

平成21年度

力学分野
共同研究成果報告

21 特 1

共同研究報告 特定研究

医療用インプラントと生体組織の力学的相互作用に関する研究

所内責任者 東藤 貢

標記特定研究は、一昨年度（平成 19 年度）から公募を開始したものであり、応用力学研究所としては初めての「生体医用工学」に関連した特定研究のテーマである。本年度は下記の 15 のテーマについて共同研究・研究集会を実施し、以下に示すような成果をあげている。今年度が最終年度となるが、平成 19 年度から 3 年間に渡って実施してきた本特定研究と様々な学会での研究成果の発表を通して、応用力学研究所が我が国における医用工学の研究拠点の一つであることを十分示すことができたことを確信している。

21 特 1-1:生体吸収性材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度及び加水分解の影響の解明

研究代表者：小林訓史（首都大学東京理工学研究科）

従来用いられてきている骨折固定材は、その多くが金属製であり、周囲組織の炎症や骨の弱화를防ぐために、治癒後速やかに体内から取り除く必要がある。そこで、患者の負担を低減するために、再手術を必要としない生体吸収性を有するポリ乳酸(PLA)を用いた骨折固定材が、現在臨床応用され、研究が行われている。

本研究では、PLA に熱処理や鍛造などを施し、機械的特性を調査し、PLA の更なる高強度化、高次構造の機械的特性に与える影響の解明を目的とする調査により鍛造法の有用性を証明し、PLA で実用的な機械的特性を持ったスクリューの製作を目標としている。

21 特 1-2:人工関節とバイオメカニクス・バイオマテリアル

研究代表者：佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

本研究集会は、高齢化社会を迎えた我が国において医学的に特に重要なテーマの一つである「関節疾患」に対して、重度の患者に対する治療方法として用いられる「人工関節置換術」を研究課題としている。これまで、この分野で活躍されている医学系と工学系の両方から第一線の研究者をお招きし、現在では、学会等でも広く認知される研究集会へと発展している。本年度は、医学と工学の両分野から最先端の研究者による 14 件の講演があった。参加者は講演者を含め大学、病院、企業より約 40 名ほどの参加者があり、各講演とも活発な議論を展開して頂いた。

21 特 1-3:顎骨と歯科インプラントの力学的相互作用に関する研究

研究代表者：松下恭之（九州大学歯学研究院）

超高齢社会が到来した我が国において、歯や顎骨の衰えによる咬合機能の低下は非常に深刻な問題である。近年、歯が完全なあるいは部分的な欠損がある場合には、インプラント治療が施されるようになってきている。下顎骨に比べると上顎骨に対するインプラント治療はさまざまな問題を抱えており、特に上顎洞の存在や脆弱な骨構造がインプラント埋入をより困難にさせている。一般に、臨床現場において、埋入するインプラントの最適な本数については臨床医の経験に基づいて決定される。したがって、生体力学と計算力学の手法に基づいてインプラント治療をサポートするような方法が確立されれば、インプラント治療の理論づけが可能となるであろう。

そこで本研究では、上顎無歯顎患者の CT データをもとに 3 次元モデルを構築し、その患者についてインプラント本数と挿入位置を考慮し力学的評価を行うことを目的とした。具体的には、インプラント本数と荷重条件を変えて力学的安全性の評価を行った。

21 特 1-4:機械的負荷培養下の細胞による細胞外マトリックス組織形成に関する研究

研究代表者：澤江義則（九州大学工学研究院）

関節軟骨は関節面において骨表面を覆い、その荷重支持能や潤滑性等により可動関節の運動機能を支えている。その力学的機能は、軟骨細胞周囲に存在する細胞外基質 (ECM) に強く依存している。再生軟骨組織の構築に際しては、組織中のコラーゲン線維網が、重要な役割を担っている。特にコラーゲン合成にはビタミン C (VC) が必要となる。現在までに代表的な VC であるアスコルビン酸 (AsA) の培地への添加濃度を増加させることにより、培養組織の弾性率が有意に上昇したが、高濃度において細胞毒性が発生した。そこで本研究では、細胞毒性の無い安定化 VC について、再生軟骨組織の機械的特性に与える影響を調べると共に、AsA と結果を比較した。本研究では、安定化 VC にリン酸化アスコルビン酸 (A2P) を用いた。

21 特 1-5:医療機器および医療材料等の計算力学および細胞培養システムを用いた有効性・安全性評価

研究代表者：石川 格（国立医薬品食品衛生研究所）

口腔外科では、癌により下顎骨の一部を切除した場合など、骨の欠損によって下顎骨の連結が保てなくなった際に、金属製のプレートを用いて骨の固定が行われている。この手術の際、湾曲した下顎骨に形状を合わせるため、プレートは医師の手により曲げられてから使用されている。一方、この手術に伴う後期合併症としてプレートの破損が生じることが報告されている。この破損では、手術の際の曲げ変形によって骨固定プレートが損傷を受けていることも要因の一つである可能性がある。そこで、本研究は、この変形操作による骨固定プレートへの影響を調べることを目的に、弾塑性有限要素解析によって骨固定プレートの塑性状態の解析を行った。解析に用いた骨固定プレートの形状モデルは、設計図や CAD データを開発元から得ることが困難であるため、実際の製品の形状を光学式 3 次元デジタイザで測定することで構築した。

21 特 1-6:医療用インプラントの接触解析に関する研究

研究代表者：長嶋利夫（上智大学理工学部）

医療分野においては、人工膝関節、髄内釘、歯科インプラントなどに代表される機械部品が人体内部に埋設され用いられるようになってきている。これらの部品の信頼性を確保するためには、部品内に発生する応力、ひずみ、変形分布を精度良く評価することが必要となる。これらの機械部品は生体骨の中に埋め込まれるため、部品と生体骨との接触を考慮する必要がある。構造解析において接触問題は境界非線形問題として分類され、たとえ材料が線形であったとしても接触面および接触圧を決定するためには一般に多くの繰り返し計算が必要となり、解を求めることが困難とされてきた。一方、最近の計算機の高精度化、数値シミュレーション技術の進歩により、大規模有限要素モデルを用いた接触解析が可能になりつつある。そこで本研究では、インプラントと生体骨との接触を考慮した有限要素解析モデルを作成し、汎用有限要素プログラムを用いた応力解析を実施し、解析手法や解析条件が結果に与える影響などを検討しながら、妥当な解析モデルの構築方法を確立することを目的とする。本研究の結果は、バイオメカニクスの観点から、医療における有効な知見を得ることに資することができる。

21 特 1-7:力学刺激に対する細胞の応答機構の解明:生細胞内における歪みの時空間変化の測定

研究代表者：水谷武臣（北海道大学先端生命科学研究院）

細胞内部の局所的な部分に生じる変化の協調機構を解明するためには、どこがどのように協調するのかを定量的に可視化する必要がある。そこで本研究では以下のことを目的とした。①細胞内に生じる変位分布解析の方法を確立し、②生きた細胞に刺激

を加えたときに細胞内で局所的に起こる変形を時空間的に観察する。細胞レベルの変形に最も関係が深いと考えられるactin 骨格の変位分布をデジタル画像相関法の適用により解析することを試みた。

21 特 1-8:生体吸収性高分子材料の動的変形挙動の解明

研究代表者：西田政弘（名古屋工業大学工工学部）

ポリ(L-乳酸)(PLLA)の物性値は汎用樹脂に匹敵するものの、脆性的破壊挙動を示すため、最近では、延性を付与するためにPLLAにポリ(ε-カプロラクトン)(PCL)、ポリブチレンサクシネート(PBS)、ポリ(ブチレンサクシネート-co-ラクテート)(PBSL)などをブレンドした材料が検討・研究されている。しかし、PLLAポリマーブレンドの動的力学挙動については、不明な部分が多い。本研究では、PLLA/PBSLポリマーブレンドの応力-ひずみ線図を、万能試験機およびホプキンソン棒法を用いて測定し、基礎的な動的力学特性について明らかにすること、また、PLLA/PBSLポリマーブレンドの耐衝撃特性について確認することを目的とした。

21 特 1-9:カラードとカラーレス人工股関節の構造が大腿骨及び骨盤に及ぼす影響の分析

研究代表者：全 仁秀（全南大学工学部）

Cementless hip joint prosthesis after THR (total hip replacement) is often subsided into the cancellous bone of femur under compressive loading arisen from body weight and gait. This phenomenon may occur additional damage to patients after THR. To prevent this problem, a femoral stem with collar is invented and used as an alternative to the stem without collar. Because of the collar shape, it is easy to expect that the stem with the collar does not easily subside into the femur. However, the actual biomechanical effect of the small collar on THR is hard to estimate from the intuition based on the empirical background.

21 特 1-10:バイオトライボロジ シンポジウム

研究代表者：馬淵清資（北里大学医療衛生学部）

生体関節は、摺動面の表層が関節軟骨で被覆されており、さらに関節液で潤滑されているため、優れた低摩擦性を示し70~80年程度の長期耐久性を有することが知られている。しかし、変形性関節症や関節リウマチが進行すると軟骨がすり減り、骨同士が直接接触することで鋭い痛みを伴うようになるため、病状が悪化した場合には歩行も困難となる。このような場合には、人工関節置換術を施すことで痛みは消え、軽度の運動も可能となるが、10~15年程度の耐久性しかなく、超高齢社会が到来した我が国において人工関節の耐久性の向上が必要となってきた。人工関節の耐久限界は、摺動面で発生する摩耗粉に起因して生じる骨との緩みの発生が主因であるため、摺動面を形成する、超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)とセラミックスまたは金属、セラミックスとセラミックス、あるいは金属と金属が動的に接触する際の摩耗発生メカニズム解明や耐久性に優れる材料の開発等に関する研究が進められている。近年、注目を集めている再生医療という観点からは、軟骨をin vitroで再生し、患部に移植する研究も進められ臨床応用も始まっている。このような状況の下、本研究集会は「関節の再建と再生のためのバイオトライボロジ」をメインテーマとし、関節や骨・軟骨に関する研究分野でご活躍の研究者にお集まり頂き、最新の研究成果を発表して頂き情報交換を行うことを目的として開催された。

21 特 1-11:生体硬組織の力学と機能

研究代表者：坂本 信（新潟大学医学部）

バイオメカニクスとは、生物・医歯学の諸分野と機械工学系の諸分野を統合することによって生まれた学際的研究分野と定義できる。つまり、生体や生体材料に作用する力を考究する学問と言える。そのバイオメカニクスの大きな特徴は、研究を臨床応用することを目的の一つとする点である。力学的知識が求められる整形外科や歯科

学で、主に医師のみの発想だけで見事な手術や治療が行われているが、バイオメカニクスによる医歯学の基礎研究はもちろんのこと、基礎研究を何らかの形で臨床応用することを見据えながら研究を進展させることが、極めて重要なことだと考えている。したがって本研究集会は、バイオメカニクスを主なキーワードとし、医学と工学の両分野で活躍する研究者に、最新の研究内容について発表し議論してもらうことを目的とした。

21 特 1-12:下顎骨角部・顎関節突起部骨折と下顎第三大臼歯の状態との力学的相互作用に関する研究

研究代表者：佐々木匡理（九州大学附属病院）

下顎骨角部および顎関節突起部の骨折は顎口腔領域の外傷においては高頻度に認められる。これまで、これらの下顎骨骨折と下顎第三大臼歯の関連について様々な研究が行われており、下顎第三大臼歯の有無、埋伏方向と骨折頻度において臨床上有意な関連がみられることが報告されている。これらの問題には明らかに下顎第三大臼歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、これらの問題を解決するためには、同歯およびその周囲の骨組織の力学状態を明らかにすることが必要不可欠である。下顎骨に埋伏している下顎第三大臼歯は複雑な3次元構造と様々な埋伏方向を成しており、実験的にその応力状態を明らかにすることは現段階では不可能である。そこで本研究では、ヒト下顎骨のCT画像をもとに下顎骨の3次元モデルを構築し、それとは別に構築を行った下顎第三大臼歯モデルを組み合わせることで、詳細な3次元下顎第三大臼歯・下顎骨モデルの構築を目指す。さらに、そのモデルに対して実際の筋肉との結合を表した境界条件を導入することで、実環境下に近い力学環境を実現し、静的および動的負荷下での応力解析を行い、下顎第三大臼歯、周囲の骨組織、ならびに界面での応力状態を明らかにすることを目的とした。

21 特 1-13:人工骨による骨組織再生の生体力学的検討

研究代表者：名井 陽（大阪大学医学系研究科）

腫瘍の切除や嚢胞等により骨に生じた大規模な欠損部は、そのままでは骨組織の自然な治癒は期待できないため、自家骨、他家骨、あるいは人工骨を利用した骨組織の再生が行われる。この中では自家骨が生体の拒否反応もなく最も理想的であるが、量的に限られているとともに、正常な骨を取り出して使用するため、健全な部位を傷つけるという問題がある。一方、人工骨は大量生産が可能であるが、骨組織の再生能に劣ることが問題である。最近では、生体親和性に優れた生体活性セラミックスを多孔質化することで、骨組織再生能を付与した人工骨が開発され臨床応用も進んでいる。また、より優れた骨組織の再生を目指し、*in vitro* でスキャホールドに幹細胞を播種し分化させ骨組織を再生後生体に移植する研究も進んでいる。本研究では、多孔質ハイドロキシアパタイト系人工骨をウサギ大腿骨に埋入し、骨再生状態の経時変化を調べた結果に対し、コンピュータ・シミュレーションの技術を用いて力学的な見地から解析し、得られた結果と実験結果と比較検討することで人工骨と骨組織の複合系の力学特性変化のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

21 特 1-14:咬合時における歯科インプラント周辺骨の変形解析

研究代表者：内野正和（福岡県工業技術センター）

本研究では、皮質骨および海綿骨、すなわち骨の二層構造を模擬したSAWBONES社製の骨モデルを使用した。この骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し、擬似咬合荷重を付与した。そして、デジタル画像相関法により変位・ひずみ分布を解析した。本報告では、フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレートドインプラント試験片、および近年、治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷イ

ンプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し、両者におけるフィクチャーと骨界面周辺の変位・ひずみ分布状態を比較検討した。

21 特 1-15: 膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に与える影響に関する研究

研究代表者：村瀬晃平（近畿大学工学部）

下肢関節は、日常生活における歩行や跳躍の影響を受け、他の関節に比べ動的・衝撃的な荷重負荷を与えられている。このため内外反あるいは屈曲など、関節面の条件変化により、静的な軽荷重でも体重の数倍、動的荷重下ではさらに大きな荷重変動が起こると予想される。膝関節は関節面に半月板や前後十字靭帯、膝蓋骨が介在するなど、他の各部関節に比べて複雑な構成をしており、歩行や跳躍時などのダイナミックな荷重支持を解明するためには、材料特性の異なる骨体と靭帯組織を組み合わせるとともに、下肢全体を再現した有限要素モデルを構築し、力学シミュレーションを行なう必要がある。本研究では、静的荷重と衝撃荷重による支持機構の違いや各姿勢における骨体内部の力学環境の変化、および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した。また、材料定数などのパラメータがおよぼす影響についても検討した。

現在の医学の発展において理工学の果たす役割は重要であり、理工学無くしては医学の発展もあり得なかったといっても過言ではない。したがって、大学においても医学と理工学の連携は重要視されてきたが、医学と理工学の専門家の研究に対する意識の差等が問題となり、連携がなかなか進んでいないのが現状であった。ようやく最近になり、我が国トップレベルの大学において「生体工学」や「医用工学」を専門とする大学院が設立され、他大学もそれに追随してこの分野の研究が活発に推進されるようになってきている。そのような状況の中、本特定研究は、生体および医用工学における応用力学の役割を考えるためにスタートしたものであるが、実際、細胞、生体組織、そして人体そのものが「力学」的な環境下にあることを考えると、生体関連の研究には応用力学が活躍する場が数多く有ると言える。本特定研究を足がかりとして応用力学研究所における新しい研究領域「応用生体力学」が今後も育っていくことを期待してやまない。最後に、本研究提案を応用力学研究所の特定研究として設定し、積極的に推進していただく体制を整備して頂きましたことに対して深謝いたします。

1. 緒言

従来用いられてきている骨折固定材は、その多くが金属製であり、周囲組織の炎症や骨の弱화를防ぐために、治癒後速やかに体内から取り除く必要がある。そこで、患者の負担を低減するために、再手術を必要としない生体吸収性を有するポリ乳酸(PLA)を用いた骨折固定材が、現在臨床応用され、研究が行われている。¹⁾

過去の研究で、Shikinami らは、未焼成・未焼結 HA(u-HA)/PLLA 複合材料に鍛造を施し、u-HA を 50wt%含有した試験片において、非常に高い機械的性質を有する HA/PLLA 複合材料を開発した。Shikinami らは、それらの高強度は鍛造による複雑な分子配向の効果に起因するものであると報告している。²⁾

本研究では、PLA に熱処理や鍛造などを施し、機械的特性を調査し、PLA の更なる高強度化、高次構造の機械的特性に与える影響の解明を目的とする調査により鍛造法の有用性を証明し、PLA で実用的な機械的特性を持ったスクリューの製作を目標としている。

2. 実験方法

2-1 試験片作製

浙江海正生物材料股份有限公司 (HISUN) 製、REVODE 101 を射出成形機を用いて 100mm×10mm×4mm の形状に成形した。

2-2 鍛造によるスクリューの作製

鍛造によりスクリューを作製した。まず、試験温度 (70℃及び100℃) に熱した丸棒用金型に試験温度下に 10 分間放置した試験片をセットし、室温下で 300kN で 10 分間加圧した。それにより作製した丸棒をスクリュー用金型を使用して同様の手順で作製した。また、比較のため、先述した試験温度にて丸棒を作製した後に、スクリュー用金型による鍛造を施さず、丸棒を直接ダイス加工することにより切削により作製されたスクリューも準備し、そして結晶化度の比較のため、スクリュー作成時の試験温度暴露時間に対応した熱処理を施した試験片も準備した。他にも強度比較のため、鋳造により作成したスクリューも作成した。このスクリューには鍛造は施されていない。

2-3 引き抜き試験

作製したスクリューを(株)島津製作所製、AGS-1000A と専用の治具を使用して引き抜き試験を行った。評価部は片端 5mm で、もう片方の端部にはつかみ部での応力集中を防ぐためタブを貼り付けた。負荷速度は 0.5mm/min で行った。引き抜き強度は以下の式を用いて算出した。

$$S_p = \frac{F}{\pi dl}$$

ここで、 F は最大荷重、 d は試験片谷径、 l は評価部長さである。

2-4 せん断試験

作成したスクリューを(株)島津製作所製、AGS-1000A と専用の治具を使用してせん断強度測定を行った。負荷速度は 0.5mm/min で行った。引き抜き強度は以下の式を用いて算出した。

$$S_s = \frac{F}{2A}$$

ここで、 F は最大荷重、 A は試験片の有効断面積である。

3. 実験結果及び考察

3-1 スクリューの成形

70℃及び 100℃の両試験温度にて非常に良好なスクリューが成形された。しかし、治具の構造上バリが生成してしまい、スクリューとして扱うためにはダイス加工が必要である。

3-2 スクリューの引き抜き強度

Fig. 1 に各種スクリューの引き抜き強度を示す。70℃と 100℃では概して 70℃のものの方が引き抜き強度が高いと言う結果が得られた。加工スクリューと鍛造スクリューに関しては、70℃では鍛造スクリューが、100℃では加工スクリューの方が高いと言う結果となった。しかし、100℃のものでも最大強度値は鍛造スクリューの方が高い結果を示しており、両試験温度での鍛造の有用性が示された。

また、一部試験片がスクリーが引き抜かれる前に引張破断した。これは引き抜き強度のばらつきが大きく、スクリーの引張強度以上の引き抜き強度を持つスクリーも存在した、または、応力がねじ山に集中せずに破断したなどの原因が考えられる。

3-3 スクリューのせん断強度

Fig. 2 に各種スクリーのせん断強度を示す。試験温度間の比較では、引き抜き強度と同じく、概して70℃の方が強度が高いと言う結果が得られた。加工スクリーと鍛造スクリーに関しては両試験温度共に鍛造スクリーの方が高いと言う結果となった。また、鋳造により作成したスクリーは鍛造スクリー、加工スクリーよりもはるかに低い強度を示し、鍛造の有用性が示された。

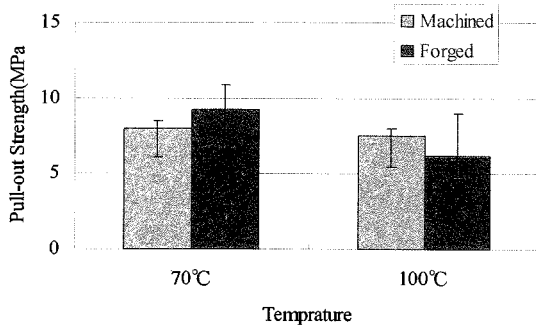


Fig. 1 Pull-out strength of screws.

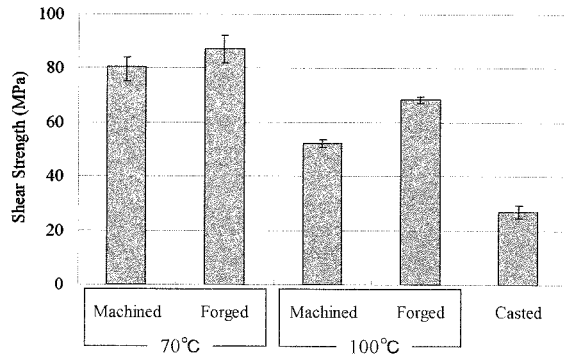


Fig. 2 Shear strength of screws.

4. 結言

スクリー引き抜き試験では、70℃の方が100℃よりも強度が高く、70℃では鍛造スクリー、100℃では加工スクリーの強度が高くなった。スクリー引き抜き試験では、一部の試験片が引張破断した。そのため一部の試験片では引き抜き強度が非常に高くなっているものと思われる。スクリーせん断試験では70℃の方が、100℃よりも強度が高く、両試験温度で鍛造スクリーの方が強度が高くなった。また、鋳造により作成したスクリーは非常に強度が低い。

5. 参考文献

- 1) 坂本和紀 リン酸三カルシウム/ポリ L 乳酸複合材料の力学的特性及び *in vitro* 分解特性評価 成形加工'06 P65-66
- 2) Y.Shikinami, M.Okuno "Bioresorbable devices made of forged composites of hydroxyapatite (HA) particles and poly-L-lactide (PLLA): Part I. Basic characteristics" *Biomaterials* 20(1999)859-877
- 3) T. Pohjonen, P. Helevirta et al. "Strength retention of self-reinforced poly-L-lactide screws. A comparison of comparison moulded and machine cut screws." *Journal of material science: materials in medicine* 8(1997) 311-320

6. 関連する学会発表・論文

- 1) 内藤克仁, 小林訓史, "射出成形したポリ乳酸ポリブチレンサクシネートブレンドの力学的特性評価", 成形加工 09, 2009 年 6 月, pp.55-56
- 2) 山本達郎, 小林訓史, "鍛造を施したポリ乳酸の力学的特性", 成形加工 09, 2009 年 6 月, pp.59-60
- 3) 小林訓史, 山地周作, "リン酸三カルシウム/ポリ乳酸複合材料の力学的挙動の損傷力学解析", 日本実験力学会講演論文集 2009 年度年次大会, 2009 年 8 月, pp. 149-150
- 4) 小林訓史, 山地周作, "リン酸三カルシウム/ポリ乳酸複合材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度の影響", 第 14 回破壊力学シンポジウム講演論文集, 2009 年 10 月, pp. 98-99
- 5) 小林訓史, "ポリ乳酸スクリーの成形とその特性評価", 成形加工シンポジウム 09, 2009 年 11 月, pp.201-202
- 6) 小林訓史, 東藤貢, "ポリ乳酸系ポリマーブレンドの力学的特性評価", 第 242 回 材料試験技術シンポジウム, 2010 年 1 月

人工関節のバイオメカニクスとバイオマテリアル

研究代表者

佐賀大学医学部 佛淵孝夫

1. 序 言

約 40 年前、英国の Charnley が低摩耗の人工股関節を開発して以来、人工関節医療は発展を遂げてきた。疾病や外傷などにより股関節や膝関節の機能が失われ、歩行や移動に困難を来した人々に対して、我が国では年間 10 万件以上の人工股関節置換術が行われている。人工関節の意義は破壊されその機能を失った関節を人工物で再建させることにある。求められる機能とは無痛性、支持性、可動性と耐久性であろう。さらに安全で正確な手術が求められることは言うまでもない。

佐賀大学医学部付属病院の人工関節置換術の実施実績は 2005 年には 750 件を数え、大学病院としては突出しており、この分野では我が国の中心的センターとなっている。この実績に支えられ、佐賀大学医学部・理工学部と九州大学応用力学研究所を中心に、より高性能で和式の生活に対応した人工関節と周辺機器とそれらの評価法を開発すべく、2003 年より「プロジェクト：人工関節」を立ち上げ、すでに 2 件の実用化と 4 件の特許申請を行ってきた。2005 年 1 月より佐賀大学医学部内に JMM（日本メディカルマテリアル）の支援により、全国初の寄附講座「人工関節学」が設置され、人工関節研究のさらなる推進と研究成果の実用化、企業化が期待されている。

現在、我々が取り組んでいる最初のテーマは「和式生活に対応した人工関節の開発」である。このテーマを実現するためには医学、工学、看護学、社会福祉学、心理学、教育学などの学際的な叡智を結集し、さらには産学官一体となった取り組みが不可欠であると考えている。

今回、昨年に引き続き本研究集会を開催できたことは感銘深いことである。研究集会開催にご協力いただいたプロジェクト関係の諸先生方、ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます。

2. プログラム

開催日時：9月26日（土）10：00～17：00

会 場：九州大学西新プラザ（福岡市早良区西新 2-16-23, TEL 092-831-8104）

10:00-10:10 **開会の辞** 佛淵孝夫(佐賀大学医学部整形外科)

セッション1 バイオメカニクス1 司会:廣川俊二(九大工)

10:10-10:25 「THA 患者モビリティデータベースの構築」

堀川悦夫（佐賀大医）、森園亮、福嶋利浩、床島絵美、田中里紀、園畑素樹
馬渡正明、佛淵孝夫

10:25-10:40 「股関節周りの筋力を考慮した人工股関節の脱臼に関する研究」

林 喜章(佐賀大理工)、木口量夫

10:40-10:55 「Bisurface人工膝関節における深屈曲時の応力変動に及ぼす内旋の影響」

東藤 貢(九大応研)

10:55-11:05 休憩(10分)

セッション2 バイオマテリアル1 司会:野田岩男(JMM)

11:05-11:20 「Suitable Evaluation Method for in Vitro Antibacterial Activity of Biomaterials: 2nd Report」

Y. Ando (Med. School, Saga Univ.), H. Miyamoto, I. Noda(JMM)

T. Shimazaki (Med. School, Kyushu Univ.), Y. Yonekura, M. Miyazaki

M. Mawatari, T. Hotokebuchi

11:20-11:35 「チタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の抗菌性評価」
井上侑子(佐賀大理工), 矢田光徳, 鳥飼紀雄, 渡孝則, 野田岩男(JMM)
佛淵孝夫(佐賀大医)

11:35-11:40 休憩(5分)

特別講演1 司会:東藤 貢(九大応力研)

11:40-12:20 「人体動作の計測とシミュレーション」
村瀬 晃平(近畿大工学部)

12:20-13:20 昼食休憩(60分)

特別講演2(日本複合材料学会西部支部特別講演) 司会:東藤 貢(九大応力研)

13:20-14:00 「最近の整形外科用材料と機能向上」
松下富春(中部大生命健康科学部)

14:00-14:40 「医療機器評価関連の現状」
堤 定美(日本大歯学部, 京都大名誉教授)

14:40-14:50 休憩(10分)

セッション3 バイオマテリアル2 司会:馬渡正明(佐賀大医)

14:50-15:05 「Next Generation Antibacterial HA Coating -Antibacterial Activity of Ag Ions in Serum-」

I. Noda (JMM), Y. Ando (Med. School, Saga Univ., JMM), H. Miyamoto, T. Shimazaki

Y. Yonekura, M. Miyazaki, M. Mawatari, T. Hotokebuchi

15:05-15:20 「In Vivo Ability of Novel Thermal Sprayed Antibacterial Coating to Sterize Methicilin-Resistant *Staphylococcus Aureus*」

T. Shimazaki(Med. School, Saga Univ.), M. Mawatari, H. Miyamoto

Y. Ando, I. Noda(JMM), Y. Yonekura(Med. School, Saga Univ.), S. Kawano

M. Miyazaki, M. Sonohata, T. Hotokebuchi

15:20-15:35 「Antibacterial Activity of Heated and Hydrtrated Dolomite Powder」

Y. Yonekura(Med. School, Saga Univ.), H. Miyamoto, Y. Ando

T. Shimazaki, I. Noda(JMM), S. Kawano(Med. School, Saga Univ.)

M. Sonohata, M. Mawatari, T. Hotokebuchi

15:35-15:45 休憩(10分)

セッション4 バイオメカニクス2 司会:木口量夫(佐賀大理工)

15:45-16:15 「高・深屈曲対応型人工膝関節の運動形態と接触応力の評価」

廣川俊二(九大工), 長谷川満彰, 河野谷仁

16:15-16:30 「人工膝関節置換状態の有限要素法解析」

萩原世也(佐賀大理工)

16:30-16:45 「完全屈曲型人工膝関節の膝受動動作シミュレータを用いた力学評価」

高野恭寿(佐賀理工, JMM), 上野 勝(JMM), 木口量夫(佐賀大理工)

井手衆哉(佐賀大医), 馬渡 正明, 佛淵 孝夫

16:45-16:55 閉会の辞 東藤 貢(九州大学応用力学研究所)

3. 講演の概要

(1) 「THA 患者モビリティデータベースの構築」 堀川悦夫

人工股関節形成術 (THA) の対象となった患者の術前・術後の歩行の変化を適切に評価することは, THA の評価のみならず, 患者の QOL (生活の質) の評価においても有効な指標となる。本講演者は, これまで佐賀大学整形外科における THA 患者の歩行計測を行ってきたが, 昨年からは歩行動作などを含む総合的移動能力を解析するため, THA 患者モビリティデータベ

ースの構築を行っている。本講演では本データベースについて紹介がなされた。

(2) 「股関節周りの筋力を考慮した人工股関節の脱臼に関する研究」 林 喜章

人工股関節置換術 (Total hip arthroplasty, THA) は、変形性股関節症や関節リウマチなどによる痛みや運動機能障害を改善するための最も効果的な治療法の一つであるが、インプラントの摩耗や破損、緩み、脱臼などの解決すべき問題が残されている。これらの問題と日常生活動作との力学的関係を明らかにすることは、THA患者の術前計画や術後の生活指導、人工股関節の設計・開発を行う上で重要である。このため、人工股関節の性能を評価する股関節シミュレータの開発が行われている。しかし、これまでシミュレータでは股関節周りの筋力の影響は考慮されていなかったため、股関節周りの筋力を考慮したうえで人工股関節の脱臼について考察する。

(3) 「Bisurface人工膝関節における深屈曲時の応力変動に及ぼす内旋の影響」 東藤 貢

JMM の KU モデルに代表される Bisurface タイプ人工膝関節は、ball-socket 構造を有することを最大の特徴とし、高屈曲位では ball-socket 構造が主要な摺動部となることで屈曲性を向上させている。最近では、Bisurface 構造を発展させ、特に深屈曲状態での動作性を向上させた CFK モデルが提案され、実用化を目指して研究が進んでいる。また、CFK では ball-socket 構造に加えて、KU にはない post-cam 構造を有することを特徴としている。

本研究では、代表的 Bisurface モデルである KU と CFK について、非線形ばねモデルを用いた簡易解析モデルを用いて、スクワット状態を模擬した深屈曲動作状態での応力解析を行い、特に屈曲に内旋をとともなう場合の応力状態の変化を調べることを目的とした。

(4) 「Suitable Evaluation Method for in Vitro Antibacterial Activity of Biomaterials: 2nd Report」

Y. Ando

Bacterial infections related to orthopaedic implants is one of the serious types of complications. Recently, there has been a greater interest in antibacterial biomaterials. However, antibacterial evaluations of each material are inconsistent, so intercomparison of the antibacterial performance is difficult. At the ISTA 2008, we proposed to apply the Japanese Standard test (JIS Z 2801) with some modifications using Fetal Bovine Serum (FBS) as a culture medium and cultured at 37°C, as an evaluation method for in vitro antibacterial activity of biomaterials. In this study, we evaluated the antibacterial activities of bone cements containing antibacterial components by this modified JIS Z2801 test.

(5) 「チタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の抗菌性評価」 井上侑子

人工関節等を用いた整形外科手術における感染は大きな問題である。演者らは、水熱反応と銀イオン交換処理により金属チタンの表面に種々のナノ構造 (不定形やナノチューブなど) を有する銀-チタン酸銀ナノ複合体薄膜を形成する技術を開発し、本研究集会にて薄膜の高い抗菌性能を報告してきた。今回は、銀を含まないチタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の高い抗菌性について報告がなされた。

(6) 「人体動作の計測とシミュレーション」 村瀬 晃平

現在開発中の屋外型モーションキャプチャシステムを用いて、機械化工場内でおこなわれる重量物の持ち上げ作業とバーチャルヒューマンモデルを組み合わせ、生体内部で発生する力学環境についてシミュレーションを行った結果について報告がなされた。あわせて生体シミュレーション時における軟組織への特性入力支援として、触覚デバイスと有限要素解析を組み合わせたシステムについても紹介がなされた。

(7) 「最近の整形外科用材料と機能向上」 松下富春

高齢者人口の増加と共に、運動機能低下を補うために各種人工材料を用いた体内埋め込み

機器（人工関節や人工骨など）が重要な役割を果たしており、体内埋め込み機器の需要が世界的に拡大し、それらの高機能化が図られてきた。先進的な長期耐用型体内埋め込み機器においては、① 生体に優しい金属材料に、② 体内埋め込み機器の適応部位に応じた機能を保有させ、③安全性の保証、高性能化、高機能化等を達成することが重要な技術課題である。一度埋植された機器が周囲の組織に悪影響を与えることなく、長期耐用の機能と効果を備えていれば、再手術の必要もなく、低侵襲の治療が実現し、患者にとっては苦痛が少なく、しかも少ない治療費で安心した生活を取り戻すことが可能になる。

(8) 「医療機器評価関連の現状」 堤 定美

インプラントなど医療機器材料に関わる規格、基準を定めている国際的な標準化団体の中で最も代表的なものは、国際標準化機構 (ISO) と米国材料試験協会 (ASTM) であろう。筆者は ISO/TC150 (外科用インプラント専門委員会) の国内検討委員会の委員長として当委員会の活動を報告することが責務であり、同時に標準化への理解と支援を要請する目的で本稿を纏める。

(9) 「Next Generation Antibacterial HA Coating – Antibacterial Activity of Ag Ions in Serum –」

I. Noda

Bacterial infection related to orthopaedic implants is a significant complication today. One of the ways to reduce the incidence of implant-associated infections is assumed to give antibacterial activity to surface of implant itself. We developed a novel thermal spraying technology for silver containing Hydroxyapatite (Ag-HA) coating with antibacterial activity and evaluated physical and chemical properties, release property of Ag ions and so on.¹⁾ In this study, we evaluated the concentration of Ag ions that show antibacterial activity in fetal bovine serum (FBS) and antibacterial property of the Ag-HA coating under the biological conditions.

(10) 「In Vivo Ability of Novel Thermal Sprayed Antibacterial Coating to Sterilize Methicillin-Resistant *Staphylococcus Aureus*」 T. Shimazaki

One of the serious postoperative complications associated with joint replacement is bacterial infection. To resolve such a problem, in the previous works, we developed a novel thermal spraying technology combined silver (Ag) having antibacterial action with hydroxyapatite (HA) displaying good biocompatibility and osteoconductivity. The properties in vitro of this coating (Ag-HA) have been already reported. In this study, we evaluated the antibacterial activity, comparing with HA coating, to clarify the in vivo ability of Ag-HA coating to sterilize methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) using a subcutaneous rat model.

(11) 「Antibacterial Activity of Heated and Hydrated Dolomite Powder」 Y. Yonekura

Bacterial infection related to orthopaedic implants is one of the serious types of complications. If the infection is occurred, it is difficult to treat. Finally, it may be necessary to remove the implants and insert the bone cement containing some antibiotics. There has been a greater interest in antibacterial biomaterials to prevent implant-related infections. We focused on the antibacterial activity of heated and hydrated dolomite (HHD), which is inorganic matter. Dolomite is a kind of the limestone, which is double salt, consists of calcium carbonate (CaCO_3) and magnesium carbonate (MgCO_3). Dolomite itself does not have antibacterial activity, although, the main components of dolomite, CaCO_3 and MgCO_3 , are converted to calcium oxide and magnesium oxide by heating and hydrating, it shows antibacterial activity. If the biomaterial containing HHD shows antibacterial activity, it can be one of the tools to prevent and treat implant-related infections. The purpose of the present study is to determine the effective concentration to show the antibacterial activity of HHD, and to evaluate the antibacterial activity of the bone cement containing HHD.

(12) 「高・深屈曲対応型人工膝関節の運動形態と接触応力の評価」 廣川俊二

ひざまづきからの立ち上がり動作解析、光弾性法による脛骨インサートの応力解析、膝関節シミュレータによる人工関節の動態計測に関する報告がなされた。

(13)「人工膝関節置換状態の有限要素法解析」 萩原世也

人工関節に置換する人工関節置換術(TKA)が変形性膝関節症等の治療法として一般化してきている。日本人の生活様式においては、正座等を行うために人工膝関節も大きな屈曲角が必要となる。そのため、従来使用されている人工膝関節よりさらに膝の屈曲角を大きく取ることが出来る完全屈曲型人工膝関節の開発が進められている。現在提案されている完全屈曲型人工膝関節の頸骨コンポーネントは従来のもとの形状が大きく異なるため、実際の使用の状況での人工膝関節や脛骨の強度等を慎重に解析する必要が生じる。本研究では、このような理由により人工膝関節の頸骨側に重点を置き解析を行った。それにより、完全屈曲型人工膝関節の屈曲時における強度、生体骨に及ぼす影響、それによって発生する問題点などを検討する事を目的とした。

(14)「完全屈曲型人工膝関節の膝受動動作シミュレータを用いた力学評価」 高野恭寿

本研究の目的は、正座などの深屈曲動作において、大腿四頭筋力が人工膝関節の関節反力および回旋角度に及ぼす影響を調べることである。その評価のために、臨床医が行う他動運動を模擬する180°まで屈曲可能な膝関節シミュレータを開発した¹⁾。サンプルは特別に設計された180°まで屈曲可能な完全屈曲型人工膝関節を用い、これを骨モデルに取り付け、3種類の異なる大腿四頭筋力を負荷した。今回、屈曲にともなう大腿骨脛骨(FT)関節反力の変化について報告がなされた。

4. あとがき

本研究集会は、2005年に応用力学研究所共同研究集会としては初めての医学と工学の両分野にまたがる学際的研究集会としてスタートし、当初は、主に力学的解析を中心した研究集会であった。一昨年度よりタイトルに「バイオマテリアル」を加え、抗菌材料を中心とした人工関節に関連するバイオマテリアルに関する研究発表をお願いした。高齢化社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「人工関節」を課題とし、医学と工学の両分野から最先端の研究者による14件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、病院、企業より約40名ほどの参加者があり、各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会在、この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない。

顎骨と歯科インプラントの力学的相互作用に関する研究

九州大学大学院歯学研究院 松下 恭之

1. 緒言

超高齢社会が到来した我が国において、歯や顎骨の衰えによる咬合機能の低下は非常に深刻な問題である。内閣が発表した高齢白書において、2015年には日本人の4人に1人は65歳以上の人になるとされており今後ますます多くなることが予想される。咬合機能の低下は脳機能の低下とも関係があるとの研究報告もあり、歯科治療による咬合機能の回復は重要な社会的課題のひとつである。近年、歯が完全なあるいは部分的な欠損がある場合には、インプラント治療が施されるようになってきている。下顎骨に比べると上顎骨に対するインプラント治療はさまざまな問題を抱えており、特に上顎洞の存在や脆弱な骨構造がインプラント埋入をより困難にさせている。一般に、臨床現場において、埋入するインプラントの最適な本数については臨床医の経験に基づいて決定される。したがって、生体力学と計算力学の手法に基づいてインプラント治療をサポートするような方法が確立されれば、インプラント治療の理論づけが可能となるであろう。

そこで本研究では、上顎無歯顎患者のCTデータをもとに3次元モデルを構築し、その患者についてインプラント本数と挿入位置を考慮し力学的評価を行うことを目的とした。具体的には、インプラント本数と荷重条件を変えて力学的安全性の評価を行った。

2. モデル構築と解析方法

生体構造解析ソフトウェア Mechanical FINDER を用いて上顎無歯顎モデルを作成した。まず、ヒト上顎無歯顎CTデータ(被験者84歳男性)から上顎部分を抽出し、2次的に抽出したものを3次元化することで上顎無歯顎モデルを作成した(Fig.1参照)。また骨の不均質性を再現させるために、CT値から骨密度を推定し、Keyakの理論を用いて骨密度をヤング率に換算し、各要素に割り当てた。次に、作成した上顎無歯顎モデルに挿入するインプラントモデルを作成した。インプラントの直径は3.75mmとし、長さは顎骨の構造に応じて変化させた。本研究で作成した顎骨モデルに対してインプラント本数が力学状態に及ぼす影響を調べるために、インプラント3本・4本・6本のモデルを作成した。

境界条件として、上顎の上部を完全固定(x-y-z固定)し、補綴下部全体に表面に対して垂直方向に分布荷重200Nを作用させた(Case 1)(Fig.2参照)。また、補綴装置の前方部表面のみに水平方向に50Nの分布荷重を作用させた条件についても解析を行った(Case 2)。



Fig.1 Maxilla model.

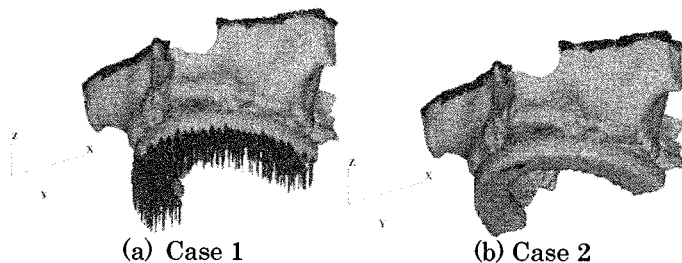


Fig.2 Boundary Conditions.

3. 結果と考察

垂直方向の分布荷重下において、右側臼歯部インプラント周辺でのひずみエネルギー分布状態を Fig.3 に示す。インプラント近傍において局所的に高いエネルギー集中が発生していることがわかる。このようなエネルギー集中箇所において、骨の損傷や吸収が発生し、さらにはインプラントのゆるみに繋がるのが予測される。図(a), (b), (c)を比較すると、インプラント本数が増加することで、ひずみエネルギー密度集中領域が減少し緩和されることが理解できる。

2種類の荷重条件での、右側臼歯部インプラント周辺骨での最大ひずみエネルギー密度値を比較したものを Fig.4 に示す。補綴装置表面全面の垂直方向に分布荷重を加えた場合、インプラント4本を基準とすると、インプラント6本では40%減少し、インプラント3本では30%増加する。一方、補綴装置表面前方の水平方向に荷重を加えた場合、インプラント6本では70%の低下を示し、インプラント3本では330%の増加を示している。このように、荷重のタイプによってひずみエネルギー密度の増減が異なり、このことは単純な咬合や歯ぎしりなど実際の口腔で考えられる荷重条件すべてについて解析することの必要性を示唆している。と、インプラント6本では40%減少し、インプラント3本では30%増加する。一方、補綴装置表面前方の水平方向に荷重を加えた場合、インプラント6本では70%の低下を示し、インプラント3本では330%の増加を示している。このように、荷重のタイプによってひずみエネルギー密度の増減が異なり、このことは単

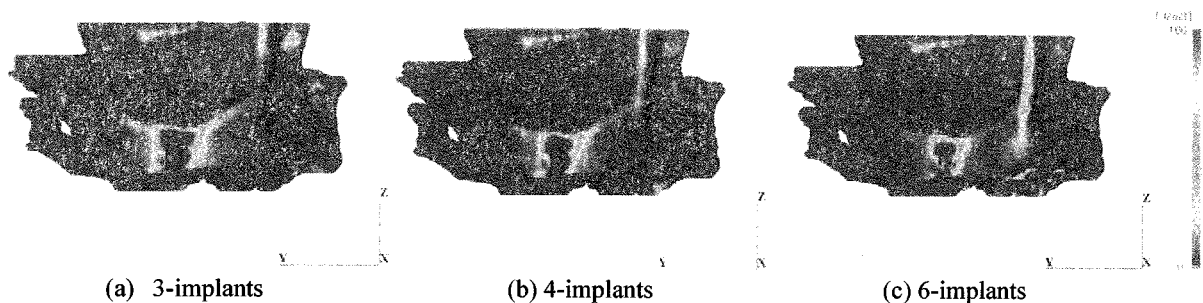


Fig.3 Distribution of strain energy density around right molar implant.

純な咬合や歯ぎしりなど実際の口腔で考えられる荷重条件すべてについて解析することの必要性を示唆している。

4. 結言

本研究では、上顎無歯顎患者の CT データから骨の不均質性を再現した 3 次元モデルを作成し、そのモデルにインプラント・補綴装置モデルを装着し、上顎インプラントモデルを構築した。さらに、このモデルに対するインプラント治療の力学的安全性を検討するため、埋入インプラント本数を 3, 4, 6 本と変化させて数値解析を試みた。その結果、インプラント本数を増加することで効果的にひずみエネルギー密度が減少し安全性が向上することがわかった。また、補綴装置前方表面に水平方向に荷重が作用する場合は、補綴装置全面に垂直方向に荷重が作用する場合に比べて、インプラント本数の影響がより顕著に出ることがわかった。本モデルの場合、特に右側臼歯部インプラント周辺において、インプラント本数が 3 本になると急激にひずみエネルギー密度値が増大した。このことは、異なる荷重条件での解析の必要性を示唆している。

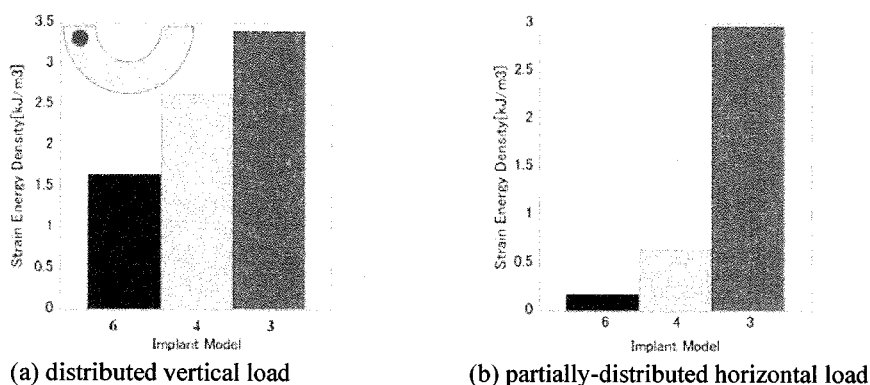


Fig.4 Maximum strain energy density in the vicinity of right molar implant.

成果報告

- ① 荒平高章, 東藤貢, 松下恭之, 古谷野潔, 無歯上顎骨のインプラント治療に対する生体力学的検討, 第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 岡山理科大学, 2010 年 1 月 9-10 日
- ② T Arahira, M Todo, Y Matsushita, K Koyano, Assessment of Mechanical Stability and Safety for Fully Edentulous Maxilla with Dental Implants, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009 (APCMM2009), PACIFICO Yokohama, Yokohama, JAPAN, November 13-16, 2009
- ③ 荒平高章, 東藤貢, 松下恭之, 古谷野潔, インプラント治療を施した無歯上顎の力学的安全性評価, 第 2 回計算力学講演会, 金沢, 2009 年 10 月 10-12 日

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
松下恭之	歯学研究院	准教授	研究代表者, 臨床的考察
古谷野潔	歯学研究院	教授	臨床的考察
荒平高章	総合理工学府	修士 2 年	数値シミュレーション
東藤貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人, 生体力学的考察

1. 緒言

関節軟骨は関節面において骨表面を覆い、その荷重支持能や潤滑性等により可動関節の運動機能を支えている。その力学的機能は、軟骨細胞周囲に存在する細胞外基質 (ECM) に強く依存している。再生軟骨組織の構築に際しては、組織中のコラーゲン線維網が、重要な役割を担っている。特にコラーゲン合成にはビタミン C (VC) が必要となる。現在までに代表的な VC であるアスコルビン酸 (AsA) の培地への添加濃度を増加させることにより、培養組織の弾性率が有意に上昇したが¹⁾、高濃度において細胞毒性が発生した。そこで本研究では、細胞毒性の無い安定化 VC²⁾ について、再生軟骨組織の機械的特性に与える影響を調べると共に、AsA と結果を比較した。本研究では、安定化 VC にリン酸化アスコルビン酸 (A2P) を用いた。

2. 実験方法

牛中指骨の軟骨組織から軟骨細胞を酵素処理によって単離し、アガロース 1 w/v%ゲル (Sigma Type VII Agarose) に播種し、再生軟骨組織モデルとして用いた。初期細胞密度は 10^7 cell/mL とした。試験片形状は、直径 4 mm、高さ 2.5 mm の円柱形とし、37 °C、5% CO₂ にて培養した。培地には DMEM を用い、20 v/v% FBS と 2 mM L-Glutamine, 100 units/mL Penicillin, 50 mg/mL Streptomycin, 20 mM HEPES を添加した。VC 濃度は最終濃度にて、0.64, 2.2, 3.2, 6.4 pmol/10⁹cell とした。また、AsA 無添加群を対象群とした。

培養後の再生軟骨の力学的評価を行った。圧縮速度 0.5mm/min にて、10%の圧縮ひずみを円柱形試験片の軸方向に与えた。得られた応力-ひずみ曲線において、5-10%ひずみにて最小二乗法により直線近似し、その傾きを接線弾性率(Tangent modulus)とした。

VC 濃度が再生軟骨組織モデルに与える影響を観察した。培養後の円柱試験片をメスで、中央付近を厚さ約 1mm にスライスし、BSA 処理した後、抗体染色法を用いて、I型コラーゲンと II型コラーゲン、コンドロイチン硫酸の三重染色をおこなった。2次抗体を標識した後、共焦点レーザー顕微鏡 (CLSM) にて蛍光観察した。

3. 結果

VC 濃度に対する再生軟骨組織モデルの弾性率の変化を図 1 に示す。培養後 15 日および 22 日後において、高 AsA 濃度のグループでは、対象群と比べて有意な増加が確認されたが、安定化 VC の A2P を投与した場合は、一部に有意な差が確認出来たものの、十分な差は現れなかった。また、ECM の形態を蛍光観察したところ、A2P 投与した場合は II 型コラーゲンの十分な広がり確認出来なかった (データ未掲載)。A2P は AsA にリン酸が付与されており、細胞膜上の脱リン酸化酵素により、A2P から AsA に変化することで効果を発揮する²⁾。そのため、酵素の反応が十分に行われていなかったため、コラーゲン合成が促進されず、弾性率上昇があまり見られなかったものと思われる。

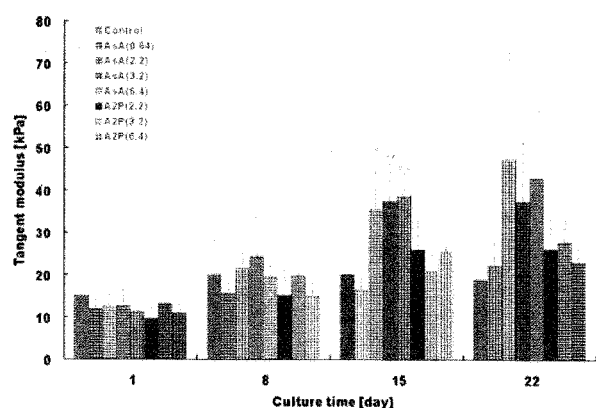


Fig 1: Comparison of tangent modulus. Error bar means sample standard deviation (n=7-23): * = ES>1, P<0.01, β >0.8; ** = ES>2, P<0.01, β >0.8 vs. control group in each culture days (ES: effect size; β : power of test).

21 特 1-5

医療機器および医療材料等の計算力学および細胞培養システムを用いた有効性・安全性評価

国立医薬品食品衛生研究所 療品部 石川 格

● 目的

口腔外科では、癌により下顎骨の一部を切除した場合など、骨の欠損によって下顎骨の連結が保てなくなった際に、金属製のプレートを用いて骨の固定が行われている。この手術の際、湾曲した下顎骨に形状を合わせるため、プレートは医師の手により曲げられてから使用されている。一方、この手術に伴う後期合併症としてプレートの破損が生じることが報告されている。この破損では、手術の際の曲げ変形によって骨固定プレートが損傷を受けていることも要因の一つである可能性がある。そこで、本研究は、この変形操作による骨固定プレートへの影響を調べることを目的に、弾塑性有限要素解析によって骨固定プレートの塑性状態の解析を行った。解析に用いた骨固定プレートの形状モデルは、設計図や CAD データを開発元から得ることが困難であるため、実際の製品の形状を光学式 3 次元デジタイザで測定することで構築した。

● 方法

▶ 形状モデルの作成

Stryker 社の Ti-6Al-4V 製の下顎骨用骨固定プレート (56-28087) をサンプルとして形状測定を行った。測定によって得られた骨固定材表面形状のポリゴンデータからソリッドモデルの作成を行った。形状測定には、光学式 3 次元デジタイザ VIVID 9i (コニカミノルタセンシング (株)) を用いた。VIVID 9i と連動する回転テーブルを併用して骨固定プレート各部の座標データを取得した。得られた複数の表面形状ポリゴンデータを RapidForm XOR2 (INUS Technology, Inc.) を用いて位置合わせ・連結し、骨固定プレート全体の表面形状ポリゴンデータを作成した。さらに、RapidForm 上で、部分ごとに表面に沿った自由曲面を生成し、それらの曲面を貼り合わせることで全体の形状曲面を構築した。

▶ 有限要素解析

形状測定データを元に作成したソリッドモデルを、Parasolid 形式のデータを経由して FEM プリポストプロセッサ Femap Ver. 10.0 (Siemens AG 社) にインポートし、材料定数の設定、四面体二次要素への分割、境界条件の設定を行った。材料の弾塑性挙動は、等方硬化の 2 直線モデル、すなわち弾性変形時と塑性変形時の応力ひずみ線図がそれぞれ直線で表されるものとした。材料定数は、Ti-6Al-4V の材料特性を元に、弾性係数 113 GPa、ポアソン比 0.31、降伏応力 900 MPa、接線係数 11.3 GPa とした。作成した有限要素モデルの解析を ANSYS 11.0 を用いて行った。

骨固定プレートに加えらるる変形は手術ごとに異なるため、モデルケースとして図 1 に示す境界条件で骨固定プレートを曲げる弾塑性解析を行った。図 1 に示すように、まず Step 1 として、断面 a の上下端での並進移動を拘束した状態で、断面 1 の上面節点に z 軸方向への強制変位 10 mm を設定し解析を行った。その解が得られた後、強制変位を設定した節点における反力値を 0 に置き換えた境界条件で解析をリスタートさせることで荷重を除荷した。同様にして、Step 2 および Step 3 の解析を順に行った。解析には、節点数 230295、要素数 148799 のメッシュを用いた。

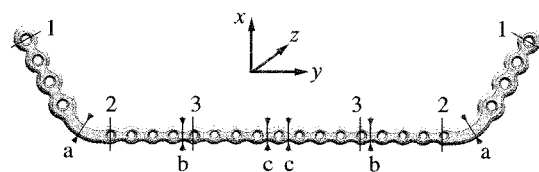
● 結果と考察

弾塑性解析の結果、図 2 に示すように、下顎形状に近い変形が得られた。図 3 は、y 軸方向の各部における最大相当塑性ひずみをプロットしたものである。横軸の数字とアルファベットは境界条件を与え

た箇所を示している。拘束部および拘束部近傍の孔周辺に大きな相当塑性ひずみが生じる結果となった。塑性変形に伴って微視的な損傷が内部に蓄積されることにより疲労強度が低下するはずであるので、このような変形操作によりプレートの耐久性も低下するものと考えられる。また、図3では、強制変位を加えた箇所にも応力集中によって塑性ひずみが生じている。実際に手術時に使用される工具においても、このような集中的な荷重が作用する場合には表面に生じた塑性箇所が疲労破壊の基点となることが考えられる。図4は、図3と同様に、y軸方向の各位置における残留応力を相当応力で示している。比較的広い範囲に600 MPaを超える残留応力が見られた。このような残留応力が存在した場合、負荷応力の方向によってはTi-6Al-4Vの疲労限度が大きく低下することから、残留応力によるプレートの耐久性低下が予想される。

● 成果報告（学会発表）

石川 格，東藤 貢，松岡 厚子，土屋 利江. 下顎骨固定用プレートに加えられる変形の弾塑性有限要素解析. 第22回計算力学講演会予稿集，2009.



Step-1
a: fixed, 1: z direction displacement 10 mm
Step-2
b: fixed, 2: z direction displacement 15 mm
Step-3
c: fixed, 3: z direction displacement 15 mm

図1：境界条件

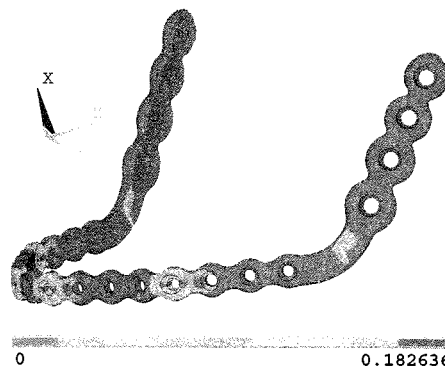


図2：変形図（コンターは相当塑性ひずみ分布）

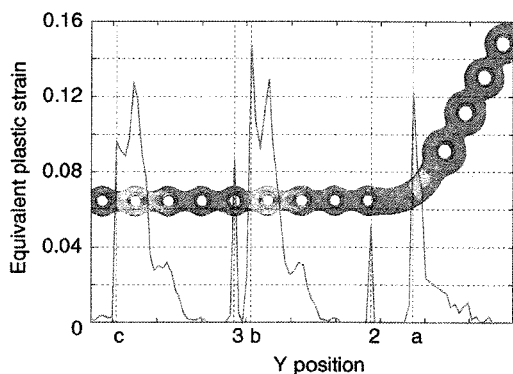


図3：相当塑性ひずみ分布

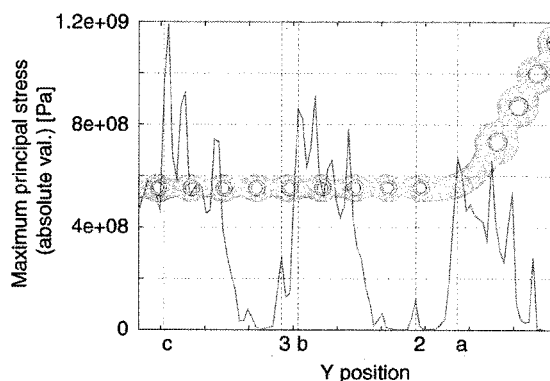


図4：最大主応力絶対値の分布

● 研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
石川 格	国立医薬品食品衛生研究所・療品部	研究員	解析の実施
土屋 利江	大阪大学・未来医療センター	特任研究員	評価，考察
東藤 貢	九州大学・応用力学研究所	准教授	評価，考察

目的

医療分野においては、人工膝関節、髄内釘、歯科インプラントなどに代表される機械部品が人体内部に埋設され用いられるようになってきている。これらの部品の信頼性を確保するためには、部品内に発生する応力、ひずみ、変形分布を精度良く評価することが必要となる。これらの機械部品は生体骨の中に埋め込まれるため、部品と生体骨との接触を考慮する必要がある。構造解析において接触問題は境界非線形問題として分類され、たとえ材料が線形であったとしても接触面および接触圧を決定するためには一般に多くの繰り返し計算が必要となり、解を求めることが困難とされてきた。一方、最近の計算機の高精度化、数値シミュレーション技術の進歩により、大規模有限要素モデルを用いた接触解析が可能になりつつある。そこで本研究では、インプラントと生体骨との接触を考慮した有限要素解析モデルを作成し、汎用有限要素プログラムを用いた応力解析を実施し、解析手法や解析条件が結果に与える影響などを検討しながら、妥当な解析モデルの構築方法を確立することを目的とする。本研究の結果は、バイオメカニクスの観点から、医療における有効な知見を得ることに資することができる。

研究方法

- (1) 三次元 CAD を利用したインプラントモデルの作成
- (2) 有限要素メッシュ分割
- (3) 適切な境界条件（荷重条件、拘束条件）の設定
- (4) 静的応力解析（物性値、接触条件の検討）
- (5) 解析結果の整理
- (6) 力学的検討

解析概要

歯科用インプラントを用いたオーバーデンチャーに着目し、インプラントへの荷重伝達を検討するために作成した上顎模型にインプラントを埋入したモデル(図 1) の荷重試験 (図 2) を応力解析の対象とする。モデル作成においては、上顎骨模型、歯肉模型、義歯の形状を、非接触三次元デジタル(コニカミノルタ社, VIVID910)で測定し、三次元形状編集ソフトウェア (INUS 社, RapidForm2004) で CAD データに変換した。その他の構成部品は 3DCAD システム (PTC 社, Pro/Engineer) を用いて作成した。

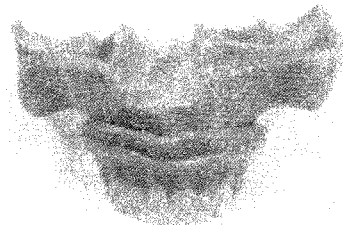


図 1 上顎オーバーデンチャー模型

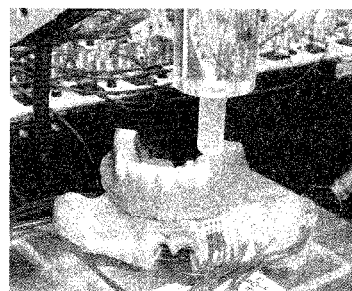


図 2 上顎オーバーデンチャー模型の荷重試験

上顎オーバーデンチャー模型の CAD モデルを図 3 に示す。この CAD モデルから図 4 に示すような有限要素モデルを生成し、汎用 FEM コード ABAQUS を用いて応力解析を実施した。

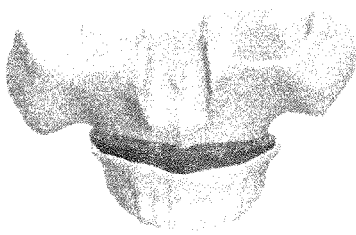


図3 CADモデル

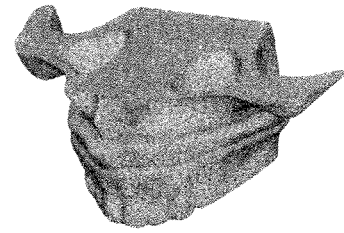


図4 FEMモデル

図5に示す位置に10Nの圧縮荷重を付与した場合の、上顎骨模型の骨部表面(発泡ウレタン)およびインプラントのひずみを評価し、FEAによる解析結果との比較を実施した。荷重点2(Load_case2)に荷重を付与した場合の骨部表面のひずみを比較した一例を図6に示す。

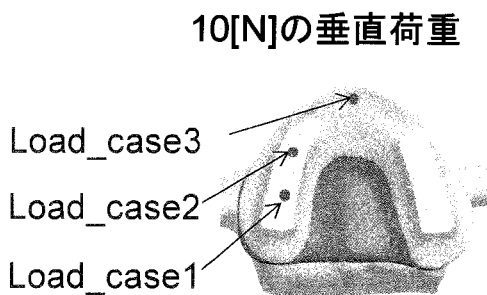


図5 荷重負荷点と荷重ケース

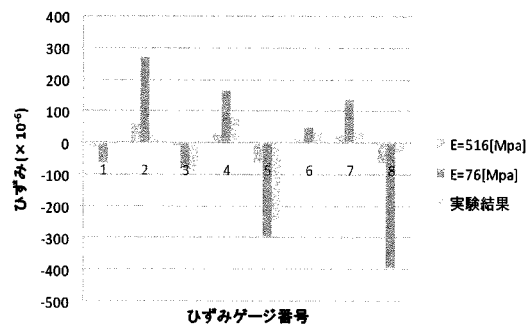


図6 試験結果と解析結果の一例

考察

荷重試験で実測されたインプラントおよび上顎部を模擬した骨部のひずみと、事前解析結果から得られるひずみの一致は良くなかった。そこで、上顎骨模型の骨部(発泡ウレタン)の物性値の実測や部品間の接触条件の修正を実施し解析モデルの修正を行ったところ実測結果に近づいた結果が得られるようになった。このような模型モデルの解析結果として得られる各インプラントに加わる荷重を用いることにより、インプラントに加わる詳細な応力が評価可能となる。

成果報告

- 2009年12月28日(月)午後:九州大学歯学部において研究会を開催
- 本稿で示した研究成果については2010年度に関連学会において講演発表予定。

研究組織

氏名	所属	職名 (院生は学年)	役割・担当分野
長嶋 利夫	上智大学・理工学部	教授	代表者、解析手法検討
平野 喜一	上智大学・理工学研究科	博士前期課程 2年	モデル作成 解析、実験の実施
田中 美穂	上智大学・理工学部	機械工学科4年	解析、実験の実施
松下 恭之	歯学研究院	准教授	実験の実施、歯科学的考察
東藤 貢	応力研	准教授	評価、考察

以上

21 特 1-7

力学刺激に対する細胞の応答機構の解明：生細胞内における歪みの時空間変化の測定

北海道大学大学院先端生命科学研究院 水谷 武臣

・ 目的

本事業の目的は、力学刺激に対して細胞がどのように応答するのかを細胞内タンパク質の変位から明らかにすることである。今回は、細胞内のある領域とまた別の領域とが時間的に協調して、力学刺激に応答することを発見したので、それについて報告する。

器官等の巨視的な形態形成において局所的に起こる変化の時間的及び空間的な協調は重要である。例えば胚発生時に、ある領域の細胞のアポトーシスがいつせいに起こることで手や足の指は形作られる。このような形態形成の協調機構は非常に複雑なものと考えられる。一細胞レベルの応答にも協調的な現象は存在する。例えば、細胞は運動する際には先端部が伸張し後部が収縮するといった具合に、細胞内の異なる変化を時空間的に連動させることで、特定方向への運動を可能にしている。このように細胞内の局所的な変化を時空間的に協調させることで、細胞は一細胞レベルの現象をつくる。しかし、このような比較的単純な一細胞レベルにおいても、内部の局所の変化がどのように協調するのか。さらにその協調機構についても不明な点が多い。

細胞内部の局所的な部分に生じる変化の協調機構を解明するためには、どこがどのように協調するのかを定量的に可視化する必要がある。そこで本研究では以下のことを目的とした。①細胞内に生じる変位分布解析の方法を確立し、②生きた細胞に刺激を加えたときに細胞内で局所的に起こる変形を時空間的に観察する。細胞レベルの変形に最も関係が深いと考えられる **actin** 骨格の変位分布をデジタル画像相関法の適用により解析することを試みた。

・ 実験手法

ヒト線維肉腫細胞(HT1080)に蛍光タンパク融合 **actin** 発現プラスミドを導入したものを実験試料とした。この細胞に刺激を加え、**actin** ネットワークの経時観察を行なった。本研究ではマニピュレーターを用いて細胞内のある一点を引っ張り細胞を局所的に変形させることと、ミオシンのリン酸化阻害剤である **Y27632** を投与し細胞内の張力を低下させることを刺激とした。**actin** の変位解析にはデジタル画像相関法を用いた。デジタル画像相関法とは、画像処理による全視野変形解析方法である。特徴として非常に簡便かつ高い空間分解能を持つ点があげられる(分解能は **0.05** 画素)。変形前の画像中における任意の位置を中心とする微小領域を基準として、変形後の画像から輝度値分布の最も相関が取れる微小領域を数値解析で探索する。このようにして、変形前後において、変位分布マップを作製した。

・ 実験結果と考察

デジタル画像相関法を用いた解析で、最も重要なことは細胞の変化の前後の画像において相関がとれるということである。2枚の画像を重ね合わせることで変位量・方向を求めるというデジタル画像相関法の性質上、変化が大きすぎると同一点の探索が不可能となり、解析不能になる。この場合の変化とは蛍光強度の褪色、細胞形状・骨格の変化などである。従って、生きた細胞の蛍光画像取得に関しては、変化が大きくなりすぎないように、蛍光の褪色や刺激の大きさ、継時観察の間隔を最適化した。本研究では蛍光強度の調節、細胞に加える変形の大きさ、観察間隔に十分留意し、**actin** 骨格の変位分布解析を試みた。結果、生きた細胞内で局所的に起こっている **actin** 骨格の変位分布の時空間的なイメージングに成功した。イメージングの結果、細胞に刺激を加えると、細胞内に局所的な構造の変化が観察された。

マイクロマニピュレーターで細胞内部の一点を局所的に引っ張った。マニピュレーターで局所刺激を加える前の actin 骨格は細胞内でランダムに変位していた。しかし、局所刺激後は、数十 μm 程度の「ドメイン」が生じ、ドメインごとに同一方向へ動いていた。このような細胞内での局所的な応答は Y27632 を投与し、細胞内の張力を低下させたときにも観察された。投与前の actin 変位はランダムであったが、薬剤投与後は時間が経つにつれ、細胞はドメインごとに同一方向へ変位した。薬剤投与による刺激では一瞬のうちに細胞内のミオシン分子の活性が抑制されると考えられるが、この結果では細胞内で大きく変位している領域とあまり変位していない領域が観察された。このことは、細胞内は場所ごとに薬剤に対する感受性が異なることを示唆している。

本研究により以下のことが示された。1) デジタル画像相関法が生きた細胞内構造物の変位分布の解析に有用である。2) 細胞は外部から刺激が加わると、細胞内部に局所的な応答を生じる。細胞はこのような局所領域に生じる変化を協調的に制御することで、一細胞レベルの現象を作り出していると考えられる。

～研究成果報告～

成果論文：

Takeomi Mizutani, et al., 『Cytoskeletal Displacement of Actin Filament and Actin Binding Proteins under Local Deformation Processed by Digital Image Correlation Method in a Myoblast』, Journal of Biomechanical Science and Engineering, (2009 Vol.4 No. 3, pp415-422).

成果発表：

・水谷 武臣、『周期外力に依存した細胞の生理的応答』

第四回細胞運動研究会 (2009 9 月 広島 広島大学) <口頭発表>

・Takeomi Mizutani, et al., 『Propagation of mechanical strain under external stretch in mammalian cells』

4th ISEM (2009 11 月 新潟 朱鷺メッセ) <口頭発表>

・水谷 武臣、『印加する外力の周波数に依存した細胞の生理的応答』

第 4 7 回日本生物物理学会年会 (2009 10 月 徳島 アクティ徳島) <ポスター発表>

～研究組織～

水谷 武臣	北大・先端生命	助教	サブテーマ代表者	mizutani@sci.hokudai.ac.jp
東藤 貢	九大・応用力学	准教授	所内世話人	todo@riam.kyushu-u.ac.jp
森田 康之	九大・応用力学	助教	研究分担者・解析担当	morita@riam.kyushu-u.ac.jp
土肥 謙一	北大・理学	修士 2 年	研究分担者	dkenichi@mail.sci.hokudai.ac.jp

生体吸収性材料の動的変形挙動の解明

名古屋工業大学 機械工学科 西田 政弘

1. 目的

ポリ(L- 乳酸) (PLLA) の物性値は汎用樹脂に匹敵するものの、脆性的破壊挙動を示すため、最近では、延性を付与するために PLLA にポリ(ε-カプロラクトン) (PCL), ポリブチレンサクシネート (PBS), ポリ(ブチレンサクシネート-co-ラクテート)(PBSL)などをブレンドした材料が検討・研究されている。しかし、PLLA ポリマーブレンドの動的力学挙動については、不明な部分が多い。本研究では、PLLA/PBSL ポリマーブレンドの応力-ひずみ線図を、万能試験機およびホプキンソン棒法を用いて測定し、基礎的な動的力学特性について明らかにすること、また、PLLA/PBSL ポリマーブレンドの耐衝撃特性について確認することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験片

原料は PLLA ペレット (島津製作所 Lacty#5000) と PBSL ペレット (GS Pla® AZ-Type, lactate unit ca. 3%) である。今回の実験では、PLLA と PBSL の重量比を 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30 とした。ブレンド材は、ペレットを混練機に入れ、190℃, 50 rpm, 20 min の条件で溶融混合した後、その混合物をホットプレスにより、190℃, 30 MPa, 30 min で加熱圧縮成形し、厚さ 5mm の板材を作製した。板材より機械加工で、静的圧縮試験用には φ6×9 mm および φ5×5 mm の円柱状試験片を、衝撃試験用には φ10×3.3 mm の円盤状試験片を作製した。Fig. 1 に、試験前の試験片の凍結破断面を示す。数 μm の球状に分散しているのが PBSL であり、2 相構造を示していることがわかる。Fig. 2 に示差走査熱量測定の結果を、Table 1 に PLLA と PBSL の融点を示す。測定結果には PLLA と PBSL の融解ピークがほぼ独立に存在し、PLLA と PBSL が相分離していることが凍結破断面および示差走査熱量測定で確認できた。

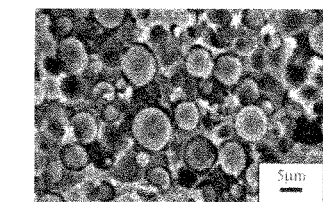
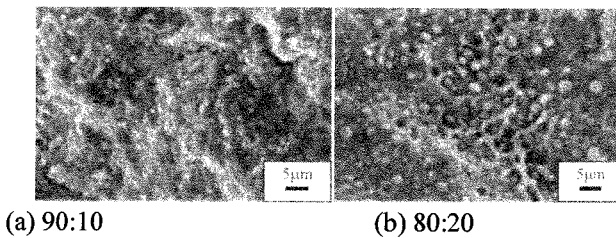


Fig. 1 Cryo-fractured surface

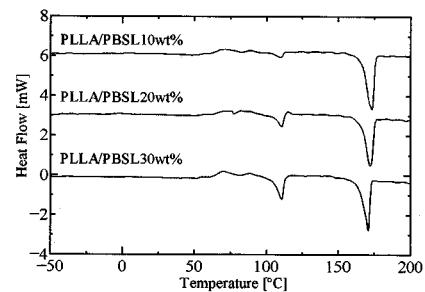


Fig. 2 DSC thermograms of PLLA/PBSL blends

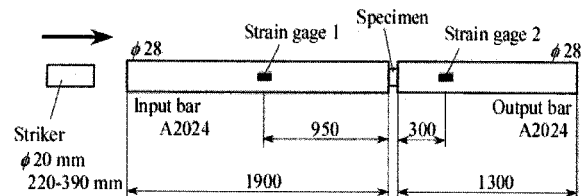


Fig. 3 Experimental set up for split Hopkinson bar method

Table 1 Thermal properties of PLLA and PBSL

	T_m [°C]	T_g [°C]
PLLA	176.2	64.0
PBSL	113.6	-33.0

Table 2 Material constants of aluminum alloy (A2024)

Density ρ [kg/m ³]	Velocity of bar wave c_3 [m/s]	Young's modulus E [GPa]
2.77×10^3	5150	73.6

2.2 衝撃圧縮試験

静的圧縮試験は、万能試験機を用いて行ったのに対し、動的応力-ひずみ線図は、Fig. 3 に示すホプキンソン棒を用い測定した。入出力棒には直径 28 mm, 長さ 1.9 m, 1.3 m のアルミニウム合金 (A2024) 棒を用いた。物性値を Table 2 に示す。入力棒には試験片側の端から 950 mm, 出力棒には試験片側の端面から 300 mm の位置に、半導体ひずみゲージを貼付した。試験片内の平均応力, 平均ひずみは,

$$\sigma_{av}(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{av}(t) = \frac{2c_3}{L} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

と表される。ここで、 E は入出力棒の縦弾性係数, c_3 は入出力棒の棒波速度, L は試験片の厚さ, A は入出力棒の断面積, A_s は試験片の断面積, ε_I は入射ひずみ, ε_T は出力棒に透過する透過ひずみである。

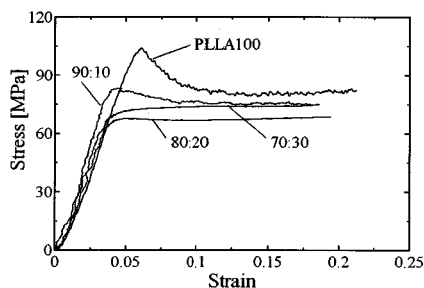


Fig. 4 Effect of PBSL content on stress-strain curves at strain rate of $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

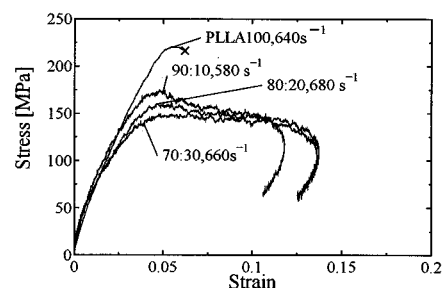


Fig. 5 Effect of PBSL content on stress-strain curves at strain rate of $580\text{-}680 \text{ s}^{-1}$

3. 試験結果

静的圧縮試験の結果を Fig. 4 に、動的応力-ひずみ線図を Fig. 5 に示す。ブレンド比 90:10 の静的圧縮試験においては、ひずみの増加とともに応力が増加した後、応力の増加の割合は次第に低下していき、極大値を示した。その後、応力は一定の値を示した。しかし、静的圧縮試験の 80:20, 70:30 では、極大値を示さなかった。塑性域では、80:20 はほぼ一定の応力を示し、70:30 では応力が常に少しずつ増加している。ホプキンソン棒法の結果では、どのブレンド比においても極大値を示したが、極大値を示した後の応力の減少は、90:10 の場合が最も大きかった。Fig. 5 のひずみ 0.07~0.10 では、流動応力はブレンド比に関係なくほぼ同じで、約 150 MPa であった。PLLA のみでは、ひずみ 0.06 程度で衝撃圧縮中に脆性破壊したのに対し、PLLA/PBSL ブレンド材は延性変形をしたことがわかる。

4. 成果報告： 国際会議で口頭発表を 1 件, 国内会議で口頭発表を 2 件：

- ① 山口真誉, 西田政弘, 東藤貢, 高山哲生, ホプキンソン棒法を用いた PLLA/PCL ポリマーブレンドの衝撃圧縮特性の評価, 成形加工シンポジウム'09, (2009 年 11 月 6-7 日:長崎大学), pp. 187-188.
- ② 久野誠也, 山口真誉, 西田政弘, 東藤貢, 高山哲生, ホプキンソン棒法を用いた PLLA/PBSL ポリマーブレンドの衝撃圧縮特性の評価, 日本複合材料合同会議 (2010 年 3 月 11 日:京都) 発表予定.
- ③ M. Nishida, M. Yamaguchi, M. Todo, T. Takayama, H.-Å. Häggblad and P. Jonsén, Evaluation of dynamic compressive properties of PLA polymer blends using split Hopkinson pressure bar, Proc of 9th Int conf on mechanical & physical behaviour of materials under dynamic loading (Brussels, 2009 Sep 10), pp. 909-915.

5. 研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
西田 政弘	名古屋工業大学	准教授	代表者, 実験手法の検討
山口 真誉	名古屋工業大学	大学院 1 年生	材料の製作, 実験の実施
久野 誠也	名古屋工業大学	学部 4 年生	実験の実施
東藤 貢	応用力学研究所	准教授	評価, 考察

BIOMECHANICAL EFFECT OF THE COLLAR OF THE FEMORAL STEM ON TOTAL HIP ARTHROPLASTY

¹Insu Jeon, ¹Ji-Yong Bae, ¹Jin-Hong Park, ²Taek-Rim Yoon, ³Mitsugu Todo, ⁴Masaaki Mawatari, ⁴Takao Hotokebuchi

¹School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University; email: i_jeon@chonnam.ac.kr,

²The Center for Joint Disease, Hwasun Hospital, Chonnam National University,

³Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,

⁴Department of Orthopaedic Surgery, Saga University

INTRODUCTION

Cementless hip joint prosthesis after THR (total hip replacement) is often subsided into the cancellous bone of femur under compressive loading arisen from body weight and gait. This phenomenon may occur additional damage to patients after THR.

To prevent this problem, a femoral stem with collar is invented and used as an alternative to the stem without collar (see Fig. 1) [1-3]. Because of the collar shape, it is easy to expect that the stem with the collar does not easily subside into the femur. However, the actual biomechanical effect of the small collar on THR is hard to estimate from the intuition based on the empirical background.

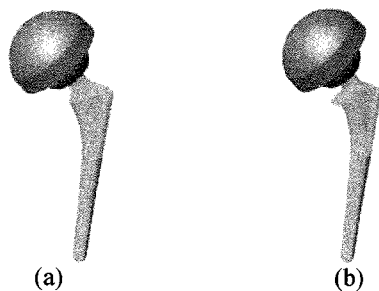


Fig. 1 Geometric models of the hip joint prosthesis (a) without and (b) with collar

METHODS

To understand the biomechanical collar effect, two regular types of cementless implant without and with collar were selected and modelled using finite element meshes. For the FE (Finite Element) modelling of biological materials such as, sacrum, coxal bone and femur, X-ray CT images of a fifty four years old woman patient were used.

After practicing the virtual THR, which was done by Boolean operation between geometric models of femoral stems and cancellous bones, the FE models of both prosthesis as well as biological materials were constructed and finite element analysis for the whole structure around the implanted hip joint under compression was carried out (See Fig. 2).

RESULTS AND DISCUSSION

From the comparison of the numerically obtained deformation behaviors between two analysis cases using collarless or collared stem, and stress fields of the femurs at which both prostheses are implanted, it is found that the collarless stem shows a possibility to subside into cancellous bone and the collar obviously prevents the subsidence of the stem but causes *the moment load* to the femur, which seriously increases the loosening at the interface between the

stem and the cancellous bone. Furthermore, it may produce *the varus deformation of the prosthesis*, which may lead *the femur fracture*.

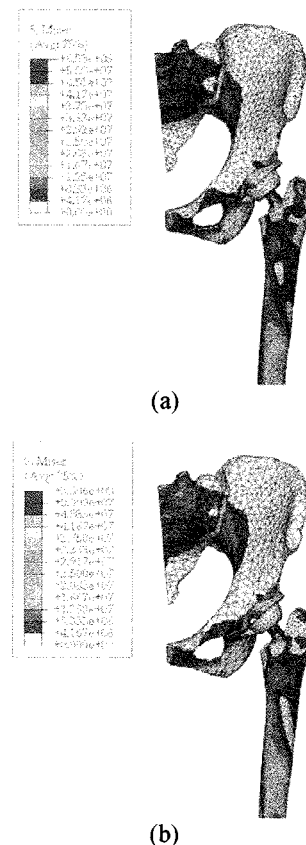


Fig.2 Mises stress field around the implanted hip joint prosthesis using (a) collarless and (b) collared stem

The geometric tilting of the stem, which can be regarded as a significant cause of stem micromotion and loosening, is investigated. Figures 3(a) and 3(c) present the lateral and anterior tilting of the stem, respectively. Two important facts are discerned from these figures. One is that the tilting of a collared stem is smaller than that of a collarless stem. This contrasts with the results of Fagan and Lee[1], who report the greater tilting of a collared stem due to the role of the collar as a pivot. The reason for the smaller tilting of a collared stem in this present study is that the perfect contact between the collar and the calcar constraints the stem from tilting. To investigate in detail the phenomenon of lateral tilting for collared stems, another model of a collared stem with imperfect calcar contact is constructed and used for computation (see Fig. 3(b)); the corresponding results are plotted in Fig. 3(a). From the results, it is found that a collared stem with imperfect calcar contact causes the most

severe tilting of the stem compared with other stems. In this case, the collar contacts gradually with the resected surface under the applied loading; thereby the stem tilting is increased. Here, the collar can be seen as playing the role of a pivot.

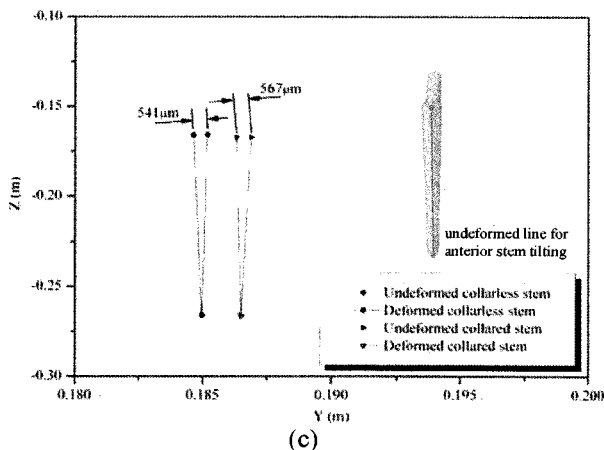
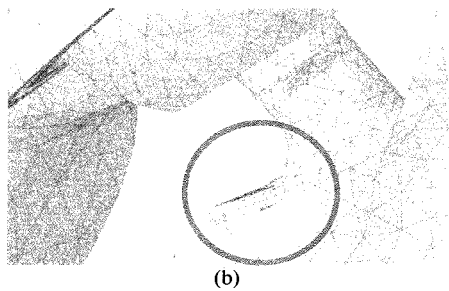
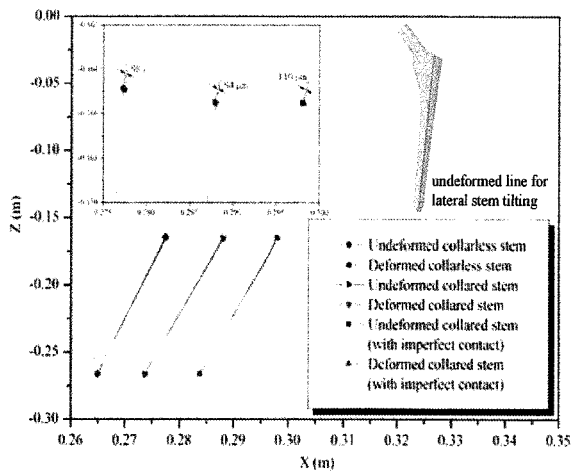


Fig. 2 (a) The lateral stem tilting, (b) another model of a collared stem with imperfect calcar contact, and (c) anterior stem tilting.

Another observation is that the anterior tilting of the stem is also considerably large in comparison with the lateral tilting of the stem. This is due to the position of the applied load, which gives rise to a moment that causes femoral deformation in the anterior direction. Since the collared stem in this research does not have projections in the anterior and posterior directions, the tilting of the collared stem is almost similar to that of a collarless stem. The subsidence of the stem into the femur and the proximal lateral gap between the

stem and the cancellous bone are observed. Figures 3(a) and 3(b) present the subsidence of collarless and collared stems, respectively. Considerable subsidence is observed for the case of a collarless stem while a collared stem causes only a little subsidence.

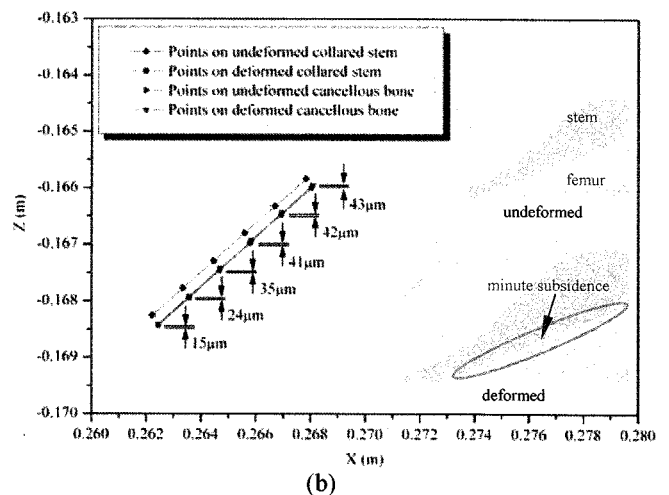
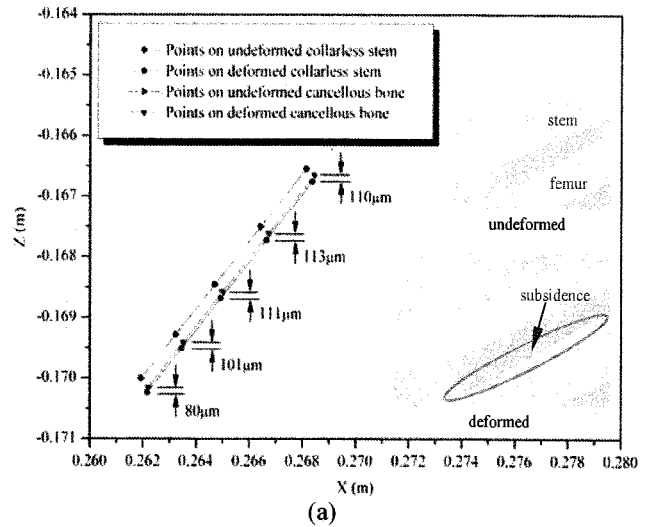


Fig. 3 The subsidence of (a) collarless and (b) collared stems.

CONCLUSIONS

- From the results of this research, it is known that:
- Implanted stem without collar has a possibility to subside into the cancellous bone.
 - The collar should prevent the subsidence of the implanted stem into the cancellous bone.
 - The collar produces loosening between the stem and the cancellous bone.
 - The collar may produce the varus deformation of the prosthesis.

REFERENCES

- Fagan M.J., Lee A.J.C., *J. Biomed. Eng.* **8**: 295-304, 1986
- Whiteside L.A., et al., *Clin. Orthop. Rel. Res.* **231**: 120-153, 1988.
- Meding J.B., et al., *J. Arthroplast.* **12**: 273-280, 1997

バイオトライボロジ シンポジウム

北里大学医療衛生学部 馬淵 清資

1. 序 言

生体関節は、摺動面の表層が関節軟骨で被覆されており、さらに関節液で潤滑されているため、優れた低摩擦性を示し70～80年程度の長期耐久性を有することが知られている。しかし、変形性関節症や関節リウマチが進行すると軟骨がすり減り、骨同士が直接接触することで鋭い痛みを伴うようになるため、病状が悪化した場合には歩行も困難となる。このような場合には、人工関節置換術を施すことで痛みは消え、軽度の運動も可能となるが、10～15年程度の耐久性しかなく、超高齢社会が到来した我が国において人工関節の耐久性の向上が必要となってきた。人工関節の耐久限界は、摺動面で発生する摩耗粉に起因して生じる骨との緩みの発生が主因であるため、摺動面を形成する、超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)とセラミックスまたは金属、セラミックスとセラミックス、あるいは金属と金属が動的に接触する際の摩耗発生メカニズムの解明や耐久性に優れた材料の開発等に関する研究が進められている。近年、注目を集めている再生医療という観点からは、軟骨を *in vitro* で再生し、患部に移植する研究も進められ臨床応用も始まっている。

このような状況の下、本研究集会は「関節の再建と再生のためのバイオトライボロジ」をメインテーマとし、関節や骨・軟骨に関する研究分野でご活躍の研究者にお集まり頂き、最新の研究成果を発表して頂き情報交換を行うことを目的として開催された。

2. プログラム

- 開会の辞 東藤 貢
9:30 - 9:35
- 追悼 笹田 直 先生 馬淵 清資
9:35 - 9:40
- 生体物性 1 司会 酒井 利奈
9:40 - 10:16
- 1. マイクロダメージに起因した骨リモデリング開始における骨細胞の役割
藏田耕作(九大院), 堀川直斗(九大工), 高松洋(九大院)
- 2. 骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延動物モデルの確立
成瀬康治, 占部 憲, 内田健太郎(北里大医), 馬淵清資(北里大医衛), 糸満盛憲(北里大医)
- 3. ラット膝蓋骨脱臼モデルにおける脛骨形態の時系列変化とカルシトニン投与による作用
成瀬康治, 占部 憲, 内田健太郎, 小林千恵, 糸満盛憲(北里大医)
- 生体物性 2 司会 占部 憲
10:20 - 10:56
- 4. 卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対するアレンドロネート投与が与える影響についての検討
嶋田千安紀(北里大医衛), 占部 憲, 成瀬康治, 須藤光敏, 内田健太郎(北里大医)
馬淵清資(北里大医衛), 糸満盛憲(北里大医)
- 5. 高週齢ラットを用いた卵巣摘出骨粗鬆症モデルおよび歩行運動抑制骨粗鬆症モデルに対するアレンドロネート投与効果の検討
須藤光敏, 占部 憲, 成瀬康治, 内田健太郎, 須藤香織, 糸満盛憲(北里大医)
- 6. 副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合蛋白を用いた骨粗鬆症治療に関する基礎的研究
内田健太郎, 占部 憲, 成瀬康治, 松下 治(北里大医), Sakon J (University of Arkansas)
Gensure RC (Ochsner Clinic Foundation), 糸満盛憲(北里大医)
- 組 織 司会 馬淵 清資
11:00 - 11:36
- 7. 冷凍保存、加温がラット膝蓋腱の力学的特性、組織学的構造に与える影響の検討
朴 晃正, 占部 憲, 成瀬康治, 内野正隆, 小沼賢治, 糸満盛憲(北里大医)
- 8. 同種骨・靭帯組織中に含まれる生存細胞除去法の検討
須藤香織, 占部 憲, 成瀬康治, 朴 晃正, 内田健太郎, 須藤光敏, 上野正喜
山本豪明, 糸満盛憲(北里大医)

9. 加圧による組織内容酸素変化の測定

山崎祐司(埼玉大工), 森田真史(埼玉大院理工), 三木将仁(埼玉大総研機構), 諸星康雄(北里大医)

○ 軟骨1

11:40 - 12:16

司会 澤江 義則

10. 円筒圧子を用いた関節軟骨の固液二相性潤滑の解析

坂井伸朗, 細田奈津子, 萩原裕一郎, 上野誠, 澤江義則, 村上輝夫(九大)

11. MPC グラフト表面を用いた軟骨水和潤滑の評価

田村暢也, 山本浩司, 山田桂輔, 寺村 剛(京大院), 岩崎泰彦(関大), 石原一彦(東大院)
富田直秀(京大院)

12. 関節軟骨超音波評価法における探査子の傾きに伴う評価値誤差の低減

山田桂輔, 小田浩平(京大工), 山本 健(関大シス理工), 富田直秀(京大工)

○ 特別講演

13:20 - 14:10

司会 東藤 貢

ソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計に基づくマクロ・ナノトライボロジー特性の精密制御

九州大学 教授 高原 淳

○ 軟骨2

14:15 - 14:51

司会 藏田 耕作

13. スキャフォールドフリー組織再生材料(TEC)を用いた修復軟骨の力学特性

南斉亮佑, 尾形 衛(工学院大), 中村憲正(阪大医), 藤江裕道(工学院大)

14. 摩擦によるせん断ひずみ負荷が培養軟骨細胞による組織形成に及ぼす影響

澤江義則, 小俣誠二, 村上広行, 村上輝夫(九大)

15. フィブロインを被覆したマイクロパターン表面における軟骨細胞の凝集と

基質産生効率の評価

可知直芳, 大高晋之, 沈 承愚(京大院), 桑名芳彦, 玉田 靖(農生資研), 富田直秀(京大院)

○ インプラント一般

14:55 - 15:31

司会 村上 輝夫

16. PS 型人工膝関節のUHMWPEインサート摺動面の応力変動解析

大野充孝(京大院), 東藤 貢(九大応力研), 日垣秀彦(九産大), 三浦裕正(九大医)
長嶺隆二(杉岡記念病院)

17. THA の安全可動域に及ぼすCup 設置角、Stem offset

佐藤太志, 中島康晴, 藤井政徳, 松下昌史, 岩本幸英(九大医)

18. マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム: Mouse Fix™ を用いた

骨折治癒過程の検討

上野正喜, 占部 憲, 成瀬康治, 峰原宏昌, 山本豪明(北里大医), Steck R, Gregory L (QUT)
Wullschlegel ME, Schuetz MA (QUT, The Princess Alexandra Hospital), 糸満盛憲(北里大医)

○ 人工関節 生体関節

15:35 - 16:23

司会 藤江 裕道

19. 人工股関節ステムのプレスフィット固定における術中骨折の発生条件

高橋亮子, 酒井利奈(北里大医衛), 高平尚伸(北里大医), 馬淵清資(北里大医衛)

20. 人工股関節ステム転子間プレート固定の有用性評価

尾畑幸代, 酒井利奈(北里大院医療系), 吉岡亮(北里大医衛), 糸満盛憲(北里大医)
馬淵清資(北里大医衛)

21. 全人工股関節置換術後の stem 周囲の BMD 変化と骨粗鬆症治療薬使用歴との
関連についての検討

山本豪明, 占部 憲, 内山勝文, 成瀬康治, 内田健太郎, 須藤光敏, 須藤香織
上野正喜, 糸満盛憲(北里大医)

22. 屈曲による膝関節衝撃伝達への影響

村瀬晃平(近大工)

○ 掉尾の言葉

16:25 - 16:30

バイオトライボロジー研究会長 糸満 盛憲

講演概要

1. 「マイクロダメージに起因した骨リモデリング開始における骨細胞の役割」 藏田耕作 (九大院)

本報では、マイクロダメージに対する骨細胞の応答を調べるための *in vivo*, *in vitro* 実験系について紹介し、骨細胞死と骨リモデリング開始との関係について考察する。両者の関連は臨床的にも指摘されており、例えば長期臥床による廃用性骨粗鬆症では、骨の不動が骨細胞の低酸素・低栄養状態を招いて細胞死を引き起こし、これが骨吸収の亢進に繋がるという報告がある。さらにグルココルチコイド投与の副作用として生じる骨粗鬆症に関しては、グルココルチコイドによる骨細胞のアポトーシスが骨吸収の亢進をもたらしている可能性が示唆されている。このような骨細胞死に関連した骨リモデリングの開始メカニズムを明らかにすることは、これらの疾患の予防や治療に大きく貢献するだけでなく、骨の再建や再生を進める上でも有益であると思われる。

2. 「骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延動物モデルの確立」 成瀬康治 (北里大医)

骨折部不安定性により骨折治癒が遷延することが知られているが、小動物げっ歯類の閉鎖性骨折モデルでは作成し難いことが知られている。また、骨折部不安定性を定量評価することも困難である。従って骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延における細胞現象やメカニズムについてはいまだ不明な点も多い。本研究では、骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延の研究に用いることができる動物モデルの確立を目指した。

3. 「ラット膝蓋骨脱臼モデルにおける脛骨形態の時系列変化とカルシトニン投与による作用」

成瀬康治 (北里大医)

変形性膝関節症を自然発症する STR/OrtCrlj マウスは、大腿脛骨関節と膝蓋大腿関節の変形性変化を呈するが、膝蓋大腿関節軟骨組織に最も早期に組織学的変化を生じる (Connective Tissue Research, 50:55-63, 2009)。また、時系列的变化として脛骨内捻角度が増加することが膝蓋脱臼の一因として考えられている。そこで、膝蓋骨脱臼と骨組織の形態学的変化の直接的因果関係を詳細に検討するためにラット膝蓋骨脱臼モデルを作成した。また、骨組織の形態学的変化に対するカルシトニン製剤 (骨吸収抑制型骨粗鬆症治療薬) 投与による作用について検討した。

4. 「卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対するアレンドロネート投与が与える影響についての検討」

嶋田千安紀 (北里大医衛)

原発性骨粗鬆症は閉経後の絶対的エストロゲン欠乏により骨量の減少や骨の脆弱化を生じる疾患である。骨の脆弱化により生じる骨折は、日常生活の質や活動性を著しく低下させる。アレンドロネート (以下 Alen) をはじめとするビスホスフォネート製剤 (以下 BP 製剤) は強力な破骨細胞による骨吸収抑制作用を有することから、本邦における骨粗鬆症薬剤療法の主流になっている。薬物治療を開始する時期や病期は患者ごとに異なる。特に、骨量や骨密度が著しく減少した患者に対する治療効果については不明な点が多い。本研究では、骨粗鬆症が進行した卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対する Alen の影響を検討した。

5. 「高週齢ラットを用いた卵巣摘出骨粗鬆症モデルおよび歩行運動抑制骨粗鬆症モデルに対するアレンドロネート投与効果の検討」 須藤光敏 (北里大医)

急速な高齢化社会を反映し、骨粗鬆症治療対象症例は閉経後早期の原発性骨粗鬆症から歩行運動抑制を背景に持つ高齢者骨粗鬆症へと推移する傾向が認められる。しかし臨床研究と基礎研究双方においても、これら複雑な病態を呈する骨粗鬆症への治療方針の検討は未だ十分ではない。そこで高週齢ラットを用いて歩行運動抑制モデルを作成し、現在エビデンスレベルの最も高い骨粗鬆症治療薬の 1 つであるアレンドロネートの投与効果について卵巣摘出モデルと比較検討した。

6. 「副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合蛋白を用いた骨粗鬆症治療に関する基礎的研究」 内田健太郎 (北里大医)

副甲状腺ホルモン (PTH) は唯一の骨形成促進型骨粗鬆症治療薬として欧米で使用されており、骨吸収抑制型骨粗鬆症治療薬であるビスホスフォネート製剤に比べ有意に骨密度を増加させることが明らかとなっている。しかし、週 1 回の経口ビスホスフォネート製剤が普及する中、PTH は 1 日 1 回の皮下注射を必要とする。そのため、優れた効果を持つにも関わらず骨粗鬆症治療薬に PTH を選択する患者は少ない。従って、PTH による骨粗鬆症治療の発展には、少ない皮下投与

頻度で PTH が効果的に作用するドラッグデリバリーシステムが必須である。我々は、コラーゲンへの結合能を有する副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合タンパク (PTH-CBD) を用いることで少ない投与頻度で骨量増加効果が得られるかを検討した。

7. 「冷凍保存、加温がラット膝蓋腱の力学的特性、組織学的構造に与える影響の検討」 朴 晃正(北里大医)

同種腱移植における処理が腱に与える影響についてはいくつか報告されてきているが、未だ不明な点も多い。とりわけ加温や凍結での膠原線維構造、形態の変化と力学的特性変化の関連性についての報告は少ない。本研究では冷凍保存、加温がラット膝蓋腱に与える力学的特性、組織学的構造の変化を検討することを目的とした。

8. 「同種骨・靭帯組織中に含まれる生存細胞除去法の検討」須藤香織(北里大医)

整形外科領域では、古くから骨欠損部を同種骨によって修復する同種骨移植術が行われてきた。近年では、膝関節の前十字靭帯損傷などに対して同種骨・靭帯組織を用いた運動器機能再建術も行われている。我々の施設(北里大学病院)では開院当初から骨バンクが設置され、同種骨・靭帯組織の処理保存法について検討が重ねられてきた。γ線照射を行うことができない本邦では、通常抗原性を低下させ疾患伝播を回避させるために同種骨には冷凍・加温処理が行われている。一方、加温処理によって同種腱・靭帯組織は力学的強度が低下するため、抗菌薬浸漬処理と冷凍が行われている。これまで冷凍保存によって同種骨組織に含まれる細胞は死滅すると考えられてきたことと、臨床的拒絶反応が極めて少ないことから、冷凍同種骨・靭帯組織の抗原性は問題視されてこなかった。しかし、我々は冷凍保存処理だけでは、骨組織に多くの生存細胞が存在することを明らかにした。よって、移植による不都合が生じる可能性が示唆された。このことから、即時臨床応用が可能な生存細胞の除去方法の確立が望まれた。今回、冷凍・解凍の繰り返しが力学的強度に影響しない簡便な生存細胞除去法となりうるかを検討した。

9. 「加圧による組織内容酸素変化の測定」山崎祐司(埼玉大)

皮膚に圧力を加え続けることで、血管が押しつぶされ血行障害が生じ、それによって組織が壊死する褥瘡という病態がある。しかし現在、発生原因はわかっているが、詳しい褥瘡発生条件は解明されていない。今回はそれを解明する一環として組織の酸素供給の基準である酸素分圧が加圧時にどのように変化するかを測定した。また、血管の圧密と関係があると思われる加圧部分の沈み込み量と経時変化を測定した。

10. 「円筒圧子を用いた関節軟骨の固液二相性潤滑の解析」坂井伸朗(九大)

生体関節軟骨機能の解明は、関節疾患機序の解明、再生組織工学の指標、潤滑システムの開発等に有用であると考えられる。軟骨組織はコラーゲンネットワークにプロテオグリカンが埋包され多くの水分を捕獲するとともに、異方性・不均一性を持つ。著者らはこの形態が高機能な関節機能を実現するための要素と考え、研究を行っている。本講演では円筒圧子を用いた関節軟骨の圧縮挙動を実験により観察するとともに、その特性を取入れた計算モデルにより円筒圧子の往復しゅう動時の挙動を解析した結果を報告する。

11. 「MPC グラフト表面を用いた軟骨水和潤滑の評価」田村暢也(京大院)

関節軟骨の潤滑においては、プロテオグリカンなどの軟骨表面高分子鎖が形成する水和層による表面ゲル水和潤滑が重要であると考えられている。水和潤滑においては摩擦する両面が水和層を保持することで軟骨特有の優れた潤滑特性を維持していると考えられる。我々は表面に水和層を保持する機能を持つ MPC ポリマー (2-Methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymer) をブラシ状にグラフトさせた材料を摩擦評価対面とした摩擦試験の水和潤滑機能評価における有用性を報告してきた。本研究では軟骨表面水和層の有無が荷重負荷時間と摩擦特性との関係に与える影響について検討した。

12. 「関節軟骨超音波評価法における探査子の傾きに伴う評価値誤差の低減」山田桂輔(京大工)
近年超音波を利用した関節軟骨評価法が開発されている。超音波を使用することで、低侵襲での軟骨評価が可能である。しかし、超音波探査子が軟骨表面に対して垂直でない場合、反射波の振幅が減少し、評価値に誤差が生じるという問題がある。これに対し、我々はPeak-to-Peak値という新たな指標を用いて反射波の波形変化を定量化することで、探査子の傾き角度の推定、および反射波振幅の補正を行える可能性を報告している。本研究では、表面性状の異なる試料においてもPeak-to-Peak値を用いた角度推定法が誤差の低減に有効であるか検討を行った。

特別講演 「ソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計に基づくマクロ・ナノトライボロジー特性の精密制御」高原 淳(九大)

高分子材料が様々な機能を発現するとき、それら材料の表面・界面(ソフト界面)の構造や物性は重要な役割を果たしている。そのため、高分子固体界面を精密に設計し、その特性を制御することで材料科学や技術を革新的に進展させることが期待されている。ここでは高分子ナノ薄膜を用いたソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計およびトライボロジー特性制御について最近の演者らの研究例を紹介する。

13. 「スキヤフォールドフリー組織再生材料(TEC)を用いた修復軟骨の力学特性」南齐亮佑(工学院大)

関節軟骨は損傷や変性が生じると、自然治癒は困難であるため、外科的措置により損傷した軟骨を修復させる必要がある。工学院大学バイオメカニクス研究室では患者から採取した細胞を生体外で培養し、細胞と、細胞自身が作り出す細胞外マトリックスから成る組織再生材料(TEC)を作製し、これを用いて損傷部を修復させる研究を進めている。これまでに、実験動物に未成熟ブタを用いた研究は行われてきたが、成熟ブタを用いた修復軟骨の力学特性の評価は行われていない。本研究では実験動物に成熟ブタを用い、TECによって修復した軟骨の力学特性を調べることを目的とした。

14. 「摩擦によるせん断ひずみ負荷が培養軟骨細胞による組織形成に及ぼす影響」澤江義則(九大)

歩行時の下肢関節では、摺動面を覆う関節軟骨に、周期的な圧縮力とともに摩擦による接線力が作用している。このうち、圧縮力により組織内部に生じる圧縮ひずみや静水圧については、軟骨細胞による細胞外マトリックス(ECM)産生を促進することが知られており、培養細胞による再生軟骨組織の形成に際しても、その効果を積極的に利用することが試みられている。一方、摩擦による接線力により組織にもたらされるせん断ひずみについては、細胞の代謝に及ぼす影響について未だ充分な知見が得られていない。本研究では、アガロースゲルをスキヤホールドとした再生軟骨モデルを用い、培養中に加えられる摩擦による周期的なせん断ひずみ負荷が、組織形成に及ぼす影響を実験的に評価した。

15. 「フィブロインを被覆したマイクロパターン表面における軟骨細胞の凝集と基質産生効率の評価」可知直芳(京大院)

家蚕の繭から作製したフィブロインスポンジに軟骨細胞を播種し培養すると、フィブロイン表面において硝子軟骨様組織が形成され、得られた組織は良好な摩擦特性を有する。一方、培養初期において軟骨細胞はフィブロインスポンジ内で凝集体を形成することが報告されている。本研究ではフィブロインスポンジ内での軟骨細胞凝集が後の組織形成に及ぼす影響に着目し、細胞濃度による凝集挙動および基質産生効率の変化を評価した。顕微鏡観察および定量評価を容易に行うために、実験にはフィブロインスポンジを模擬したマイクロパターン平面を用いた。

16. 「PS型人工膝関節のUHMWPEインサート摺動面の応力変動解析」大野充孝(京大院)

現在、高度な膝関節障害を持つ患者に対する有効な治療法として、人工膝関節全置換術(TKA)が多く行われている。このTKAの問題として、UHMWPE製脛骨インサートの経年性摩耗や破損などがあり、インサートの耐久性向上が求められている。インサートの耐久性を検討するには、生体膝内部におけるインサートの力学状態を明らかにすることが重要であり、そのための有効な実験

的手法として、膝シミュレータによる研究が行われている。しかし、詳細な応力状態については実験からは得られないため、有限要素法を用いた数値解析との併用が望ましいと考えられる。そこで我々の研究グループは、膝シミュレータを数値モデル化したバーチャル・シミュレータの開発を試みている。初期モデルでは、筋肉として大腿四頭筋のみを考慮したモデルを構築したが、本研究では屈曲動作をより実際の動作に近づけるために新たにハムストリングを考慮したモデルを作成し、動作状態の確認を行った。

17. 「THA の安全可動域に及ぼすCup 設置角、Stem offset」佐藤太志(九大医)

骨盤傾斜の変化はCup とStem の相対的な位置を変化させる。年齢とともに進行する骨盤後傾例ではCup は過前開きになり、前方への脱臼が危惧される。今回、骨盤傾斜がTHA の可動域 (ROM) に及ぼす影響を定量的に計測し、至適設置角とStem offsetの影響について検討した。

18. 「マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム：Mouse Fix™ を用いた骨折治癒過程の検討」上野正喜(北里大医)

従来用いられてきたマウス大腿骨閉鎖性骨折モデル作成には、鋼線や注射針など用いた髓内固定が採用されてきた。従来法には、多くの利点もあるが回旋動揺性などが残存する。このため骨折治癒過程における細胞事象観察には使用されてきたが、固定性や固定材料特性が骨折治癒過程へ及ぼす影響は正確に検討できない。これらの欠点を克服するため AO Development Institute は、近年マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム：Mouse Fix™を開発した。このシステムを用いた際の形態学的、組織学的時系列変化について検討した。また、剛性の異なる2種類のプレートを用いて、骨折部の力学的環境の違いが骨折治癒過程に及ぼす影響を検討した。

19. 「人工股関節ステムのプレスフィット固定における術中骨折の発生条件」高橋亮子(北里大医衛)

現在、人工股関節ステムのセメント非使用固定においては、プレスフィット固定が一般的である。その場合、強い力でしっかりと打ち込むことが、十分な固定力を得るのに必要と考えられている。しかし、その弊害として、ある程度の頻度で術中骨折が発生することが避けられないのが実情である。外見やX線像では認識されない微小骨折の発生頻度はさらに高いと推定され、それが術後の大腿部痛の発生要因となっているのではと疑われる。そこで本研究においてはプレスフィットタイプのセメントレス人工股関節ステムを対象とし、打ち込み作業の際に大腿骨内部に発生する応力を、応力測定実験と有限要素解析により求めた。2つのアプローチによって得られた応力値を骨組織の強度と比較して、術中骨折の発生条件について考察した。

20. 「人工股関節ステム転子間プレート固定の有用性評価」尾畑幸代(北里大院医療系)

人工股関節を長期使用した時に生じる緩み、摩耗、骨溶解などの問題点を解決するために、フィン、プレート、カラーなどを用いた機械的な固定法を有するステムが開発されている。カラーを有する人工股関節ステムは、近位における力の伝達という利点があるが、カラー直下の骨に、適切な接触状態を実現することが難しいという問題が生じる。一方、1972年に前澤伯彦によって考案された転子間プレートを用いた場合は、先にプレートのみを設置するためステムの挿入が容易である。また、プレートを用いる場合、高い圧力のかかる場所は、金属と金属の接触部分になる。そして、圧力が分散するので、骨組織には高い圧力がかからないという利点がある。本研究では、プレートの有用性を明らかにするために、プレートがある場合とない場合のステムで、圧力測定と有限要素解析を行い、ステム上の圧力分布を指標とした比較を行った。

21. 「全人工股関節置換術後の stem 周囲の BMD 変化と骨粗鬆症治療薬使用歴との関連についての検討」山本豪明(北里大医)

Stress Shielding はセメントレスタイプの stem を用いた全人工股関節置換術(以下、THR)後に大腿骨ステムが関節から受けるストレスをバイパスして末梢骨に伝えることでステム周囲の骨へのストレスが減少して発生する、廃用性骨萎縮である。骨密度の悪化は有効な stem との固定力を減少させて緩みの原因となる可能性が指摘されている。このことから Stress Shielding の予防は臨床上重要な問題として注目されている。

22. 「屈曲による膝関節衝撃伝達への影響」村瀬晃平(近大工)

日常生活では、歩行や運動によって常に動的な外力が生体に負荷されている。通常、跳躍やスポーツ時の軽度の衝突では身構える、あるいは筋力を伸張・収縮させることにより緩和して受け止めていると考えられるが、階段の踏み外し等の予期しない負荷の場合には、そのような事前反応がなく衝撃的な負荷が加わると予想される。とくに膝関節は関節面に半月板や前後十字靭帯、膝蓋骨が介在するなど複雑な構成をしており、高速変形下での材料強度や応力分布状態は静的荷重時とは大きく異なることが予想される。これまでも膝関節領域の衝撃伝達については近來数多くの研究が行なわれているが、大腿骨近位部や脛骨遠位部までを再現したコンピュータモデルによる報告は未だ少ない。膝関節のダイナミックな荷重支持を解明するためには、骨体と靭帯組織など力学特性の異なる生体材料を組み合わせた、大規模な下肢モデルによる数値シミュレーションが必要であろう。本研究では靭帯などの軟組織を組み込んだ下肢の三次元有限要素モデルを作成し、姿勢における骨体内部の力学環境の変化、および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した。

4. あとがき

本研究集会は応用力学研究所とバイオトライボロジ研究会の共催として開催された。バイオトライボロジ研究会は、バイオトライボロジに関する理論および技術の研究調査を目的として、医学、工学の両分野にまたがる研究者集団として1980年5月に組織され、年1回バイオトライボロジシンポジウムを実施しており、本研究集会は第30回バイオトライボロジシンポジウムとして開催されたものである。今回は、超高齢社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「関節の再建と再生」を課題とし、医学と工学の両分野から最先端の研究者による23件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、病院、企業より約40名ほどの参加者があり、各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会在、この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない。

生体硬組織の力学と機能

新潟大学医学部 坂本 信

1. まえがき

バイオメカニクスとは、生物・医歯学の諸分野と機械工学系の諸分野を統合することによって生まれた学際的研究分野と定義できる。つまり、生体や生体材料に作用する力を考究する学問と言える。そのバイオメカニクスの大きな特徴は、研究を臨床応用することを目的の一つとする点である。力学的知識が求められる整形外科や歯科学で、主に医師のみの発想だけで見事な手術や治療が行われているが、バイオメカニクスによる医歯学の基礎研究はもちろんのこと、基礎研究を何らかの形で臨床応用することを見据えながら研究を進展させることが、極めて重要なことだと考えている。したがって本研究集会は、バイオメカニクスを主なキーワードとし、医学と工学の両分野で活躍する研究者に、最新の研究内容について発表し議論してもらうことを目的とした。

なお本研究集会は、日本実験力学学会バイオメカニクス分科会「The 9th Conference on Biomechanics in Fukuoka」を主催とし、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「生体硬組織の力学と機能」および日本複合材料学会西部支部との共催という形態をとった。

2. プログラム

開催日：2009年10月31日（土）、11月1日（日）

会場：九州大学西新プラザ（福岡県福岡市早良区西新 2-16-23）

10月31日（土）

13:30 - 13:40	開会の挨拶：坂本 信（新潟大学）
セッション 1	座長：山本 衛（近畿大学）
13:40 - 14:00	「ヒト脛距関節における接触面積の MRI を用いた生体内測定」 坂本信（新潟大学）、野田口洋成、田邊裕治、笹川圭右、小林公一
14:00 - 14:20	「超音波による骨評価とファントム」 野方文雄（岐阜大学）、藤井秀夫（石川製作所）、土生恵彦、影近謙治（金沢医科大学）
14:20 - 14:40	「歯根破折の原因追究 - 歯根根尖部の形態と応力の関係 -」 遠藤英昭（東北大学）、佐々木具文、伊藤秀美
14:40 - 15:00	「膝関節の生体内運動力学特性評価法の開発」 小林公一（新潟大学）、小田川健一、豊田貴嗣、坂本信、田邊裕治
15:00 - 15:20	休 憩
セッション 2	座長：東藤 貢（九州大学）
15:20 - 16:20	特別講演「生体力学からみる上下無歯学へのインプラント補綴設計」 松下恭之（九州大学）
16:20 - 16:30	休 憩
セッション 3	座長：笹川 圭右（新潟大学）
16:30 - 16:50	「圧縮負荷下の皮質骨で発生する微小損傷の観察」 山本衛（近畿大学）、松本祐樹、中山裕隆
16:50 - 17:10	「深屈曲を目指した Bi-surface 型人工膝関節の力学的安全性の評価」 東藤貢（九州大学）
17:10 - 17:30	「骨モデルを用いたインプラント周辺骨の変位・ひずみ場計測」

森田康之（名古屋大学），錢立和（九州大学），東藤貢，松下恭之，内野正和（福岡県工業技術センター），新川和夫（九州大学），古谷野潔

18:00 - 20:00 懇親会（福岡鷹勝 西新店 福岡市西区 1-8-1-1F）

11月1日（日）

セッション 4

座長：小林 公一（新潟大学）

09:00 - 09:20

「Impact Bone Grafting による寛骨臼欠損再建部の力学特性評価」

山澤知之（新潟大学），飯田哲（千葉県松戸市立病院），大橋弘嗣（大阪府済生会中津病院），岸田俊二（千葉大学），田邊裕治（新潟大学）

09:20 - 09:40

「頸動脈強度と無侵襲評価システム」

野方文雄（岐阜大学），横田康成，河村洋子，W. R. Walsh（University of New South Wales）

09:40 - 10:00

「圧縮刺激による骨芽細胞と歯根膜細胞の遺伝子発現解析」

千葉美麗（東北大学），林治秀

10:00 - 10:20

休 憩

セッション 5

座長：森田 康之（名古屋大学）

10:20 - 10:40

「生体情報（呼吸・心電図）センシングシステムの開発」

坂本英俊（熊本大学），大淵慶史，鳥越一平，宮河秀和，村山伸樹，林田祐樹，伊賀先伴彦

10:40 - 11:00

「CCD カメラを用いた人工股関節ステム設置管理法の精度検証」

窪田陽介（新潟大学），坂本信，小林公一，古賀良生（新潟こばり病院），田邊裕治（新潟大学）

11:00 - 11:20

「MRI モデルによる立位下肢状態のアライメント評価に関する検討」

笹川圭右（新潟大学），小林公一，坂本信，田邊裕治

11:20 - 11:40

「人工股関節のソケット関節面における応力分布の数値解析」

解晨（新潟大学），坂本信，小林公一，湊泉（新潟臨港病院），古賀良生（新潟こばり病院），田邊裕治（新潟大学）

11:40 - 11:45

閉会の挨拶：遠藤 英昭（東北大学）

3. 講演の概要

- (1) 「ヒト脛距関節における接触面積の MRI を用いた生体内測定」 坂本信（新潟大学）

Prof. Sakamoto et al. adapted a closed-MRI system with a loading device to study the in vivo articular cartilage contact areas and contact distributions of the tibiotalar joint during various ankle flexions under ankleunloaded and ankle-loaded conditions. They also evaluated the effects of body height and the geometry of tibial and talar joint surfaces on the contact areas of the tibiotalar joints.

- (2) 「超音波による骨評価とファントム」 野方文雄（岐阜大学）

踵骨と等価な海綿骨形状をした 2 次元骨ファントムを試作し，市販の骨量検査機器(許認可医療機器)を用いて計測した結果について報告があった。

- (3) 「歯根破折の原因追究 - 歯根根尖部の形態と応力の関係 -」 遠藤英昭（東北大学）

ヒト抜去歯の形態を模型に反映し，歯根や根尖部の形態に依存して，どのように応力が広がり，どこに集中しているかについて報告があった。特に，各計測部位の比率や湾曲による根尖の位置に注目した結果についての講演であった。

- (4) 「膝関節の生体内運動力学特性評価法の開発」 小林公一（新潟大学）

立位静止時の関節アライメントと床反力および運動時の関節動作と床反力の同時測定システムの開発を行うとともに，健常者と変形性膝関節症（膝 OA）患者に適用した結果について報告があった。

- (5) 「生体力学からみる上下無歯学へのインプラント補綴設計」 松下恭之 (九州大学)
下顎無歯顎に対する固定性および可撤性インプラント補綴設計の臨床的エビデンスが紹介され、講演者らのチームでの生体力学的検証と現時点での下顎無歯顎に対するインプラント治療に関する講演内容であった。
- (6) 「圧縮負荷下の皮質骨で発生する微小損傷の観察」 山本衛 (近畿大学)
ウシ大腿骨骨幹部より作製した皮質骨試料の骨軸方向に、非破壊的な圧縮過負荷を作用させ、その後発生した微小損傷を蛍光顕微鏡によって観察していた。過負荷を単一、繰り返し、持続的の3条件で作用させることで、負荷様式の相違が微小損傷の発生に及ぼす影響について検討していた。また、3種類の蛍光色素を使用した蛍光顕微鏡観察を実施することで、継続的に作用させた過負荷のもとで発生する微小き裂の進展の様子に関する報告があった。
- (7) 「深屈曲を目指した Bi-surface 型人工膝関節の力学的安全性の評価」 東藤貢 (九州大学)
現在開発中の人工膝関節 CFK モデルの力学的安全性を評価するために、有限要素法を用いてスクワットを模擬した深屈曲状態でも応力解析を行い、特に耐久性が問題となる超高分子量ポリエチレンインサートの応力状態について調べ、安全性や耐久性について検討する報告があった。
- (8) 「骨モデルを用いたインプラント周辺骨の変位・ひずみ場計測」 森田康之 (名古屋大学)
フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレートッドインプラント試験片、および近年、治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷インプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し、両者におけるフィクスチャーと骨界面周辺のひずみ分布状態を比較検討した結果について報告があった。
- (9) 「Impaction Bone Grafting による寛骨臼欠損再建部の力学特性評価」 山澤知之 (新潟大学)
混合比の異なる計4群の MCB/HA 混合物を、作製した寛骨臼モデルに埋設し、繰り返し圧縮荷重を与える実験を行った。そして、MCB/HA 混合比が寛骨臼欠損再建部の力学特性に及ぼす影響について、Motion analysis microscope を用いてカップ移動量を連続的に撮影し、検討した結果について報告があった。
- (10) 「頸動脈強度と無侵襲評価システム」 野方文雄 (岐阜大学)
血管の強度とその無侵襲評価システムについて報告があった。特に、血管位置のステフネス、強度、予想破裂血圧の分布として計測する多点強度計測画像解析システムについての講演であった。
- (11) 「圧縮刺激による骨芽細胞と歯根膜細胞の遺伝子発現解析」 千葉美麗 (東北大学)
歯周組織に持続的圧縮力をかけたときに、直接圧縮され歯周組織のリモデリングに深く関与していると思われる骨芽細胞と歯根膜細胞に着目し、遺伝子発現とそのシグナル伝達機構を解析した結果について報告があった。
- (12) 「生体情報 (呼吸・心電図) センシングシステムの開発」 坂本英俊 (熊本大学)
呼吸・心電図などの生体情報を無侵襲、低侵襲で計測するシステムの開発に関する講演であった。
- (13) 「CCD カメラを用いた人工股関節ステム設置管理法の精度検証」 窪田陽介 (新潟大学)
3次元下肢アライメント評価システムにより THA 術前計画された人工股関節のステム設置位置を術中に CCD カメラにより得られる骨頭の3方向 RGB 画像を用いて、正確に再現するステム設置管理法におけるイメージマッチングの精度検証に関する報告があった。
- (14) 「MRI モデルによる立位下肢状態のアライメント評価に関する検討」 笹川圭右 (新潟大学)
膝の MRI モデルを用いた立位下肢アライメントの解析法を提案し、その解析法の精度について検討した結果に関する報告があった。
- (15) 「人工股関節のソケット関節面における応力分布の数値解析」 解晨 (新潟大学)
剛体-バネモデルに基づく離散要素解析を人工股関節に適用する方法を考案し、日常生活における基本動作時の垂直接触応力と接触面積を数値解析した結果について報告があった。

4. あとがき

本研究集会では、医歯学、バイオメカニクスの各分野において第一線で活躍する研究者にご参集いただいた。そして医学・工学の様々な視点からご講演いただき、活発な議論が交わされた。本研究集会が、この分野の発展に貴重な役割を果たしたと確信している。最後に、この研究集会にご協力いただいた諸先生方、ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げるとともに、助成していただいた貴研究所に感謝申し上げます。

・目的

下顎骨角部および顎関節突起部の骨折は顎口腔領域の外傷においては高頻度に認められる。これまで、これらの下顎骨骨折と下顎第三大臼歯の関連について様々な研究が行われており、下顎第三大臼歯の有無、埋伏方向と骨折頻度において臨床上有意な関連がみられることが報告されている。これらの問題には明らかに下顎第三大臼歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、これらの問題を解決するためには、同歯およびその周囲の骨組織の力学状態を明らかにすることが必要不可欠である。下顎骨に埋伏している下顎第三大臼歯は複雑な 3 次元構造と様々な埋伏方向を成しており、実験的にその応力状態を明らかにすることは现阶段では不可能である。そこで本研究では、ヒト下顎骨の CT 画像をもとに下顎骨の 3 次元モデルを構築し、それとは別に構築を行った下顎第三大臼歯モデルを組み合わせることで、詳細な 3 次元下顎第三大臼歯・下顎骨モデルの構築を目指す。さらに、そのモデルに対して実際の筋肉との結合を表した境界条件を導入することで、実環境下に近い力学環境を実現し、静的および動的負荷下での応力解析を行い、下顎第三大臼歯、周囲の骨組織、ならびに界面での応力状態を明らかにすることを目的とする。

・実験方法

- (1) 臨床データの検討
- (2) 下顎骨の CT 画像に基づく 3 次元モデルの作成
- (3) 下顎第三大臼歯モデルの下顎骨モデルへの埋入
- (4) 静的・動的応力解析
- (5) 解析結果に基づく下顎第三大臼歯の埋伏、萌出状態における力学的問題点の検討

・実験結果

(1) 2000～2009 年に九州大学病院顔面口腔外科を受診し、下顎骨骨折と診断された 136 症例（男性 105 例、女性 31 例）を対象とした。そのうち下顎角部骨折は 70 例、顎関節突起部骨折 42 例であった。下顎角部骨折と下顎第三大臼歯の関係は、表 1 に示すように 65/70 例で下顎第三大臼歯を通る骨折がみられ、41/65 例が左側であった。

表1 下顎角部および顎関節突起部骨折と下顎第三大臼歯の有無

下顎角部骨折	例(70)	顎関節突起の骨折	例(42)
・8→8なし	4	・8→8なし	17
・8↓のみ	3	・8↓のみ	3
8↓を通る骨折	3	8↓を通る骨折	1
接点なし	0	接点なし	2
・↑8のみ	4	・↑8のみ	6
↑8を通る骨折	4	↑8を通る骨折	0
接点なし	0	接点なし	6
・8→8	59	・8→8	16
8→8を通る骨折	18	8→8を通る骨折	2
↑8を通る骨折	37	↑8を通る骨折	0
8↓8を通る骨折	3	8↓8を通る骨折	0
接点なし	1	接点なし	14

顎関節突起部骨折では下顎第三大臼歯がないものは 17/42 例でみられ、下顎角部骨折と併発したものは 3 例のみであった。下顎第三大臼歯の状態（図 1）と Pell と Gregory らの分類（図 2）による下顎角部骨折との関連に

図1 下顎第三大臼歯の状態

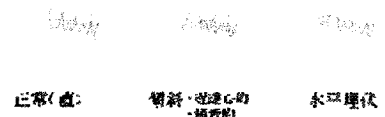
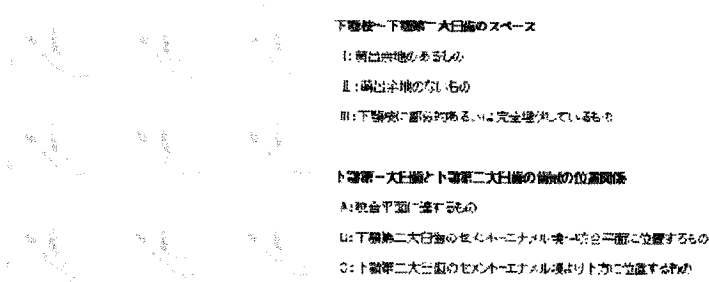


図2 下顎第一大臼歯の萌出状態



においては下顎第三大白歯の萌出余地がなく、半埋伏歯で咬合せず、傾斜しているもので有意に骨折が高かった (図3)。

(2) 実際の臨床における下顎骨の CT 画像を生体構造解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて必要箇所を抽出し、顎骨モデルを作成した (図4)。続いて、CT 画像からの CT 値を骨密度、ヤング率へ換算



図4 CT画像からの顎骨モデルの作成

した (図5)。骨密度分布を考慮することによって、皮質骨部と海綿骨部のヤング率分布を再現し、実生体構造に近い数値モデルの構築を行った (図6)。この顎骨モデルに下顎第三大白歯を模したモデルを挿入し、下顎第三大白・下顎骨モデルを作成した。

図5 骨のヤング率分布換算

CT値から骨密度への換算式

$$\text{骨密度} [\text{mg/cm}^3] = 1.770 \times \text{CT値} [\text{HU}] - 119.8$$

$$\text{骨密度} [\text{mg/cm}^3] = 1.770 \times \text{CT値} [\text{HU}] - 119.8$$

骨密度への換算式

Equivalent (mg/cm³)	Young's Modulus (MPa)
1400	$E=11901$
0.770 × CT - 119.8	$E=0.9800 \times 10^4$
1.770 × CT - 119.8	$E=0.9071 \times 10^4$
0.300	$E=10000$



図6 顎骨モデルのヤング率分布

(3) 下顎第三大白歯・下顎骨モデルにおいて、下顎骨に作用する各咀嚼筋における筋力を設定し、荷重条件を設定して静的・動的応力解析を現在行っている。

・考察

本研究において、下顎第三大白歯が傾斜 (特に近心)、半埋伏の状態である場合に下顎角部骨折の頻度が有意に高く、下顎第三大白歯がくさびのように作用することで下顎角部の骨折が生じやすいことが示唆された。また、角部が骨折することで顎関節突起にまで外力が及ばず、顎関節突起の骨折が生じにくいことが考えられた。これらの結果から、下顎第三大白歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、本研究において同歯およびその周囲の骨組織の力学的状態を明らかにすることで、同歯抜歯の必要性の根拠へとつなげていくことが可能と思われる。

人工骨による骨組織再生の生体力学的検討

大阪大学大学院医学系研究科 名井 陽

1. 諸言

腫瘍の切除や嚢胞等により骨に生じた大規模な欠損部は、そのままでは骨組織の自然な治癒は期待できないため、自家骨、他家骨、あるいは人工骨を利用した骨組織の再生が行われる。この中では自家骨が生体の拒否反応もなく最も理想的であるが、量的に限られているとともに、正常な骨を取り出して使用するため、健全な部位を傷つけるという問題がある。一方、人工骨は大量生産が可能であるが、骨組織の再生能に劣ることが問題である。最近では、生体親和性に優れる生体活性セラミックスを多孔質化することで、骨組織再生能を付与した人工骨が開発され臨床応用も進んでいる。また、より優れた骨組織の再生を目指し、*in vitro* でスキャホールドに幹細胞を播種し分化させ骨組織を再生後生体に移植する研究も進んでいる。

本研究では、多孔質ハイドロキシアパタイト系人工骨をウサギ大腿骨に埋入し、骨再生状態の経時変化を調べた結果に対し、コンピュータ・シミュレーションの技術を用いて力学的な見地から解析し、得られた結果と実験結果と比較検討することで人工骨と骨組織の複合系の力学特性変化のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 動物埋入実験

図 1(a)に実験で用いた人工骨の微視構造を示す。空孔径の平均サイズは $150\mu\text{m}$ であり、連通構造となっている。図 1(b)は円柱状の人工骨をウサギ大腿骨に埋入した状態を示している。この状態でウサギを最長 48 週間飼育し、 μCT による構造観察や力学試験を行い骨組織再生の影響を評価した。図 2 に 1 週間後と 48 週間後の人工骨内の状態を示す。青色で染色された部分が骨組織であり、1 週間後では人工骨内には骨組織は侵入していない。しかし、48 週間後には人工骨内は骨組織で満たされており、骨伝導能が有効に働いたことがわかる。



(a) 微視構造

(b) 動物埋入実験

(a) 1 週間後

(b) 48 週間後

図 1 人工骨の微視構造と動物埋入実験

図 2 骨組織侵入の様相

3. コンピュータ・シミュレーション

人工骨をウサギ大腿骨に一定期間埋入した後に μCT で撮影した微視構造の 2 次元画像より 3 次元数値解析モデルを構築し、力学特性の評価を行った。図 3(a)に μCT 画像を基に構築した 3 次元モデルの全体像を示す。図 3(b)は 1 週間後の人工骨の一部分を抽出したものであり、1 辺が $500\mu\text{m}$ の立方体形状を成している。人工骨の多孔質構造が数値解析モデルにおいても再現されていることがわかる。図 3(c)は有限要素モデルであり、4 面体要素で分割している。この立方体モデルに対し、上面は 2 方向を固定し下面に 1N の分布荷重を作用させて圧縮解析を行った。

図 4 にひずみエネルギー密度の分布状態を示す。1 週間後のモデルでは骨組織の侵入が無く (図 2(a)参照) 多孔質構造が維持されているため、ひずみエネルギー密度の局所的集中が多く観察される。一方、48 週間後のモデルでは骨組織が侵入し空隙が無くなるため、ひずみエネルギー密度の局所的集中箇所は大幅に減少していることがわかる。図 5 は 1 週間後の強度を

基準とし規格化した圧縮強度の実験結果と数値解析結果を比較したグラフである。解析結果をそのまま用いて予測した圧縮強度は実験結果と大きな違いを示しているが、補正を施すことで実験結果と良い一致を示す。この補正は μ CTの解像度に起因するものであり、実際の空孔サイズよりも数値解析モデルの空孔は解像度の影響で小さくなるために弾性率は過大評価となる。そこで、1週間後のモデルから得られた弾性率に対して空孔サイズを考慮した補正を行い圧縮強度の再評価を行った。なお、本解析では、ひずみ基準の破壊のクライテリアを用いて、1週間後の圧縮強度と他の週の圧縮強度の比は弾性率の比に等しいという仮定を用いて評価を行った。圧縮強度は増加を示した後、減少する傾向を示すが、これは骨組織の再生が活発に行われた後、骨芽細胞と破骨細胞による骨リモデリングが機能し、定常状態に近づいていくことを示唆している。

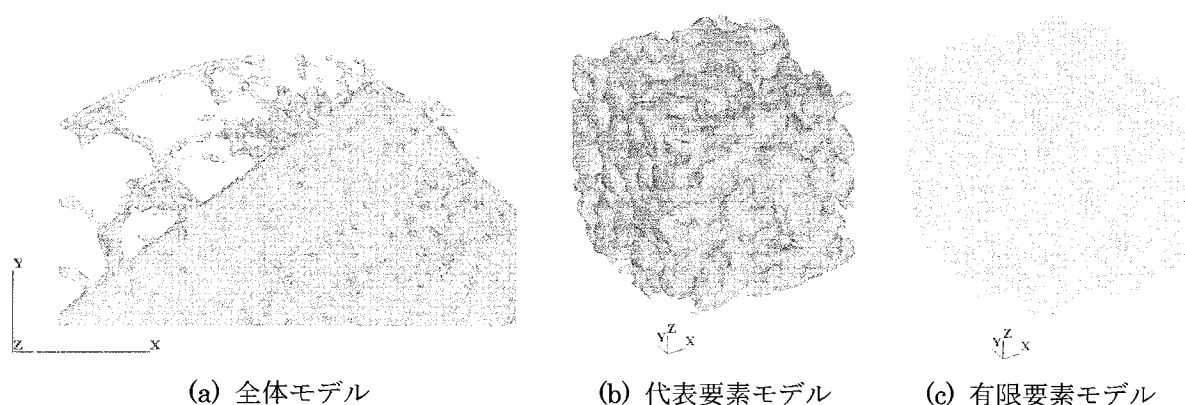


図3 μ CT画像より構築した3次元数値解析モデル

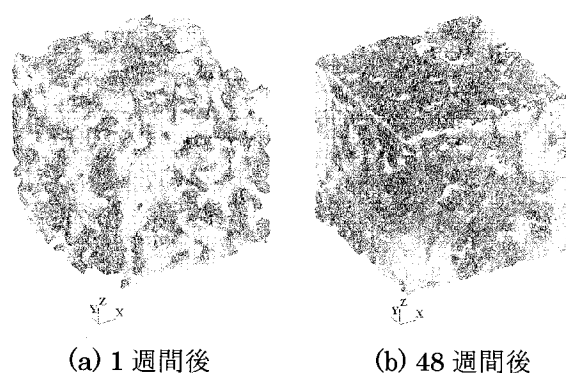


図4 ひずみエネルギー密度分布状態

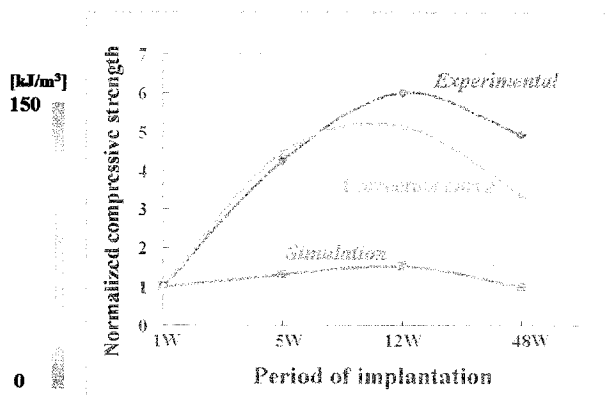


図5 圧縮強度の実験結果と数値解析結果の比較

成果発表

- ① 荒平高章, 東藤貢, 名井陽, 人工骨の力学挙動に及ぼす骨組織再生の影響, 第31回日本バイオマテリアル学会大会, 京都, 平成21年11月16-17日

研究組織

1. 名井 陽, 大阪大学大学院医学系研究科, 准教授, 研究代表者・生物学的考察
2. 杉安謙仁朗, 大阪大学附属病院整形外科, 医師, 生物学的考察
3. 荒平高章, 九州大学大学院総合理工学府, 修士課程2年, 数値シミュレーション
4. 東藤 貢, 九州大学応用力学研究所, 准教授, 所内世話人・生体力学的考察

咬合時における歯科インプラント周辺骨の変形解析

福岡県工業技術センター 内野 正和

1. まえがき

近年、歯科インプラント治療は「歯牙および歯周組織の欠損から生じる咀嚼、発語機能、審美性の低下を回復し、患者の生活の質（QOL）を著しく向上させる」として、歯科医療の中で重要な地位を占めてきている。しかしながら、不適切な治療による術後の「骨吸収」、「インプラント破折」などの合併症も生じている。

これらの合併症は、力学的要因が大きいと考えられる。そのため、歯科インプラントおよびその周辺骨の変位・ひずみ・応力分布を明らかにすることが重要である。しかし実験の困難性から、有限要素法を用いた数値解析が主流であり、実験的にインプラント周りの骨に作用する変位・ひずみ・応力分布を求める研究は少数である。またその実験的手法に関しても、単一構造の光弾性材料に歯科インプラントを植立し、光弾性法により応力分布を解析することに限られている。しかし実際の骨は、皮質骨および海綿骨の二層構造を有しており、実験を行う際にもそのような骨モデルを使用することが重要である。

そこで本研究では、皮質骨および海綿骨、すなわち骨の二層構造を模擬した SAWBONES 社製の骨モデルを使用した。この骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し、擬似咬合荷重を付与した。そして、デジタル画像相関法により変位・ひずみ分布を解析した。本報告では、フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレートッドインプラント試験片、および近年、治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷インプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し、両者におけるフィクスチャーと骨界面周辺の変位・ひずみ分布状態を比較検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

歯槽骨の皮質骨および海綿骨の二層構造を模擬した骨モデルには、SAWBONES 社製 Biomechanical Test Material の Laminated Test Block を使用した。材質は、皮質骨がガラス繊維強化エポキシ樹脂、海綿骨がポリウレタンである。この Laminated Test Block の特長は、二層構造のほかに、力学的特性が骨とほぼ等しいことである⁽¹⁾。使用した Laminated Test Block のサイズは $40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$ 、皮質骨厚さはそれぞれの両端で 2 mm とした。また使用したフィクスチャーは、日本メディカルマテリアル（JMM）社製 POI EX FINAFIX テーパータイプ（POI 47-14TP-L）である。本フィクスチャーの最大外径は 4.7 mm 、全長 16 mm 、骨への埋入長さは 14 mm である。

フィクスチャーは、Laminated Test Block の上面 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ の中央に植立した。フィクスチャー植立時におけるフィクスチャー窩の形成には、JMM が推奨する POI EX Manual に示されたドリル群を使用した。窩洞形成時に生ずる試験片の個体差を小さくするため、万能フライス盤（日立精機社製 2MF-U）により窩洞形成を行った。ここでオッセオインテグレートッドインプラント試験片の作製には、インプラント窩に接着剤（住友スリーエム社製 Scotch 強力接着剤 6004N）を充填後、フィクスチャーを植立した。そして即時負荷インプラント試験片の作製には、接着剤を充填せずフィクスチャーを植立した。フィクスチャーの植立は、いずれの試験片においても、タッピングレンチにより手動で行った。フィクスチャーを植立した Laminated Test Block 試験片において、全視野の変位・ひずみ分布計測を行うため、側断面を露出させた。

2.2 実験手順

咬合を模擬した圧縮試験は、次の手順で行った。(i) デジタル画像相関法を用い解析を行うため、試験片の観測領域に黒色および白色のスプレー塗料（大日本塗料製 シリコン変性タイプ超速乾水性スプレー S05032）を噴霧し、ランダムパターンを形成した。(ii) 試験片を小型卓上試験機（島津製作所製 EZ Test）に設置した。(iii) 荷重点はフィクスチャーの上端部とし、最初に荷重を負荷した際の剛体変位を防止するため、予荷重として 4.0 N 付与した。(iv) そして送り速度 0.50 mm/min で 200 N まで圧縮荷重を加えた。(v) その際のロードセルの荷重およびクロスヘッドの変位を記録するとともに、 -10 N ずつ CCD カメラ（Nikon 製 D80）で画像を取得した。画像サイズは $2600 \times 3900 \text{ pixels}$ 、画素サイズは $4.7 \mu\text{m/pixel}$ である。(vi) デジタル画像相関法の解析プログラムには、Correlated Solutions 社の Vic-2D を使用した。

3. 実験結果

圧縮試験により得られた荷重-変位曲線の一例を図 1 に示す。横軸はクロスヘッドの変位、縦軸はロードセルの荷重である。オッセオインテグレートッドインプラント試験片は、変位に対してほぼ線形に荷重が増加した。一方即時負荷イ

インプラント試験片では、変位-0.15 mmあたりですべりが生じたような挙動を示しているが、それ以降の荷重はほぼ線形的に増加した。したがって同じ荷重では、即時負荷インプラント試験片のほうが、常に大きい値を示した。

デジタル画像相関法により得られた変位分布からひずみ分布を求めた。その結果を図2, 3に示す。図2は即時負荷インプラント試験片、図3はオッセオインテグレートドインプラント試験片であり、(a), (b), (c)は、 ϵ_{xx} , ϵ_{zz} , γ_{xz} を表す。いずれの試験片においても、最大ひずみの集中箇所はほぼ同じで、 ϵ_{xx} および γ_{xz} はフィクスチャーテーパー部の海綿骨領域、 ϵ_{zz} はフィクスチャー先端部の海綿骨領域に生じた。しかしながら分布をみると、即時負荷インプラント試験片では、フィクスチャー直近の骨で咬合荷重を負担しているのに対し、オッセオインテグレートドインプラント試験片では、広範囲の骨で咬合荷重を負担していることが示されている。これは、オッセオインテグレートドインプラント試験片では、フィクスチャーと骨が接着されているためである。また各ひずみの最大値においても、オッセオインテグレートドインプラント試験片では(ϵ_{xx} , ϵ_{zz} , γ_{xz}) = (-0.3%, -1.5%, 0.4%)であったのに対し、即時負荷インプラント試験片では(-0.6%, -5.0%, 1.9%)と全て高い値を示した。このように即時負荷インプラントはオッセオインテグレートドインプラントに比べて、ひずみの最大値が大きくなる傾向を示しており、骨吸収が生じやすい状況であることを示唆している。

4. まとめ

骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し、擬似咬合下でのフィクスチャー／骨モデル界面周辺の変位・ひずみ分布挙動を解析した。骨モデルには、実際の骨の構造および力学的特性に近い皮質骨・海綿骨の二層構造を模倣したSAWBONES社製のLaminated Test Blockを使用した。そして、オッセオインテグレートドインプラント周辺の骨変形状態と即時負荷インプラント周辺の骨変形状態を比較検討し、以下の結果を得た。

- (1) オッセオインテグレートドインプラントおよび即時負荷インプラントともに最大ひずみの集中箇所はほぼ同じで、 ϵ_{xx} および γ_{xz} はフィクスチャーテーパー部の海綿骨領域、 ϵ_{zz} はフィクスチャー先端部の海綿骨領域に生じた。
- (2) 即時負荷インプラントではフィクスチャー直近の骨で咬合荷重を負担しているのに対し、オッセオインテグレートドインプラントでは広範囲の骨で咬合荷重を負担していることを示した。
- (3) 各ひずみの最大値は、オッセオインテグレートドインプラントでは(ϵ_{xx} , ϵ_{zz} , γ_{xz}) = (-0.3%, -1.5%, 0.4%)であったのに対し、即時負荷インプラントでは(-0.6%, -5.0%, 1.9%)と全て高い値を示した。

参考文献

- (1) SAWBONES Worldwide Leaders in Orthopaedic and Medical Models, A Division of Pacific Research Laboratories, Inc., (2008), 72-73.

研究体制

氏名	所属	職名	役割・担当分野
内野正和	福岡県工業技術センター	専門研究員	研究代表者・解析
森田康之	名古屋大学大学院工学研究科	講師	実験、解析
新川和夫	応力研	教授	解析
東藤貢	応力研	准教授	世話人・解析

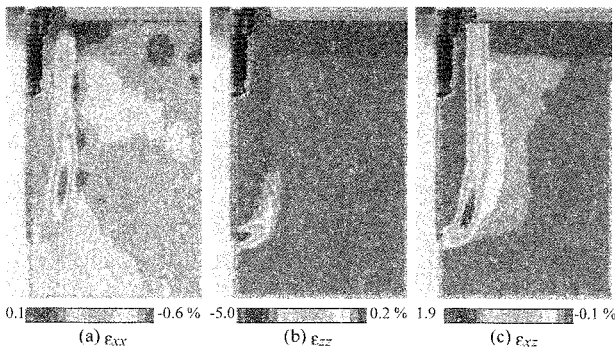


Fig. 2 Strain distributions of an immediate-loaded implant specimen.

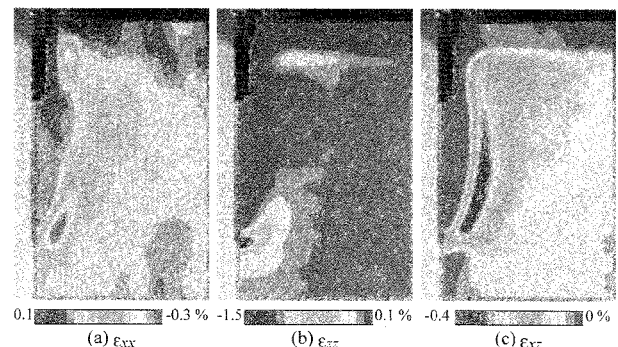


Fig. 3 Strain distributions of an osseointegrated implant specimen.

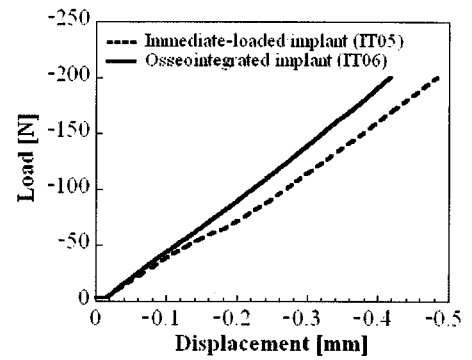


Fig. 1 Load-displacement curve.

膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に与える影響

近畿大学工学部 村瀬晃平

1. 緒 言

下肢関節は、日常生活における歩行や跳躍の影響を受け、他の関節に比べ動的・衝撃的な荷重負荷を与えられている。このため内外反あるいは屈曲など、関節面の条件変化により、静的な軽荷重でも体重の数倍、動的荷重下ではさらに大きな荷重変動が起こると予想される。

膝関節は関節面に半月板や前後十字靭帯、膝蓋骨が介在するなど、他の各部関節に比べて複雑な構成をしており¹⁾、歩行や跳躍時などのダイナミックな荷重支持を解明するためには、材料特性の異なる骨体と靭帯組織を組み合わせるとともに、下肢全体を再現した有限要素モデル^{2,3)}を構築し、力学シミュレーションを行なう必要がある。

本研究では、静的荷重と衝撃荷重による支持機構の違いや各姿勢における骨体内部の力学環境の変化、および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した。また、材料定数などのパラメータがおよぼす影響についても検討した。

2. 方 法

2.1 膝関節のモデリング

有限要素モデル作成では、CTデータより抽出した輪郭形状からサーフェスモデルを作成したのち、あらかじめ六面体要素で分割したプリミティブをサーフェス内で膨張させることでモデル内の六面体要素充填⁴⁾をおこなった。

膝関節には、体重を支えられる安定性、歩行やバランスを支持するための可動性が必要である。このため、大腿骨と脛骨は内側側副靭帯と外側側副靭帯、関節面中央部で大腿骨外側と脛骨を繋ぐ前十字靭帯、および脛骨後方から大腿骨内側を繋ぐ後十字靭帯で、それぞれ接続されている。また膝蓋骨上下端は膝蓋腱と呼ばれる繊維状組織によって、大腿骨や脛骨と接続されている。本研究ではこれらの靭帯をモデル化した。

骨体内部については軟骨、軟骨下骨、皮質骨、海綿骨および半月板を再現した。解析モデルを背後から見た様子を Fig.1 に示す。

今回は左下肢全体を想定し、Fig.2 に示すように関節面から大腿骨を 420mm、脛骨を 380mm までモデル化した。直立と歩行を再現するため、直立モデルでは関節面を基準に 10°、歩行モデルでは弱屈曲状態を想定し、関節面を基準に 22°の屈曲を与えた。モデル全体の節点数は 6291、要素数は 5190 であった。

本研究では膝関節の力学環境が異なる条件として内反、外反状態を取り上げた。一般に整形外科領域では、前額面から見て大腿骨と脛骨のなす角度が 175°の場合を正常な状態としている。このため本解析ではこの状態を正常位置とし、大腿骨を内側および外側へそれぞれ 5°傾けることで、内反、外反状態を再現した。

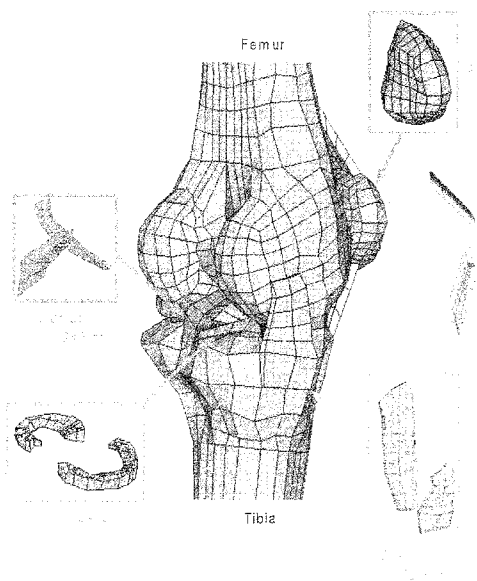


Fig. 1 Finite element mesh of knee joint

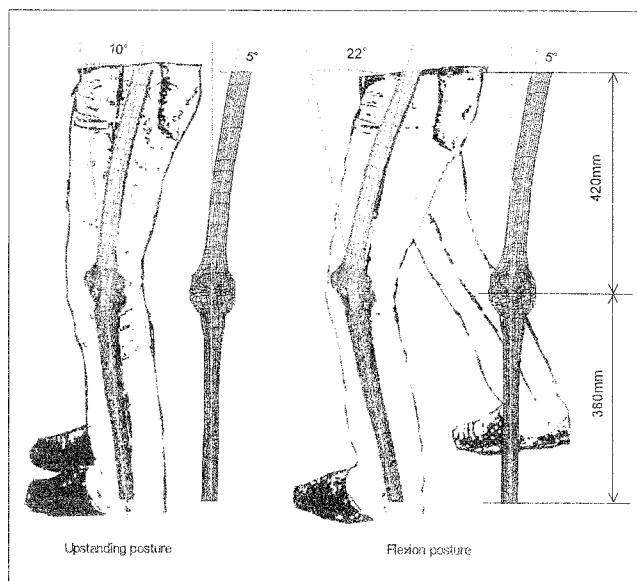


Fig. 2: Upstanding and flexion posture of FE model.

	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Density [g/cm ³]
Articular Cartilage	100	0.49	1.20
Subchondral Bone	5000	0.25	1.71
Cancellous Bone	203	0.45	1.16
Cortical Bone	17700	0.30	1.71
Meniscus	10	0.49	1.20
Bone Marrow	0.1	0.30	1.16
Patella	17700	0.30	1.17
Knee Ligament	350	0.30	1.10
Plate	210000	0.30	1.15
Patella Ligament	350	0.30	1.10

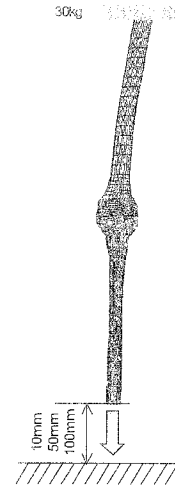


Fig. 3: Material properties and loading conditions.

2.2 解析条件

Fig.3 に使用した材料定数および荷重条件を示す。本解析では膝関節モデルの上端、または下端から荷重を与えるため、比較的単純な引張または圧縮状態になることが予想されるため、各組織は等方性弾性体と定義した。

衝撃荷重については 10mm、50mm、100mm の高さから落下した状態の加速度を与え、着地後 10ms までを解析した。上半身の体重を模擬した上部プレートは、衝撃時の落下防止のため荷重方向以外の変位を拘束し、脛骨下端には完全拘束とした。また、大腿骨、脛骨、半月板、膝蓋骨には接触設定を定義した²⁾。静解析モデルでは上記の設定を施すとともに、体重の半分を想定した 300N の荷重を大腿骨近位端から与えた。

3. 結果と考察

Fig.4 に解析モデルに衝撃および静荷重を与えた際の大腿骨の回旋の様子を示す。衝撃解析の結果では、大腿骨の内側、外側端に直線を引き、前後方向の変位と回旋を表している。大腿骨は体の内側に回旋（内旋）しながら前方へ変位し、後退するときには体の外側に回旋（外旋）している。

静解析の結果は、前後および内外側方向の相対的変位をそれぞれ矢印と数値で表している。内外側方向では内側部の変位量が大きく、前後方向では外側部の変位が大きいことから、静荷重では衝撃時に比べ、外旋が発生しやすいことが示唆された。

Fig.5 に 10mm から膝関節モデル全体を落下させ着地を再現した場合の直立姿勢、歩行姿勢、内

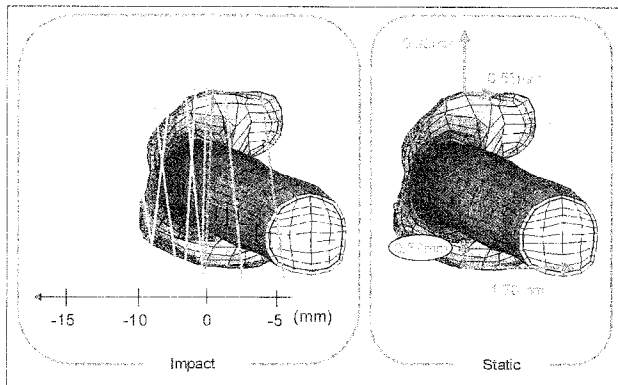


Fig. 4 Displacement for impact and static loading.

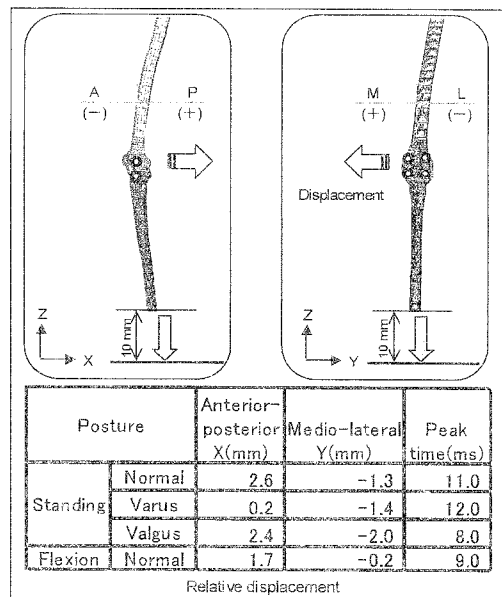


Fig. 5 Maximum equivalent displacements of postures in impact loading.

反, 外反姿勢モデルの最大相対変位量と発生時間を示す. 最大変位が発生する時間はどれも 10ms 前後であり, それほど差は見られなかったが, 相対変位量は内反姿勢モデルが最も少なく, 続いて歩行姿勢, 直立, 外反の順であった. 大腿骨と脛骨間の相対変位量が大きいほど, 靭帯などの軟組織が瞬間的に伸展させられると予想される. これらのことから, 歩行姿勢以外の角度で着地を行なうと, 小さい段差でのつまづき等でも軟組織に大きな負荷が加わり, 思わぬ怪我をする可能性があると考えられる. この傾向は 50mm, 100mm の場合も同様であった.

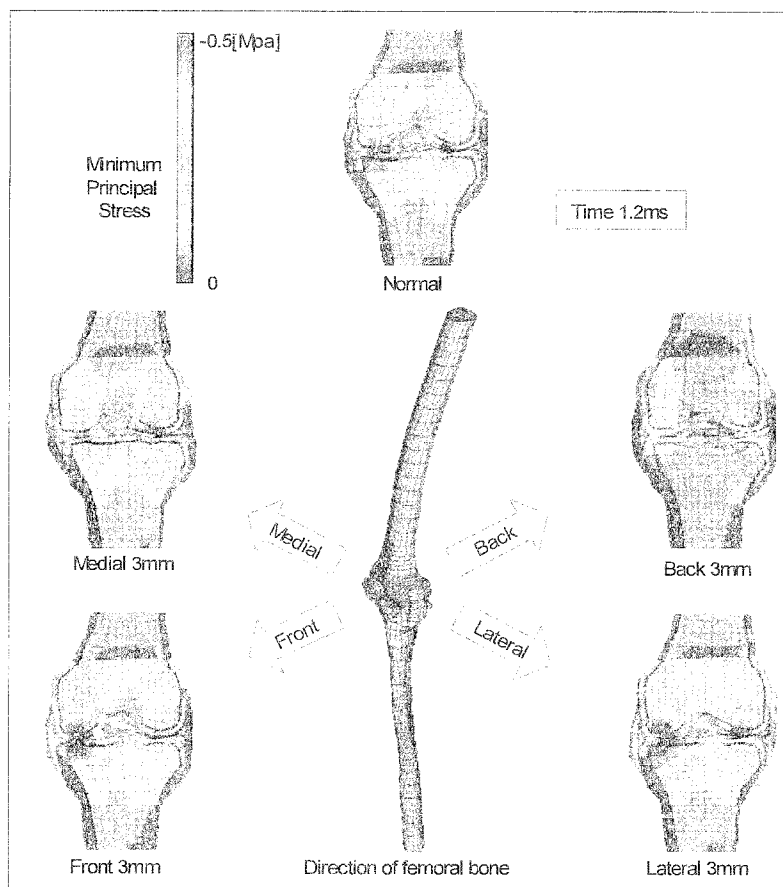


Fig. 6 Compress stress distribution of knee joint for impact load

大腿骨-脛骨の接触位置が数ミリずれたことを想定し, 直立姿勢モデルの大腿骨を前後左右に 3mm オフセットし衝撃荷重を与えたときの応力分布状態を Fig.6 に示す. 応力ピークは着地後 1.2ms で発生しており, 変位ピークが 10ms 前後であることとくらべ, はるかに早く衝撃荷重が伝達されていることを示している. 接触面を前方および外側に移動させた場合は, 大腿骨を移動させなかったものとあまり変化は見られなかった. 一方, 接触面を後方に移動させた場合では, 海綿骨部分の応力値が極端に低くなり, 内側に移動させた場合では応力ピーク位置が外側海綿骨へ変化した. この傾向は部分的に材料定数を変更した場合やメッシュ規模を変更した場合も同様であった. これらの結果から, 膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に大きな影響を与えることが予想される.

参考文献

- 1) John C.Gardiner and Jeffrey A. Weiss: Subject-specific finite element analysis of the human medial collateral ligament during valgus knee loading, Journal of Orthopaedic Research, No.21, pp.1098-1106, 2003.
- 2) K.Murase, F.Morita, N.Yoshino et. al. :Impact Load Transmission of Human Knee Joint using in vitro Drop-Tower Test and Three-Dimensional Finite Element Simulation., Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.2, No.4, pp.218-227, 2007.
- 3) 村瀬, 吉野, 福田, 堤 : 静荷重下における生体膝関節の FEM 浅屈曲シミュレーション, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.29, pp.253-260, 2008.
- 4) 村瀬, 山田:要素膨張充填による生体の三次元モデリング, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.26, 437-442, 2005.

音響放出による類似歯質/レジン界面の非破壊解析

Nondestructive Analysis of Simulated Tooth/Resin Interface using Acoustic Emission

Ja-Uk Gu¹, Nak-Sam Choi^{2*}, Kazuo Arakawa³

¹ Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

² Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1271 Sa3 dong, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-791, Korea. * Corresponding author. E-mail address: nschoi@hanyang.ac.kr

³ Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi 816-8580, Japan

Objectives. Polymerization contraction of the composite resin causes marginal disintegration with the bonded surrounding substrate and insufficient sealing of open dentinal tubules. The purpose of this study was to detect in real time acoustic emission (AE) signals arising during the polymerization shrinkage of composite resin restorations subjected to light exposure, and to suggest an AE method for nondestructive characterization of the marginal disintegration of the dental restoration.

Methods. Composite restoration based on different substrates and different adhesive bonding states was performed under the light curing. The contraction stress and the disintegration around the margin of the composite restoration are analyzed by measuring the circumferential strain on the outer surface of the ring type substrate. AE signals were monitored in real-time for observing the marginal disintegration process of the restoration in the cavity-type substrate. AE behaviors are compared to SEM analysis results of the marginal disintegration.

Results. All kinds of restoration specimens generated blast-typed AE signals having principally a frequency band of 100-200 kHz during the polymerization shrinkage. Bad bonding states caused

to generate many AE events having comparatively high amplitudes. The distribution of hit events versus curing time was significantly different depending on the ring substrates and the interfacial bonding treatments. The quantity of AE hit events for the human molar dentin specimens was much less than that for the steel ring specimen but more than that for the PMMA ring specimen.

Significance. It was ascertained that AE happened during the polymerization shrinkage of composite resin. Bad bonding states without an adhesive layer, or with an adhesive layer untreated by the light exposure, were represented by the generation of many AE events, especially in the initial curing period of one minute at high contraction rate. A good bonding state suppressed cracking and thus caused the little generation of AE during the curing of dental composite restoration. The number of AE hit events showed a steep increase with increasing the marginal gap size. The increase in the gap size represented the increase in the number of crackings along the margin and thus corresponded to the large number of hit events detected. Therefore, the AE behaviors can be used as a nondestructive evaluation index for the marginal disintegrative fracture of dental restoration.

Research Outcome:

- 1) Ja-Uk Gu, Nak-Sam Choi, Kazuo Arakawa, Debonding fracture between composite resin and artificial dental ring during the light curing, Proceedings of the Spring Conference of Korean Society for Composite Materials, Daejon, Korea, (May 1, 2009) pp.107-110.
- 2) A full paper submitted to 'Dental materials' Journal on November 30, 2009.

船首形状変更による波浪中抵抗増加低減に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

波浪中では静水中を航行する場合と比べて船舶に作用する抵抗が増加する。これは船体が、船体運動や入射波の反射波等に基づく非線形波を造波することによるエネルギーの損失に起因したものである。近年、CO2削減等の社会的要請もあり、船舶の推進性能は従来の静水中の性能のみでなく波浪中抵抗増加を含んだ形で評価されるようになってきている。こうした背景を受け、本研究では抵抗増加の小さな船首形状を、供試模型を用いた水槽実験による船体運動の計測と波形の計測を通じて実験的に調べることを目的としている。

2. 研究方法

船首形状を変更した複数の供試模型を用いた曳航試験によって、次の手順により研究を遂行する。

- (1) 2.5m 供試模型を用い、深海機器力学実験水槽において、船体運動計測試験を行い、非線形運動および波浪中抵抗増加を計測する。
- (2) 運動計測試験と同時に波形計測試験を行い、現在得られ難い波浪中航行時の非定常波形を計測する。
- (3) 取得データを解析し、船体運動および波形の非線形性の特性についてまとめるとともに、非定常波の波形解析からも抵抗増加を算出する。
- (4) 力の計測により得られた抵抗増加と波形から得られた抵抗増加の二つの視点から、船首形状の相違による抵抗増加の低減量を比較、検討する。
- (5) 一連の研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程3年	実験補助
松琴 卓也	広島大学工学部第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
池本 俊史	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4年	実験補助
吾郷 祐紀	広島大学工学部第二類情報工学課程	3年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 供試模型

本実験で使用した供試模型は分割模型となっており、船首部形状を容易に取り替えることができる。船首形状としては、船体番号 M09057 をオリジナル船型とし、主にチェーンライン位置とフレアー形状を変更した 6 種類を準備した。Fig.1 に本実験で使用した各船首形状の写真と船型番号、およびチェーンラインとフレアーの特徴を示す。なお、各船首部を装着した船体模型に対して重心位置や環動半径などの実験条件を一致させるため、バラストウエイトの調整を行っている。

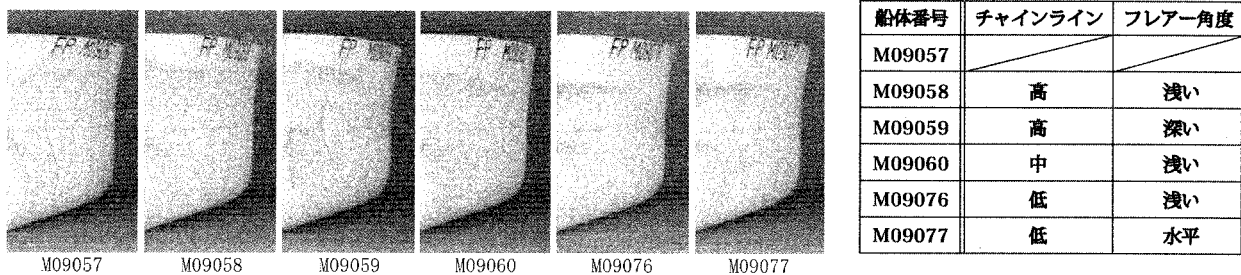


Fig. 1 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴

4.2 試験内容

運動計測

運動計測装置を用いて surge, heave, pitch の運動の計測を行い、前後のロッドに取り付けたひずみゲージにより船体に及ぼす抵抗を求める。位相基準は船体重心位置に入射波頂が来た時を $t = 0$ としている。運動計測試験は、静水中を航行する定常試験と造波機により起こされた入射波中を航行するときの非定常試験について行っている。実験条件はフルード数 $F_n = 0.19045$ 、非定常試験における入射波は正面向かい波で $\lambda/L = 0.3 \sim 3.0$ について行った。運動計測試験で用いる模型船体の模式図を Fig.2 に示す。

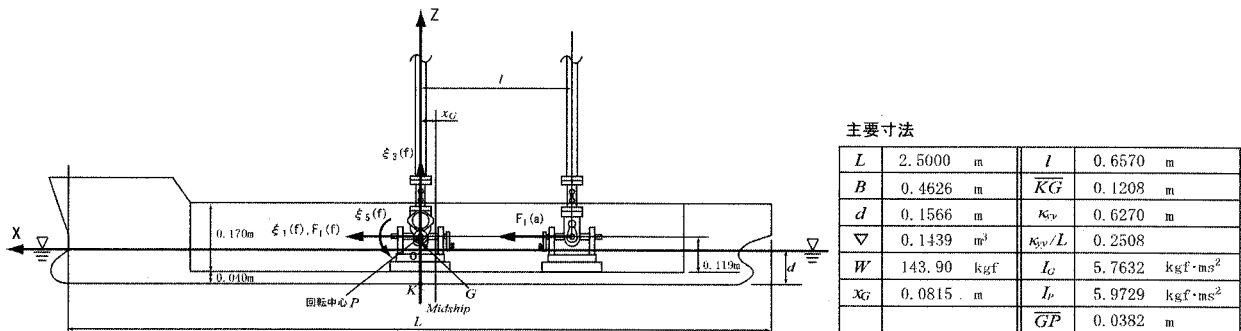


Fig. 2 運動計測試験時の模型セットアップ図および模型主要目

波形解析

Fig.3 に波形解析の模式図、また Fig.4 に容量式波高計を示す。水槽壁面に計 6 個の波高計を船の進行方向に縦並びに設置し、Fig.3 中の trigger の位置に船首が差しかった瞬間を計測開始時刻としている。波形計測は定常試験および非定常試験について行った。計 6 個の波高計は同時に calibration が可能であり、非定常試験における波高計間隔は入射波の λ/L に対応させて、等間隔位相でデータ取得できるように調整している。

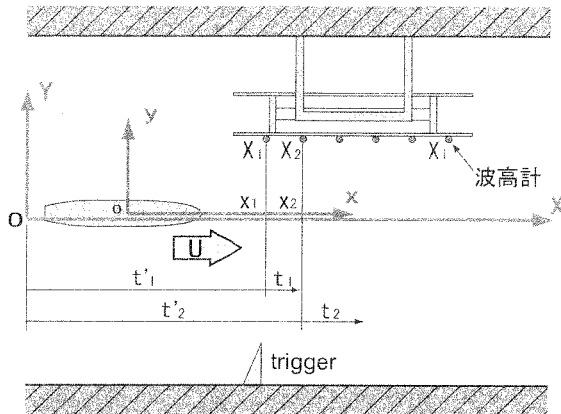


Fig. 3 波形計測装置セットアップ図

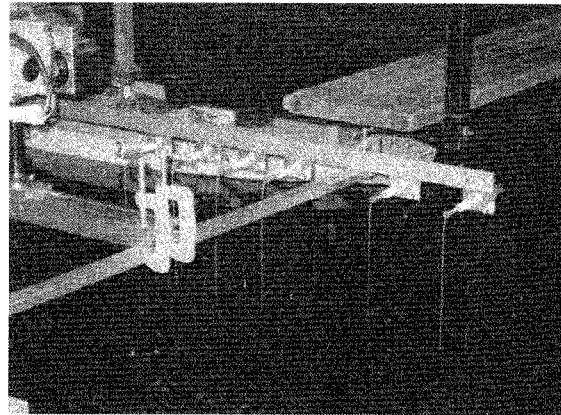


Fig. 4 容量式波高計

4.3 結果・考察

定常問題

水槽試験による定常航走時の各船型における x 方向流体力 (定常抵抗) とオリジナル船である M09057 からの増減率を Table.6.1 に示す。これによると定常抵抗の低減を考慮され設計されているオリジナル船が、予想通り最も低い抵抗値を示した。他の船については、M09058 はチェーンラインの存在による性能低下が著しく、逆に M09060 は比較的パフォーマンスが低いという結果を得た。

Table.1 各船首形状における定常抵抗

形状	抵抗係数	増減率
M09057	4.88E-03	-
M09058	5.01E-03	+2.7%
M09059	4.93E-03	+1.0%
M09060	4.91E-03	+0.7%
M09076	4.99E-03	+1.7%
M09077	4.96E-03	+1.6%

非定常問題

Fig.5 に実験で計測された抵抗増加のグラフを示している。横軸に λ/L 、縦軸に抵抗増加量を波振幅、主要船体寸法で無次元化した値を取っている。ここで言う抵抗増加とは、入射波ありの非定常実験で計測された surge 方向の力と入射波なしの定常実験で計測された surge 方向の力との差を意味している。また Fig.5 の右のグラフは海洋で主要な波長域である $0.3 \leq \lambda/L \leq 1.0$ の範囲において Fig.5 左のグラフを拡大したものである。

全船型で $\lambda/L = 1.3$ 付近において抵抗増加がピークとなることが分かる。また、船首形状ごとの変化を見ていくと、ピーク付近から長波長域にかけては違いは少なく、逆に短波長域において大きな優劣が見られる。Fig.5 の左図で細かく確認してみると、まずオリジナル船である M09057 は他の船に比べ明らかに抵抗増加が大きく、チェーンラインの追加により抵抗増加の減少が発生したと判断できる。また、オリジナル船以外では、M09059, M09060 は比較的抵抗が大きく、M09058 は λ/L の値によってバラつきが見られ、逆に安定して抵抗が少ないと思われるのは M09076, M09077 と読み取れる。これら二つはチェーンラインを最も高めに設計している船首形状の二つであるため、このような高めのチェーンラインは $0.3 \leq \lambda/L \leq 1.0$ の入射波において全体的に抵抗増加を減らす働きがあると分かった。

船体運動

Fig.6 に各船型の波浪に対する船体運動とその位相のグラフを示している。左から surge, heave, pitch となっており、全グラフとも横軸には入射波の波長の無次元量である λ/L 、縦軸には運動振幅を入射波振幅で無次元化したもの、波浪に対する船体運動の位相を示している。

heave, pitch 運動においては λ/L が 1.0 を越えた付近に運動の同調点が存在するのに対して surge の運動には同調点は存在しない。これらの運動の結果には、各船型において実験値のバラツキ以上のものは見られない。先のフレア形状の違いによる抵抗増加低減は、運動の違いに因り低減したものではなく、船首領域からの入射波の反射等の低減効果に依存したものであることが推察される。

全抵抗

船首形状の違いによる性能の優劣は、船体に作用する全抵抗(定常抵抗+抵抗増加)で判断するべきである。抵抗増加で優位であっても静水中定常抵抗が大きくては全抵抗としては性能は劣るものとなるからである。抵抗増加は入射波の波振幅の 2 乗に比例するため、抵抗増加の優位性は波振幅が大きい程顕著となる。そこで、波租度 $H/\lambda = 1/20$ に対して各船首形状の違いによる全抵抗の比較を行ってみることにする。

Fig.7 は横軸に λ/L , 縦軸に $H/\lambda = 1/20$ 時の抵抗増加と定常抵抗の和を無次元化したものを表している。チャインラインが高めに設計されている M09076 や M09077 が良い性能を示すことが分かる。 $\lambda/L = 0.6 \sim 0.8$ 付近における全抵抗は 20 % 程度低減されていることが分かる。無論、この低減率は波租度が大きくなるに伴い増大することになる。実海域での推進性能向上においてこれら船首形状の優位性が確認できたことになる。

波形解析

力の計測により示された船首形状の相違による抵抗増加低減の事実を波形の観点から検証することができる。抵抗増加は船体が非定常波を造波することにより発生するものであるから、抵抗増加が低い船型であれば造波した非定常波の振幅も小さくなるはずである。

参考までに、Fig.8 にオリジナル船首形状船型に対して計測・解析して得られた非定常波形を示している。この波を波形解析理論を用いて解析することにより、素成波の振幅や位相を表わす Kochin 関数、およびそれに重みを掛けて積分することにより抵抗増加が算出できる。Fig.9 に Kochin 関数の例を示している。

Fig.10 に実験による検力計の結果および Kochin 関数から算出された抵抗増加を示す。力の計測により得られた抵抗増加と波形から算出した抵抗増加とは良好な一致を示している。抵抗増加が最大値を取る近傍で、波形解析による抵抗増加の方が低めになっているのは、船首からの碎波抵抗等に起因する非線形な影響であると思われる。波形解析による抵抗増加の結果からも、M09076 や M09077 が他の船型に比べて短波長領域で低い抵抗増加を示すことが確認された。

5. まとめ

定常抵抗, 波浪中船体運動, 抵抗増加をチャインラインやフレア形状を変更した 6 種類の船首形状で計測比較し, 優秀な性能を示す船首形状の検討を行った。また同時に波浪中を動揺しながら前進する船体が造波する非定常波形を計測することで波形解析の観点からも確認を行った。本研究より得られた結論を示すと次のようになる。

- (1) 船首に強いフレアを付けることで、特に $\lambda/L < 1.0$ の短波長域において抵抗増加が低減されることが確認された。本実験で特に優秀な性能を示した船首形状は M09076 と M09077 である。
- (2) 船首に強いフレアを付けることで、静水中の定常抵抗は増加する傾向にあるが、その増加量は微量であり、波租度が大きくなるに従い、抵抗増加の低減効果の方が顕著になる。波租度 $H/\lambda = 1/20$ であれば $\lambda/L = 0.6 \sim 0.8$ において約 20 % もの全抵抗低減が達成できることが確認された。

(3) 非定常波の計測を行い、波形解析理論を適用することにより船首形状の相違による抵抗増加の低減効果の確認を行った。その結果、非定常波形解析による結果は力の計測により得られた結果と良好な一致を示し、非定常波形の観点からも上記船型が優秀であると結論付けられた。

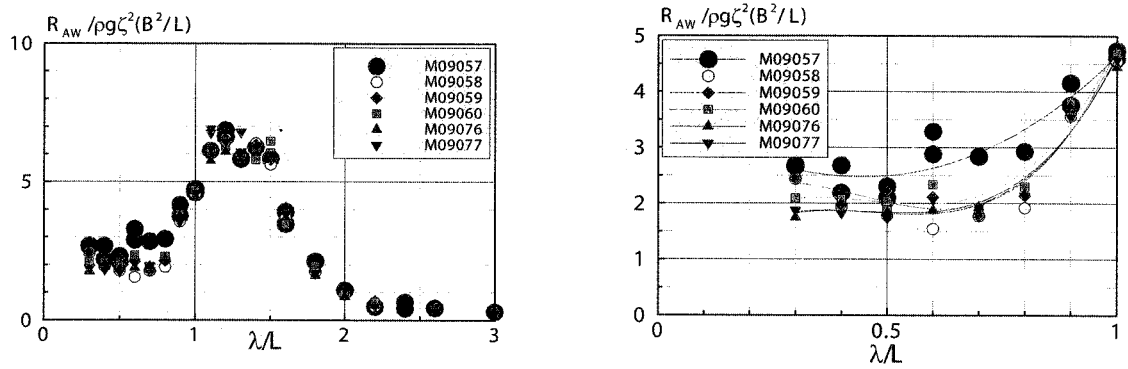


Fig. 5 Added wave resistance for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

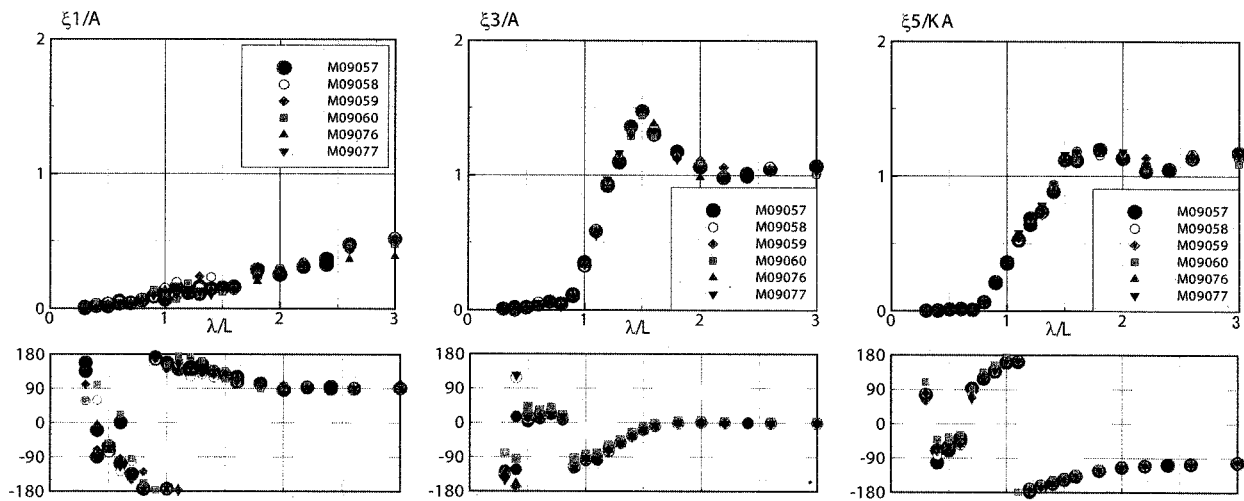


Fig. 6 Ship motions for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

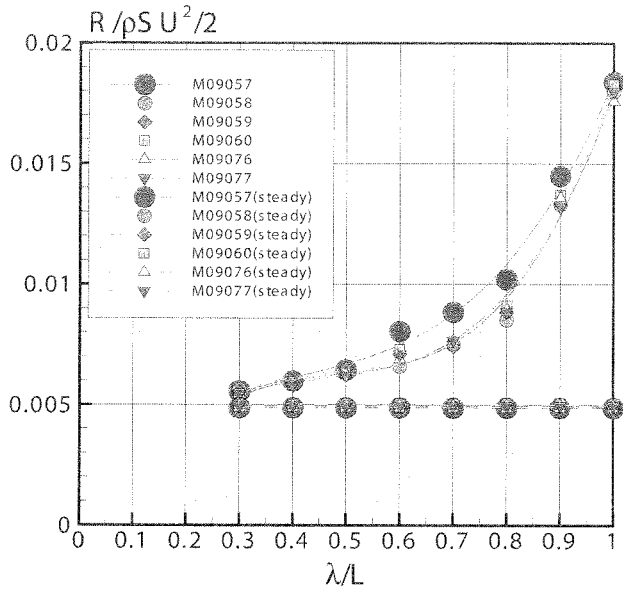


Fig. 7 Total wave resistance for different bow shapes ($F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs., $H/\lambda = 1/20$)

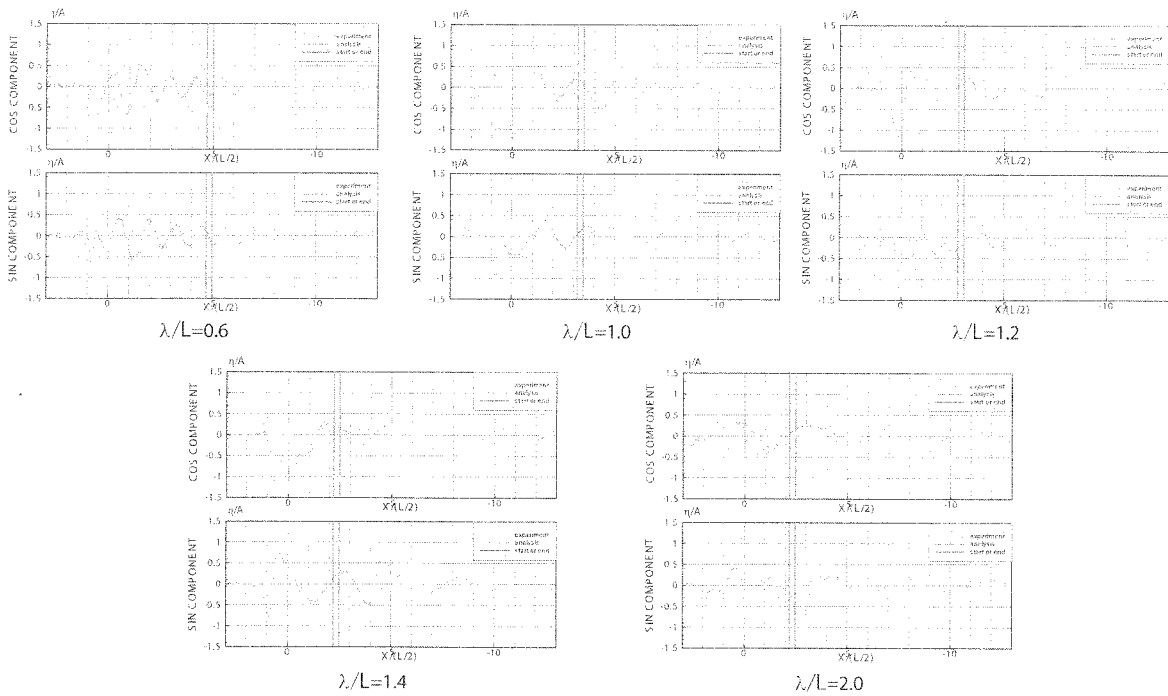


Fig. 8 Unsteady waves for M09057 model at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

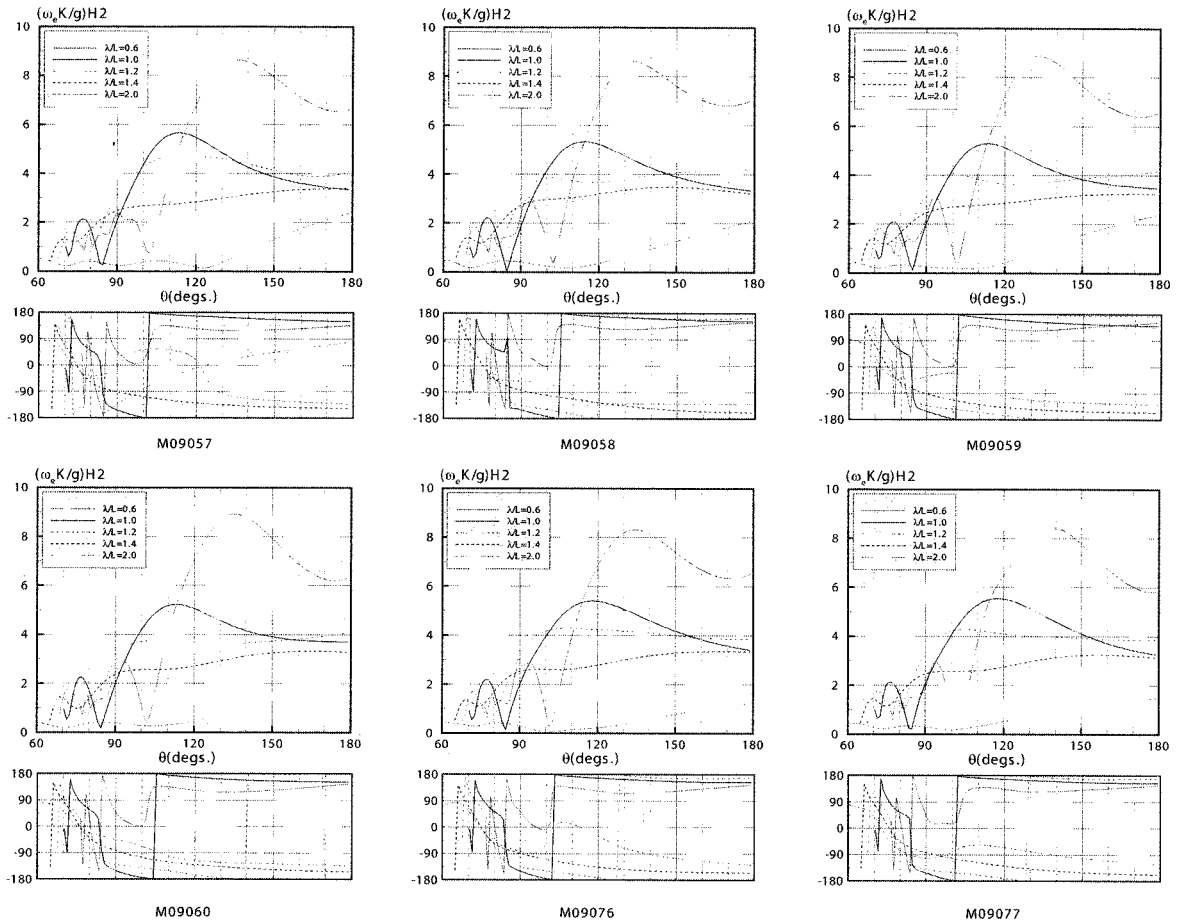


Fig. 9 Kochin functions for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

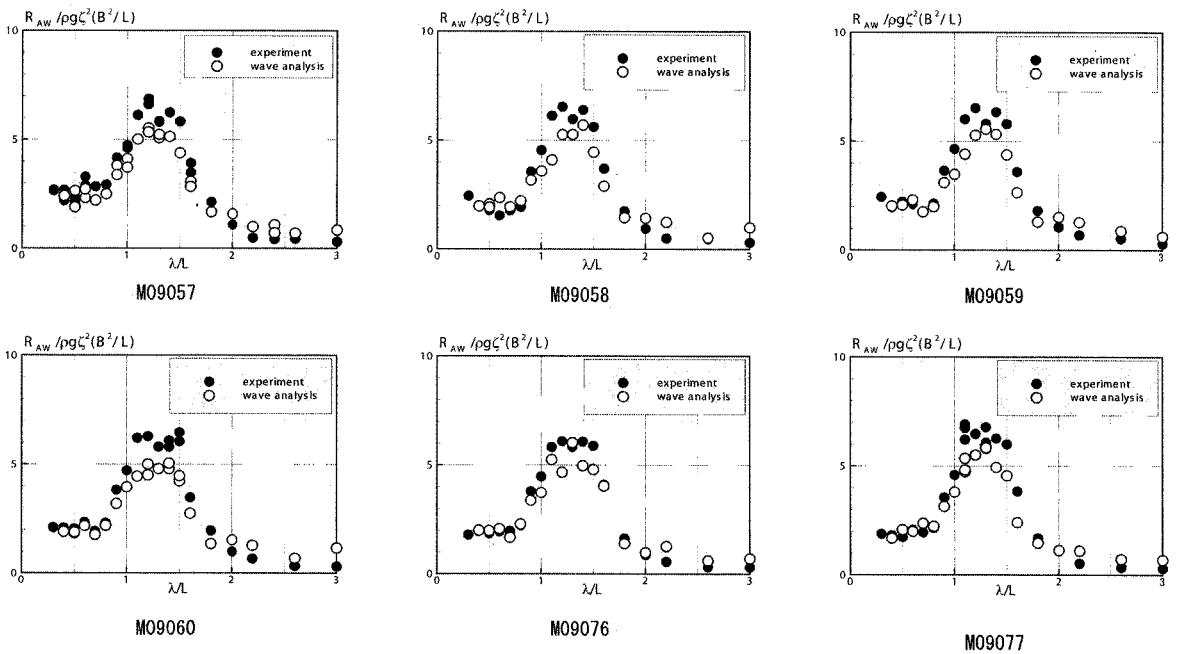


Fig. 10 Comparisons of added wave resistance between measured by load cell and unsteady waves, at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

浅喫水船の波浪中抵抗増加に関する研究

柏 木 正

大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1, E-mail: kashi@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

1. 研究目的

船舶の波浪中抵抗増加の研究は、これまで数多く行われてきたが、最近、実海域での船の推進性能予測・評価の重要性が認識されるに伴い、不規則波中での抵抗増加の推定や、これまで研究例の少なかった軽荷状態（バラスト状態、浅喫水）での抵抗増加の推定に注目が集まっている。特にバラスト状態では、従来の計算法による値は、短波長域で実験値より大分小さいことが指摘されているが、その定量的で物理的な説明は十分に行われているとは言えない。

これについて研究するためには、非定常波形解析理論によって、波振幅関数レベルでの理論値と計測値の比較をすることにより、間接的に碎波や粘性の影響を調べる手法が有効であると考えられる。この非定常波形解析法は応用力学研究所で開発され、計測・解析システムが完備されているため、共同研究によってその計測装置やノウハウを利用して頂きたいと願っている。

2. 実験と数値計算

Experiments were carried out in head waves, measuring the wave-induced motions (surge, heave, and pitch), the added resistance by a dynamometer, and also ship-generated unsteady waves using six wave probes of capacitance type which are positioned with almost equal intervals over one period of encounter. The spatial distribution of cosine and sine components in the unsteady wave oscillating with circular frequency of encounter ω were obtained by the least-squares method using the data measured with six wave probes along a longitudinal line parallel to the x -axis (at constant y).

The ship model used in the experiments and also numerical computations is a modified Wigley model with wider breadth, expressed mathematically as

$$\left. \begin{aligned} \eta &= (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + 0.6\xi^2 + \xi^4) + \zeta^2(1 - \zeta^8)(1 - \xi^2)^4 \\ \xi &= \frac{2x}{L}, \quad \eta = \frac{2y}{B}, \quad \zeta = \frac{z}{d} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

where the real dimensions are $L = 2.5$ m, $B = 0.5$ m, $d = 0.175$ m (which is called standard draft). The gyrational radius in pitch and the center of gravity were set to $\kappa_{yy}/L = 0.236$ and $\overline{OG}/d = 0.177$ (below the free surface).

The lateral distance of a longitudinal line used for the wave measurement from the centerline of a ship model (i.e. x -axis) was set equal to $y = B/2 + 0.1\text{m} = 0.35$ m. The Froude number was $Fn = 0.2$ in all measurements.

Numerical computations corresponding to the experiments were performed by means of the enhanced unified theory (EUT) developed by Kashiwagi (1995). This theory can compute the surge-related quantities with 3-D and forward-speed effects taken into account and also the effect of wave diffraction near the bow by retaining the contribution of the x -component of the normal vector in the body boundary condition. In EUT, the radiation and diffraction problems are solved, with 3-D and forward-speed effects incorporated through a homogeneous component in the inner solution, and those effects are reflected through the matching procedure into the source distribution $Q_j(x)$ in the outer solution and then the Kochin function to be computed from (??) and (??). Of course the complex amplitude X_j was determined by solving the equations of ship motion.

3. 結果と考察

Figure 1 shows a comparison of the added resistance, in which open circles show the results measured by a dynamometer and the solid line shows computed results by EUT in terms of the Kochin function and Maruo's formula (??). Closed triangles indicate the results obtained from the wave-pattern analysis (??), using the measured data over the range of $3 > x/(L/2) > -5$ and no correction is made for the downstream wave profile. One example of the measured wave elevation is shown in Fig. 2 which is for $\lambda/L = 1.0$, and the cosine and sine components correspond to the coefficients in the Fourier-series expansion and thus they can be expressed as $\zeta(x, y) = \zeta_C(x, y) - i\zeta_S(x, y)$ in complex notation.

In order to compare this wave profile with computed one and to understand effects of the local wave and lateral distance in the wave measurement and which part of the wave is dominant in the prediction of the added resistance, numerical computations of the wave elevation and added resistance were performed using EUT.

It should be noted that the position of the source distribution in EUT is, as shown by (??) or (??), just on the free surface ($z_s = 0$) and along the x -axis ($y_s = 0$). In this case, as shown in Fig. 3, the shorter-wavelength component becomes conspicuous, which looks much different from the measured one. However, it is confirmed that the added resistance computed from the Fourier transform of this computed wave profile is in virtually perfect agreement with the solid line shown in Fig. 1. (It is noteworthy that the wave measurement has been done only with six wave probes, which may not be enough for resolving shorter waves.)

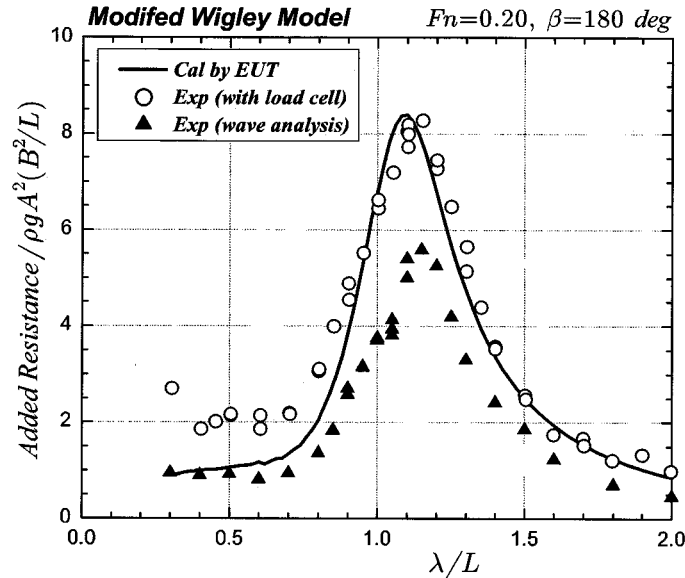


Fig.1 Comparison of the added resistance on modified Wigley model in head waves at $Fn = 0.2$.

Anyhow, to suppress the amplitude of shorter-wave component, the depth-wise position of the source distribution is slightly shifted with $z_s = 0.004 d$ (0.4% of draft). This slight shift affects greatly the result of the wave profile, resembling the measured one. However, the resulting added resistance computed from (??) becomes much smaller than the value by the original EUT.

Thus the entire wave profile is 1.75 times magnified and shown as Fig. 4. With this magnification in the amplitude, the added resistance becomes almost the same as that to be computed from Fig. 3.

By comparison between Fig. 2 (measurement) and Fig. 4 (computation), prominent discrepancy can be seen in the range of $1 > x/(L/2) > 0$. In EUT, the far-field disturbance by a ship is represented by the source distribution along the x -axis, whereas in the experiment, the half breadth of ship model is $B/2 = 0.25$ m and thus the so-called displacement effect becomes obvious (the wave pattern tends to be shifted to transversely outward direction).

Through the present numerical study on the analysis of wave profile and resultant added resistance, following facts have been found:

[1] The amplitude (profile) of the wave generated near the bow and propagating ahead is dominant in the added resistance. In the examples shown as Fig. 2 – Fig. 4, the waves at $|x/(L/2)| < 1$ are especially important and little influence exists from the downstream waves. This implies that the prediction of the added resistance from the measured wave elevation can be successfully made without any correction for the downstream waves (which actually cannot be measured due to reflection from side walls of a towing tank).

[2] The effect of local wave is very small and negligible in the added resistance. In fact, the added resistance was virtually the same irrespective of whether the local wave components in (??) are included in the numerical computation by EUT.

[3] The effect of lateral position in the wave measurement is also very small. In fact, the wave profile was computed also at $y = L/2 = 1.25$ m (the result of which is shown as Fig. 5) and the added resistance computed from this wave profile was virtually the same as that computed from the wave profile at $y = 0.35$ m shown in Fig. 4.

From the consideration above, relations between the added resistance and the unsteady wave analysis were

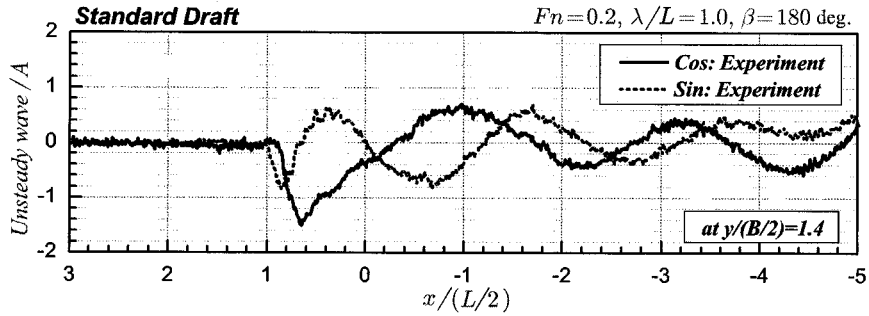


Fig. 2 Unsteady wave generated by modified Wigley model, measured by wave probes positioned at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$.

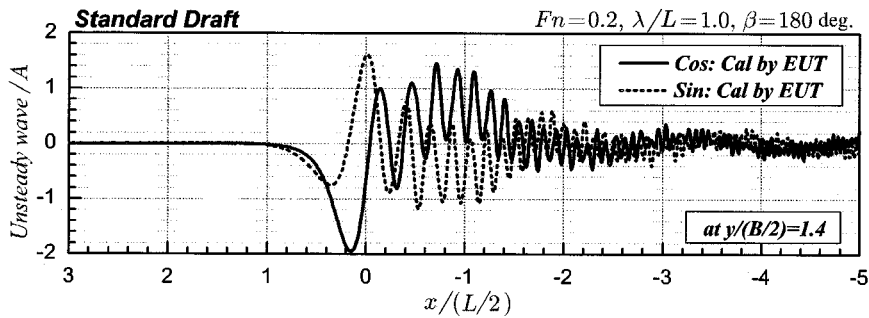


Fig. 3 Unsteady wave generated by modified Wigley model, computed with EUT at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$. The source distribution is placed at $z_s = 0.0$.

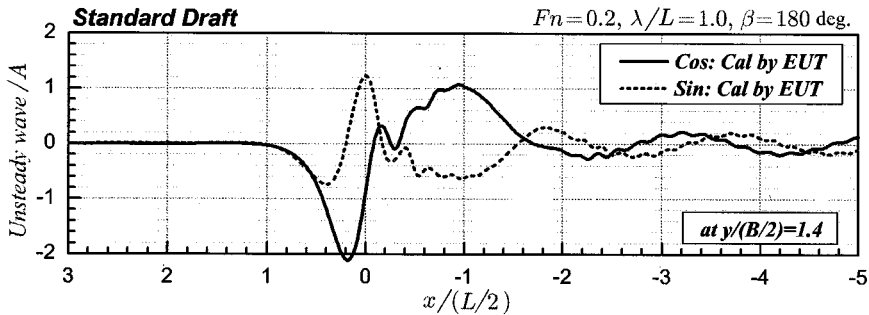


Fig. 4 Unsteady wave generated by modified Wigley model, computed with EUT at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$. The source distribution is placed at $z_s/d = 0.004$ and the amplitude is 1.75 times magnified.

elucidated. Consequently it can be understood that careful attention must be paid in measuring the waves (including short-wavelength component) generated from the bow part of a ship, because slight error in the wave amplitude may result in large difference in the added resistance.

References

- 1) Ohkusu, M. 1980: Added Resistance in Waves in the Light of Unsteady Wave Pattern Analysis, *Proc. of 13th Symp. on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, pp. 413–425.
- 2) Kashiwagi, M. 1995: Prediction of Surge and Its Effect on Added Resistance by Means of the Enhanced Unified Theory, *Trans. West-Japan Society of Naval Architects*, No. 89, pp. 77–89.

1. 目的

近年、多くの種類の波力発電装置が考案されているが、その中でも益田氏により考案された後曲げダクトブイ (Backward Bent Duct Buoy、以後 BBDB) はその優れた発電特性から、将来性が期待されている浮体型の波力発電装置である。Fig.1 は BBDB の基本的な構造を示した断面図である。BBDB は浮力体 (Buoyancy Tank)、L 字型のダクト (Duct と Air Chamber) 及びタービンにより構成されており、チェーン等により定点係留される。波は図中の左側から右側に向かって進行し、主に Surge、Heave、Pitch の各運動が BBDB に発生する。これらの浮体運動により L 字型ダクト内部の海水が動き、これにともなってダクト上部の空気室 (Air Chamber) の体積が変動する。さらに、この体積変化により発生する空気流を、空気室の上部に装備したタービンを用いて電気エネルギーに変換する。

本研究は、BBDB の不規則波中応答試験における空気室圧力等を計測し、一次変換効率を求め、規則波中応答試験の結果と比較することを目的とする。

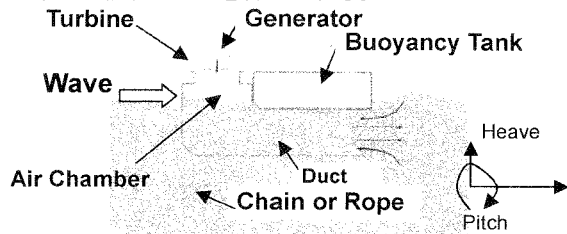


Fig.1 Principle of BBDB

2. 実験装置と実験方法

実験は応力研所蔵の深海機器試験水槽で行った。1/3 有義波高が 3cm、平均周期が 1.3s の JONSWAP 型スペクトルを持つ不規則波を造波し、模型と造波機の中点、および模型横の 2 点に波高計を設置して入射波高を、模型空気室の上部に設置した超音波式波高計と圧力計を用いて、空気室内水面変動と圧力をそれぞれ計測した。本研究で用いた三次元水槽の概略図を Fig.2、模型の概略図を Fig.3 示す。

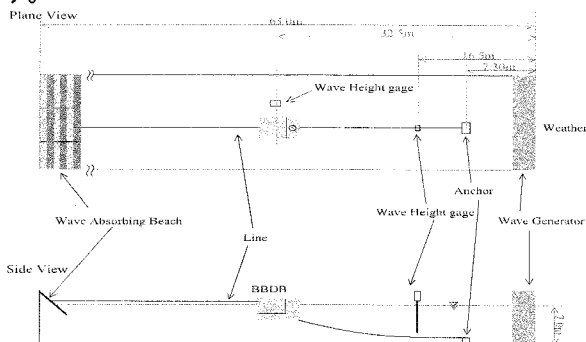


Fig.2 Schematic view of three dimensional tank

3. 実験結果と解析

実海域では、不規則波を様々な波高と周期の規則波が重ね合ったものと考えることが出来る。不規則変動の瞬時値を完全に予測することは困難であるが、その不規則変動

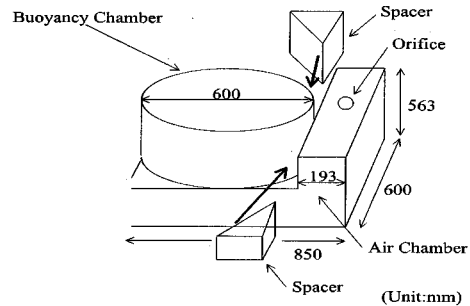


Fig.3 Model of Backward Bend Duct Buoy

の統計的性質に着目すれば、この一見規則性を欠く変動についての種々の情報を得ることができ、予測が可能となる。様々な手法があるが、本研究では、スペクトル解析を用いて解析を行った。

3.1 入射波の選定

Fig. 4(a) ~ (c) に模型と造波機の中点に設置した波高計、模型横波高計で計測した波高 $\zeta_1(m)$ 、 $\zeta_2(m)$ 、および空気室圧力 $P(Pa)$ をそれぞれ示す。模型と造波機の中点に設置した波高計と模型横の波高計は 16m 離れており、入射波の伝播に時間を要する。圧力と入射波の対応を見るためには、模型横の波高計のデータを用いるべきであるが、模型からの反射波が影響している可能性がある。その影響を知るために伝播に要した時間を求め、その時間分ずらした模型横の波高データのパワースペクトルを模型と造波機の中点に設置した波高計の波高データと比較する。

まず、模型と造波機の中点に設置した波高計のデータの平均周期 $T_e = 1.25(s)$ から郡速度 $C_g = 0.975(m/s)$ を求めた。そして伝播に要した時間 16.41(s) を算出し、時差を解消する。これらの値を Fig. 5 (a) ~ (c) に示す。さらに、この時の ζ_1 と ζ_2 のパワースペクトル S_{xx1} 、 S_{xx2} を Fig. 5 に示す。 S_{xx2} が S_{xx1} よりも大きい値を示している。反射波の影響と考えられるが、この程度ならば実験結果に与える影響は比較的少ないと考え、造波機と浮体の中点の波高計の計測値を入射波とした。

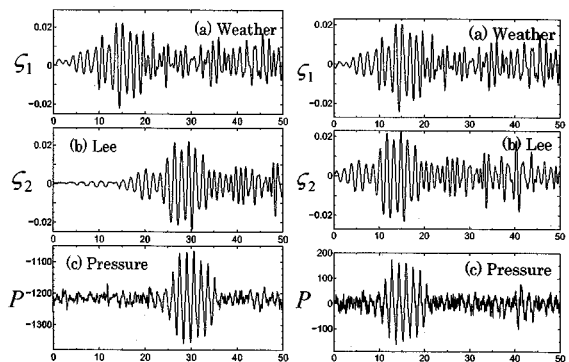


Fig. 4 Original Time series Fig. 5 Modified Time series

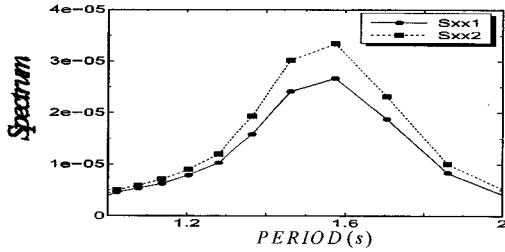


Fig. 5 Spectrum of incident wave

3.2 スペクトル解析と規則波との比較

入射波、圧力、内部水面変動のパワースペクトルは S_{xx} 、 S_{pp} 、 S_{hh} とする。また、入出力の関係より、入射波と圧力の応答関数 $|H_p|$ は次式で表される。

$$|H_p(\omega_k)| = \sqrt{\frac{S_{pp}(\omega_k)}{S_{xx}(\omega_k)\rho^2g^2}} \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。入射波と圧力のパワースペクトルと、その2つの応答関数と規則波との比較を Fig. 6 に示す。応答関数の縦軸は比圧力、横軸は周期(s)である。規則波と比較して不規則波はピークがほとんど出でおらず、全体的に一定値を示している。

次に、不規則波に対する BBDB の一次変換効率をもとめる。まず、圧力の複素フーリエ成分 $P(\omega_k)$ 、内部水面変動の複素フーリエ成分 $\zeta(\omega_k)$ を用いると、クロススペクトル $S_{ph}(\omega_k)$ は、

$$S_{ph}(\omega_k) = \frac{4\pi}{T} P(\omega_k) \overline{\zeta(\omega_k)} \quad (2)$$

で求められる。ここで、複素フーリエ成分の上付きバーは複素共役を表す。周波数応答関数の位相 $\omega_k \tau_k$ はクロススペクトルの偏角を用いて、

$$\omega_k \tau_k = \arg(S_{ph}(\omega_k)) \quad (3)$$

で求められる。また、入射波エネルギーのスペクトル $W_i(\omega_k)$ 、出力エネルギーのスペクトル $W_{out}(\omega_k)$ は

$$W_i(\omega_k) = \rho g B \int_0^\infty S_{xx}(\omega_k) C_g(\omega_k) d\omega_k \quad (4)$$

$$W_{out}(\omega_k) = 0.5 A_w \omega_k \sqrt{|P(\omega_k)|} \sqrt{|\zeta(\omega_k)|} \sin \omega_k \tau_k \quad (5)$$

で求められる。ここで B は BBDB の幅、 A_w は空気室断面積である。一次変換効率の周波数応答関数は

$$|H_E(\omega_k)| = \frac{W_{out}(\omega_k)}{W_i(\omega_k)} \quad (6)$$

で求められる。Fig. 7 に入力と出力のエネルギーのスペクトルと応答関数（一次変換効率）と規則波の一次変換効率を示す。この図において、規則波中および不規則波中での BBDB の一次変換効率特性は、ほぼ同様の傾向を示している。しかしながら、規則波中での変換効率と比較して不規則波中のものは全体的に低い値を示しており、規則波のピーク時の値と比較して、不規則波中では、65%程度まで低下している。

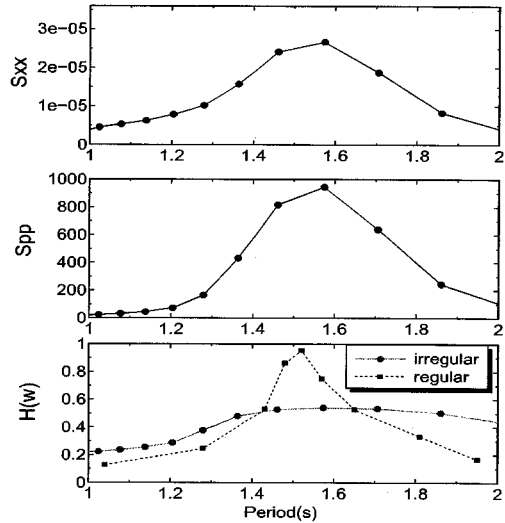


Fig. 6 Spectrum of incident wave and pressure

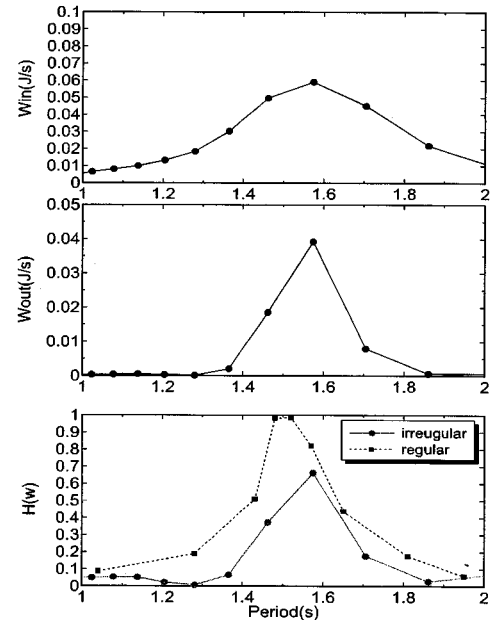


Fig. 7 Spectrum of energy

4. 結論

本研究では、深海機器実験水槽を用いて BBDB の不規則波中応答試験を行った。得られたデータからスペクトル解析を行い、規則波中応答試験との比較をし、以下の結論を得た。

- 圧力の結果から、不規則波実験では規則波実験で得られたようなピークは計測されず、規則波実験での平均値程度で一定している。この原因として考えられるのは、空気室などの非線形性の影響と考えられる。
- 一次変換効率の結果から、不規則波実験では、規則波実験で得られた効率よりも 35%程減少することがわかった。また、規則波実験で示された一次変換効率特性に追従していることが分かった。これらのことから、実海域で使用の際、その海域での代表的な周期に対応する装置の寸法で設計を行うことで大きな発電量を得ることが出来ると考えられる。

トワイマン・グリーン干渉計を用いたレーザー誘起音響波の測定

豊橋技術科学大学 鈴木 新一

1. まえがき

歯科インプラントにおいて骨への経時的固定率を評価することは重要である。現在の主な評価法として、埋入トルク値（30～40N・cm）からの評価と、共振周波数から評価する手法が知られているが、それぞれにおいて問題点が指摘されている。埋入トルク値からの評価に関しては、接触式であり、インプラント周囲の骨が圧迫壊死する可能性がある。また、初期安定性の評価しかできず、経時的評価が不可能である。共振周波数からの評価に関しては、非接触式であるが、用いられるISQ値の科学的根拠が分からないなどの問題点が挙げられる。

そこで我々は、レーザー誘起超音波法⁽¹⁾⁽²⁾を用いて、植立後の歯科インプラントの骨への固定率を非接触かつ経時的に評価できるシステムの開発を目指している。レーザー誘起超音波法は、被測定面にレーザー光を照射し、熱吸収によって被測定物内に超音波（弾性波）を発生させる非接触・無侵襲な計測法である。生じる弾性波は、伝ばする媒体の力学的な性質に影響されるので、弾性率、吸光係数、熱膨張などの物性情報が得られる。この手法は産業応用⁽³⁾⁽⁵⁾のみならず、生体情報計測を基盤とする医用工学に非常に有効である。本手法では、低エネルギーのパルスレーザーを植立後の歯科インプラントに照射し、非接触で歯科インプラント内に超音波を誘起させると、骨との界面における音響インピーダンスの差異により、界面の反射超音波の性質が変化する。この反射超音波信号を光干渉計を用いて非接触かつ無侵襲で検出することにより、歯科インプラントの骨に対する固定率を評価することが可能となる。本研究では、インプラント体と同質のチタン板の弾性波を測定した。また、実際のインプラント体と骨のモデル（ポリウレタン製ファントム）にそれを埋め込んだ場合の共振周波数を測定し、その違いを調べた。

2. 実験方法

図1に今回使用した実験システムを示す。図1の左側が試料に超音波を誘起する励起系を示しており、右側が試料に誘起された超音波により生じた変位を検出する検出系を示している。まず励起系について述べる。Nd:YAGレーザー（波長：1064nm パルス幅：10ns）から照射されたパルス光はビームスプリッターにより二つに分けられる。ビームスプリッターを反射した光はフォトダイオードで受光され、トリガー信号となる。一方ビームスプリッターを透過した光は、試料を照射する。この照射された光エネルギーは試料表面で吸収され、熱エネルギーとなり、熱膨張が生じる。そして熱膨張により弾性波が発生する。この弾性波はデルタ関数的なパルスエネルギーによって生じるため、様々な周波数を有している。

次に、図1の右側の検出系について述べる。検出系は微小変位を高感度に非接触計測する集光型の2光束干渉計を採用した。光源にはCWのHe-Neレーザー（波長：633nm）を用いた。He-Neレーザーからの光はビームスプリッターにより二つに分けられる。ビームスプリッターを反射した光はミラーで反射し、ビームスプリッターを透過した後、フォトダイオードに入射する。これが参照光となる。一方ビームスプリッターを透過した光は、試料を照射し、反射光の一部がビームスプリッターにより反射され、フォトダイオードに入射する。これが物体光となり、上述の参照光と干渉する。この干渉信号により、励起系で誘起された試料表面の変位を検出することが可能となる。しかしながら本干渉計において、物体光である粗面からの反射光は位相が乱れ、良好な干渉信号を得ることが難しいなどの問題点が挙げられる。そこで対物レンズを用い、粗面上での集光径を小さくすることにより、反射光の位相面の乱れを軽減することができる。

3. 結果と考察

図2にインプラントと同質であるチタン板の結果を示す。図2(a)は、干渉計により検出した弾性波を高速フーリエ変換(FFT)した結果である。また、図2(b)はAEセンサにより測定した結果である。板厚1mmのチタン板の場合、干渉計では2.86MHz、AEセンサでは2.87MHzとほぼ同じ値を示した。

弾性波の周波数は材料の厚さに依存する。音速 v 、厚さ d の場合、弾性波の共振周波数 f の理論式は、次式となる⁽⁴⁾。

$$f = v / (2 * d) \quad (1)$$

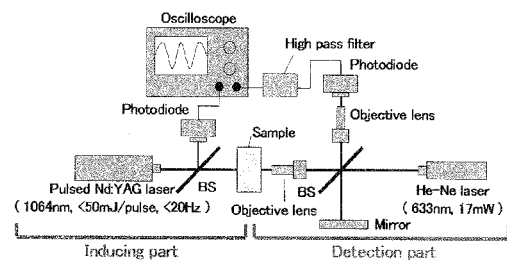


Fig.1 Experimental set-up.

一般的なアルミニウム内の音速は 5990m/s である。板厚 1mm の場合、上式より理論値 f は 2.99MHz となり、実験値は近い値を示した。すなわち、この結果は計測装置がインプラント体へ有効であることを示している。

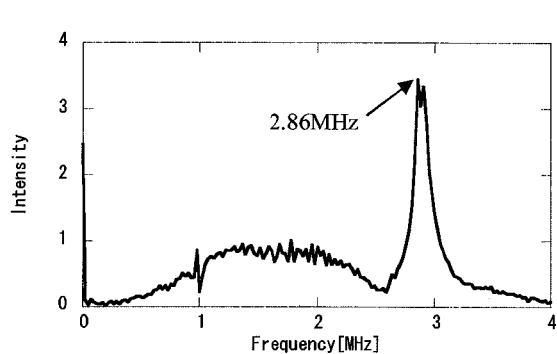
次に、図 3 にインプラント体および骨ファントムに埋入したインプラント体の測定結果を示す。インプラント体および埋入インプラントは、170kHz、415kHz で同じ共振周波数が得られた。これは、インプラント体そのもののもつ共振周波数であると考えられる。また、埋入した時と比べインプラント体のみ独自の共振周波数(756kHz、659kHz)が得られた。この結果は、インプラントを埋入した時に示す共振周波数が違うことを示している。すなわち、本装置がインプラントの骨への経時的評価の可能性を示している。

4. まとめ

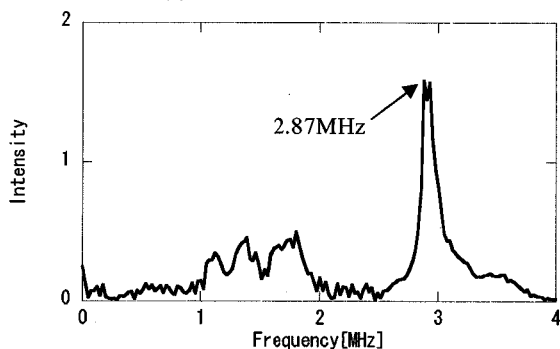
レーザー誘起超音波装置を使用し、物体内に生じる弾性波の共振周波数を測定した。試料には、インプラントと同質のチタンを用いた。また、インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数を測定した。チタンでは、干渉計と AE センサが同じ共振周波数を示し、本装置がインプラント体へ適応可能であることを示した。そして、インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数に違いが表れた。この結果は本装置が骨への固定率を経時的に評価できる可能性を示した。

参考文献

- (1) 澤田嗣郎編: 光熱変換分光法とその応用, 学会出版センター, (1997), 117.
- (2) 澤田嗣郎編: 音響分光法とその応用, 学会出版センター.
- (3) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光: 音響法による不透明多層膜計測-粗面微小振動計測技術-, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演文集, (2004), 1277.
- (4) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光, 藤井義樹, 小林宏明: 光熱変換効果による不当面多層膜厚計測技術(第1報), 精密工学会誌, 71-12, (2005), 1568.
- (5) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光, 藤井義樹, 小林宏明: 光熱変換効果による不当面多層膜厚計測技術(第2報), 精密工学会誌, 73-1, (2007), 134.

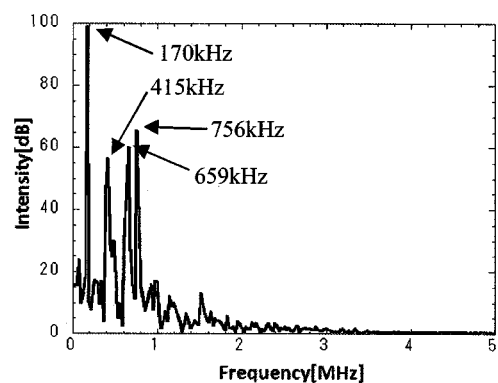


(a) two-beam interferometer

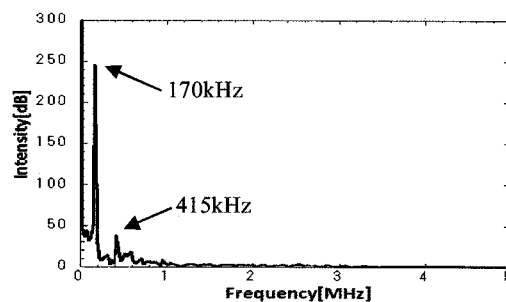


(b) AE sensor

Fig.2 Frequency analysis result of a titanium plate.



(a) implant only



(b) embedded implant

Fig.3 Frequency analysis result of the two-beam interferometer.

非線形流体構造連成問題に対する効率的数値解析法の開発

九州大学デジタルメディシン・イニシアティブ 陳 献

・目的

平成20年度の共同研究で、大変形薄肉構造に対する流体構造連成問題数値解析手法に関する基礎研究を行い、弱連成アプローチによる数値解析の安定性を検討し、その有効性を確認した。一方、弱連成アプローチの短所として、強い非線形を持つ問題に対して、解析が不安定になる問題点も明らかになっている。これは、流体及び構造の解析をそれぞれ独立に行い、互いに情報を伝達しながら解析を進める弱連成法では、流体と構造が相手の接線剛性に及ぼす影響を考慮していないことに起因していると考えられる。本研究では流体構造連成解析の不安定性の原因を究明し、数値解析の安定性を向上させながら、強連成アプローチにおける大規模計算のデメリットを回避できる、効率的流体構造連成解析手法の開発を目的とする。

・方法

構造解析ではまず固体の運動を記述する微分方程式をは total Lagrange 定式化によって基準配置へ変換し、さらにガラキーン法を用いて下記の運動方程式の弱形式が導かれる。

$$\int_{\Omega} \delta \mathbf{u} \cdot \rho_0 \ddot{\mathbf{u}} dV + \int_{\Omega} \delta \mathbf{E} \cdot \mathbf{S} dV = \int_{\Gamma} \delta \mathbf{u} \cdot \tilde{\mathbf{i}} dS + \int_{\Omega} \delta \mathbf{u} \cdot \rho_0 \mathbf{g} dV$$

ここで、 \mathbf{u} は変位、 $\ddot{\mathbf{u}}$ は加速度、 $\delta \mathbf{u}$ は変位の変分、 ρ_0 は変形前の密度、 \mathbf{E} は Green-Lagrange 歪み、 \mathbf{S} は 2nd Piola-Kirchhoff 応力、 $\tilde{\mathbf{i}}$ は境界における公称表面力、 \mathbf{g} は体積力である。大変形による構造非線形性と超弾性体非線形材料モデルを導入し、有限要素法による離散化を行うと、ダンピング効果を無視した運動方程式が得られる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{R} 、 \mathbf{M} 及び \mathbf{K} はそれぞれ外力ベクトル、質量マトリックス及び剛性マトリックスを表わしている。時間積分には Newmark 型アルゴリズムを用いている。空間・時間的離散化で得られる非線形連立方程式の解は Newton-Raphson 法を用いた反復解析によって求められる。

一方、流体解析では CIP・直交格子法を用いている。この手法の特徴として、(1) 全解析領域に空間固定の直交格子を用いることにより、複雑な流体自由表面や構造の激しい動きによる強い非線形性を、従来の構造形状に合わせた適合格子法と比べてより効率的且つロバストに扱えること、(2) CIP 法により、流体に関する高次風上計算がコンパクトなスキームで実現可能になること、(3) THINC に基づく高精度な自由表面の捕捉アルゴリズム、(4) 直交格子法による構造運動のラグランジュ的な計算方法が挙げられる。

・流体構造連成解析不安定性の究明及び安定性の向上

流体構造連成解析は、通常 Lagrange 表記される構造解析と Euler 表記される流体解析を流体・固体界面において連成させることによって行われる。その連成手法として以下のように分類できる：一体型解法（強連成解法）、分離型解法（弱連成解法）、分離型反復解法（漸進的強連成）。それぞれの手法の安定性は以下に示す。

(1) 一体型解法（強連成解法）

これは流体系と構造系の方程式を完全に連立させて解く方法であり、反復計算の過程において、流体系と構造系に相手の影響を互いに取り込まれながら、平衡状態を求めていくため、最も高い安定性を持ち、非線形性の強い問題に適している。しかし、連散る方程式が大規模になるほか、専用のプログラムを開発するこ

とが求められ、また、並列化の実装も困難である。

(2) 分離型解法 (弱連成解法)

この手法では構造解析と流体解析が独立に行われ、それぞれの解を予測値として相手に交互代入しながら解が進められる。既存の構造解析と流体解析のプログラムを利用できるため、解析コード全体の構造が単純になり、並列化の実装も容易なため多く用いられている。しかし、構造 (流体) の予測値を基に求めた流体 (構造) の解は真の構造・流体連成系の解ではないため、非線形性問題に対しては図1に示すように、構造または流体解析の解は解析が進むにつれ実際の状態より離れて行き、最終的に不安定となり発散に至る。

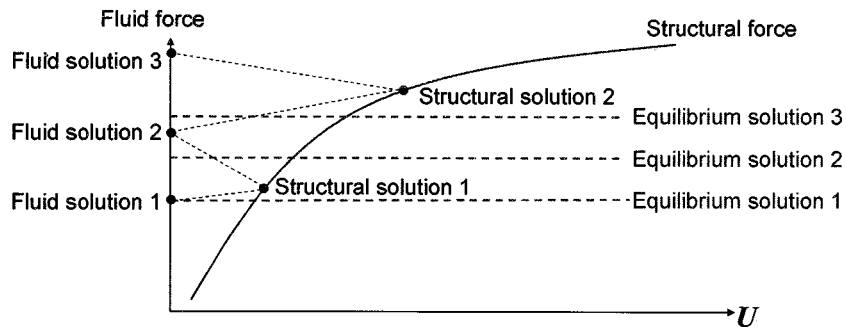


図1 分離型解法 (弱連成解法) の不安定性

(3) 分離型反復解法 (漸進的強連成)

この手法では構造 (流体) 解析の解を用いて流体 (構造) 解析の解を補正し、構造・流体系全体の平衡状態を満たすまで反復計算を行うことより、原理的には安定的構造・流体連成解析が可能である。しかし、非線形性の強い問題に対しては、構造 (流体) 解析の解に基づく流体 (構造) 解析の解が逆に構造 (流体) 解析に与える影響による変化の予測ができないため、図2に示すように強い非線形性による急激な変化に対応しきれず、反復計算自体の発散による不安定性が問題となる。

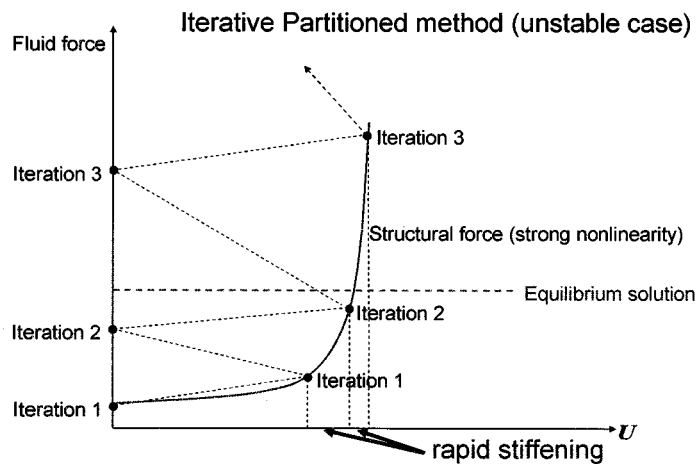


図2 分離型反復解法 (漸進的強連成) の不安定性

上述のように、強い非線形問題に対して、分離型解法による安定的流体・構造連成解析を行うためには、解の変化が予測値に及ぼす影響を考慮することが重要であり、今後、流体と構造の接線剛性に互いに及ぼす影響を前増分の結果を用いて予測し、反復計算の結果から修正を行う手法を開発する。

本研究の成果は九州大学応用力学研究所 (国際) 研究集会「強非線形流体・構造連成解析」で発表した。

散逸系における有限振幅波動の変調不安定性

Modulational instability of finite amplitude waves in dissipative systems

高知高専・電気情報工学科 成行 泰裕

研究目的：

海洋や河川で見られる水の波や宇宙空間で観測されるプラズマ波動は、有限振幅の場合に変調不安定性 (Benjamin-Feir 不安定性、側帯波不安定性) を生じ、大振幅の波束を生成することが知られている。これらの波の変調不安定性に関しては、それぞれの物理系の基礎方程式から同種の不安定性を記述する発展方程式 (非線形シュレディンガー方程式系) が導出されることが知られている。さらに、これらの物理系が散逸 (水の波では粘性や風の影響) を含む系である場合、不安定性が抑制されず、むしろ増進される場合があることが明らかとなっており、近年では宇宙空間中の磁気流体波の発展過程においても、散逸系においてのみ生じる変調不安定性が宇宙空間プラズマの発展に大きな役割を果たしていることが数値計算によって示された。しかし現在までのところ、散逸系における変調不安定性の物理過程は明らかではなく、統一的な理解は進んでいない。本研究では、散逸系における変調不安定性の物理過程の詳細な理解、特にどのような散逸機構が、どのような効果 (分散性、非線形性) との組み合わせで変調不安定性を増進するのかを、定式的に理解することを目的としている。

研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論的・数値的に発展させた結果について、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

研究成果：

本年度は、数値データから重要な物理過程を抽出する手法の開発を行い、その手法を用いてより現実的な系 (Vlasov-Poisson 系) を用いた弱い電子ビームにより励起されるラングミュア乱流の数値シミュレーションデータの解析を行った。具体的には、Vlasov 方程式の一次のモーメントとして得られる電子の運動方程式をポンドロモーティブ力が陽に現れる形に変形し、線形項・非線形項それぞれの寄与を数値計算データを用いて定量的に評価した。その結果、電子波のイオン運動論効果による減衰に重要な低調波の励起には、電場のポンドロモーティブ力よりも電子の対流項 (非線形項) の方が重要な役割を果たすことが明らかになった。この結果は、弱乱流的な近似やポンドロモーティブ力による非線形性を重視した従来のラングミュア波の不安定性理論が、弱い電子ビームにより励起されたラングミュア乱流の励起の場合ではその妥当性が疑われることを示唆している。

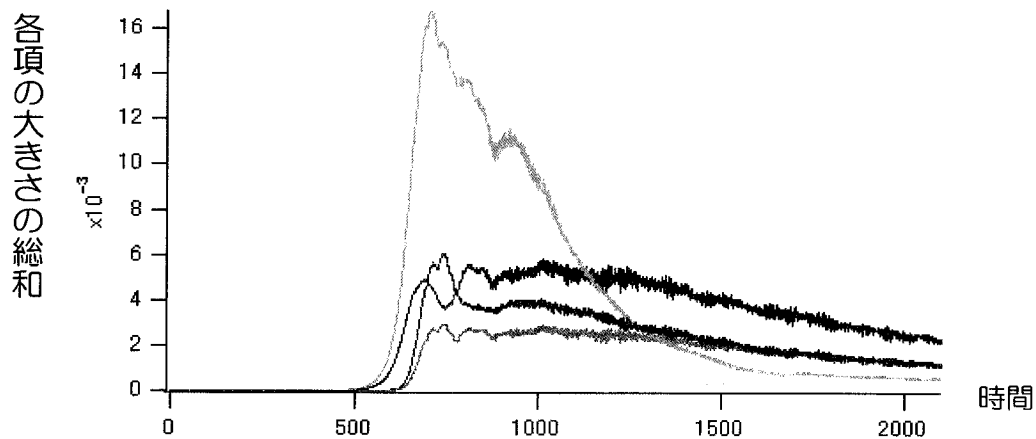


Fig.1: 波数空間における各項(圧力項、プラズマ振動項、対流項、ポンデロモーティブ項)の大きさの総和の時間発展。色はそれぞれ(水色)圧力項、(青色)プラズマ振動項、(赤色)対流項、(緑色)ポンデロモーティブ項、である。時間発展初期は線形項(圧力項・プラズマ振動項)で表される線形ビーム不安定性が卓越しているが、不安定性が飽和した後は非線形項がより大きくなっている。ただし、対流項の寄与の方がポンデロモーティブ項の寄与よりも2倍近く大きい。

考察・展望：

今後は本年度の解析結果を受けた変調不安定性の定式化を試みる。また、電子ビーム速度、イオン熱速度などについてのより詳細なパラメータ研究を行う。

公表状況：

- [1]成行泰裕, 梅田隆行, 電子ビーム不安定性により励起されたラングミュア乱流の非線形性について, 第126回 SGEPS 総会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月
 [2] Y. Nariyuki, T. Umeda, On nonlinearity of Langmuir turbulence excited by a weak electron beam-plasma interaction, submitted

研究体制：

研究代表者：成行 泰裕 (高知高専・電気情報工学科)
 nariyuki@ee.kochi-ct.ac.jp

所内世話人：及川 正行
 oikawa@riam.kyushu-u.ac.jp

研究協力者：羽田 亨 (九州大学大学院総合理工)
 hada@esst.kyushu-u.ac.jp

研究協力者：辻 英一 (九州大学応用力学研究所)
 tsuji@riam.kyushu-u.ac.jp

光重合型コンポジットレジンの収縮挙動解析

兵庫県立大学大学院 海津 浩一

1. 目的

歯科治療において、修復材料として光重合型コンポジットレジンは広く用いられている。光重合型コンポジットレジンは、取り扱いが容易で成形性にも優れており、自然歯に近い色合いを表現できる特徴がある。しかし、光重合型コンポジットレジンは光を受けて硬化する際に重合収縮を生じるため、エナメルとコンポジットレジンの接着界面に引張応力が発生し、この引張応力がき裂や剥離等の欠陥の原因となる。このような欠陥の発生を防ぐために、コンポジットレジンの重合収縮時の応力状態を明らかにすることが重要な課題となっている。光重合型コンポジットレジンの収縮に関する研究には、新川らの研究^{(1), (2)}があり、デジタル画像相関法を用いた解析により、光重合型コンポジットレジンの収縮する際の変位場が明らかにされているが、その応力状態の詳細は明らかになっていない。

本研究では光重合型コンポジットレジンの重合収縮する際の応力状態を明らかにすることを目的として、有限要素法コード Marc を用いてコンポジットレジンの重合収縮過程をコンポジットレジンの冷却されて収縮・硬化するものと見なした熱弾塑性解析で近似的に解き、その応力状態について検討した。

2. 解析モデル

2.1 有限要素解析モデル 光重合型コンポジットレジンは、470nm 前後の波長の光を受光することによって重合収縮を開始する高分子材料であるが、現時点で受光による収縮を解析する手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、コンポジットレジンの受光して収縮・硬化する過程をコンポジットレジンの冷却されて収縮・硬化する過程と見なして、近似的に熱弾塑性有限要素解析を行うこととした。図 1 に有限要素解析モデルを示す。解析には 8 節点 6 面体要素を用いた。エナメルの要素数は約 11000 で、コンポジットレジンの要素数は約 8600 である。

2.2 有限要素解析の条件

(1) 有限要素計算の方法および計算条件 コンポジットレジンの収縮解析は、熱伝導解析と Update Lagrange による大変形弾塑性有限要素法による応力解析を同時に行うことにより行った。表 1 に有限要素解析に用いたエナメルとコンポジットレジンの物性値⁽³⁾を示す。

(2) 温度の初期条件および境界条件 エナメルとコンポジットレジンの初期温度はともに 573K とし、エナメルの外側表面の境界条件は断熱とした。コンポジットレジンは上面のすべての節点の温度を 273K に冷却することにより非定常熱伝導解析を行った。なお、この温度は解析結果が新川らのコンポジットレジンの収縮量^{(1), (2)}と一致するように試行錯誤的に決定した。すなわち、本解析手法は、解析結果の変位分布と実験結果の変位分布を一致させ、そのときの解析から得られる応力状態が実験における応力状態と見なすものである。なお、本研究で用いた計算モデルの場合には、30 秒で温度分布が定常状態になることを確認した。

(3) エナメルとコンポジットレジンの接触条件

コンポジットレジンは、通常、エナメルに接着剤を塗布した後に挿入されている。そのため、接着剤の有無によりコンポジットレジンのおよびエナメル内部の応力状態は異なることが予想される。そこで本研究では、コンポジットレジンのおよびエナメル内部の応力状態に及ぼす接着剤の影響について検討するために、①接着剤を用いた場合を想定して、コンポジットレジンのとエナメルの境界条件を固着 (glue 接触) とした解析、②接着剤の接着力が弱い場合を想定して、コンポジットレジンのとエナメルの接触面における全節点の 1/2 が固着 (glue 接触) しているとして、接着力を減少させた解析、③接着剤を用いない場合を想定して、コンポジットレジンのとエナメルの接触面に接着力が無い場合の解析を行った。

3. 計算結果及び考察

図 2 (a) に新川らの実験によって計測されたコンポジットレジンの上面の x 方向の変位分布^{(1), (2)}と有限要素解析によって得られた x 方向の変位分布の比較を、また図 2 (b) はコンポジットレジンの中部 (図 1 に示す計算モデルにおける CD 線上) の x 方向の変位分布を示す。これらの図から、コンポジットレジンの x 方向変位は、エナメルとの接着界面近傍で最大あるいは最小となり、中心部で零

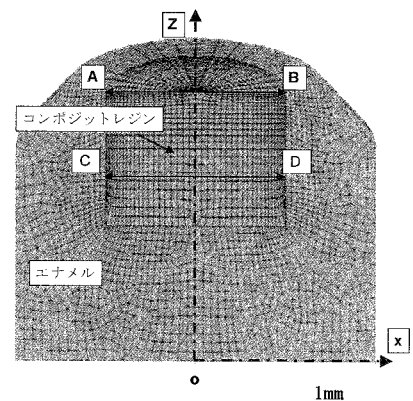


図 1 有限要素計算モデル

表 1 エナメル及びコンポジットレジンの物性値

	エナメル	レジン
ヤング率 (GPa)	84.1	9.0
降伏強さ (MPa)	364.0	40.0
ポアソン比	0.33	0.24
密度 (kg/mm ³)	2.97×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁶
熱膨張率 (1/K)	1.14×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻⁵
熱伝導率 (W・K ⁻¹ ・mm ⁻¹)	9.36×10 ⁻⁴	1.37×10 ⁻³
比熱 (J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	1000	1600

であることがわかる。従って、コンポジットレジンは、受光により中心軸方向に収縮することがわかる。図2(a)よりコンポジットレジンとエナメルが完全固着している場合は、変位と変位分布はともに実験値とほぼ一致し、部分的に固着している場合は、変位は実験値に比べ大きい、同様な変位分布を示している。接着なしの場合は、変位と変位分布は実験値と全く異なっていることがわかる。また、図2(b)において、完全固着の場合の変位と変位分布はともに実験値と全く異なる。部分的に固着している場合は図2(a)の結果と同様に、実験値と比べて変位は大きい同様な変位分布を示している。これらのことから、エナメルとコンポジットレジンが部分的に固着している場合において、コンポジットレジンの表面および内部のx方向の変位分布が実験値と傾向が合うことが分かる。

図3、4はエナメルとコンポジットレジンが完全に固着している場合と部分的に固着している場合のコンポジットレジン断面の主応力分布をそれぞれ示している。図3より最大主応力はコンポジットレジン下部の外周部ほど大きい特徴があり、特に下部の角部で高い引張応力が生じることがわかる。図4は図3と同じ傾向を示しているが、主応力値はやや低くなっている。したがって、エナメルとコンポジットレジンは収縮時に下部の外周部で剥離しやすいと推測される。

4. 参考文献

- (1) 古川太一, 新川和夫ら, デジタル画像相関法を用いた光重合型コンポジットレジンの収縮変位場評価, 実験力学 Vol.9, 90-95, 2009
- (2) 古川太一, 新川和夫ら, デジタル画像相関法を用いた歯科用補綴材料の収縮変位場評価, 実験力学 Vol.8, 115-120, 2008
- (3) 田上順次, 千田彰ら, 永末書店, 保存修復学 21, p. 11, 2005

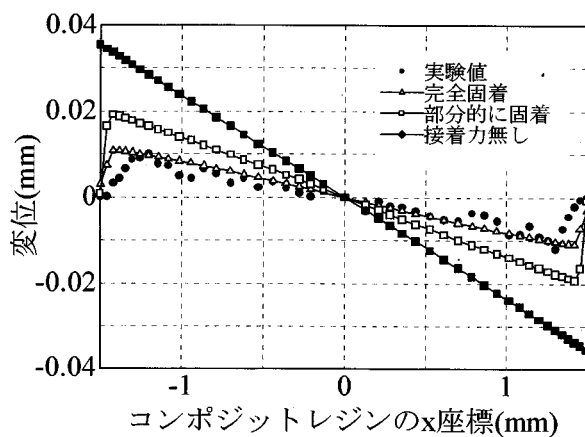
5. 研究組織

研究代表者: 海津浩一 兵庫県立大学大学院工学研究科教授

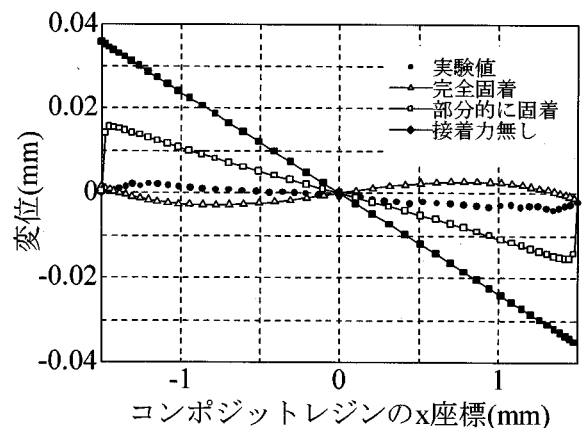
研究協力者: 木之下広幸 宮崎大学工学部助教

河村 隆介 宮崎大学工学部准教授

新川 和夫 九州大学応用力学研究所教授



(a) 図1中のA-B線上のx方向変位



(b) 図1中のC-D線上のx方向変位

図2 デジタル画像相関法によって得られたコンポジットレジンのx方向変位との比較

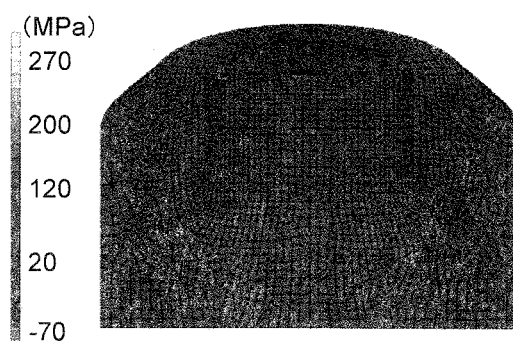


図3 エナメルとコンポジットレジンが完全固着している場合の最大主応力分布

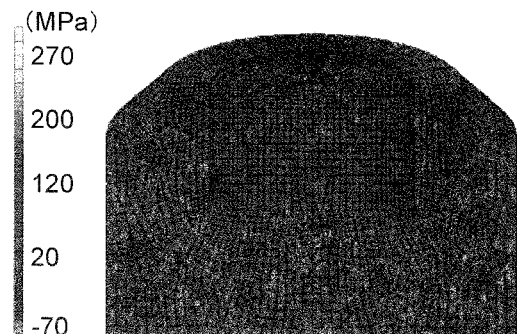


図4 エナメルとコンポジットレジンが部分的に固着している場合の最大主応力分布

カルコパイライト型化合物半導体太陽電池の作製

宮崎大学 工学部 電気電子工学科 吉野賢二

1. はじめに

I-III-VI₂ 族カルコパイライト型半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、バンド端より大きい光エネルギーに対して吸収係数が高いので、太陽電池吸収層として期待されている。中でも CuInGaSe₂ 太陽電池については広く研究されており、変換効率 19.5% という報告もある [1]。CuInS₂ は禁制帯幅 1.5eV を持ち、太陽光スペクトルの強い波長領域に対応し、また、光の吸収係数は $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 程度であることから、太陽電池の吸収層として期待できる材料とされている [2]。これまでに、CuInS₂ バルク結晶の低温成長に成功している。実験は 22.5 MPa で成長温度を 400~700 °C まで変化させた。X線回折の結果から 400 °C では異相がみられたが、温度を増加させるにしたがって、その異相は減少し、CuInS₂ の融点である 1050 °C よりもはるかに低温である 700 °C で CuInS₂ バルク結晶を得ることに成功した [3]。

本研究では作製した CuInS₂ バルク結晶を用いて、蒸着法により薄膜を作製し評価を行った。

2. 実験方法

本研究では、ホットプレス法によって粉末二元系材料である Cu₂S (99.9%) と In₂S₃ (99.99%) から作製した Cu/In 比=1.0 の CuInS₂ バルク粉末を用いて真空蒸着法によって CuInS₂ 薄膜を成した。蒸着源はシングルソースとし抵抗加熱による真空蒸着法を用いてソーダライムガラス基板上に真空度 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ で原料を堆積させた。この時、基板は特に加熱せずに蒸着を行っている。さらに、真空蒸着法により作製した CuInS₂ 薄膜を、1 気圧、アニール温度 250~400 °C、アニール時間 60 分で H₂S 雰囲気中でアニールを行った。

評価として、X線回折によって格子定数と粒径を求めた。また電子プローブマイクロ分析 (EPMA) により組成を行い、ホール測定によりキャリア濃度、移動度、抵抗率を測定した。

3. 結果と考察

H₂ アニール温度 250~400 °C と変化させた CuInS₂ 薄膜の X 線回折スペクトルを図 1 に示す。参考とし、CuInS₂ の JCPDS ピークも示す。アニール温度が 250 °C を超えると、最も支配的で強いピークが 27.8° に現れ、また、その他にも 46.6° と 55.1° に二つのピークが観測された。それぞれの面方位は 27.8° で (112)、46.6° では (204)/(220)、55.1° では (116)/(312) である。全ての試料において、(112) が最も強いピークであった。しかしながら、アニール温度が 300° 以下の低温において、CuS の回折ピークが現れた。この CuS 相は、大気中で熱処理を施した際には見られないものである [4]。これは、CuInS₂ 薄膜表面に存在していた Cu 原子と雰囲気ガスである H₂S 中の S 原子が低温にて反応した

と思われる。また、350°C以上ではカルコパイライト型 CuInS_2 のみのピークが確認された。よって、 CuInS_2 単相が育成されたと考えられる。また、アニール温度上昇と共に、 CuInS_2 の(112)に配向性も向上している。特に、JCPDS の(112)面に対して、アニール温度 400°Cの(112)が配向している。したがって、結晶性の向上と結晶成長が得られた。

試料の X 線回折スペクトルより求めた格子定数を図2に示す。JCPDS より求めた各格子定数 ($a=5.520 \text{ \AA}$, $c=11.160 \text{ \AA}$) も共に示す。格子定数においても JCPDS の値にほぼ一致しており、アニール温度を変化させても、格子定数の変化はみられない。

X 線回折スペクトルの(112)面から求めた粒径を図3に示す。全体的にアニール温度の増加に伴い粒径サイズは増大する傾向にあり、

アニール温度 250°Cの時の粒径 47 nm からアニール温度 500 °C の粒径 70 nm と増加しており、アニール温度が高くなるにしたがって粒径成長も急激に促進している。粒径が増大した理由としては、真空蒸着によって堆積している薄膜表面に存在する Cu-S 系液層を介して成長したためと思われる[5]。この薄膜成長機構では、Cu-S 系液層が固相の Cu_2S と共存し、この固相の Cu_2S と拡散してきた In が反応してカルコパイライト型構造をもつ CuInS_2 結晶を生成されると思われる。

電子プローブマイクロ分析によるアニール後の CuInS_2 の薄膜内の組成分析の結果を図4に示す。また、点線は Cu, In, S の化学量論的組成を示す。アニール温度 250°Cでは Cu-poor、In-poor、S-rich となり、S (47%) が最も多く存在し、次に Cu(36 %)、最も少ないのが In (17%)であった。アニール温度を高くするにしたがって、薄膜内の Cu/In 比は 1.0 に徐々に近づき、また、250°C程度では存在していた S 空孔も H_2S ガス中で熱処理されることによって、400°C程度の熱処理温度でそれぞれの組成比はほぼストイキオメトリーとなった。このことから、S 空孔が H_2S ガス中の S 原子によって置換されたと

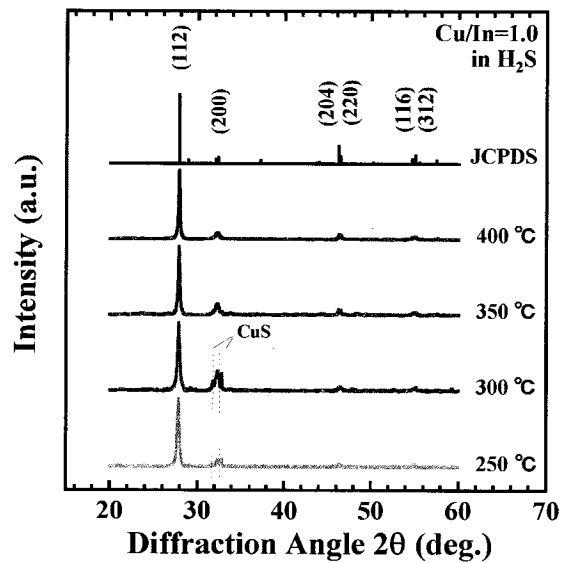


図1 XRD スペクトル

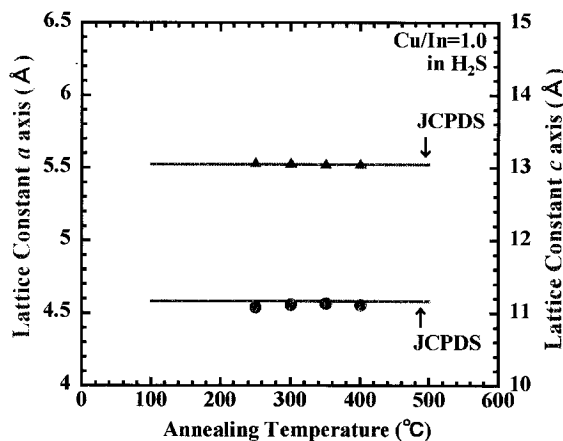


図2 格子定数

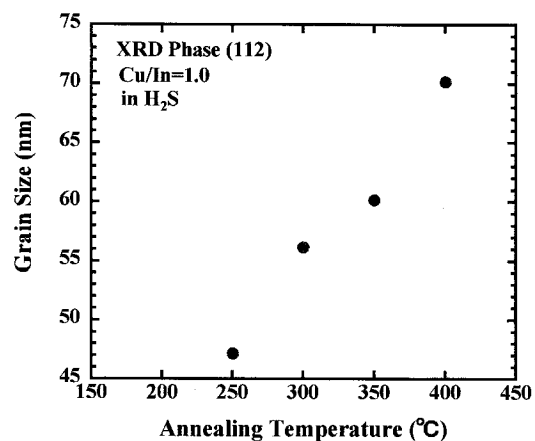


図3 粒径

思われる。また、徐々にCu/In=1.0に近づいた理由としては、二元系粉末材料から真空蒸着法によってCuInS₂薄膜を作製した際に、In-S系物質が先にガラス基板に蒸着され、その後Cu-S系物質がその上に蒸着される[6]。EPMAは試料のごく表面しか測定できない。したがって、最後に蒸着されたCu-S系物質のために低温側ではS-rich、Cu-poor、In-poorになったと思われる。

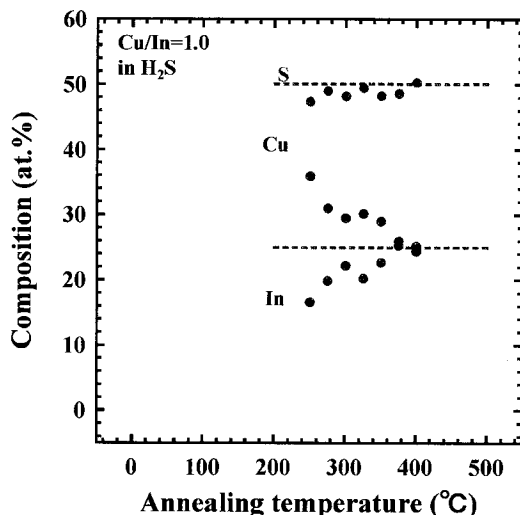


図4 EPMA分析結果

Hall 測定の結果を図6に示す。それぞれの抵抗率、移動度、キャリア濃度は各アニール温度でH₂Sガスでの熱処理後、室温にて測定している。全ての薄膜においてP型の伝導型が得られ、これはEPMAの結果でも述べたように、大気中での熱処理では薄膜中のS空孔ができ、H₂Sガス中で熱処理を施した際には薄膜中のドナー性欠陥であるS空孔をH₂Sガス中のS原子が置換したためである。実際に、大気中でアニールした際には、全ての薄膜においてn型が得られたという報告もある[7]。また、アニール温度が350℃まで上昇したときにおいて、キャリア濃度は減少し、抵抗率と移動度は増加している。また、アニール温度400~500℃においては、抵抗率には変化はないが、キャリア濃度は減少し移動度は増加している。

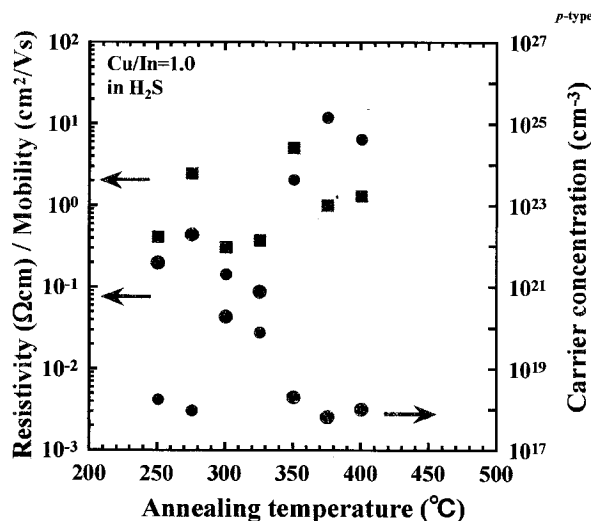


図5 ホール測定結果

また、X線回折の結果より粒径が増大していることから、粒径の増大により、移動度が増加し、抵抗率が減少したと考えられる。したがって、アニール温度を増加させることによって良質な結晶性を持つ多結晶CuInS₂薄膜が得られたと思われる。また、アニール温度375°Cの時の移動度は、約1 cm²/Vsであり、これは硫化法によって作製された薄膜の値とほぼ同じである[8]。

4. まとめ

真空蒸着法によって作製したCuInS₂薄膜にH₂Sアニール処理を行った。X線回折より、格子定数はJCPDSのデータとほぼ一致し、アニール温度を変えても格子定数に殆ど変化は見られなかった。粒径サイズは温度増加に伴い増大する傾向が見られた。また、アニール温度350°C以上でCuInS₂単相が得られた。またアニール温度の増加にしたがって、Cu、In、Sがそれぞれ化学量論的組成比に近づいた。また、薄膜中のS原子が増加していることから、雰囲気ガスであるH₂S中のS原子がS空孔を置換したと思われる。ホール測定により、アニール温度300°Cにおいて、キャリア濃度には変化がないが、抵抗率が減少しており、移動度は増加している。以上のこととX線回折から求めた粒径の増大により移動度が増加し、抵抗率が減少したものと考えられる。また、全ての薄膜においてP型の伝導型が得られ、これはEPMAの結果より、ドナー性欠陥であるS空孔がH₂SガスのS原子によって置換されたと思われる。

5. 引用文献

- [1] M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Haseon, J. Keane, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog. Photov. Res. Appl. **13** (2005) 209.
- [2] J. Klaer, J. Bruns, R. Henninger, K. Siemer, R. Klenk, K. Ellmer and D. Bräunig, Semicond. Sci. Technol. **13** (1998) 1456.
- [3] H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, J. Crystal Growth **236** (2002) 253.
- [4] Y. Akaki, H. Komaki, K. Yoshino and T. Ikari, J. Vac. Sci. Tech. A **20** (2002) 1486.
- [5] 和田 隆博：化合物薄膜太陽電池の最新技術（シーエムシー出版、2007）。
- [6] Y. Akaki, H. Komaki, K. Yoshino and T. Ikari, J. Mater. Sci. Mater. Electro. **14** (2003) 291.
- [7] Y. Akaki, H. Matsuo, and K. Yoshino. Phys. Stat. Solidi C **3** (2006) 2597
- [8] S. P. Grindle, C. W. Smith and S. D. Mittleman Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 24.

電磁波遮蔽材料の創製と性能評価

信州大学繊維学部
機能機械学科 倪慶清
九州大学応用力学研究所
汪文学

1. 目的

IT技術の発展、情報量の増大に伴い、高速通信がますます重要視されている。高速通信を実現するために、マイクロ波帯からミリ波帯への高い周波数の利用が望まれている。その応用にあたり、衛星通信、自動車衝突防止レーダ、鉄道の事故監視、ミリ波無線LAN等様々な研究開発が行われている。一方、これらの装置からの電磁波は医療装置、工業ロボット、自動ドアなどの誤動作を引き起こし、さらに、人体への影響が懸念されている。これは電磁干渉(EMI, Electromagnetic Interference)と呼ばれ、問題となっている。これからのものづくりには機器が不要な電磁波を放射しないことおよび機器自身が外部からの電磁波の影響を受けにくいこと、つまり電磁両立性を考え設計を行う必要がある。電磁波遮蔽材料は電磁両立性を考える上で重要な要素の1つとなる。

そこで、広範囲の周波数領域にわたる電磁波の遮蔽や制御は必要不可欠であり、今後も益々重要視される。本研究では、高性能の電磁波遮蔽材料・構造を開発するとともに、電磁波遮蔽性能の評価方法の確立を図る。

2. 実験手法

◆**試料作製** CFRP 積層板の作製にはグラノックプリプレグ(日本グラファイトファイバ社)を用いた。炭素繊維はピッチ系である。作製方法を次に示した。まず、プリプレグを2層積層した。試料は、2層CFRP 積層板で2枚のプリプレグの繊維方向を同じ方向に積層したCFRP(CFRP00) および直角方向に積層したCFRP(CFRP09)の2種類を用意した。

◆**評価方法** 直流導電率 σ 試料の導電性の評価のために直流導電率を測定した。試料の導電率は電磁波遮蔽特性において重要なパラメータの1つである。端子の接触抵抗を排除するために4端子法を用いた。電極は導電ペースト(酢酸ブチル, Butyl Acetate)を塗布して作製した。電流計および電圧計はADVANTEST社製のR8240 DIGITAL ELECTROMETERを用いた。直流電源は高砂製作所社製のEX-375L2を用いた。試験片サイズは $40 \times 10 \times t$ mmとした。tは積層板の厚みである。

◆**電磁波遮蔽効果** 試料の電磁波遮蔽特性を評価するために電磁波は遮蔽効果(SE, Shielding Effectiveness)を測定した。SEは材料に入射する電磁波および伝送後の電磁波の比率で表される。本測定では、電磁波遮蔽効果の測定はホーンアンテナの前方に誘電レンズを設置した自由空間法を採用した。装置にはベクトルネットワークアナライザおよび透過減衰量測定装置を用いた。装置の概略図をFig.1に示す。試験片は孔の開いた金属板上に孔を覆うように置いた。金属板の孔のサイズは $\phi 150$ mmのものを用いた。試験片サイズは 220×220 mmとした。装置のダイナミックレンジは約60 dBである。ホーンアンテナから放射された電磁波は誘電レンズを通過することにより、高利得で等位相に近い平面波として試験片に入射する。装置に用いたホーンアンテナから放射される電磁波は直線偏波であり、電界の振動方向が一定

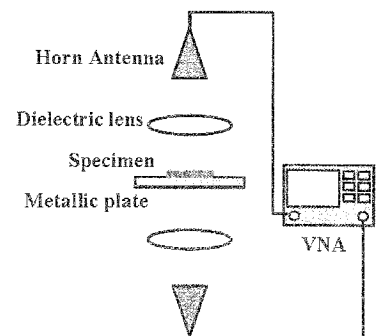


Fig.1 The schematic of an EMI shielding measurement system.

である。これを用いてCFRPの繊維方向の電磁波遮蔽特性の依存性を検証した。電界の振動方向に対してCFRPの上層の繊維方向が等しいときの角度を0°とした。電界の振動方向に対して0, 45, 90 および135°のときのCFRPの電磁波遮蔽効果を測定した。測定周波数は8-12 GHz のXバンドとした。

3. 結果および考察

3.1. 直流導電率 2層CFRP積層板の直流導電率の測定結果をTable 1 に示す。CFRP00a の導電率は580 S/cm であった。一般的な金属より導電性は低い。CFRP00b の導電率は0.13 S/m であり、CFRP00a より3桁低い値を示した。これは炭素繊維間には絶縁性のエポキシが存在するため、CFRPの繊維の直径方向の導電率が低下したのはエポキシによる接触抵抗の増加のためであると考えられる。

Table 1. DC conductivity of CFRP

Specimen	DC conductivity (S/cm)
CFRP00a	580
CFRP00b	0.139

3.2. 電磁波遮蔽効果

◆**一方向CFRPの電磁波遮蔽特性** 放射電磁波の電界の振動方向に対するCFRP00の繊維方向による影響をFig.2に示す。90°において電磁波遮蔽効果は最も低い値となった。0°において、他の角度の時よりも高い電磁波遮蔽効果を示した。また、ダイナミックレンジ付近であり、実際のSEはさらに高いと予測できる。45°および135°におけるSEはほぼ等しく、0°におけるSEよりも高くなった。SEの変化量は0-45°の時よりも5-90°の時の方が大きい。以上のことより、CFRPのSEは電界の振動方向に依存すると言える。炭素繊維の繊維方向に対して電界の振動方向が等しい時、SEは最も高くなる。これは炭素繊維中の自由電子が動き、多くのエネルギーを消費するためであると考えられる。一方、炭素繊維の繊維方向に対して電界の振動方向が直角である時、SEは最も低くなる。これは繊維および樹脂の間における接触抵抗により、電子の動きを妨げるためであると考えられる。

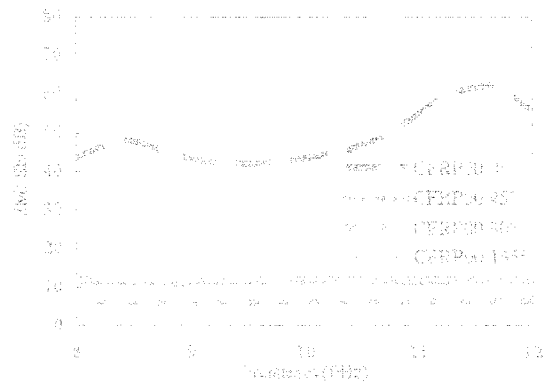


Fig. 2. The shielding effectiveness of unidirectional CFRP

◆**直交CFRPの電磁波遮蔽特性** 放射電磁波の電界の振動方向に対するCFRP09の繊維方向による電磁波遮蔽効果の変化は、いずれの測定角度において、50dB近い値を示し、測定角度による影響はほとんど見られない。

4. まとめ

2層CFRP積層板を作製し、8-12 GHzにおいて電磁波遮蔽特性を評価した。その結果、一方向積層CFRPでは、電磁波の電界の振動方向に対して電磁波遮蔽効果の依存性がある。CFRPの繊維方向が電磁波の電界の振動方向と等しい時、最も高い電磁波遮蔽効果を得られた。また、直交積層CFRPは8-12 GHzにおいてSE ≥ 35 dBを示し、電磁波遮蔽材料として有効性が確認された。

5. 研究組織

- 研究組織 1. 信州大学繊維学部機能機械学科 倪慶清 (研究代表者)
 2. 九州大学応用力学研究所 汪文学

MPS 法によるタンク内流体挙動解析と 数値積分による船体横揺れ予測の連成解法に関する研究

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学部門 橋本博公

研究目的

近年問題となっている LNG 船や FPSO のタンク内スロッシング問題、損傷浸水船の過渡状態を考慮した残存性評価、小型船舶の海水打ち込みや滞留水による転覆現象などを正確に予測するためには、タンク内流体運動と船体運動間の動的な連成影響を精度良く考慮できる解法の構築が必要である。本研究では自由表面の大変形が取り扱い可能であり、複雑形状への適用も容易な粒子法 (MPS 法) を用いたタンク内流体の挙動予測と船体運動方程式の求解による船体運動予測のハイブリッド解法の構築を目指した。

動的連成解法の概要

本研究で構築した解法は、タンク内流体の運動を自由表面の大変形、複雑形状への適用や流体の流出入などが取り扱い可能である MPS 法を用いて解き、各タイムステップにて得られたタンク内流体の圧力分布から船体運動への連成力を求める。船体運動は船体運動を記述する時間微分方程式に MPS 法から得られた連成力を考慮して数値積分により解き、求まった運動変位から次のタイムステップにおける壁粒子 (境界粒子) の位置、速度を MPS 法の計算に与えるという弱連成計算ループを繰り返すことで、非線形性を考慮したタンク内流体と船体運動の動的連成解を求めるものである。

タンク内流体から船体運動への連成力推定精度の検証

本研究では、第一歩としてタンク装備船の横揺れ問題を検討した。タンク形状は長方形型、U 字型の 2 種類のタンクとし、タンク内流体から船体運動への連成力は、壁粒子の圧力をタンク内壁に沿って積分することで軸力、圧力にモーメントレバーを掛けて積分することでモーメントを求めた。MPS 法による連成力の推定精度を検証するため、強制横揺れ模型試験結果との比較を実施し、振幅、周期、回転中心位置、タンク形状、タンク水量などに関わらず、MPS 法は強制動揺下でのタンク水挙動と連成力を十分な精度で推定可能であることを確認した。長方形タンクについての検証の一例を Fig.1 に示す。

タンク内流体と船体運動の動的連成解法の精度検証

タンク装備模型船を用いて、自由横揺れ試験、規則横波中横揺れ、規則向波中パラメトリック横揺れの計測を実施し、今回構築した動的連成解法のシミュレーション結果との比較を行った。その結果、自由横揺れ試験のような準静的な連成運動からパラメトリック横揺れのように大振幅動揺でタンク水が大変形するような非線形連成運動まで、タンク内流体と船体運動の連成運動を実用的な精度で予測が可能であることを確認した。船体横揺れ運動とタンク水挙動の比較の一例を Fig.2 に示す。

まとめ

タンク装備模型船を用いた各種実験結果との比較により、今回構築したシミュレーション手法の妥当性を示した。本手法は、船体運動と船内流体の非線形連成問題を取り扱う有力な解法として期待できる。

成果報告

橋本博公, 杉本友宏, 末吉誠「タンク内流体と船体運動の動的連成解法に関する研究(第一報)」, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第9K号, 2009, pp. 125-128 他1編

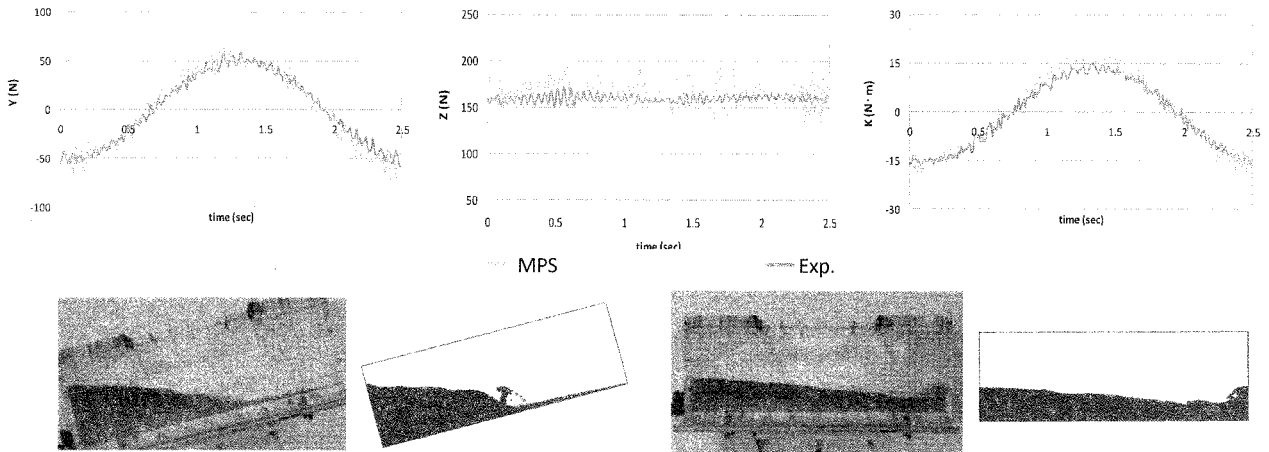


Fig.1 Comparison of coupling force and water behavior between model experiment and MPS method
(forced roll motion test with 15degrees amplitude and 2.5sec period)

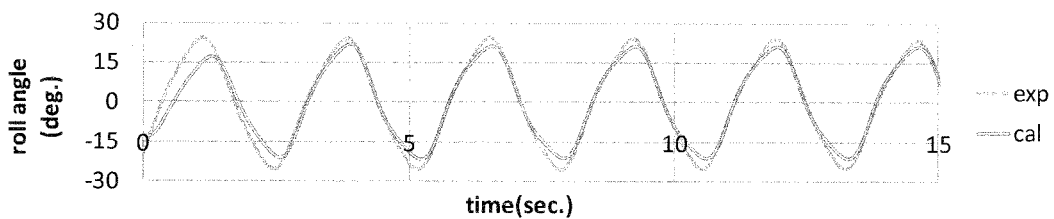
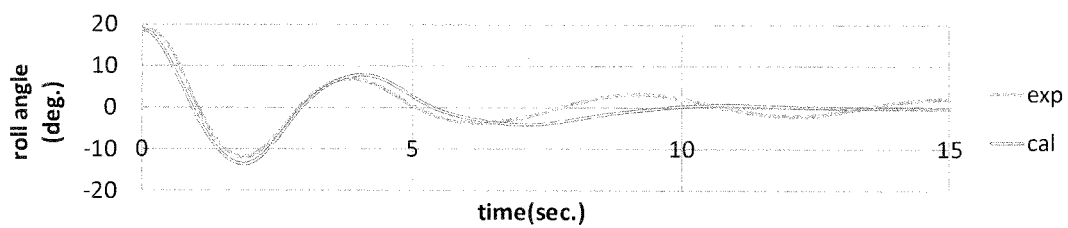


Fig.2 Comparison of ship motion and water behavior between model experiment and proposed method
(above: free roll in calm water, below: parametric roll in regular head waves)

波と浮体の非線形相互作用の解析に適した複合型数値計算法の開発に関する研究

防衛大学校システム工学群機械システム工学科 木原一

研究目的

浮体と波の線形相互作用に関連する問題を広範囲にかつ高精度に解くことのできる計算手法の開発を研究目標として、前年度までの共同利用による研究成果を踏まえ、特に造波問題に関して数値粘性影響が少ない計算スキームの開発と計算手法の構築、3次元問題への拡張とこれにともなう計算技術の高度化を図った。

研究内容

数値粘性影響の少ない計算スキームの開発に関しては主要なアルゴリズムの改善に加え、細部の境界処理なども重要である。まず粒子法では一層分の固定粒子を物体壁面に使用していたため十分な粒子数を用いた壁面でのFree Slip条件を実現できていなかったが、これを可能にするために壁面固定粒子上に法線ベクトル情報を付加して簡単な演算による鏡面境界を実現しFree-Slipとするためのアルゴリズムについて検討を行った。図1に今回検討された壁面境界に関する取り扱いの概念図などを示す。検討されたアルゴリズムでは一層の壁面粒子を配置するのは従来と同一であるが、実際には配置を行わない仮想粒子を壁面に対し固定的なもののみならず、液体側粒子の配置に応じて逐次位置・速度を仮定しながら計算するものである。このアルゴリズムに関しては本研究期間内では計算プログラムとして実装し、十分な検証を行うことはできなかったものの、その実装の試みの中で副次的な産物を得た。それらは付加情報として壁面上の法線ベクトルを利用可能となったことで、薄肉状の境界を用いた計算を粒子法で容易に実現する手法と、粒子の壁面貫通防止処理の高度化による計算安定性の向上である。薄肉状構造はその形状特性から裏表の両面に圧力などの物理量を保持して状況に応じて適切に使用する必要があるが、その際流体の貫流がない通常の固体壁面であれば裏面側、表面側のそれぞれに存在する流体粒子間では相互作用は完全に遮断される必要がある。粒子法では打ち切り半径内の粒子に関して相互作用計算を行うため、関係の遮断を適切に行うためには正確な壁面との位置関係の判定が求められる。この際移動粒子を用いた粒子法では離散点間の近接関係が流動に応じて変化するため、格子を用いた手法で一般的な領域分割的な手法では複雑任意形状に対応が事実上困難である。近接壁面粒子の検索とその点での法線ベクトルを利用した相対距離計算により裏面側粒子と表面側粒子の存在領域を簡単な符合判定だけで処理が可能なることを確認し、実装が行われた。これに関しては共同研究者によりシンポジウムで発表なども行われた¹⁾。図2にそのアルゴリズムの概略を示す。

3次元問題への拡張については粒子法側が計算負荷の大半を占めるため、その計算プログラムの改良による高速化が重要な課題であった。現有の粒子法プログラムは3次元化・並列化がすでになされており大規模計算に一応の対応がなされていたがその計算量の多さから、本格的な3次元造波問題での試計算などの事例は少なく、複合型計算手法に組み込むにはその計算性能や安定性などを十分検証する必要がある。今年度はその準備段階として応用力学研究所基礎力学部門界面動力学分野に設置されている高速ネットワーク装置を持つPCクラスタにより分散記憶型の並列計算を3次元スロッシング問題について多様な条件で実施し、適切な設定パラメータの確認や細部の改良などが行われた。今年度はこの結果について評価・検討を行い、本格的な造波を取り扱う複合型計算手法に適用する際の基礎データとした。

1) "Numerical simulation of tank sloshing with thin plate structures by using a particle method," Makoto Sueyoshi, ISOPE2009 Conference Proceedings CD-ROM, 2009.

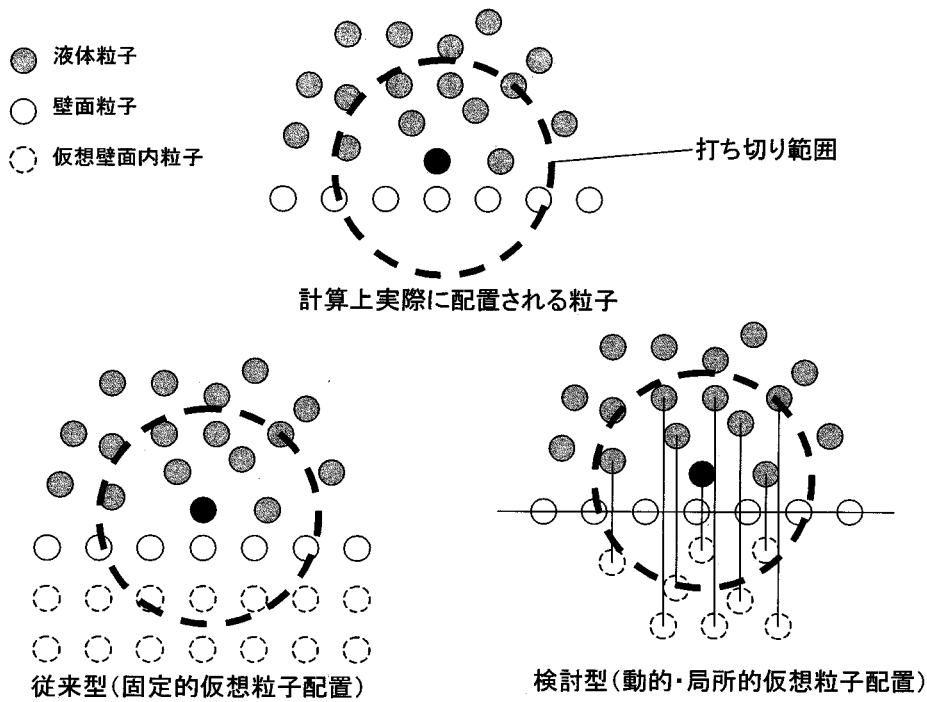


図1：検討された仮想粒子の動的・局所的配置の概念図。(粒子法では点線で囲まれた範囲の粒子を着目点について計算を行う際に使用する。通常MPS法などの粒子法では仮想粒子を壁面外側に配置して計算を行っている。今回検討した手法では最近接の壁面粒子から壁面までの距離を計算しその面に対して対称な位置に仮想粒子を配置する。この際対称な位置に配置するのは打ち切り距離内の粒子だけであり、壁面近傍粒子(打ち切り距離内に壁面粒子が存在する粒子)についてのみこの処理を局所的に行う。この際、仮想粒子についても境界条件に応じて面を基準に流速を与えることでFreeSlip境界などが比較的汎用性を保ったまま実現可能となる。)

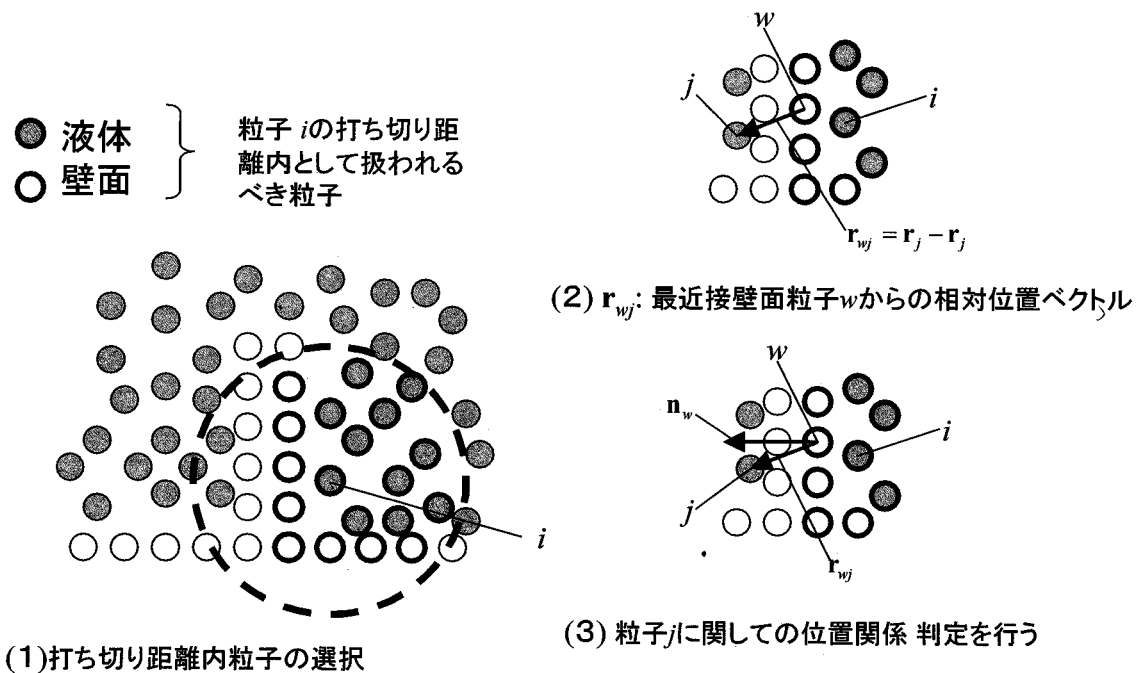


図2：薄肉壁面境界を効率的に取り扱うアルゴリズム

潮流発電のためのダリウス形水車の高性能化

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

1. はじめに

研究代表者は、現在、長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の実証実験を実施中であるが、平成 17 年度から鉛直軸を持つダリウス形水車のトルクおよび発電効率について実験的な研究を行ってきた。鉛直軸のダリウス形水車は流れの方向に無関係であり、構造も単純であるので、潮流発電用の水車に用いられることが多い。しかしながら、ダリウス形水車の動翼は流れの下流側では上流側の他の動翼が発生する渦流中で作動するので非線形影響がおおきくなるため、これまでは主に実験的に研究^{1),2)}されてきたが、実験的なアプローチによる高性能ダリウス形水車の開発は時間を含めたコストによって大きな障害になっている。本研究では、昨年度から引き続き実施中の商用 CFD ソフト (SCRYU/Tetra) を用いた潮流発電装置の開発結果について報告する。

今年度の研究では、回転中のトルク変動を抑えるために 4 翼ダリウス水車とし、さらに増速器を水車の両側において高性能化を図ることとした。増速器の大きさと形状をいくつか変えて CFD 計算を実施した結果、円弧形の増速器がわずかに高性能となった。そこで、回流水槽において実験を行い、円弧形増速器の有無による水車性能の変化を比較した。

2. 数値計算

2.1 CFD コード

解析に用いた(株)ソフトウェアクレイドル社製の SCRYU/Tetra for Windows V7 は、非構造格子を採用し、かつ自動格子生成が可能な 3 次元熱流体解析ソフトウェアで、解析は 3 次元有限体積法に基づいた非定常解析である。乱流モデルは SST (Shear-Stress Transport) $k-\omega$ モデルを使用した。このモデルは、低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルでは不可欠であった減衰関数を用いなくても壁面近傍の平均流速分布を再現でき、さらに逆圧力勾配での剥離現象を精度よく捉えられる長所がある。

2.2 計算領域

計算領域を Fig.1 に示す。計算領域は 2 つの部分に分かれており、空間固定領域と翼とともに動く回転領域である。増速器は空間固定領域において考慮される。Fig.2 は、回流水槽での実験に合わせて設定した計算領域の平面図である。奥行き 3.5m とした。内部の回転領域は直径 0.7m、高さ 0.7m の円柱形である。要素移動には ALE 法を使用した。

2.3 増速器形状

Fig.3 は、今回計算を行った 5 種類の増速器形状を示したもので、長さと同様に厚さを同一とした。Catenary-1, 2 は双曲線関数 ($y = b \cosh(ax)$)、円弧形、台形および Concave 形について計算した。

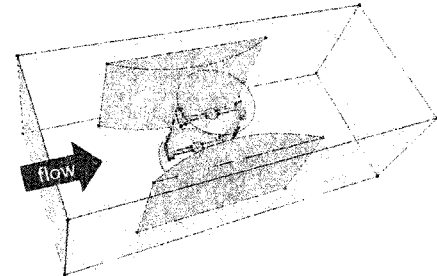


Figure 1 Calculation domain

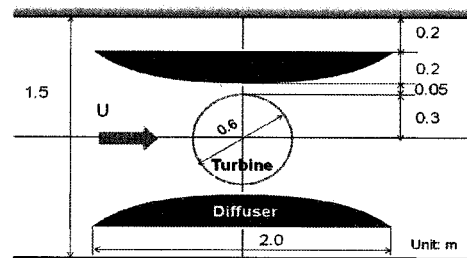
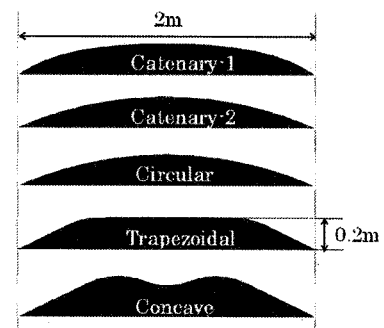


Figure 2 Configuration of turbine and diffuser in CFD (Length of diffuser was changed 1.2m in experiments)



2.4 計算格子数および境界条件

自動格子生成を利用して四面体格子を基本とする非構造格子を用いた。格子要素数は、静止領域は 10 万要素で、回転領域は 400 万要素である。流入境界には流速条件 1.0m/s、流出境界には表面圧力条件 0Pa を与えた。回流水槽に合わせるため、静止領域の上面はフリースリップ境界に、その他の面は固定壁に設定した。

3. 数値計算

3.1 CFD 計算結果

増速器の有無による水車のトルク係数 (C_T) およびパワー係数 (C_p) の比較を Table 1 に示す。この場合の計算条件は、動翼の取付け角は 0° で、周速比 ($\lambda = R\omega/U$) を $\lambda = 1.5$ とした。Fig.4 は、この結果を棒グラフで比較したものである。増速器のない場合には、 C_p は 0.0957 であるのに対し、増速器付きの場合にはどの場合もほぼ倍にな

っていることが分かる。増速器形状による差はほとんど無いに等しいが、わずかではあるが、円弧形が最も良い結果となっている。増速器を作る立場からは、できるだけ単純な形状が良いので、この結果は望ましい。

3.2 実験結果

Fig.5 は、回流水槽中の実験装置の写真である。水槽幅は1.5mであり、その中央部に直径0.6m、4翼のダリウス水車、その両側に長さ1.2m、厚さ0.2m、スパン0.6mの円弧形増速器を設置した。動翼は、翼形 NACA0018、翼弦長117mm、スパン長0.6mの直線翼である。

実験は、増速器がある場合と無い場合の2つの条件で、翼の取付け角を $0\sim 9^\circ$ まで 2.5° づつ変化させて水車効率 C_p を比較した。Fig.5 がその最終的な結果を示しており、増速器の無い場合には C_p が最も大きくなったのは翼の取付け角が 7.5° の場合で $\lambda=1.6$ において $C_p=0.3$ であったが、増速器付きの場合は翼の取付け角が 2.5° の場合で $\lambda=2.1$ において $C_p=0.55$ となった。このことから、増速器の有無によって水車近傍の流場が変化し、最高効率となる周速比が異なること、およびそのときの翼取付け角が異なることが分かる。増速器の有無による増速効果の単純な推定値としては、最高効率となった周速比から $2.1/1.6=1.31$ 程度と思われるが、一方 C_p からの推定値については $(0.55/0.30)^{1/3} = 1.22$ 程度であると思われる。このことから、比較的単純な増速器を付加することによって水車効率を大幅に改善できることが分かった。

なお、CFD 計算では今回実験した増速器の半分の長さでもほぼ同じ効果が得られる結果となっており、今後、どの程度まで小さくしても良いのか、などについても更に検討する必要がある。

4. むすび

CFD ソフトウェアを用いて、鉛直軸ダリウス形水車を高性能化するために増速器を付加することを試みた。その結果、長さが水車直径の2倍程度の円弧状の増速器を付加することによって水車効率を約2倍程度に高めることができることが分かった。これらのCFD計算結果から円弧状増速器を製作し、実験によって増速器の有無による水車効率の変化を調べた。その結果、CFDと同様な結果を得ることができた。今後、実用的な観点から増速器の最適形状、最適寸法について検討していきたい。

参考文献

- [1] F. Ponta and G. S. Dutt, "An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device", *Renewable Energy*, **20**, 2000, pp.223-241.
- [2] T. Setoguchi et al., "Development of two-way diffuser for fluid energy conversion system", *Renewable Energy*, **29**, 2004, pp.1757-1771.

Table 1 Results of performance by CFD for the turbine of $\alpha=0$ at $\lambda=1.5$

Kind of Diffuser	C_T	C_P
No	0.0638	0.0957
Arc	0.1250	0.1875
Catenary-1	0.1248	0.1872
Catenary-2	0.1242	0.1863
Trapezoidal	0.1231	0.1847
Concave	0.1190	0.1785

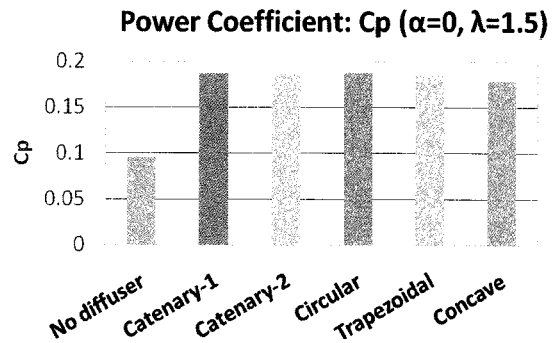


Figure 4 Comparison of power coefficient

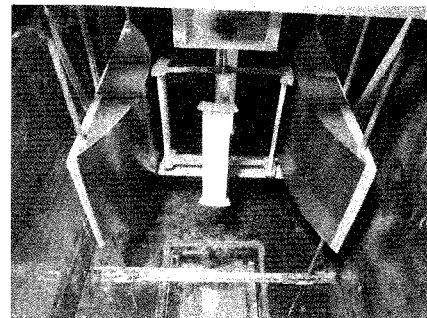


Figure 5 Experimental Setup

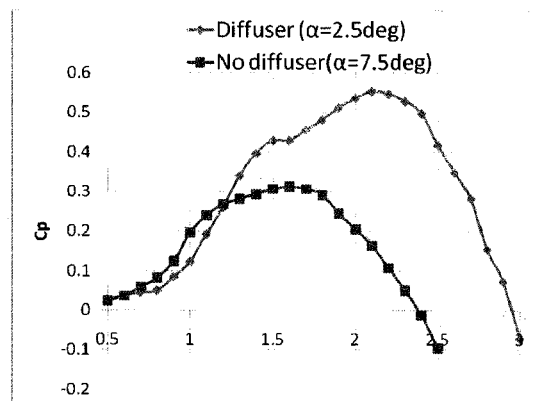


Figure 6 Power coefficient with/without diffuser

研究組織

	経塚雄策
研究協力者	上野正樹、陳 秀智
所内世話人	胡 長洪

地形上を伝播する非線形内部波の挙動の数値解析的研究

研究代表者 鹿児島大学大学院理工学研究科 柿沼太郎

研究の目的

辻・及川らは、2層流体における有限小振幅モデルを用いて孤立波の2次元相互作用の数値解析を行ない、初期の孤立波の振幅の4倍を超えるような新しい波の生成が起り得ることを示した。しかしながら、非線形性・分散性が共に強い内部波の相互作用の場合に対してそのような結果が得られるか不明であり、更に、底面地形が空間的に変化している場合の内部波の非線形挙動に関しては、未解明な点が多い。そこで、柿沼が導出した変分法に基づく方程式系を適用し、内部波の非線形性・分散性を十分に考慮して、底面地形の影響を受けながら伝播する内部波の1次元挙動、または、内部波の干渉を含む平面2次元挙動を数値解析的に研究する。柿沼・中山グループと辻・及川グループが協力してこの問題の解明にあたらうとするのが、本共同研究の目的である。

過去の共同研究において、まず、平成19年度に、計算手法の検討及び1次元波動を対象とした数値モデルの開発を行なった。次に、平成20年度には、平面2次元問題を対象とした数値モデルを開発した。そして、平成21年度において、潜堤上を伝播する内部波の1次元挙動の数値解析を行ない、更に、孤立波解を初期条件として数値モデルに導入し、平面2次元における内部波の干渉を対象とした数値解析を行なう。

研究の方法

本研究の具体的な方法は、次の通りである。

- (1) 潜堤を配置した領域を対象として、内部波の1次元挙動を数値解析により調べる。その際に、内部波の伝播に伴う界面形と流速及び動圧の変化を追跡し、内部波の非線形性及び分散性に依存する伝播特性を検討する。
- (2) 3次オーダの内部孤立波解（及川）を初期値として与える。初期条件は、速度ポテンシャル、界面形、界面における圧力である。数値モデルでは、速度ポテンシャルの鉛直分布を、鉛直座標 z のべき乗の関数で表わす。べき乗の関数の項数が多いほど、数値モデルの精度が向上することから、鉛直座標 z の2次関数までを考慮して検討を行なう。
- (3) 内部波の平面2次元挙動及び平面2次元における干渉を数値解析により調べる。

これらの各段階において、方程式系や数値解析に関する役割を分担し、計画の遂行にあたる。全メンバーが直接会って議論する機会を持つ。

主要な成果

本研究の主要な結論は、次の通りである。

- (1) 天端上の下層水深が浅い場合、内部波の峰が潜堤肩を通過するとき、その下方の水平方向流速の鉛直分布が、他の地点と逆の値を示す。
- (2) 天端長が十分に長い場合、内部波の峰の分裂が発生し得る。
- (3) 天端上の下層水深が浅い場合、内部波の峰下方の水平方向流速が顕著な鉛直分布を有するとき、その峰が分裂を開始し、このとき、峰下方の動圧が鉛直分布を示す。
- (4) 下層水深が相対的に浅い天端上では、内部波の伝播に伴い、計算対象時間内において、波の非線形性により峰の波高が次第に増加し、この峰下方の水平方向流速の鉛直分布が次第に大きな湾曲を示すようになった。
- (5) 速度ポテンシャルの鉛直分布を鉛直座標 z の 0~2 次関数で表わす場合に、3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与えることが可能となった。
- (6) 下層厚さに対する振幅の比が比較的低い場合、孤立波の定常進行波を再現できることが示された。
- (7) 下層厚さに対する振幅の比が比較的高い場合、孤立波形が伝播に伴い変化し、大振幅の孤立波の後方に小振幅の内部波が発生した。
- (8) 特定の条件下で、台形に近い孤立波形が再現されることがわかった。
- (9) 平面 2 次元の現象を対象とした数値モデルにおいて、3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与えることが可能となった。
- (10) 比較的簡単なケースを対象として、平面 2 次元において、内部波の干渉による新たな内部波の発生が確認された。

なお、3 次オーダの内部孤立波解（及川）には、大振幅の内部孤立波のみならず、台形に近い界面形の内部波も含まれている可能性がある。今後、これらの内部波に関して、より詳細な解の検討が必要である。また、その結果を平面 2 次元の数値解析に応用し、内部波の干渉による振幅の増大や、新たな内部波の発生等の検討を行ないたい。

研究成果報告

及川正行：二層流体系における孤立波解，22p.（未発表）

柿沼太郎・山下 啓・中山恵介：潜堤上における非線形内部波の伝播特性、非線形波動現象の数理と応用，京都大学数理解析研究所講究録。（印刷中）

研究組織

研究代表者 柿沼太郎（鹿児島大学大学院理工学研究科）
研究協力者 中山恵介（北見工業大学社会環境工学科）
所内世話人 辻 英一（九州大学応用力学研究所）
研究協力者 及川正行（九州大学応用力学研究所）

21 ME-S 1

応用力学研究所共同利用研究集会 (21ME-S1)

第2回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究 ～エピタキシャルグラフェンの形成と物性～

研究代表者：田中 悟 (九州大学工学研究院エネルギー量子工学部門)

所内世話人：寒川義裕 (九州大学応用力学研究所)

日時：平成22年1月29日 (金) 13:00-18:00

場所：九州大学伊都キャンパス・ウエスト2号館921室

1. 13:00~13:30

九大院工 田中 悟

「SiC 上エピタキシャルグラフェンの成長機構」

SiC 表面熱分解法によるグラフェンの形成は、高品質の大面積 SiC ウエハーを出発材料とするため、将来的なデバイス応用に向いていると考えられる。また、最近では形成されたエピタキシャルグラフェンにおいて、量子ホール効果や比較的高いキャリア移動度が報告されており、高品質であることが示されつつある。しかしながら、結晶が積み重なる正の結晶成長である通常のヘテロエピタキシーとは異なり、Si 原子の脱離・C 原子の再配列という負の結晶成長であるため、成長機構が複雑で既存の結晶成長の概念では説明できない系である。今までに様々な興味ある成長物理現象（超構造を有する $(6\sqrt{3}\times 6\sqrt{3})R30^\circ$ 界面構造、カーペット状成長、finger 状成長など）が観察されているが、成長機構に関する報告はあまりない。特に、グラフェン層の空間的な層数のばらつきや構造欠陥（回転ドメイン、積層不整など）を抑制・制御する上では、成長機構の解明は必須といえる。本発表では、特に原子レベルで制御された微傾斜 SiC 表面上のエピタキシャルグラフェン成長機構を議論する。

2. 13:30-14:00

福井大院工 橋本 明弘

「エピタキシャル・グラフェンの大面積転写技術」

グラフェンの発見は、HOPG からのスコッチテープによる機械的剥離法による SiO₂ 膜上へのグラフェンの転写から始まった。2004 年の発表以来、HOPG からのグラフェン形成とその物性研究以外に、SiC 基板上的エピタキシャルグラフェンの形成とその形成メカニズムや ARPES を用いたバンド構造などの物性研究及びそのデバイスへの応用などの研究、さらには、CVD 法による触媒金属上へのグラフェン形成とその転写に関する研究や化学的手法による大面積グラフェン形成法などの研究が進められてきた。最近、Cu 上に CVD 成長したグラフェンの SiO₂ 上への 1cm² もの大面積転写が発表されるなど、大面積グラフェンの異種基板への転写に関する研究にも大きな進展が見られつつある。

我々は、これまで微傾斜 SiC 基板上に形成された良質のエピタキシャルグラフェンをシート層として用いる大面積転写法に関する研究を行ってきた。

本報告では、最近我々が開発した新たな転写プロセスによる、Si-面微傾斜 SiC 基板上 2 層及び 3 層グラフェンシート層から SiO₂/Si 基板上への層数制御されたグラフェンの大面積転写に関する結果について報告する。

3. 14 : 00 ~ 14 : 30

広島大学院理 叶 茂

「Edge states of single layer graphene epitaxially grown on 4H-SiC(0001) studied by STM/STS」

The unusual electronic structures of graphene edges, which have been predicted by theoretical work[1], give rise to the possibility of constructing carbon-based spintronics. However, the experimental investigation on the edge states of single layer graphene grown on the semi-conducting surface is not well understood yet.

In our research, by utilizing the ultra-high vacuum (UHV) scanning tunneling microscopy (STM) and scanning tunneling spectroscopy (STS) at the temperature of 78K, we have investigated the growth mechanism of epitaxial graphene on the semiconductin SiC(0001) surface, and the localized electronic structures at the edges of single layer graphene epitaxially grown on the partially graphitized 4H-SiC(0001) substrate have been extensively investigated. We found that, in contrast with the ideal freestanding graphene model and the previously reported edge states of graphite [2], the edge states of epitaxially grown graphene are significantly modified due to the graphene-substrate interaction, which can be attributed to the symmetry-breaking of the sublattices [3].

[1]. M. Fujita, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1920 (1996).

[2]. Y. Niimi, et al., Phys. Rev. B 73, 085421 (2006).

[3]. S. Y. Zhou, et. al., Nat Mater. 6, 916 (2007).

4. 14 : 30 ~ 15 : 00

NTT 基礎研 影島 博之

「SiC(0001)上グラフェン成長のエナージェティクス」

SiC(0001)上のグラフェン成長の機構を解明する第一歩として、第一原理計算によりテラス上のエナージェティクスを調べた。Si はステップから選択的に脱離すると考えられるので、C はステップから供給されるだろう。そこで、その C が平らなテラス上に降り積もる過程として、グラフェン成長を捕らえた。ステップは重要だが、直接的には考慮しない。計算結果は、2 量体・3 量体よりもグラフェンシート形成の方が、次

のグラフェンシートが成長するなら 0 層目シートの下の方が、生じやすいことを示している。テラス上に余計な Si があつたり、Si 空孔が開いていたりしても傾向は変わらないが、後者は余剰 C を吸収する性質を持ち、結果できた構造は小さなグラフェン核とみなすことが可能である。従って、テラス上でも Si 脱離と余剰 C 吸収が適宜起こればグラフェン島が成長する。実際の成長表面の原子構造との関連性が注目される。

休憩 15:00-15:30

5. 15:30~16:00

東京大学物性研 中辻 寛

「微傾斜 SiC 上グラフェンの電子状態測定」

九州大学・田中グループで作製された、微傾斜 SiC(0001) 基板上の一層および二層グラフェンの原子構造と電子状態について、走査トンネル顕微鏡 (STM) と角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて調べた結果を紹介する。1 層および 2 層グラフェンの K 点付近の ARPES 測定では 1 本および 2 本の p バンドが観測され、均一な厚さのグラフェンが形成されていることが確認された。1 層の場合、Dirac 点の結合エネルギーが 0.4 eV 程度であること、直線分散からのずれによりエネルギーギャップがあるように見えること、STM 像に 6x6 超構造が観察されることは、これまでの SiC 上グラフェンでの報告例と一致した。ARPES 測定における運動量分布幅には異方性がみられ、これは、ステップ密度の異方性を反映していると考えられる。また、SiC との界面における 6x6 超構造ポテンシャルを反映したレプリカバンドも観測された。

6. 16:00~16:30

東北大学院理 菅原克明

「SiC 上のグラフェンの高分解能 ARPES」

単層グラフェンで理論的に予言されているディラックコーンの形成を実験的に明らかにする目的で、超高真空中または Ar ガス雰囲気中で作成した SiC 上の単層グラフェンの高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) を行った結果について報告する。ブリルアンゾーン K 点のフェルミ準位近傍において、p バンドと p* バンドを明確に観測した。p* バンドの一部はフェルミ準位の下に入り込んでおり、SiC 基板またはグラフェン構造に類似したバッファ層からグラフェン層への電荷移動があることを示している。さらに p バンドと p* バンドの間には、試料作成条件に依存した 100-300meV のギャップが開いていることを見いだした。このバンド間ギャップは、原子間力顕微鏡の実験結果から、グラフェンのテラスサイズに密接に関係していることを示している。

7. 16:30~17:00

和歌山大 木曾田 賢治

「エピタキシャルグラフェンのラマン分光」

シリコンカーバイド表面を炭化させて形成されるエピタキシャルグラフェンは、高配向熱分解グラファイトの劈開や酸化グラファイトの還元によって得られるグラフェン作製に比べて再現性の点ではるかに優位である。一方、ラマン散乱分光法は、共有結合性軽元素から構成される物質やそのナノ構造体の評価手段として重要な役割を果たしている。実際、グラフェンの評価に関しては、最も簡便な評価測定手段である。我々は、シリコンカーバイド基板に形成されるエピタキシャルグラフェンをもつ場合ラマン散乱分光法実施してその過程を明らかにすることを目的としている。本研究会では我々のグループで行っている深紫外ラマン分光法を用いたエピタキシャルグラフェンの評価とその利点について発表したい。

8. 17:00~17:30

物質・材料研究機構 塚越 一仁

「SiC 上グラフェン電気伝導の伝導異方性」

ナノファセット構造を有する off-axis SiC 基板に成長したグラフェンの伝導異方性を電界効果トランジスタ (FET) として評価した。表面ナノファセット構造に対して平行もしくは垂直に FET チャンネルを作り、面伝導率のゲート電圧依存性を測定した。ナノファセット構造に対して平行チャンネルの方が垂直より全ての素子で面伝導率が高く、移動度も高くなる。電荷中性点における電気伝導率と電界効果移動度より評価した最少キャリア密度は、電界効果移動度変化に対して、垂直チャンネルでは最少キャリア密度が大きく変化するが、平行チャンネルでは大きく変わらない。この要因は、ナノファセット構造の平坦部と斜面部でイオン化不純物濃度が異なり、最少キャリア密度と移動度が変わることによると推測される。つまり、垂直チャンネルではイオン化不純物帯を多数横切ることによって、不純物密度の多少を反映しキャリア密度が分散し移動度が小さくなる。また、平行チャンネルではイオン化不純物帯を横切らないため、移動度が高くなり得る。SiC 基板上のグラフェンのナノファセット構造の平坦部と斜面部の伝導の差異に基づく電気伝導に関して実験結果を紹介する。

9. 17:30~

総合討論

応用力学研究所共同利用研究集会 (21ME-S1)

第2回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究 ～エピタキシャルグラフェンの形成と物性～

研究代表者：田中 悟 (九州大学工学研究院エネルギー量子工学部門)

所内世話人：寒川義裕 (九州大学応用力学研究所)

日時：平成22年1月29日 (金) 13:00-18:00

場所：九州大学伊都キャンパス・ウエスト2号館921室

1. 13:00~13:30

九大院工 田中 悟

「SiC上エピタキシャルグラフェンの成長機構」

2. 13:30-14:00

福井大院工 橋本 明弘

「エピタキシャル・グラフェンの大面積転写技術」

3. 14:00~14:30

広島大学院理 叶 茂

「Edge states of single layer graphene epitaxially grown on 4H-SiC(0001) studied by STM/STS」

休憩 14:30-15:00

4. 15:00~15:30

NTT 基礎研 影島 博之

「SiC(0001)上グラフェン成長のエナージェティクス」

5. 15:30~16:00

東京大学物性研 中辻 寛

「微傾斜 SiC 上グラフェンの電子状態測定」

6. 16:00~16:30

東北大学院理 菅原克明

「SiC上のグラフェンの高分解能 ARPES」

7. 16:30~17:00

和歌山大 木曾田

「エピタキシャルグラフェンのラマン分光」

8. 17:00~17:30

物質・材料研究機構 塚越 一仁

「SiC上グラフェン電気伝導の伝導異方性」

9. 17:30~

総合討論

研究会に関するお尋ねは、エネルギー量子工学部門 田中 まで
(伊都 内線3535, stanaka@nucl.kyushu-u.ac.jp)

氏名	所属	大学関係	企業等	学生
田中悟	九大エネルギー量子工学	1		
寒川義裕	九大応研	1		
井上仁人	九大航空宇宙工学			1
橋本明弘	福井大学工学部	1		
木曾田賢治	和歌山台教育	1		
中辻寛	東大物性研	1		
菅原克明	東北大WPI	1		
水田典章	九大総理工			1
水野清義	九大総理工	1		
影島博之	NTT		1	
塚越一仁	NIMS		1	
家近泰	政策研		1	
稲垣祐次	九大エネルギー量子工学	1		
加藤喜峰	九大工	1		
木村昭夫	広大院理	1		
叶 茂	広大院理			1
木村将成	九大航空宇宙工学			1
上原直也	九大エネルギー量子工学			1
森下幸紘	九大エネルギー量子工学			1
石山裕策	九大エネルギー量子工学			1
小野田磔	九大総理工			1
河江達也	九大エネルギー量子工学			1
計		10	3	9

22

地形のダイナミクスとパターン及び境界領域

研究代表者・柳田達雄（北海道大学電子科学研究所）

1 研究集会の開催目的

多くの地形変化のダイナミクスは流体運動とそれに伴う物質移動からなっている。物質移動は、流体運動を規定している境界条件を変化させ、その変化が流れにフィードバックする極めて非線形性の強い現象である。地形変化の代表的な例は、河川流路変化・河岸変化・砂丘移動・鍾乳石形成・熱収縮割れ目の形成と多岐にわたり、各分野で異なる対象・異なる方法論で取り扱われてきた。本研究集会では、これらの現象を流れとそれに伴う物質移動による境界の自発的運動として捉え、異分野での理論、数値計算、実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより、新たな知見を見いだすことを目的としたい。このような流体と固体およびそれらの相互干渉に起因する研究集会は、応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる。

2 プログラム

11月25日（水）

- 14:00-14:45 新屋啓文, 西森 拓, 粟津暁紀（広大理）
結合断面モデルによる砂丘の形状とダイナミクス
- 14:45-15:30 西村浩一（名大環境）
氷河湖の形成と決壊洪水
- 15:45-17:00 山田泰広（京大工）
地質構造形成モデリングによる最近の知見
- 17:00-18:30 ポスターセッション（資料室 W 603）
下川倫子（摂南大工）, 太田 正之輔（九大総理工）
二成分砂山に見られる新しい縞構造
佐伯 亜由美（九大総理工）, 岡村 誠（九大応力研）
浸食モデルによる水路網形成とそのパターン
遠藤徳孝（金沢大理工）, 上野佑基（金沢大理）
Rhomboid rill の室内実験

11月26日（木）

- 9:30-10:15 伊藤麻実, 小林 亮, 秋山 和（広島大理）
河川の流路パターン
- 10:15-11:30 阪口 秀, 西浦泰介（海洋研究開発機構）
プレートテクトニクスの開始から終焉まで
- 11:45-12:30 谷口圭輔（同志社大）
砂が枯渇する系で発達する水成ベッドフォームの特徴
—平成21年10月時の木津川の増水後の観察事例—

3 講演内容の概要

結合断面モデルによる砂丘の形状とダイナミクス
新屋啓文, 西森 拓, 粟津暁紀

バルハン砂丘や横列砂丘の形状の安定性や移動の本質を解析的に捉えるため、西森、勝木らの2次元バルハン衝突方程式を拡張し、風向きの2次元断面を複数抜き出し、隣り合う断面との相互の砂のやり取り(相互作用)を取り入れた2次元断面結合モデルを提案した。このモデルは、3次元バルハン砂丘のダイナミクスを低次元力学系として表現しており、初期屈曲度、相互作用の強さ、風の強さに依存した、形状の安定性について解析的に議論できる。その結果、i) 初期屈曲度に対し、相互作用を強くすることで安定な形状を維持できる領域が増加する。ii) 風を強くすることで屈曲度が鋭くなることが分かった。

氷河湖の形成と決壊洪水

西村浩一

ブータンやネパールなどヒマラヤ山脈の麓の国々では、氷河の縮退にともなって拡大した氷河湖の決壊洪水 (Glacial Lake Outburst Flood: GLOF) が1960年代から頻発しており、切迫した環境問題となっている。ブータンだけでも2000以上存在すると言われる氷河湖とその決壊事例、さらにはその形成と拡大メカニズムの解明を目的に実施されたこれまでの研究の概要を紹介する。

地質構造形成モデリングによる最近の知見

山田泰広

乾燥砂などの粒状体材料を用いたモデル実験によって、数百メートルから数キロメートルスケールの地質構造形成過程を物理的等価に実験室で再現できる。今回は、逆断層先端部に形成される斜面が急傾斜化することに伴って発生する斜面崩壊をモデル実験で再現した。その結果、斜面崩壊には下部で発生する小規模なものとは上部で発生する大規模なもの2種類が存在すること、小崩壊から大崩壊へ進展すること、斜面崩壊が側方に移動することなどが観察された。また、モデル中の1条の断層に注目し、その微細構造と発達過程を解析した結果、まず微細せん断帯集合体で構成される幅広せん断帯が形成された後、ひずみ集中によって断層中軸帯が形成され、さらに断層中軸帯内で微小ブロックが回転運動することなどが観察された。

二成分砂山に見られる新しい縞構造

下川倫子, 太田 正之輔

混合した二種類の粉体を一様に混ぜ合わせ、狭い隙間に入れると、規則正しい縞構造を持った砂山を自発的に形成する。今回、従来の二倍の砂山で同様の実験を行ったところ、二つの周期を持つ縞構造が形成された。二重縞構造の形成要因について、詳細な実験結果を元に現象論的モデルを立て、理解した。

浸食モデルによる水路網形成とそのパターン

佐伯 亜由美, 岡村 誠

地形形成のモデルは数多くあるが、複雑な水路網が形成される機構は未だ明らかではない。そこで我々は浸食の効果のみを扱ったシンプルな流体モデルを提案し、数値シミュレーションを行った。その結果、流長一流域のべき乗則の実測とよく合う水路網が再現できた。またフラクタル次元に関しても実際の地形と近い値をとり初期勾配に依存しないことが分かった。

Rhomboid rillの室内実験

遠藤徳孝, 上野佑基

砂浜の波打ち際で発生する数cm程の菱形の微地形、rhomboid rillの地形学的性質を室内実験で調べた。実験は3種類の粒径の砂を用いて行った。0.1mmと0.2mmの砂では、菱形の冲向き(つまり斜面下方)の角度は斜面傾斜と正の相関があった。特に、斜面傾斜が10°以上のときその傾向は明瞭である。しかし、斜

面傾斜が 10° 未満の場合と、砂のサイズが 0.5mm の場合では明確でなかった。以上のように菱形の角度は斜面傾斜に依存し、一方、フルード数や表面流速とはあまり強い相関が見られなかった。

河川の流路パターン

伊藤麻実, 小林 亮, 秋山 和

河川は長い年月をかけて河床を浸し、流路を変え、また大きく変形していく非常にダイナミックな存在である。もちろん、そのタイムスケールの悠久さのために、我々は河川の歴史の一部始終を観察することはできない。そこで、河川のダイナミクスを理解するための方策としては、河川のミニチュアモデルをつくる、河川の数理モデルをつくるなどが考えられる。今回の発表は河川のミニチュアモデルを観察、記録した結果を発表する。流す水とトレイの中に温度差をすることで、主流の動きだけをとらえるのではないかと考え実験ではサーモグラフィーカメラを使用した。サーモグラフィーカメラで長時間微速度撮影した結果、主流が蛇行し成長する様子や、主流の蛇行が川幅を広くする様子など、主流と構造の関係を見ることができた。また、傾斜を変化させることで直線流路、大蛇行やショートカット、蛇行が上流に上がるような様子などをとらえた。主流の動きのみに注目してみると、形を保ったまま下流に下りていく様子、時間と共に定常化する様子を観察できた。

プレートテクトニクスの開始から終焉まで

阪口 秀, 西浦泰介

マイケル・ファラデーが振動するスピーカー上に見出した粉体対流は、地球のマントル層のように中心から暖められ表面から冷やされる厚みを有する球殻状重力環境下でも再現できるのか? という素朴な疑問に答えるために、DEMで大規模長時間数値実験を行った。計算モデルは球殻中心に固定球核(熱浴)を配置し、その周りにランダム配置した粒子を核中心に向けて重力充填する。さらに、最外殻層には冷却用粒子を配置し、粒子間および粒子-核間で熱伝導をさせて温度に応じて粒子の運動エネルギーを増減させ、その他は通常のDEMと同様である。この様に至って単純なモデルで粒子間の摩擦係数と反発係数を変化させただけで、レイリー・ベナル対流のようなサッカーボール状対流の他、バレーボール状対流、および土星の様な洗濯機状対流パターンが見つかった。さらに、洗濯機状対流の過渡期ではプレート運動を連想させる非対称沈み込み運動が見つかった。サッカーボールからバレーボール、洗濯機になるにつれて、粒子層はより高密度充填され固体的な状態であり、従来の流体ベースのマントル対流シミュレーションでは再現できなかった固体ならではのプレート沈み込み運動を再現できた。

砂が枯渇する系で発達する水成ベッドフォームの特徴—平成21年10月時の木津川の増水後の観察事例— 谷口圭輔

2009年10月初めに日本列島に上陸した台風18号は、近畿地方の広い範囲に多くの雨を降らせた。京都府南部を流れる木津川では、平常時から最大6mの水位上昇がみられた。この増水により、京都府京田辺市に位置する、高水敷を利用したグラウンド上に、多くの砂床形が形成された。侵食地形であるObstacle Markを上流側に持つ場では、移動可能な砂の量を反映して、流向に平行な向きに砂床形の種類が変化した。一方、砂の枯渇する系では、流向に垂直な方向に砂床形の種類が変化した。この変化は、流速の変化を反映するとみられる。

4 開催日程, 場所

開催日程 2009年11月25日(水) - 11月26日(木)

開催場所 九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室), 資料室(W603号室)

講演数 9件

参加者数 17人

(研究集会)

強非線形流体・構造連成解析

研究代表者

大阪大学大学院工学研究科教授

柏 木 正

1. 目的

強非線形流れに関する研究は、数値流体力学分野での各種の高精度計算手法の開発によって近年急速に発展してきた。しかしこれまでの研究は、複雑な流れの解析に重点が置かれ、どちらかと言うと、研究の興味は新しい計算スキームの開発、計算精度の検証や改良、複雑流体现象そのものの科学・物理的理解などであった。

現在ではそれらの研究成果を受けて、津波による構造物の破壊、荒天波浪中での浮体への波浪衝撃やスラミングによる強非線形流体・構造連成問題など、浮体や構造物の安全性・防災を意識した実際問題への応用が期待されている。それに関連した研究をしているいろいろな分野の研究者が一堂に会し、研究成果の発表、研究情報の交換を行うことが目的である。また、国内だけでなく海外からの参加者も加え、強非線形問題、流体構造連成などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

2. 研究集会の開催日時、場所

開催日時：平成21年12月11日（金） 13：00～17：40

12月12日（土） 9：00～12：15

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室（W601号室）

3. 講演プログラムと概要

講演プログラムは末尾に示しているのですが、ここでは講演の順番に従ってその概要、並びに全体的な雰囲気、参加者からの感想などについて述べておく。なお、目的にも書いたように、この研究集会は既に国際研究集会として認知されており、今回も講演、討論はすべて英語で行われたことを申し添えておく。

Monolithic Modeling of Viscous Flows around Deformable Structures

Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)

An efficient FEM-fictitious boundary method for the detailed simulation of solid-liquid two phase flows with large number of moving particles is presented. An explicit fictitious boundary method based on a FEM background grid which covers the whole computational domain and can be chosen independently from the particles of arbitrary shape, size and number is used to deal with the interactions between the fluid and the particles. The flow is computed by a special ALE formulation with a multigrid finite element solver. The solid particles are allowed to move freely through the computational mesh which is adaptively aligned by a special mesh deformation method (r -type moving grid method) such that the accuracy for dealing with the interaction between the fluid and the solid particles is highly improved. Since the presented method treats the fluid part, the calculation of forces and the movement of particles in a subsequent manner, it is potentially powerful to efficiently simulate real particulate flows with huge number of particles. A series of simple test cases is first presented, and then as an illustration of the efficiency of the presented method, several examples of numerical simulations of particular flows, including three big disks plunging into 2000 small particles and sedimentation of 10,000 particles in a cavity, are shown.

Analysis of Linear and Nonlinear Ship Springing in Time Domain by Fully Coupled BEM-FEM

Yooil KIM, Kyoung-Hwan KIM, Yonghwan KIM (Seoul National University)

Numerical methodology to solve ship springing problem, which is basically fluid-structure interaction problem, was explored in this study. Solution of this hydroelasticity problem was sought by coupling higher-order B-spline Rankine panel method and finite element method in time domain, each of which is introduced for fluid and structure domains respectively. In the present study, extensive case studies have been done on the numerical schemes, especially focusing on the iteration method, FE analysis of beam-like structure, handling of forward speed problem and so on. Two different iteration schemes, Newton-style one and fixed-point iteration, were tried in this study, and results were compared between the two. For the solution of the FE-based equation of motion, direct integration and modal superposition method were compared with each other from the viewpoint of its efficiency and accuracy. Finally, calculation of second derivative of basis potential, which is difficult to obtain with accuracy within grid-based method like BEM was discussed.

Large-scale Two-Phase Flow Simulation

Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)

The purpose of this research is to develop a large-scale two-phase flow simulation code in order to get high spatial resolution (~mm). In this presentation, two-phase flow solver with Level Set method to tackle high spatial resolution large-scale simulation is described. As a numerical example, we have carried out a dam breaking simulation in which the floor is wet at the beginning. The computation is performed in a computer with 512 CPU cores. From the present high-resolution simulation it is shown that three-dimensionality has significant effect on the impact pressure and the energy dissipation after wave breaking.

Numerical Simulation on Tsunami due to Slope Failure by Fluid-Elastoplastic Hybrid Particle Method

Hiroyuki Ikari (Kyoto University)

In this presentation, the hybrid model of elasto-plastic body and fluid based on the particle method, which has been developed as a tool of interface fields between soil mechanics and hydrodynamics, is introduced. This model can be applied to the prediction of a river-bank destruction due to flood for urban disaster prevention. Numerical examples are shown on a collapse of an overhanging cohesive soil cliff. The collapse process, which is caused by the sudden change of the stress state in the ground by the outbreak of the crack, can be tracked. Large deformation problems, that were unable to be simulated by conventional methods like the FEM, can be dealt with by the particle method.

GPU Computing for Large-Scale CFD

Takayuki Aoki (Tokyo Institute of Technology)

Some of CFD applications are successfully accelerated on GPU (Graphics Processing Unit) and several-ten times speed-ups are often reported to compare with a CPU core. In order to execute large-scale CFD computations beyond local VRAM limitation, GPU-to-GPU communications are required over nodes through the PCI-Express bus and the interconnection. These communications cost comparable to GPU computation and the overlapping technique between computation and communication has to be introduced to sustain the linear strong scaling. We demonstrate the results of Lattice Boltzmann method, Tsunami simulation solving shallow water equation, compressible flow computations and show the multiple-GPU scalabilities on Tokyo Tech TSUBAME grid cluster.

Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction for Vortex-Induced Vibration

Hyung-Taek Ahn (University of Ulsan, Korea)

This presentation is about the current state of the art in VIV (Vortex-induced vibration) simulation. VIV is being observed in various types of naval and offshore structures. Numerical prediction of VIV is a multidisciplinary subject as the phenomenon should be understood through multidisciplinary perspectives, such as the fluid mechanics, vortex dynamics, ocean turbulence, structural dynamics, etc. A new computational approach based the coupled simulation of computational fluid dynamics (CFD) and computation structural dynamics (CSD) is presented. Experiments to be carried out at the Circulating Water Channel (CWC) at the University of Ulsan, Korea will also be presented.

An Eulerian Scheme with Lagrangian Particle for Evaluation of Seakeeping

Suandar Baso (Hiroshima University)

We have developed an efficient and robust CFD method to compute a strongly nonlinear interaction between wave and ship, such as heave and pitch motions in a severe wave condition, resultant slamming on the surface of a ship and an impact pressure due to green-water phenomena. The proposed method is based on coupling the Eulerian method for fluid phase with the Lagrangian method for solid phase to compute fluid-structure interaction. In this model, two kinds of Lagrangian particles are employed. One is free surface particle located near the free surface to capture a water surface accurately. The other one is SPH particle to compute ship motions in 3D. A fully nonlinear phenomenon with wave breaking is treated on a fixed Eulerian grid with the free surface particles to rebuild density function for capturing an interface between two phases in a filamentary under resolved region. In this study, the proposed model was applied to ship-wave interaction for evaluating of seakeeping of a ship in waves and their results were compared with experimental results and strip theory.

Numerical Computation of Added Resistance on Ships in Waves

Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

Accurate prediction of added resistance on ships is one of essential element for power prediction, since the magnitude of added resistance can be 10~30 % of calm-water wave resistance. In the present study, the numerical computation of added resistance on ships due to incoming waves is treated. As a method of solution, a higher-order Rankine panel method is applied in time domain. The added resistance is evaluated by integrating the second-order pressure on the body surface. As the numerical result, mean wave drift forces of hemi-sphere and barge are computed at zero speed, and the computational results are compared with experimental data. Furthermore the mean drift forces of LNG FPSO and LNG carrier positioned by side-by-side are also compared with experimental data. Computational quantities of added resistance with various ship speed are validated for a few ship models, including Wigley hulls, Series 60(CB=0.7) and S175 containership by comparing with experimental data. The computational results of mean drift force and added resistance show reasonable correspondences with experimental data. The components of added resistance are observed for each integral term, and the contributions of radiation and diffraction components are also compared.

Control of Heave-Pitch Coupled Motion of Cruise Ships

Jae-Han Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

The typical device to reduce the roll motion of cruise ships is stabilizing fin. The present study includes the application of the active stabilizing fin. Two or four stabilizing fins are equipped to reduce the roll and/or pitch motions of cruise ships. Each fin is controlled by digital control algorithms which are PID (proportional-integral-derivative) control and LQR (linear quadratic regulator). A single controller can actuate two or four fins at the same time in consideration of some constraints such as a free surface effect and a mechanical saturation of actuator for a realistic simulation. Numerical computation is carried out by using the time-domain ship motion program, called WISH-CRUISE. The resultant motion responses as performance of controllers are compared for different control algorithms. LQR control algorithm shows a good performance for not only motion stabilizing but also easy application. PID control also can provide a good performance for roll or pitch motion stabilizing. However, more effort is generally needed for tuning up a proper set of gains.

Comparative Study on Hydroelastic Response of Vertical Plate due to Wave

Guanghua He (Osaka University)

In the present paper, wave-plate interactions are simulated using the Mixed Eulerian Lagrangian method for the free-surface flow and the FEM for the deflection of the plate. The present work can be considered as a nonlinear numerical extension of the work of Peter and Meylan, which treated the 2-D vertical elastic problem in the framework of nonlinear potential flow rather than the linear potential flow. A hydroelastic vibration of plate due to pulse-type initial elevation of the free surface is systematically investigated. Firstly, a comparison between elastic plate and a wall due to pulse-type initial wave is illustrated. Then, the influence of the plate stiffness and the edge condition at the top of plate on the wave-plate interaction is also studied.

Numerical Simulation of a Floating Fish Cage

Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)

A numerical code was developed to predict the performance of fish culturing system. The numerical implementation is based on a popular lumped mass method and multi solid body computation with 6degrees of freedom. It can compute complicated interaction among fish cages and mooring systems consisted from synthetic cable and rigid buoys under current and wave conditions. Some numerical examples of floating fish cage arrangements were demonstrated and discussed.

Structural Analysis in FSI Problems

Xian Chen (Kyushu University)

In this study we consider a weak coupling approach, in which a CIP (Constraint Interpolation Profile) based method is used for fluid motion and a nonlinear FEM method is used for structure deformation. The fluid and the structure are solved sequentially by implementation of existing codes for fluid solver and structure solver. In this presentation, some features of nonlinear FEM method are discussed. There are three types of nonlinearity in structural analysis: geometry, material and boundary. Large deformation problems are usually treated based on reference configuration and iterative procedure is needed in nonlinear structural analysis. Interaction of fluid and structure is indeed interaction of boundary nonlinearities in fluid and structure. Stability of weak coupling solution of FSI problem relies on the nonlinearity and sensitivity of the partitioned solutions; therefore, improving stability may need handling equation system of the counterpart.

Motion and Structural Loads on a Modern Containership: Experiment vs. Computation

Myung-Jae Song, Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Seoul National University, Korea)

The objective of this study is to validate numerical seakeeping codes based on nonlinear 3-D time-domain Rankine panel method by comparing the numerical results with experimental data for industrial applications. The numerical codes used are based on weakly-nonlinear scheme which include nonlinear Froude-Krylov and restoring forces. Main focus of the study is to validate nonlinear numerical tools for industrial use through the comparison of the nonlinear characteristics of wave-induced loads on a modern 6500 TEU containership. This study attempts to evaluate the vertical bending moments, vertical shear forces, torsion moments, horizontal shear forces and horizontal bending moments at high waves, as well as linear transfer functions.

Numerical simulations for the foregoing responses are performed with two different numerical codes, WISH and WASIM. WASIM, developed by DNV, is one of the accredited seakeeping code in the shipbuilding industry, and WISH, developed by SNU, begins industrial debut. The comparisons show that the linear and nonlinear motions and hull girder loads computed by numerical codes have good agreements between numerical and experimental results except in horizontal modes at extreme waves. It is found that the both numerical codes have acceptable for industrial applications except the horizontal structural responses. To increase the accuracy of the time-domain numerical codes in horizontal modes at extreme waves particularly in oblique sea, careful treatment is recommended to the control of the horizontal displacement of ships.

Numerical Simulation of Container Ship in Large Waves

Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

Some recent developments and applications are presented on RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computational Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics), which is a in-house CFD software developed for strongly nonlinear free surface-body interaction problems such as ship motions in large-amplitude waves, resultant slamming on ship's bottom and flare, the green-water impact on deck, and so on. The numerical results of the computation on a latest post-Panamax container ship model moving in large-amplitude regular waves for various wave lengths and wave angles, are presented. The frequency response characteristics of the wave-induced motions and various wave loads, such as the vertical bending moment and the shear force on three cross-sections of the ship, are compared to the experiments and the results obtained by linear-theory based numerical methods.

4. おわりに

多くの分野で関連の深い「強非線形流体・構造連成解析」を取り上げ、種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め、情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会でも「流体・構造連成」を共通のキーワードとしていくつかの分野における最新の研究成果を聞くことができ、学際的な研究の発展が強く実感できた。今回も外国からの研究者が参加していたため、すべての講演・議論を英語で行った。韓国・中国・日本からの参加者の交流もこの研究集会の重要な目的になっており、この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

この研究集会は、特にアジア域の若い研究者(大学院生も含む)にとって大変良い刺激になっていることは事実であり、数値計算が若い人によって行われていることを考えれば、優秀な人材育成のためにも、この研究集会を継続して行うべきだと考えている。

プログラム

期 日： 2009 (平成21) 年12月11日 (金), 12日 (土)
場 所： 九州大学応用力学研究所西館6階W601号室

12月11日 (金)

- 13:00~13:10 Opening Address
Masashi Kashiwagi (Osaka University)
- 13:10~14:00 Keynote Presentation :
Monolithic Modelling of Viscous Flows around Deformable Structures
Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)
- 14:00~14:30 Large-scale Two-Phase Flow Simulation
Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)
- 14:30~15:00 Numerical Simulation on Tsunami due to Slope Failure by Fluid-Elastoplastic Hybrid
Particle Method
Hiroyuki Ikari (Kyoto University)
- (休 憩)
- 15:20~16:00 GPU Computing for Large-Scale CFD
Takayuki Aoki (Tokyo Institute of Technology)
- 16:00~16:40 Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction for Vortex-Induced Vibration
Hyung-Taek Ahn (University of Ulsan, Korea)
- 16:40~17:10 An Eulerian Scheme with Lagrangian Particle for Evaluation of Seakeeping
Suandar Baso (Hiroshima University)
- 17:10~17:40 Numerical Computation of Added Resistance on Ships in Waves
Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

(懇 親 会)

12月12日(土)

- 9:00~ 9:30 Control of Heave-Pitch Coupled Motion of Cruise Ships
Jae-Han Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)
- 9:30~10:00 Comparative Study on Hydroelastic Response of Vertical Plate due to Wave
Guanghua He (Osaka University)
- 10:30~10:30 Numerical Simulation of a Floating Fish Cage
Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)
- (休 憩)
- 10:40~11:10 Structural Analysis in FSI Problems
Xian Chen (Kyushu University)
- 11:10~11:40 Motion and Structural Loads on a Modern Containership: Experiment vs. Computation
Myung-Jae Song, Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim
(Seoul National University, Korea)
- 11:40~12:10 Numerical Simulation of Container Ship in Large Waves
Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)
- 12:10~12:15 Closing Address
Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性

研究代表者・吉田 恭（筑波大学数理物質科学研究科）

1 研究集会の開催目的

大気・海洋の流れ、プラズマ、工学的応用分野における流れ、そして我々の身の回りの多くの流れは乱流である。これら多様な乱流現象の物理的理解および応用的予測・制御のため、各分野で理論的解析・実験・観測・計算科学などの様々な手法で精力的に研究されている。これら様々な分野で異なる手法を展開する研究者が、互いの情報を交換して議論を通して知識・問題意識を共有する場を設けることは、重要であると思われる。また、乱流が非平衡力学系の一典型であることを考えると、より幅広く様々な非平衡系の研究者と乱流研究者が交流を持ち、その多様な視点をそれぞれの分野に導入し、またそれぞれの問題の背後にある普遍性を探ることは、今後の乱流および非平衡系の研究の展開に有意義であると思われる。日本における国際会議やワークショップを見る限り、このような機会は少ないのが現状と思われる。本研究集会では、異分野での理論、数値計算、実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより、新たな知見を見いだすことを目的としたい。このような研究集会は、応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる。

2 プログラム

11月12日(木)

- 13:30-14:00 津田慎也、後藤 晋（京大工）
歳差運動する球体内に維持される乱流の統計
- 14:00-14:30 渡邊 威、後藤俊幸（名工大工, JST-CREST）
乱流中の高分子鎖モデルの数値シミュレーション
- 14:50-15:50 小松信義（金沢大）、安部隆士（東大, ISAS/JAXA）
ミクロな時間可逆分子シミュレーションを通して見たマクロ現象の不可逆性
- 15:50-16:20 高田 滋（京大工）
線形化ボルツマン方程式の対称性とその応用
- 16:40-17:10 石崎龍二（福岡県立大人社）、秦 浩起（鹿大理）、庄司 多津男（名大工）
ACトラップにおける帯電微粒子のカオス拡散
- 17:10-17:40 R. Anugraha, T. Ueki, Y. Hidaka（九大工）、M. I. Tribelsky（MIREA, Russia）、S. Kai（九大工）
A New Type of Defect in Soft-Mode Turbulence

11月13日(金)

- 9:30-10:30 有光敏彦（筑波大）、有光直子（横浜国大）、本池 巧（湘北短大）
充分発達した乱流の新しい解釈に向けて— δ^∞ 不安定軌道の集団 —
- 10:30-11:00 有光直子（横浜国大）、有光敏彦（筑波大）
MPDFTによる充分発達した乱流の解析—数値および風洞実験から得られたPDFによる—
- 11:20-11:50 大屋裕二（九大応力研）
風レンズ風車という風力発電システム
- 13:30-14:30 磯部雅晴（名工大）
非平衡統計物理学と分子シミュレーション—2次元粉体気体の乱流化と統計則—
- 14:30-15:00 波多野 恭弘（東大地震研）
粉体せん断流における速度揺らぎの空間構造とレオロジー
- 15:20-15:50 竹内一将、黒田真史（東大理）、Hugues Chate（CEA-Saclay）、佐野雅己（東大理）
液晶乱流の時空間欠性に見る吸収状態相転移のユニバーサリティ
- 15:50-16:20 小林 幹、山田道夫（京大数理研）
シェルモデル乱流における時間間欠性のメカニズムについて
- 16:40-17:10 服部裕司、中野 わかな（東北大流体研）、畠山 望（東北大工）
Volume Penalization 法による渦対生成の数値解析研究
- 17:10-17:40 広瀬直毅（九大応力研）
東アジア縁辺海のデータ同化モデリング

11月14日(土)

- 9:30-10:30 板野智昭（関大）、S. C. Generalis（Aston Univ）、藤 定義（京大）、関 眞佐子、秋永 剛（関大）
低レイノルズ数における平面クエット流の厳密解とその渦構造
- 10:50-11:20 吉川 裕、増田 章（九大応力研）
海洋表層における乱流感星境界層流の観測

- 11:20-11:50 松本洋介, 関 華奈子 (名大太陽地球環境研)
地球磁気圏速度シア境界層における無衝突プラズマの乱流輸送
- 13:30-14:00 森肇, 岡村 誠 (九大応力研)
カオス・乱流の2重構造と動的スケーリング則
- 14:00-14:30 富永広貴 (佐賀大医), 森肇 (九大応力研), 石崎龍二 (福岡県立大),
森 信之 (九州看護福祉大), 黒木昌一 (福岡女子大)
Duffing 振動子系の時間相関関数の初期 regime と終期 regime
- 14:50-15:20 森野佳生 (京大情報), 大内克哉 (神戸芸工大), 宮崎修次 (京大情報)
周期外力下の Swift-Hohenberg 系における緩和現象
- 15:20-15:50 庄司 多津男, 西川徳彦, 岩井一彦 (名大工), 秦 浩起 (鹿大理工)
誘電体バリヤ放電における電流フィラメントのパターン形成
- 15:50-16:20 秦 浩起 (鹿大理工), 庄司 多津男, 石川多一 (名大工)
DC 電極間の微粒子による振動子結晶

3 講演内容の概要

歳差運動する球体内に維持される乱流の統計 津田慎也, 後藤 晋

歳差運動を行う球体を歳差球体と呼ぶ。この歳差球体を支配するパラメータは自転軸まわりのレイノルズ数 Re と歳差の強さを表すポアンカレ数 Γ である。本研究では、これまで明らかにされていなかった、 Re と Γ がどのようなパラメータのとき、内部流れが最も発達した乱流となるかを実験的に調べた。今回の実験では $Re = 5000-80000$ の範囲に関して実験を行った。結果は、自転軸まわりの角速度に対し、歳差軸まわりの角速度が5-10%程度のときに内部流れは最も発達するということが判明した。また、歳差軸まわりの角速度がそれ以下のときは、自転軸まわりの回転が支配的な流れとなり、それ以上のときは歳差軸に平行な柱状の構造が支配的な流れになり、歳差軸まわりの角速度が自転軸まわりの角速度に対して20%程度のときには、大域的な周期流が存在するということが判明した。

乱流中の高分子鎖モデルの数値シミュレーション 渡邊 威, 後藤俊幸

乱流中の高分子鎖の振る舞いとその統計性質を調べるために、乱流の直接数値計算と高分子モデルのブラウン力学シミュレーションを組み合わせた数値シミュレーションを行った。ワイゼンベルグ数 Wi を変化させた際の高分子鎖の末端間距離 r の大きさの確率密度関数や時間相関関数の振舞から、高分子鎖のコイルストレッチ (CS) 転移点について調べた。結果、 r の確率密度関数は $Wi = 3 \sim 4$ で $1) P(r) \sim 1/r$ のスケーリング側を示すこと、 $2)$ 時間相関が最大値を示すことが明らかになった。また高分子によるストレステンソルの振る舞いを調べた。高分子ストレステンソルによるエネルギー散逸率は粘性によるエネルギー散逸率よりも間欠的な振舞を示すこと、確率密度関数は小さなスケールではべき的な減衰を示すことがわかった。

マイクロな時間可逆分子シミュレーションを通して見たマクロ現象の不可逆性 小松信義, 安部隆士

マクロな系の不可逆性は、時間可逆なマイクロな基礎法則から、どのように説明されるのか?例えば、力学系の時間発展を考え、ある時刻に全粒子の速度方向を一斉に反転すれば、力学の可逆性に基づく限り、系は初期状態に戻るはずである(可逆性パラドックス)。しかし、通常分子動力学法 (MD) を用いて可逆性パラドックスを解析する

と、丸め誤差のために、力学系は初期状態に復帰しないことが知られている。従って、本研究では、不可逆性のメカニズムをより適切に検討するため、力学の時間可逆性を厳密に再現する分子動力学法 (Bit 可逆アルゴリズム: Bit MD) を用いて、時間反転解析を行い、系に付加された微小ノイズが不可逆性に与える影響を解明した。さらに、気体中には存在しないと考えられている膨張衝撃波を検討するため、Bit MD を用いて爆発現象を時間反転した爆縮過程を解析し、膨張衝撃波が消失するメカニズムを明らかにした。また、流体を対象にした不可逆現象に関連する最近の研究トピックスの紹介などを行った。

線形化ボルツマン方程式の対称性とその応用 高田 滋

微小系における気体流は非平衡流であるが、外部が系に与える温度や圧力の平衡状態からの摂動は多くの場合に小さく、線形化 Boltzmann 方程式による取り扱いが許される。この講演では線形化 Boltzmann 方程式に内在する対称性を紹介し、それをもとにして定常な微小系内の種々の気体流の間で成り立つ相反関係の一般論が構築できることを示す。これは線形化 Boltzmann 方程式が、系の希薄の度合いに関わらず、Laplace 方程式における Green の相反性に類似の構造を保持することに由来する。この結果から、エントロピー生成に基づく Onsager の相反関係が一定の条件のもとで任意の希薄度の系に拡張できることを明らかにできる。

AC トラップにおける帯電微粒子のカオス拡散 石崎龍二, 秦 浩起, 庄司 多津男

帯電微粒子を交流電場によって閉じ込めると、コントロールパラメータを変えることにより、帯電微粒子の運動は、固定点や周期運動やカオス運動を示すことが実験で確認される。

交流電場によって荷電粒子を閉じ込めるための条件は、Mathieu 方程式の固定点や周期運動の安定性により説明される。実際の実験では、空気抵抗などによる散逸が考えられるため、Mathieu 方程式に散逸を考慮しなければならず、周期運動やカオス運動の発生は説明できない。そこで、散逸のある Mathieu 方程式を拡張した数理モデルを導入した。散逸のある Mathieu 方程式を拡張した数理モデルにより、固定点が不安定化すると安定周期運動が、更に、安定周期運動からカオスが生じることを示した。

特に、カオスが発生するパラメータ領域で、1 粒子の回転運動の揺らぎの統計性は、同一方向に回り続ける継続時

間分布により特徴づけられることを示した。また、2粒子の回転運動の揺らぎは、クーロン相互作用が強くなると、2粒子間の角度差の揺らぎが小さくなることを数値的に確認した。

A New Type of Defect in Soft-Mode Turbulence

R. Anugraha, T. Ueki, Y. Hidaka, M. I. Tribelsky, S. Kai

In the soft-mode turbulence (SMT) in electroconvection of homeotropic nematic system, which is a kind of spatiotemporal chaos induced by nonlinear interaction between the Nambu-Goldstone modes and the convective modes, a line structure called blackline has been discovered [1]. We measured the density of the blackline as a function of ac voltage and frequency. It is clarified that the blackline is a structure of the nematic director in the x-y plane and includes a sequence of point defects. The occurrence of this defect is only due to the symmetry in the SMT and independent of the properties of fluctuations. [1] R. Anugraha, Y. Hidaka, T. Ueki, and S. Kai, Phys. Rev. E 80, 041701 (2009).

充分発達した乱流の新しい解釈に向けて — δ^∞ 不安定軌道の集団 —

有光敏彦, 有光直子, 本池 巧

Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) is a statistical mechanical ensemble theory for analyzing those phenomena providing fat-tail PDFs, constructed by the authors (T.A. and N.A.) under the assumption that the singularities due to the scale invariance of the Navier-Stokes equation for high Reynolds number distribute themselves multifractal way in real physical space. The degree of singularity for those quantities which are responsible for intermittent phenomena is specified by the singularity exponent α that is assumed to be equal to the parameter appeared in the scale transformation of the Navier-Stokes equation as an arbitrary parameter taking real values. Note that α is a stochastic variable, and is related definitely to the quantity representing intermittent behavior.

For the case of the A&A model, the distribution of α is given by Tsallis-type probability function with three parameters. The three parameters are fixed by the condition of energy conservation, the definition of μ and the scaling relation that relates between the entropy index q , appeared in the definition of Rényi entropy or Tsallis entropy, and the zeros of the multifractal spectrum $f(\alpha)$. The multifractal spectrum is uniquely related to the probability function for α . The probability function is responsible for the tail part of PDFs of those quantities revealing intermittent behavior whose singularity exponents can have values $\alpha < 1$.

In order to extract the intermittent character of the fully developed turbulence, it is necessary to have information of hierarchical structure of the system. This is realized by producing a series of PDFs for responsible singular quantities with different length $\ell_n = \ell_0 \delta_n$, $\delta_n = \delta^{-n}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), $\delta > 1$ that characterize the sizes of regions in which the physical quantities are coarse-grained. The value for δ is chosen freely by observers. Therefore, the choice of δ should not affect the theoretical estimation of the values for the fundamental quantities characterizing the turbulent system under consideration. The framework of MPDFT itself tells us that it is enough to put the scaling relation in

the generalized form $(\ln 2)/(1 - q) \ln \delta = 1/\alpha_- - 1/\alpha_+$ in order to satisfy above requirement. Here, α_\pm are the zeros of the multifractal spectrum, i.e., $f(\alpha_\pm) = 0$.

The new scaling relation provides us with a new interpretation of the fully developed turbulence, i.e., it is an aggregate of the δ^∞ unstable orbits which connote the structure of δ -scale Cantor sets providing the intermittency.

MPDFTによる充分発達した乱流の解析 — 数値および風洞実験から得られたPDFによる —

有光直子, 有光敏彦

In order to show how Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) works in the precise analyses of PDFs, and how it can provide us with new information to understand turbulence, we will present the investigations with the help of the PDFs from DNS with 4096^3 grid points by Kaneda and Ishihara and from experiments in a wind tunnel by Mouri. MPDFT is a statistical mechanical ensemble theory for analyzing those phenomena providing fat-tail PDFs, constructed by the authors under the assumption that the singularities due to the scale invariance of the Navier-Stokes equation for high Reynolds number distribute themselves multifractal way in real physical space.

風レンズ風車という風力発電システム

大屋裕二

風レンズ風車とは、風車の周囲に簡単な構造の集風体を装着して、風車翼にあたる風を強め、風車の発電性能を飛躍的に高める風力発電装置である(5kW実用機)。風車の発電量は風速の3乗に比例する。したがって何らかの流体力学的工夫で風車翼にあたる風を少しでも増速できれば発電量は飛躍的に増加する。九州大学風レンズ研究グループは、つば付きディフューザという集風構造体を開発した。このつばの存在により、つばの背後に強い渦形成がなされ、出口付近の圧力が周囲圧力よりも大きく低下する。この低圧領域がディフューザ内部により強い流れを引き込み、速い流れが風車翼にあたる。このため、この集風体(風レンズ体とも呼ぶ)を装着した風レンズ風車では、通常と同サイズの風車と比較して約2-5倍の発電出力を達成している(参考文献:ターボ機械33-7, 2005)。

非平衡統計物理学と分子シミュレーション— 2次元粉体気体の乱流化と統計則—

磯部雅晴

近年のアルゴリズムの開発と計算機の発展により、ミクロな分子動力学からマクロな現象論や時空相関(統計則や輸送係数)を探るといった非平衡系の計算統計物理学的研究の重要性が増大している。本講演では、剛体球系分子動力学法の大規模シミュレーションにより、粉体気体系の乱流化現象やロングタイムテール問題に関して、得られた最新の研究成果を紹介した。

粉体せん断流における速度揺らぎの空間構造とレオロジー

波多野 恭弘

地面を形作っている岩石や土砂などは一見堅固に見えるが、あるとき突然流体のように動き始めることがある。地震などに伴う地滑り、火山噴火に伴う山体崩壊などはその代表例であろう。このようなマクロ粒子多体系(粉体)の流動状態と停止状態の明確な違いは熱力学的な液・固転移を思い出させる。最近我々は、これらの現象がある種の相

転移（臨界現象）として物理的に記述できることを発見した。本研究の核心は、「ジャミング転移」として現在急速に研究が進んでいる概念にある。これは一言で表すなら、「マクロ粒子系がある閾値密度より上で剛性を獲得する」転移である。ただしジャミング転移では結晶化は起こらずランダムな構造がそのまま凍結されるため、液・固転移よりもむしろガラス転移と密接に関連していることが推測される。それを裏付けるように、過冷却液体における分子の動的な協同運動（動的不均一性）と同様の現象が、ジャミング転移点近傍の粉体系においても観察されている。さらに重要なことに、それら協同運動の相関距離と特性時間は、ジャミング転移点で発散するように見える。このことはジャミング転移点（ $\Phi = 0, \gamma = 0$ ）が臨界点であることを示唆している。実際にこの臨界性を反映して、臨界現象的なスケーリング則が流動する粉体において成立することも見出された。

$$S = |\Phi|^{y_\Phi} S_\pm \left(\frac{\gamma}{|\Phi|^{y_\Phi/y_{\text{gamma}}}} \right),$$

ここで S はせん断応力であり、 $\Phi = \phi - \phi_J$ は密度 ϕ と臨界密度 ϕ_J の差、 γ はせん断率である。このスケーリング則に現れる臨界指数は、相関長の発散を記述する臨界指数に関連付けられる。このことはジャミング転移点（ $\Phi = 0, \gamma = 0$ ）が臨界点であることをより強く証拠づけるものである。

液晶乱流の時空間欠性に見る吸収状態相転移のユニバーサリティ

竹内一将, 黒田真史, Hugues Chate, 佐野雅己

液晶電気対流の乱流間相転移に着目することにより、Directed Percolation (DP) 普遍クラスに属する相転移の初の実験的証拠を発見したので報告する。

DP は吸収状態、すなわち入ったら二度と出られない状態への相転移を議論する際の基本モデルであり、その普遍クラスは伝染病の拡がりから粉体流や触媒反応など多種多様な数値モデルで見られ、理論的にも非常によく確立されている。しかし実験では十分な精度で確認されたことはなく、非平衡相転移の重要な未解決問題として認識されてきた。

我々は、ネマチック液晶の電気対流で見られる2種類の乱流状態 (DSM1-DSM2) 間の時空間欠性への相転移に着目し、その静的・動的臨界現象を特徴づける3つの実験を行った。その結果、12個の臨界指数と5個の普遍スケーリング関数が全て DP クラスのものとして一致することが判明した。

我々はさらに、ツイスト配向により系に Ising 対称性を付加し、理論の予言どおり、ログ減衰 coarsening で特徴づけられる voter クラス臨界現象を確認した。以上により、DP クラス、voter クラスの吸収状態相転移の初の実験的証拠が見つかったと考えている。

シェルモデル乱流における時間間欠性のメカニズムについて

小林 幹, 山田道夫

乱流において時間間欠性は普遍的で重要な性質であるにも関わらず、未だその全貌は明らかになっていない。特に、時間間欠性のダイナミクスに着目した研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では、一様等方乱流のモデルとして有名な GOY シェルモデル乱流が示す時間間欠性をダイナミクスの観点から特徴づけることが目的である。本研究により、間欠性と乱流アトラクターに埋め込まれた不安定期軌道の関係を明らかにした。また、

間欠性を乱流アトラクターの多様体が作り出す接構造の観点から特徴づけることも行った。

Volume Penalization 法による渦対生成の数値解析研究 服部裕司, 中野 わかな, 畠山 望

渦輪や渦対の生成過程は、秩序的な渦構造の形成のダイナミクスを理解する上で基本的な問題として重要である。管からピストンの運動により流体を押し出して生成する方法が実験的にも数値的にも研究されているが、数値解析でピストンの運動を実際の現象に忠実に考慮することは易しくはない。われわれは volume penalization 法によりこれを実現し、渦対の生成過程を忠実に数値解析することを試みた。数値解法には、空間差分にスペクトル法（フーリエ・コロケーション）とコンパクト差分の組み合わせを用い、penalization 項を時間的に変化させることでピストンの運動を表現した。その結果、渦対の生成過程、特に渦層の巻きあがりや散逸による渦核の形成を高い精度で捉えることに成功した。

東アジア縁辺海のデータ同化モデリング

広瀬直毅

日本海を中心とした縁辺海のデータ同化・予報モデルを構築した。近似カルマンフィルターにより、かなり現実的な海流や渦変動が再現された。その結果は、エチゼンクラゲの漂流予測などに有用である。グリーン関数を利用した経験的パラメーターの最適化にも成功した。予測精度の向上と共に、海洋物理現象のより深い理解や解明に結びつくこと期待される。大気から海洋へ輸送される運動量フラックスの逆推定はその一例である。

低レイノルズ数における平面クエット流の厳密解とその渦構造

板野智昭, S. C. Generalis, 藤 定義, 関 眞佐子, 秋永 剛

平行平板間乱流に見られる秩序構造は、乱流の制御などを視野に入れた工学的観点から、また、非線形性による維持過程は物理的観点からも興味深く研究者たちの関心を集めてきた。それらの最も簡単なプロトタイプとして、互いにある一定の相対速度で動く二枚の平行平板間の流れ、いわゆる平面クエット流が挙げられる。本発表では、渦構造と渦の対称性・階層性をキーワードに、発表者がこれまで行ってきた平行平板間流れの研究成果を交えつつ、平面クエット流において近年見つかったヘアピン型の渦を有する定常解 (Itano & Generalis : PRL v102 p114501(2009)) について報告する。

海洋表層における乱流感星境界層流の観測

吉川 裕, 増田 章

乱流混合と地球自転の影響を受ける風の摩擦による海洋表層の流れを吹送流と呼ぶ。吹送流の流速が従来考えられていた値より小さいこと、またその流向・流速が大きく季節変化していることなど、最新の観測で明らかになった知見を紹介した。

地球磁気圏速度シア境界層における無衝突プラズマの乱流輸送

松本洋介, 関 華奈子

地球磁気圏境界においては、しばしば人工衛星による渦が観測され、それに伴い無衝突プラズマの混合の様子が報告されている。磁気圏境界は太陽風と常に接した、速度シア境界となっていることから、このような観測はケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定が成長した結果であると考えられている。磁気圏境界での無衝突プラズマの混合を理解するため、KH 不安定のプラズマ粒子シミュレーションを行った。その結果、KH 不安定の順・逆カスケードにより、効率的なプラズマ混合・輸送が可能であることが明らかになった。以上のような磁気圏境界層における渦乱流とプラズマ輸送の問題は、次世代の人工衛星ミッションのサイエンスタargetとなり、人工衛星の多点同時観測により、様々なスケールでの渦構造が明らかになることが期待される。

カオス・乱流の2重構造と動的スケールリング則 森 肇, 岡村 誠

カオス・乱流の状態変数の時間相関関数やパワースペクトルは、決定論的な短い軌道群と、確率論的でランダムな長い軌道群からなり、特色のある2重構造をもつ。その2重構造を解明し、時間相関は動的スケールリング則に従うことを示した。

Duffing 振動子系の時間相関関数の初期 regime と終期 regime

富永広貴, 森肇, 石崎龍二, 森 信之, 黒木昌一

力学系のカオス軌道は決定論的な時間発展をするため短い timescale では予測可能であるが、カオスの軌道不安定性のため長い timescale では stochastic で random になる。このようなカオスの二重性のため時間相関関数において異なる減衰型を持った初期レジームと終期レジームと呼ばれる2つの領域として現れることが予測される。散逸系カオスを示す最も簡単な力学系である Duffing 振動子において、典型的なカオス運動を示すパラメータで、これら二つの領域が存在することを明らかにし、それぞれの減衰形に対応する関数形を数値的に見いだした。初期レジームの減衰形は双曲型減衰であり、終期レジームのそれは拡張指数関数型である。また、初期レジームと終期レジームの境界は、カオス揺動力の特性時間から見積もられることを示唆した。

周期外力下の Swift-Hohenberg 系における緩和現象 森野佳生, 大内克哉, 宮崎修次

レイリーベナール対流の空間二次元モデルである Swift-Hohenberg 方程式

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} = [\epsilon - (\nabla^2 + 1)]s(x, y, t) - [s(x, y, t)]^3$$

はラメラ構造の時空間パターンを形成する。この際にある特徴的な波数が選ばれ、状態変数のフーリエ成分の強度は時間の経過と共にその波数で急峻なピークを持つ

ようになる。波数平面を円筒座標表示し、角度方向について平均して得られる波数の絶対値の関数としてのフーリエ強度については、以下のスケールリング則が成立する。 $S(k, t) = t^\alpha f((k-k_0)t^\alpha)$ 。今回我々はこの Swift-Hohenberg 方程式に周期外力 ($h \sin(\Omega t)$) を加えたモデルを対象とした。このモデルはその外力の振幅 (h) と振動数 (Ω) に依存してある時空間パターン (ラメラ構造, ドット構造, 空間一様状態) を形成する。この際も無外場の際と同様に状態変数のフーリエ成分の強度を角度方向に平均した量は時間に対してスケールリング則が成立する。我々は無外場の際に知られているスケールリング指数 $\alpha = 0.2$ と周期外場が加えられた際のスケールリング指数の変化について調べた。その結果、ラメラ構造が観測された場合にはスケールリング指数は無外場の際と変わらずドット構造が観測された場合にはスケールリング指数は無外場の際より小さくなることを見出した。

誘電体バリヤ放電における電流フィラメントのパターン形成

庄司 多津男, 西川徳彦, 岩井一彦, 秦 浩起

0.1-1 気圧下におけるガス中の放電としてオゾン発生等に使われる誘電バリヤ放電 (DBD) がある。この放電は、電極の一部に放電が集中するストリーマ放電によって形成されているものであり、誘電体表面での電子・イオンの拡散、再結合、電荷間の相互作用等の非線形効果により、放電電流は空間的に不均一で、圧力等の領域によっては多数のフィラメント状の構造が出現する。これらフィラメントは放電電圧や圧力などの領域によっては、様々な静的な秩序パターンや動的なパターンを示す。フィラメントの一部の秩序構造は放電の反応拡散系モデルで解釈も出来るが、説明できない構造もありまだ十分な解明にはいたっていない。さらに我々は電極の垂直方向に強磁場 ($< 5T$) を印加した場合に出現したフィラメント構造の動的振る舞いに関して報告する。

DC 電極間の微粒子による振動子結晶

秦 浩起, 庄司 多津男, 石川多一

下部に+電極を上部に-電極を配置した DC 電場中に、微粒子を封入すると、微粒子は下部電極で+に帯電して上昇し、上部電極で-に帯電して下降するというように往復運動する振動子となる。このような微粒子が多数あると、同(逆)方向に動く粒子間に斥(引)力のクーロン相互作用が働く。その集団的振る舞いを理論と実験の両面から研究している。(なお、異符号に帯電した粒子が衝突すると電荷を失い落下し、下部電極に達すると再び帯電し振動を再開する。)

最近、ある条件下で振動子群が周期パターン“振動子結晶”を作ることを理論的に見出し、数値実験より確認した。講演では、その機構やコントロールパラメータである「系の水平方向の面積(つまり振動子密度)」を変えた際に起きる“結晶”と“乱れた状態”間の転移などについて報告する。

4 開催日程, 場所

開催日程 2009年11月12日(木) - 11月14日(土)
開催場所 九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室)
講演数 23件
参加者数 36人

共同利用研究集会(21ME-S5)報告書

ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価

研究代表者
九州大学工学研究院
宇田 暢秀

目 的

ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価についての研究を一層発展させることが本研究集会の目的である。

ナノ複合材料等次世代複合材料は、これまでの材料では克服できなかった領域をナノ・テクノロジー等新規技術で対処していこうとした材料であり、ナノ・スケールの材料、自然材料、生体に適応した材料をベースにした次世代複合材料である。このため、ナノ複合材料等次世代複合材料の作製技術及び各種特性評価は重要な研究項目であり、様々な領域の研究者間のアイデア交換が重要である。そして、十分な時間の意見交換、多方面からの議論が必要である。

各学会の材料系の集会でも、ナノ複合材料等次世代複合材料に関する講演が多数あるが、それらは発表時間の制限や広範囲な発表のため上記目的にはそぐはない。従って、ナノ複合材料を代表とする次世代複合材料の作製技術及び各種特性評価に関する十分な議論を行える表記研究集会を開催したい。

研究集会の日時・場所

日時：平成22年1月7日(木)～8日(金)

場所：九州大学応用力学研究所西棟 W601号室

プログラム

【1月7日(木)】

招待講演

招待講演 司会 宇田暢秀 (九州大学)

14:00-14:40 炭素繊維複合材料の開発と航空機構造への展開
吉岡 健一 東レ(株)

14:40-15:20 層間剥離進展と破壊力学理論の応用に関して
末益 博志 (上智大学)

一般講演

司会 汪 文学(九大応力研)

15:30-15:35 Opening address
宇田暢秀 (九州大学)

15:35-16:00 三次元織物CMCの高速衝撃損傷挙動
○黄木景二, 矢代茂樹(愛媛大学)

16:00-16:25 Pullout simulation for ideal sliding in multi-walled carbon nanotubes
○李 淵(千葉大[院])、胡 寧(千葉大)、山本 剛(東北大)、橋田俊之(東北大)

16:25-16:50 VGCFによるCFRP複合材積層板の界面機械特性の向上
胡 寧(千葉大)、○李 淵(千葉大[院])、堀 直樹(東北大[院])、
荒井政大(信州大学)

- 16:50-17:15 エレクトロスピニング法によるナノファイバーを用いた複合材料
○山下義裕(滋賀県立大学)
- 17:15-17:40 粒子法を用いたCFRP積層板の飛翔体衝突損傷挙動の予測
○矢代茂樹(愛媛大), 黄木景二(愛媛大)
- 17:40-18:05 航空機複合材料構造の修理法
○中村俊一郎(九大院、第一工業大学), 高雄 善裕,
汪 文学, 松原 監壮(九大応力研)

【1月8日(金)】

司会 矢代茂樹(愛媛大)

- 09:00-09:25 生分解性樹脂と平織リケナフ織物を用いた熱可塑性複合シートの開発
○上野雄太(日大院), 邊 吾一(日本大学), 坂田憲泰(日本大学)
- 09:25-09:50 多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件にもとづくCFRPボルト接合部損傷解析
○灘部岳晃(東大院), 西川雅章(東北大), 中村達也(東大院),
武田展雄(東大新領域)
- 09:50-10:15 SMAワイヤー強化VaRTM成形Carbon/Epoxy複合材料のモードI層間破壊じん性の評価
○三浦一浩(九大院) 宇田暢秀, 小野幸生, 平川裕一, 永安忠(九大工)
- 10:15-10:40 Evaluation of electrical properties of PE/CNTs nano-composites
○王 経国(日本大学・院), 邊 吾一(日本大学), 坂田 憲泰(日本大学)

司会 倪 慶清(信州大)

- 10:50-11:15 固液界面におけるからみあい高分子の分子鎖ダイナミクスシミュレーション
○奥田覚, 井上康博, 北條正樹(京大), 増淵雄一, 畝山多加志(京大化研)
- 11:15-11:40 Numerical simulation of resin transfer molding for CFRP manufacturing
○本多 崇(東北大院), 岡部 朋永(東北大)
- 11:40-12:05 CFRP積層板におけるレーザ励起超音波の伝播挙動の解明および損傷検知への適用
○伊藤悠策(東大) 高橋市弥(三菱電機) 武田展雄(東大新領域)
- 12:05-12:30 CNTの表面処理および天然ゴムとの複合材料における粘弾性挙動
○江 紅霞(信州大院), 夏木俊明, 倪 慶清(信州大)
- 12:30-12:55 Effect of Nanoclay Agglomerates Distribution on Mechanical Properties of Nanocomposites
○Azmi Nordin, Baosheng REN, Junji NODA, Koichi GODA (Yamaguchi Univ.)

招待講演(自然エネルギー発電特別セッション)

招待講演 司会 高雄 善裕(九大応力研)

- 14:00-14:30 Wind energy R&D activity in Korea
○K.S. HAN (POSTECH)
(Wind Energy Program Director, KETEP, Ministry of Knowledge Economy)

- 14:30-15:00 Graduate program of wind energy at POSTECH
○Hyunchul Park (POSTECH)
- 15:00-15:30 Development of composite wind turbine blades
○S.H. PARK, T.S. PARK and K.S. HAN (POSTECH)
- 15:30-16:00 Development of a shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology
○Y. Ohya, T. Karasudani and M. Hasegawa (Kyushu Univ.)
- 16:30-17:00 Research and development of tidal current power generation as an ocean renewable energy
○Y. Kyojuka (Kyushu Univ.)
- 17:00-17:30 High resolution micro-siting of 100KW wind-lens turbine at the new campus of Kyushu University by using the RIAM-COMPACT® CFD model
○T. Uchida and Y. Ohya (Kyushu Univ.)
- 17:30-17:35 Closing address
汪 文学(九大・応力研)

講演概要

炭素繊維複合材料の開発と航空機構造への展開

吉岡健一 (東レ株式会社)

炭素繊維複合材料(CFRP)の開発は、炭素繊維の弾性率や強度といった基本特性の向上から、マトリックス樹脂の靱性の向上へと進み、航空機主構造への展開を可能としてきた。さらに、近年のCO₂排出量削減とそのための省エネルギー化の要請に対応しうる、抜本的なトータルプロセスの変更の試みも行われている。こうした動きの概要とトピックスを紹介する。

層間剥離進展と破壊力学理論の応用に関し

末益博志 (上智大学 理工学部)

複合材料構造は、破壊メカニズムが複雑、特性のばらつきが大きいなどの理由で、設計基準が従来の金属構造に比べて厳しく設定されており、複合材料自身の持つ軽量高強度・高剛性の性能を十分生かすことができない。信頼性や安全性を犠牲にしないで複合材料構造の性能を最大限に生かすためには、損傷の進展メカニズムを明らかにし、また層間剥離などの損傷の累積を考慮した最終破壊強度を推定できる手法の開発が必須である。

複合材料積層構造は、衝撃・疲労などにより比較的容易に損傷が発生するだけでなく、多くの破壊現象が層間剥離、トランスバースクラックといった損傷の累積による強度の劣化後に生じる。複合材料構造物の強度の推定は、「最終破壊が、どのような損傷状態でどのような破壊形態で生じるか」まで、考えないと十分でないと思われる。これらの損傷発生・進展問題の中で、層間剥離は一般に破壊力学的に議論されているが、非均質異方性体界面中のクラック進展を一般応力下で破壊力学的に取り扱うことは、非常に困難な課題を抱えている。どのようにこの問題を解釈し、実際に供するものにできるかが、我々の研究の課題と考える。ここでは、破壊力学的に議論するうえでの困難さに関して議論したい。

Characterization of high-speed impact damage behavior in a three-dimensionally woven SiC/SiC composite

Keiji Ogi and Shigeki Yashiro (Ehime University)

This paper discusses high-speed impact damage in a three-dimensionally woven SiC/SiC composite (3D-CMC). The impact damage was introduced by a steel ball projectile in 3D-CMC plates with and without thermal exposure. The surface and internal damages were observed by optical microscopy and X-ray CT. A crater was observed on the collision surface. The X-ray CT measurement revealed that multiple pyramid-shaped cone cracks were generated beneath the crater when the impact speed was relatively low. At an impact speed exceeding the critical speed, a spall fragment was ejected from the back surface, while no internal damage was observed in the fragment. The spall fracture mode differed between the virgin and the thermally-exposed specimens. This difference is the result of embrittlement of the fiber/matrix interface due to oxidation of the carbon coating layer in the thermally-exposed specimen. In addition, it is found that z-yarns improve impact resistance by constraining delamination.

Pullout Simulation for Ideal Sliding in Multi-walled Carbon Nanotubes

Yuan Li, Ning Hu (Chiba University), Go Yamamoto, Toshiyuki Hashida (Tohoku University)

The ideal sliding mechanism between nested walls of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) was investigated by performing pullout simulations. The pullout force was found to be proportional to the diameter of the “critical wall”, i.e., the adjacent outer wall at the sliding interface, but independent on nanotube length and chirality. One set of simple formulas was developed to predict the pullout force at an arbitrary sliding interface for any MWCNT, as validated by some previous experiments. Moreover, the obtained surface energy density is close to that of graphite.

Improvement of Interlaminar Mechanical Properties of CFRP Laminates Using VGCF

Ning HU, Naoki HORI, Yuan LI (Chiba University) and Masahiro ARAI (Shinshu University)

Due to the low interlaminar strength and fracture toughness of CFRP laminates laminated from prepreg sheets, under external transverse loads, delaminations may easily occur in the CFRP laminates, which results in a remarkable strength reduction and the consequent failure of the laminates. In this work, to improve the interlaminar mechanical properties of CFRP laminates, the interlaminar mechanical properties of CFRP laminates with VGCF as reinforcements filled at interfaces, were investigated experimentally and numerically. It was found that, with 20g/m² addition of VGCF at the interface, the fracture toughness and tensile strength of Mode-I increase by 100% and 75%, respectively.

エレクトロスピンニング法によるナノファイバーを用いた複合材料

山下義裕（滋賀県大・工）、瀧本直英（滋賀県大・工）

今注目されている材料のひとつに有機無機ハイブリッド材料があります。有機材料は柔軟性、加工性、多様性をもっています。無機材料は耐熱性、高弾性率、耐薬品性をもっています。これらをハイブリッド化することで、両者の特性をさらに高める事が期待されている。用途は電子材料、光通信材料、接着剤、コーティング剤です。一方、無機ケイ酸化合物は粉末状のため、取り扱いが難しく、用途も限られ、商品として展開しにくいので、繊維にすれば、容易に曲げたり、切ったりできます。本研究の目的はエレクトロスピンニング法を用いて、無機ガラスファイバーを作製します。無機ガラスファイバーは耐熱性、高純度、低熱膨張性、耐衝撃性をもっています。そこで、ゴムとこれらを複合化し、無機ガラスファイバーがゴムのフィラーとして使えるかを検討しました。

粒子法を用いたCFRP積層板の飛翔体衝突損傷挙動の予測

矢代茂樹，黄木景二（愛媛大）

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は，航空機用ターボファンエンジンの軽量化や耐疲労，耐腐食特性を向上すべく，ファンブレードやファンケースへ適用が進められている。ファンブレードの高速衝撃損傷は，多くの場合，鳥が衝突するバードストライクによって生じる。鳥の衝突のほか，異物混入によるブレードの損傷，破損の防止が技術課題である。また，ファンケースにおいては，ファンブレード飛散時に貫通を防止する性能を満足しなければならない。これら異物衝突による損傷（Foreign Objective Damage, FOD）に対する信頼性評価は実用において欠かせない。

これまでもFODに関する研究は行われてきたが，スペースデブリの衝突に代表される超高速域（飛翔体速度＝数km/s）における貫通孔やデブリクラウドの形状，貫通限界曲線などに関する研究が多い。一方で，航空機エンジンで問題となる音速域（数百m/s）におけるFODメカニズムは解明できていないのが現状である。

そこで，本研究ではCFRPクロスプライ積層板に対する飛翔体衝突試験を行い，損傷形態を詳細に観察した。また，SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法^[1]を用いた損傷進展解析を実施した。損傷観察の結果と解析結果の比較により，飛翔体衝突損傷の進展メカニズムを考察した。

航空機複合材料構造の修理法

中村俊一郎（九大院、第一工業大学） 高雄 善裕、汪 文学、松原 監壯（九大応力研）

近年、複合材料、特に強化炭素繊維エポキシ樹脂複合材料(CFRP)は民間旅客機の主要構造にも大幅に使われるようになってきた。¹⁾ 使用範囲も比較的厚い主翼外板の構造のみならず、比較的薄い胴体外板の構造にも使われるようになってきた。一方、飛行機はエアラインで運航している間にさまざまな損傷を受ける。損傷の原因は多岐にわたるが、特に複合材料構造は修理に時間とコストがかかることから、損傷事故の低減対策及び、如何に損傷部を修理するかが大きな課題となっている。複合材料の修理に関しては、如何に損傷の範囲を特定するのか、如何に初期の構造が有する強度レベルに回復させるのかが課題である。エアラインにとっては飛行機の就航率を如何に上げるかが重要で、その為には地上にあって修理等に要する時間の短縮が課題である。あるエアラインでは修理のために常時一機はドック入りしているとの話もある。空港ランプなどで損傷を受ける可能性のある胴体構造に複合材料を使うことによりその修理のためドック入りの時間が長くなることが考えられ、その対応として、いったん事故が発生した場合は、次の重整備で恒久修理をすることで、それまでは飛行機が運用可能なレベルの簡便で短期間で行える一時修理法の開発が必要となる。

生分解性樹脂と平織りケナフ織物を用いた引抜き成形法による熱可塑性複合シートの開発

上野雄太（日大・院），邊吾一（日本大学），坂田憲泰（日本大学）

GFRPに代表される繊維強化プラスチックは，比強度，比剛性，衝撃吸収性などその優れた性質を利用し，軽量化を始めその利用用途・分野は多岐に渡る。しかし，ガラス繊維や熱硬化性樹脂を基材とした従来の複合材料は廃棄処理やリサイクルが困難である。そこで環境に配慮した環境循環型複合材料，グリーンコンポジットの研究，開発が盛んに行われている。

当研究室ではケナフ繊維を強化材，生分解性樹脂を母材とした引抜き成形法によるグリーンコンポジットの開発^{1,2)}を行ってきた。引抜き成形法の特徴は一定断面形状の材料を連続的に成形することができる点であり，我々の過去の研究において同一形状のグリーンコンポジットを連続的に成

形することが可能であることを報告している。

この引抜き材は熱可塑性樹脂を母材としており、再溶融することによって自由に形状を変形させることができる。すなわち、この引抜き材をCFRPプリプレグ材のように利用することが可能である。ここでは、この引抜き材を中間材料として利用し、加熱圧縮成形法により異なる繊維体積含有率 (Vf) の一方向の板材を作製し、曲げ特性を評価した。更に、強化材としてケナフ繊維束だけでなく、ケナフ織物を用いた新たな引抜き成形機構を提案し、熱可塑性複合シートの作製を試みたので報告する。

多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件にもとづく CFRPボルト接合部損傷解析

灘部岳晃(東大院)、西川雅章(東北大) 中村達也(東大院)、武田展雄(東大)

近年、複合材料の利用拡大にともない、複合材料構造のボルト接合も多く用いられ、ボルト接合部の損傷挙動・強度予測に関する研究が必要とされている。特に大型複合材料構造を実構造に適用する際、その開発段階において各接合部の強度を予測することで実大構造試験での構造全体の損傷挙動を予測すること、また運用段階においてあらかじめ各接合部の損傷挙動を予測し、メンテナンスをさらに効果的に行うこと、さらに材料開発の段階において、接合部強化のための材料開発に関する指針が得られるような知見を得ることが重要と考えられる。このため、ボルト接合部に関し継続的な研究が必要となる。

そこで筆者ら¹⁾も炭素繊維強化複合材料(CFRP)ボルト接合部の損傷挙動に関する研究を実験と数値解析両面から行い、基礎的な損傷進展を把握し損傷挙動予測モデルの構築を行ってきた。これまでの研究の結果、強度は繊維圧縮損傷と深く関係していること、繊維圧縮損傷の損傷条件を適切に選ぶことで強度特性を数値解析により再現できることが明らかとなった。本報告では、この研究結果にもとづき、繊維圧縮損傷の損傷メカニズムにもとづいたボルト接合部の損傷挙動予測モデルを構築すること、そしてこのために必要な、接合部内部の複雑な応力状態のもとでの繊維圧縮損傷発生条件の定式化を行うことを目的とする。

繊維強化複合材料の繊維圧縮損傷に関しこれまで多くの研究が行われてきた。これらの研究に関し、1994年にBudiansky, Fleck²⁾により、1996年にSchultheisz, Waas³⁾によりレビューが行われ、特にSchultheiszらのレビューは詳細なものとなっている。これまでの研究の結果、繊維圧縮損傷を繊維座屈ととらえ、その座屈強度に繊維不整配向と母材の塑性が大きく影響することが報告され、これをモデル化し繊維圧縮強度を定式化したものとして、Sun, Jun⁴⁾のモデルが提案されている。Sun, Junモデルは一方向材に対するものであり、このモデルを損傷発生条件として多軸負荷下に適用するためには、拡張が必要となる。Sun, Junモデルは繊維圧縮損傷発生メカニズムが反映され、繊維圧縮損傷が支配的な損傷現象において重要な知見を提供することが期待されるが、その一方、このモデルの多軸負荷下への拡張は、筆者の知る限りこれまで報告されていない。繊維圧縮損傷が支配的な様々な構造要素の損傷挙動予測、強度予測を行うためにも、このモデルを多軸負荷下に拡張することが必要不可欠であると考えられる。以下ではこのモデルを拡張し、多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件の定式化を行う。

SMAワイヤー強化VaRTM成形Carbon/Epoxy複合材料のモードI層間破壊じん性の評価

三浦一浩(九大院)、宇田暢秀、小野幸生、平川裕一、永安忠(九大工)

炭素繊維複合材料(CFRP)は優れた力学特性を有し、その適用率が増加している。一方CFRPは繊維に対して横方向の特性が低く層間剥離が生じやすい、成形コストが高いなどの欠点が存在する。層間強度特性は圧縮強度や衝撃を受けた際に生じる層間剥離の程度に大きな影響を与える。そのため縫合糸を用いるスティッチング^[1]や複合材料製のピンを挿入し層間を強化する研究^[2]が行われている。またCFRPの成形コストを軽減する方法として

VaRTM（真空含浸工法）が注目されている。VaRTM成形はプリフォームをバギングフィルムで覆い、バッグ内を真空圧にすることで液状の樹脂を注入し、加熱硬化させる成形方法である。高価なプリプレグや大型設備が不要であり低コスト化が図れる。そのため航空機構造への適用に関する研究[3]が行われている。

本研究では形状記憶合金（SMA）ワイヤーを板厚方向（ファブリックに対して垂直）に挿入し層間強化を試みる。SMAはスマートアクチュエータとして注目されており、これを強化材とする複合材料の研究[4]も行われているが、いまだSMAによるCFRPの層間強度に与える影響を評価する研究は行われていない。そのためSMAワイヤーがCFRPの層間破壊じん性に与える効果を明らかにするため試験片をVaRTM成形し、DCB試験より評価する。

Evaluation of Electrical Properties of PE/CNTs Nano-composites

King Kwok Wong, Goichi Ben, Kazuhiro Sakata (Nihon University)

In this paper, two kinds of carbon nanotubes (CNTs) were used as a conductive filler for fabricating conductive polymer composites. CNTs were dispersed into high density polyethylene (HDPE) by melt compounding method with a twin screw extruder. The volume resistivity of PE/CNTs nano-composites were measured with the four-point probe array method. Specimens for the measurement of electrical properties were fabricated with the hot press method. PE/VGCF nano-composites show a low volume resistivity when the VGCF content is more than 6 wt%, which indicates a high dispersion of VGCF within PE by the melt compounding method. To confirm the dispersion degree of VGCF within PE matrix, scanning electron microscope (SEM) was also used.

固液界面におけるからみあい高分子の分子鎖ダイナミクスシミュレーション

奥田 覚（京大院），井上 康博（京大工），北條 正樹，増渕 雄一（京大化研），畝山 多加志

高濃度および熔融状態の高分子ダイナミクスを把握することは、高分子材料の機能設計・構造制御にとって重要な課題である。特に固液界面におけるダイナミクスの知見は、ナノスケールの微細加工技術の基礎となる。例えば、界面上のすべりや配向性の解析は、印刷、塗布、MEMSの技術に有用である。さらに、高分子および界面間の親和性に起因して形成される相構造の理解は、自己組織化を利用したボトムアップ型の成形加工技術にとって必須である。

高分子は、長い紐構造をしており、熔融状態ではそれが高密度で分布しているため、互いの運動を束縛する（Fig. 1）。この分子鎖同士の束縛効果を“からみあい”と呼ぶ。からみあいによる分子鎖運動の束縛は、熱揺らぎによって徐々に緩和される。この緩和過程は、分子鎖の形状や長さに強く依存しており、高分子ダイナミクスを理解するためには、からみあいスケールの解析が必要である。

からみあいの効果を受けた分子鎖運動の緩和は数ミリ秒から数百秒に及ぶため、通常の分子動力学シミュレーションで扱える時間域にない。そこで粗視化とよばれる理論的な扱いにより、系の本質的な挙動を損なわないように、計算に必要な自由度を大幅に減少させることで長時間計算を可能とする手法がいくつか提案されている。

本研究では、高分子のダイナミクスを分子レベルで記述する粗視化分子モデルとしてプリミティブチェーンネットワーク（PCN）モデル¹⁾を用い、シミュレーションによる検討を行う。PCNモデルは、分子鎖間のからみあいによる束縛効果を“からみあい点”で表現し、分子鎖の形態に基づいてダイナミクスを解析できるのが特徴である。このPCNモデルに対して、壁面境界モデルを導入し²⁾、平行壁面間の分子鎖ダイナミクスを検討する。

CFRP製造のためのRTMIに関する数値シミュレーション

本多崇（東北大・院），岡部朋永（東北大）

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、高比強度・高比剛性を有しており、軽量化を目的とした航空機構造への適用が盛んに試みられている。従来のCFRPの成形法は、プリプレグ (繊維束に未硬化の樹脂を含浸させたシート) を構造に合わせて一枚ずつ重ね、オートクレーブ内で加熱・加圧する手法であった。しかし、プリプレグへの手間や材料コスト、オートクレーブの設備費用等が問題となっていた。そこで、もともと風車ブレード等で用いられていたRTM (Resin Transfer Molding) という成形法が、航空機の構造材料へ採用され始めた。RTMとは、プリフォーム (材料設計に応じた積層構造を有する繊維束) を成形型に配置し、樹脂を含浸させ、その後、加熱硬化させる手法である。プリプレグ、オートクレーブを必要としないため、従来の成形法に比べ低コストで高効率な成形法として期待される。しかし、RTMでは、繊維束の積層構造やプリフォーム形状の複雑化に伴い、成形時に樹脂の未含浸部 (ボイド) が生じることが問題となっている⁽¹⁾。そのため、成形前に繊維の表面酸化処理 (プラズマ酸化処理⁽²⁾、電気化学的処理⁽³⁾、薬剤処理⁽⁴⁾) などにより繊維表面に化学官能基を付加させる手法) を行い、繊維/樹脂間の濡れ性の制御が行われてきた^{(2), (3)}。(以上に述べたRTMに関する現象をスケール別に示した模式図が図1である。) この制御法の問題点は、経験則に基づく部分が多く、ボイド発生・抑制のメカニズムが明らかとなっていないことにある。そこで、本研究では、CFRPを対象として、RTMにおける樹脂流動現象をモデル化した。まず、粒子法に二体間ポテンシャルを導入することで、濡れ現象を表現できる計算手法を提案した。次に、この計算手法を利用し、樹脂が繊維束内を含浸していく数値シミュレーションを行った。繊維/樹脂間の濡れ性が繊維束内における樹脂流動へ及ぼす影響を検討し、RTMにおける樹脂流動特性を評価した。

CFRP積層板におけるレーザ励起超音波の伝播挙動の解明および損傷検知への適用

伊藤悠策 (東大院)、高橋市弥 (三菱電機)、武田真一、岩堀豊 (JAXA)、矢代茂樹 (愛媛大理工)、高坪純治 (産総研)、岡部洋二 (東大生産研)、武田展雄 (東大新領域)

炭素繊維をプラスチックに入れて強度を向上させた材料である炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は高強度、高比剛性、腐食しにくい等の優れた性質を有しており、スポーツ用品からロケットまで様々な分野で用いられている。特に軽量化が重要視される航空機においてCFRPは二次構造だけでなく次世代民間旅客機の主翼や胴体といった一次構造にも使用されている。航空機におけるCFRP適用率の増加によりCFRPの修理件数も増加し、機体各所には、被修理部分が分布すると考えられる。損傷部は補修によって一旦強度を回復するが、補修部に再び衝撃荷重が加わることで強度上重要な損傷の発生が懸念されている。したがって、CFRPの大量利用を目前にひかえ、航空機の安全性を確保する為にCFRP補修部の損傷評価手法の確立が重要な課題となっている。

現在、航空機の整備においては目視検査や超音波探傷法、渦電流探傷法、X線検査等^[1, 2]が行われているが、本研究では損傷検知手法として産業総合研究所の高坪らによって開発された映像化超音波探傷法を用いる。本手法はレーザによって供試体に波を励起させ供試体を伝播する超音波を可視化し、可視化画像において波の伝播挙動を観察することで損傷の検知を行う手法である^[3]。本手法は、曲面や段差を有する複雑形状物体の損傷検知が可能である、また、一度に広い領域を伝播する超音波の映像を遠隔計測できる等、実際の航空機整備への適用において多くの利点を持っている。しかし、本手法をCFRPに適用した研究は未だほとんど行われていない。本手法をCFRPに適用する際には、レーザによって励起されCFRPを伝播する波の伝播挙動を理解することが重要となる。そこで、本研究ではレーザによって励起されCFRPを伝播する波の伝播挙動の解明および映像化超音波探傷法を用いたCFRP補修材内部の損傷検知手法の確立を目的とする。

Modification of Carbon Nanotubes and its Application to Natural Rubber Composite

Hong-Xia Jiang, Toshiaki Natsuki and Qing-Qing Ni (Shinshu University)

Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were modified by Bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide

(TESPT) in two-step method and natural rubber (NR) composites enhanced by modified or unmodified multi-walled carbon nanotubes (m-MWCNTs) were synthesized in solution casting method. A thin layer was fabricated around MWCNTs according to transmission electron microscopy (TEM) observation. The ratio of D band to G band changed after silane modification by Raman analysis. The silicon element and Si-O bond were confirmed combined in m-CNTs by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared (FT-IR) analysis. For m-MWCNT/NR composite, D band shifted from 1340 cm⁻¹ to 1354 cm⁻¹, proving an efficient interfacial bonding occurred between m- MWCNTs and NR, which agreed with scanning electron microscopy (SEM) observation on the fracture surface. The improved interface resulted in a improved storage modulus at low temperature.

Effect of Nanoclay Agglomerates Distribution on Mechanical Properties of Nanocomposites

Azmi Nordin, Baosheng REN, Junji NODA, Koichi GODA (Yamaguchi University)

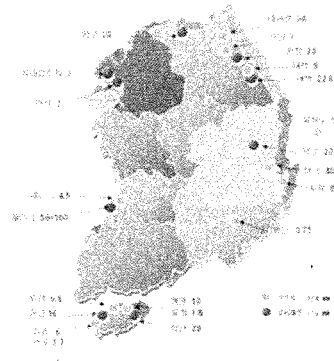
In this study, nanoclay/epoxy resin plate specimens were prepared under different amount, 1 part(s) by weight of the added material per hundred parts by weight of resin (phr), 2phr, 3phr and 5phr, of nanoclay loading. Tensile test was carried out for each nanoclay/epoxy resin plate specimen by using an Instron-type testing machine. From experimental results, we try to investigate the relation between mechanical properties and microstructure of resin plate specimens using an electron probe micro analyzer (EPMA) according to different nanoclay loading amount in the epoxy. From the obtained results, we defined an agglomerates cluster distribution throughout each specimen and related it with the experimental results.

Wind Energy R&D Activity in KOREA

Kyung Seop HAN (Wind Energy R&D Program Director Ministry of Knowledge Economy and POSTECH)

Wind Energy in KOREA

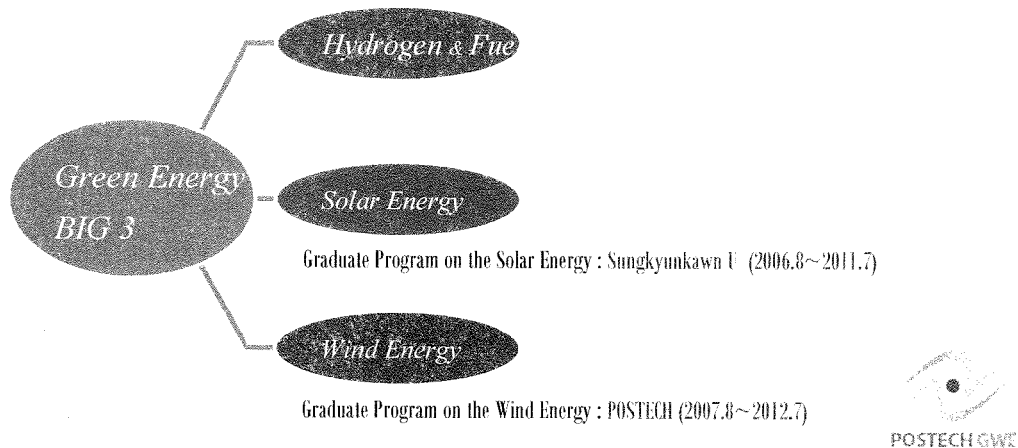
- ✓ **The world’s 7th largest oil consumer and the 4th largest energy importer.**
- ✓ **The wind industry is still at an early stage but has a bright potential, both domestically and globally.**
- ✓ **1,835 MW will be installed by 2012.**



	Cumulative installed capacity (MW) by end of in 2007	Installed capacity (MW) in 2007	Forecast 2008-2012					Installed capacity between 2008-2012	Cumulative installed capacity (MW) by end of 2012
			2008	2009	2010	2011	2012		
Australia	972	176	250	300	350	400	500	1,800	2,772
Japan	1,681	229	300	350	400	500	500	2,050	3,731
New Zealand	321	151	150	150	150	250	300	1,000	1,321
South Korea	235	41	150	250	300	400	500	1,600	1,835
Total OECD-Pacific	3,209	597	850	1,050	1,200	1,550	1,800	6,450	9,659

(BTM Consult ApS – March 2008)

Graduate Programs on the Green Energy



- Funded by the Ministry of Knowledge and Education

Development of composite wind turbine blades

Sunho Park, Taesung Park and Kyungseop Han (POSTECH)

GFRP based composite rotor blades were developed for wind turbines. The blade sectional geometry was designed to have a general shell-spar and shear web structure. For verifying the structural safety under all relevant extreme loads specified in the GL guidelines, the structural analysis of the rotor blades was performed using commercial FEM codes. The static load carrying capacity, blade tip deflections and natural frequencies were evaluated to satisfy the strength and stability requirements. The prototype of each rotor blade passed all full-scale proof tests for GL certification. Then, a real-time monitoring system with fiber Bragg grating(FBG) sensors was designed and applied to monitor wind turbine blades in operation. Differences according to the operating conditions (yawing, pitching and start-up / normal operation) were monitored accurately in real time with sensors. Additionally, using commercial FEM codes, a GFRP based composite rotor blade was modeled, and then natural frequencies obtained from the FE modal analysis were compared with the FFT results of measured strain data. This paper provides an overview of the development of wind turbine system including proof tests and monitoring results.

A SHROUDED WIND TURBINE GENERATING HIGH OUTPUT POWER WITH WIND-LENS TECHNOLOGY

Yuji Ohya, Takashi Karasudani (Kyushu University), and Xing Zhang (Tsinghua University)

We have developed a new wind turbine system that consists of a diffuser shroud with a broad-ring brim at the exit periphery and a wind turbine inside it. The shrouded wind turbine with a brimmed diffuser has demonstrated power augmentation for a given turbine diameter and wind speed by a factor of about 2-5 compared with a bare wind turbine. This is because a low-pressure region due to a strong vortex formation behind the broad brim draws more mass flow to the wind turbine inside the diffuser shroud.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TIDAL CURRENT POWER GENERATION AS AN OCEAN RENEWABLE ENERGY

Yusaku KYOZUKA (Kyushu University)

Some recent international and domestic projects on tidal current power generation including the SeaGen project by the Marine Current Turbine (MCT) of UK, the Uldolmok pilot power plant of Korea and the activities of the Ocean Energy Association of Japan founded in 2008 are briefly introduced. Our feasibility study on tidal current power generation making use of a pier of the Ikitsuki Bridge in Nagasaki Prefecture is introduced. Measurements of the tidal current by an ADCP (acoustic Doppler current profiler) and the power estimated from the current data are presented. Research and development of the adopted Darrieus-Savonius turbine, its performance in the model experiments and the records of the demonstration experiments in the sea are also presented. Finally, the tasks toward practical use of the tidal current power generation are discussed.

HIGH RESOLUTION MICRO-SITING OF 100KW WIND-LENS TURBINE AT THE NEW CAMPUS OF KYUSHU UNIVERSITY BY USING THE RIAM-COMPACT® CFD MODEL

Takanori UCHIDA, and Yuji OHYA (Kyushu University)

As a countermeasure against global warming, a substantial reduction in CO2 emissions has become an urgent issue. Accordingly, the effective use of wind power energy is attracting attention as a clean and environmentally friendly solution. Given this background, we have developed RIAM-COMPACT® (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain, a non-stationary, non-linear wind synopsis simulator that is capable of predicting the optimum sites for wind turbine construction to the pin-point level within a target area of a few km or less. In this study, a high resolution micro-siting of 100kW wind-lens turbines was performed under neutral stability in the new campus of Kyushu University.

おわりに

2日間の研究集会において、多くの大学から多数の研究者（出席者50名を越え）が参加され、上述のすばらしい研究発表を行われた。研究交流会にも多くの研究者が出席され、盛んに交流を行われた。基本的に当初企画した集会が実現された。来年度からもナノ複合材料を中心とした研究集会を続けて行いたいと考えている。

研究組織

宇田 暢秀	九州大学工学研究院	研究代表者
小野 幸生	九州大学工学研究院	研究協力者
高雄 善裕	九州大学応用力学研究所	研究協力者
新川 和夫	九州大学応用力学研究所	研究協力者
黄木 景二	愛媛大学工学研究科	研究協力者
岡部 朋永	東北大学工学研究科	研究協力者
胡 寧	東北大学工学研究科	研究協力者
倪 慶清	信州大学繊維学部	研究協力者
朱 世傑	福岡工業大学工学部	研究協力者
北條 正樹	京都大学工学研究科	研究協力者

末益 博志	上智大学理工学部	研究協力者
武田 展雄	東京大学工学研究科	研究協力者
汪 文学	九州大学応用力学研究所	所内世話人

参加者名簿

No.	名前	所属機関	職業	備考
1	宇田 暢秀	九州大学	教授	代表者
2	末益 博志	上智大学	教授	
3	吉岡 健一	東レ(株)	主任研究員	
4	黄木 景二	愛媛大学	教授	
5	矢代 茂樹	愛媛大学	助教	
6	本多 崇	東北大学(院)	准教授	
7	岡部 朋永	東北大学	准教授	
8	李 淵	千葉大学(院)	大学院生	
9	山下 義裕	滋賀県立大学	講師	
10	中村 俊一郎	第一工業大	教授	
11	邊 吾一	日本大学	教授	
12	上野 雄太	日本大学(院)	大学院生	
13	王 経国	日本大学(院)	大学院生	
14	灘部 岳晃	東京大学(院)	大学院生	
15	伊藤 悠策	東京大学(院)	大学院生	
16	北條 正樹	京都大学	教授	
17	奥田 覚	京都大学(院)	大学院生	
18	Azmi Nordin	山口大学(院)	大学院生	
19	合田 公一	山口大学	教授	
20	野田 淳二	山口大学	准教授	
21	倪 慶清	信州大学	教授	
22	江 紅霞	信州大学(院)	大学院生	
23	K.S. HAN	POSTEC	教授	
24	H.C. Park	POSTEC	教授	
25	S.H. Park	POSTEC	博士	
26	Y.C. Kim	POSTEC	教授	
27	C.W. Chung	POSTEC	教授	
28	高木 均	徳島大学	教授	
29	佐々木 元	広島大学	教授	
30	岡本 秀穂	九州大学	教授	
31	小野 幸生	九州大学	助教	
32	三浦 一浩	九州大学(院)	大学院生	
33	新川 和夫	九州大学	教授	
34	東藤 貢	九州大学	准教授	
35	大屋 裕二	九州大学	教授	
36	内田 孝紀	九州大学	助教	
37	経塚 雄策	九州大学	教授	
38	高雄 善裕	九州大学	教授	
39	松原 監壮	九州大学	技術職員	
40	任 麗梅	九州大学	学術研究員	
41	陳 兆祥	九州大学(院)	学術研究員	
42	高祖 京介	九州大学(院)	大学院生	
43	薛 佳	九州大学(院)	大学院生	
44	伊藤 康德	九州大学(院)	大学院生	
45	泉 達郎	九州大学(院)	大学院生	
46	矢野 文彬	九州大学	大学院生	
47	陳 瑩	九州大学	大学院生	
48	宋 昌錫	九州大学	大学院生	
49	趙 峻楓	九州大学	研究生	
50	汪 文学	九州大学	准教授	所内世話人

(研究集会)

地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者

新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により、地球・惑星大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで、計算機の上で再現できるようになった。そして、人工衛星による宇宙からの観測は、地球・惑星全域での広域情報の入手を可能にした。今日では、地球科学は再現と検証の手段を得て、先端科学のひとつに変貌しつつある。そのような状況に於いて、地球流体力学は数値計算の結果や衛星観測の膨大なデータを整理し統一的な理解を得るのに、重要な役割を担う学問である。本研究集会の目的は、複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に会し、相互に最新の情報を交換し、新しい学問の展開を模索するものである。

研究集会の日時・場所

日時：2009年12月21日(月)～12月22日(火)

会場：九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 西棟6階 W601号室

講演プログラム

12月21日(月)

○14:00-14:10 代表者挨拶

新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

○14:10-14:40 坂本 圭(気象研究所、東大CCSR)辻野 博之(気象研究所)

西川 史朗(気象研究所、東大CCSR)中野 英之(気象研究所)

本井 達夫(気象研究所)

北西太平洋モデルにおける沿岸親潮とその短周期蛇行

冬から春の北海道南東海域では、沿岸親潮と呼ばれる沿岸流によって、オホーツク海起源の低温・低塩・低密度な海水が西へ移流される。高解像度北西太平洋モデルを用いて沿岸親潮の力学を調べたところ、沿岸親潮は陸棚縁上の密度前線に伴うジェット流であることが分かった。また、モデル中の沿岸親潮は頻繁に蛇行し、碎波や渦の切離を通して陸棚から外洋への海水流出に寄与していた。沿岸親潮の短周期変動に関する研究の第一歩として、蛇行の伝播メカニズムについても調べた。

○14:40-15:10 水野 信二郎

海洋と室内実験で観察される大気海洋相互作用の比較

Open oceanにおけるair-sea interactionではwind stressに加え、最近、波と流れの相互作用による Craik-Leibovich 機構—(CL2モデル)—により Langmuir circulation(LC)が発生し、風波の碎波とLCが海面付近のmixingに重要な役割を演じると考えて研究が進められている。

他方、風洞水槽で風を加えた我々の実験では、風波とLCが共存する。更に、風波の場に規則波を加えた実験では、規則波は風波に強く応答し風波を減衰させるが、LCの発達には殆ど影響せず、波によるCL2機構は作用しないと思われる。

この様に、open oceanと水槽実験では波が水面下の流れに果たす役割は全く対照的で正反対である。何故air-water interactionがopen oceanと室内実験では異なるのか、に関して話題提供したい。

○15:30-16:00 山崎 哲・伊藤 久徳 (九州大学大学院 理学府)

渦と渦の相互作用による大気ブロッキング持続メカニズム

対流圏中緯度において重要な大気変動の要素の1つである、大気ブロッキングの持続メカニズムについて考察を行った。ブロッキングの持続メカニズムは、傾圧波との相互作用によって大きな持続性を獲得すると考えられている。今回、これまで提唱されたブロッキング持続メカニズムと異なる新たな持続メカニズム

ムを提唱する。このメカニズムは、渦と渦の相互作用の考え方に基づいており、大気ブロッキング以外の持続する渦についても適用できる可能性を秘めている。この新たなメカニズムについて、事例解析と簡易数値モデルの両方から考察を行った結果を示す。

○16:00-16:30 佐藤 尚毅(東京学芸大学/JAMSTEC 地球環境変動領域)

大気海洋結合のある浅水波方程式系において導出された位相速度の遅い東進モード

赤道 β 平面における浅水波方程式に大気海洋結合を取り入れることによって、MJ0に対応する遅い東進成分の存在を説明することを試みた。 $v=0$ を仮定した場合に得られるケルビン波型モードとして、現実のMJ0に近い分散関係を持つモードが得られた。このモードは、大気海洋結合がない場合にも得られるケルビン波とは別のものである。つまり、古典的なケルビン波とMJ0が共存することが整合的に説明されている。特に東西波数が小さい場合には、不安定解が存在し、現実大気のMJ0が不安定モードとして成長している可能性を示唆している。

○16:30-17:00 Chen Ying-Wen・宮原 三郎(九州大学大学院 理学府)

Analysis of Ultra-fast Kelvin waves in the Kyushu GCM

Equatorial Kelvin waves have been revealed that they are important global wave motions in the equatorial region by theoretical studies(e.g. Matsuno, 1966) and observations (e.g. Hirota, 1967, Salby et al., 1983, Riggin et al., 1997, Garcia et al. 2005). Many observational studies have shown that prominent periods of Kelvin waves shift to shorter period with increasing height. In the mesosphere and lower thermosphere region (the MLT region), it has been discovered that Kelvin waves have the periods between 2-4 days with zonal wavenumber 1 and are called as ultra-fast Kelvin waves. In this study, we use the middle atmosphere general circulation model at Kyushu University (the Kyushu-GCM) to investigate the wave behavior and generation of the 3-day ultra-fast Kelvin waves. We use a composite analysis, a space-time Fourier analysis, and E-P flux analysis. It is found that latitudinal and vertical structures of the wave are consistent with the theoretical solution of the Laplace's tidal equation. Both the vertical structure and the E-P flux analysis show that the wave is generated below 20 km height and propagate up to about 100 km height nearly conserving wave energy. Divergence of the EP flux shows that 0.3 ms⁻¹day⁻¹ westerly acceleration exists around 110 km height in the low latitude region that is consistent with that obtained by observational results.

12月22日(火)

○9:30-10:00 松島 和宏(東海大学理学研究科) 三村 和男(東海大学理学研究科)

ゆっくりと回転速度を変化させた実験で観察された半球規模回転水槽の流れ

地球流体の主な力学効果である惑星 β 効果と傾圧効果を持つ室内実験モデルの実験結果について報告する。底の形状が方物面の形をもつ回転水槽で惑星 β 効果を、差分加熱により傾圧効果を持たせた。回転水槽は半球規模を意識して作成した。実験条件の半径方向温度差を5度に固定し、回転速度を0.4rpmから1.2rpmまでと1rpmから5rpmまで連続的に変化させた。

○10:00-10:30 三村 和男(東海大学 教養学部)

無限自由度を持つ現実流体中に生じる小自由度カオスについて

閉ループ内熱対流実験は、「ローレンツ・カオスと類似の小自由度カオス理論が、現実流体中で生じるカオスの振る舞いに対してどのように有効であるか」を追求する上で、強力な実験装置である。しかしながら、水を使った室内実験では、水の物性ゆえに、かなり細い閉ループを利用せざるを得ない。その結果、ループ内流れは乱流化しやすい傾向があり、小自由度カオスを実現することは困難である。数値実験であれば、比較的乱流化しにくい太目の閉ループを想定した数値実験が可能であり、有限要素法では小自由度カオスと見なせるものが発見できた。しかしながら、計算アルゴリズムに対する依存性が大きく、差分法では発見が困難である。

従って、両アルゴリズムと新しいスペクトル・モデルを比較しながら、矛盾しない解釈を求めて考察して行く。

- 10:50-11:20 加藤 亮平 (九州大学大学院 理学府) 杉山 耕一郎 (北海道大学 低温科学研究所)
中島 健介 (九州大学大学院 理学研究院)
木星大気大規模渦の数値モデリング

木星大赤斑を想定して行ってきた数値実験の結果を報告する。加藤ら (2008, 地球流体力学研究集会) は、東西平均温度場を維持する強制を長い緩和時間で加えた実験で大規模渦が形成・維持されるのに対して短い緩和時間のもとでは大規模渦が形成されなくなることを報告し、激しい小規模渦の活動を大規模渦の阻害要因と示唆していた。しかし、感度実験を行い解析した結果、彼らの示唆はあやまっており、鉛直シアーが大規模渦を引きちぎることが阻害要因であることがわかった。

- 11:20-11:50 高木 征弘 (東京大学 理学系研究科) 松田 佳久 (東京学芸大学 自然科学系)
放射輸送を考慮した金星大気における平均子午面循環の数値シミュレーション

金星大気の研究に適用できる放射モデルを開発した。圧力効果によるラインの広がりに関して、ローレンツ型を初めとして、いくつかの関数型を用いて吸収係数を計算し、それを用いて放射 (・対流) 平衡温度分布を求めた。観測された鉛直温度分布と一致する計算結果も得られた。

この放射モデルを組み込んだ大気大循環モデルによる数値実験の準備として、灰色大気の近似を用いた放射モデルにより、2次元の大気循環の計算を行った。吸収係数の大きさ (の圧力依存性) により浅い子午面循環と深い子午面循環が得られた。

- 13:00-13:30 齊藤 直彬・石岡 圭一 (京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻)
回転系における熱対流と平均流の相互作用に関する研究

回転系における \sin 型水平シアー流中の熱対流について、非線形時間発展、線形安定性解析及びエネルギー解析を行った。回転軸が鉛直方向を向いている場合、波数1の順圧渦構造が順圧不安定によって発達することを示した。また、回転軸が鉛直方向から傾いている場合、固有モードから二次的に生成される鉛直流に働くコリオリ力によって平均流が加速されることを示した。

- 13:30-14:00 伊賀 啓太 (東京大学 海洋研究所)
一様シアー・渦位勾配を持つ流れの中立波

ゼロでない渦位勾配を持つシアー流中には正則な中立波が存在しないことが知られているが、「流れの一部の渦位を一様にすることによって、シアーに隠された中立波を取り出す」という方法を、最も基本的な設定である「シアーと渦位がともに一様である場合」に適用して、このような中立波の基本的な性質を調べる。渦位勾配とシアーの比に応じて、この手法によって取り出される中立波の波数が求められる。

最後に

各発表は十分な時間を確保し討論を活発に行うことができた。若手研究者の発表や参加も数多くあり、本研究集会が将来を担う若手研究者育成の一助になればと考える。また、本研究集会は、毎年中心となるトピックを選びながら、九州大学・応用力学研究所と東京大学・海洋研究所の間で、原則として交互に1年交代で開催している。

開催の期間 平成21年12月21日 (月) ~ 22日 (火)

代表者 組織名 新野宏 東京大学・海洋研究所

参加者 34 名

非線形波動研究の現状と将来一次の10年への展望

研究代表者 宇都宮大学工学研究科 矢嶋 徹

研究集会の目的

非線形波動はプラズマや流体力学、光ファイバーなどの多彩な系で観測され、その応用の可能性も追求されている興味深いものであり、現在の理工学諸分野の研究において中心的なテーマの1つをなしている。非線形波動研究においては、各種現象のモデル化やその解析手法と、実験や数値シミュレーションにおける具体的な結果の相互作用により、新たな研究テーマや応用分野が開拓されてきた。その結果、いくつかの大きい潮流が生じてきた。

たとえば、1960年代から70年代にかけて逆散乱法をはじめとするソリトン方程式の解法の確立が実験物理学に新しいテーマを与え、そこから得られた知見の解釈が理論の前進をもたらした。また、水面波を記述するものだったKdV方程式がプラズマに応用され、逓減摂動法などの手法により他の物理系でのモデル方程式との関係を元にしてさらに他の現象の解釈に用いられてきた。目を転ずると、直接法による解法は解の構造を明らかにし、明らかになったその数学的構造を元にして新しい離散化の手法が確立した。それはまた超離散化へと発展し、セルオートマトンの解析に重要な役割を果たした。応用上も交通流など工学的な応用問題の開拓へとつながった。その他、非線形方程式の可積分性とパルプ方程式の関連性、統計力学のモデルとそこから得られる差分化の構造など、非線形波動の各種テーマにおける相関の例は枚挙にいとまがない。

現在、非線形波動の研究は対象・手法共に広い範囲の内容をカバーする状態であるが、その発展した内容の相互関係を見極め、新たな研究テーマへと発展させる段階に至っている。このような状況を考えると、共通の非線形波動という対象のもと、理論から数値計算、実験にいたるまで、また分野においても物理や数学などの枠にとらわれずに、すべての研究者が一堂に会して議論し、お互いの問題意識を確認して話し合い、これからの研究を展望する場が必要である。そのために本研究集会の企画に至ったものである。

開催予定地の応用力学研究所は、非線形波動研究の創成期以来、一貫して関連分野の研究における国内外の拠点の一つである。過去にも継続して関連した研究集会が行われてきており、活発な議論が繰り広げられ、そこから生まれた新しい研究分野も多い。本年度もまた多数の研究者の参加によって、さまざまな分野のテーマの有機的なつながりを目指したい。

成果の概要

本研究集会は、11月19日から21日までの3日間にわたって開催され、特別講演4件と一般講演38件(口頭発表18件、ポスター発表20件)の合計42件の講演が行われた。特別講演は最近特に注目を集めているテーマに関して、特定の分野に偏ることなく、また「非線形波動」というキーワードに縛られることなく講演をお願いした。それらは、講演順に次の通りである：

- 微分幾何を利用した可積分方程式の解析に関するレビュー
- 2次元におけるソリトンの相互作用についての数値的および理論的解析の動向
- 量子暗号理論に関する最近の話題
- 離散確率過程に関する最近の研究動向と研究成果の紹介

これらの内容は、非線形波動に関連する数値計算や数学に関するもののほか、今後の研究の指針となるべき興味深い内容であった。

一般講演については、関連研究分野の先進的な内容に関する報告が主に行われた。提供された話題は数学や物理の純理論的なものから、実験やシミュレーションの話題を始め、工学的な応用を含んだ多彩なものとなり、聴衆の幅広い興味を集めた。内容を大別すると、

- 非線形波動・非線形力学系の実験と理論
- 離散系の理論と理工学上の諸問題への応用
- 可積分系の数理論と応用

であった。2日目の午後にはポスターセッションを行い、大学院生などの若手研究者をはじめとして多くの研究者が参加して、幅広い内容のプレゼンテーションが行われた。口頭発表では難しい、シミュレーションや実験の実演を伴った発表が見られ、今後の研究の発展性を秘めた、萌芽的な話題が提供された。一般講演においては、総じて実験から理論までのレベルの高い講演がなされ、それを元に活発な討論が広がられた。

本年度は、文部科学省グローバルCOEプログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」との共催となった。同プログラムおよびその周辺には、本研究集会の研究協力者をはじめ、関連分野の研究者が在籍し

ており、それらの方々の参加によって研究集会がより活発なものとなった。昨年度も同様の試みがなされていたが、特に大きな問題はなく、研究集会の今後のあり方の1つを示唆していると思われる。

本研究集会は、数学や物理の理論的な話題から工学的な応用問題にいたるまで多彩なテーマを扱いつつ、講演が公募されて自由に発表できることが大きな特色である。しかも、その内容は単に羅列的に提供されているのではなく、多くの研究者が講演ごとに各自の視点から積極的に討論を行って議論を深め、また関連する話題についての情報交換も活発に行われた。非線形波動に関連する研究分野における多くのテーマの有機的なつながりは研究集会の当初の目的であるが、それは十分に果たし得たのではないかと思う。本研究集会では大学院生や学部生をはじめとした若手研究者の発表の場としても有意義であった。彼らによる新鮮な視点からの発表や討論が行われたことは、特筆しておかねばならない。非線形波動の研究のような、さまざまなテーマが密接に関係し合う研究分野では、本研究集会のような場の存在が大変重要である。このような場を提供して頂いた応用力学研究所の存在意義を実感させて頂いた。参加者を代表して心から感謝申し上げたい。

講演プログラムと概要

11月19日(木)

13:00 - 13:30 **帯行列の固有値を計算する離散可積分系について**

福田亜希子(東京理科大学), 石渡恵美子(東京理科大学), 山本有作(神戸大学), 岩崎雅史(京都府大生命環境), 中村佳正(京大情報)

離散可積分系に分類される離散ハングリー-ロトカ・ボルテラ系及び離散ハングリー-戸田方程式の時間発展は、あるクラスの帯行列の相似変形を与える。この性質を利用して定式化された帯行列の固有値計算アルゴリズムを紹介した。

13:30 - 14:00 **A completeness study on a class of Lax pairs**

Mike Hay (九大数理)

We find every Lax pair that can be written in a certain simple form. The Lax pairs are for two dimensional partial difference equations and consist of linear problems written in 2×2 matrix form, with one term in each matrix entry. Two new systems are found which can be reduced to the lattice modified KdV equation or the lattice sine Gordon equation in special cases.

14:00 - 15:00 **取り扱いの難しい可積分方程式**

井ノ口順一(山形大学)

可積分系の例として知られながら、解の構成や解空間の構造などが詳しくわかっていない方程式がいくつかある。それらの方程式の中には、微分幾何学を用いることで方程式の構造が解明できるものがある。この講演ではそういった「微分幾何学を使って取り扱いができるようになる方程式」の例として cosh-Gordon 方程式と澤田・小寺方程式を取り上げ、これらの方程式と対応する微分幾何学について報告する。

15:00 - 15:30 **玉の種類一般、箱の種類一般、箱の容量一般の周期箱玉系の超離散テータ関数解**

岩尾慎介(東大数理)

簡約された離散 KP 方程式の超離散化をすることで、高橋-陸摩箱玉系をはじめとする様々な超離散可積分系が得られる。本講演では、周期的簡約条件を課した離散 KP 方程式の線形化問題を基に、超離散系の、トロピカル曲線を用いた線形化を説明した。特に、一般化された箱玉系の基本周期をもとめるアルゴリズムについての解説を行った。

15:30 - 16:00 **特解を保つ重力 3 体問題の差分化**

峯崎征隆(徳島文理大)

変数変換によって、一般 3 体問題が拘束力学系と見なせることを示す。さらに、この拘束系にエネルギー保存型差分法を適用する。得られた差分系は以下の 3 つの条件を満足する：(i) Hamiltonian, 全線運動量, 重心の位置を保つ, (ii) 特異点消去によって、数値計算誤差の増大が少ない, (iii) 高精度に線形安定領域の境界付近での解軌道を再現する。

16:00 – 16:30 **跡公式と定常 KdV 階層の完全積分可能性**
松島正知 (同志社大工), 大宮真弓 (同志社大生命医科)

2 階線形常微分作用素には一連の跡公式が成立するが、無反射や有限帯の場合には、それらは統一的な表示式となり、それから自然に定常 KdV 階層が導かれ、その完全積分可能性も完全な代数的方法で示すことができる。

11 月 20 日 (金)

9:30 – 10:00 **A_4 型アフィンワイル群対称性を持つ q -パルヴェ方程式**
中園信孝 (九大数理), 西岡斉治 (東大数理)

アフィンワイル群に同型な双有理変換群の平行移動を時間発展と考えることで、離散パルヴェ方程式が得られることが知られている。本研究では、 $A_4^{(1)}$ 型 (拡大) アフィンワイル群に同型な双有理変換群から得られる 4 つの q -差分パルヴェ方程式の特殊解や連続極限などについて報告する。

10:00 – 10:30 **対数的時間発展による非線形 Schrödinger 階層と Ablowitz-Ladik 階層の拡張**
高崎金久 (京大人間環境)

Carlet, Dubrovin, Zhang は通常の 1 次元戸田階層に対数的時間発展を加えて拡張戸田階層を構成した。Milanov はこの拡張戸田階層に対して双線形形式を与えた。本公演では対数的時間発展を 1 次元戸田階層の 2×2 行列形式 (非線形 Schroedinger-戸田階層) に翻訳し、非線形 Schroedinger 階層の $2+1$ 次元拡張との類似性に基づいて双線形方程式が導けることを指摘する。さらに Ablowitz-Ladik 階層に対する同様の結果を報告する。

10:30 – 11:00 **連立非分散方程式の有効ポテンシャル**
角島浩 (富山大工), 紺野公明 (日大理工)

ソリトンの位置をピークの位置として、ソリトンを点粒子と見なした。ソリトン粒子間 effective force をピークの位置の加速度から求め、ソリトン相互作用を定性的に説明した。この結果から、ソリトン相互作用の有効ポテンシャルを求めた。

11:00 – 11:30 **細長い容器内の二層流体のファラデー波の励起と共鳴**
船越満明 (京大情報), 田村桂太 (京大情報)

流体を入れた容器を鉛直方向に加振するときパラメータ共鳴によって生じる波は通常ファラデー波と呼ばれる。本講演では、容器が細長く流体が自由表面を持つ二層流体である場合を考え、ファラデー波の励起や共鳴を記述するモデル方程式とその解について述べる。

11:30 – 12:00 **一般化 BKP 差分方程式のバククルンド変換**
広田良吾 (早大名誉教授)

一般化 BKP 差分方程式は双線形形式で $[z_1 \exp(D_1) + z_2 \exp(D_2) + z_3 \exp(D_3) + z_4 \exp(D_4)]f \cdot f = 0$, ここで、 $D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 0$ であり、 z_1, z_2, z_3, z_4 は任意の定数である。この方程式のバククルンド変換式、Lax-pair について講演する。

12:00 – 12:30 **衝突によって形を変える超離散ソリトン**
中村伸也 (早大基幹理工), 広田良吾 (早大名誉教授)

超離散 hungry Lotka-Volterra 方程式では、孤立波同士の相互作用の前後で挙動に変化が起こる場合がある。このような現象を表す厳密解として、周期関数を導入してソリトンを拡張した解や、静止解について述べる。ソリトンを拡張した解は、形を変えながら伝播する波を表しており、この解が関わる相互作用ではソリトンの場合ではありえなかった現象が観測される。

12:30 – 13:30 **ソリトンの2次元相互作用について**
及川正行 (九大応力研)

ソリトンの二次元相互作用というと、Kadomtsev-Petviashvili (KP) 方程式のソリトン共鳴が有名である。われわれはここ数年、KP 方程式のソリトン共鳴と同様な現象が他の系でも起こりうるのかを調べるために、二次元 Benjamin-Ono, modified KP, extended KP, 二次元 intermediate long wave 方程式などを数値的に調べてきた。また、最近 KP 方程式のソリトン解について新たな研究の進展があり、V 字型波形の初期値問題の漸近解とソリトン解との関係が明らかになりつつある。この報告では、ソリトンの二次元相互作用に関するわれわれの最近の研究成果や問題点について述べる。

11月21日(土)

9:30 – 10:00 **セルオートマトンによる鉄道ネットワークシミュレーション**

友枝明保 (明大先端数理, 東大先端研), 小松満仁 (東大工), 兪逸淵 (東大工), 高山糧 (東大工), 姜銳 (Univ. of Science and Technology of China), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

公共交通における定時運行は企業・乗客の双方にとって最も重要なポイントである。特に鉄道ネットワークの場合、一旦アクシデントが生じると乗客の流れのパターンが変化しネットワーク全体に擾乱が広がってしまい、車両の定時運行を維持することは困難となる。この場合、ネットワーク上の乗客の流れの変化を見積もることが重要となり、本稿では、確率セルオートマトンモデルに基づく Public Conveyance Model を用いて乗客流を見積もる鉄道シミュレーター”KUTTY”を構築したので報告する。それに加えて、本稿では混雑した車両を緩和するための運行制御方法も提案し、その効果についても議論する。

10:00 – 10:30 **高次元写像に於ける不確定点の可積分極限での振舞い**

斎藤暁, 畠中智哉 (首都大物理), 斎藤革子 (横浜国大工)

高次元有理写像に於ける不確定点近傍での写像の振る舞いを調べた。極限ではすべての周期の周期点の不確定点に集積することが示された。

10:30 – 11:30 **量子暗号理論から見た量子系の諸性質の定量的な理解**

小芦雅斗 (阪大基礎工)

量子系に対して測定を行うと、その量子系の状態は一般に変化する。この量子力学の基本的な性質を、盗聴行為の検出に応用することで暗号通信を行う試みが量子暗号である。様々な状況下において、量子暗号のセキュリティを原理的に証明する試みは、測定と状態変化の不可分な関係という量子力学の基本的な性質について定量的に掘り下げることに相当する。その結果、暗号通信という応用的な目標とは別に、量子系の持つ情報の大きさを操作的に定量化する問題への解答や、量子的な相関の大きさについての定量的な理解など、量子系の諸性質の定量的な理解を促進するという基礎的な副産物が生まれている。

11:30 – 12:00 **排除体積効果を取り入れた待ち行列の厳密解について**

有田親史 (九大数理), 柳澤大地 (東大工)

待ち行列は粒子の流入と流出のある最も簡単なモデルである。人が窓口等に並ぶとき、普通前にスペースが空いてから一步前進する。最近、完全非対称単純排他過程に新しい境界条件を課すことで、排除体積を取り入れた待ち行列モデルが [Phys. Rev. E 80 (2009), 051119] において考えられた。今回はその離散時間バージョンを考える。

12:00 – 12:30 **人の集団に関する新たな評価方法の考察 2**

大塚一路 (東大先端研), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

筆者らはこれまでに決定論的な資産価格評価法 (正味現在価値) を応用して人の混雑に関する価値評価理論を構築することに成功している。本研究では、この決定論的な理論をリアルオプションアプローチと呼ばれる手法を用いて確率的な変動を考慮した理論として定式化することを目標とする。また、これらの解の評価、応用可能な混雑の事例、今後の展望についても述べたい。

12:30 – 13:30 **1D ASEP & KPZ**

笹本智弘 (千葉大理)

1次元非対称単純排他過程 (ASEP) と KPZ 方程式・普遍性クラスに関する基本事項について概説し、最近の関連研究についても言及する。また格子上的 KPZ 方程式についても説明する。

13:30 – 14:00 **2成分 KP 階層に由来する高階パルヴェ方程式**

鈴木貴雄 (神戸大理)

パルヴェ方程式の高階化の一つである野海・山田系は、KP 階層に周期簡約および相似簡約の2つの条件を課すことで導かれることが知られている。本講演では、2成分 KP 階層について同様の考察を行うことで、新しい高階パルヴェ方程式を導く。

14:00 – 14:30 **ソリトン理論・可積分系の非可換化と Quasideterminant**

浜中真志 (名大多元数理)

ソリトン理論・可積分系の非可換化は、変数の行列型への拡張、非可換空間上への拡張といった形で古くから活発に研究がなされてきた。特に最近、ソリトン解の構成において、Quasideterminant というある種の非可換行列式が本質的役割を果たすことが明らかになり、非可換ソリトンの研究は新しい局面を迎えている。この記事では、Quasideterminant の基礎を解説したのち、4次元空間上の非可換反自己双対ヤン・ミルズ方程式を題材に、それらが解の構成でいかに威力を発揮するかを説明する。(これはグラスゴー大学の C. Gilson 氏, J. Nimmo 氏との共同研究に基づく。) 低次元ソリトン方程式との関連についても少し触れる。

14:30 – 15:00 **離散 BKP 方程式と Yang-Baxter 写像**

箕三郎 (立教大理), Jonathan J. C. Nimmo (グラスゴー大), Ralph Willox (東大数理)

これまでの研究で、Yang-Baxter 写像と古典可積分型との関係が、様々な形で明らかにされている。本研究では、離散 BKP 方程式から得られる Yang-Baxter 写像、およびその超離散化について議論する。

ポスターセッション概要

(1) 「待ち行列の長さ=待ち人数」でよいのか？

柳澤大地 (東大工, 学振), 田中裕貴 (東大工), 姜銳 (Univ. of Science and Technology of China), 友枝明保 (明大先端数理, 東大先端研), 大塚一路 (東大先端研), 須摩悠史 (東大工), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

待ち行列理論では、待ち行列の長さは待ち人数で表される。しかし、実際の待ち行列では人が列を詰める時間のために、待ち行列の長さは待ち人数に一人当たりにスペースを乗じたものよりも長くなると考えられる。本研究では、待ち行列理論に排除体積効果を導入し、待ち行列の長さが待ち人数と異なることを示すと同時に、実験によりその現象を確認した。

(2) 高次元写像のジュリアセットの可積分極限に於ける振る舞い

斎藤革子 (横浜国大工), 斎藤暁

高次元非可積分系におけるジュリアセットが可積分極限でどの様に振舞うかを解析的に考察する。系の性質によって、いくつかの異なる振る舞いが得られた。

(3) 相対速度効果を含む新しい交通流追従モデルの提案

社本大輔 (東大工), 友枝明保 (明大先端数理, 東大先端研), 西遼佑 (東大工), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

ドライバーの運転に影響を与えるものとして新たに相対速度効果を付与したモデルを新たに提案する。実際にサーキットで実験し相対速度効果を確認、またコンピューターシミュレーションによって提案したモデルが渋滞を発生することを示す。

(4) **可解カオス系の超離散化**

梶原健司 (九大数理), 金子昌信 (九大数理), 野邊厚 (千葉大教育), 津田照久 (九大数理)

カオス系でありながら一般解が初等函数などで表せる可解カオス系は, 可積分系と非可積分系の境界領域に位置する力学系である. 最近, 著者らは可解カオス系に超離散化の手法を適用し, 組織的に区分線形写像とその一般解を与えることに成功した. 副産物として, テント写像の背後のトロピカル幾何学的構造を明らかにした. 同様に, ある2次元可解カオス系の超離散化にも成功し, この場合は写像にも解にも見られる本質的な「マイナスの問題」を克服して非自明な極限を得た. 本講演では以上の結果を報告する.

(5) **粉粒体モデルによる密集シミュレーション**

佐原亨 (東大工), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

本研究では, 自由な動きのできない密集状態における人の動きを粉粒体を用いた実験装置でシミュレーションすることにより, 振動周波数, 出口径, 容器の傾斜の大きさといった条件の違いによる流動係数の変化を考察し, 密集状態でスムーズな動きをするための条件や状態の新しい指標を得ることができた.

(6) **生産ラインにおけるロット数変化と、生産・輸送効率の改善方法**

峯村匠 (東大工), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

生産現場などにおいて, ロット数(どれだけまとめて生産するかの単位)を適切に設定することは生産効率の向上には不可欠である. もちろん経営工学的なアプローチで最適ロット計算の手法は提案されているが, 実際の生産現場で必ずしも最適なロットを計算することができていない. そこで本研究では, 生産工場をモデル化し, ASEP(一次元非対称単純排他過程)を用いてのシミュレーションと理論解析を行うことで, 工学的な立場から生産・輸送効率を上げることのできるロット数を考える. また多種多様な製品を生産する工場をモデル化し, 製品の送り順による生産効率の改善方法についても考察を行う.

(7) **雑踏を通り抜ける歩行者のダイナミクス**

田中裕貴 (東大工), 西成活裕 (東大先端研, さきがけ)

東京のように人口密度が非常に高い都市では, 雑踏の中で思い通りに進むことができずストレスを感じる人が多い. 本研究では, 雑踏の定義を定めた上で, 雑踏における歩行者の挙動をモデル化した. さらに, 進行方向と垂直な方向への拡散現象を理論, 実験, シミュレーションを用いて検証した結果, 各密度における拡散係数が得られた.

(8) **回転楕円体座標を用いた無重力空間中における液滴の振動、安定性の解析**

江口隆大 (東大工), 西成活裕 (東大先端研・さきがけ)

無重力空間中における液滴の振動挙動, 安定性については未だ理論的な解析が十分いなされていない. 本研究では, 回転挙動による非対称形状への遷移及び振動挙動の変化を回転楕円体座標を用いて解析した.

(9) **多体系の非弾性衝突過程に関する理論研究**

林克起 (東大工), 西成活裕 (東大先端研・さきがけ)

多体系の非弾性衝突過程の解析には, 主として平均場近似を用いた解析などが用いられてきたが, 十分な解析がなされていなかった. また, 多体系の温度変化についての解析では, 従来は熱伝導方程式, フーリエの法則が用いられてきたが, これらに従うと熱伝播速度が無限大となり非物理的であり, 電信方程式に従うはずであるという提案がなされている. 本研究では, 数値計算により多体系の温度変化を解析し, 熱は波動として伝播するが, 電信方程式の解とも異なる振る舞いをすることを確認した. 特に, エネルギーの大きな粒子と小さな粒子のエネルギー差が大きいとき(100倍程度のとき)にどのように温度が伝播するかを理論的に解析した. また, 温度伝播速度の反発係数依存性, 密度依存性を調べることに成功した. 今後は, より一般的な場合についての解析, 多体系についてのミクロな視点からの解析によるマクロな熱伝導の解析が課題である.

- (10) **片方向のみが予測を行う群衆対向流の解析**
 須摩悠史 (東大工), 西成活裕 (東大先端研・さきがけ)
 従来の群集運動の研究では全員が同じ性質を持っていた. 本研究ではこの均一性を取り除き, 対向流において片方向のみが対向者の動きを予測する場合を対象に数値計算と実験を行った. 数値計算には予測フロアフィールドを含むフロアフィールドモデルを使用した. 数値計算と実験の両方の結果から, 片方向のみが予測を行う場合は両方向が予測を行う場合よりも流れが滞りやすくなるが, 予測を行わない場合と比べると大幅に改善されることが分かった.
- (11) **交差点の情報による交通流への影響の解明**
 野村宗広 (東大工), 西成活裕 (東大先端研・さきがけ)
 1つの場所から2つの経路で1つの交差点に繋がる系からなるセルオートマトンモデルにおいて, 交差点部の情報を与えられ最適な経路選択を車両が行う場合に各車両の速度と車両群の流量の関係をゲーム理論を用いて明らかにした.
- (12) **高次保存量を持つ2階可積分方程式について**
 田中宏典 (龍谷大理工), 津田照久 (九大数理), 野邊厚 (阪大基礎工), 松木平淳太 (龍谷大理工)
 2階差分方程式の可積分方程式として QRT 系が知られているが, これまでに我々は, この系をもとに高次保存量を持つ差分方程式を生成してきた. 今回は, 2階差分方程式の中で QRT 系以外のものとして示されている方程式から得た考察をもとに, 新たな可積分な方程式の生成法を報告をする.
- (13) **べき乗法と qd 表による密行列の三重対角化について**
 大西洋平 (同志社大工), 近藤弘一 (同志社大理工)
 ベルヌーイ法は多項式の根のうち絶対値が最大な根を1つ求める古典的な算法であり, 多項式のコンパニオン行列に対するある種のべき乗法とみなされる. 本論では, 一般の行列に対するべき乗法から得られる数列を初期値とする qd 表と行列の固有値, 固有多項式の係数, 同じ固有値をもつ別の3重対角行列との関係を明らかにする.
- (14) **算術調和平均アルゴリズムと Sakaki-Kakei 方程式の一般解とその分類**
 近藤弘一 (同志社大理工)
 Sakaki-Kakei は超幾何関数の関数等式より得られる保存則をもつ非可逆2次元離散力学系を12種類提出した. 本論ではこのうち第3, 5, 6番目の方程式の一般解を求めることを目的とする. これらの方程式は, 算術調和平均アルゴリズム, ロジスティック写像と関連することを明らかにする.
- (15) **ベクトル, 行列連分数の組合せ論的解釈とその周辺**
 新宮史也 (京大情報), 上岡修平 (京大情報)
 ある重み付きグラフを導入し, その重み付きグラフ上の経路の重みを考えることによって得られる量を用いて, 行列連分数と, べき級数を成分に持つ行列との間の関係を組合せ論的に考察する. また, Block-Hankel 行列式の組合せ論的な表現を与え, 行列連分数やべき級数の行列と Block-Hankel 行列式の関係に対する組合せ論的な考察を行う.
- (16) **Benjamin-Ono ソリトンの非対称な二次元相互作用**
 辻英一 (九大応力研), 及川正行 (九大応力研)
 振幅の異なる Benjamin-Ono ソリトンの非対称な弱二次元相互作用を, 二次元 Benjamin-Ono 方程式を用いて調べた. その結果, 対称な場合と性質の異なる相互作用が現れる事が明らかになった.
- (17) **不規則性を持つ非対称単純排他過程における粒子の運動**
 今村卓史 (東大先端研)
 ホッピングレートが粒子ごとに異なる非対称単純排他過程を考える. 具体的には, ある1つの粒子の運動に着目しそれがどのような確率過程に従うかを考察する. この確率過程がランダム行列理論の固有値の確率過程と等しいことを厳密に示す.

- (18) **超平面制約付き非線形方程式に対するニュートン反復を利用した特異値分解法**
矢谷健一（京大情報），近藤弘一（同志社大理工），岩崎雅史（京都府大生命環境）

行列の特異値問題を非線形方程式の求解問題に置き換え，これをニュートン法に似た反復計算で数値的に解くことによって特異値分解を得る方法を紹介する。さらに，この特異値分解法のいくつかの理論的性質を明らかにし，実用的なハイブリッド版を示す。

- (19) **確率変数がある場合の逡減摂動法の適用について**
矢嶋徹（宇都宮大工），宇治野秀晃（群馬高専）

逡減摂動法は，非線形方程式を導出する重要な手段である。ここでは，モデルとなる物理系で確率的に変動する量があるときに逡減摂動法を適用する手法について考察する。あわせて実際に方程式を導出し，未知関数の振る舞いについて考える。

- (20) **確率共鳴を利用した力制御**
劉紅波（横浜国大工），石渡信吾（横浜国大工）

確率共鳴は閾値応答素子と微弱信号、ノイズからなる単純な非線形応答システムである。その出力は2値化されているが、確率的には比例制御と同等である。この非線形応答を使って、ノイズを積極的に利用した制御手法を力発生の制御に適用する。

開催の期間 平成21年11月19日～平成21年11月21日

参加者 86名

応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会

研究代表者

福岡県工業技術センター機械電子研究所
内野正和

目的

生産現場では安全性、高信頼性、高付加価値を有する製品開発が行われている。しかしながら近年、製品サイクルの縮小による製品開発期間の短縮が進み、その結果として設計や製品評価の時間も削られている状況である。設計の効率化を進めるためにCAEによる製品開発が普及してきた。CAEではFEMに代表されるコンピュータ解析が用いられるが、解析の基礎データとなる部材の特性条件（ヤング率やポアソン比など）や実際の境界条件（荷重条件、変形条件、接触条件など）が非常に重要である。この諸条件次第で結果は千差万別に変化する。実際、不適切な条件を用いたため製品の強度不足や構造物の耐震性不足など大きな問題が起こっている。このようにこれらの条件を精度良く求めることは安全な設計を行う上で重要である。精度の高い特性条件や境界条件を用いるためには精度の良い応力・変位場計測が必要不可欠である。また、これらの計測技術は実製品評価や構造物などの診断・評価技術としても関心が高くなってきている。そこで本研究集会では応力・変位場の計測技術、解析技術、応用実施例について議論を行い、研究者が最新の知識を共有し、新たな知見を得ることや応用展開を進めることを目的とする。

本研究集会は2010年1月13日(水)、14日(木)に九州大学西新プラザで開催した。プログラムおよび報告書の概要を以下に示す。

プログラム

1. 開会あいさつ (13:30-13:40)
2. レーザー誘起超音波法を用いた完全非接触型歯科インプラント固定率評価装置の開発 (13:40-13:55)
九州大学応用力学研究所 大田雄一郎
3. 空孔内における光重合型コンポジットレジンの力学特性評価 (13:55-14:10)
九州大学応用力学研究所 綿貫智
4. インプラントモデルに作用する衝撃計測法について (14:10-14:25)
九州大学応用力学研究所 寺坂知幸
- 休憩 (14:25-14:45)
5. サンプリングモアレ法を用いた変形物体の形状・表面ひずみ計測 (14:45-15:05)
和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科 藤垣元治
6. 有限要素法と最小二乗法を利用した変位測定データの平滑化とひずみの算出 (15:05-15:25)
青山学院大学理工学部機械創造工学科 米山聡
7. デジタル画像相関法の測定精度に関する研究－画像輝度並びにひずみの影響－ (15:25-15:45)
金沢工業大学工学部機械工学科 畝田道雄
- 休憩 (15:45-16:05)
8. スポーツカイトの運動計測とカイトラインの強度評価 (16:05-16:20)
九州大学応用力学研究所 松岡孔明
9. 点灯時における自動車用電球の残留応力測定 (16:20-16:40)
豊橋技術科学大学機械システム工学系 鈴木新一、西北昇平
10. 高速高精度3次元画像変位計測の地震工学研究への応用 (16:40-17:00)
東京電機大学情報環境学部 新津靖

1月14日

1. デジタル画像相関法による微細接合部のひずみ分布評価 (9:30-9:50)
京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 穴戸信之

2. 先端画像処理技術による大型構造物の全視野変位分布計測 (9:50-10:10)
東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 李志遠
3. 屋外計測現場で適用可能なひずみ計測装置の開発 (10:10-10:30)
佐賀大学理工学部都市工学科 伊藤幸広
休憩 (10:30-10:50)
4. デジタル画像相関法を用いた鋼コンクリート合成桁の計測 (10:50-11:10)
九州工業大学大学院工学研究院建設社会工学研究系 合田寛基
5. デジタル画像相関法を利用した新しい応力集中評価法の検討 (11:10-11:30)
福岡県工業技術センター機械電子研究所 内野正和
6. 閉会あいさつ (11:30-11:40)

講演概要

1. レーザー誘起超音波法を用いた完全非接触型歯科インプラント固定率評価装置の開発

九州大学応用力学研究所 大田雄一郎, 森田康之, 新川和夫
レーザー誘起超音波装置を使用し, 物体内に生じる弾性波の共振周波数を測定した. 試料には, インプラントと同質のチタンを用いた. また, インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数を測定した. チタンでは, 干渉計と AE センサが同じ共振周波数を示し, 本装置がインプラント体へ適応可能であることを示した. そして, インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数に違いが表れた. この結果は本装置が骨への固定率を経時的に評価できる可能性を示した.

2. 空孔内における光重合型コンポジットレジン of 力学特性計測

九州大学応用力学研究所 綿貫智, 新川和夫, 馬田俊雄
歯科臨床において, 光重合型コンポジットレジン is 充填や形態付与などの操作が容易であるため窩洞修復だけでなく, 広く歯科臨床に用いられている. しかし, 補綴物や修復物が接着層の破壊により脱落した症例も多い. その要因として, レジンは硬化する際に重合収縮が生じるため, レジンや歯質および接着界面に応力が発生したり, 過酷な口腔環境も手伝い, 亀裂や剥離の原因があるためと考えられる. 本研究は収縮荷重を窩洞を擬した空孔を用いて測定および力学特性を調査することを目的とした.

3. インプラントモデルに作用する衝撃測定法について

九州大学応用力学研究所 寺坂知幸, 新川和夫, 馬田俊雄
現在, 高齢化が進んでいる日本では, 人々が健康を損なわずに生活する事が, これからの社会においての最重要事項となっている. また, 多くの高齢者は, 歯を始めとする体の各器官を喪失あるいは機能低下を引き起こす場合が多く, これが原因となり, 様々な疾病を誘発することがある. 現在の歯科医療では, 喪失した天然歯の代わりとなる治療法として, 歯科インプラントや入れ歯などの手法が採られているが, どの方法にも長所と短所がある. 本研究では, インプラントモデルを作製し, 人工歯の材料として用いられているセラミックス, および樹脂を取り付け, 衝撃試験を行なった. そして試験結果より, インプラント用人工歯に衝撃力が作用した際の衝撃特性を調べた

4. サンプリングモアレ法を用いた変形物体の形状・ひずみ分布計測

和歌山大学システム工学部 光メカトロニクス学科 藤垣元治, 志茂公亮, 梶谷明大
三次元物体の形状計測やひずみ分布計測は製品の検査や評価等において重要である. 当研究室では, サンプリングモアレ法を用いて, 2次元格子シートを貼り付けた物体を撮影し, その撮影画像から三次元形状およびひずみ分布を解析するシステムを開発した. このシステムによって動的に変形する物体の形状とひずみ分布を同時に計測することが可能となる. 本研究では物体が変形していく様子を撮影し解析を行い, 形状, ひずみ分布の評価を行い, システムの有効性の確認を行った.

5. 有限要素法と最小二乗法を利用した変位測定データの平滑化とひずみの算出

青山学院大学理工学部 機械創造工学科 米山聡

A method for smoothing the measured displacements and computing strains utilizing a finite element method is described. Nodal displacement values in a finite element model are determined by fitting the measured values to shape functions using the method of least-squares. Then, the smoothed displacement distributions are obtained. The elements in the region where the measured values are not obtained or unreliable are determined by solving finite elements equation. The validity is demonstrated by applying the proposed method to displacements of a plate with a hole obtained by electronic speckle pattern interferometry. Results show that the displacements and strains can be determined accurately by the proposed method. Furthermore, the strains near free boundaries and strain concentration region can be determined easily. As strains can be evaluated easily and accurately, it is expected that the proposed method can be applied to various problems in solid mechanics.

6. デジタル画像相関法の測定精度に関する研究—画像輝度並びにひずみの影響—

金沢工業大学工学部 機械工学科 畀田道雄

近年、高度経済成長期に建造された構造物の老朽化が進み、それらの維持管理やリスク評価を目的として、ひずみ測定が行われている。ひずみ測定における代表的な測定法として、ひずみゲージによる接触測定法やモアレ法による非接触測定法が挙げられるが、それぞれ広範囲の分布測定には適さないことや、微小ひずみの検出が困難であることなどが問題とされている。そのような状況を背景に、デジタルカメラで撮影した複数の画像を用いて、非接触で広範囲のひずみ分布測定を可能とするデジタル画像相関法(以後、Sub-DIC法)に関する研究が盛んに行われ、様々な画像照合法を利用した検討も進められている。しかし、構造物の多くは屋外で太陽光により照らされている状態であり、時間の経過などによって光の揺らぎが発生する環境であることから、複数の画像を撮影する場合に画像間で輝度が変化すると想定される。さらに、構造物にひずみが生じている場合、ひずみが生じる前後で画像に投影される構造物の形状は変化する。このような輝度の変化やひずみの発生は、測定精度に影響を及ぼすことが知られているものの、具体的な測定精度への影響の大きさや、輝度の変化とひずみが同時に発生した場合の測定精度への影響検討は少ない。そこで本研究では、輝度の変化及びひずみの発生が、Sub-DIC法によるひずみ分布測定の測定精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本報告においては、3種類の画像照合法ごとに輝度変化のシミュレーションを行い、輝度の変化が測定精度に及ぼす影響についてそれぞれ評価した結果を述べる。また、画像間にひずみが発生させ、ひずみが画像照合法ごとの測定精度に及ぼす影響を確認し、ひずみと輝度変化が同時に生じた場合についても検討を行い、輝度変化やひずみが発生した場合に適切な画像照合法について検討した結果を言及する。

7. スポーツカイトの運動計測とカイトラインの強度評価

九州大学応用力学研究所 松岡孔明、新川和夫、馬田俊雄

近年、インフレーターカイトが開発され、カイトサーフィンやカイトボードと呼ばれる水上スポーツで利用されている。インフレーターカイトは、パラグライダーに近い形状をしているが、エアチューブからなるリーディングエッジとフレームをもち、水上でも浮くような構造となっている。操作性に優れたこのカイトを用いると、高速で水上を滑走すること、急激な力を発生させ大きくジャンプすることが可能となる。本研究では、カイトの操作方法を習得し、カイトの運動中に発生する張力を測定した。さらにカイトラインの強度評価を行った。

8. 点灯時における自動車用電球の残留応力測定

豊橋技術科学大学 機械システム工学系 鈴木新一、西北昇平

Photoelasticity of high sensitivity is applied to measure the residual stress of the pincher portion of the light bulbs for automobiles. The residual stress is not so high that isochromatic fringes don't appear, hence, there only exists the change of brightness. The residual stress of the pincher portion is obtained by measuring the light intensity with a

light detector of high sensitivity or phase-shifting method. The present study measures the residual stress when the light bulb is being turned on and off. Also, the present study uses what phase-shift photoelasticity method to measure the residual stress. The measurement results say that the methods of the present study are useful to measure the residual stress of light bulbs for automobiles.

9. 高速高精度 3次元画像変位計測の地震工学研究への応用

東京電機大学情報環境学部 新津靖

In recent years, the importance of the fracturing test using the full-scale model is recognized in order to upgrade an earthquake resistant design. It is, moreover, important to develop a new measuring method which can measure a complex three-dimensional behavior in such fracturing test. This study has been doing research and development of three-dimensional measurement using an image processing technique for a measurement of dynamic displacement in shake table test without any contact. This paper describes the measurement results of shake table test using actual scale models at E-Defense and Tsukuba Research Center.

10. デジタル画像相関法による微細接合部のひずみ分布評価

京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 宍戸信之

デジタル画像相関法を用いた微細領域の変位・ひずみ分布計測システムの構築及びその精度向上を目的とした観察画像のゆがみ評価手法開発に関する研究を行った。構築した計測システムを用いて微細構造物におけるひずみ計測を実施し、ゴム変成エポキシ樹脂接着継手に適用した例では、機械荷重でのき裂先端ひずみ分布を実測し、樹脂の損傷を考慮した有限要素解析結果と比較することで、その損傷モデルの妥当性を検証した。また、電子デバイスに適用した例では熱負荷で生じる内部構造に応じたひずみ分布や接合部のひずみ集中位置を明らかにし、有限要素解析結果と比較検討することで、解析支援手法として構築したひずみ分布計測システムが有用であることを確認した。原子間力顕微鏡観察に三次元的な画像の変形を考慮した DICM を適用することで、超微細な領域を対象とした 3次元表面変位計測システムを構築した。さらに、走査に起因する画像ゆがみを定量的に評価及び補正することで、20nm の変位分解能で計測可能であることを実験的に確認した。

11. 先端画像処理技術による大型構造物の全視野変位分布計測

東北大学大学院 工学研究科 李志遠, 坂真澄

中部電力(株)技術開発本部 電力技術研究所 南原健一, 小林大輔

大型機器・構造物の健全性を評価するために、その変位やひずみ分布を高精度かつ非接触で広域なエリアを一度に測定できる全視野計測法の開発が望まれている。画像計測による手法では、特に大型構造物の変位分布を測定するフィールド実験では、周辺環境の振動の影響を大きく受ける。本稿では、変形前後の各 1 枚の格子画像から振動下における構造物の微小変位分布を高精度に計測できる先端画像処理技術 (Advanced Image Processing (AIP) technique) を開発する。測定したい構造物の表面に格子シートを貼付け、サンプリングモアレ法を用いてたわみ分布を測定する。さらに非荷重部の自然模様を利用して、デジタル画像相関法を用いてカメラのぶれ成分を補正することで振動の影響を除去する。10メートル長のクレーンを測定した結果、サブミリメートルのたわみを検出することができ、本手法の有効性を示す。

12. 屋外計測現場で適用可能なひずみ計測装置の開発

佐賀大学理工学部 都市工学科 伊藤幸広

建設構造物の施工時や供用の段階において、ひずみゲージにより表面ひずみを計測して各種検査を行うことは効果的な管理手法ではあるが、ひずみゲージは配線が必要なこと、設置や保守が煩雑なこと、1枚のゲージで微小領域のデータしか得られないことなどの問題があり、一般の現場で実施されることは少ない。最近、物体の表面ひずみを光学的な手法により計測する方法が提案されており、その代表的なものとして、スペックルパターン干渉法やデジタル画像相関法がある。これらの手法は、配線等の問題がなく撮

影範囲内の全方向のひずみが計測できることから、有効な構造物の施工・維持管理手法となり得る。しかしこれらを屋外現場で適用する場合には、画像取得の際にレンズと CCD (CMOS) カメラを用いることから、レンズの諸特性の問題、計測期間中の日照条件の変化、風、振動の影響などから高精度なひずみ計測は難しい。本研究では、レンズの問題が無く照明の調整が不要なラインセンサスキャナを用いて、高精細な画像を取得し、デジタル画像相関法により全視野ひずみ計測を行う装置の開発を行った。実験では、開発したひずみ計測装置の精度の検証を行い、さらに、実橋を用いた実験において本装置によるひずみ計測を行い、屋外現場での適用性について検討を行った。

13. デジタル画像相関法を用いた鋼コンクリート合成桁の計測

九州工業大学大学院工学研究院 建設社会工学研究系 合田寛基,
内野正和, 山口浩平, 日比野誠, 松田浩

本研究は、全視野非接触計測技術を用いた構造物の維持管理方法を提案するための基礎研究である。デジタル画像相関法を用いて鋼コンクリート合成桁の曲げ挙動を測定した。デジタルカメラを用いて 1000mm×600mm の範囲を撮影した。変形以外の要因で発生する画像のばらつきを低減するために、複数の画像を重ね合わせた。さらに、測定箇所の周辺における変位を平均化した。得られた知見として、たわみや相対変位といった変位について、接触型計測と同等の精度が得られた。ひずみについては、ゲージの値よりもばらつきが大きいものの定性的な挙動を評価できた。

14. デジタル画像相関法を利用した新しい応力集中評価法の検討

福岡県工業技術センター機械電子研究所 内野正和

応力集中の評価は、機械設計や強度評価、構造物などの維持管理を行う上で非常に重要な要素技術である。例えば、孔や楕円孔、両端を丸めたみぞ、すみに丸みのある四角形孔などを持つ無限幅板、あるいは有限幅板、側面に U 型ノッチや V ノッチ、双曲ノッチなどをもつ場合の応力集中は、理論解や実験解が数多く報告され、応力集中係数の関係式なども提案されている。これらの実験の多くは光弾性法によるもので、実際の製品や部品などで評価を行う場合は、ひずみゲージによる計測が一般的である。しかしながら応力集中は局所的に発生し、その部位から離れるにつれて応力集中の影響が小さくなる。そのため、応力集中部を精度よく評価するためには、その部位に正確に貼り付けることが求められる。しかしながら、ひずみゲージはある幅（ゲージ長）を持ち、その幅の平均ひずみを得ることになるので、精度良い応力集中の評価は難しいのが現実である。そこで本研究では、非接触で実物の応力集中を精度よく評価する技術の検討を行った。計測法としてデジタル画像相関法を利用した。デジタル画像相関法は簡便に物体の変形分布計測が可能な方法として、近年、幅広い分野で利用されている計測手法である。本手法は変形前後の測定対象物表面をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布を利用した解析処理により、画像範囲全体に渡って表面の変位分布（大きさと方向）を得ることができる方法である。デジタル画像相関法を利用した応力集中の評価対象として、円孔による応力集中について検討を行った。最初に、一つの円孔を持つ無限幅板が一軸引張を受けた場合の円孔の縁に発生する応力場の理論解から導き出したデジタル画像相関法による評価原理を示す。次に、本手法の有効性を評価するために金属材料による円孔の応力集中に関する計測実験を行い、FEM 解析による結果との比較を紹介する。

まとめ

応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関して 14 テーマの講演があり、計測技術、解析技術、応用実施例について活発な議論が交わされた。その結果、研究者が最新の知識を共有し、新たな知見を得ると共に他分野の研究者との交流も行われ、非常に有意義な研究会であったと考える。このような研究会開催の機会を与えていた九州大学応用力学研究所新川和夫教授をはじめとする九州大学応用力学研究所の関係各位に感謝いたします。

(研究集会)

力学適応能、自己組織化能を有する

バイオマテリアル-生体インターフェースの創製

研究代表者
東北大学歯学研究科
佐々木啓一

1. 研究集会の目的

平成19年度から平成23年度までの5年間を事業計画期間とした特別教育研究経費・大学間連携研究「生体-バイオマテリアル高機能インターフェイス科学推進事業」が平成19年4月より開始されました。事業実施主体は東北大学大学院歯学研究科、東北大学金属材料研究所、九州大学応用力学研究所の3組織です。その概要は、生体-バイオマテリアル「インターフェイス」における材料、生物学、力学の研究の連携を図り、高機能化インターフェイス創製に関する新たな研究領域を開拓し、喪失した口腔及び生体の精緻な機能の新規創建治療技術開発に資すると謳われています。応用力学研究所では、生体工学グループを組む破壊力学分野および複合連続体力学分野がこの生体力学適応能に関する研究を行います。

本共同利用研究集会は平成22年3月14日に、東北大学歯学研究科実習講義棟B棟1階B1講義室で上記事業に関する基礎的な問題についての研究発表及び討論を行います。報告内容の概要を以下に示します。詳細は、九州大学応用力学研究所平成21年度の本共同利用研究集会前刷集をご覧ください。

2. 講演概要

(1) **Surface modification of pure titanium and in vitro cell responses**

Z.X. Chen, Y. Takao, W.X. Wang, T. Matsubara and L.M. Ren
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

The surface of pure titanium was modified by anodization treatment at different voltages. The surface TiO_2 layer obtained at 100V exhibits a nanostructured surface similar to natural tooth cementum. In contrast, porous oxide layers with few nanometer features were produced at higher voltages. Cell responses study demonstrated greater cell adhesion and proliferation on the nanostructured surface. Subsequent hot water treatment makes further improvement on the biocompatibility of anodized titanium.

(2) デジタル画像相関法を用いた歯科インプラント周辺骨のひずみ分布計測

森田康之(名古屋大学), 東藤貢(九州大学), 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔

皮質骨, 海綿骨の二層構造を有した骨モデルに歯科インプラントを埋入した. そして, 擬似咬合下におけるインプラント/骨界面の変形分布をデジタル画像相関を用いて計測した. インプラントと骨モデルが接着したオッセオインテグレートドインプラント, およびインプラントと骨モデルが非接着な即時荷重インプラントの二種類の試験片を準備し, 従来のインプラント植立法と近年治療期間の短期化を目指した即時荷重インプラント法における咬合下でのひずみ分布を比較した.

(3) 骨再生用材料のバイオメカニクスの検討

荒平高章 (九州大学大学院総合理工学府), 東藤 貢 (九州大学応用力学研究所)
松下恭之 (九州大学大学院歯学研究院), 古谷野潔
名井 陽 (大阪大学大学院医学系研究科)

近年、先天異常や顎変形症などの下顎不全を訴える患者数が増加している。これに対して、顎矯正手術を用いることが現在の治療法となっている。この手術では、顎骨の平行移動や回転移動が行われるため手術後に上下顎の歯の位置関係、つまり咬合状態が変化する。咬合状態は、歯の位置や下顎の安定性などにも大きな影響を与える。それゆえ、患者自身の顎及び歯列形状に対して、手術後の咬合状態を予測する数値シミュレーションが望まれている。

過去3次元有限要素モデルを使い、咬合状態における下顎歯と上顎歯間の詳細な接触変化を考慮した解析は少ない。本研究の目的は、個々の患者の咬合を解析する手法の確立し、これにより咬合状態が下顎骨に与える影響を求めることである。今回は、簡単のために下顎の第二大臼歯一本について考察したが、結果はそのまま歯列全体に適用できる。

(4) RFマグネトロンスパッタリング法によりACP膜を成膜したTi合金の骨結合強度評価

鈴木祐子¹, 塗溶², 後藤孝², 高橋正敏¹, 鈴木治¹,
新家光雄², 桑名利枝¹, 佐々木啓一¹

¹東北大学大学院歯学研究科, ²東北大学金属材料研究所

RFマグネトロンスパッタリング法を用いてアモルファスリン酸カルシウム (ACP) 膜を成膜した cpTi, 64Ti, TNTZ, 金属ガラス (BMG) の小型試料をラット大腿骨に埋入し、打ち抜き試験により骨結合強度の評価を行った。実験の結果 TNTZ において最も高い値が得られ、今回の手法により小型サイズの Ti 合金を用いて骨結合強度の評価が可能であった。Ti 合金と表面改質法の効果について今後の展開を報告する。

(5) ISFETによるバイオフィルム-マテリアルインターフェイス環境測定

真柳 弦^{1,2}、五十嵐公英²、鷺尾純平²、高橋信博²

¹ 東北大学大学院歯学研究科インターフェイス研究事業、

² 東北大学大学院歯学研究科口腔生化学分野

微小イオン感受性電界効果型トランジスタ (ISFET) pH 電極を用い、バイオフィルム-バイオマテリアル・インターフェイスの pH 測定装置を作製した。本装置によりインターフェイス pH をリアルタイムにモニターすることが可能となった。フッ素徐放性バイオマテリアルはインターフェイスの pH 低下を抑制できることが分かった。本装置は、齲蝕予防歯科修復材料の開発や多様な機能性バイオマテリアルの評価に有用であると考えられる。

(6) Octacalcium phosphate (OCP)インプラントが骨形成を促す最適条件の検討

○本田義知¹、村上宜央^{1,2}、島内英俊²、穴田貴久¹、鈴木治¹

東北大学大学院歯学研究科 ¹顎口腔機能創建学分野、²歯内歯周治療学分野

合成 octacalcium phosphate (OCP) 結晶の顆粒は、骨欠損部で破骨細胞と骨芽細胞を賦活化し、骨再生を促す。OCP 顆粒の顆粒径や、表面微細構造の調節は、骨関連細胞が存在する局所環境 (空隙・イオン濃度) を大きく変化させるが、骨形成に及ぼす影響は十分に明らかにされていない。本発表では、骨形成を促す OCP インプラントの最適条件について、これまで得られた知見を、OCP 顆粒充填時の局所環境と、骨形成反応との関係から報告する。

(7) チタン上への多層リン酸カルシウムコーティング膜の作製とその評価

成島尚之¹、上田恭介¹、後藤孝²、栗原淳³、川村仁³

¹ 東北大学大学院 工学研究科 材料システム工学専攻

² 東北大学 金属材料研究所

³ 東北大学大学院 歯学研究科 顎顔面外科学分野

RF マグネトロンスパッタリング法によりチタン基板側の高結晶性ハイドロキシアパタイト(HAp)層と表面側の低結晶性オキシアパタイト(OAp)層からなる二層コーティング膜を作製した。二層コーティング膜は均一かつ緻密であり、チタン基板との密着力は 50 MPa 以上であった。二層コーティングを施したスクリー型ブラスト Ti-6Al-4V インプラントの家兎大腿骨からの回転除去トルク値はコーティングなしと比べ有意に高い値を示した。

3. まとめ

高機能バイオマテリアル-生体インターフェースの創製に関する第4回目の研究集会であり、3研究機関からそれぞれ3件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われる。参加者の内訳は九大6名（内院生1名）、東北大20名程である。平成22年度は平成22年秋に、日本機械学会全国大会のシンポジウム場で開催する予定である。

