

平成19年度

力学分野
共同研究成果報告

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、本年度（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 5 つ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。次年度は、細胞、バイオマテリアルから医療機器まで幅広い内容でテーマを公募し、共同研究体制の規模を拡大する予定である。

19 特 1-1：生体吸収性材料の力学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）

生体吸収性を有する生体活性セラミックス/PLLA 複合材料を用いた医療用デバイスは、PLLA 単体では強度・剛性の不足から限定されている使用範囲の拡大や分解までに要する期間の短縮などが期待されている。本研究ではより高いひずみ速度における試験を行い、ひずみ速度の影響を考慮した生体吸収性骨治療材の開発の指針を与えることを目的とし、生体吸収性複合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を実験的に評価した。

19 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）

本研究集会は、一昨年度、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、昨年まではタイトルを「人工関節とバイオメカニクス」とし、主に力学的解析を中心した研究集会であった。今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。

19 特 1-3：下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）

本研究では、下顎無歯顎症例に相当する詳細な 3D-FEA モデルを作成し、インプラント体および骨内応力を解析することを目的とした。まず、ヒト頭蓋骨の X 線 CT 画像を基にして 2 層構造を成す下顎骨モデルの作成を試みた。また、歯と歯根膜を導入した下顎骨モデルも作成した。次に、下顎骨モデルに 4 本のインプラ

ントを埋入するとともに、その上部に固定式補綴装置およびCT画像より作成した人工歯のモデルを装着し、All-on-4モデルを模擬したFEAモデルを構築した。汎用FEAコードを用いて応力解析を行うことで、インプラント、補綴装置および下顎骨について力学的検証を行った。

19 特1-4：バイオメカニクスとシミュレーション技術

研究代表者：堤 定美（京都大学）

本研究集会は、応用力学研究所共同研究集会としては初めてのバイオメカニクスにおけるシミュレーション技術に焦点を絞った研究集会である。生体工学の分野において最先端で活躍されている研究者をお招きし、細胞から医療機器まで15件の講演が行われた。また、特別講演者として、人工股関節置換術数日本一の佐賀大学医学部整形外科の佛淵孝夫教授、厚生労働省の医療機器評価策定事業にお詳しい国立医薬品食品衛生研究所の土屋利江先生をお招きして、貴重なご講演を拝聴することができた。参加者は講演者を含め大学、病院、企業より約53名の参加者があり、各講演とも活発な議論が展開された。

19 特1-5：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）

近年、十分な強度を有する軟骨組織の再生を目指し、最適な培養条件を検討する研究が盛んに行われている。力学的刺激は、軟骨組織の機械的特性を発達させることが指摘されている。また細胞培養に用いる三次元担体の特性も、再生組織の形成に大きく影響することが報告されている。本研究では、アガロースゲルをスキャホールドとした再生軟骨モデルに周期的圧縮負荷を加え、力学的機能の発達およびECMの産生に及ぼす影響を評価した。また、アガロース濃度を変えることにより、スキャホールド材質による影響について検討した。

近年、我が国においても「生体工学」や「医用工学」が重要視され、各大学・研究機関においても活発に研究が推進されている。細胞、生体組織、そして人体にいたるまで「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。「環境」と「エネルギー」という2大テーマに頼りがちな応用力学研究所において、「生体」という新しい研究テーマが育つ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。

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

首都大学東京 大学院理工学研究科 小林 訓史

1. 緒言

医療技術の進歩にともない、QOL(Quality Of Life)の向上が近年重要視されている。現在臨床応用されている骨折固定用プレートやビスはそのほとんどが金属製であるため、治療後は速やかに取り除く必要がある。しかし再手術は患者にとって精神的苦痛であり、肉体的・経済的に負担となる。この再手術による患者の負担を低減するため、現在では生体吸収性を有するポリ L 乳酸(PLLA)や PLLA と生体活性セラミックスとの複合材料を用いた骨折固定材の臨床応用が進められている。このうち生体活性セラミックス/PLLA 複合材料を用いたデバイスは、PLLA 単体では強度・剛性の不足から限定されている使用範囲の拡大や分解までに要する期間の短縮などが期待されている。また生体活性セラミックス/PLLA 複合材料の特徴として、その力学的特性や分解特性を、フィラー含有率を変化させることで制御できることが挙げられる。そこでこの特徴を適切に利用することで、骨疾患の部位や程度に応じて適切な力学的特性・分解特性を生体吸収性骨治療材に対して付与するといったことも期待できる。これまでに生体活性セラミックスをフィラー材とした複合材料の研究が行われ、その力学的特性や *in vivo* 及び *in vitro* 環境における分解特性が評価されてきた。

しかしながら、これまでの研究で行われた力学的特性評価は $10^{-4}[\text{s}^{-1}]$ という低いひずみ速度域のものであり、実際の使用を想定した場合、 $10^{-1}[\text{s}^{-1}]$ 程度までのひずみ速度を考慮することが必要であると考えられる。そこで本研究ではより高いひずみ速度における試験を行い、ひずみ速度の影響を考慮した生体吸収性骨治療材の開発の指針を与えることを目的とし、生体吸収性複合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を実験的に評価した。

2. 実験方法

2. 1 試験片作成

本研究では PLLA 単体と β -TCP/PLLA 複合材料の二種類の試験片を作製した。

PLLA 単体の試験片は PLLA ペレットとして島津製作所(株)製ポリ乳酸ラクティ #5000 を使用し, 日精樹脂工業製小型射出成形機 NR7 Real Mini を用いて 100mm×10mm×4mm のバルク状に射出成形した。射出成形した試験片はホットプレスを用いて上下から加熱し, Non-Annealing (未処理), 70℃で 24 時間, 130℃で 24 時間の 3 つの条件で熱処理を行い, 結晶化度の異なる試験片を作成した。

β -TCP/PLLA 複合材料の試験片はフィラー材である β -TCP(太平化学工業製, リン酸三カルシウム)と PLLA ペレットをフィラー含有率 5wt%, 10wt%, 15wt%でそれぞれ混合後, 100mm×10mm×4mm のバルク状に射出成形した。また, 混合に用いた容器内の β -TCP 残量を測定し, その値を差し引くことにより最終的な含有率を決定した。

2. 2 擬似生体環境浸漬試験

擬似生体環境として, 生体内と同じ pH のリン酸緩衝液(PBS, pH : 7.4)を作成し, 各試験片を 37℃に保たれたインキュベーター内で一定期間(8, 16 週間)浸漬した。各試験片は浸漬後, 吸水の影響を取り除くために常温の真空炉内で絶乾を行った。

2. 3 引張試験

20mm×10mm×1mm のアルミニウムタブを各試験片の両端部に接着した後, 両面にひずみゲージを接着し, 常温の大気中にて引張試験を行った。試験速度は 1, 10, 100, 1000mm/min とした。

2. 4 圧縮試験

各試験片から 10mm×10mm×4mm の圧縮試験片を切り出し, 圧縮面の平行を出すために三点の測定結果が±0.005mm 以内になるよう研磨した。圧縮試験は常温大気中にて試験速度 1, 10, 100mm/min の 3 条件で行い, 各試験片の機械的特性に及ぼすひずみ速度依存性を調査した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 引張試験結果

引張試験結果を PLLA 単体のものを図 1 に, β -TCP/PLLA 複合材料のものを図 2 に示す. 両試験片共に弾性率においてひずみ速度に対して変化は見られず, $10^{-4}[\text{s}^{-1}]$ から $10^{-1}[\text{s}^{-1}]$ 程度ひずみ速度では弾性率にひずみ速度依存性は観察されなかった. しかしながら, 引張強度において両試験片共にひずみ速度の増加にともなう引張強度の増加が観察された. PLLA 単体においては結晶化の進んだ 70°C -24h, 130°C -24h 試験片において Non-Annealing よりも顕著なひずみ速度依存性が観察され, 結晶化によってひずみ速度依存性がより顕著に現れることが示唆された. β -TCP/PLLA 複合材料において, フィラー含有率が低い試験片ほどより顕著なひずみ速度依存性を示している. これはフィラー材である β -TCP はひずみ速度依存性が低いもしくは無い為に, ひずみ速度依存性を示す母材の重量比が大きいものほど顕著なひずみ速度依存性を示した可能性が示唆される. 以上の結果から, 母材のひずみ速度依存性とフィラー含有率から複合材料のひずみ速度依存性が予測可能であることが示唆された.

3. 2 圧縮試験結果

PLLA 単体の試験片に対して圧縮試験を行った結果, 引張試験結果と同様に弾性率に関してひずみ速度に対する依存性は殆ど観察されず, 降伏応力においてひずみ速度の増加にともなう増加が観察された.

3. 3 浸漬後引張試験結果

16 週間浸漬後の β -TCP/PLLA 複合材料における引張強度を図 3 に示す. 16 週間浸漬の結果, 各試験片において強度において若干の減少を示したが, 16 週までの浸漬においてひずみ速度依存性に関する変化は殆んど観察されなかった.

4. 結言

PLLA 単体と PLLA を母材とする生体吸収性複合材料の実験的評価から母材のひずみ

速度依存性が既知であるならばフィラー含有率から複合材料のひずみ速度依存性が予測可能であることが示唆された。しかしながらフィラー材のひずみ速度依存性の有無、そして複合材料の力学的特性が解析的に予測可能であるかを検討するために今後解析的評価を行う必要があると考えられる。

共同研究者

基礎力学部門 東藤 貢

総合理工学府 高山 哲生

成果発表

- (1) Satoshi KOBAYASHI, Mitsugu TODO, "Experimental Characterization of Mechanical Properties of Bioabsorbable Plastics after Hydrolysis", Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007 (CD-ROM), ID P-02
- (2) Satoshi KOBAYASHI, Mitsugu TODO, "The Effect of Hydrolysis on the Mechanical Properties of Injection-Molded Poly(L-lactic acid)", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 1 (2007), No. 12, in press

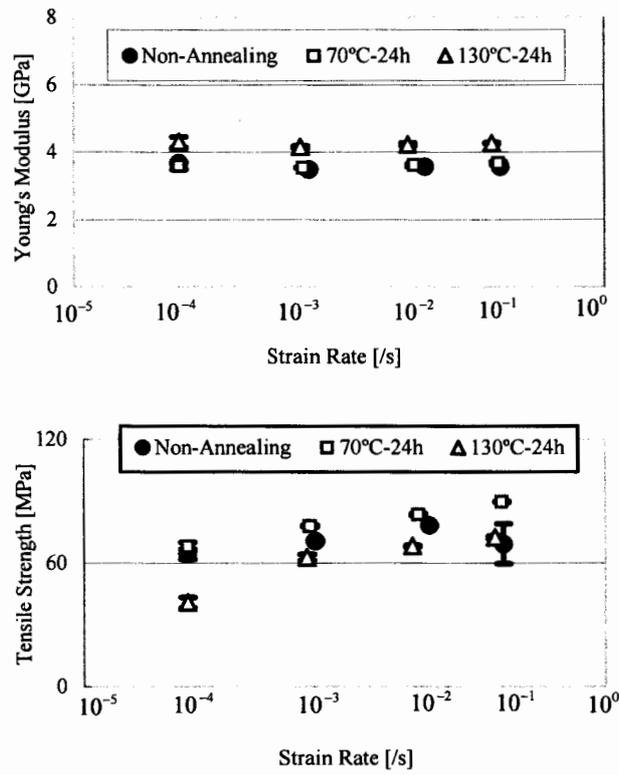


Fig.1 The effect of strain rate on the mechanical properties of monolithic PLLA.

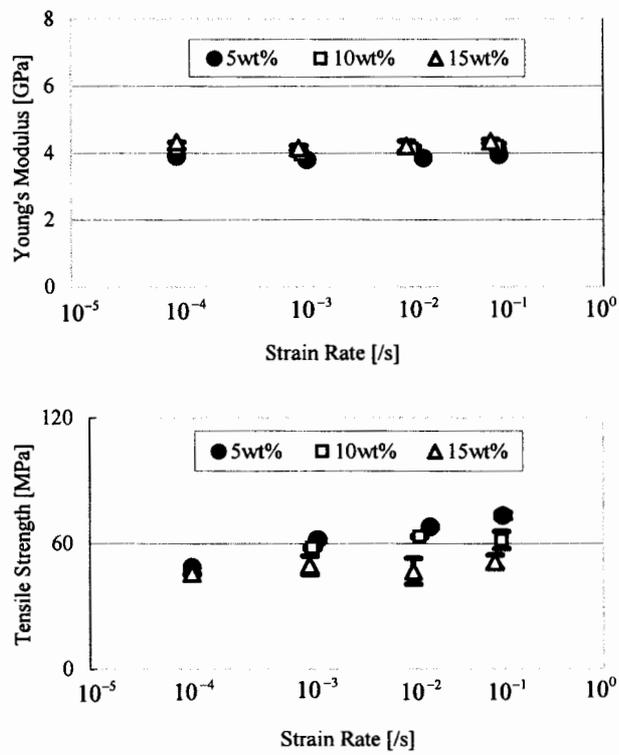


Fig.2 The effect of strain rate on the mechanical properties of β-TCP/PLLA composites.

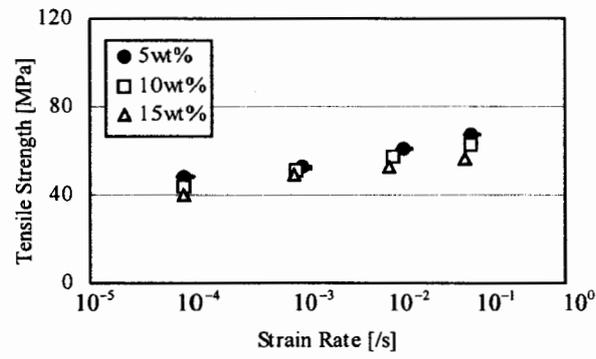


Fig.3 Tensile strength of β -TCP/PLLA composites as a function of strain rates after 16 weeks immersion.

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
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り、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。

佐賀大学医学部附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、昨年の研究集会をさらに発展させる形でタイトルを改め、「人工関節とバイオメカニクス・バイオマテリアル」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

日時：9 月 29 日（土）10：30～17：00

会場：九州大学西新プラザ

10：30 開会の辞 佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

セッション 1 バイオメカニクス 1（司会：廣川俊二）

10：40 「和式生活様式に対応した人工関節の開発」

井手衆哉，伊藤 純，馬渡正明，佛淵孝夫（佐賀大医学部整形外科）

東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

内山英一，倉 秀治（札幌医科大学）

廣川俊二（九州大学工学研究院）

木口量夫，萩原世也（佐賀大学理工学部）

11：00 「階段昇降動作にみられる加齢の影響」

堀川悦夫，大屋友紀子，森園 亮（佐賀大学地域医療科学教育研究センター）

11：20 「完全屈曲型人工膝関節頸骨コンポーネントと頸骨の有限要素法解析

—従来型人工膝関節との比較—

萩原世也（佐賀大学理工学部）

11:40 休憩 (10分)

セッション2 バイオマテリアル1 (司会: 矢田光徳)

11:50 「overview とドロマイト」

馬渡正明 (佐賀大学医学部整形外科)

12:10 「銀含有ハイドロキシアパタイト溶射技術の開発と特性評価」

野田岩男, 安藤嘉基 (JMM)

宮本比呂志 (佐賀大学医学部病因病態科学)

宮崎真樹, 嶋崎貴文, 米倉豊, 馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

12:30 昼食休憩 (70分)

特別講演 (司会: 東藤 貢)

13:40 「人工関節用UHMWPE -摩耗, 酸化, 疲労-」

迫田秀行 (国立医薬品食品衛生研究所)

14:00 「人工軟骨の高機能化とトライボ性能評価」

村上輝夫 (九州大学工学研究院)

14:20 休憩 (10分)

14:30 「次世代医療機器評価指標事業と整形外科系材料の課題」

土屋利江 (国立医薬品食品衛生研究所)

15:00 休憩 (10分)

セッション3 バイオメカニクス2 (司会: 萩原世也)

15:10 「人工関節評価用関節シミュレータ」

Part 1: Hip Joint 佐々木 誠, 木口量夫, (佐賀大学理工学部)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

Part 2: Knee Joint 高野恭寿, 木口量夫 (佐賀大学理工学部)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大医学部整形外科)

15:30 「深屈曲動作を対象とした下肢の力学モデル解析」

野見山隆洋, 木村勇介, 廣川俊二 (九州大学工学研究院)

15:50 「シミュレーションによる人工股関節と人工膝関節のリスク分析」

東藤 貢 (九州大学応用力学研究所)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

長嶺隆二 (吉塚林病院)

16:10 休憩 (10分)

セッション4 バイオマテリアル2 (司会: 馬渡正明)

16:20 「新規銀系抗菌材料の in vitro、in vivo 抗菌性評価」

安藤嘉基, 宮本比呂志 (佐賀大学医学部病因病態科学)

野田岩男, 桜井伸子 (JMM)

宮崎真樹, 嶋崎貴文, 米倉豊, 馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

16:40 「チタネートナノ構造体薄膜の合成と生体材料への応用」

矢田光徳, 井上侑子, 鳥飼紀男, 渡孝則 (佐賀大学理工学部)

野田岩男 (JMM)

佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

17:00 閉会の辞 東藤 (九州大学応用力学研究所)

3. 講演の概要

(1) 「和式生活に対応した人工関節の開発」 井手衆哉

正座などの深屈曲動作に対応した下肢人工関節モデルを開発することは、日本人の和式生活様式において必要不可欠であるが、未だ達成し得ていないテーマである。我々の研究の目的である和式生活様式に対応した人工関節の開発について、これまで行ってきた人工股関節、人工膝関節それぞれについての紹介があった。

(2) 「階段昇降動作にみられる加齢の影響」 堀川悦夫

高齢者及び若年者の階段昇降動作を3次元解析し、加齢の影響を検討することを目的とした研究を行った結果について報告があった。

(3) 「完全屈曲型人工膝関節脛骨コンポーネントと脛骨の有限要素法解析 —従来型人工膝関節との比較—」 萩原世也

有限要素モデルの荷重境界条件の設定について説明し、2種類のCFK脛骨コンポーネント(1st, 2nd)の比較、脛骨(1st, 2nd)の状態の比較、さらに従来モデルとの比較を行った結果について報告が行われた。

(4) 「抗菌生体材料の開発」 馬渡正明

医療機器に対する抗菌コーティングは、医療機器の安全性を高めるため、また患者から患者への感染伝播のリスクを軽減するためにも重要である。本講演では、銀系抗菌生体材料と新規の抗菌材料としてドロマイトについての紹介がなされた。

(5) 「銀含有ハイドロキシアパタイト溶射技術の開発と特性評価」 野田岩男

骨内インプラントである人工関節および固定材料を用いた整形外科手術における感染は、周術期のみならず長期的にも大きな問題であり、抗菌剤の投与のみでは治療に難渋する。本講演では、溶射法を用いて銀含有ハイドロキシアパタイトを金属表面にコーティングする技術を開発し、銀イオンの溶出挙動を評価することにより、生体インプラントへの抗菌コーティングの可能性を検討した結果についての報告がなされた。

(6) 「人工関節用UHMWPE —摩耗、酸化、疲労—」 迫田秀行

1990年ごろより超高分子量ポリエチレン摩耗粉が緩みの原因になることが明らかになり、人工関節の摩耗量の低減を目指した研究開発が盛んに行われてきた。ガンマ線照射などにより高密度に架橋を施した高密度架橋ポリエチレンは、実験室レベルではほとんど摩耗を生じないとされ、2000年ごろから急速に普及し、現在臨床による成績が待たれているところである。人工関節の長寿命化を実現するためには、摩耗の問題以外にも酸化劣化や疲労について検討しなくてはならないと考えられる。本講演では、力学的な正確性はあえて無視し、抜去インプラントや最終製品の試験が可能のように小さな試験片を使用した実用的な試験方法を考案し、この試験法の妥当性について評価を行った結果についての報告があった。

(7) 「人工軟骨の高機能化とトライボ性能評価」 村上輝夫

超高齢化社会への接近に際して、関節機能障害者が増加することが予測されている。介助労働者の減少も予測されているため、高齢者の多くが健康を維持し自立して生活できることが期待されている。近年では、人工関節を主体にして、国内では年間10万例以上の手術が実施され、運動機能の回復と除痛という恩恵とともに、寝たきりの状態から自分で活動できる状態になる。その結果、新陳代謝の活性化と自主生活領域の拡大により心身両面にわたる向上がもたらされるため、人工関節置換術の重要性が増大している。しかるに、とくに微小な摩耗粉の発生が骨組織の変性をきたし、人工関節の緩みを発生させ再置換手術を要する場合が生じており、人工関節における摩擦摩耗特性の適正な評価と低摩耗・低摩擦化が要望されている。本講演では、人工軟骨の導入による人工関節における潤滑モード自体の改善、摩擦摩耗の問題点と問題解決のための高機能化、その実験室評価についての概説がなされた。

(8) 「次世代医療機器評価指標事業と整形外科系材料の課題」 土屋利江

次世代医療機器評価指標事業に関しての説明がなされた。

(9) 「人工関節評価用シミュレータ Part1:Hip Joint」 佐々木誠

人工股関節置換術において、インプラントの脱臼、破損、摩耗、緩みなどの術後の合併症は非常に深刻な問題である。本講演では、これら合併症の発生リスクと日常生活動作との力学的関係について解明するために開発を進めている、股関節角度と関節間力を自由に再現可能な人工股関節運動シミュレータの構成および制御系についての報告があった。

(10) 「関節シミュレータによる完全屈曲型人工膝関節 CFK の評価研究」 高野恭寿

完全屈曲型人工膝関節 CFK における深屈曲時の軟部組織への影響、膝非荷重下での脱臼抵抗特性、血管・神経への影響などを明らかにするために進められている切断膝実験や関節シミュレータの開発状況について説明がなされた。

(11) 「Model analysis of lower limb at deep knee flexion」 Takahiro Nomiya

The performance of CFK has been evaluated for practical use; however, there have been no practical methods to measure the force acting on the knee joint in vivo. Also, the model analyses or the experimental studies at deep knee flexion are quite few. In this study, we try to calculate the force acting on the knee joint and the muscles' forces of the lower limb by using a mathematical model.

(12) 「シミュレーションによる人工股関節と人工膝関節のリスク分析」 東藤 貢

人工関節は過酷な力学的環境に常時さらされるため、人工関節の設計段階において、予想される力学的条件に対して安全性を十分に考慮したデザインの決定がなされることが重要である。しかし、人体内で人工関節が経験する力学状態を正確に把握することは非常に難しく、詳細はいまだに把握されていない。一方、コンピュータシミュレーション技術の発展にともない、複雑な3次元形状の構造体の力学状態を推定することが可能になってきている。本講演では、人工股関節と人工膝関節について、それぞれ1例ずつFEMを応用して解析を行った結果を紹介し、人工関節のリスクアセスメントにおけるシミュレーション技術の役割についての概説がなされた。

(13) 「新規銀系抗菌生体材料のin vitroおよびin vivo抗菌能評価」 安藤嘉基

人工股関節手術は、損なわれた関節機能を回復させる有効な治療方法であり、近年の高齢化社会の進行にともない手術件数も増加傾向にある。しかし、外科手術である以上危険性もあり、特に問題となるのが感染症である。本講演では、人工股関節表面に抗菌性を付与できるコーティングとして新規に開発した、銀含有ハイドロキシアパタイト溶射被膜について報告がなされた。

(14) 「チタネートナノ構造体薄膜の合成と生体材料への応用」 矢田光徳

本講演では、より簡便で安価な抗菌性インプラントの開発を目的として、抗菌成分として銀イオンを、また、銀イオンを担持する物質として金属の表面に形成させたナノ構造のチタン酸塩を検討した。具体的には、種々の形状を有するチタン、チタン合金などの金属表面上へのチタン酸ナトリウムナノ構造体薄膜の形成と、チタン酸ナトリウムナノ構造体薄膜のチタン酸銀ナノ構造体薄膜への変換と薄膜からの銀イオン溶出特性およびメチシリン耐性黄色ブドウ球菌に対する抗菌特性について検討した結果について報告がなされた。

4. あとがき

本研究集会は、一昨年度、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、昨年まではタイトルを「人工関節とバイオメカニクス」とし、主に力学的解析を中心した研究集会であった。今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。

下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 1 : インプラントオーバーデンチャーの3次元FEAモデルの構築と応力解析

長嶋 利夫 平野 喜一 (上智大学理工学部)
松下 恭之 (九州大学大学院歯学研究院)

1. はじめに

下顎無歯顎症例に対して、インプラントを用いたオーバーデンチャーにより臨床的に良好な結果が得られることが報告されている¹⁾。著者らは、インプラントオーバーデンチャーのアタッチメント構造が荷重伝達に及ぼす影響を検討するために、下顎模型にインプラントを埋入したモデルを作成し、ひずみ計測を実施している²⁾。さらにインプラントの形状、配置などがインプラントの変形、応力分布に及ぼす影響を詳細に検討するためには、多くの模型実験が必要となる。このような模型実験を有限要素法による数値解析に置き換えることができれば、形状や物性データで記述されるモデルの変更等が容易となるので、個別の患者ごとのより実際的な応力分布を検討することが可能となると考えられる。本研究では、ひずみ計測実験に用いたインプラントー下顎骨を模倣したモデルを対象とした有限要素法解析を実施し、解析結果と実測結果を比較した結果を示す。

2. オーバーデンチャー模型

Fig.1に示すような下顎無歯顎模型 (歯科用レジン製) に4本のフィクスチャーを埋入し、バーとERAアタッチメントを設置したオーバーデンチャー模型を解析対象とした。本モデルにおいては、オトガイ間に4本のインプラントが基底面に対して垂直にレジメンセメントで固定され、疑似粘膜として、2mm厚のシリコーンラバー系印象材が使用されている。模型内に埋入されたフィクスチャーに連結される維持装置にニューCMバーアタッチメントを採用し、4本のフィクスチャーを、スタンダードアバットメント・ゴールドシリンダー・ニューCMバーによって連結している。最遠心部にERAアタッチメントのフィメールを設け、クリップと弾性アタッチメント (ERA White) を併用している。荷重側インプラント2本の各周囲の軸方向荷重と曲げモーメントを測定するために、各インプラントの近遠心頬舌側面の4箇所抵抗線ひずみゲージが貼付されている。

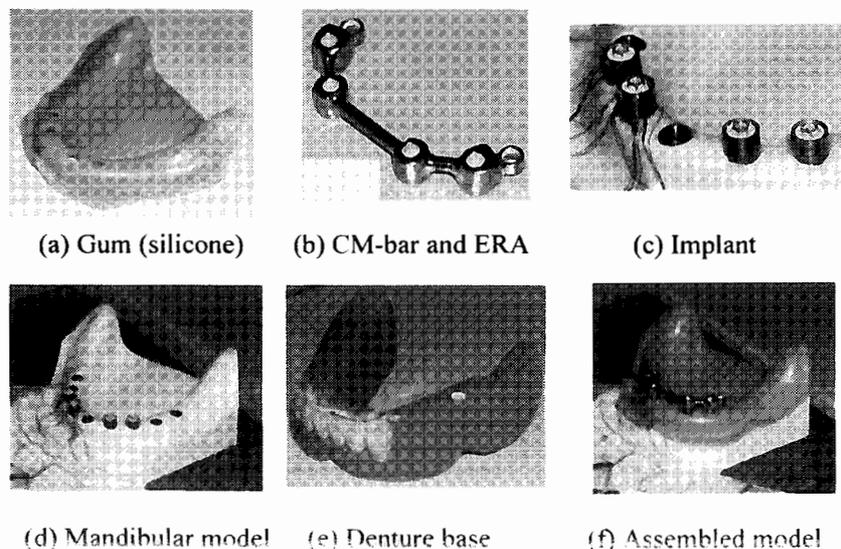


Fig. 1 Overdenture model

3. 有限要素解析

3.1 解析モデルの作成

下顎骨模型，歯肉模型，義歯を非接触三次元デジタイザ(VIVID910)で測定し，取得した点群データをRapidForm2004に読み込み，三角形ポリゴンデータに変換した．つぎにポリゴンに編集作業を行い，ポリゴン上にNURBSサーフェスを作成した．このサーフェスデータを三次元CAD(Pro/Engineer)に読み込み，CADの編集機能を用いて，下顎骨模型，歯肉模型，義歯模型それぞれのソリッドデータを作成した．その他の構成部品はPro/Engineerを用いて作成した．オーバーデンチャー模型を構成する全部品をPro/Engineer上で組み立て，**Fig.2**に示すようなオーバーデンチャー模型のアセンブリモデルを作成した．

3.2 材料物性値

応力解析で使用する各構成部品の材質，弾性係数，ポアソン比を**Table 1**に示す．

3.3 荷重条件

咬合力を模した静的荷重負荷100 Nを，万能試験機を用いて咬合面に垂直に，**Fig.3**に示すように義歯床の右側第二小臼歯相当部に負荷した．

3.4 応力解析ソフトウェア

前述したアセンブリモデルに対して構造解析ソフトウェアMechanicaを用いて応力解析を実施した．Mechanicaはp法による有限要素法ソフトウェアであり，解析者がメッシュ分割を意識せずに有限要素解析(FEA)を実施できる．

3.5 解析結果および考察

クリップ部およびERA部は完全に接触しているものとして応力解析を実施し，**Fig.4**に示すようなA, B, C, D (遠心インプラント) , E, F, G, H (近心インプラント) の8点における軸方向ひずみの計測値をFEAによる計算値と比較した．結果を**Fig.5**に示す．

遠心インプラント (A-D) の方が，近心インプラント (E-H) よりも，大きな曲げを受けている点では，実測とFEAで整合が取れている．しかしながら，近心のインプラントでは，実測では全体に圧縮が負荷されているのに対して，FEAでは曲げを受けており，両者の間で相違が認められる．

4. おわりに

本稿では，3DCADやデジタイザーなどを利用してオーバーデンチャー模型の有限要素モデルを作成し応力解析を実施し，インプラントに発生するひずみの解析値を実測結果と比較した結果を示した．現段階では解析と実測との一致は十分ではないが，今後は部品間の接触条件の導入や物性値の見直しにより，解析モデルの改善を行う予定である．

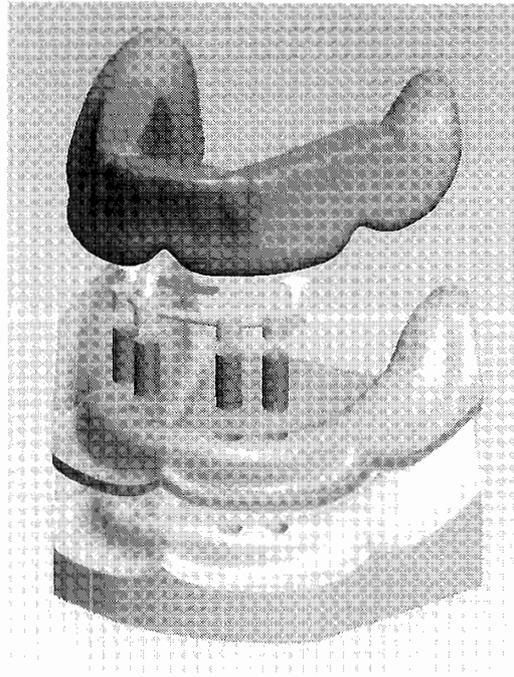


Fig. 2 3DCAD model for the overdenture

Table 1 Material properties

Parts	Material	Young' s modulus [MPa]	Poisson' s ratio
Mandibular model	resin	7000	0.3
Gum	silicone	3	0.47
Implant x 4	titanium	110000	0.34
ERA x 2	polyurethane	100	0.4
CM-bar / Clip	gold arroy	100000	0.3
Denture base	resin	3000	0.35

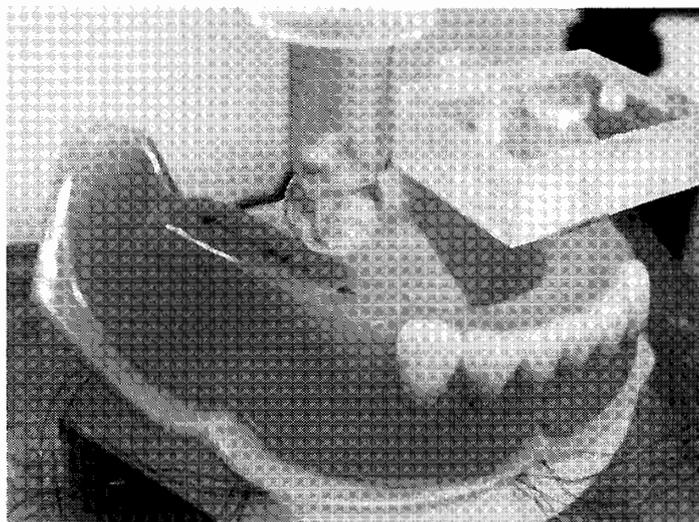


Fig.3 Load point on the overdentures

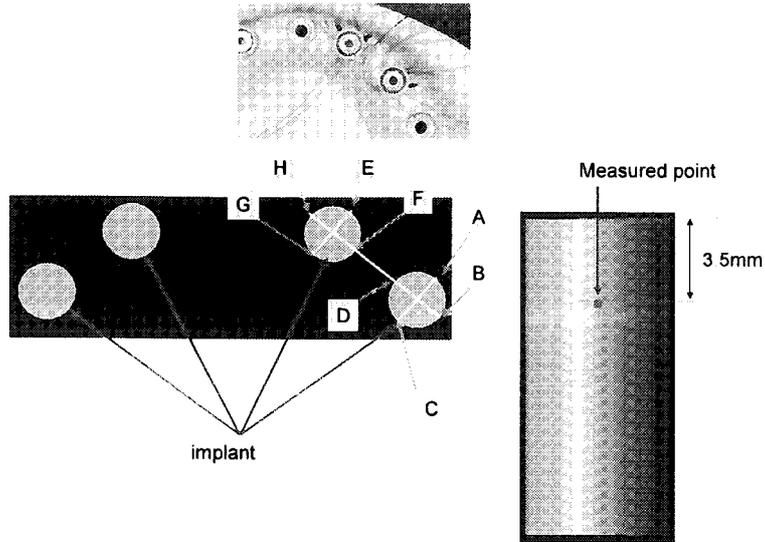


Fig. 4 Positions of gauges for strain measurements

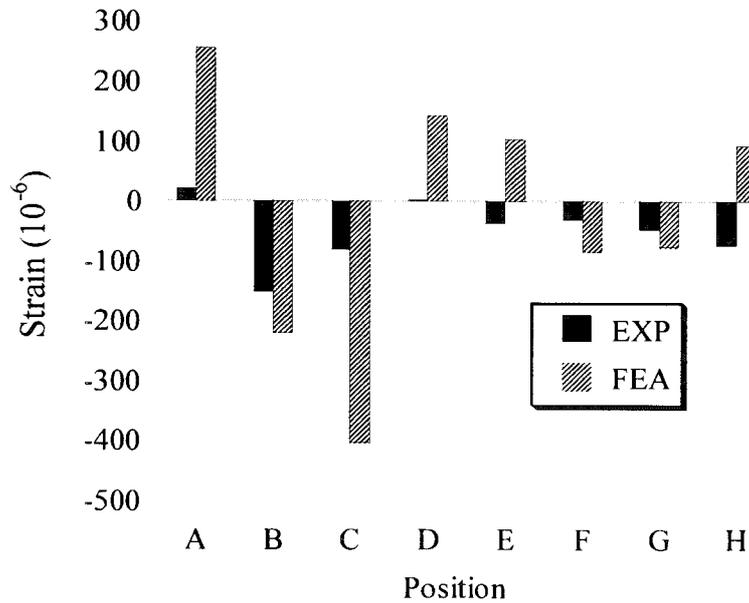


Fig. 5 Comparison of axial strains between measurements and FEA results

謝辞

FEA解析で利用した3DCADモデルの作成においては、元上智大・大学院生の槇戸謙二氏（現、コマツ）に協力いただいた。ここに謝意を表す。

研究協力者

東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

参考文献

- 1) Sadowsky, SJ, Mandibular implant-retained overdentures: A literature review, J. Prosthet Dent., 86, pp. 468-473 (2001).
- 2) 中尾, 松下, 澤江, 坂井, 村上, 古谷野, 歯科用インプラントを支台としたオーバーデンチャーの力学的評価, 第32回日本臨床バイオメカニクス学会プログラム・抄録集 p134 (2005).

下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2: 歯科インプラント埋入下顎骨の応力状態に及ぼす固定式補綴装置の材料の影響

松下恭之 (九州大学大学院歯学研究院)
東藤 貢 (九州大学応用力学研所)
入江皓平 (九州大学大学院)

1. 緒言

近年、天然歯を失った上下無歯顎の患者は全世界の人口のおよそ10%いると言われており、無歯顎症例に対する新たな治療法としてインプラント治療を応用した治療法が増えつつある¹⁾。このような治療法において、インプラントの存在が下顎骨に対して力学的にどのような影響を及ぼすのか、さらに力学環境下での骨吸収などの生物学的作用を知ることは、インプラントの安全性や耐久性などとも関連し臨床的に大変重要である。現在、複雑な生体組織の応力状態を近似的に高精度で知ることができる唯一の方法は有限要素解析 (FEA) であるが、多くのインプラントの FEA は、2次元や単純化した3次元モデルを用いた解析がほとんどである。

一方、X線CT画像やMRIから得られる画像データより、個体別の詳細な3次元FEAモデルを作成し応力解析を行う手法は、骨体に生じる力学状態を実際に近い状態で探る方法として医工学分野で期待されている技術であり、顎骨に対しても応用が始まっている^{2,3)}。

そこで本研究では、下顎無歯顎症例に相当する詳細な3D-FEAモデルを作成し、インプラント体および骨内応力を解析することを目的とした。まず、ヒト頭蓋骨のX線CT画像を基にして2層構造を成す下顎骨モデルの作成を試みた。また、歯と歯根膜を導入した下顎骨モデルも作成した。次に、下顎骨モデルに4本のインプラントを埋入するとともに、その上部に固定式補綴装置およびCT画像より作成した人工歯のモデルを装着し、All-on-4モデルを模擬したFEAモデルを構築した。汎用FEAコードを用いて応力解析を行うことで、インプラント、補綴装置および下顎骨について力学的検証を行った。

2. 下顎骨モデルの構築

ヒト頭蓋骨のX線CT画像から生体骨の輪郭を抽出した。このとき、骨の境界が曖昧な画像については手作業で処理を施した。着目する部分の輪郭を抽出し、3次元の表面点群データとした。次に、作成した3次元の表面点群データよりポリゴンによる面データを作成し、最終的にサーフェイスデータを作成した。FEA解析用プリプロセッサFEMAPにサーフェイスデータを読み込み、ソリッド化を行った。以上の作業を下顎骨の緻密骨、海綿骨、歯について行った。CT画像より作成の困難な歯根膜に関しては、人工的に作成し導入することで、実際の下顎骨の形状を模擬する2層構造を再現したモデルを構築した。作成した下顎骨モデルをFig. 1に示す。

3. FEAモデルの構築

下顎骨に埋入するインプラントは直径4mm、長さ20mmのチタン製、シリンダー型とした。このインプラントを下顎骨モデルのオトガイ孔間の遠心部に傾斜させたインプラントを2本、前歯部に2本埋入した。また、補綴装置の材料に関してはアクリル樹脂製とチタン製の2種類を用いた。

用いた要素は4節点4面体要素であり、要素数は173318、節点数は48726である。また、緻密骨、海綿骨、インプラント、補綴装置および人工歯はすべて線形弾性体と見なし Table 1 に示した材料定数を用いた。また、それぞれの界面は接合しているものとした。下顎骨下方の緻密骨の表面ノードを完全拘束とし、左側臼歯部に垂直荷重100Nを負荷して解析を行った。要素分割の様子および設定した境界条件を Fig. 2 に示す。

4. 解析結果

Fig. 3 にアクリル製補綴装置の場合の相当応力の分布状態を示す。図より、臼歯部に傾斜埋入したインプラントの周囲、特に、遠心側において高い応力集中が生じていることがわかる。このような高い応力の発生がインプラントの弛みや骨吸収に関連すると思われる。補綴装置をアクリルからチタンに変更し剛性を増加させることで、同部の骨内応力が70%程度に減少することが確認できた。

Fig. 4 にアクリル樹脂製補綴装置の相当ひずみ分布図を示す。図より負荷部分周辺でひずみ集中が生じていることがわかる。このことより、今回の解析モデルにおいては、剛性の低い補綴装置の場合、負荷部分付近での局所的な補綴装置の変形が骨内応力の増大に影響したことが推測される。

5. まとめ

下顎無歯顎症例の治療法の一つである All-on-4 の FEA モデルの構築を目的として、ヒト頭蓋骨の CT 画像を基に下顎骨の 3D を作成した。緻密骨と海綿骨を分けてモデル化し組み合わせることで2層構造の単純化した FEA 下顎骨モデルを作成した。このモデルの臼歯部に簡略化したインプラントモデルを2本、前歯部に2本埋入後、固定式補綴装置および人工歯のモデルを組み合わせることで、All-on-4 のモデルを構築した。応力解析を行った結果、臼歯部に傾斜埋入したインプラントの遠心側において高い応力集中を確認することができた。この応力集中は補綴装置の剛性を上げることで軽減されることがわかった。

参考文献

- 1) F.Renouard and B.Rangert. Risk Factors in Implant Dentistry-Simplified Clinical Analysis for Predictable Treatment-, 1-7, Quintessence Publishing Co, Inc, 1999.
- 2) 伊能教夫 他. 日本機械学会論文集(A編) 58-551, 1042-1045, 1992.
- 3) 伊能教夫 小関道彦 他. バイオメカニズム学会誌 28-4, 184-185, 2004.

Table 1 Material properties

Material	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
緻密骨	13.7	0.3
海綿骨	1.37	0.3
インプラント	106	0.3
アクリル樹脂	3.14	0.23
チタン	106	0.3
人工歯	68.9	0.28

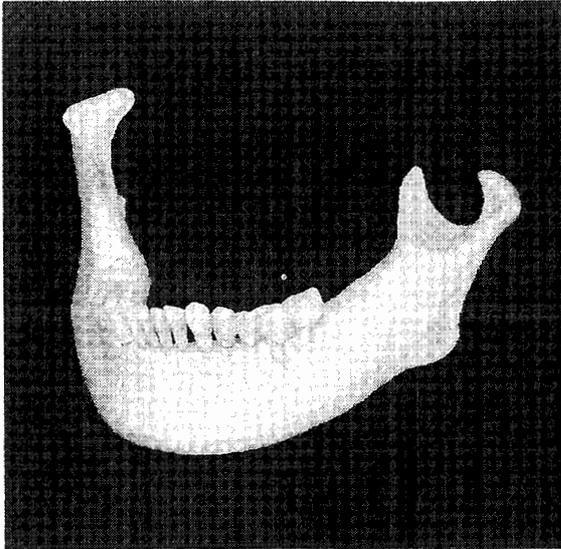


Fig. 1 3D mandibular model

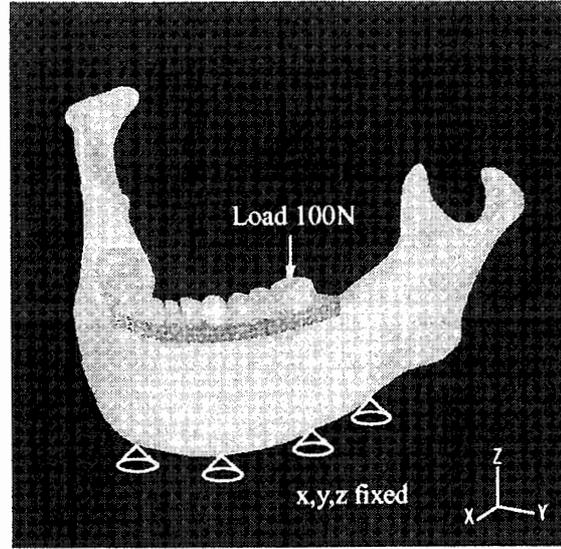


Fig. 2 Boundary conditions for FEA(All-on-4)

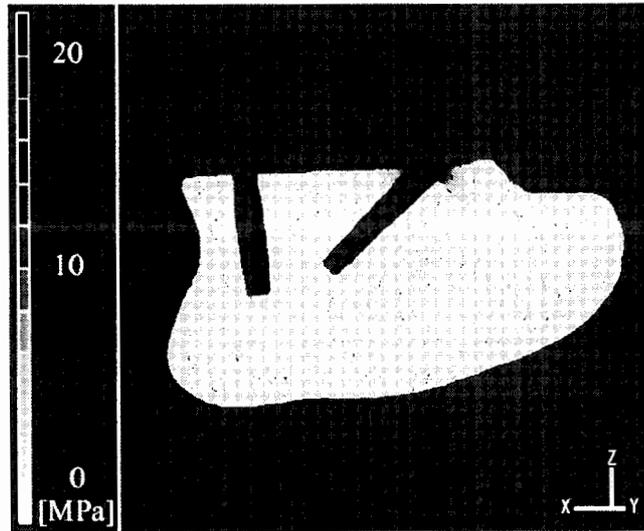


Fig. 3 Mises equivalent stress distribution

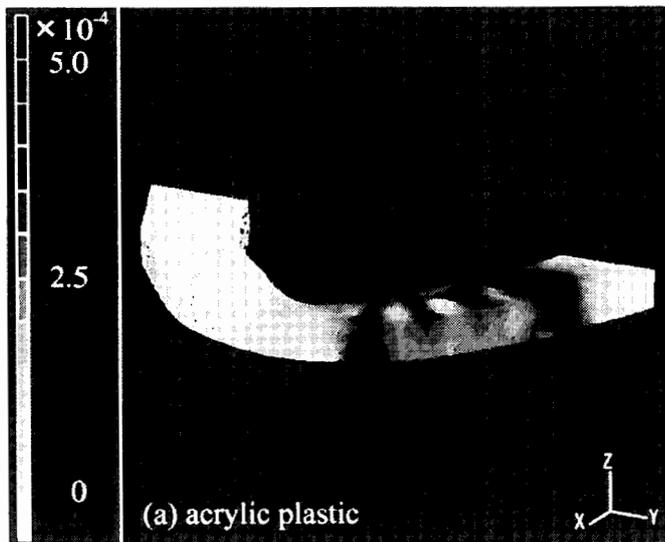


Fig. 4 Equivalent strain distribution

バイオメカニクスとシミュレーション技術

研究代表者

京都大学再生医科学研究所 堤 定美

1. 序 言

整形外科用インプラントなどの対内埋め込み型の医療機器は、生体内に埋入して使用されるため、その力学的環境は複雑であると共に、実験や計測技術を用いてその力学的環境を知ることが大変困難である。さらに、このような医療機器は複雑な3次元形状と構造を成すことが多く、ある条件下における医療機器自体の力学的状態を知ることが実験的にはほとんど不可能である。このような状況の下、コンピュータやソフトウェアの急速な発展とともに、生体医用工学の分野においても有限要素法に代表されるコンピュータ・シミュレーション技術の応用が盛んになってきている。シミュレーションを用いることで、高精度で医療機器表面や内部での応力やひずみ分布などを知ることが可能になるが、未だ多くの課題が残されているのが現状である。また、医療機器と生体組織の相互作用に起因する臨床上的の問題も多く、細胞や組織などの生体系の力学シミュレーションも重要となっており、活発な研究が進んでいる。

本研究集会では、生体工学分野においてシミュレーション技術を駆使して研究を進められている第一線の研究者にお集まりいただき、生体工学の様々な分野でのシミュレーションの応用と有用性、問題点、今後の検討課題などについてご講演いただいた。最後に、研究集会開催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ます。

2. プログラム

日時：6月2日（土）13：00～17：35

6月3日（日）9：20～12：35

会場：九州大学西新プラザ

6月2日（土）

10：30 開会の辞 堤 定美（京都大学）

セッション1 座長：東藤 貢（九州大学）

13：10 「X線CT画像に基づくヒト下顎骨の個体別有限要素解析」

小関道彦，伊能教夫（東京工業大学）

横 宏太郎（昭和大学）

13：35 「骨の微視構造を考慮した複合構造モデリング」

東藤正浩，但野 茂（北海道大学）

14：00 「ボクセルモデルによる人体頭部衝撃解析」

弓削康平，渡邊 大（成蹊大学）

西本哲也（日本大学）

村上成之，高尾洋之（日本慈恵会医科大学）

14：25 「歩行者保護脚部インパクト挙動の考察（人体FEMモデルTHUMSとの比較）」

山前康夫（トヨタテクニカルディベロップメント（株））

14：50 休憩

セッション2 座長：村瀬晃平（近畿大学）

15：05 「脊柱胸郭構造力学モデルの構築と手術シミュレーション」

- 玉木 保 (日本工業大学)
 金 紅梅 (トヨタテクニカルディベロップメント (株))
 15:30 「関節軟骨の圧縮挙動シミュレーション」
 村上輝夫, 細田菜津子, 石川 格, 坂井伸朗, 澤江義則 (九州大学)
 15:55 「有限要素モデルによる血管内皮細胞の変形挙動の再現」
 山田 宏 (九州工業大学)
 16:20 休憩
 特別セッション「次世代医療機器評価におけるシミュレーション技術」
 座長: 玉木 保 (日本工業大学)
 16:35 「TFコンピュータシミュレーション」
 堤 定美 (京都大学)
 16:50 「FEAによる人工股関節ステム標準モデルの応力解析」
 村瀬晃平 (近畿大学)
 17:05 「次世代医療機器評価について」
 土屋利江 (国立医薬品食品衛生研究所)
 17:20 総合討論

6月2日 (土)

セッション3 座長: 東藤 貢 (九州大学)

- 9:20 「膝関節のモデリングとシミュレーション」
 村瀬晃平 (近畿大学)
 9:45 「大腿骨頭壊死に対する表面置換型人工骨頭置換術の力学解析」
 坂本二郎, 梅本雄一郎, 加畑多文, 坂越大悟, 尾田十八, 富田勝郎 (金沢大学)
 10:10 「骨リモデリングの計算バイオメカニクスと人工股関節ステム形状設計への展開」
 安達泰治 (京都大学)
 10:35 「転倒シミュレーションによる大腿骨頸部の応力評価」
 田中英一 (名古屋大学)
 11:00 休憩

セッション4 座長: 堤 定美 (京都大学)

- 11:15 特別講演「運動器再建とバイオメカニクス」
 佛淵孝夫 (佐賀大学)
 11:45 「人工股関節に関連する骨リモデリングシミュレーション」
 鄭 徳泳 (国立医薬品食品衛生研究所)
 堤 定美 (京都大学)
 15:50 「人工股関節に関連した力学的諸問題と FEA の応用」
 東藤 貢 (九州大学)
 佛淵孝夫 (佐賀大学)
 12:30 閉会の挨拶: 東藤 貢 (九州大学)

3. 講演の概要

(1) 「X線CT画像に基づくヒト下顎骨の個体別有限要素解析」小関道彦

骨体の力学的特徴を非侵襲状態で数値計算によって把握することが可能となれば骨体の診断・治療に役立つ情報が提供できる。そのため、個体別有限要素モデルの生成手法に関する研究が活発に行われている。本講演者は、骨体全体をほぼ等しい要素サイズでモデリング

する手法を開発した。これにより有限要素モデルをほぼ自動的に生成することが可能となった。本講演では、骨体の形状に応じて要素サイズを制御するモデリング手法に関して行われた考察に関する報告がなされた。

(2) 「骨の微視構造を考慮した複合構造モデリング」東藤正浩

Bone tissue is often regarded as a composite material composed of HAp like mineral particles and collagen fiber in a microscopic scale. As the HAp is crystalline structure, an X-ray diffraction method is useful to measure the lattice strain of HAp crystals. The X-ray diffraction method has the possibility to measure the stress of bone tissue nondestructively. In order to estimate the stress from the lattice strain of HAp crystal, it is necessary to understand the relationship between the lattice strain of HAp and the macroscopic deformation of bone tissue. In this study, a modeling method is proposed to simulate the anisotropic properties of bone composed of HAp and collagen matrix. The relationship between the strain of HAp phase and macroscopic strain of bone tissue was evaluated by using the FE analysis of bone composite model.

(3) 「ボクセルモデルによる人体頭部衝撃解析」弓削康平

頭部の衝撃耐性値として現在最も広く受け入れられているHICは並進加速度とその持続時間により計算される評価指標である。しかし、歩行者頭部保護基準として並進加速度のみを考慮したHICだけでは不十分である可能性がある。そこで近年頭部の回転加速度と並進加速度を組み合わせた評価指標を提案しているが、検証データがほとんどないため評価指標として採用されている例は見受けられない。また頭部の並進および回転運動の差異が頭蓋内においてどのような影響があるかについて考察した報告例は少ない。そこで、本報では講演者らが開発した頭部モデルを用いて、まず頭部の衝撃的な回転挙動を再現し頭蓋内応答について、またそれに伴い脳脊髄液を粘弾性体として扱ったことについての検討を行ったことを報告する。

(4) 「歩行者保護脚部インパクト挙動の考察」山前康夫

歩行者の脚部保護性能を評価する手段として、脚部インパクト試験がある。ただし、使用される脚部インパクトは骨のたわみ変形を再現しておらず、膝部の特性も強固であるなど、人の特性と差異が大きいことが指摘されており、評価結果の妥当性についてはまだ不明な点が多い。本報の目的は、生体忠実度の高いと考えられる人体FEモデルTHUMSを用い、脚部インパクト試験での評価の妥当性を明らかにすることである。すなわち、同一のFE車両モデルを用いて、THUMSとの衝突計算および、インパクト試験を模擬したFEM計算を実施する。両者の脚部の傷害のみならず、膝靭帯断裂の重要な因子であると考えられる膝の曲げ角および、発生する衝撃荷重を比較し、脚部インパクトによる傷害の評価精度を明らかにする。

(5) 「脊柱胸郭構造力学モデルの構築と手術シミュレーション」玉木 保

整形外科手術は基本的に力学的再建手術である。最近では CT 撮影によって個人の骨格の形状が取得できるようになり、これを元に力学的な手術シミュレーションを行うことで、手術を支援することが期待される。CT データを元に個人別の手術シミュレーションを行うが、その基となる脊柱および胸郭の標準の構造力学モデルの構築について検討を行った。解析は FEM ソフト ANSYS によった。骨をはり要素（あるいは固体要素）とし、軟組織をはり要素あるいは非線形ばね要素とした。

(6) 「関節軟骨の圧縮挙動シミュレーション」村上輝夫

変形性関節症の病因（変性・修復機構）の解明、および再生軟骨における構造形成・機能向上に及ぼす力学的刺激の役割の解明には、軟骨組織全体・表面及び軟骨細胞周辺・軟骨細胞の力学的環境の理解が必要である。本研究では、可視化実験とシミュレーションによる統合的評価を行った。

(7) 「有限要素モデルによる血管内皮細胞の変形挙動の再現」山田 宏

大動脈や動脈壁の内腔面に存在する血管内皮細胞は血流や血管壁の変形によって外部から力学的刺激を受け、細胞内部で細胞骨格の再構築や遺伝子発現などが生じる。細胞内部での刺激の伝達や細胞骨格形成に果たす力学的場の寄与は明らかにされておらず、仮説に基づいたモデル化が重要である。そこで本研究では、核、細胞質、基質からなる細胞モデルを作成する。

(8) 「TFコンピュータシミュレーション」堤 定美

現在、人工股関節を始めとする外科用インプラントの力学的安定性は主に実験的手法によって評価されており、ISOやASTMでも素材やインプラントを対象とした実験による評価を基本として規格化がなされている。有限要素解析などによるコンピュータ・シミュレーションを使用すれば、解析対象との等価性が比較的得やすく、対象物全体の応力分布が正確に把握できるだけでなく、形状や材料特性などの各設計因子の影響を詳しく効率よく吟味することができる。シミュレーションがインプラントの疲労破壊の推定など強度評価に有効である示唆を基にして、今回シミュレーションに関する作業部会 (Task Force 2) が設けられた。作業概要としては、コンピュータ・シミュレーションの作業実施ガイドラインの骨格の検討、ソフトの解析精度を保証するためのbench mark test法の設定、解析モデルの解析精度を検証するための推奨モデル2種の検討、モデルの分割要素の適正サイズや高次要素の採用などについての検討などである。

(9) 「FEAによる人工股関節ステム標準モデルの応力解析」村瀬晃平

人工股関節ステムの開発・評価に有限要素解析を利用するには、どのアプリケーションでも、だれが作っても、モデルの節点・要素が異なっても同様の解が得られることが重要である。本研究では、FEAを評価指標として使用する際の、使用ソフトウェアの違い、メッシュ化の影響がシミュレーション結果に与える影響を調査した。

(10) 「次世代医療機器評価について」土屋利江

厚生労働省は、医療機器の開発の迅速化、薬事法審査の円滑化に資する評価指標の検討、作成を行うため、経済産業省と合同で検討会を設置し、評価指標を作成する5分野：体内埋め込み型能動型機器分野（高機能人工心臓）、ナビゲーション医療分野（手術ロボット）、再生医療分野（心筋シート）、体内埋め込み型医療機器分野（生体親和性インプラント）、リポソーム等のデリバリーシステム分野（抗がん剤DDSと人工酵素運搬体）について、具体的課題を決定した。本講演では、2年間の各分野の活動状況について発表する。次世代医療機器・医用材料開発を支援し、我が国発の医療機器の産業化と、必要とする患者様に優れた医療機器で治療できる環境の整備が必要不可欠である。

(11) 「膝関節のモデリングとシミュレーション」村瀬晃平

画像情報から3次元FEAモデルを構築する手法、輪郭形状が忠実でないモデル部位の特定、六面体要素によるモデル構築の試みと衝撃解析の結果と実験値との比較、要素数とアスペクト比がシミュレーション結果に及ぼす影響などについての講演がなされた。

(12) 「大腿骨頭壊死に対する表面置換型人工骨頭置換術の力学解析」坂本二郎

In this study, finite-element models of femoral head replacement with the resurfacing implantation were created based on a clinical CT images, and stress analyses were carried out considering inhomogeneous property of bone. Furthermore, influence of stress distribution around the femoral head with arrangement of the resurfacing implantation was investigated by changing implant setting angle to femoral axis.

(13) 「骨リモデリングの計算バイオメカニクスと人工股関節ステム形状設計への展開」

安達泰治

人工股関節ステムと骨との界面で生じる現象には、局所的な力学状態やリモデリングによる骨の構造変化が密接に関係している。そのため、力学的適合性に優れたステムの設計を行

うためには、界面の力学的評価に基づくステム形状の設計が不可欠となる。本研究では骨とステムの界面における応力の一様化を一つの指針としボクセル有限要素法を用いた3次元物体の形状変化シミュレーション手法を用いて、人工股関節ステムの形状決定を試みる。

(14) 「転倒シミュレーションによる大腿骨頸部の応力評価」田中英一

大腿骨単体モデルによる転倒の静的応力解析，簡易全身モデルによる転倒の動的応力解析，マルチボディー有限要素複合モデルによる歩行時の転倒シミュレーション等の研究成果についての報告がなされた。

(15) 「運動器再建とバイオメカニクス」佛淵孝夫

整形外科医の立場から，人工関節置換術の例，骨のリモデリングやインプラントと骨の相互作用に関する臨床例，人工股関節の歴史と現状，プロジェクト人工関節，シミュレーションへの期待と問題点などについての講演がなされた。

(16) 「人工股関節に関連する骨リモデリングシミュレーション」鄭 徳泳

人工股関節における「ゆるみ」や「移動」現象は，人工股関節と生体骨との力学的不適合，埋入位置や姿勢などに起因する応力分布状態の変化によって骨の形状や構造がリモデリングしたために生じると考えられる。これらの問題を解決するためには人工股関節周辺の応力分布状態を知ることが重要であるが，生体内の応力分布状態を実測することは不可能である。そこで，数値シミュレーションが有効な手段となる。本研究では，有限要素法をベースとして，骨リモデリングを考慮した数値シミュレーション法を構築し，人工股関節の周辺骨における骨リモデリング現象と人工股関節の力学的パラメータの関係を調べた。

(17) 「人工股関節に関連した力学的諸問題と FEA の応用」東藤 貢

人工股関節に関連する臨床上重要な問題のうち，力学的要素の強い問題を選定して研究対象とした。破損，脱臼，subsidence 等の問題を取り上げ，CAD データを用いた 3D モデルの構築と，3D-FEA の応用，材料力学に基づくメカニズムの考察などについての報告があった。

4. あとがき

本研究集会は，応用力学研究所共同研究集会としては初めてのバイオメカニクスにおけるシミュレーション技術に焦点を絞った研究集会である。生体工学の分野において最先端で活躍されている研究者をお招きし，細胞から医療機器まで15件の講演が行われた。また，特別講演者として，人工股関節置換術数日本一の佐賀大学医学部整形外科の佛淵孝夫教授，厚生労働省の医療機器評価策定事業にお詳しい国立医薬品食品衛生研究所の土屋利江先生をお招きして，貴重なご講演を拝聴することができた。参加者は講演者を含め大学，病院，企業より約53名の参加者があり，各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会が，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。

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

九州大学大学院工学研究院 澤江 義則

1. 背景と目的

関節軟骨組織の優れた力学的機能は、軟骨細胞が産生する細胞外マトリックス(ECM)の主成分であるプロテオグリカンとⅡ型コラーゲンにより形成される組織構造に由来する。損傷した軟骨組織の治療法として注目される再生軟骨のひとつの課題は、生体関節軟骨の力学的機能を再建することである。そのため、十分な強度を有する軟骨組織の再生を目指し、最適な培養条件を検討する研究が盛んに行われている。

力学的刺激は、軟骨細胞によるECMの産生を促進することにより、軟骨組織の機械的特性を発達させることが指摘されている。また細胞培養に用いる三次元担体(スキャホールド)の特性も、再生組織の形成に大きく影響することが報告されている。本研究では、アガロースゲルをスキャホールドとした再生軟骨モデルに周期的圧縮負荷を加え、力学的機能の発達およびECMの産生に及ぼす影響を評価した。また、アガロース濃度を変えることにより、スキャホールド材質による影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片作製および圧縮培養

牛中指骨遠位端の軟骨組織から酵素処理によって単離した軟骨細胞をアガロースゲルに播種し、再生軟骨モデルとして用いた。スキャホールドとして用いたアガロースゲルは、Sigma Type VII agarose 1wt%、Sigma Type IX-A agarose 3wt%および4wt%の3種類である。試験片の形状は直径4mm×高さ2.5mmの円柱形とした。作製した再生軟骨モデルはそれぞれ24ウェル・カルチャープレート内で培養した。全ての試験片は、37°CのCO₂インキュベータ内で一日静置培養した後、負荷群、コントロール群、静置培養群の3つに分類した。

負荷群には、2軸負荷培養装置⁽¹⁾のスライダー先端に取り付けた塩化ビニール製の圧子を用い、周期1Hzにて15%単軸圧縮ひずみを円柱軸方向に1日6時間与えた。負荷終了後は、圧子を軟骨モデルの上面に接触させたまま、ひずみを与えない状態で培養を継続した。圧子の接触による影響を評価するため、コントロール群はモデル上面に別の圧子を接触させた状態で培養した。培養液(DMEM+20%FBS)は2-3日に1度交換した。

2.2 力学試験

培養1, 8, 15, 22日目に再生軟骨モデルの力学的評価を行った。高精度ロード・セルを備えた力学試験機を用い、20%/minの速度にて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-ひずみ曲線にて、直線近似が可能であったひずみ5%~10%区間の傾きより、接線弾性率(Tangent modulus)を求めた。

2.3 グリコサミノグリカン(GAG)定量

1mlのダイジェスト・バッファ(2.8 mM EDTA, 9 mM cysteine hydrochloride in PBS)に各試験片を浸漬し、70°Cで一時間加熱処理することで溶解した。その後、溶液にパパイン(Papain from Carica Papaya, Fluka)を3Uとアガラゼ(β -Agarase, Wako)を10U加え、37°Cで一晩保温した。翌日60°Cで加熱した後、DMMB (Dimethylmethylene Blue) Assay⁽²⁾によりプロテオグリカンの主成分である硫酸化グリコサミノグリカン(GAG)濃度を測定した。

3. 実験結果

図1-3に力学試験によって得られた再生軟骨モデルの接線弾性率を示す。横軸は培養日数を表している。培養1日目の弾性率の違いは、アガロース濃度とタイプに由来する。Type IXアガロースの濃度を4%から3%に低減することにより、初期の弾性率は減少した。一方、Type VIIアガロースゲルはType IXアガロースゲルより剛性が高く、Type VII 1wt%ゲルはType IX 3wt%ゲルよりも高い弾性率を示した。Type IXアガロースの負荷群、およびType VIIアガロースの全群において、培養15日までに接線弾性率の有意な上昇が認められた。また、Type IXアガロースの培養15日目、およびType VIIアガロースの培養22日目において、負荷群の接線弾性率がコントロール群の接線弾性率と比較し有意に高くなった。Type IXアガロースと比較し、Type VIIアガロースでは培養に伴う接線弾性率の上昇がより顕著であり、また早期に生じた。

図4-6に再生軟骨モデルに含まれるGAG量を示す。縦軸は湿潤重量に対するプロテオグリカンの重量比(GAG%)を表している。Type IXアガロースのGAG量はDay15まで上昇しているが、Type VIIアガロースのGAG量はDay1からDay8にかけて急上昇し、その後の上昇はわずかであった。また、Type IXアガロースでは負荷群のGAG含有量がコントロール群と比較し有意に高くなったのに対し、Type VIIアガロースでは負荷群とコントロール群の間にGAG含有量の差が認められなかった。

4. 考察

いずれのアガロースゲルについても、負荷群の弾性率はコントロール群および静置培養群と比較し高い値を示した。一方、GAG含有量は、Type VIIアガロースの負荷群とコントロール群の間に差が見られなかったものの、それ以外は負荷群のGAG含有量が他の二群と比較し高くなった。このことより、特にType IXアガロースをスキャホールドとした場合、

周期的圧縮負荷が軟骨細胞によるプロテオグリカンの産生とスキヤホールド内への蓄積を促進し、力学的特性を向上させたと考えられる。また、再生軟骨モデルの接線弾性率と GAG 含有量に明らかな相関関係が認められたことから、スキヤホールド内に蓄積された GAG が、圧縮変形に対する再生軟骨モデルの変形抵抗に大きく関与していると考えられる。

本研究では、圧縮負荷を与えることによって再生軟骨モデルの力学的特性が向上することが確認された。そのメカニズムは以下の二つが考えられる。一つは、周期的圧縮がモデル内の軟骨細胞を刺激し、メカノトランスダクション経路を介して ECM の産生が促進されたと考えられる。もう一つは、周期的圧縮がゲル内の物質輸送を促進し、細胞の代謝を向上させたと考えられる。

再生軟骨モデルに用いるスキヤホールドが弾性率と GAG 含有量に大きく影響することが確認された。他と比較し、Type VII 1wt%ゲルでは GAG 含有量と弾性率が早期に上昇した。しかし、Type VII 1wt%アガロースモデルの GAG 含有量は、Day8 以降に上昇しなかった。この理由として、試験片内の GAG 分子の拡散挙動の変化が考えられる。アガロース濃度を低減したことによりゲル内の細孔面積は増加しており、これによりゲル内および培養液とゲル間の物質輸送特性が変化したことが予想される。その結果産生された GAG 分子のゲル内拡散速度と、平衡状態におけるゲル内分子濃度に影響を及ぼしたもののと思われる。Type VII 1wt%ゲルにおいて、負荷群とコントロール群の GAG 含有量と、静置培養群との GAG 含有量の間には有意差が確認された。これは圧子が試験片の上面に接することにより、ゲルと培養液間の物質輸送が影響を受けたことが一因と考えられる。今後は産生された GAG 分子のモデル外への放出を確認するため、培養液中の GAG を定量する予定である。

5. まとめ

本研究では、軟骨細胞-アガロースゲルの再生軟骨モデルに周期的圧縮負荷を与え、力学的機能の発達と細胞外マトリックス (ECM) 産生に及ぼす影響を検討した。その結果、力学的刺激は ECM 産生を促進させる重要な因子であり、プロテオグリカン含有量が再生軟骨モデルの圧縮剛性に大きく寄与することを確認した。また、スキヤホールドに用いたアガロースのタイプと濃度を変えることにより、スキヤホールド材質が ECM 組織の構築と力学的機能発達を大きく影響することがわかった。

参考文献

- (1) 花木, 澤江, 坂井, 石山, 村上, 2005年度年次大会講演論文集Vol.5, (2005), 211-212
- (2) Farndale R.W., Buttler D.J. and Barrett A.J., *Biochimica et Biophysica Acta* 883 (1986) 173-177.

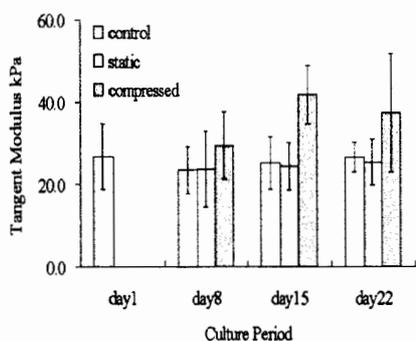


Fig. 1 Tangent Modulus of 4% Type IX-A agarose constructs (n=5-7)

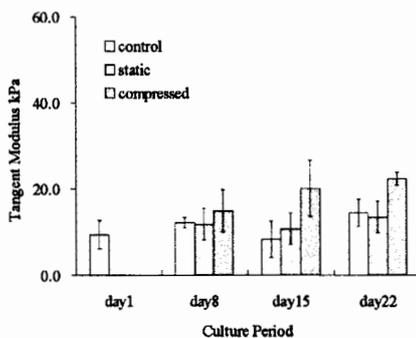


Fig. 2 Tangent Modulus of 3% Type IX-A agarose constructs (n=6-11)

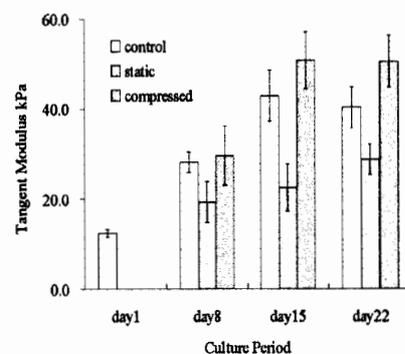


Fig. 3 Tangent Modulus of 1% Type VII agarose constructs (n=6-12)

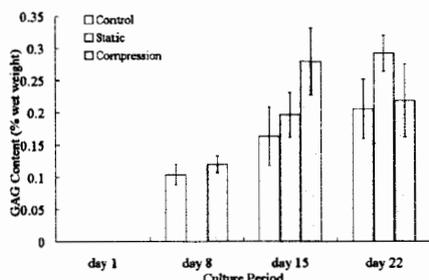


Fig. 4 GAG Content in 4% Type IX-A agarose constructs (n=2-8)

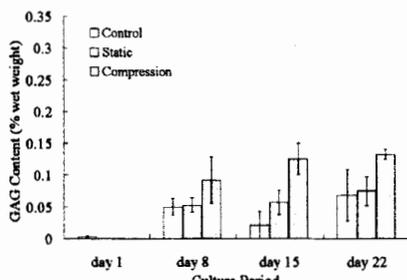


Fig. 5 GAG Content in 3% Type IX-A agarose constructs (n=5-12)

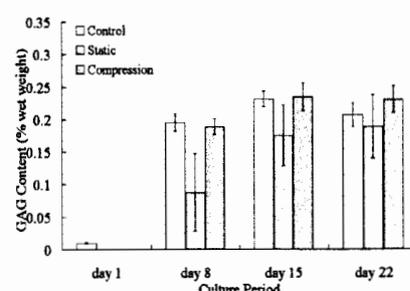


Fig. 6 GAG Content in 1% Type VII agarose constructs (n=6-14)

太陽電池のための機能性化合物半導体の結晶成長

宮崎大学工学部電気電子工学科 吉野賢二、木下 綾、白幡 泰浩

1. はじめに

I-III-VI₂ 族カルコパイライト型化合物半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、禁制帯幅付近で大きな吸収係数をもつ。禁制帯幅はCuAlS₂の3.5 eV からCuInTe₂の0.8 eV と広い波長域をカバーしている¹⁾。また、カルコパイライト型化合物半導体は太陽電池としての期待が高く、中でも、Cu(InGa)Se₂多結晶薄膜をベースとした太陽電池では、19.5%の変換効率が得られている²⁾。一方、Ag-III-VI₂ 族カルコパイライト型半導体の中でも、AgInSe₂は禁制帯幅1.2 eVを持ち、光吸収係数は禁制帯幅付近で10⁵ cm⁻¹程度と高く、太陽電池の吸収層として期待されている。現在のところ、AgInSe₂とAgGaSe₂の混晶であるAg(InGa)Se₂太陽電池の変換効率が7.3%という報告がある³⁾。AgInSe₂の作成法には、薄膜では、MBE法³⁾やフラッシュ蒸着法^{4, 5)}、パルスレーザー堆積法⁶⁾などが報告されている。これまでに、我々は、真空蒸着法によるAgInSe₂薄膜の研究を行ってきた⁷⁾。しかし、バルク結晶ではブリッジマン法^{8, 9)}やVGF法^{10, 11)}による作成法が報告されているものの、バルク結晶に関する報告例は少ない。そこで本研究では、ホットプレス法によりAgInSe₂バルク結晶の結晶成長を行った。ホットプレス法は低温、短時間で結晶成長が可能で、真空を必要としないなどの利点がある。これまでに、AgGaSe₂、AgInS₂、CuInS₂バルク結晶をホットプレス法で作成し、良質なバルク結晶が得られている¹²⁻¹⁴⁾。

本研究では、成長温度400℃から700℃と変化させAgInSe₂バルク結晶を作成し、太陽電池作製のための基礎物性の評価を行った。結晶の評価として、X線回折(XRD)によって格子定数と粒径サイズを求め、電子プローブマイクロ分析(EPMA)より定量分析を行った。また、比重測定から密度を求めた。ホール測定、サーモプローブ分析より、伝導型、抵抗率、キャリア濃度、移動度を評価し、透過率測定より禁制帯幅を見積もった。

2. 実験方法

本研究では、粉末二元系材料のAg₂Se(99.99%)、In₂Se₃(99.99%)を用いて、化学量論的組成比になるように混合した。これを原料としてホットプレス法を用いてAgInSe₂バルク結晶を作成した。直径20mmのカーボンダイスを用いて成長温度400℃から700℃、圧力25MPa、成長時間1時間でAgInSe₂バルク結晶を作成した。作成したAgInSe₂バルク結晶はカーボン紙で包まれているため、研磨をした後にXRD測定、比重測定、透過測定、ホール測定により評価を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 結晶成長

成長温度400℃から700℃、圧力25MPa、成長時間1時間でAgInSe₂バルク結晶を作成した。作成した試料は、カーボンダイスの形状により直径20mm、厚さ約2mmの円柱形である。Fig. 1は、作成した試料を表面研磨したものである。成長温度400、500℃の試料では、表面が粗く、光沢が見られなかった。試料内部は加圧焼結の際にできる小さな気孔が

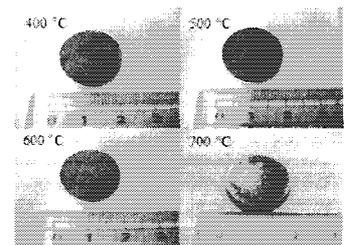


Fig. 1 Sample photographs.

えられる。成長温度 700 °C で最も化学量論的組成の値に近づいた。このとき Ag-poor、In-poor、Se-rich であった。欠陥としては、Ag 空孔 (V_{Ag})、In 空孔 (V_{In})、格子間 Se (Se_i)、Ag サイトの Se (Se_{Ag})、In サイトの Se (Se_{In}) などが考えられるが、サーモプローブ測定、ホール測定の結果より、試料は n 型の伝導型を示したことから、ドナー性欠陥の Se_{Ag} や Se_{In} がアクセプター欠陥よりも多いと考えられる。

3.4 比重測定

文献によると、 $AgInSe_2$ の密度は 5.792 g/cm^3 である¹⁵⁾。成長温度 400 °C から 600 °C では文献値より小さな値を示した。粉末二元系材料の Ag_2Se 、 In_2Se_3 のピーク、さらには $AgIn_5Se_8$ のピークが観察されたことから、結晶内に異相の存在が考えられる。成長温度 650 °C での密度は 5.48 g/cm^3 であり、 $AgInSe_2$ の文献値より小さな値を示した。しかし、この試料の XRD スペクトルでは異相が観察されなかった。同様にホットプレス法を用いて Ag_2Se と In_2Se_3 のバルク結晶を作成したところ、 Ag_2Se が 8.1 g/cm^3 、 In_2Se_3 が 5.5 g/cm^3 であったので、比重測定の結果より、異相の存在が考えられる。成長温度 700 °C での密度は 5.80 g/cm^3 であった。これは文献値とほぼ同じ値であった。Fig. 2 の XRD スペクトルからも異相のピークが観察されなかったので、成長温度 700 °C で $AgInSe_2$ の単相が得られたと考えられる。

3.5 ホール測定

Fig. 3 にホール測定における抵抗率の結果を示す。試料表面にオーミック電極として In を蒸着法で作成した。全ての試料でオーミック特性が得られた。抵抗率は成長温度の増加にしたがって増加傾向を示した。これは XRD の結果より、成長温度 400 °C での XRD スペクトルで粉末二元系材料のピークや異相のピークが他の試料の XRD スペクトルに比べて多く観察されたことから、結晶中の異相が電気伝導のパスとなり、反映されたと考えられる。成長温度上昇にしたがって、異相が減少したことで抵抗率が増加したと考えられる。XRD、EPMA、比重測定より、 $AgInSe_2$ の単相が確認された成長温度 700 °C での抵抗率は $0.16 \text{ } \Omega \text{ cm}$ であった。本実験で得られた値は、抵抗率は VGF 法で作成された $AgInSe_2$ バルク結晶¹⁰⁾ や蒸着法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜⁷⁾ と近い値を得た。しかし同じ $AgInSe_2$ 薄膜でも MBE 法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜と比べ、大きく値が異なった。これは、MBE 法は超高真空下で薄膜作成を行うため不純物の取り込みが極めて少なく、高品質のものが得られることから、MBE 法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜は抵抗率が大きいと考えられる²³⁾。

Fig. 4 にキャリア濃度と移動度の結果を示す。キャリア濃度は成長温度増加にしたがって減少傾向を示した。キャリア濃度が減少した原因として、結晶中の異相によって生じたドナー性欠陥が減少したと

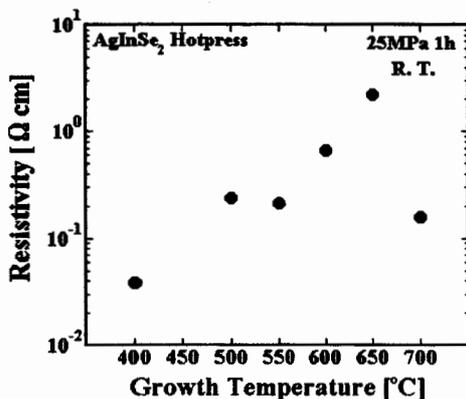


Fig. 3 Resistivity of $AgInSe_2$

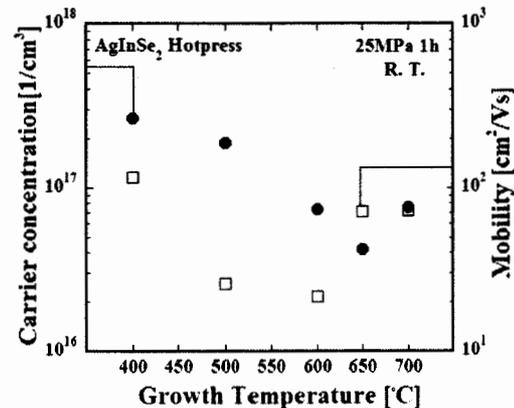


Fig. 4 Carrier concentration and electron mobility

考えられる。また、移動度は増加傾向を示した。移動度が増加した原因として、成長温度が上昇するにしたがって結晶性が良くなったことが原因だと考えられる。抵抗率のときと同様、成長温度700 °Cでのキャリア濃度は $7.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度は $73 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。これらの値は、VGF法で作成された AgInSe_2 バルク結晶¹⁰⁾と近い値であった。蒸着法で作成された AgInSe_2 薄膜では、キャリア濃度は $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度は $18 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と報告されている⁷⁾。本実験で得られた値に比べ、キャリア濃度が高く、移動度が低い。これは、バルク結晶のダイス内部での拡散過程と薄膜の基板への堆積過程が異なるためと考えられる。また、ホール測定の結果、ホール係数は全ての試料で負の値を示したので、本実験で作成した試料は全てn型であった。サーモプローブ分析の結果でも、全ての試料でn型の伝導型を示した。ドナー性欠陥がアクセプター性欠陥よりも多く存在しているためn型の伝導型を示したと考えられる。 AgInSe_2 に関する論文^{3, 7, 8, 24)}によると、サーモプローブ分析でn型を示したという報告があるが、本研究で作成した試料においても同様の結果が得られた。

3.6 透過率測定

Fig. 5 に、XRD の結果より AgInSe_2 の単相が得られた成長温度 700 °C における、横軸をエネルギー、縦軸を $(\alpha h\nu)^2$ として禁制帯幅を算出したグラフを示す。この結果から室温での禁制帯幅は 1.204 eV を得た。文献と比較して、バルク結晶の文献では 1.216 eV⁸⁾、1.225 eV²⁶⁾、薄膜の文献では 1.21 eV²⁷⁾、1.25 eV²⁸⁾ と報告されている。本実験で得られた値は文献値と比べ、若干低い値となった。これはキャリア濃度や組成比の相違により、禁制帯幅が低い値となったと考えられる。

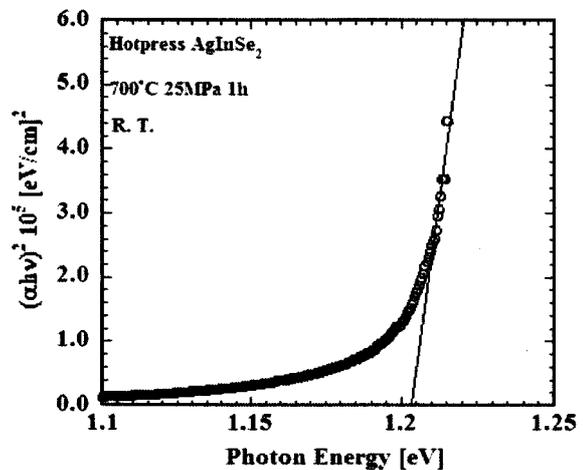


Fig. 5 Relationship between $h\nu$ and $(\alpha h\nu)^2$.

4. まとめ

粉末二元系材料 Ag_2Se 、 In_2Se_3 を用いて、ホットプレス法により、 AgInSe_2 バルク結晶の作成を試みた。圧力25 MPa、成長温度1時間で、成長温度400 °Cから700 °Cと変化させた。

X線回折の結果より、全ての試料で多結晶であった。成長温度400 °Cでは、 AgInSe_2 のピークがわずかに観察されたが、粉末二元材料のピークや AgIn_5Se_8 のピークが顕著に観察された。成長温度増加にしたがって、粉末二元系材料のピークは600 °Cで消え、 AgIn_5Se_8 のピークは650 °Cで消えた。成長温度650、700 °CでICDDカードの AgInSe_2 のピークと一致した。格子定数は、成長温度400~550 °Cで多少のバラつきが見られたが、成長温度600~700 °CでICDDカードのa 軸、c 軸の値に近づいた。粒径サイズは成長温度増加にしたがって増大し、成長温度700°Cで80 nmが得られた。

電子プローブマイクロ分析の結果より、成長温度増加にしたがって、Ag、In、Seの組成比は化学量論的組成比に近づき、成長温度700 °Cのとき、最も近づいた。このとき、わずかにAg-poor、In-poor、Se-richであった。ホール測定、サーモプローブ分析の結果より、n型の伝導型を示したことから、 Se_{Ag} や Se_{In} のドナー性欠陥が考えられる。

比重測定の結果より、成長温度400~650 °CではICDDカードの値よりも小さい値となった。650 °CのXRDスペクトルでは異相が観察されなかったが、比重測定の結果より、異相の存在が考えられる。成長

温度700 °Cのとき、ICDDカードの値に最も近い5.80 g/cm²となり、X線回折の結果を含め、成長温度700 °CでAgInSe₂の単相が得られた。

ホール測定の結果より、成長温度増加にしたがって、抵抗率は増加、キャリア濃度は減少、移動度は増加傾向を示した。X線回折スペクトルより成長温度増加にしたがって、異相が減少していることから、欠陥が減少し、結晶性が良くなったことが考えられる。XRDの結果より単相が得られた成長温度700 °Cのとき、抵抗率は0.16 Ωcm、キャリア濃度は7.6×10¹⁶ cm⁻³、移動度は73 cm²/Vsを得た。

透過率測定の結果より、XRDの結果から単相が得られた成長温度700 °Cの試料における禁制帯幅を見積もった結果、禁制帯幅は1.204 eVを得た。

引用文献

- 1) 山本 信行：新しい機能性半導体材料をめざして(アイビーシー出版部、1989)。
- 2) M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog.
- 3) Photovolt: Res. Appl. **13** (2005) 209.
- 4) K. Yamada, N. Hoshino and T. Nakada, Sci. Technol. Advanced. Mater. **7** (2006) 42.
- 5) S. M. Patel and A. D. Patel, Mater. Lett. **2** (1983) 127.
- 5) P. Paul Ramesh, O. Md. Hussain, S. Uthanna, B. Srinivasulu Naidu and P. Jayarama Reddy, Mater. Lett. **34** (1998) 217.
- 6) H. Mustafa, D. Hunter, A. K. Pradham, U. N. Roy, Y. Cui and A. Burger, Thin Solid Films **515** (2007) 7001.
- 7) H. Matsuo, K. Yoshino and T. Ikari, Phys. Stat. Sol. (c) **3** (2006) 2644.
- 8) S. Ozaki and S. Adachi, J. Appl. Phys. **100** (2006) 113526.
- 9) I. V. Bodnar, Inorg. Mater. **40** (2004) 914.
- 10) K. Yoshino, N. Mitani, M. Sugiyama, S. F. Chichibu, H. Komaki and T. Ikari, Physica B **302-303** (2001) 349.
- 11) K. Yoshino, H. Komaki, K. Itani, S. F. Chichibu, Y. Akaki and T. Ikari, J. Cryst. Growth **236** (2002) 257.
- 12) A. Kinoshita, H. Matsuo, K. Yoshino, T. Ikari and K. Kakimoto, Phys. Stat. Sol. (c) **3** (2006) 2093.
- 13) K. Yoshino, H. Komaki, T. Kakeno, Y. Akaki and T. Ikari, J. Phys. Chem. Solid. **64** (2003) 1839.
- 14) H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki and T. Ikari, J. Cryst. Growth **236** (2002) 253.
- 15) ICDD No. 00-035-1099.
- 16) ICDD No. 00-024-1041.
- 17) ICDD No. 00-034-0455.
- 18) ICDD No. 00-036-1397.
- 19) Otfried Madelung 編：Semiconductors-Basic Data (Springer).
- 20) 国立天文台 編：理科年表 (丸善、1999)。
- 21) J. L. Shay, B. Tell, H. M. Kasper and L. M. Schiavone, Phys. Rev. B **7** (1973) 4485.
- 22) 粉体工学会 編：粉体工学便覧 第2版 (日刊工業新聞、1998)。
- 23) 権田俊一：分子線エピタキシー p. p. 15-16 (培風館、1994)。
- 24) M. C. Santhosh Kumar and B. Pradeep, Vacuum **72** (2004) 369.
- 25) 権田 俊一監修：薄膜作製応用ハンドブック (株式会社エヌ・ティー・エス、2003)。
- 26) J. G. Albornoz, R. Sena and M. León, J. Appl. Phys. **97** (2005) 103515.
- 27) A. El-Korashy, M. A. Abdel-Rahim and H. El-Zahed, Thin Solid Films **338** (1999) 207.
- 28) A. H. Ammar, A. M. Farid and M. A. M. Seyam, Vacuum **66** (2002) 27.

(共同研究)

大振幅内部孤立波の二次元相互作用の研究

研究代表者 鹿児島大学工学部 柿沼太郎

研究の目的

最近、辻・及川らは二層流体における有限小振幅モデルを用いて孤立波の二次元相互作用の数値的研究を行い、浅水波の場合と同じように、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こりうることを示した。しかし、その結果を得るために用いたモデルが微小振幅の仮定の下に導かれたものであるから、振幅の大きな孤立波の相互作用の場合でもそのような結果が得られるかどうかはわからない。その計算を行うにあたっては、二層流体における界面の3次元的運動を精度よくかつ効率よく追跡できる計算法が必要である。この目的に対して、最近、柿沼が開発した変分法に基づく方法が非常に有効であるように思われる。そこで、柿沼グループと辻・及川のグループで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。

計算法と成果の概要

この計算法では非圧縮、非粘性の多層流体における渦なし運動に対する基礎方程式系を変分原理に書き換え、それぞれの層における速度ポテンシャルを鉛直座標 (z とする) の適当な関数系で展開し、それを変分原理に代入し、解くべき方程式系から z 座標を消去する。 z の関数系を適切に選んで、展開項を十分とれば、厳密な方程式にいくらでも近くなる。

われわれが扱う上下を水平な剛体壁で挟まれた二層流体 (密度は上層で ρ_1 、下層 ρ_2 、静止状態での厚さは上層で h_1 、下層で h_2) に対しては、上層および下層の速度ポテンシャル ϕ_1 および ϕ_2 を関数系 $\{Z_{m,\alpha}(z), \alpha = 0, 1, \dots\}$ を用いて

$$\phi_m(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} Z_{m,\alpha}(z) f_{m,\alpha}(\mathbf{x}, t) \equiv Z_{m,\alpha} f_{m,\alpha}, \quad (m = 1, 2) \quad (1)$$

と展開すると、上層に対して

$$Z_{1,\alpha}^\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\int_0^\eta Z_{1,\alpha} Z_{1,\beta} \nabla f_{1,\beta} \right) - \int_0^\eta \frac{Z_{1,\alpha}}{\partial z} \frac{Z_{1,\beta}}{\partial z} dz f_{1,\beta} = 0, \quad (2)$$

$$Z_{1,\beta}^\eta \frac{\partial f_{1,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_{1,\beta}^\eta Z_{1,\gamma}^\eta \nabla f_{1,\beta} \cdot \nabla f_{1,\gamma} + \frac{1}{2} \frac{Z_{1,\beta}^\eta}{\partial z} \frac{Z_{1,\gamma}^\eta}{\partial z} f_{1,\beta} f_{1,\gamma} + g\eta + \frac{p_1}{\rho_1} = 0. \quad (3)$$

下層に対して

$$Z_{2,\alpha}^\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\int_{-(h_1+h_2)}^\eta Z_{2,\alpha} Z_{2,\beta} \nabla f_{2,\beta} \right) - \int_{-(h_1+h_2)}^\eta \frac{Z_{2,\alpha}}{\partial z} \frac{Z_{2,\beta}}{\partial z} dz f_{2,\beta} = 0, \quad (4)$$

$$Z_{2,\beta}^\eta \frac{\partial f_{2,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_{2,\beta}^\eta Z_{2,\gamma}^\eta \nabla f_{1,\beta} \cdot \nabla f_{1,\gamma} + \frac{1}{2} \frac{Z_{2,\beta}^\eta}{\partial z} \frac{Z_{2,\gamma}^\eta}{\partial z} f_{2,\beta} f_{2,\gamma} + g\eta + \frac{p_1 + (\rho_2 - \rho_1)gh_1}{\rho_2} = 0. \quad (5)$$

を得る。 $\alpha = 0, 1, \dots, N-1$ であって、 β, γ については和をとっている。また、 $z = \eta(\mathbf{x}, t)$ は界面を、 p_1 は界面における圧力を表し、上側境界面は $z = 0$ 、下側境界面は $z = -(h_1 + h_2)$ である。さらに、 $Z_{m,\alpha}^\eta = Z_{m,\alpha}|_{z=\eta}$ 、 $\partial Z_{m,\alpha}^\eta / \partial z = \partial Z_{m,\alpha} / \partial z|_{z=\eta}$ である。

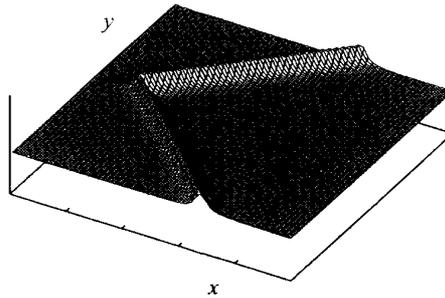


図 1: 初期条件のイメージ

われわれの目標は、図 1 のように孤立波を V 字型にセットした初期値からスタートしたとき、相互作用がどのように起こるかということであるが、この計算を行うためには以下のような課題がある：

1. $Z_{m,\alpha}(z)$ の選択.
2. 孤立波の 1 次元伝播を精度よく計算できるスキームを開発.
3. 1 次元（深さ方向を含めると 2 次元）の有限振幅の孤立波解とそれに伴う流れの計算法.
4. 2 次元（深さ方向を含めると 3 次元）スキームの開発.

課題 1 に対して： $Z_{m,\alpha}(z)$ は出来るだけ少ない個数の展開でよい結果が得られるように選ぶ必要がある。全層の深さが孤立波の水平スケールに比べて浅いときには、 $Z_{m,\alpha}(z)$ は z のベキ関数から作られる系でよいであろう。これはすでにいくつかの例で実証済みである。しかし、全層の深さが深い場合には、今後検討を要する。

課題 2 に対して：1 次元伝播でも fully nonlinear な非定常計算はまだそれほど多くはない。それ自体この方法を用いて研究できることがたくさんある。今年度の成果の 1 つは、この方法を用いたスキームで、ステップ状の初期値からの孤立波の形成過程を調べ、このスキームの有効性を示すとともに、 $N = 3$ で十分よい結果が得られることを示したことである。この結果は現在 Int. J. Numer. Meth. Fluids に投稿中である。

課題 3 に対して：これについてはかなり大きな振幅まで、摂動法による解析解が利用出来る。また、数値計算による方法は積分方程式を利用した方法など様々ある。 $Z_{m,\alpha}$ を定めた時の上記の方程式 (2) から (5) の孤立波解を求めるのも 1 つの方法である。

課題 4 に対して：これについては今年度上記の方法を用いた差分スキームで簡単な 2 次元問題の例題を解くことが出来た。しかし、差分法がよいのか、辻らが使ってきたスペクトル法がよいのかの具体的な検討は今後の課題である。

研究組織

- 研究代表者 柿沼太郎（鹿児島大学工学部）
 研究協力者 中山恵介（北見工業大学工学部）
 研究協力者 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）

太陽電池用高品質多結晶シリコンの結晶成長および結晶評価に関する研究

豊田工業大学 半導体研究室 大下祥雄

目的

太陽電池の生産量はここ数年約30%の伸び率を維持している。市場に出ている太陽電池のうち、約90%が結晶系太陽電池であり、中でも多結晶シリコンの占める割合は全体の60%を超えている(図1)。しかし、現在量産されている多結晶シリコン太陽電池の変換効率は未だ16%程度と低い。従来、多結晶シリコン太陽電池の変換効率が低い理由としては、多結晶の粒径が小さく、光により生成された少数キャリアの多くが粒界で再結合するためであるとされてきた。そのため、多結晶シリコンの粒径を大きくすることが、変換効率を向上させるために必要不可欠であるとして研究開発が進められてきた。

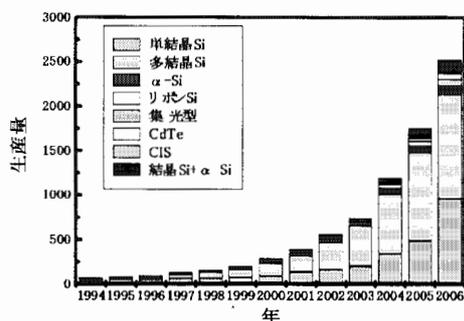


図1 太陽電池生産量の内訳

しかし、少数キャリアの拡散長を超える粒径が実現したにもかかわらず、期待されるほどの変換効率が得られていない。十分に大きな粒径を有する多結晶シリコン太陽電池の変換効率が依然低い理由は、粒界近傍に存在する結晶欠陥と結晶中に残留する金属原子、さらには酸素や炭素からなる複合欠陥が再結合中心として働いているためであると考えられる。

一方、太陽電池市場の拡大にともない、従来よりも鉄などの不純物を多く含む原料を使用する必要性が高くなってきた。それゆえ、先の不純物に起因する問題はより深刻なものとなっている。本研究では、低品位なシリコン原料を用いているにもかかわらず、再結合中心の少ない多結晶シリコンを成長させ、高い変換効率を有する多結晶シリコン太陽電池

を実現することを目的とする。

以上に述べたような状況において、資源量や信頼性などの観点から、結晶シリコン太陽電池に関する研究開発は以前にまして重要となっている。これに対し我々は、九州大学柿本研究室の協力のもと、シリコン結晶成長技術やパッシベーション技術などに関する研究開発を進めている。本報告では、今年度の成果の一部を紹介する。

成果

多結晶シリコン太陽電池の特性向上を目指して、豊田工業大学においては、精密な温度制御が可能で、結晶成長中の坩堝の回転が可能な新たなキャスト成長炉の開発を進めている(図2)。本装置は、従来の1ゾーンヒーターではなく、坩堝側面の2ゾーンヒーターに加えて、坩堝上部および下部に半径方向の温度勾配を制御するためのヒーターを配置してある。なお、使用可能な坩堝のサイズは、円筒型の坩堝で最大直径150mm、角型で1辺100mmである。本結晶成長炉に対して、結晶成長中のシリコン融液温度分布などを九州大学柿本教授が開発したシミュレーターを用いて予測すると共に、実際に結晶成長を行い各種実験を進めている。

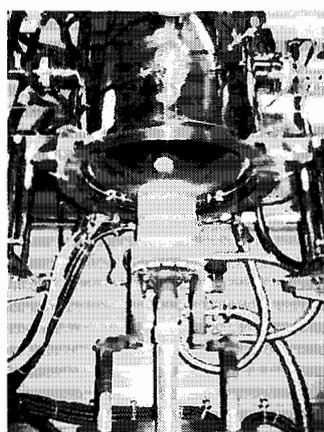


図2 キャスト炉

従来の研究により、Secco エッチングなどにより現れるエッチピットの数と平均的な少数キャリア寿命との間には強い相関が存在することが示されている

る。本結果は、現在では結晶粒内の欠陥でのキャリア再結合が変換効率の低下の主な原因となっていることを意味する。すなわち、多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、欠陥構造の解析や欠陥形成機構を明らかにし、それら欠陥密度を低減させることが必要不可欠な状況にある。

エッチピットとして現れる欠陥をTEMにより観察した結果、マイクロツイン、マイクロツインに挟まれた領域に存在する転位、それら転位の集合体、多くの欠陥が集まった非晶質に近い領域などが観測された。詳細な構造に関しては現在解析中であるが、酸素析出において形成される欠陥構造に類似する部分もあり、結晶成長中に発生した微少な析出物がそれら欠陥の生成原因である可能性が高い。特に、結晶成長速度が速い場合において、成長の後半で欠陥を多く含む微少結晶粒が形成される。その領域では、SiCならびにSiNが多く析出する。

シリコン融液中の炭素が欠陥形成に関与している可能性を確かめるため、シリコン結晶中の格子位置に存在する炭素濃度をFTIR測定により求めた(図4)。これら格子位置炭素の状態ならびに量は、格子間炭素の振動に対応する信号 607cm^{-1} における吸収として求めた。図は、キャスト法においてヒーター移動速度を変えて成長させた多結晶シリコン中のインゴット底部から上部にかけての格子位置炭素濃度である。炭素濃度は、インゴット底部から濃度が上昇しその後一定となる。炭素濃度が一定となった領域では、結晶中の炭素濃度は固溶限に達している。炭素の偏析係数は0.07であるため、結晶成長にともないシリコン融液中の炭素濃度は上昇する。それゆえ、固液界面近傍の融液側において偏析により濃度が上昇した炭素が、熱的な過冷却に加えて、固液界面近傍において組成的な過冷却を引き起こすことが予想される。そ

の結果、固液界面近傍の融液中でSiCの析出が生じ欠陥が発生した可能性が高い。離型材シリコン窒素が原因と考えられるシリコン融液中の窒素に関して、結晶成長初期においてシリコン融液中に多く含まれ、かつ偏析係数が小さいことから、炭素と同様な理由によりSiNが析出したと考えられる。

上記炭素濃度を低減させることを目的として、結晶成長中の坩堝を回転しシリコン融液を強制的に対流させるACRT法を採用することにより、炭素濃度が均一に分布することを数値シミュレーションにより予測した。実際にACRT法により結晶成長した結果、ACRT法で成長したインゴットでは、通常のインゴットに比べて炭素濃度が低く抑制されていることが判る。また炭素濃度の均一性もACRT法のインゴットの方が高い結果が得られた(図5)。

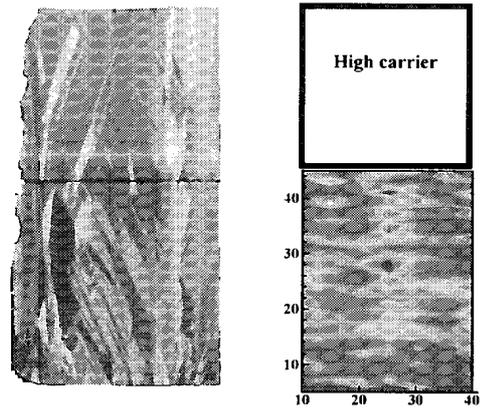


図4 ACRT法により成長させた結晶

謝辞

本共同利用研究の機会を与えて頂きました九州大学応用力学研究所ならびに、共同研究を通じてご指導頂きました柿本教授に深く感謝いたします。

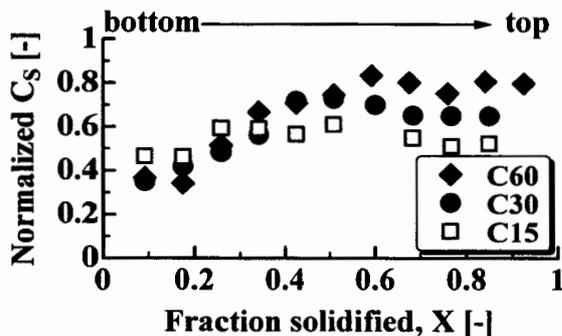


図3 結晶中の格子位置炭素濃度

アンチローリングタンクを用いたパラメトリック横揺れ防止に関する研究

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 橋本博公

研究目的

近年、海上物流量の増加に伴い輸送効率追求の船型改良が目覚しいが、その結果としてコンテナ船や自動車運搬船においてパラメトリック横揺れという深刻な横揺れ現象が報告されるようになってきている。パラメトリック横揺れの検討は国際海事機関 (IMO) や国際試験水槽委員会 (ITTC) でも急務の課題とされており、その防止の検討が強く望まれている。パラメトリック横揺れの発生を抑えるためには、タンク内水の位相差を利用して減揺効果を得るアンチローリングタンクの装備が有効であるが、その効果を定量的に推定するには制限水路内の大変形流動を取り扱うことのできる計算手法が必要となる。

本研究では、応用力学研究所界面動力学分野で開発されてきた界面の分裂や合体などまで取り扱い可能な粒子法 (MPS 法) を用いたアンチローリングタンク単独での性能評価と、大阪大学が開発してきたパラメトリック横揺れ予測のための非線形船体運動数値シミュレーションを組み合わせることで、パラメトリック横揺れ防止装置としてのアンチローリングタンクの設計・性能評価手法の確立を目指す。

邪魔板付きアンチローリングタンクの自由振動試験

はじめに、MPS 法を用いたアンチローリングタンク単独性能の推定精度を検証するために、タンク両舷をつなぐダクトの高さを水の移動周期が船体横揺れ固有周期に合致する 7.5mm に設定し、実際のアンチローリングタンクに採用されている造渦促進用の 2 次元邪魔板を各ウィングタンクの底面に取り付けられた状態にて、タンク左右舷に強制的に水位差を与えた後に開放する自由振動試験を実施した。邪魔板の高さ 2 種類、取り付け位置 2 種類の合計 4 パターンで実験を行った結果、高い邪魔板をダクト側に寄せた場合に最も大きな減衰効果が得られた。

アンチローリングタンクはタンク水の移動周期を船体の横揺れ周期に一致させることで最大の効果が得られるため、タンク水の移動周期の推定が不可欠である。また、摩擦や造渦によってタンク水の運動エネルギーを散逸させる減衰力の推定がパラメトリック横揺れ防止効果の推定には重要となり、従来はこれらの推定にタンクの模型試験が用いられてきた。本研究ではこの模型試験の代替として、MPS 法を用いた数値実験の可能性を検討した。MPS 法を用いたアンチローリングタンクの自由振動試験の再現については、研究協力者である九州大学応用力学研究所界面動力学分野の末吉が担当し、タンクの自由振動試験の手順に倣って、強制的にタンク両舷に水位差を与える粒子配列を初期状態とした数値計算を実施した。その結果、粒子間距離を 0.5mm (総粒子数 約 50000) に設定することで、邪魔板の高さや取り付け位置に関わらず、タンク水の移動周期および減衰力を実用的な精度で推定できることを確認した。

邪魔板付きアンチローリングタンク装備コンテナ船の自由航走模型実験

アンチローリングタンク模型を最新の 6600TEU ポストパナマックスコンテナ模型船のデッキ上に搭載し、タンク非装備、邪魔板非装備、邪魔板の組み合わせ 4 種類の計 6 種類について、弾性ロープで曳航する模擬自由航走模型実験を実施し、波長船長比 1.0、波高波長比 0.03 の規則向波、追波中でのパラメトリック横揺れ観測実験を行った。タンクに水を入れると自由水影響によりメタセンター高さが多少変化するので、バラストウェイトを調整してメタセンター高さを同一にした。実験結果より、造渦効果を高める邪魔板を装備することでタンク単独での減衰効果は向上するが、タンク水の最大傾斜角が抑えられるため、逆にパラメトリック横揺れの最大振幅は増大することが確認された。

タンク模型試験および MPS 法による数値実験から得たタンク単独での減衰力を用いて、船体横揺れ運動とタンク水の振動運動を連成させて解くアンチローリングタンク装備船の船体運動予測シミュレーションを各邪魔板について実施した。その結果、邪魔板を有する場合でもアンチローリングタンクのパラメトリック横揺れ防止・減揺効果の精度良い推定が可能であり、邪魔板の装備が最大横揺れ振幅を増大させる実験結果を再現することができた。(Fig.1)

まとめと今後の課題

MPS 法を援用したアンチローリングタンク装備船のパラメトリック横揺れ推定手法を構築し、造渦効果促進用の邪魔板を装備した場合においても、自由航走模型実験にて観測されたアンチローリングタンクによるパラメトリック横揺れ防止効果を推定可能であることを示した。これにより、模型実験を全く必要としないパラメトリック横揺れ防止のためのアンチローリングタンク設計の道が開かれたといえる。また、パラメトリック横揺れ防止装置として最大のパフォーマンスを得るために、タンク単独での減衰力を抑えたタンク形状の検討が今後の課題となる。

成果報告

橋本博公, 末吉誠, 峯垣庄平, 「パラメトリック横揺れ防止装置としてのアンチローリングタンクの性能推定」, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号, 2007, pp. 305-311

Hashimoto, H. et al. "An Application of CFD to Recent Ship Stability Problems", Proceedings of the 10th International Ship Stability Workshop, 2008, in press.

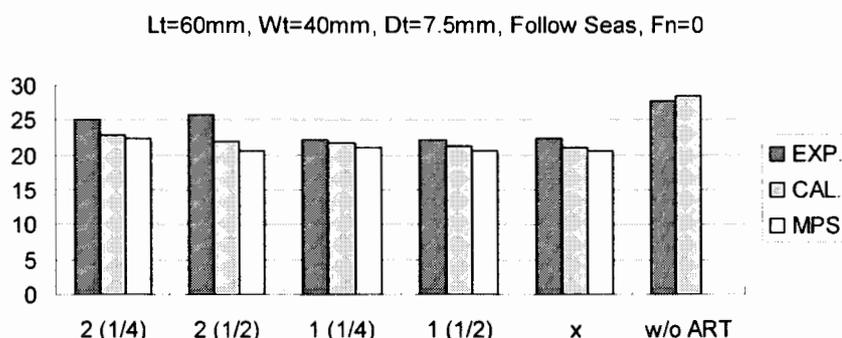


Fig.1 Comparison of maximum roll amplitude of parametric roll

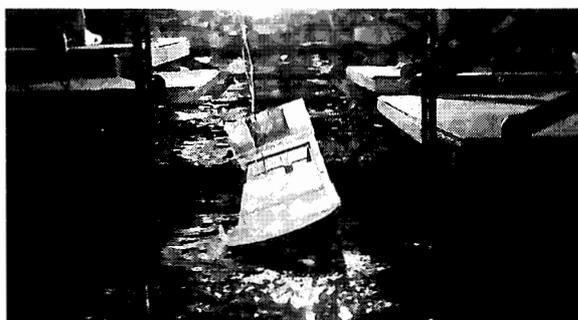


Fig.2 Parametric rolling observation

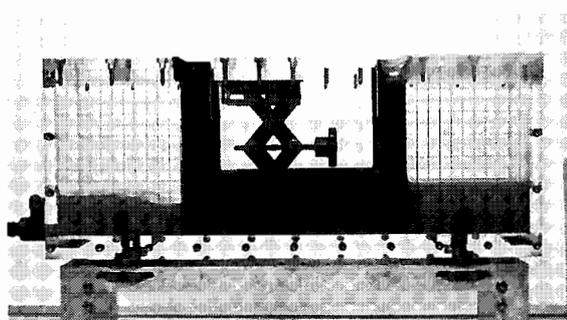


Fig.3 Free oscillation test

デジタル画像相関法を用いた咬合時における歯周組織の変形解析

福岡県工業技術センター 内野 正和

1. 背景と目的

咬合時における歯周組織、すなわち歯牙、歯根膜、歯槽骨（顎骨）の変位・変形挙動の解明は、矯正や歯周病の原因究明の観点から歯科医学分野において重要な研究課題の一つである。したがって、以前より様々な見地からそれに関する研究が行われており、計測手法も多様に開発されている。しかしながら計測装置の空間的制約などにより、歯周組織の局所的な変位量・ひずみである一点計測しか行えていない。したがって現状では、この一点計測による変位情報とロードセルによる荷重情報から荷重-変位曲線を構成し、咬合時における歯周組織の変位・変形挙動を推測しているに過ぎない。以前の研究により、歯周組織の荷重-変位曲線は咬合の初期段階で変位が急激に増加し、その後、荷重が急激に増加するという二相性が指摘されている^{(1),(2)}。しかし、その特徴を変位・変形分布と関連付けた研究はない。

そこで本研究では、咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに、デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形挙動の可視化を試み、荷重-変位曲線と変位・変形分布の関連付けを試みた。

2. 実験方法

2.1 デジタル画像相関法 デジタル画像相関法は、被測定物表面の固有に存在するパターン、あるいはスプレー塗料などの噴霧により意図的に作成したランダムパターンを利用する計測法である。被測定物の変位前後を CCD カメラなどで撮影し、得られた変位前後のデジタル画像の輝度値分布を比較することにより、被測定物表面全体の変位ベクトルを計測することが可能な方法である。変位量と変位方向は変位前の画像中の任意の位置を中心とする小さい画素領域（サブセット： $N \times N$ 画素）を基準として、変位後の画像より最も相関の良い画素領域を求め、その中心を変位後の移動位置とする。相関値 C_R を求める方法として使用した残差最小法の式を以下に示す。

$$C_R(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_s(X+i, Y+j)| \quad (1)$$

ここで、 $I_s(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変位前後の画像光強度を示し、 X, Y はサブセットの中心座標、 u, v はそれぞれ x, y 方向への移動量である。また、 $N = 2M+1$ である。式(1)の総和が最小になる位置がそのサブセットの中心が移動した位置の最近接画素となる。しかしながら式(1)により得られた画素の位置が、必ずしも最も高い相関値を得るとは限らない。すなわち、実際の移動量は画素の整数倍とはならないため、画素間に相関のピークが存在することが一般的である。そのため画素間の補間を行う必要があり、それを考慮した相互相関法の式を次に示す。

$$C_d(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times I_s(X+i, Y+j)}{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \right) \times \left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_s(X+i, Y+j) \right)} \quad (2)$$

補間方法は、最近接画素の前後の画素で式(2)より得られた相関値を用いて二次曲線近似による補間を行い、二次曲線の極大値を最も相関の良い位置とした。式(2)は式(1)に比べて計算に時間がかかる反面、画素間を補間する場合にはさらに良い相関が得られる利点をもつ。

2.2 試験片 可及的に生体に近い状態を実現するため、二～三日前に食肉用としてと畜されたブタの頭蓋骨を使用した。頭蓋骨から下顎骨を分離し、低速精密切断機（BUEHLER 社製 ISOMET）を用いて、後臼歯・歯根膜・歯槽骨からなる厚さ 2 mm の試験片を作製した。試験片の一例を図 1 に示す。後臼歯と歯槽骨は、歯根全域で厚さ数十～数百 μm の歯根膜と呼ばれる線維性結合組織により接着されている。なお切り出した試験片は、咬合試験を行う直前まで生理食塩水に浸け、乾燥を防いだ。

2.3 実験手順 咬合機能を模擬した圧縮試験に関しては、Gathercole⁽³⁾の手法に倣ったが、デジタル画像相関法を適用するため下記の手順で行った。(i) 生理食塩水から試験片を取り出し、表面の水分をデジタル画像相関法に用いるスプレー塗料が塗布できる程度に乾燥させる。(ii) スプレー塗料の噴霧により試験片表面にランダムパターンを形成する。(iii) 試験片の髓腔周辺の顎骨をバイスにより固定し（図 1 の破線 A）、小型卓上試験機（島津製作所製 EZ Test）に設置する。(iv) 歯冠上端（図 1 の点 B）に圧縮荷重を付与する。(v) CCD カメラにより変位画像を撮影する。

これまでの研究により単一の後臼歯に作用する咬合荷重は明らかになっているが、今回のような薄片の後臼歯試験片に作用する実際の咬合荷重は不明である。したがって本研究では、試験機による強制変位を付与することにより咬合荷重

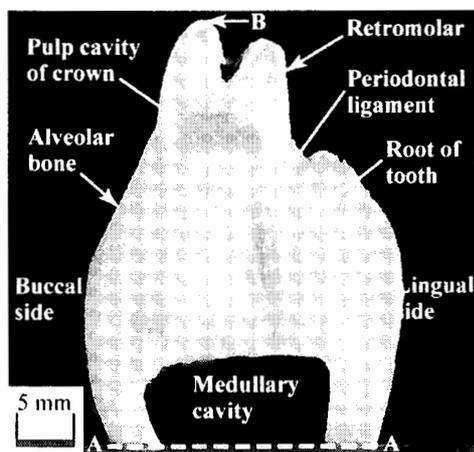


Fig. 1 Periodontium structure.

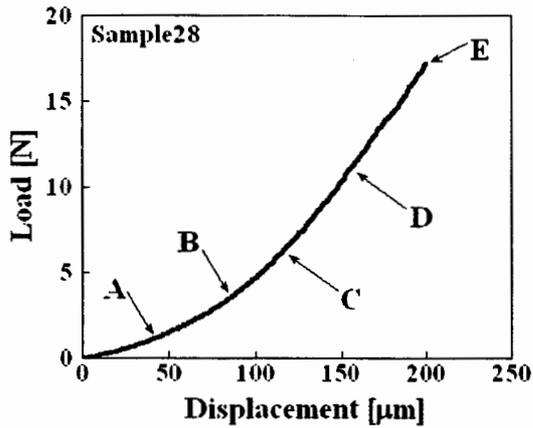


Fig. 2 Load-displacement curve.

を负荷した。その最大押し込み量は 200 μm とし、20 μm ごとに画像を取得した。

3. 実験結果

咬合試験により得られた荷重-変位曲線の一例を図 2 に示す。横軸が強制変位の値、縦軸がその時の荷重を表している。約 100 μm 程度までは荷重が緩やかに増加しているのに対し、それ以降は荷重が急激に増加しており、まえがきで述べた荷重-変位曲線の二相性が実験でも得られていることがわかる。

図 2 に示す点 A~E における変位分布を図 3 および図 4 に示す。図 3 は歯軸方向である y 方向の変位分布を示しており、白色になるほど下方向の変位分布が大きいことを意味する。また図 4 は x 方向の変位分布を示しており、白色になるほど右方向の変位分布が大きいことを意味する。まず歯軸方向である y 方向に注目する。白黒印刷の関係により図 3 からでは若干わかりにくいかもしれないが、(a)~(b) に示す 80 μm 程度までは後臼歯のみ変位しているのに対し、(c)~(e) と押し込み量が増加するにつれ、歯槽骨が変形していることがわかる。すなわち咬合の初期段階では、歯槽骨と歯根膜の間に介在する歯根膜が大きく変形することにより、変位のみが大きく増加している。一方、次の咬合段階では、歯槽骨が変形することにより、荷重が急激に増加することがわかる。

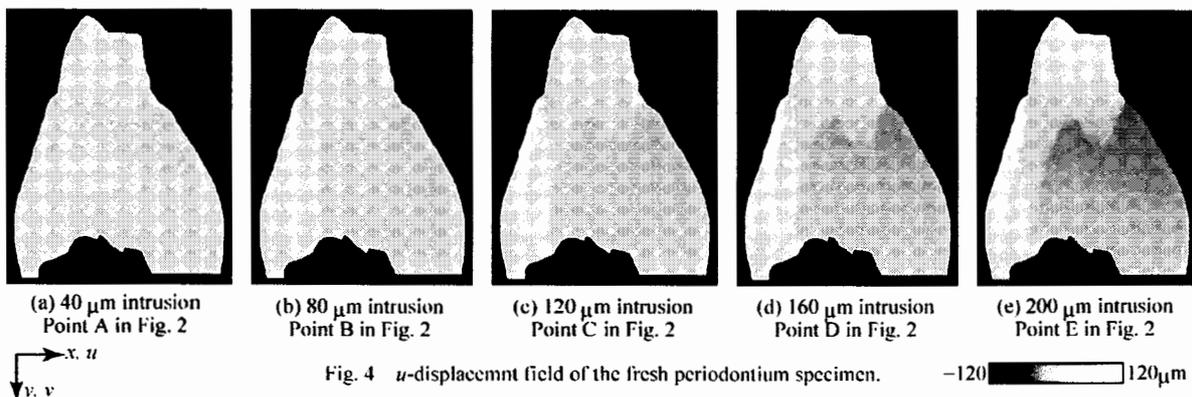
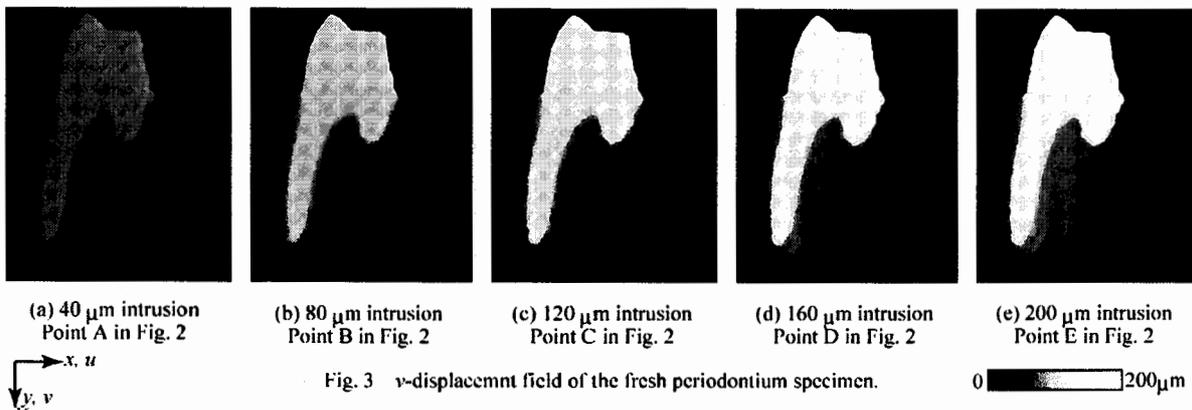
また、図 4 に示す x 方向の変位分布では、咬合が進行するにつれ、頬側の歯槽骨が大きく後臼歯の方向に変位していることを示している。これは、咬合による後臼歯の大きな変位により、歯槽骨と後臼歯の間に大きな間隙が開かないよう歯根膜が歯槽骨を引っ張っていると推測できる。

4. まとめ

咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに、デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形挙動を可視化し、荷重-変位曲線と歯周組織の変位・変形挙動の関連付けた。

参考文献

- (1) Parfitt G.J., *J. Dent. Res.*, 39-3, (1960), 608-618.
- (2) Berkovitz, B.K.B, Moxham B.J. and Newman H.N., *The Periodontal Ligament in Health and Disease 2nd Edition*, (1995), 215-241, Mosby-Wolfe.
- (3) Gathercole L.J., *Archs. Oral Biol.*, 32-4, (1987), 249-255.



高速船の非定常船尾流に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

高速船は一般商船と比べて、船の波の中での性能、すなわち設計時の耐航性能の推定が非常に重要となる特殊な船舶である。加えて船尾が打ち切られたトランザム船尾という特殊な形状を有するものがほとんどであり、その流体力学的な扱い方については今日でもなお探究すべき部分が多く残されている。昨年の共同利用研究(特定研究1)において、そのトランザム船尾を有する高速船の耐航性能理論推定法について研究を行い、トランザム船尾の取り扱い方として一つの方法を提案した。また、流体力や船体運動レベルでの水槽試験との比較を通じて、その方法が実用上妥当性のあることを確認している。本研究では、こうした背景をベースに、その方法の波形レベルでの検証を行うことを目的としている。

2. 研究方法

トランザム船尾を有する高速船の2m 供試模型を製作し、波形解析法にて定常波および非定常波の計測を行う。それらの結果と、先に提案した計算法による数値計算結果とを比較し、提案する方法がどの程度船尾流を捕捉できているのかについて考察を行う。

2m 供試模型は広島大学にて製作し、波形計測および解析は応用力学研究所深海機器力学実験水槽において研究所所有の装置、解析ツールを用いて行う。対応する数値計算は広島大学で行い、定常波、非定常波の cos 成分、sin 成分等に関して計測結果と比較検討する。

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
笹重 修平	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
黒川 桂介	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
沖野 健司	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
川瀬 靖彦	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
山下 芳郎	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
柏木 正	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究成果報告

添付原著論文をまとめ、日本船舶海洋工学会論文集へ投稿中である。

5. 研究結果

添付原著論文に全ての研究結果を取りまとめてあるので、具体的な結果については添付原著論文をもってこれに替えることとする。

Seakeeping Estimations of Fast Ships with Transom Stern

by Muniyandy Elangovan*, *Student member* Hidetsugu Iwashita*, *Member*
Hiroyuki Saito**, *Member* Akio Ito**, *Member*

Summary

An estimation method of the seakeeping of fast ships with transom stern is proposed and validated through the comparison with experimental results. The method is based on the potential theory and the Rankine panel method is employed as a numerical computation method. A transom stern is carefully observed in the experiments and it is confirmed that the transom stern is completely dry even in free motion in waves. A condition corresponding to the observation is derived and imposed as the boundary condition at the free-surface just behind the stern.

Numerical results are compared with experiments from the aspects of hydrodynamic forces, ship motions and unsteady waves around the ship. Through the comparisons, the adequacy of the transom stern condition proposed in the present study and also the significant influence of the sinkage and trim in the seakeeping estimations are confirmed.

1. Introduction

In the design of fast ships, the the estimation of the seakeeping qualities is important and must be evaluated from the early stage of the design. This is because the encounter frequency relatively increases due to the high forward-speed and this leads to the large acceleration induced by the ship motions and large wave pressures acting on the hull. Additionally, the nonlinear phenomena such as impact pressure caused by the slamming, bow wave breaking et al. become remarkable compared with conventional ships. The forward speed effect becomes also remarkable and negligible that is an effect from the steady wave field to the unsteady wave field and can be captured even within the framework of the linear and/or quasi-linear seakeeping theories.

Notwithstanding such unconventional properties of fast ships, the strip theory has been broadly applied to their seakeeping estimations from the practical point of view. Recently, application of the three dimensional methods to the fast ships has been also proceeding. The major three dimensional method among them is a frequency-domain Rankine panel method (RPM) based on the potential theory¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾. The time-domain RPM⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ that makes the nonlinear calculation possible is also attempted, but not yet major from the aspect of the computational cost. Most of the fast ships have the transom

stern and the wave field around the stern is also nonlinear in a sense. When we apply the potential theory to this problem, we therefore need to introduce some appropriate flow model to force the potential flow to be practical flow. The treatment can be recognized as a Kutta condition in the wing theory. This kind of modeling is not related in detail in the most of the literatures and also have not been validated sufficiently.

In this paper, we carried out two experiments for measuring hydrodynamic forces and for measuring ship motions. The unsteady wave fields are also measured in the former experiment on behalf of the pressure measurement on the hull surface. In two experiments, we observe the flow around the transom stern and a corresponding condition is derived as a transom stern condition. Consecutively we carry out numerical calculations and the results are compared with experiments to validate the proposed condition and numerical method.

2. Formulation

2.1 Boundary conditions

We consider a ship advancing at constant forward speed U in oblique regular waves encountered at angle χ , Fig.1. The ship motion $\xi_j e^{i\omega_e t}$ ($j = 1 \sim 6$)

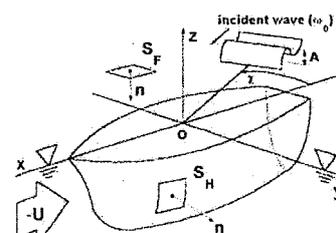


Fig. 1 Coordinate system

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University

** IHI Corporation

A of the incident wave are assumed to be small. ω_0 is the circular frequency and K the wave number of the incident wave. The encounter circular frequency is $\omega_e (= \omega_0 - KU \cos \chi)$. The linear theory is employed for this problem assuming ideal (potential) flow.

The velocity potential Ψ governed by Laplace's equation can be expressed as

$$\Psi(x, y, z; t) = U[\Phi(x, y, z) + \varphi(x, y, z)] + \Re[\phi(x, y, z)e^{i\omega_e t}] \quad (1)$$

where

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{gA}{\omega_0}(\phi_0 + \phi_7) + i\omega_e \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j \\ \phi_0 &= ie^{Kz - iK(x \cos \chi + y \sin \chi)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Φ means the double-body flow, φ the steady wave field and ϕ the unsteady wave field. Assuming small disturbance due to the ship, we can linearize the free-surface conditions for φ and ϕ in several forms. In this paper we adopted the following free-surface conditions derived by Yasukawa³⁾ and corresponding body boundary conditions. For φ it becomes

$$\frac{1}{2K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + \frac{1}{K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \varphi) + \frac{1}{2K_0} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_H \quad (4)$$

and for ϕ_j

$$-K_e \phi_j + 2i\tau \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j + \frac{1}{K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) + \frac{1}{2K_0} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla \phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} &= n_j + \frac{U}{i\omega_e} m_j \quad (j = 1 \sim 6) \\ \frac{\partial \phi_7}{\partial n} &= -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \end{aligned} \right. \quad \text{on } S_H \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \mathbf{n}, & (m_1, m_2, m_3) &= -(\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{V}, \\ (n_4, n_5, n_6) &= \mathbf{r} \times \mathbf{n}, & (m_4, m_5, m_6) &= -(\mathbf{n} \cdot \nabla)(\mathbf{r} \times \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\mathbf{V} = \nabla \Phi$, $K_0 = g/U^2$, $K_e = \omega_e^2/g$ and $\tau = U\omega_e/g$. m_j in eq.(6) derived by Timman & Newman¹²⁾ is an influence term from the steady flow to the unsteady flow on the body surface. Eq.(3) coincides with the Dawson's free-surface condition in the steady problem¹³⁾ and eq.(5) is its corresponding form in the unsteady problem.

If we put $\Phi = -x$, $\partial\varphi/\partial n = n_x$ and $\mathbf{V} = \nabla[-x + \varphi]$, the formulation (3) ~ (6) leads to the Neumann-Kelvin formulation.

2.2 Hydrodynamic forces and wave elevations

The steady wave elevation and pressure are evaluated by

$$\frac{\zeta_s}{(1/2K_0)} = [1 - \bar{\nabla} \Phi \cdot \bar{\nabla} \Phi - 2\bar{\nabla} \Phi \cdot \bar{\nabla} \varphi] \quad \text{on } z = 0 \quad (7)$$

$$\frac{p_s - p_0}{\rho(U^2/2)} = [1 - \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - 2\nabla \Phi \cdot \nabla \varphi] \quad \text{on } S_H \quad (8)$$

Integrating the pressure over the wetted surface ($z < 0$), we obtain steady forces and moment as

$$F_j = - \iint_{S_H} (p_s - p_0) n_j dS \quad (j = 1, 3, 5) \quad (9)$$

The unsteady wave elevation $\zeta_i = \Re[\zeta e^{i\omega_e t}]$ and unsteady pressure $\Re[p e^{i\omega_e t}]$ are calculated by

$$\zeta = -\frac{1}{g}(i\omega_e + U\mathbf{V} \cdot \bar{\nabla})\phi \quad \text{on } z = 0 \quad (10)$$

$$p = -\rho(i\omega_e + U\mathbf{V} \cdot \nabla)\phi - \rho \frac{U^2}{2} \sum_{j=1}^6 \xi_j (\beta_j \cdot \nabla)(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) \quad \text{on } S_H \quad (11)$$

$$\text{where } \beta_j = \begin{cases} \mathbf{e}_j & (j = 1, 2, 3) \\ \mathbf{e}_{j-3} \times \mathbf{r} & (j = 4, 5, 6) \end{cases}$$

$\mathbf{e}_j (j = 1, 2, 3)$ are the unit vector in x, y, z axes.

Substituting the radiation potential in eq. (2) into eq. (11), the added mass and damping coefficients acting in i -th direction due to the motion in j -th direction are given by

$$-\frac{A_{ij}}{\rho} + i \frac{B_{ij}}{\rho\omega_e} = \iint_{S_H} \left(1 + \frac{1}{iK_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j n_i dS - \frac{1}{2(K_0\tau)^2} \iint_{S_H} (\beta_j \cdot \nabla)(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) n_i dS \quad (12)$$

The wave exciting forces acting in j -th direction is similarly obtained by substituting the diffraction term in eq. (2) into eq. (11). Putting $\nu = U\omega_0/g$, it becomes

$$\frac{E_j}{\rho g A} = -i \frac{\tau}{\nu} \iint_{S_H} \left(1 + \frac{1}{iK_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) (\phi_0 + \phi_7) n_j dS \quad (13)$$

2.3 Transom stern conditions

For the steady problem that treats the steady translocation of ship in calm water, the modeling of the transom stern flow has been already proposed. Referring the Bertram¹⁴⁾ for instance, the dry transom stern condition is derived as follows. Approximating the basic flow by $\Phi \cong -x$, the steady wave elevation ζ_s at the stern should be equal to the depth z_T of the transom stern. Therefore we obtain the relation from eq.(7) in the form

$$\begin{aligned} \zeta_s &= \frac{1}{2K_0} [1 - \nabla(\Phi + \varphi) \cdot \nabla(\Phi + \varphi)] \\ &\cong \frac{1}{2K_0} [1 - (-1 + \varphi_x)^2] = z_T \end{aligned} \quad (14)$$

Then we easily get

$$\varphi_x = 1 - \sqrt{1 - 2K_0 z_T} \quad \text{at } P = (x_T, y_T, 0) \quad (15)$$

where (x_T, y_T, z_T) shows the coordinate of the transom stern.

For the unsteady problem, we carried out experiments first. Through the observation of the transom stern part in the experiments, we confirmed the following phenomena:

- 1) In the measurement of ship motions, the total waves that consists of steady wave, incident wave, diffraction wave and radiation waves due to surge, heave and pitch motions are smoothly separating away from the dry transom stern.
- 2) In the measurement of the wave forces in which the ship motion is restricted, the total waves that consists of steady wave, incident wave and diffraction wave are also smoothly separating away from the dry transom stern.
- 3) In the measurement of the added mass and damping coefficients in which the forced motions (only heave and pitch) are enforced to the model in the calm water, the total waves that consists of steady wave and heave/pitch radiation wave are also smoothly separating away from the dry transom stern.

For the diffraction problem denoted in phenomenon 2), the corresponding formulation can be obtained as follows. The total unsteady waves that consists of incident wave and diffraction wave are calculated by

$$\zeta = -\frac{1}{g}(i\omega_e + UV \cdot \nabla) \frac{gA}{\omega_0} (\phi_0 + \phi_7) \quad \text{on } z = 0 \quad (16)$$

and this must be zero at the transom stern. Then we obtain the condition

$$\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_7 = -\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_0 = -\frac{\nu}{\tau} \phi_0 \quad \text{at } P = (x_T, y_T, 0) \quad (17)$$

For the radiation problem denoted in phenomenon 3), substituting $\phi = i\omega_e \xi_j \phi_j$ into (10) and expressing the radiation wave due to mode j by ζ_j , we get the radiation wave as

$$\zeta_j = -\frac{(i\omega_e)^2}{g} \xi_j \left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j \quad (18)$$

and this must be equal to z -coordinate of the unsteady displacement at the transom stern due to each mode of the forced motion. The unsteady displacement $\Re[\alpha e^{i\omega_e t}]$ at arbitrary position on the hull is expressed by

$$\boldsymbol{\alpha} = (\xi_1 + z\xi_5 - y\xi_6)\mathbf{i} + (\xi_2 + x\xi_6 - z\xi_4)\mathbf{j} + (\xi_3 + y\xi_4 - x\xi_5)\mathbf{k} \equiv (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z) \quad (19)$$

Considering only z component at transom stern and expressing

$$\alpha_z \Big|_{P=(x_T, y_T, 0)} \equiv \sum_{j=1}^6 \alpha_j \quad (20)$$

where

$$\alpha_3 = \xi_3, \quad \alpha_4 = y_T \xi_4, \quad \alpha_5 = -x_T \xi_5 \\ \alpha_j = 0 \quad (\text{for } j \neq 3, 4, 5)$$

the corresponding condition to phenomenon 3) can be obtained by putting $\zeta_j = \alpha_j$. This condition can be arranged in the form:

$$\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j = \begin{cases} 0 & (j \neq 3, 4, 5) \\ 1/K_e & (j = 3) \\ y_T/K_e & (j = 4) \\ -x_T/K_e & (j = 5) \end{cases} \quad (21)$$

If the conditions (17) and (21) are satisfied at the transom stern, then the phenomenon 1) can be automatically explained. Therefore these conditions give us at least one of the solutions although the solution can not be unique. Other solutions may exist that satisfy eq. (19) without decomposing α_z into each mode when we consider the free ship motions in waves corresponding to phenomenon 1).

3. Numerical method

The RPM applied in this study is a panel shift method developed by Jensen¹⁵⁾ and Ando¹⁶⁾ for the steady problem and extended to the unsteady problem by Bertram¹⁾. The radiation condition is satisfied by shifting the collocation point one panel upward on the free surface. The method has been applied to many ships and its estimation accuracy has been confirmed up to now¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾.

The steady and unsteady potentials, φ and ϕ_j , are both expressed by the source distributions on the body surface S_H and the free surface S_F as follows:

$$\left. \begin{matrix} \varphi(P) \\ \phi_j(P) \end{matrix} \right\} = - \iint_{S_H + S_F} \begin{Bmatrix} \sigma_s(Q) \\ \sigma_j(Q) \end{Bmatrix} G(P, Q) dS \quad (22)$$

where $P = (x, y, z)$ and $Q = (x', y', z')$ show the field point and the source point respectively, and $G(P, Q)$ is defined as

$$G(P, Q) = 1/4\pi r, \quad r = \overline{PQ}$$

The body surface and the free-surface are discretized into the finite number of constant panels, and numerical solutions for steady and unsteady problems are obtained such that a corresponding set of the free-surface condition and the body boundary condition are satisfied at collocation points. The collocation points on S_H coincides with the geometric center of each panel and those on S_F are shifted one panel upward in order to force the radiation condition numerically. This numerical radiation condition is valid only for $\tau > 0.5$ in the unsteady problem where the waves do not propagate to the forward direction of the ship¹⁹⁾.

When we impose the transom stern condition derived in the former section, both the free surface condition and the transom stern condition are imposed at collocation points just behind the transom stern²⁰⁾. Fig.2 shows the conceptual illustration of the method based on the panel shift technique. The panels just behind the transom stern are not necessary when the transom stern condition is not

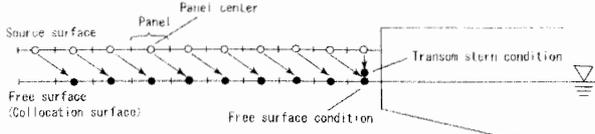


Fig. 2 Panel shift method for the transom stern problem

imposed. Then only the free surface condition is imposed on all the collocation points. When the source surface is shifted in the vertical direction as illustrated in Fig.2, the method is called 'desingularized panel method' and used for solving the fully nonlinear free-surface problem. In the present study, we need not to adopt this vertical shift since our problem is not nonlinear.

4. Experiments

Two experiments were carried out using the towing tank in RIAM, Kyushu University. One experiment is the motion measurement test to measure the ship motions and added resistance in regular head waves. Another one is the forced oscillation test to measure the added mass & damping coefficients and wave exciting forces & moment. The setup of the model and equipments is illustrated in Fig.3, and the perspective view and the principal dimensions of the model are shown in Fig.4 and Table 1 respectively. Values in the parenthesis indicate those of the forced motion test. The hull form is confidential at this moment and we can not denote the details.

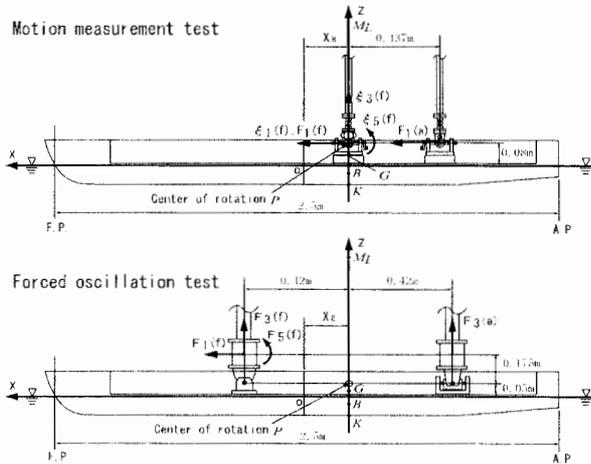


Fig. 3 Setup of the model and equipments

Table 1 Principal dimensions of the model

L_{pp} (m)	2.500	z_G (m)	0.043 (0.020)
B/d	3.000	GM_L (m)	8.584 (8.607)
z_B (m)	-0.024	κ_{yy}/L	0.186 (0.192)

The unsteady wave fields are also measured in the forced oscillation test. They are measured by using the Ohkusu's method²¹⁾ along a longitudinal line of $y/(B/2) = 1.52$ from the center line.

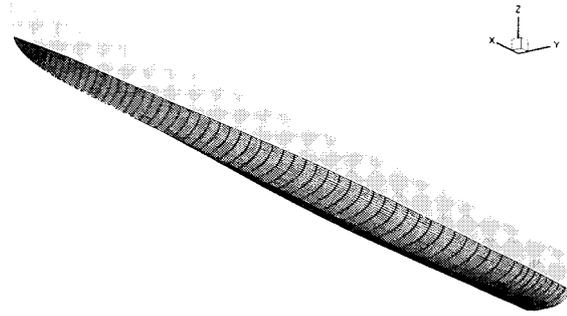


Fig. 4 Perspective view of the model with computation grids

Fig.5 shows a snapshot of the transom stern in the motion measurement test. It is confirmed that the transom stern is completely dry even when the model is freely oscillating in waves. It should be noted that the same phenomenon was also observed in the forced oscillation test.

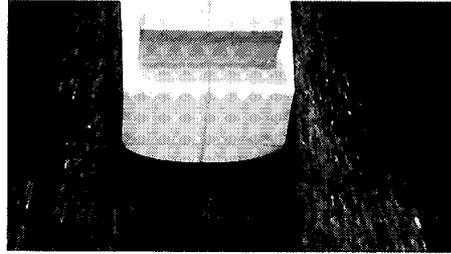


Fig. 5 A snapshot of the transom stern in the motion measurement test

5. Results and discussions

Fig.6 shows the computation grids used in the present calculations. From symmetry, the computation domain can be reduced to the half ($y > 0$). Hull surface is discretized into 1480 panels and the free surface, which consists of two regions, is 3888 panels for the main region and 297 panels for the additional region behind the stern.

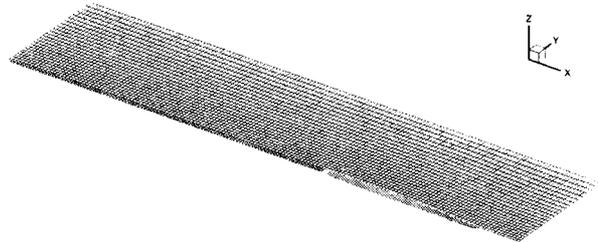


Fig. 6 Computation grids ($N_H = 1480(74 \times 20)$, $N_F = 3888(162 \times 24)$, $N_{FA} = 297(99 \times 3)$)

The region of the free surface is determined so that the disturbed waves by the ship are not truncated in the transverse direction and are captured sufficiently in the longitudinal direction.

5.1 Steady wave field

Fig.7 shows the comparison of the steady wave pattern between experiment and calculation. In both cases the ship motion is restricted in the equilibrium position so that the sinkage and trim are fixed to be zero. The steep diverging wave that is generated around ord. 7 is observed in the experimental wave pattern, but not seen in the computational result. This may be originated in the negrection of the nonlinearity in the present calculation. Nevertheless, the fundamental wave pattern is well predicted including the stern wave.

Fig.8 shows the measured resistance, sinkage and trim in the motion free test. This will be referred later when we calculate seakeeping taking the influence of the sinkage and trim into account.

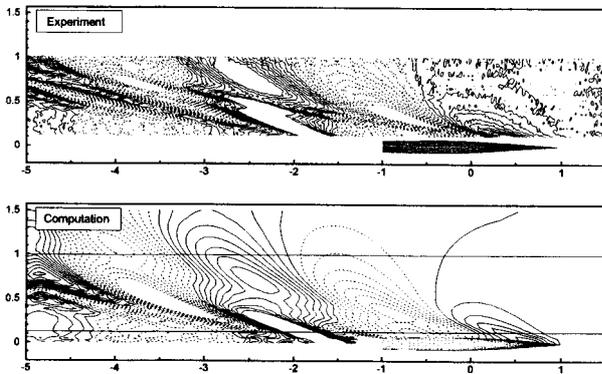


Fig. 7 Steady Kelvin wave pattern at $F_n = 0.5$

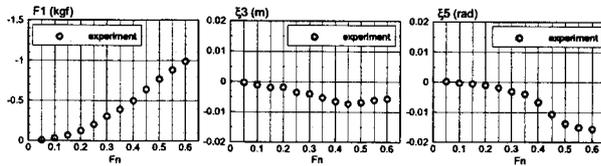


Fig. 8 Measured steady resistance, sinkage and trim

5.2 Added mass and damping coefficients

Figs.9 and 10 are added mass and damping coefficients due to forced heave and pitch motions respectively. The strip method and the RPM are compared with experiments. The strip method seems to predict pure terms well compared with experiments. However the coupling terms that show the interactive hydrodynamic effect between heave and pitch motions are not predicted so well. It will be suggested that the strip method fundamentally based on the two dimensional calculation is not sufficient to capture the forward speed effect and three dimensional effect for the fast ships where these effects become remarkable.

On the other hand, the RPM can predict even the coupling terms. Especially the RPM with transom stern condition presented in this study improves the estimation re-

markably. The bold line shows the result of the RPM with transom stern condition considering the effect of the sinkage and trim. In the calculation, measured sinkage and trim shown in Fig.8 is used and the ship hull surface is rediscritized taking them into account. It must be noted that the bold line is just a reference to show the effect due to the sinkage and trim and not to be compared with experiments and other numerical results. This is because the experiments are carried out by enforcing the heave and pitch motions to the model around its equilibrium position without taking their effects into account. The comparison of the bold line with the thin-solid line has a meaning to see a significant effect of the sinkage and trim in the seakeeping estimations.

5.3 Wave exciting forces and moment

Fig.11 shows the wave exciting forces and moment at $F_n = 0.5$ and $\chi = 180$ degs. We can not see notable differences among estimation methods. Only small advantage is confirmed in the calculation of the RPM with transom stern condition. Fast ships are generally slender as a model employed in this study. Therefore the scattering of the incident wave by the hull may not so significant and the Froude-Krylov force may be dominant. This is why even the strip method presents good estimations.

5.4 Ship motions

Result of ship motions at $F_n = 0.5$ and $\chi = 180$ degs is shown in Fig.12. The strip method underpredicts the experimental ship motions in wide range of λ/L and the resonance point of heave motion is not predicted at all. It is known that the estimation accuracy of coupling terms of the added mass and damping coefficients affects significantly the estimation of the resonance point²²⁾. Then we can conclude that the inaccurate estimation of the coupling terms observed in Figs.9 and 10 will be a cause of the large discrepancy in the motion estimation by the strip method.

The RPMs with and without transom stern condition can predict the resonance point taking account of the forward speed effect and three dimensional effect adequately. The deference between two RPMs is not so remarkable. A small improvement can be seen in pitch motion near the resonance point. It will be rational to understand that the treatment of the transom stern affects the pressure distribution at the stern directly and it affects the pitch moment due to the long moment-lever from the center of gravity. And this leads to some effect in the pitch motion as a result.

If we take account of the effect of sinkage and trim, and use a revised wetted hull surface in the computation considering them, the estimation of ship motion by RPM is drastically improved and gives almost complete prediction as shown by the bold line in the figure. It has been already well understood that the effect of sinkage and trim

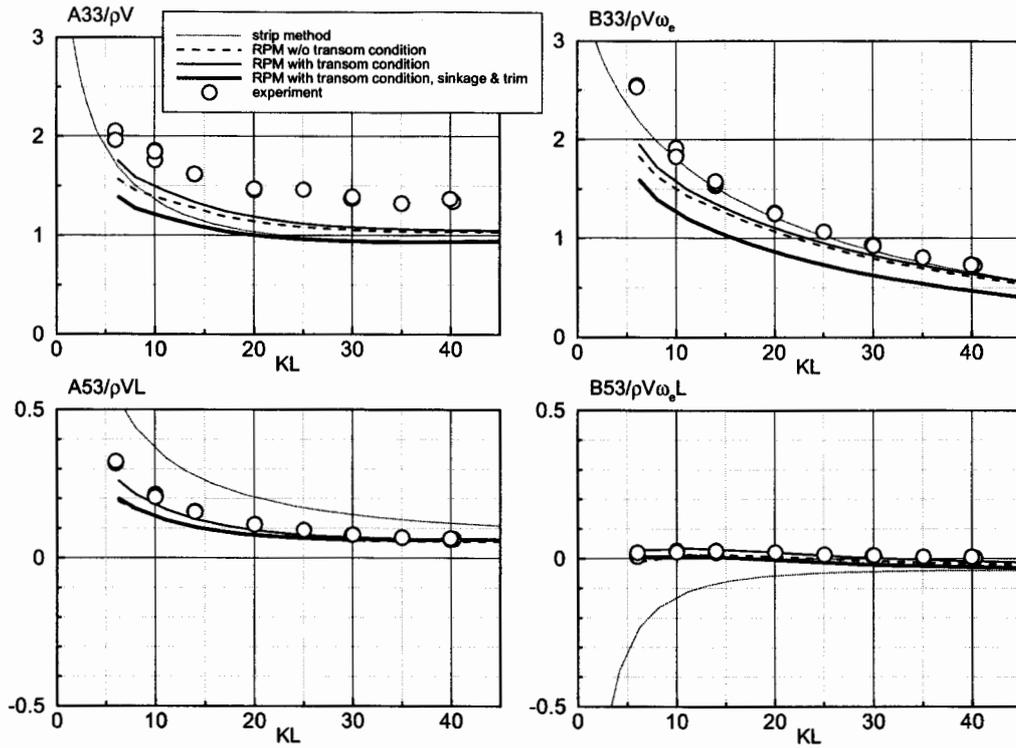


Fig. 9 Added mass and damping coefficients due to forced heave motion at $F_n = 0.5$

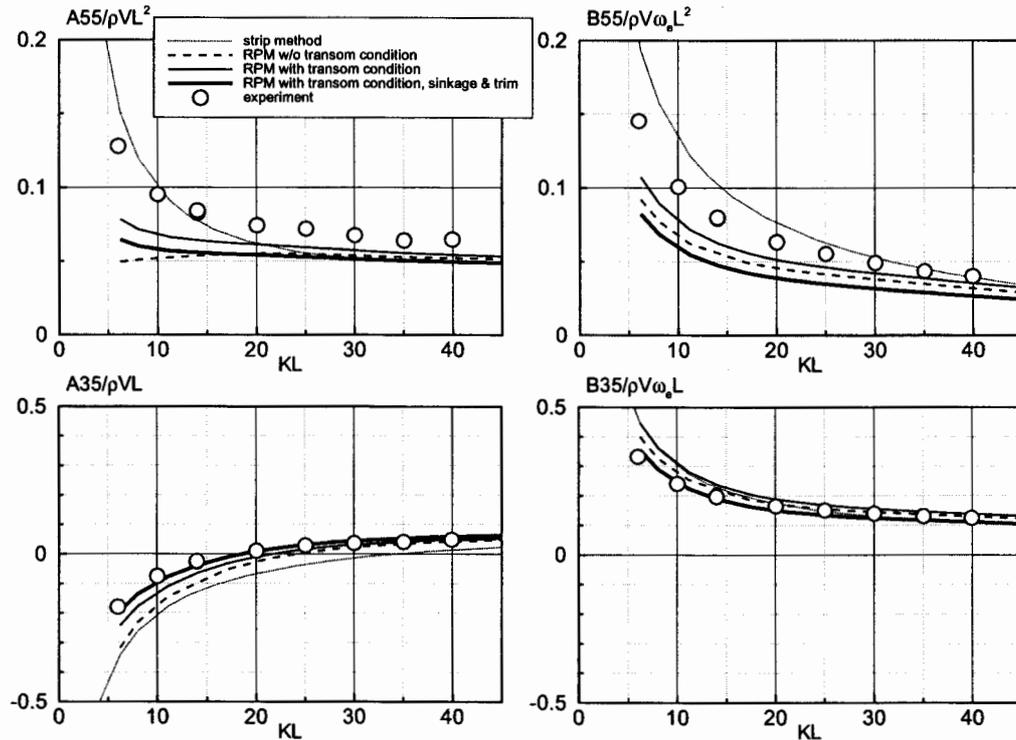


Fig. 10 Added mass and damping coefficients due to forced pitch motion at $F_n = 0.5$

is negligible when we evaluate seakeeping of the fast ships. Now we realize this knowledge also in this result.

We also carried out the computation by the strip method taking account of sinkage and trim although we did not

illustrate the result in the figure. The result was slightly improved compared with the strip method in the figure. However the resonance point could not be predicted at all even by this calculation.

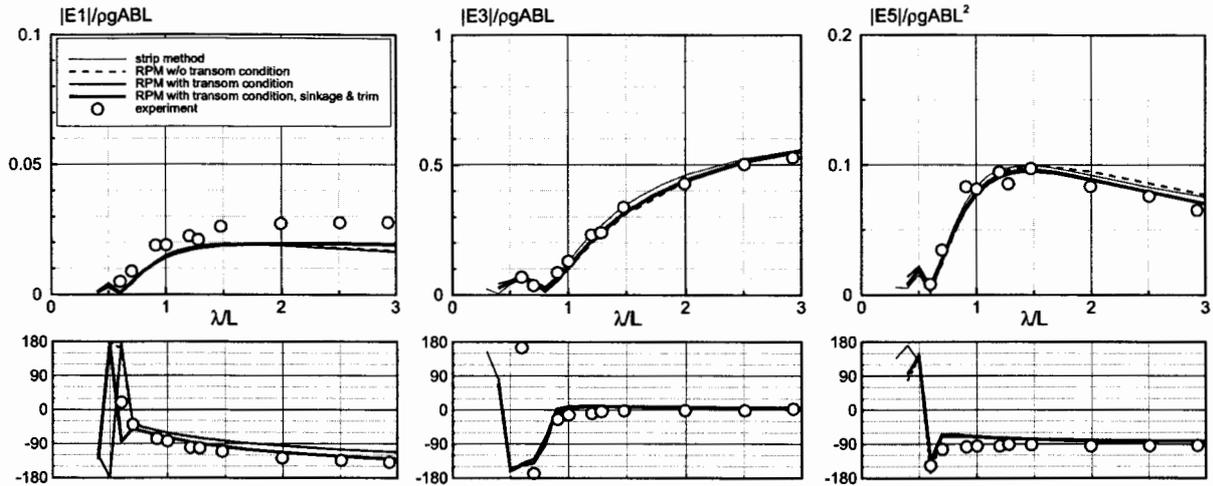


Fig. 11 Wave exciting forces and moment at $F_n = 0.5$, $\chi = 180$ deg.

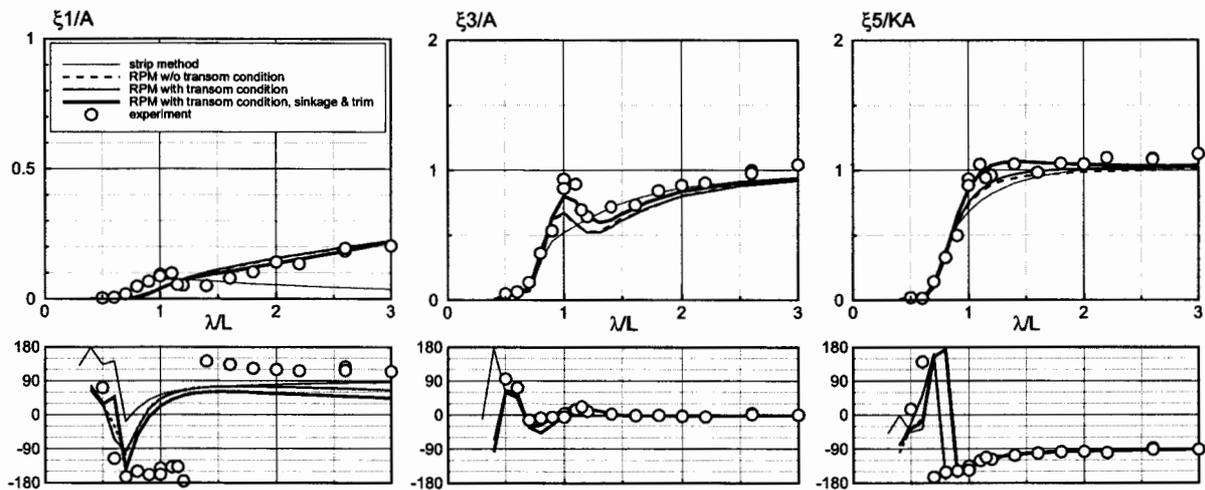


Fig. 12 Ship motions at $F_n = 0.5$, $\chi = 180$ deg.

5.5 Pressure distributions

In order to see the influence of the transom stern condition, the sinkage and trim, we illustrated the pressure distributions on the hull in Figs.13 and 14. Fig.13 is a wave pressure due to $\phi_0 + \phi_7$ and Fig.14 is a total unsteady pressure including the effect of ship motions. The unsteady pressure term related to $-\rho g z$ is also included in this calculation. We can see the influence of the transom stern condition by comparing (a) with (b) in both figures ('TSC' means the transom stern condition). The difference appears only near the stern part and the transom stern condition does not affect so much the whole pressure distribution over the hull. The comparison between (b) with (c) shows the influence of the sinkage and trim in the unsteady pressures. The shape of the wetted surface beneath the calm water surface is changed considering the sinkage and trim. We confirm that its influence spread to the whole hull surface and can not be neglected.

Figs.15 and 16 are showing the two dimensional pressure

distributions at representative ordinates. The horizontal axis θ indicates the angle of the arbitrary point along the girth on the hull surface measured from the bottom toward the water line. The origin is set along the body fixed x axis. Therefore θ becomes smaller than 90 degs. at the stem part and larger than 90 degs. at the stern part in the case of (c) since the sinkage and trim is taken into account. The effect of the transom stern condition can be seen by the comparison between (a) and (b), and it is confirmed that the pressure is remarkably different near the transom stern. On the other hand, the comparison between (b) and (c) shows significant effect of the sinkage and trim on the pressure distributions. Thus, using these figures of two dimensional pressure distributions we can justify the considerations done by the three dimensional pressure distributions, Figs.13 and 14.

5.6 Unsteady wave field

We have not yet validated our numerical results from the pint of view of the local forces such as pressure. Here we

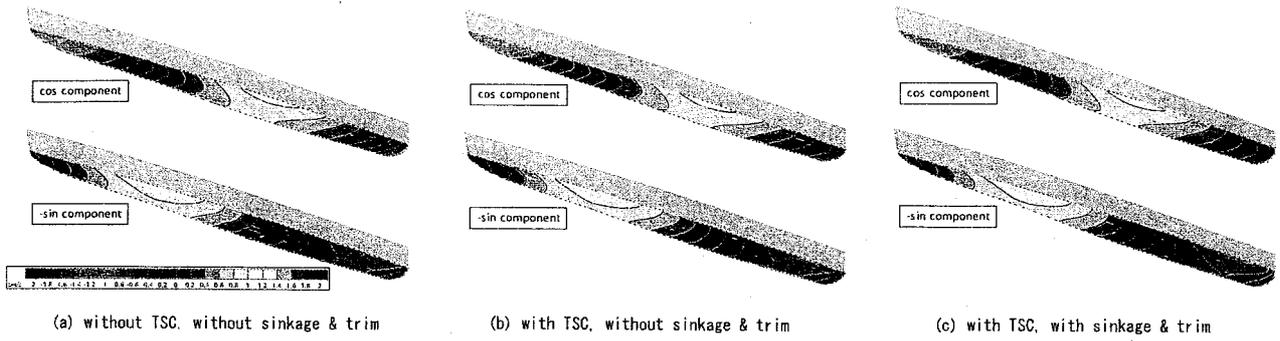


Fig. 13 Wave pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

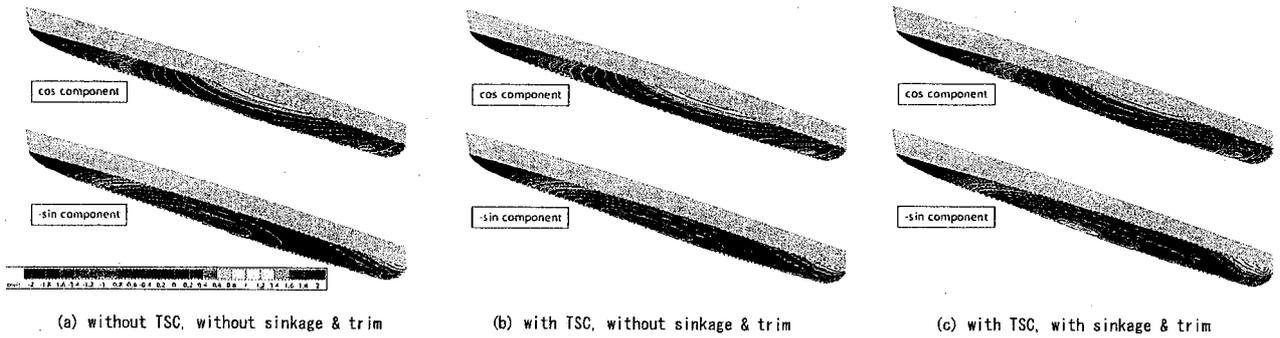


Fig. 14 Total unsteady pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

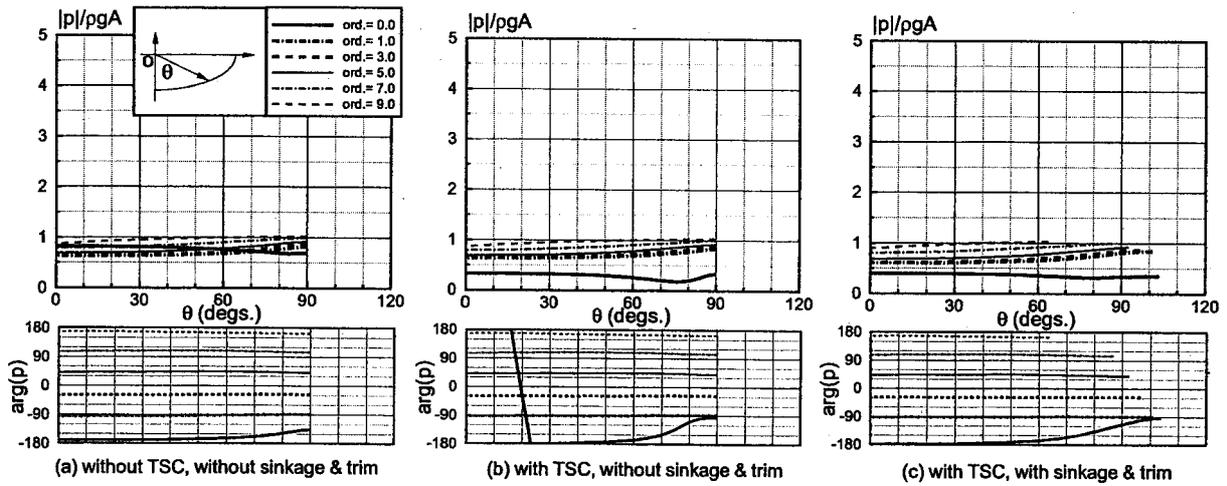


Fig. 15 Wave pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

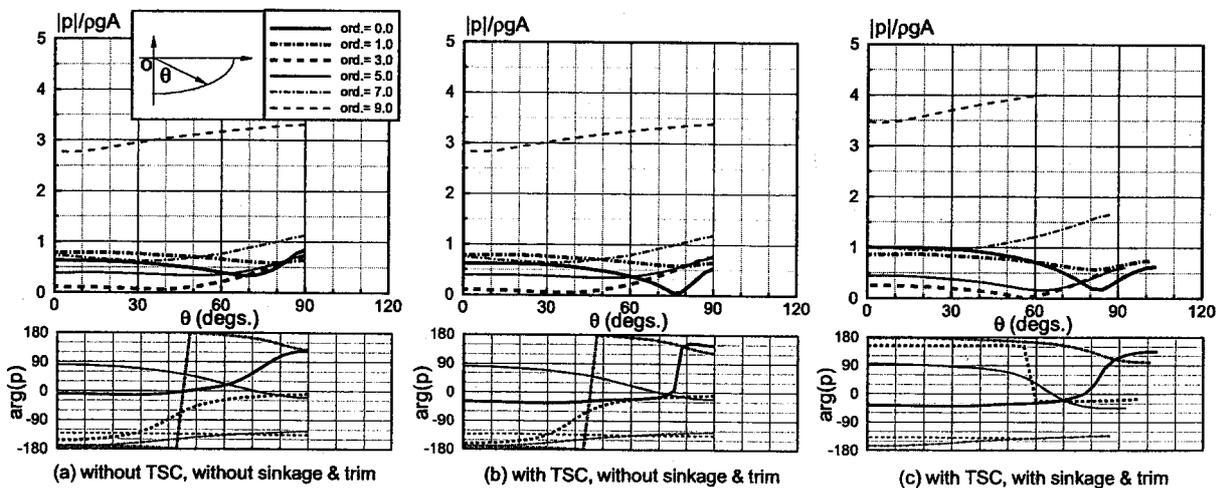


Fig. 16 Total unsteady pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

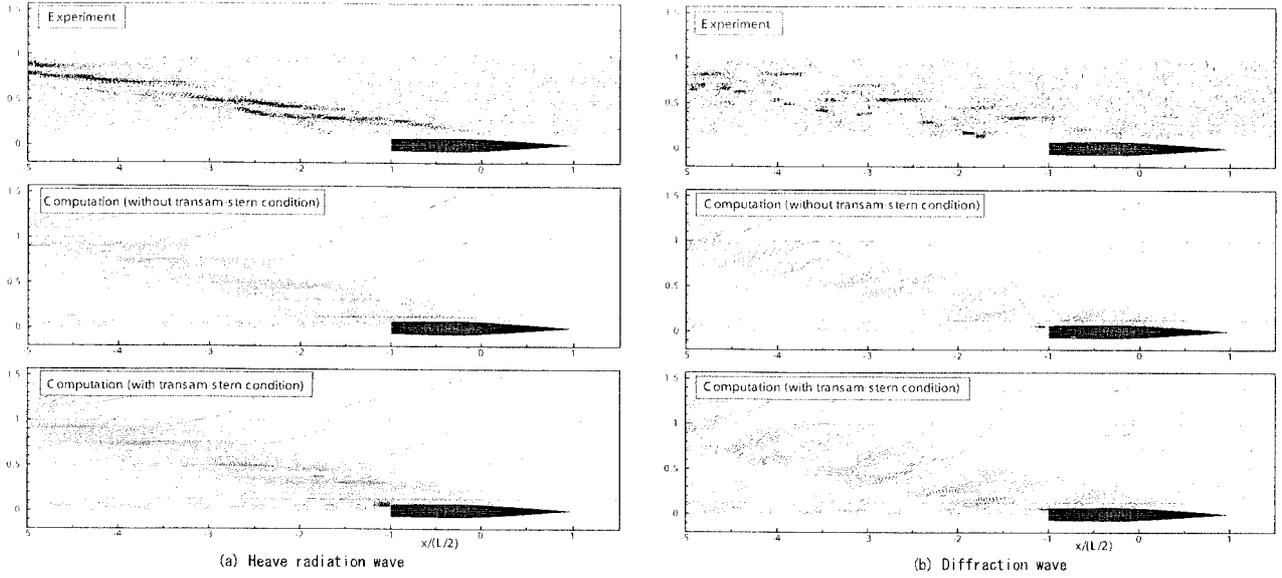


Fig. 17 Comparisons of measured and computed wave patterns ((a): Heave radiation wave at $F_n = 0.5$, $KL = 30$, $\xi_3 = 0.02m$, (b): Diffraction wave pattern at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 0.7$, $\chi = 180degs.$, $H/\lambda = 1/20$)

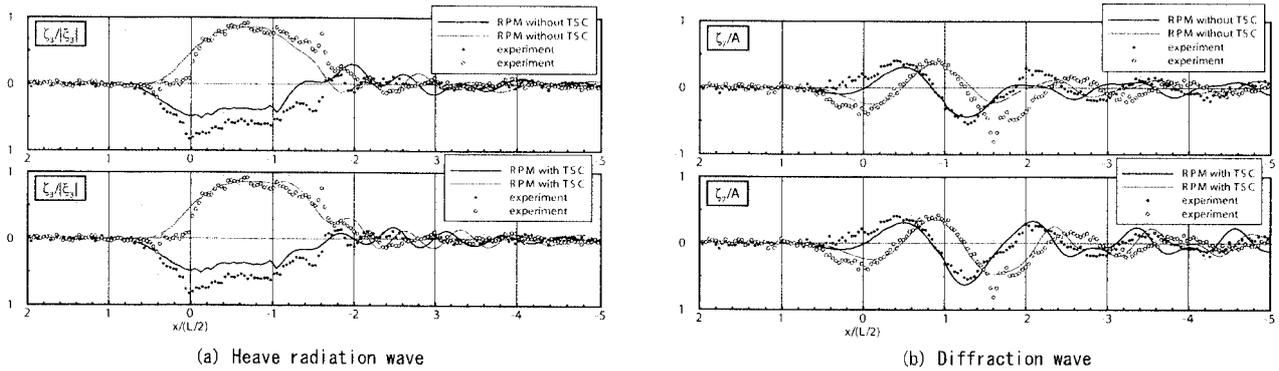


Fig. 18 Comparisons of measured and computed wave profiles along $y/(B/2) = 1.52$ ((a): Heave radiation wave at $F_n = 0.5$, $KL = 30$, (b): Diffraction wave pattern at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 0.7$, $\chi = 180degs.$) [bold line & solid circle: cos component, thin line & white circle: sin component]

adopt the unsteady wave elevation for this purpose. The wave elevation itself is equivalent to the pressure distribution on the free surface and its measurement is superior to pressure measurement on the hull surface from the point of view of cost and convenience.

The left and right figures in Fig.17 show the contour plots of the heave radiation wave and the diffraction wave around the ship respectively. Two numerical results with and without transom stern condition are compared with experimental results. Both calculations of heave radiation wave agree well with experiments in amplitude. The effect of the transom stern condition appears not only in the wave elevation around the stern but also in that at far field from the ship. It is observed that the transom stern condition makes the phase difference of the wave at far field slightly smaller. In the diffraction wave, the effect of the transom stern condition appears more remarkably in amplitude, and the result with transom

stern condition gives better agreement with experiment than that obtained without the condition. This can be seen more clearly if we illustrate Fig.17 by color contour. The phase difference between measured and computed diffraction waves observed at far field in Fig.17 is also seen for other ships and even for normal Froude number. This is considered to be originated in wave-wave nonlinear interaction²³). Therefore the the present computation based on the linear theory can not predict this phenomenon.

Fig.18 shows the wave profiles obtained by cutting the wave fields in Fig.17 along longitudinal axis of $y/(B/2) = 1.52$. From these figures, we confirm that the wave profile around $-2.5 < x/(L/2) < -1.5$ is fairly improved by imposing the transom stern condition. Since this part of wave is mainly generated from the stern, it is suggested that the transom stern condition improves the pressure estimation especially near the stern part.

6. Conclusions

In this paper, we proposed a transom stern condition in seakeeping calculation of fast ships, and validated it through the comparison of the numerical results and experiments. Through the study we obtained the following results:

- (1) It was confirmed from the experiments that the transom stern was completely dry even when the ship is freely oscillating in waves provided that ship advances at high speed. All the waves that consists of the incident wave, steady wave, radiation waves and diffraction wave flow away smoothly from the bottom part of the dry transom stern.
- (2) A flow model was proposed to satisfy the phenomena denoted in (1) and a corresponding boundary condition was derived.
- (3) It was confirmed that the Rankine panel method with transom stern condition rationally explains the experimental results. Additionally the accuracy of the seakeeping estimations was fairly improved by taking account of the effect of the sinkage and trim incorporated with the present transom stern condition.

Acknowledgment

Here we express our appreciation by denoting that a part of this study was supported by grants-in-aid for scientific research (No.19206093 and No.19206092), Japan Society for Promotion of Science. A part of the present work was carried out within a framework of a Joint-Use Research with RIAM, Kyushu University.

References

- 1) Bertram, V.: *Fulfilling Open-Boundary and Radiation Condition in Free-Surface Problems Using Rankine Sources*, Ship Technology Research, Vol.37/2(1990)
- 2) Sclavounos, P. D., Nakos, D. E.: *Ship Motions by a Three-Dimensional Rankine Panel Method*, Proc. 18th Symp. on Naval Hydrodyn. Ann Arbor (1990)
- 3) Yasukawa, H.: *A Rankine Panel Method to Calculate Unsteady Ship Hydrodynamic Forces*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.168, pp.131-140 (1990)
- 4) Takagi, K.: *An Application of Rankine Source Method for Unsteady Free Surface Flows*, J. of the Kansai Soc. of Naval Arch. Japan, No.213, pp.21-29 (1990)
- 5) Iwashita, H., Lin, X., Takaki, M.: *Combined Boundary-Integration Method for Ship Motion in Waves*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.85, pp.37-55 (1993)
- 6) Lin, W. M., Yue, D.: *Numerical Solutions for Large-Amplitude Ship Motions in the Time Domain*, Proc. 18th Symp. on Naval Hydrodyn. Ann Arbor, pp.41-65 (1990)
- 7) Nakos, D. E., Kring, D., Sclavounos, P. D.: *Rankine Panel Methods for Transient Free-Surface Flows*, 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, Iowa, pp.613-632 (1993)
- 8) Bunnik, T.: *Seakeeping Calculations for Ships, Taking into account the Non-Linear Steady Waves*, PhD Thesis, Technical University Delft, Netherland (1999)
- 9) Yasukawa, H.: *Time Domain Analysis of Ship Motions in Waves using BEM*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.100, pp.83-98 (2000)
- 10) Kataoka, S., Iwashita H.: *Estimations of Hydrodynamic Forces Acting on Ships Advancing in the Carm Water and Waves by a Time-Domain Hybrid Method*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.196, pp.123-138 (2004)
- 11) Kataoka, S., Iwashita H.: *Estimations of Unsteady Wave Fields of Ships Advancing in Waves by a Time-Domain Hybrid Method*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.196, pp.139-150 (2004)
- 12) Timman, R., Newman, J.N.: *The Coupled Damping Coefficients of a Symmetric Ship*, JSR 5/4 (1962)
- 13) Dawson, C. W.: *A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems*, 2nd Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley(1977)
- 14) Hughes, M., Bertram, V.: *A Higher-Order Panel Method for 3-D Free Surface Flows*, Institute für Schiffbau der Universität Hamburg, No.558, pp.1-46 (1995)
- 15) Jensen, G., Mi, Z.-X., Söding, H.: *Rankine Source Methods for Numerical Solutions of the Steady Wave Resistance Problem*, 16th Symp. on Nav. Hydrodyn., Berkeley(1986)
- 16) Ando, J., Nakatake K.: *A Method to Calculate Wave Flow by Rankine Source*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.75(1988)
- 17) Iwashita, H., Bertram, V.: *Numerical Study on the Influence of the Steady Flow in Seakeeping*, Proc. of 12th IWWWFB, Marseille (1997)
- 18) Iwashita, H., Nechita M., Calagrossi, A., Landrini M., Bertram, V.: *A Critical Assessment of Potential Flow Models for Ship Seakeeping*, 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, pp.37-46 (2000)
- 19) Iwashita, H., Ito, A.: *Seakeeping Computations of a Blunt Ship Capturing the Influence of the Steady Flow*, Ship Technology Research, Vol.45, No.4, pp.159-171 (1998)

- 20) Eguchi, T.: *A Study on Power Estimation for High-Speed Vessels Using Panel Shift Rankine Source Method*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.95, pp.9-16 (1998)
- 21) Ohkusu, M.: *Analysis of Waves Generated by a Ship Oscillating and Running on a Calm Water with Forward Velocity*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.142, pp.36-44 (1977)
- 22) Kashiwagi, M., Kawasoe, K., Inada, M.: *A Study on Ship Motion and Added Resistance in Waves*, J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan, No.234, pp.85-94 (2000)
- 23) Ohkusu, M., Iwashita, H.: *Revising the Unsteady Wave Pattern of a Ship*, Proc. of 20th IWWWFB, (2004)

垂直衝突におけるゴルフボールの力学モデルの同定

岡山理科大学 工学部 中井 賢治

1. 緒言

最近のゴルフボールとゴルフクラブの高品質化および高性能化を目指した開発は、主として飛距離、方向性の向上を中心に行われている。この目的を達成するためには、ボールとクラブヘッドの衝突に関わる諸現象を的確に把握することが重要であり、そのための第一歩として、ボールの動力的特性を明らかにする必要がある。これまで、ゴルフボールの衝突性能（接触力、接触時間、反発係数など）に関しては、実験的に理論的に様々な研究がなされてきた。

本研究の目的は、垂直衝突におけるスリーピースゴルフボールの動的挙動を表現する3要素線形離散モデルを同定することである。ゴルフボールと標的の衝突実験を行ない、それから得られる荷重-時間、変形-時間に対してフーリエ変換し、周波数領域で複素コンプライアンスを求め、この複素コンプライアンスに最小2乗法により曲線を当てはめることにより、最初に仮定した3要素線形モデルの各定数を決定する。

2. ゴルフボールの力学モデル

剛体面に垂直衝突させたゴルフボールの動的挙動を表現するために、図1に示すような3要素線形離散モデルを開発する。本モデルは、集中質量、2つの線形ばねそしてダンパから構成されている。図中の m , k_i ($i = 1, 2$), c_2 は、それぞれボールの質量、ばね定数、粘性減衰係数である。 $x(t)$, $y(t)$, $F(t)$ は、それぞれボールの変形、図中の点Aでの変位、剛体面に作用する荷重（接触力）である。図1に示すモデルの運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} = -k_1(x - y) \tag{1}$$

ばね (k_1) と Kelvin-Voigt モデル (ばね(k_2)とダンパ(c_2)が平行) それぞれに作用する荷重は等しいため、荷重 $F(t)$ は次式で表わされる。

$$F(t) = k_1(x - y) = c_2\dot{y} + k_2y \tag{2}$$

式(1), (2)より、

$$\dot{y} = \frac{k_1}{c_2}x - \frac{k_1 + k_2}{c_2}y; \quad \dot{z} = -\frac{k_1}{m}(x - y) \tag{3}$$

となる。ここで、 $z \equiv \dot{x}$ である。 z はボール中心の速度である。ルンゲクッタ法を用いて式(3)を解くことにより (初期条件: $x(0) = y(0) = 0$; $z(0) = \dot{x}(0) = V_{in}$: ボールの初速度)、ボールの変形量 $x(t)$ を求め、それを式(2)に代入することで、荷重 $F(t)$ を求める。

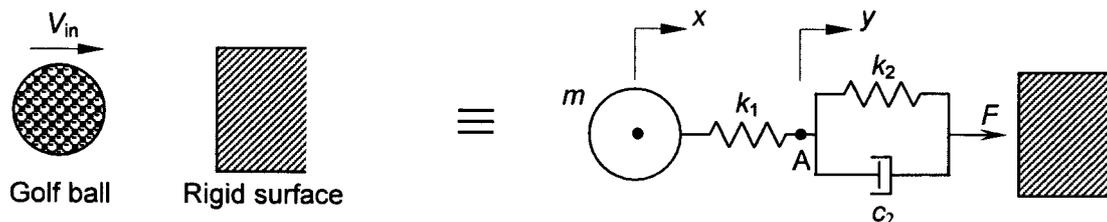


図1 ゴルフボールの力学モデル

3. 3要素線形離散モデルの同定

3・1 ボールの衝突実験 ロードセルを備えた標的（鋼製板）を用いて、スリーピースゴルフボール（ $m = 46 \pm 0.1$ g）の垂直衝突試験が、新川他¹⁾により行なわれている。本試験では、空気圧を制御することにより、異なる4つの速度（ $V_{in} = 28$ m/s, 35.2 m/s, 53 m/s, 61 m/s）でボールを標的に対して発射させた時のボールの接触力、変形量の時間的変化（ $F(t)$, $\delta(t)$ ）を求めている。ボールの変形量 $\delta(t)$ については、高速ビデオカメラを用いて、ボール中心の変位を計測することにより求めている。本試験で計測した $F(t)$, $\delta(t)$ のデータを用いて、スリーピースボールの3要素線形離散モデルを同定する。

3・2 モデルパラメータの決定 スリーピースボールの接触力、変形量の時間的変化（ $F(t)$, $\delta(t)$ ）の計測値をそれぞれフーリエ変換することで、周波数領域内における試験片の接触力 $\bar{F}(\omega)$ と変形量 $\bar{\delta}(\omega)$ を求めることができる。

$$\bar{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \exp(-i\omega t) dt; \quad \bar{\delta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (4)$$

ここで、 ω は角周波数である。複素コンプライアンス $J(\omega)$ は、 $\bar{\delta}(\omega)$ と $\bar{F}(\omega)$ の比として、次式のように求められる。

$$J(\omega) = \bar{\delta}(\omega) / \bar{F}(\omega) = J_1(\omega) - iJ_2(\omega) \quad (5)$$

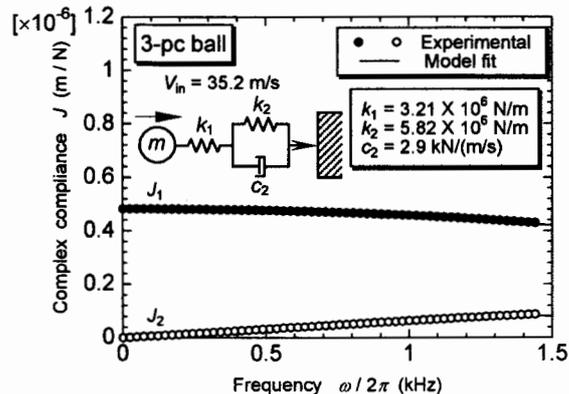
ここで、 $J_1(\omega)$ と $J_2(\omega)$ は、それぞれ貯蔵コンプライアンスと損失コンプライアンスである。 $V_{in} = 35.2$ m/sの実験結果 $F(t)$, $\delta(t)$ を用いて、式(4), (5)を計算することにより複素コンプライアンス $J(\omega)$ を求め、その結果をプロットで、図2に示す。実線は、3要素線形離散モデルの $J_1(\omega)$, $J_2(\omega)$ の理論値であり、次式より求められる。

$$J_1(\omega) = \frac{1}{k_1} + \frac{k_2}{k_2^2 + (\omega c_2)^2}; \quad J_2(\omega) = \frac{\omega c_2}{k_2^2 + (\omega c_2)^2} \quad (6)$$

実験値に最小2乗法を用いて曲線（式(6)の理論値）を当てはめることにより、今回仮定した3要素線形離散モデル（図1参照）の各定数を決定した。モデルの各定数の値は、図2の中に付記されている。両ボールとも、すべての周波数範囲内において、3要素線形離散モデルによって動的挙動がうまく再現できていることがわかる。

3・3 3要素モデルの妥当性 3要素線形離散モデルの精度を検証するため、式(2), (3)より求めたスリーピースボールの接触力 $F(t)$, 変形量 $x(t)$ （= $\delta(t)$ ）の予測値と、実験により得られた $F(t)$, $\delta(t)$ を比較すると、図3のようになる。ここで、実線が実験結果、破線がモデルより予測した結果をそれぞれ示している。 $V_{in} = 40$ m/sまでは、実験値と予測値は良好に一致しており、3要素モデルの各定数が精度よく求められていたことがわかる。しかし、 $V_{in} = 53$ m/sの場合は実験値と予測値とで両者に不一致が認められた。この原因は、 $V_{in} = 50$ m/s以上においては、ボールの変形量が大きくなり、材料の非線形性の影響が生じ始めるためと考えられる。

図2 スリーピースボールの複素コンプライアンス



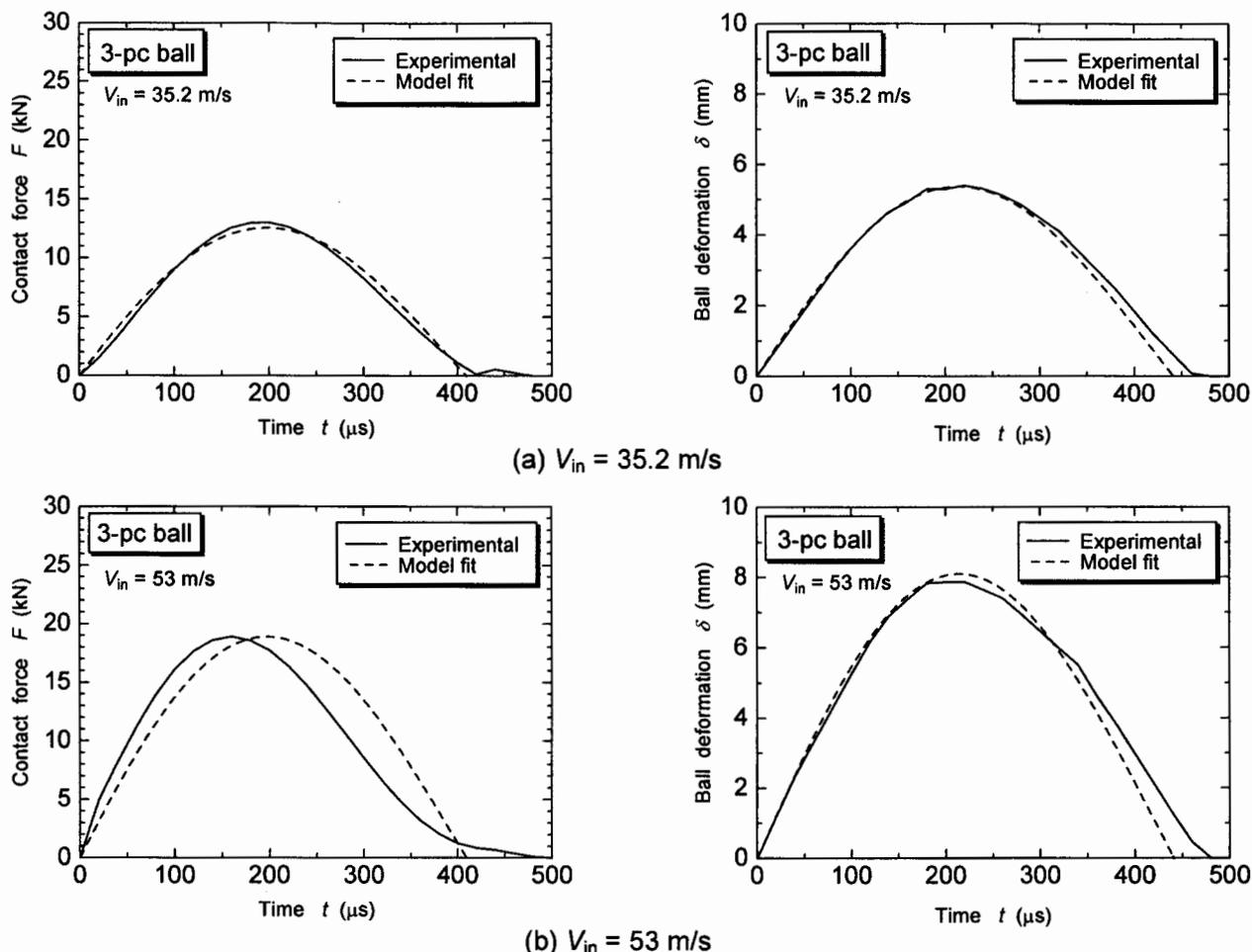


図3 スリーピースボールの接触力・変形量の時間的変化の実験値と解析値の比較 ($V_{in} = 35.2, 53 \text{ m/s}$)

参考文献

- 1) 新川和夫, 馬田俊雄, 小松治男, 清水哲雄, 佐藤正矩, 竹原幸生, 江藤剛治: 垂直衝撃を受けるゴルフボールの動的変形計測, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.724 (2006), pp. 3826-3831.

謝辞

本研究を遂行するにあたり貴重なコメント・アドバイスをして頂いた 新川和夫 氏に感謝する。また、本実験に使用したゴルフボールを提供して頂いたマルマン (株) の 清水哲雄 氏に感謝の意を表する。

研究成果報告

- Nakai, K. and Yokoyama, T.: Identification of a Lumped-Parameter Model for Golf Balls in Normal Impact, *Applied Mechanics and Materials*, Vols.7/8 (2007), pp. 237-242.
- 中井賢治, 横山 隆: 垂直衝突におけるゴルフボールの力学モデルの同定, 第51回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, (2007), pp. 45-46.

研究組織

- 研究代表者 中井 賢治 (岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- 研究協力者 新川 和夫 (九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野)

1. 目的

脆性破壊時にはき裂が材料中を加速・減速しながら高速で伝ばする。そのき裂伝ばは、物体の形状、負荷条件などによる物体内部の応力状態に著しく影響を受けることが指摘されているが、そのような動的なき裂進展のメカニズムはまだ十分に解明されていない。本研究は、そのメカニズムを解明するために粒子法の一つである拡張個別要素法⁽¹⁾ (EDEM) を用いて動的なき裂伝ば現象の解析を試み、Arakawa らの実験結果⁽²⁾⁽³⁾と比較した。

2. 理論

拡張個別要素法 (EDEM) で用いる要素間の力学的な相互作用は弾性ばね、ダッシュポット、スライダを用いて表現する。Fig.1 に示すように、特に要素間の空隙に存在する物質の効果を表すことを目的として、要素ばねとは別に空隙ばねとして、法線方向と接線方向に弾性ばねとダッシュポットを並列に配置している。Fig.1 中の“×”の記号は、要素間のひずみが破壊基準として設定した引張限界ひずみ β に達したときに要素間で破壊が生じること(き裂の発生)を示し、“=”の記号は、要素同士が接触した圧縮状態のみでの力の伝達を示している。さらに接線方向の摩擦力を考慮している。円形要素 i の運動方程式は次式となる。

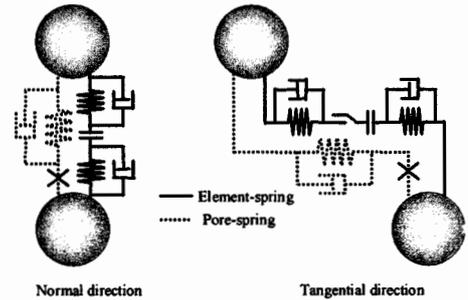


Fig.1 EDEM model

$$m_i \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} + C_i \cdot \frac{du}{dt} + F_i = 0 \quad I_i \cdot \frac{d^2 \phi}{dt^2} + D_i \cdot \frac{d\phi}{dt} + M_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 m_i は要素 i の質量、 I_i は要素 i の慣性モーメント、 F_i は要素に働く合力、 M_i は要素に働く合モーメント、 C_i 、 D_i は減衰定数、 u は要素の変位ベクトル、 ϕ は要素の回転変位である。各要素の座標や回転は、式(1)を時間について数値積分することにより求められる。本研究では数値積分に Leap-frog 法を用いた。空隙物質にき裂が入った状態を空隙ばねの破壊(き裂の発生)とし、要素間に圧縮力が作用する場合は要素間に法線方向の力 F_n と接線方向の力 F_s が作用するが、要素間に引張力が作用する場合は $F_n = F_s = 0$ となる。空隙ばねの破壊(き裂の発生)に関しては、引張破壊の場合には法線方向の要素間のひずみが β に達したときに空隙ばねが破壊したとみなし、せん断破壊の場合の破壊基準はモール・クーロンの条件を用いている。

き裂進展の非線形挙動を表現するために、Nishioka・Atluri らの動的 J 積分の式⁽⁴⁾を用いた。

$$J'_1 = \int_{+\Gamma_c} [(W + K)n_1 - t_i u_{i,1}] ds + \int_{-V_c} [\rho \ddot{u}_i u_{i,1} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i+1}] dV \quad (2)$$

ここで、 W はひずみエネルギー密度、 K は運動エネルギー密度、 u_i は変位、 t_i は表面力、 ρ は密度である。

応力拡大係数 K_I は動的 J 積分と伝ば速度 C によって次式で関連づけられている。⁽⁴⁾

$$K_I = \sqrt{2\mu'_1 / A_I(C)} \quad (3)$$

ここで、 $A_I(C) = \beta_1(1 - \beta_2^2) / \{4\beta_1\beta_2 - (1 + \beta_2^2)^2\}$ であり、き裂パラメータ β_1 、 β_2 は次式となる。

$$\beta_1 = (1 - C^2 / C_d^2)^{1/2}, \quad \beta_2 = (1 - C^2 / C_s^2)^{1/2} \quad (4)$$

ここで C_d は膨張波速度、 C_s はせん断波速度である。

3. 解析結果

解析モデルを Fig.2 に示す。材料は Homalite - 100 とし、縦弾性係数 $E=5.3\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ 、密度 $\rho=1.23 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた。き裂進展の発生条件として、破面で消費されるエネルギーを考慮した間島らの研究など

⑤⑥を考慮して間隙ばね破壊基準 $\beta=1.000553$ を用いた, また要素半径 $r=2.5\times 10^{-4}$ m, 時間刻み幅 $\Delta t=1.0\times 10^{-9}$ sを用いた. 今回の解析では, 実験結果と比較するために, Fig.2 に示す解析モデルにおいて, き裂が進展する直前までモデル内部にある Load Pin 2 本をそれぞれ上向きと下向きに等速 5.0×10^{-2} m/s で動かし, その後, 実験結果と同じ 1mm/min に相当する 8.33×10^{-6} m/s で動かした. そして, 準静的引張条件に近づけるため, き裂進展開始直前まではダッシュポットの粘性定数を $\eta=2(mk)^{1/2}$ (m:質量, k:バネ定数) と大きくし, 減衰を利用して動的な影響を小さくした. そしてき裂進展開始後はき裂伝ばに伴う応力波の伝ばを考慮し, ダッシュポットの粘性定数 η を 10 分の 1 と小さくした. これは計算開始直後から実験データと同じ引張速度では計算時間が膨大になり解析困難になるため, その解決策として試みたものである. Fig.3 にき裂速度と応力拡大係数の実験結果^②と解析結果を示す. 解析結果は実験結果と同じようにき裂速度の加速・減速を表現できているが, 応力拡大係数は実験結果の約 1.5 倍, き裂速度は約 1.7 倍となっている. この原因としては, き裂進展開始までの引張速度がまだ速すぎることや計算に使用した要素数が少ないことなどが考えられる. 計算精度の向上が今後の課題である. さらに Fig.4 に Load Pin を 4 本にし, 材料を PMMA^③とした場合の解析モデルを示す. この解析例では Load Pin の数と材料パラメータ ($E=5.97$ GPa, $\nu=0.28$, $\rho=1.18\times 10^3$ kg/m³, $\beta=1.000239$) 以外の条件は前述の解析例と同じである. Fig.5 にき裂速度と応力拡大係数の関係を示す. 図からき裂速度と応力拡大係数の関係が加速・減速・加速をしており, 実験結果^③を定性的には表せているが, 前述の例と同様に応力拡大係数とき裂速度の値に大きな差があることがわかる.

4. 参考文献

- (1)伯野元彦, 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う, (1997), 39, 森北出版
- (2) Arakawa, K., Nagoh, D. and Takahashi, K., Int. J. Fracture, 96, (1999), 345.
- (3) Arakawa, K., Nagoh, D. and Takahashi, K., Int. J. Fracture, 83, (1997), 305.
- (4) Nishioka, T. and Atluri, N., Engineering Fracture Mechanics, 18, (1983), 1.
- (5) 間島 理, 末益博志, 日本複合材料学会誌, 25, (1999), 140
- (6) Yu, C., et al., Proc. of Int. Conf. on Fracture and Damage Mechanics, (2001)

5. 研究組織

研究代表者: 海津 浩一 兵庫県立大学大学院教授 (元 宮崎大学工学部准教授)
 研究協力者: 木之下 広幸 宮崎大学工学部助教
 池田 清彦 宮崎大学工学部教授
 新川 和夫 九州大学応用力学研究所教授

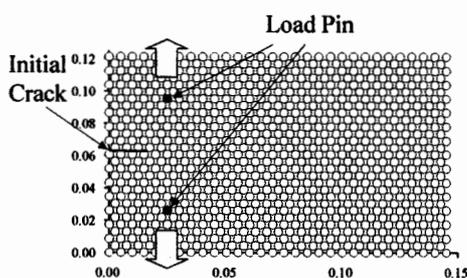


Fig.2 Analytical model I

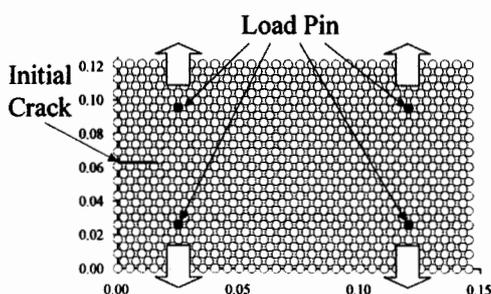


Fig.4 Analytical model II

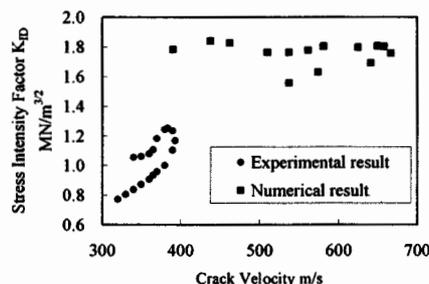


Fig.3 Relationship between crack velocity and stress intensity factor

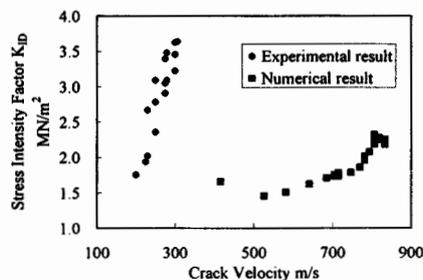


Fig.5 Relationship between crack velocity and stress intensity factor

潮流発電のための高性能ダリウス形水車の開発

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

● 目的

研究代表者らは、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。ダリウス型水車は、動翼の揚力を利用する水車で流れの中で高いエネルギー変換効率を持つが、静止時の起動トルクが小さなことが問題である。系統連携された発電機の場合にはモータリングによって強制的に回転させることが出来るが、我々の場合には独立電源となっているので、起動特性の問題は重要である。この対策としては、ダリウス水車の動翼数を増やすなどの対策も考えられるが、ここでは図1のように、ダリウス形水車の回転軸にサボニウス水車を取り付けけたダリウス・サボニウス混合水車について実験的な研究を行った。サボニウス型水車は、半円弧形のバケットを用いる抵抗型水車で、構造が単純であるので各種装置に利用されているが、特徴として起動トルクが大きなことが挙げられる。もし、両水車の長所を活かすことができれば高性能な水車を実現できる可能性がある。それを調べるのが本研究の目的である。

● 実験装置および実験方法

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 ($L \times B \times d = 65\text{m} \times 5\text{m} \times 4.8\text{m}$) において行った。ダリウス水車の翼は、翼弦長が0.1mのNACA0018と同じ厚さ分布で、円弧キャンバーをつけたものを用いた。曳航速度は、1m/sを標準とした。流力特性計測実験では水車を強制回転させ、その時に水車が発生する平均トルク $Q[\text{N} \cdot \text{m}]$ を計測し、トルク係数 (C_Q) およびパワー係数 (C_P) を求めた。発電実験では発電機の実出力電圧により、パワー係数を求めた。

● 実験結果

図2は、ダリウス・サボニウス水車のトルク係数を流力特性計測実験によって比較した。この結果をみると起動トルクは全ての混合水車で改善されたことが分かる。ただし、両水車の取り付け角による影響は大きく、 β が 90° あるいは 135° が大きな起動トルクを与えるが、 45° ではその効果は小さいことがわかる。一方、潮流発電を行う場合に稼働回転数となる $\lambda \approx 2.2$ 付近では、組合せ水車のトルクは総じてダリウス単独時の7割

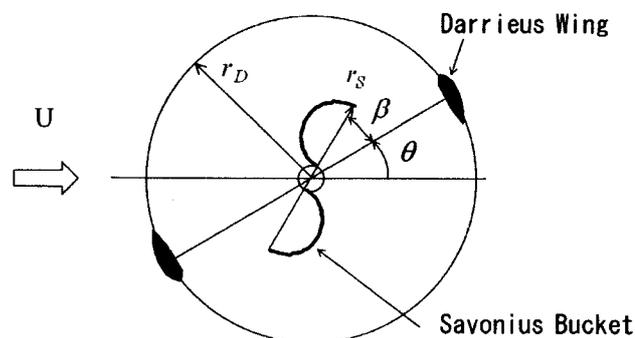


図1 ダリウス・サボニウス混合水車の取り付け角

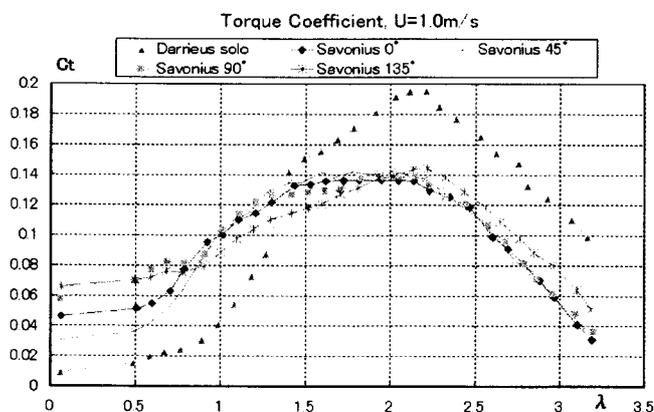
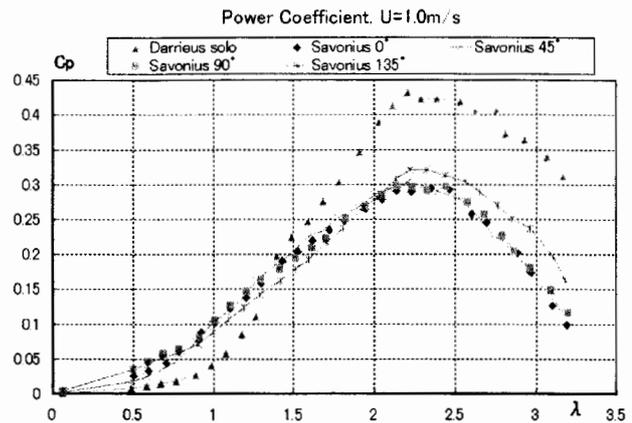


図2 ダリウス単独および混合水車のトルク係数

程度に減少する。すなわち、ダリウス水車に今回のサボニウス水車を追加することによって $\lambda \approx 1.4$ 以下では正のトルクを発生するが、 $\lambda \approx 1.4$ 以上では負のトルクを発生すると考えることができる。

図3は、以上の結果をパワー係数で比較したものである。ダリウス単独の場合には、最高のパワー係数は $\lambda = 2.2$ で $C_p = 0.43$ であるが、混合水車については3割程度効率が悪くなる

図3 ダリウス単独と混合水車のパワー係数の比較



ことが分かる。

図4は、曳航水槽における発電実験装置の写真である。アウターローターコアレス発電機（株式会社スカイ電子製 SKY-HR350 (1 kW)）を直結して用いた。この発電機は48極であり、100rpm程度 of 低回転数でも増速ギア無しで直結して使える特徴がある。発電機の出力は、AC-DC 変換器により直流に変換して計測した。実験では、水車トルク、回転数、動翼角度検出のためのパルス信号、発電機出力電圧、電流を計測した。発電機の負荷は固定抵抗を9段階に切り替えて可変とした。

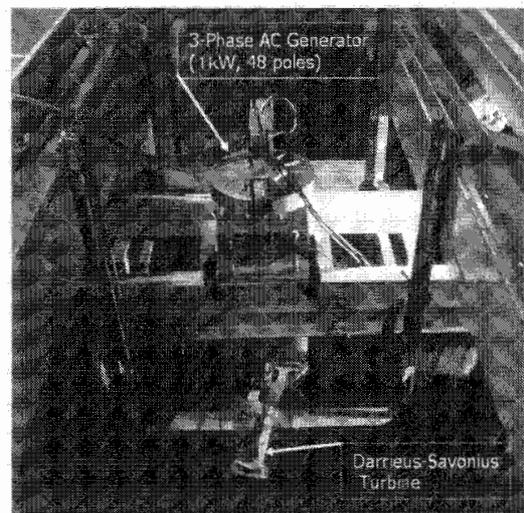


図4 曳航水槽における実験装置

図5は、ダリウス単独とラチェット有のダリウス-サボニウス水車、サボニウスの角度を固定した場合のダリウス-サボニウス水車の発電実験におけるパワー係数を比較したものである。パワー係数は、発電機出力から計算したので発電機の変換効率（約70%）の損失も含まれている。この結果をみると、一番効率が良いのはダリウス単独水車であり、ラチェットの効果については無負荷時の周速比は3を超えており、ダリウス単独とサボニウス固定の混合水車との中間的な性能であることが分かるが、発電機として稼動する $\lambda \approx 2.2$ では他の混合水車との差異は小さい。

● まとめ

- ・サボニウス水車を取付けることによって起動トルクを大きくすることができるが、パワー係数の最高値は7割程度に落ちるので、起動トルクとパワー係数の良い兼合いを取る必要がある。
- ・発電実験により発電性能を確認できた。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括
 明 宏幸 九大・総理工 M2 実験解析

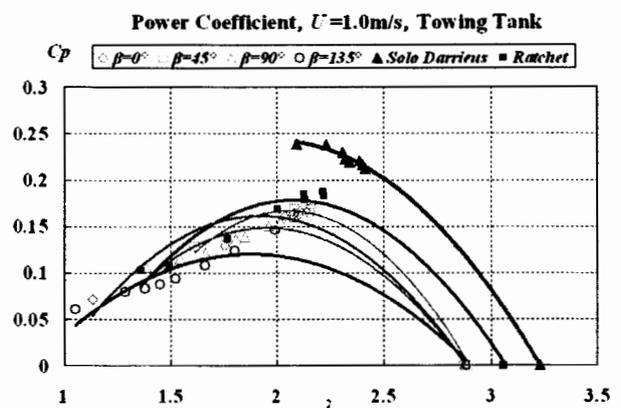


図5 発電実験におけるパワー係数の比較

複合型数値計算法の実用化に関する研究

防衛大学校システム工学群機械システム工学科講座 木原 一

研究目的

浮体と水波の強非線形相互作用に伴う流体现象を解明するために CIP 法や MPS 法といった数値流体力学的手法を用いた研究が近年なされるようになってきたが、その数値解析はしばしば膨大な計算量を必要としていた。本研究の目的は計算手法の一つである MPS 法と境界要素法を組み合わせた複合型計算手法により計算量の大幅な削減を図り、その実用化に向けた各種開発を行うことにある。

研究内容

平成 18 年度に実施した応用力学研究所との共同利用研究の成果により、複合型計算手法が正常に機能することが確認されたため、本年度の研究では主にその実用化に向けた各種問題点の洗い出しに主眼を置いた研究が行われた。

昨年度研究において計算法の課題となっていた点で今年度主に調査検証などを行った項目を以下に列挙する。

1. 高速化効果の量的な検証がなされていない。
2. 長距離を伝搬する水波の計算する際、波振幅の減衰が見られる。
3. 境界要素法と粒子法 (MPS 法) の接合面において移動境界として取り扱う粒子法側の境界形状が水槽端部で異常な挙動を示す。

1 については、大量の粒子を使い MPS 法単独で 2 次元造波水路の問題を計算した例と比較することで高速化効果の量的確認を行った (図 1, 2)。長さ 5 m、水深 40 cm の造波水路を設定し、粒子法単独で 101,234 個の粒子を要する計算を複合型計算法で行った例では粒子数を 31,204 点で実施可能で、この際計算に要した時間は約 6 分の 1 であり、十分な高速化効果が得られていることが確認された (表 1)。

2 については現象の解決には至らなかったものの、減衰量が境界要素法と粒子法間で情報のやり取りをする際に行っていた高周波ノイズ除去を目的とした速度ポテンシャルの空間分布に対する移動平均処理の平滑化幅に相当依存していることを確認し、安定的に計算できる限界の平滑化幅について知見を得た (図 3)。

3 については粒子法側で垂直壁面と流体近傍で不自然な上昇流が発生する現象を発見し、これが原因の可能性と考えその調査を行った。この上昇流の原因は圧力勾配を粒子法で計算する際、壁面近傍で見られる粒子分布の空間的不均一性が計算精度の低下をもたらし、圧力勾配が壁面近傍でのみ過剰評価されることと推定された。そこで計算時に場所によらず一定値としていた重み関数の影響半径を壁面近傍で極端な不均一性が発生しないように変更することで回避が可能であることを確認した。

開発された複合型計算法に関する研究と関連した発表を複数の国際会議で行った。以下に列挙する。

- ◆ A Hybrid Technique Using Particle and Boundary-Element Methods for Wave-Body Interaction Problems, Makoto Sueyoshi, Hajime Kihara and Masashi Kashiwagi 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan, August 5-8, 2007
- ◆ A Hybrid Computational Method for Nonlinear Free Surface Problems, Hajime Kihara, Makoto Sueyoshi and Masashi Kashiwagi, International Conference on Violent Flows, Fukuoka Japan, November 20-22, 2007

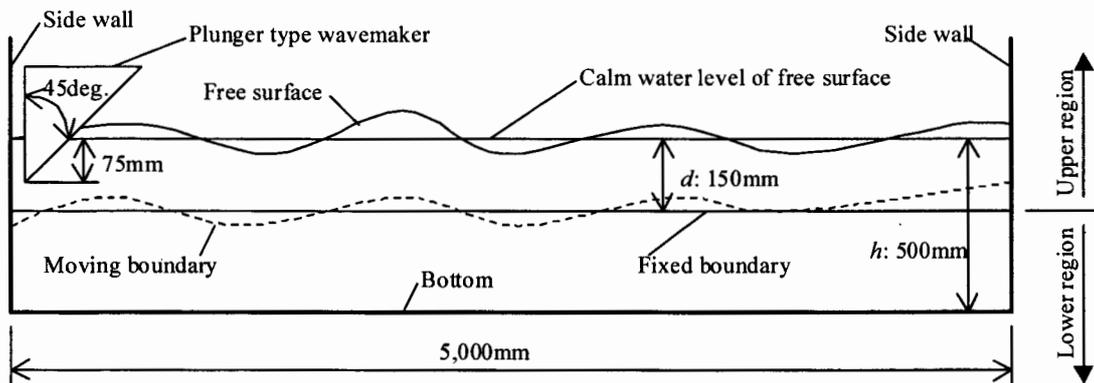


図1：2次元水路における造波問題の設定



図2：複合型計算法による2次元造波問題の計算例

表1：複合型計算手法による計算量削減効果の1例

	MPS Method	Hybrid Method
Total Number of Particles	101,234	31,204
Computation Time	69h50m	11h40m

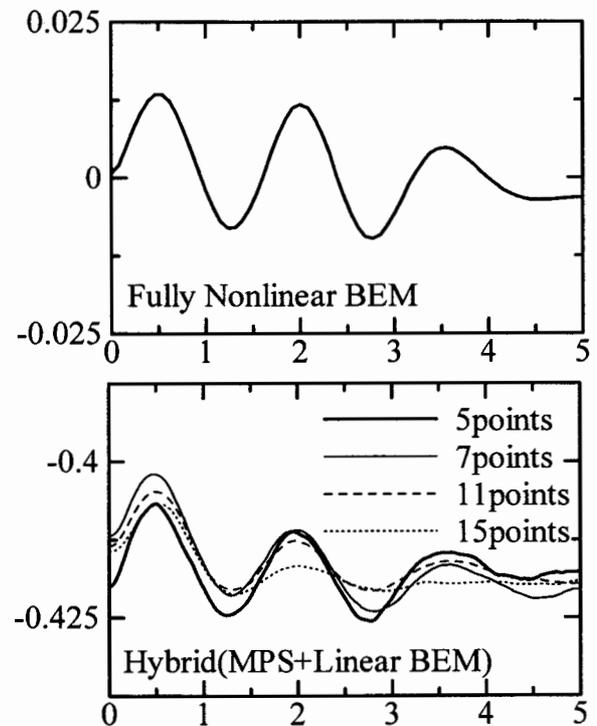


図3：速度ポテンシャルの空間分布に、移動平均による境界での平滑化が与える影響

カーボンナノチューブ/Ti 合金による金属基傾斜機能ナノコンポジットの開発

信州大学繊維学部
機能機械学科 倪慶清

1. 目的

カーボンナノチューブ (CNT; Carbon Nanotube) は機械的および電気的特性に優れ、熱的および化学的に安定性が高いなど、様々な利点を持つナノ材料である。その優れた特性から、CNT を強化材として、セラミクスや樹脂に分散した複合材料が研究され、金属基複合材料 (MMCs) においても、CNT を強化材とした研究がなされている。これらの研究から、CNT 強化 MMCs は優れた特性を持つことが部分的であるが分かってきている。しかし、CNT はぬれ性の悪さおよび高アスペクト比のため凝集しやすく、均一に分散させることが困難である。そして、金属と CNT の複合材料においては、比重差の問題もあり均一に CNT が分散した組織を持つ複合材料の作製は困難である。そのため、現在 MMCs における研究では十分な結果が得られていない。

近年、Al は軽量で、加工性、熱および電気伝導性に優れた金属であることから、幅広い分野で使用されている。しかし、純 Al では強度が弱いという欠点がある。その欠点を補うために、他の金属との合金化や、強化材に繊維およびセラミクスを用いて複合化することが考案されている。ところで、セラミクスと金属のように熱膨張係数が著しく異なる材料を組み合わせる場合、加熱および冷却時に大きな熱応力が発生し、材料が破壊してしまう。そこで、混合率を連続的に変化させた傾斜機能材料 (FGMs; Functionally Graded Materials) とすることで、熱応力による破壊を防ぐことができる。FGMs とは「ひとつの材料の中で組成や機能が連続的または段階的に変化している材料」と定義されており、均一な複合材料とは異なった、新たな機能を得られることが知られている。

本研究では、CNT の分散性を改善すべく表面改質を行い、CNT を強化材とする Al 基 FGMs を創製した。そして、創製した FGMs 内における CNT の分散状況を観察し、機械的特性の評価を目的とした。

2. 実験方法

◆試料 母材 Al は平均粒子径 30 μm の純 Al 粉末を用いた。強化材には直径 150 nm、長さ 10~20 μm の CNT (昭和電工株式会社製、VGCF) を用いた。本研究では、CNT の表面改質技術を行い分散性の評価を行った。CNT の凝集を防ぐために、CNT の表面改質を施した。CNT の分散性が良好な溶液を使用し湿式攪拌法を用いて Al/CNT 混合粉末を作製した。試料は Al に対する CNT 含有率 0.3 wt.%、0.5 wt.% および 1.0 wt.% の混合粉末を作製した。作製した Al/CNT 混合粉末を金型に入れ、ロードセルを用いて、円柱状圧粉体を作製した。作製条件は、圧縮圧 120 MPa、クロスヘッドスピード 5 mm/min、保持時間 10 min で常温片側圧縮した。

◆FGMsの創製 FGMs 創製方法として遠心铸造法を用いた。遠心力铸造法とは、熔融金属に遠心力を印加し、強化材と熔融金属との密度差に起因する遠心力の差により生じる移動速度差を利用して、組成傾斜を制御する方法である。遠心铸造を行うにあたり、遠心力を規格化したパラメータである重力倍数 G が CNT の傾斜化に大きく関連する。重力倍数 G は以下の式で与えられる。

$$G = \frac{2\pi^2 DN^2}{g} \approx 2DN^2$$

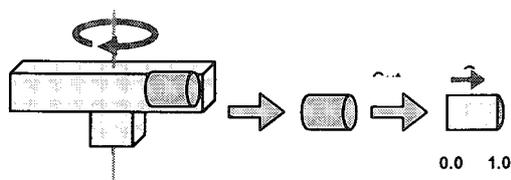


図1 試料の規格化位置

ここで、 D は回転直径、 g は重力加速度、 N は回転数である。

作製した圧粉体に対して遠心鑄造を行い、円筒状試料を創製した。創製条件は、Ar ガス雰囲気中において、熔融温度 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、重力倍数 $G=80$ および保持時間 60 min であった。創製したシリンダ形状 FGMs を遠心力方向に切り出し、図 1 のように遠心力方向に試料を $0.0\sim 1.0$ まで 10 分割に規格化した。そして、規格化位置毎における、試料の傾斜化を評価した。

◆性能評価 混合粉末時の CNT 分散状況を確認するために、光学顕微鏡 (OM; Optical Microscope) を用いて、作製した Al/CNT 混合粉末を観察した。さらに、創製した FGMs の母材内部における CNT の分散状況を確認するため、走査型電子顕微鏡 (SEM; Scanning Electron Microscope) を用いて観察した。X 線光電子スペクトル (XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy) を用いて、創製した FGMs を元素分析した。また、組織傾斜による機械的特性を調査するため、規格化位置毎におけるビッカース硬さを測定した。測定条件は荷重 2.9 N (300 gf)、保持時間 15 sec とした。

3. 結果および考察

◆CNT の混合粉末および FGMs における分散状態 混合粉末作製には、いろいろ試行錯誤の結果、溶媒を添加した湿式攪拌法を使用することとした。作製した混合粉末の OM 観察から CNT 凝集体を確認することができなかった。このことから、CNT の分散性は向上したと考えられる。創製した FGMs の SEM による組織観察の写真を図 2 に示す。試料を研磨した後では、CNT を確認することができなかった。これは、研磨による CNT の脱落が原因であると考えられる。そこで、試料を切り出したままの切り口を観察したところ、図 2 のようにわずかな隙間に入り込んだ CNT 凝集体を数点発見することができた。FGMs における CNT の分散は凝集体ではあるが、試料内部に分布していることが確認できた。

◆硬度分布 マイクロビッカース硬さ試験の結果、 $0.5\text{ wt.}\%$ CNT 添加で 37.6 Hv まで硬度が上昇し、純 Al より高い硬度を得ることができた。 $0.3\text{ wt.}\%$ CNT および $1.0\text{ wt.}\%$ CNT においては、純 Al の硬度に劣る結果となったが、硬度の傾斜化を得ることができた。また、元素分析の結果からも、強化材としての CNT が Al に影響を与えていることがわかった。

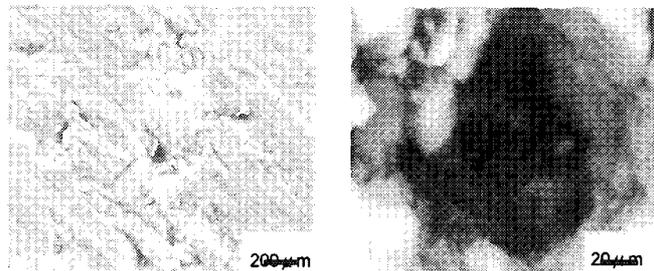


図 2 SEM 観察写真 ($1.0\text{ wt.}\%$ CNT)

4. 結論

本研究では、CNT の表面改質を行い、CNT の分散性の向上を評価したうえで、Al/CNT FGMs を創製した。その結果、CNT を溶液中に可溶化することおよび超音波攪拌を行うことにより、より良好な分散状態が示された。

XPS を用いて、創製した FGMs を分析した。CNT は確実に FGMs 内に含有され、硬度に影響を与えていることが確認された。遠心鑄造法を用いることにより、 $0.5\text{ wt.}\%$ CNT において、同条件で創製した純 Al より高い硬度を持つ、また硬度の傾斜化を得ることができ、Al/CNT FGMs 材料が創製できた。

5. 研究組織

研究代表者 倪慶清

研究組織 1. 信州大学繊維学部機能機械学科 倪慶清

2. 九州大学応用力学研究所 汪文学

曳航水槽を用いた境界層の遷移過程および乱流普遍則に関する基礎研究

名古屋大学工学研究科 辻 義之

1. 研究の背景

乱流境界層をはじめとする壁乱流において、壁面せん断応力の計測は、工学的応用のみならず、カルマン定数や平均速度プロファイルの確定など基礎的課題の解明をする上でも必要不可欠とされる。せん断応力の計測法には、クラウザーチャート、プレストン管法など速度分布型を暗に仮定する方法が簡便であるため、広く用いられてきた。速度の計測データを利用するという観点では、運動量積分方程式の各項を評価することから、せん断応力の算出を Prandtl(1927)がおこない、Schlichting(1979)が後に実験データのフィッティングから簡便な表記を導いたのは周知のとおりである。圧力勾配のない平板乱流境界層の局所摩擦抵抗に限れば、カルマンの定式化に従い Schoenherr が実験データを基に導いた経験式が広く利用されてきた（以降、K.S.式と略する）。平板抵抗の計測は、平板の局所抵抗と全抵抗を計測する場合でその手法は大きく異なる。後者の場合には、風洞ではなく水槽中に平板を曳航することにより計測する試みが報告されている。一方、平板の局所抵抗を計測する、かつ速度情報を用いない、手法として注目されるのが、浮動片要素とオイルフィルム法である。その代表例として大坂ら(1996)と Osterlund(1999)により計測された圧力勾配の無い平板乱流境界層の局所摩擦抵抗係数を比較してみると、レイノルズ数が小さい場合には、わずかな相違が認められ、レイノルズ数の増加とともに両者はよく一致するようになる。しかし、従来から信頼されてきた K.S.式と浮動片要素、オイルフィルムによる計測には約 5%の相違が存在する。このような大きな相違が現れた背景は、K.S.式の導出に際して何らかの仮定や実験上の制約があったものと推測される。そこで、本研究では K.S.式の導出過程を再度確認し、あらためて同様の実験をおこない、浮動片要素法やオイルフィルム法との相違について考察した。

2. 実験条件

実験は応用力学研究所深海機器力学実験水槽でおこなった。曳航台車に平板を設置して、一定速度で曳航した際の抗力を計測する。平板の設置方法は、(1) 検力計を介して直接に台車に設置する、(2) フロートを用いて平板を固定して自重をキャンセルする（図 1 参照）、の 2 種類の方法を試みた。前者には測定レンジ 20kg の検力計を用い、後者には測定レンジ 5 kg のビーム型ロードセルによって平板抗力を計測した。平板は 3.3m×1m×0.03m（平板 A）、4.3m×1m×0.03m（平板 B）のアルミ製で製作し、前縁は半楕円形（10:1）とした（ただし、重量を軽くするため内部はハニカム構造とし、発砲スチロールを詰めてある）。また、後縁はシャープエッジ（頂角 15°、長さ 0.3m）を取り付けられるようにした。シャープエッジを用いない場合には、平板背面の圧力を深さ方向に 4 点の位置で、小型圧力センサ（レンジ 70mmH₂O）により計測した。乱流への促進は、トリッピングワイヤ（直径：1.0mm, 2.0mm）を前縁から 20cm の位置に設置した。曳航台車の速度を 0.25～2.0m/s の範囲で 0.25m/s 刻みで変化させ、喫水は約 15cm 間隔で 4 条件変えて実験をおこなった。なお、計測データには電気ノイズや曳航台車の微小な振動が含まれるため、数値フィルタ（Wavelet）を用いて除去した。水面下 2 m まで水温変化は±0.5 であり、物性値の補正は不要と判断した。

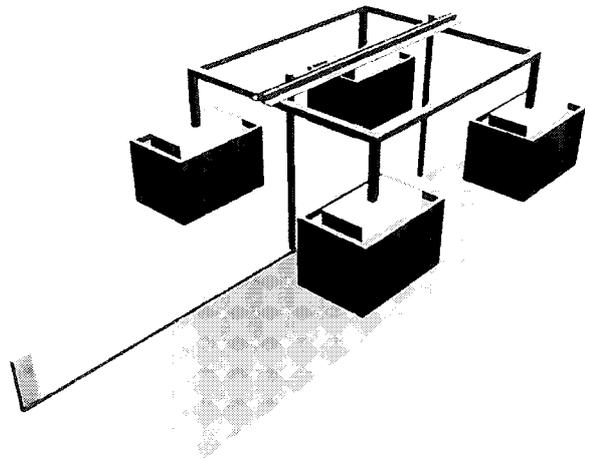


図 1 平板及びフロート部、先端がロードセル

3. 結果及び考察

主流速度 U_0 の一様流中に平板を設置したとき、片面（面積 A 、長さ L ）にかかる全抗力を F 、せん断応力を τ_w とする。全抵抗係数 C_F および局所抵抗係数 c_f は以下のように定義される。

$$C_F = \frac{F}{A \times \rho U_0^2 / 2} = \frac{1}{L} \int_0^L c_f dx, \quad (1) \quad c_f = \frac{\tau_w}{\rho U_0^2 / 2} = \frac{1}{2} \frac{u_\tau^2}{U_0^2}, \quad (2)$$

全抵抗係数 C_F を図 2 (a) に示した。記号の違いは、異なる喫水深さに対応する。喫水深さによらず、各計測結果は同一の傾向を示し、平板 A および平板 B についても同様であった。レイノルズ数が低い場合には抵抗係数は K.S. 式の値に近い値を示すが、レイノルズ数の増加とともに差異が大きくなる。現在の実験体系では、計測される全抗力にはおのずと以下の抗力が含まれることとなる；(a) 造波抵抗、(b) 平板下端面効果、(c) 圧力抗力、(d) トリップングワイヤ抵抗、(e) 水面上部での平板が受ける空気抵抗、である。造波抵抗は平板の曳航によって造られる波に与えるエネルギーに相当し、また、平板下端面で流れが三次元化することによって発生する抗力が (b) である。これらは喫水深さには依存しない。平板の厚さは有限であるために、リーディングエッジ、シャープエッジ形状に起因する圧力抵抗 (c) が生じる。また、トリップングワイヤ抵抗 (d) は、単なる抵抗ばかりではなく、水面ではトリップングワイヤからも波が造られるため、造波抵抗の一部にもなっている。抗力 (c)、(d) は喫水深さに依存してその大きさが変わる。抗力 (e) については、実測の結果、その影響はほとんど無いことが分かった。

この方法で計測される抗力には、造波抵抗 F_w 、圧力抵抗 F_p 、下端面抵抗 F_B 、トリップングワイヤ抵抗 F_T が含まれる。すなわち、

$$F = F_{plate} + F_w + F_B + F_p + F_T, \quad (3)$$

ここで、 F_{plate} が真の平板抗力である。 F_w および F_B は、喫水深さに依存しないため、喫水深さを変えた実験をおこないこれらの抗力を除去した。 F_p と F_T は、長さの異なる二種類の平板を用いた計測から除去する方法を考案した。曳航速度は、0.25 から 2.0 m/sec の範囲で 0.125 m/sec の間隔で変化させ、このとき達成される最大 Re 数は、 $Re_L \cong 10^7$ である。これは運動量暑さに基づく Re 数 $R_\theta \cong 10^4$ に相当する。

図 2 (a) は、平板を曳航した際に計測された効力 F を用いて計算された全抵抗係数である。実線は KS 式を表し、測定結果は、KS 式よりも大きな値を示している。これは、式 (3) に示したように、真の平板抗力以外の効力の影響である。そこで、喫水高さを変えることにより造波抵抗と下端面の抗力を補正した場合の全抵抗係数 $C_F^{(b)}$ を図 2 (b) に示した。当然のことではあるが、計測結果は KS 式により近くなる。圧力抵抗とトリップングワイヤ抵抗の補正は、長さの異なる 2 枚の平板の計測から補正をおこなった。即ち、抗力 $F_{plate} + F_w + F_B$ から計算される全抵抗係数 $C_F^{(c)}$ (図 2 (c)) を図 2 (b) と比較すると、KS 式よりも小さくなっている。これは、(圧力抵抗 + 下端面効力) が測定抗力 F に占める割合が大きいことを表している。4 つの効力をすべて補正し、真の平板効力 F_{plate} を用いて全抵抗係数を計算すると、KS 式よりも約 6% 小さくなることがわかった。Shoenherr は、全抵抗係数を計測した際に、圧力抵抗や造波抵抗の補正をおこなっておらず、その結果として抵抗係数を過大評価したものと考えられる。Shoenherr は K.S. 式の係数を定めるために他の多くの実験結果を参考にしているが、データのばらつきは大きく、これらのデータのばらつきに関して、抗力 (a) ~ (d) についての適正な補正がなされていないことが最大の原因ではないかと考えられる。

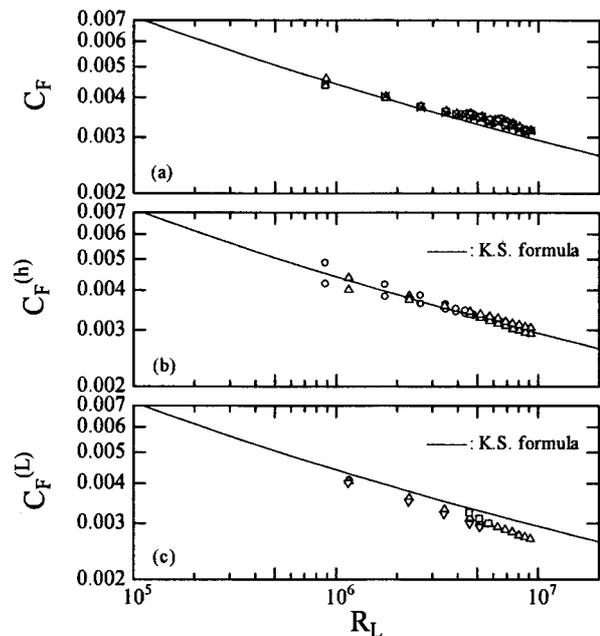


図 2 (a) 全抵抗係数、(b) 抗力 $F - F_w - F_B$ における抵抗係数、(c) 抗力 $F - F_p - F_T$ における抗力係数。

1. 目的

波浪エネルギーから電気的エネルギーを取得する波浪発電システムには数多くの方法が提案され、現在、その実用化の研究が世界各所で行われている。中でも、波浪エネルギーから空気エネルギーへ一次変換し、その後、空気エネルギーから電気エネルギーへ二次変換する浮体式振動水柱型は、現実的で最も実用化に近い方法とされている。しかし、これらのシステムは、波浪エネルギーから空気エネルギーへの一次変換性能を最大にする浮体形状が明確でないという課題がある。実験のみを用いて最適形状を求めることは困難であるから波浪中での浮体運動を予測する数値解析コードが必要である。

そこで、本研究では振動水柱型浮体式波力発電装置[後ろ曲げダクトブイ (BBDB)]を対象に、浮体に作用する流体力の計測実験を行った。この実験結果は数値解析コードの検証に有用である。

2. 実験装置と実験方法

本研究で用いた BBDB 模型及び座標系の概略図を Fig.1 に示す。強制動揺装置、検力計及び BBDB 模型の概略図を Fig.2 に示す。実験に用いた水槽の全体配置図を Fig.3 に示す。

本研究では静止状態にある BBDB 模型に規則波を作用させ、Diffraction 流体力を計測した。また、静水状態で BBDB 模型を Heave 方向、Pitch 方向に強制動揺させ、このときの反力と変位から Radiation 流体力を計測した。

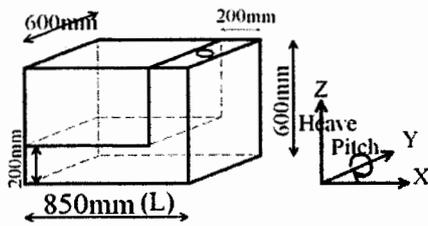


Fig.1 Model of BBDB

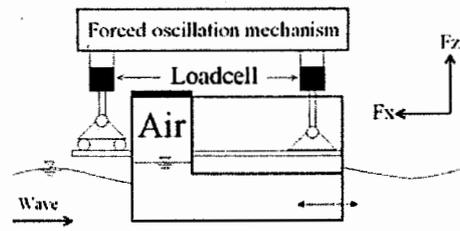


Fig.2 Experimental apparatus

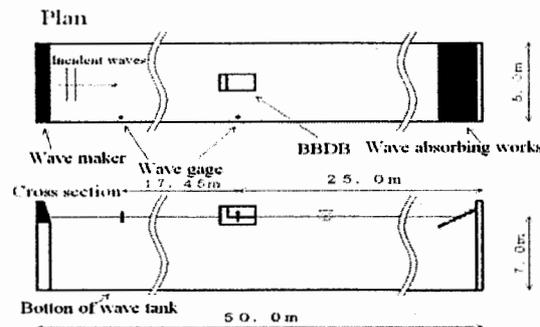


Fig.3 Tank configuration

3. 実験結果及び考察

Diffraction 流体力の実験結果を Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.4 は BBDB 模型の空気室内部圧力が変化する場合の結果、Fig.5 は空気室内部圧力が一定(=大気圧)の場合の結果である。Fig.4, Fig.5 共に横軸は λ/L 、縦軸は Diffraction 流体力の水平方向成分 (F_x)、鉛直方向成分 (F_z)、Y 軸周りモーメント (M_y) をそれぞれ無次元化した値である。ここで、 λ (m) は波長、 L (m) は模型全長とする。

本研究では Radiation 流体力は加速度に比例する付加慣性力と速度に比例する造波減衰力で構成されていると仮定し、計測値から付加質量(A33,A55)、および造波減衰係数(B33,B55)を求めた。Radiation 流体力の実験結果を heave、pitch の順に Fig. 6、Fig. 7 に示す。これらの図では共に横軸は周期(s)、縦軸は付加質量、造波減衰係数をそれぞれ無次元化した値である。

Fig. 4~7 の実験結果において空気室内部圧力が変化する場合と空気室内部圧力が一定の場合で変化がみられる。

4. 結論

- ① Diffraction 流体力については、 $\lambda/L=7\sim 9$ の場合で大きく、特に空気室内部圧力が一定の場合には非常に大きくなる。
- ② 付加質量、造波減衰係数については、いずれも空気室内部圧力が一定の場合の方が周期 2 秒付近の変化が大きい。この周期は Diffraction 流体力が大きく変化する時と同じ周期である。

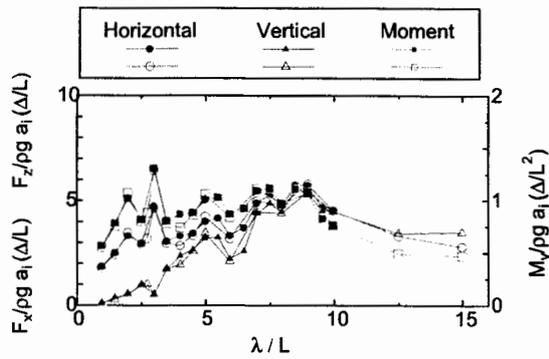


Fig.4 Diffraction force with top cover

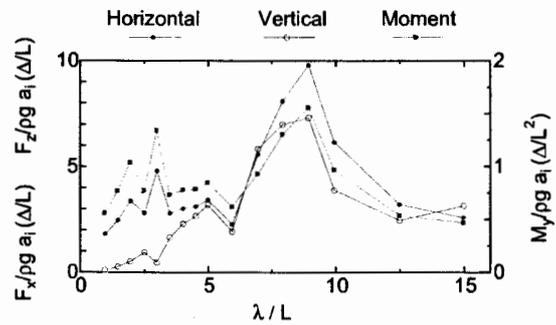


Fig.5 Diffraction force without top cover

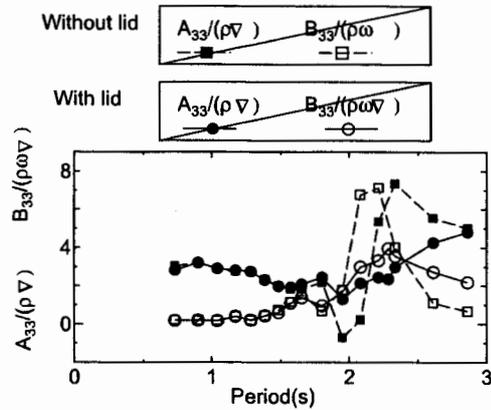


Fig.6 Added mass and Damping coefficient (Heave)

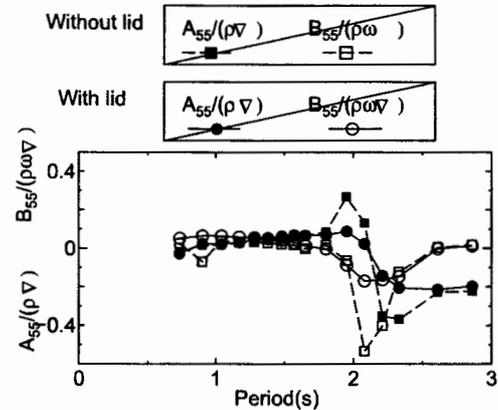


Fig.7 Added mass and Damping coefficient (Pitch)

研究組織

研究代表者： 永田 修一 佐賀大学海洋エネルギー研究センター教授
 研究協力者： 豊田 和隆 佐賀大学海洋エネルギー研究センター准教授
 研究協力者： 今井 康貴 佐賀大学海洋エネルギー研究センター助教
 所内世話人： 柏木 正 九州大学応用力学研究所教授

九州大学 応用力学研究所 研究集会 (19ME-S1)
「窒化物半導体の結晶成長に関する基礎研究」

研究代表者:平松和政(三重大学大学院 工学研究科)

所内世話人:寒川義裕(九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門)

日時 : 平成19年7月27日(金)~7月28日(土)

場所 : 九州大学 応用力学研究所 西棟 W601、W606

<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taiharou/index-j.html> [map 参照]

参加費 : 無料

7月27日(金)

■ **講演発表 13:50~17:00 (参加自由)** 応用力学研究所 西棟 W601

13:50~13:55

「研究集会の趣旨について」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

* **セッションA ; 薄膜・表面/界面** 13:55~15:30 司会 : 柿本浩一(九州大学)

13:55~14:15 (講演15分+質疑応答5分)

「窒化物半導体における成長機構の理論検討」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

14:15~14:40 (講演20分+質疑応答5分)

「励起窒素原子および励起窒素分子照射を用いる RF-MBE 法による Si 上 2H-AIN テンプレート成長」

大鉢忠 (同志社大学 工学部)

14:40~15:05 (講演20分+質疑応答5分)

「SiC 自己形成ナノファセット表面とヘテロ構造の形成」

田中悟 (九州大学大学院 工学府)

15:05~15:30 (講演20分+質疑応答5分)

「rf スパッタ法で作製した AIN 薄膜の微細組織と圧電特性」

桑野範之¹、蒲原敏浩²、秋山守人²

(¹九州大学産学連携センター、²産業総合研究所九州センター)

* **セッションB ; バルク・厚膜** 15:45~17:00 司会 : 寒川義裕(九州大学)

15:45~16:10 (講演20分+質疑応答5分)

「その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いた AlGaIn の MOVPE 成長」

平松和政 (三重大学大学院 工学研究科)

16:10~16:35 (講演20分+質疑応答5分)

「非発光電子遷移検出による半導体光吸収スペクトル測定」

福山敦彦、王萍 (宮崎大学大学院 工学研究科)

16:35~17:00 (講演20分+質疑応答5分)

「厚膜エピを目指した原料分子制御 HVPE 法: AIN, AlGaIn および InN」

額額明伯、熊谷義直、村上尚 (東京農工大学大学院 共生科学技術研究部)

7月28日(土)

■ 共同研究テーマの創出に向けた意見交換会 (要 事前予約) 応用力学研究所 西棟 W606
9:00~10:30 (自由討論)

事前予約・問い合わせ先 :

寒川 義裕

九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門

〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

TEL : 092-583-7742

FAX : 092-583-7743

E-mail : kangawa @ riam.kyushu-u.ac.jp

URL : <http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taiharou/index-j.html>

「研究集会の趣旨について」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

本研究集会では、薄膜成長・表面分析の観点およびバルク・厚膜成長の観点から、窒化物半導体成長の基礎についてご討論いただく予定です。また、両分野の研究者の積極的な意見交換をもとに、新たな共同研究テーマを創出することを目的としています。

「窒化物半導体における成長機構の理論検討」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

現在、III族窒化物半導体は青・緑色LED(Light Emitting Diode)や青紫色LD(Laser Diode)として広く利用されている。製品化に至っているデバイス材料としては、GaNとInNの混晶であるInGaNが主流であり、深紫外域の発光を示すAlGaIn系材料は実用化に至っていないのが現状である。これは、InGaIn系材料ではIn-N-In-N-Inジグザグチェーンクラスターが効果的な発光中心として働くため、非発光中心となる結晶欠陥が多く混入していても高効率の発光が得られること。また、AlGaIn系材料では、InGaIn系材料のような効果的な発光中心が確認されておらず、発光効率に対する非発光中心密度の寄与が大きいことに原因があると考えられる。すなわち、AlGaIn系材料を用いた光学デバイス開発では非発光中心となる結晶欠陥、特に現在の結晶に高濃度含まれている貫通転位の低減が重要となる。本研究では、理論的見地から窒化物半導体の成長機構を解析し、結晶欠陥の少ない高品質結晶の創製に向けた検討を行っている。本講演では以下の研究テーマについて、行った研究内容と得られた知見を紹介する；(1)モンテカルロ法によるInGaIn中の発光中心形成メカニズムの解析、(2)GaIn溶液成長における窒素輸送現象の熱流動解析、(3)化学反応を成長の駆動力とする新規AlN溶液成長手法の確立。

「励起窒素原子および励起窒素分子照射を用いるRF-MBE法によるSi上2H-AlNテンプレート成長」

大鉢忠 (同志社大学 工学部)

III族窒化物半導体結晶を用いる電子デバイスは半導体デバイスプロセスラインに使用可能なような大口径で、結晶中の格子欠陥特に転位を減少させたホモエピタキシャル用高品質基板が必要とされている。低転位ホモエピタキシャル成長用の基板成長として、溶液成長法やHVPE法が有利とされる中、溶液成長法やHVPE法用の3インチ種結晶としてSi上にヘテロエピタキシャル成長させた2H-AlNテンプレートを利用する事を目標としている。

ヘテロ基板としてSi(111)を用いSi基板上の成長初期過程にAl照射と窒化膜形成の2方法を利用した。窒化膜形成のために、誘導結合による窒素高周波プラズマ放電(RF放電)により生成される活性窒素の発生を検討し、反応に用いられる窒素原子と励起窒素原子および反応に直接関与せずGa、In、AlIII族金属原子の表面拡散を促進する励起窒素分子の生成を報告する。それらを利用したモード切替マイグレーションエンハンストエピタキシー(MC-MEE)により成長を行い、Al被覆の初期層の性質により六方晶2H-AlNの極性制御を行

うことを報告する。Si(111)の7x7構造清浄表面へAlを約1.8MLの初期被覆の後にそのAlと反応する量の原子窒素をSi上へ照射して窒化シリコンを形成後AIN成長を行うとAl極性に、過剰のAlを照射した場合や直接Si上へ1ML以下のAlを照射して γ 相と呼ばれる表面構造を形成後AINを成長させた場合はN極性が得られた。

「SiC自己形成ナノファセット表面とヘテロ構造の形成」

田中悟 (九州大学大学院 工学府)

傾斜SiC表面にはエネルギー安定構造として周期的ナノファセット(ナノ表面)が形成されることがわかっている[1,2]。この自己形成ナノ表面の形成物理を明らかにし、更にヘテロ系物質の形成へと応用することは、メソスコピックスケール領域($< 20\text{nm}$)のボトムアップテクノロジーとして有用である。既に我々は次世代ナノエレクトロニクスとして重要な材料であるグラフェンやワイドギャップ半導体(SiC, GaN)への応用に関して興味深い結果を得ている。本発表では、SiCナノ表面形成機構および構造ゆらぎに関して古典的表面弾性論に基づく考察を行い、更にグラフェン・SiON超構造[3]、ポリタイプGaNの核生成[4]の例を取り上げ「SiCナノ表面」の重要性に関して示したい。

- [1] H. Nakagawa et al., "Self-ordering of nanofacets on vicinal SiC surfaces", *Phys. Rev. Lett.* 91, 226107(2003).
- [2] M. Fujii and S. Tanaka, "Ordering distance of surface nano-facets on vicinal 4H-SiC(0001)", *Phys. Rev. Lett.*, July 5 (2007), in press.
- [3] T. Shirasawa et al., "Epitaxial Silicon Oxynitride layer on a 6H-SiC(0001) surface", *Phys. Rev. Lett.* 98, 136105(2007).
- [4] M. Ebihara et al., "Nucleation and growth mode of GaN on vicinal SiC surfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L348(2007).

「rfスパッタ法で作製したAIN薄膜の微細組織と圧電特性」

桑野範之¹、蒲原敏浩²、秋山守人²

(¹九州大学産学連携センター、²産業総合研究所九州センター)

窒化アルミニウム(AIN)はこれまで既に坩堝材料からSAW素子材料に亘る広範な分野に応用されており、古くて新しい材料といえる。rfスパッタ法で作製したAIN薄膜は容易にc軸配向を示すことから、我々はAINが高い耐熱性示すことに注目して、AIN薄膜を種々の環境下で使用できる圧電素子材料として応用する開発研究を進めてきた。これまで、AIN薄膜の圧電特性はc軸配向度に強く依存すると信じられ、いかにして配向の振れを小さくするかが求められてきた。しかし、実際にはAIN薄膜の圧電特性は配向性のみならず結晶極性分布が大きな要因であることが明らかになった。本研究では、Ti, Moなどの金属中間層によるAIN膜のc軸配向度の改善を、主に透過型電子顕微鏡とX線回折実験で解析した。その結果、metal/AINの局所的エピタキシャル関係(local epitaxy)が重要な役割を果していることが確かめられた。スパッタ条件による圧電特性変化を明らかにするために、極性分布をピエゾ応答顕微鏡(PFM)で評価した。これらの結果を基に高機能圧電素子材料としてのAIN薄膜について議論する。これらの成果は、スパッタ以外の方法で成長させたAIN系機能材料に対しても有益な情報となる。

「その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いたAlGaInのMOVPE成長」

平松和政 (三重大学大学院 工学研究科)

波長300nm以下での深紫外領域での発光デバイスではAlモル分率が50%以上のAlGaInが必要になる。そのエピタキシャル層には発光効率を低減させる転位が通常 10cm^{-2} 以上と多数存在するので、発光デバイスの高性能化には転位密度低減が不可欠である。転位低減方法には選択横方向成長(ELO)が主に用いられているが、AlGaInではマスクを用いた選択成長が困難であるため、基板表面に凹凸状にエッチングを施した加工基板が一般に用いられている。

そこで下地層として、その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いてAINテンプレート基板の上にストライプ状のGaInファセット構造を作製し、その上にAlGaInを成長させ転位密度の低減を試みた。反射光モニタリングを用いてその場観察を行いながらGaInの選択成長を行うことで、{11-20}面と(0001)面からなるファセット構造の精密な制御が可能になった。さらにそのファセットを有するGaIn上に $\text{Al}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{In}$ の選択成長を行った結果、クラックの発生が無くかつ転位密度が2桁程低減した。AlGaInエピ層の高品質化のためには、下地GaInのIn-situ FACELOが有効であることを実証した。

「非発光電子遷移検出による半導体光吸収スペクトル測定」

福山敦彦、王萍（宮崎大学大学院 工学研究科）

半導体材料評価においてその光吸収スペクトルを測定することは大変重要である。しかしながら従来の入射光と透過光の強度比から求める手法では光学的に非常に厚いあるいは薄い材料での測定は困難である。そのためフォトルミネッセンス法(PL)やフォトリフレクタンス法(PR)が主に用いられている。共に高い分解能をもち幅広い温度範囲での測定が可能であるが、何れも光吸収の閾値はわかるものの、光吸収スペクトルの形状、すなわちバンドの電子状態密度は分からない。そこで我々は、重要な物理素過程でありながらこれまで測定されずにいた非発光電子遷移に注目している。同過程はそのときに放出されるフォノン(熱)を検出することによって評価が可能で、これに基づき圧電素子光熱分光法(PPTS)を開発した。本講演では PPTS によるこれまでの研究成果を報告する。InGaN 薄膜に関する研究では、多孔質化により PR スペクトルが得られない In 組成比においても感度よく光吸収スペクトルが得られる事が分かった。また GaInNAs 単一量子井戸構造に関する研究では、フィッティングにより井戸内の励起子吸収と2次元化された離散化準位間吸収を明確に分離できたことを報告する。

「厚膜エピを目指した原料分子制御 HVPE 法: AlN, AlGaN および InN」

瀬戸明伯、熊谷義直、村上尚（東京農工大学大学院 共生科学技術研究部）

高品位 GaN 自立基板結晶の成功が次世代 DVD を実現化したことから明らかなように、新機能・高機能素子のためには高品位の窒化物自立基板が不可欠である。現在、実用化されている GaN は大きな成長速度が得られる一塩化ガリウム(GaCl)とアンモニア(NH₃)を原料とした HVPE 法により成長されている。一方、GaN と同様に、AlN および InN 結晶の HVPE 成長を考えると、大きな障害が存在する。AlN の HVPE では、原料である AlCl₃ と石英が反応し石英管の破損およびエピ層内への Si の汚染が起こる。また、InN の HVPE の場合は InCl₃ と NH₃ との反応の自由エネルギー変化(ΔG)が小さく反応が理論的に進行しない。

これまで、我々は①原料分子反応を制御し石英と反応しない AlCl₃ を原料とすることにより、AlN の HVPE に成功した。さらに、② AlCl₃-GaCl-NH₃ 反応系により、AlGaN 三元混晶の HVPE 成長への道筋を立てた。③ InN の HVPE に関しては、気相に安定して存在する InCl₃ に対して分子が持つ全エネルギーの大きな(不安定な) InCl₃ を原料に用いる HVPE 法で InN 成長に成功している。

本研究会では、原料分子を制御した HVPE の反応メカニズムを示すと共に、厚膜基板結晶の理想的な成長方法について議論したい

(研究集会)

戸田格子40周年 非線形波動研究の歩みと展望

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科 西成 活裕

研究集会の目的

非線形波動研究は1960年代から本格的になり、今日に至ってはほとんど全ての物理・数学の分野で中心的なテーマとなっている。特に1960年代から1970年前半の日本人による貢献、たとえば、戸田による戸田格子の発見、谷内・矢嶋による逓減摂動法の開発、広田による直説法の考案などはその後の非線形波動研究に多大な影響を与え続けている。中でも、戸田格子は非線形波動研究において最も深い意義を持つもので、その発見のおかげでソリトンの統一理論が進み、また他の分野への応用への道も開かれた。

本年度は、この戸田格子発見のちょうど40周年にあたる記念すべき年である。そして九州大学応用力学研究所は、当時からの非線形波動研究のまさに中心拠点の一つである。そこで、応用力学研究所において戸田格子の誕生を記念する共同研究集会を開催することは重要な意義があり、また非線形研究者の望んでいる声そのものであるといえる。本研究集会では、戸田格子を中心にその研究の歴史を概観するとともに、今後の非線形波動研究に向けての新しい指針を皆で議論し合える場にしたいと考えている。とかく細分化されやすい現在の研究の状況に対して、戸田格子という軸を中心に据え、異分野の研究者が情報を交換し合い、また世代を超えた対話も生まれるようないきいきとした研究集会を開催する予定である。

成果の概要

本研究集会では3日間で特別講演5件、一般講演34件(内ポスターセッション16件)の計39件の講演が行われた。また2日目には戸田格子の研究を中心とした研究発表を行い、その歴史から最先端までの研究を概観することができた。そして戸田盛和先生ご本人のビデオインタビューを会場に流し、若手研究者へのメッセージや研究者として成功する秘訣などの興味深い話をしていただいた。さらに特別賞として広田良吾先生を選出し、その研究業績を称えた。2日目の夕方にはポスターセッションが行われ、大学院生など若手研究者を中心に実験から理論までレベルの高いプレゼンテーションと活発な討論が続き盛況であった。

特別講演は1件が最近発展しているパルペ方程式のレビューであり、残りの4件は戸田格子に関連した話題であった。まず、数式処理ソフトを用いた方程式の解の表現について、そして可積分な離散方程式系における戸田格子の果たしてきた役割について、また応用的な話題として戸田格子を用いたソリトンの異常透過現象、そして最後にソリトン方程式に内在する不安定現象など、様々な分野からの話題提供であった。一般講演で提供された話題も物理・工学から数学まで多岐に渡った。大まかに分類すると(1)非線形波動・非線形力学系の実験と理論(2)離散系・max-plus系・セルオートマトン系の理論とその交通流・生物現象への応用(3)可積分系の理論(4)離散可積分系と数理工学や幾何学・解析学・表現論などとの関わり、となる。

本研究集会への参加者は100人近くへのぼり、連日分野を越えて活発な討論と情報交換が行われた。特に大学院生や学部生の参加と発表が代表者の予想以上に多かったことを注意しておきたい。非線形波動と非線形力学系の中に新しい物理と数理的構造を見だし、そこで培われた技法が別の分野に応用され、またその分野との相互作用で新たな数理・物理が発見されていく、参加者はそのダイナミックな発展を間近に感じ、新たな研究の展望を得ることができた。そして、このような有機的な結びつきの根本の一つをなすものが、戸田格子の発見であったことは疑いようがない事実である。数理の根幹に関わる発見がこのように他分野に波及していくことは大変素晴らしい、ということを実感できたプログラムであった。

またこの研究会は日本評論社の数学セミナーという雑誌にも取り上げられ、取材を経て2008年3月号に特集された。そこで戸田格子40周年の記念の論文が本研究会の研究発表をもとにして掲載され、さらに戸田先生のビデオインタビューも活字になり、多くの研究者や一般の人々の目に触れることとなった。

本研究集会は話題が工学から数学まで多岐に渡り、かつ、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。非線形科学のような横断的な分野ではこのような場を持つことが大変重要であって、応用力学研究所がこの貴重な場を提供していることは大きな意味を持っている。参加者を代表して厚く感謝する次第である。

講演プログラムと概要

11月7日(水)

○ 13:00~13:30 再帰方程式の無限個の生成について

齋藤 暁, 齋藤 革子 (横浜国立大・工)

論文 JPSJ 76/024006 に於いて, 可積分写像の周期点集合は周期点毎に異なる多様体を成すことを示した. その結果, 任意の初期値に対して全ての解が一定の周期を持った周期解となる方程式 (再起方程式) が幾らでも得られることを示す.

○ 13:30~14:00 Appell の補題と KdV 保存則再訪

山本 悠, 長瀬 昭子, 大宮 真弓 (同志社大・工)

2階常微分方程式の2つの解の積の満たす方程式に関する Appell の補題という, 極めて古典的かつ初等的な事実に依拠して, Deift-Trubowitz 型跡公式を援用しつつ, 古くから知られている無限個の KdV 保存則の局所密度について報告する.

○ 14:15~14:45 E 型アフィンワイル群対称性を持つ加法的離散 Painlevé 方程式の超幾何解

梶原 健司 (九州大・数理学)

Sakai によって分類された2階の Painlevé 系のうち, $E_6^{(1)}, E_7^{(1)}, E_8^{(1)}$ 型のアフィンワイル群対称性を持つ加法的離散 Painlevé 方程式のもっとも簡単な超幾何解を構成する. これによって超幾何解を許容するとされる2階の全ての Painlevé 系に対して, 解として現れる超幾何関数の同定が完了したことになる.

○ 14:45~15:45 $E_8^{(1)}$ 型 q -Painlevé 系の超幾何タウ関数 (特別講演)

増田 哲 (神戸大・理)

Painlevé 方程式および離散 Painlevé 方程式は, 超幾何関数およびその離散類似で表されるような特殊解を持つ. 本講演では, $E_8^{(1)}$ 型 q -Painlevé 系の超幾何解に対するタウ関数の構成について述べる.

○ 16:00~16:30 代数的ベーテ仮説によるスピンレス・フェルミオン模型の相関関数

茂木 康平 (東京大・理), 堺 和光 (東京大・総合文化)

フェルミオン系を直接扱うことのできる量子逆散乱法を用いてスピンレス・フェルミオン模型の形状因子や相関関数 (グリーン関数) の厳密な積分表示を求め, 自由フェルミオン点で既存の結果を再現することを確かめた.

○ 16:30~17:00 トロピカル楕円曲線と超離散 QRT 系

野邊 厚 (大阪大・基礎工)

超離散 QRT 系はトロピカル楕円曲線の群構造の定める力学系であることを示す. さらに, トロピカル楕円曲線の Abel-Jacobi 写像を用いて, 超離散 QRT 系をトロピカルヤコビ多様体上で線形化し, 基本周期に関する公式を導く.

○ 17:00~17:30 拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析

柳澤 大地, 友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究で, 避難設計において重要な出口から人が単位時間あたりに何人脱出できるかを表す流動係数について, 実験・シミュレーション・理論の三つの方法を用いて研究を行った. 実験では障害物を出口の前に設置すると, 流動係数が大きくなるという結果が得られた. シミュレーションではフロアフィールドモデルの人どうしの衝突を表す衝突パラメータを定数から衝突に関わった人数の関数へと拡張することにより, 実験結果を再現できた. また理論では, 過去の我々の研究成果である流動係数の解析の近似精度を上げることに成功し, よりシミュレーションと一致させることができた. また障害物が流動係数を増加させる原因も考察し, 障害物の位置を変えることによって流動係数が変化することも解析的に調べることができた.

11月8日(木)

○ 9:30 ~10:00 戸田格子と渋滞学

金井 政宏 (東京大・数理科学), 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では, 戸田方程式のベックレント変換である Kac-van Moerbeke 系と厳密解を持つ交通流モデルとの関係を明らかにし, KM 系の力学的意味づけを行うと同時に可積分理論の渋滞学への応用を示したい.

○ 10:00~10:30 戸田方程式と微分幾何

井ノ口 順一 (宇都宮大・教育)

1990 年台以降, 2 次元戸田方程式がさまざまな微分幾何学に登場することが明らかになった. 本講演では微分幾何学と戸田方程式のかかわりについて概説する.

○ 10:45~11:45 Exploring the Toda lattice with 3D-XplorMath (特別講演)

Martin Guest (首都大学東京・理工)

We shall demonstrate the software 3D-XplorMath, which contains a series of “exhibits” on lattice dynamics - including, of course, the Toda Lattice. This software was written by Richard Palais and Hermann Karcher in the 1980s, to investigate minimal surfaces. It has been expanded in several directions since then, and can be used for both research and educational purposes. We shall demonstrate some examples of lattice dynamics, in particular the Fermi-Pasta-Ulam experiment. After that we shall mention some recent applications of the Toda Lattice in pure mathematics, such as in quantum cohomology theory.

○ 13:00~14:00 Toda equations as paradigms of integrable (continuous, discrete and ultradiscrete) systems (特別講演)

Basil Grammaticos (パリ第7大学), **Alfred Ramani** (エコル・ポリテクニク)

We investigate the singularity structure of the Toda system. The approach used in this study is through the Painlevé property for differential systems and its discrete analogue, known as singularity confinement. We show that the Toda systems satisfy this integrability criterion. Both discrete/continuous and fully discrete versions of the Toda lattice are examined as well as an extension to the domain of ultradiscrete, cellular automaton-like systems. For the latter a recently proposed integrability criterion is implemented.

○ 14:00~15:00 接合戸田格子におけるソリトンの異常透過 (特別講演)

久保田 陽二 (分子科学研究所), **小田垣 孝** (九州大・理)

非線形媒質間の接続部におけるソリトン散乱を解析するモデルとして2つの戸田格子を線形格子で結合したものを用い、ソリトン散乱を数値シミュレーションにより解析した。透過ソリトンのエネルギーを用いて透過係数を定義し、様々なパラメータについて系統的にソリトンの透過率を求めた。その結果、ソリトンの共鳴透過と遅延透過という2つの異常な透過現象を発見した。共鳴透過の理解を深めるために入射ソリトンの振幅の小さい場合と大きい極限について、共鳴透過の起こるパラメータを解析的に求めた。また、遅延透過が起こるには、準局在現象の存在と、2つのばねの運動の時間スケールの一致が重要である事を示した。

○ 15:15~16:15 ソリトン方程式の不安定解の超離散極限用 (特別講演)

広田 良吾 (早稲田大学名誉教授)

差分KdV方程式や戸田方程式の解 U は2種類に分類される。一つは値が $U > 1$ となる解で超離散化すると $u > 0$ である。これを正の解と呼ぶ。もう一つは値が $1 > U > 0$ となる解で超離散化すると $u < 0$ である。これを負の解と呼ぶ。差分方程式の負の解は不安定な解である。しかし、負の解は超離散化すると安定な解になる。正の解と負の解の衝突によって新しい現象が観測される。

○ 16:20~17:00 戸田先生からのメッセージ (ビデオ)

戸田格子秘話, 成功する研究とは? 研究者へのメッセージ

戸田格子40周年記念賞として広田良吾先生を表彰

○ 17:10~18:30 ポスターセッション

(1) 結合振動子の同期現象と非線形発展方程式

山本 悠, 大宮 眞弓 (同志社大・工)

本報告では、ある種の近接接合型の結合振動子の同期現象をその結合振動子の連続極限に対応する非線形発展方程式の解の特性との関係を Kuramoto の秩序変数を用いた数値実験により考察する。

(2) KP方程式の多ソリトンの最大振幅と Extreme Wave の生成

丸野 健一 (UTPA), **Gino Biondini** (SUNY-Buffalo), **及川 正行, 辻 英一** (九州大・応力研)

KP方程式の多ソリトン相互作用時における振幅の最大値を厳密に求める方法について報告する。この方法を用いて、通常よりも振幅が大きく増幅される場合を分類する。この機構は海洋における extreme wave 生成機構のひとつとなりうる。

(3) 首都高にみる膨張衝撃波

社本 大輔 (東京大・工)

首都高に発生する渋滞現象を流体力学的な視点から考える。流体力学で発展した特性曲線の議論を車の流れに応用することで交通流でも衝撃波が生成されることを述べる。また交通流で流体力学では起こりえない膨張衝撃波が生成される可能性についても考える。

(4) 特異値分解を用いた画像圧縮方法に関する研究

笹田 昇平, 近藤 弘一 (同志社大・工), **岩崎 雅史** (京都府大・人間環境)

特異値分解を用いた Kakarala-Ogunbona の画像分解アルゴリズムは個々の画像から分解フィルタを

抽出する。そのため、画像の性質を含んだフィルタの生成が可能である。本手法の画像圧縮への応用について考察を行う。

(5) 大域的情報に基づく時間発展ルールを持つ二次元 CA について

中村 伸也 (早稲田大・理工), 岩尾 昌央 (東京大・数理科学), 岩尾 昌央 (早稲田大・理工)

大域的情報に基づき時間発展する二次元 CA を構築する。この CA には孤立波のようなパターンが存在し、そのパターン同士の衝突ですり抜けや消滅が起こる。また、様々な拡張が可能でありその実例をいくつか示す。

(6) 対面 2 粒子流における流動-凝固相転移

鈴木 迪子, 飯塚 剛 (愛媛大・理工)

通路を対面的に流れる 2 種類の粒子について流動-凝固相の転移を統計的に調べた。排除体積的なセルオートマトンモデルを用いて、流れのライフタイムを測定し頻度分布を調べると指数減衰していることが分かり、平均ライフタイムを求めることが出来た。粒子数をパラメタとしてライフタイムが無窮大となる臨界点を推定した。同様の手法を用いて左右向き進行粒子数をパラメタとした平面上で流動相と凝固相に分離し相図を作成した。相図では高密度の異常現象を発見した。

(7) 表面の温度分布を用いた浮遊液滴の振動制御

崔 大宇, 榎 祐作 (東京大・工)

宇宙空間での無容器冷却技術で、液滴の振動制御が問題になっている。本研究では、液滴の表面の温度分布を与えることで表面張力を制御し、液滴の振動を抑えることを提唱する。

(8) Hillman-Grassl 対応の明示公式

足立 進吾 (京大・情報)

Robinson-Schensted-Knuth 対応と呼ばれる組合せ論的アルゴリズムはクリスタル基底の変換という表現論的意味付けを持つと同時に、「逆超離散化」により離散可積分系との関係も知られている。この報告では RSK 対応の一つの拡張と考えられる組合せ論的アルゴリズム、Hillman-Grassl 対応について、有理変換類似を導入し、離散可積分系の手法を応用することで対応の明示公式を与える。

(9) 予測を取り入れたフロアフィールドモデルによる人の対向流のシミュレーションと実験

須摩 悠史, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では、他人の動きを予測して回避する効果を持たせる Anticipation Floor Field を導入したフロアフィールドモデルによる、人の対向流のシミュレーションを行った。その結果、予測の強度や距離により平均旅行時間や衝突回数が増加することがわかった。また、シミュレーションに合わせて 30 人ほどの規模で行った実験の結果との比較、検討も行った。

(10) 付着と脱離を許した多成分 ASEP に対する一考察

有田 親史 (東京大・理)

1次元格子上的各サイトで、粒子の付着と脱離を許した多成分の非対称単純排他過程 (Asymmetric Simple Exclusion Process) を考える。系の時間発展は連続時間のマスター方程式に従うものとし、遷移率は各サイトまたは各ボンドに依存しているとする。本研究では定常状態が局所的な重みの積で書けるためのパラメタ (遷移率たち) に対する条件を導いた。このとき局所的な重みはパラメタから作られるある行列の行列式の形で書けることを示した。

(11) 交互配置化による織込部交通流の渋滞改善策

西 遼佑 (東京大・工)

本稿では、二車線上の車を自発的に交互配置化させ、織込部交通の渋滞を改善する計画を提案する。SOV Model に、隣接車線同士の車が反発する効果を付加し、車を交互配置化する交通流モデルを作成する。Simulation の結果、減速効果による反発作用を加えた場合、交互配置化が誘起され、平均速度が増加し、衝突事故の危険性も下がることが分かる。

(12) Potential Kaup-Newell (Derivative NLS) 方程式の解公式

土田 隆之 (岡山量子科学研究所)

Kaup-Newell 型の Derivative NLS 方程式の解は、通常、Chen-Lee-Liu 型や Gerdjikov-Ivanov 型といった他の Derivative NLS 方程式の解に変数変換を施して、導出される。しかし、それでは、煩雑な表式になってしまう上、potential Kaup-Newell 方程式の解を与えることができない。この講演では、potential 変数に対する直接的で簡潔な解の公式を与える。

(13) CA による微小管の伸縮を考慮した分子モーターの渋滞解析

野口 義朗, 西成 活裕 (東京大・工)

脳内の神経細胞は中心から軸索という長い突起が一本伸びており、他の神経細胞とコネクションをとっている。その軸索内には神経の中核から末端へと様々な物質を運ぶ流れが存在するが、今回はそこでの運び屋である分子モーターに着目した。

この分子モーターは軸索内に散在する微小管という細い管にそって物質を運ぶが、この分子モーター

がどこかで詰まってしまうと神経の末端部に十分量の必要物質の供給が行われず脳の活動に支障をきたす。また、微小管は両端で伸縮が絶えず行われている。

C Aによる分子モーターのモデル化については過去、様々な研究があるが、微小管の伸縮まで考慮したものはない。

そこで、セルの総数を時間ごとに変化させるというA S E P拡張型のモデルを用いて、分子モーターの粒子の振る舞いを調べてみた。その結果、ノーマルのA S E Pと比べて伸縮が流れの混雑をある程度緩和することが確かめられ、相図上においてもS W相が右にずれF R E E相が拡大し、代わってJ A M相が縮小するなど、全体模様がA S E Pにおける基本の相図から変化することがわかった。

(14) 系を不変に保つベクトル場による摂動問題の解の構成方法

巖佐 正智 (名古屋大・理)

常微分方程式における摂動解を構成する際に、その方程式を不変にするベクトル場を導入することにより、ある次数における解から次の次数の解を構成するための漸化式を一般的な形で導出することができたので報告する。

(15) 斜面を転がる球と粉粒体モデル

佐原 亨, 西成 活裕 (東京大・工)

斜面を転がる鉄球を衝突させる実験とそれを模したシミュレーションを行い、その様子を巨視的な粉粒体とみなしてアプローチを試みる。また、衝突の伝播の様子を流体における衝撃波としてとらえて考える。

(16) 拡張結合型バーガス方程式による多車線交通流モデル

山田 剛 (東京大・工)

多車線交通流モデルの一つとして拡張結合型バーガス方程式によるモデルを提案する。一般的な結合バーガス方程式に流出入項を導入した本モデルが、任意の n 車線において解析的に解ける事を示す。

11月9日 (金)

○ 9:30 ~10:00 超離散ソリトン方程式の行列式解

長井 秀友, 高橋 大輔 (早稲田大・理工)

超離散戸田方程式, 超離散 mKdV 方程式, および可変容量箱玉系を表す非自励超離散 KP 方程式について、行列式の定義から符号を取り除いたパーマネントの超離散化によってソリトン解を与えた。また、この新しい形式のソリトン解とすでに知られている摂動形式の超離散ソリトン解との関係を示した。さらに解の証明について、差分ソリトン解の証明を援用することなく、超離散方程式におけるマックスープラス演算で閉じた形で証明を与えた。

○ 10:00~10:30 離散時間戸田格子から得られる再帰方程式について

斎藤 革子 (横浜国立大・工), 斎藤 暁

講演「再帰方程式の無限個の生成について」で得られた結果を離散時間戸田格子に応用した。参照 ArXiv math-ph/0612084 (J.Phys.A to appear)

○ 10:45~11:15 Fano resonances at light scattering by a finite obstacle and their modeling by a discrete chain

Michael I. Tribelsky (九州大・数理, Moscow State Inst. Rad. Electr. Aut.), Sergej Flach (Max plank Inst.), Andrey E. Miroshnichenko (Austr. Nat. Univ.), Andrey Gorbach (Univ. Bath), Yuri S. Kivshar (Austr. Nat. Univ.)

It is shown that elastic resonance scattering of light by a finite size obstacle with weak dissipation is analogous to quantum scattering by a potential with quasidiscrete levels and exhibits Fano resonances. Localized plasmons (polaritons), excited in the obstacle by the incident light, are equivalent to the quasidiscrete levels, while the radiative decay of these excitations plays exactly the same role as tunnelling from the quasidiscrete levels for the quantum problem. Mie scattering of light by a spherical particle and an exactly solvable 1D discrete model with non-local coupling simulating wave scattering in systems with reduced spatial dimensionality are discussed as examples.

○ 11:15~11:45 同次式ポテンシャル系の超可積分性の必要条件

吉田 春夫 (国立天文台)

同次式ポテンシャル系に対する既知の可積分性の必要条件をさらに制限する形で、超可積分性の必要条件を得た。その条件は直線解の周りの変分方程式を変換して得られるガウスの超幾何微分方程式の2つの一次独立な解が共に代数関数となる、と言う条件から導かれる。結果を中心力ポテンシャルに適用すると、ケプラー問題および等方調和振動子のみが条件を満たすことが確認できる。

○ 13:00～13:30 成田空港への応用に向けたイベントモデルの紹介

木村 紋子, 柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

イベントモデルは人の出入りがある現象に対して, マクロな滞在人数変化を把握するためのモデルである。本講演ではこのイベントモデルの厳密解を求め, 安定性の証明を紹介した。またイベントモデルのシミュレーションと実際のイベントでの観測を比較し, イベントモデルが妥当なものであることを示した。更にイベントモデルの拡張を数種類紹介し, より現実の現象にモデルを近づけるよう努力した成果を発表した。

○ 13:30～14:00 非線形シュレーディンガー方程式の記述する大規模乱流構造

佐々 成正, 町田 昌彦 (日本原子力研究開発機構), 坪田 誠, 小林 未知数 (大阪市大・理)

非線形シュレーディンガー方程式 (斥力系, 空間3次元) は多数の量子渦糸が絡まり合った量子乱流状態を記述する。最近, この量子乱流と通常乱流の中間に位置する大規模量子乱流構造を見出したので, それについて報告する。

○ 14:15～14:45 $(-1)^M(d/dx)^{2M}$ に対するディリクレ・ノイマン境界条件境界値問題と対応するソボレフ不等式の最良定数

山岸 弘幸 (大阪大・基礎工), 亀高 惟倫 (大阪大名誉教授), 永井 敦 (日本大・生産工)
渡辺 宏太郎 (防衛大), 武村 一雄 (日本大・生産工)

リーマンゼータ関数 $\zeta(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n^{-z}$ ($\text{Re } z > 1$) の特殊値 $\zeta(2M)$ に変分学的な意味づけを行った。

$(-1)^M(d/dx)^{2M}$ に対するディリクレ・ノイマン境界条件境界値問題を考える。グリーン関数はあるヒルベルト空間と内積のもとで再生核となる。対応するソボレフ不等式の最良定数はグリーン関数の対角線値の最大値である。離散変数の場合についても考察した。

○ 14:45～15:15 ソリトン方程式に付随した確率過程と逡減摂動法

矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 宇治野 秀晃 (群馬高専)

講演者は, サインゴールドン方程式や非線形シュレーディンガー方程式に関連した確率過程を構成し, その振る舞いを調べてきた。これらの方程式は逡減摂動法によって関連づけられているが, 確率変数のレベルでその対応がどうなっているか検討し, 確率変数の振る舞いを解釈する。

○ 15:30～16:00 人の発進波・停止波シミュレーション～人の反応の速さについて～

友枝 明保, 柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

人が歩き出すときや止まるときの反応の速さというものは一体どれくらいだろうか? 本研究では, 人が歩き出すときや止まるときの反応の伝播速度を実験による測定し, その発進波・停止波の伝播速度に対するシミュレーションと理論計算を行うことで定量的な結果を得た。測定実験から, 発進波・停止波の伝播速度は上り坂と下り坂で異なり, 逆転現象が存在することがわかった。そこで, セルオートマトンモデルを用いてシミュレーションを行ったところ, 伝播速度の逆転現象を再現することに成功した。また, 発進波に関しては, 平均場近似を用いることで道路形状 (平地・上り坂・下り坂) による伝播速度の違いを理論的に計算できた。

○ 16:00～16:30 接続剛体系を移動する非線形局在モード

渡辺 陽介, 濱田 和幸, 杉本 信正 (大阪大・基礎工)

マクロな周期構造における波動現象を考察するための単純な力学モデルとして, 形状や性質が等しい多数の剛体のはり (またはパネル) がそれぞれの両端で連結された“接続剛体系”を考える。連結部では隣り合う二つのはりがなす相対的な回転角 ($\Delta\phi$) に応じて復元モーメントを与える回転バネが仕込まれているものとする。このような周期構造での波動現象の特徴は, 周期構造の代表である結晶格子系の場合と異なり, ‘横波’が強く関与していることである。‘非線形回転バネ’ ($\Delta\phi$ に対して復元モーメントの大きさが $\Delta\phi$ の1次と3次の和の形によって与えられる) を仮定し, 系の変位の大きさの有限性ととも, 系に非線形性を持たせると, 適当な初期条件の下で, 空間的に局在した振動 (非線形局在モード) が現れる。本講演では特に, 非線形局在モードが系内を移動する場合について明らかになったことを報告した。

開催の期間 平成19年11月7日～平成19年11月9日

参加者 87名

地形のダイナミクスとパターン

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 講演内容の概要

超小型水槽を用いた湧水起源チャンネル発達実験

遠藤徳孝

畳一畳程度の大きさの水槽を用いて、地下水の湧水によるチャンネル発達を観察した。実験チャンネルと自然界の河川・溪谷などの形状及び発達過程の比較を行った。また、谷頭の発達過程を記述する数値モデルの可能性について検討した。

地形を見る目を磨くのに役立つ実験

池田 宏

砂礫堆の形成条件を東京教育大学大学院で研究。用いた実験水路を核として筑波大学に水理実験センターが発足し、幅4 m、長さ160 mの大型水路が建設された。砂と礫とを混ぜて流す実験によって、砂と混ざると礫がきわめて運ばれやすくなる混合効果を見出し、内外の研究者との共同研究を続け、グランドキャニオンを流れるコロラド川の環境保全研究に参加。人工洪水による河床の砂州の復元を試みたが、地形環境を見る目が弱かったために失敗。以来、地形を見るために必要な時間の目と比較の目を磨くために役立つ地形実験を考案。地形を見る目を伝えるために、講演と出前実験授業と現地見学会を各地で実施中。実験装置の小型化が現在の課題。瞬間一発芸として見せるために作った簡単な実験をいくつか見てもらった。

河川による地形パターンの形成

佐伯 亜由美, 岡村 誠

地形パターンの形成プロセスは、流体運動や粉体のダイナミクスなど複雑な問題を多く含んでいる。また植生や天候など様々な要因によっても大きく左右され、非常に困難な問題である。そのパターン形成過程を解明するために多くのモデルが考えられてきたが、その複雑さゆえにどうしても経験則を用いたモデルが多い。そこで我々は流体の運動を基礎としたより原理的なモデルを作り、それについて数値シミュレーションを行った。ここでは新しいモデルとそのシミュレーション結果を紹介する。

乾燥破壊によるペーストの記憶の視覚化

中原明生, 篠原 雄, 稲垣翔太, 勝木厚成, 松尾洋介

我々は粉と水を混ぜて作ったペーストが揺れや流れを記憶することを実験的に見出した。記憶によるペーストの構造変化は弱いために、ペーストを直接観察してもその記憶の有無はわからない。ところが、そのペーストを乾燥させ収縮により破壊させることによって、ペーストの記憶を亀裂パターンとして視覚化することに成功した。具体的には、ペーストが揺れを記憶するときは亀裂パターンの方向は揺れに垂直に、そして、ペーストが流れを記憶するときは亀裂パターンの方向は流れに平行になることがわかった。我々はこの記憶効果を工学的に応用して、ペーストを乾燥前に揺すったり流したりすることによって、乾燥によって生じる亀裂パターンを自在に制御することにも成功した。

乾燥破壊での亀裂の伝播

狐崎 創

ゆっくりした乾燥に伴って生じる粉体ペーストの破壊の伝播速度を炭酸カルシウムとコーンスターチの2種類のペーストで測定し、乾燥速度に対する依存性、グリセリンを混ぜた場合の変化、試料の厚さ依存性を調べた。ペーストは柔らかい塑性体の状態で割れ亀裂は逐次的に生成し、個々の亀裂はほぼ一定の速度でゆっくり成長する。両ペーストとも亀裂速度は乾燥が遅くなると減少するが、その範囲と試料の厚さ依存性に著しい違いがあることがわかった。

バルハン砂丘のサイズ分布

勝木厚成

風と砂の相互作用で形成される砂丘は美しく多様で多くの人々を魅了してきた。しかし、砂丘自身のダイナミクスはまだ未解明な部分が多く、特に砂丘間の相互作用に関する研究は数少ない。そこで、粗視化された砂丘模型を使い、砂丘サイズの分布を求めたところ、対数正規分布に従うことがわかった。また、2つの砂丘回廊の境界域での砂丘分布を求めた。

成因不明の「涙型砂丘」の形成環境

—斜交する二方向流下での地形発達を調べる水槽実験—

谷口圭輔, 遠藤徳孝, 関口秀雄

火星面上には、「涙型砂丘」と呼ばれる形成環境未知の孤立砂丘が存在する。涙型砂丘が形成される流れ環境の推定のため、 $0^\circ \sim 180^\circ$ までの幅広い流向変動量を持つ二方向流が作用する環境を実験水槽内で再現し、どのような地形が形成されるのかを観察した。その結果、斜交する二方向流の下では、角度変動量 θ に依存してバルハン型 ($0^\circ < \theta < 30^\circ$)・涙型 ($45^\circ < \theta < 75^\circ$)・セイフ型 ($90^\circ < \theta < 135^\circ$)・反転型 ($150^\circ < \theta < 180^\circ$) という4種類の地形が形成されることが分かった。斜交二方向流下で発達する地形が θ に依存して変わるのは、流向変動時のクレストラインの変形方法が異なるためである。同じクレストラインがそのまま使われる「共有」、上流・下流が逆転して使われる「反転」、既存のものとは無関係に新しいクレストラインが作られる「非共有」という3種類の变形方法が存在した。火星の涙型砂丘と共通の丸いボディと一本の短いホーンを持つ地形は、 $\theta = 75^\circ$ の条件で見られた。火星面上においても、成す角 75° 程度の交互二方向流の存在が推測される。

リーゼガングリングにおけるパターン遷移

寅丸敦志, 山内沙耶香, 上山大信, 三村昌泰, 伊大知晃, 岡村隆広, 原田剛志

リーゼガングリングと呼ばれる沈殿拡散系のパターン形成において、拡散媒質である寒天の成分濃度と伴に、周期的沈殿から枝分かれ構造へとパターン遷移が起こる。講演では、このパターン遷移の実験と数値モデルについて紹介し、パターン遷移の成因について考察する。

つららや鍾乳石の表面上にできる波模様

上之和人, 山口 悟, 松田真一

つららの表面にはリングを積み重ねたような規則正しい波模様が存在する。不思議なことに、つららとは全く成長機構の異なる鍾乳石の表面にもそのような波模様が存在する。波模様の平均波長は、表面を流れ落ちる水量や直径にはほとんど依存せずどれも約1cm程度である。このような普遍性を理論的に説明する試みは誰にもなされていない。つららや鍾乳石が成長する場合、表面は流れる薄い液膜で覆われており、液膜のひとつの面は自由表面であり、もうひとつの面は成長する固液界面である。気液界面の形の影響を考慮に入れた薄いシアー流れ下での固液界面の形態不安定性の理論がはじめて提唱された (K. Ueno, Phys. Rev. E, 2003, 2004)。低温室内で、表面の滑らかな木製の円柱の棒や平らな木製の桶の表面上に水を流して氷の波模様を作る実験を行った。水量や棒の直径を変えて波模様の波長を測定し、理論的予測を検証した。

粉体クレーター形成の動力学

桂木洋光, ダグラス・デュリアン

固体弾を粉体層に衝突させるとクレーターが形成される。その際に固体弾は粉体層から抵抗力を受け最終的に停止に至る。この過程は基本的に一次元の固体弾の運動で記述することが出来る単純なものであるが、その具体的な運動方程式は未だに明らかにされていない。このような状況を受け、近年、ルースな粉体層に固体弾を低速で衝突させた際の侵入深度やダイナミクスが盛んに研究されるようになった。しかし、それら最近の実験結果は一見お互い相容れないように見え、粉体衝突抵抗力の統一的記述は困難な状況となっていた。そこで本研究では、この混乱した状況を解消することを目指し、高精度の固体弾ダイナミクス測定システムを構築した。この新たに開発したシステムを用いて、粉体衝突抵抗力 ΣF が $\Sigma F = -mg + k|z| + mv^2/d_1$ となることを明らかにした。ここで、 m, z, v は固体弾の質量、侵入深さ、速度であり、 g は重力加速度、 k, d_1 は摩擦抵抗、慣性抵抗を特徴づけるパラメータである。

3 プログラム

11月15日(木) ○印は招待講演

- 14:00-14:40 遠藤徳孝(金沢大)
超小型水槽を用いた湧水起源チャンネル発達実験
- 14:45-15:45 池田 宏○(元筑波大)
地形を見る目を磨くのに役立つ実験
- 16:00-16:40 佐伯 亜由美, 岡村 誠(九大)
河川による地形パターンの形成
- 16:45-17:25 中原明生, 篠原 雄, 稲垣翔太, 勝木厚成, 松尾洋介(日大)
乾燥破壊によるペーストの記憶の視覚化
- 17:35-18:15 狐崎 創(奈良女大)
乾燥破壊での亀裂の伝播

11月16日(金)

- 9:00-9:40 勝木厚成(日大)
バルハン砂丘のサイズ分布
- 9:45-10:25 谷口圭輔(阪大), 遠藤徳孝(金沢大), 関口秀雄(京大)
成因不明の「涙型砂丘」の形成環境—斜交する二方向流下での地形発達を調べる水槽実験—
- 10:45-11:45 寅丸敦志○(九大), 上山大信, 三村昌泰(明治大), 伊大知晃, 岡村隆広, 原田剛志(金沢大)
リーゼガンゲリングにおけるパターン遷移
- 13:00-14:00 上之和人○(名大), 山口 悟(防災科学技術研究所), 松田真一(日本気象協会)
つららや鍾乳石の表面上にできる波模様
- 14:05-14:45 桂木洋光(ペンシルバニア大, 九大), ダグラス・デュリアン(ペンシルバニア大学)
粉体クレーター形成の動力学

4 開催日程, 場所

開催日程 2007年11月15日(木) - 11月16日(金)
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 10件
参加者数 19人

(研究集会)

ナノ複合材料の創製及び評価に関する研究

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。

ナノ複合材料の研究は、カーボン・ナノチューブが1991年に発見されたときから盛んになり、15年が経つ。その間、世界各国において、カーボン・ナノチューブをはじめ、様々なナノ複合材料が研究されてきた。特に、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度から、カーボン・ナノチューブを補強材とする複合材料の研究は各国が競って研究を進めている。しかし、そのスケールの微小さに生じる様々な困難により、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度を有効に発揮できるナノ複合材料はまだ開発されていない。それを実現するには、数多くの研究者の更なる努力が必要である。

また、カーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料のほか、シリカ・ナノ粒子強化複合材料やナノ・クレイ強化複合材料など様々なナノ複合材料が研究されている。ナノ・テクノロジーを利用した新しい複合材料の開発には、その複雑さやコストの面から、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。

研究代表者はこれまでカーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料の作製や力学特性について研究を進めてきた。高雄教授と世話人の汪助教授はナノ複合膜によるFMLの開発やナノ複合材料の力学特性の評価について研究を進めてきた。それらの研究を踏まえ、本研究集会を通じて国内外の研究者との共同研究を進め、ナノ複合材料の研究を一步でも前進させていきたい。

ナノ複合材料は、これまでの材料では克服できなかった領域をナノ・テクノロジーで対処していかうとした材料であり、ナノ粒子、ナノファイバ、ナノチューブなどのナノ・スケールの材料を補強材または機能材とし、様々な用途に適した新しい複合材料である。このため、ナノ強化材及びナノ複合材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、ナノ強化材及びナノ複合材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20年1月10日(木)～11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10日(木)】

- 14:00-14:05 **開会の挨拶**
宇田暢秀 (九州大学)
- 14:05-14:30 **表面処理されたCNT複合材料の力学的特性**
○広瀬秀俊(九大院), 宇田 暢秀, 小野幸生(九大)
- 14:30-14:55 **Tensile properties of ramie yarns by cyclic load treatment**
○祝侶, 合田公一 (山口大)
- 14:55-15:20 **歯質と光重合型コンポジットレジン界面における熱変形評価**
○中西 拓人(九大院), 新川 和夫, 森田 康之(九大), 内野 正和(福岡工技セ)

- 15:20-15:45 一方向CFRPの引張特性に及ぼす繊維配向不良の影響とその改善
○任 保勝(山口大・院), Azmi Nordin(山口大・学),
野田 淳二,合田 公一(山口大)
- 15:45-16:55 休憩
- 16:55-16:20 カーボンナノチューブと樹脂の界面強度測定およびそのMDシミュレーション
○鄧飛(東大・院), 津田皓正(東大・学), 小笠原俊夫(JAXA), 武田展雄(東大・新領域)
- 16:20-17:45 クレイ・ナイロン6ハイブリッドナノ複合材料の時間依存型力学特性
○朱 世杰,岡崎雅則(福岡工大),白杵有光, 加藤誠(豊田中研)
- 17:45-17:10 メカニカルコーティング法による複合光触媒薄膜の作製と機能評価
○中山博之(千葉大・院), 吉田浩之(千葉県産技研), 佐野秀樹(千葉大・学),
魯 云, 廣橋光治(千葉大・工)
- 17:10-17:35 放電プラズマ焼結法によるTi/TiO₂ 複合光触媒の作製とその特性評価
吉田浩之(千葉県産技研), ○中山博之(千葉大・院),
魯 云, 廣橋光治(千葉大・工), 佐野秀樹(千葉大・学)

【1月11日(金)】

- 09:00-09:25 ナノ薄膜の力学特性および微細組織の評価
○巨 東英(埼玉工大), 長谷川浩一(石福金属), 石黒 諭(埼玉工大・院)
- 09:25-09:50 ナノファイラー充填ゴム組成物の高周波領域における粘弾性挙動
○倪 慶清(信州大), 國澤鉄也(住友ゴム工業), 汪 文学(九州大)
- 09:50-10:15 カーボンナノチューブポリマー複合材料の電気伝導特性および高感度ひずみセンサへの応用
○胡 寧(東北大), 軽部嘉文(東北大・院), 福永 久雄(東北大)
- 10:15-10:40 CSCNT分散CFRPの力学的特性評価
○横関智弘, 青木隆平(東京大学), 岩堀豊(JAXA), 石橋勝, 柳澤隆(GSIクレオス)
- 10:40-10:50 休憩
- 10:50-11:15 電導性ナノカーボン/有機ポリマー複合材料
○陶有勝, 加納博文, 金子克美(千葉大・理)
- 11:15-11:40 バクテリア・セルロースを用いた複合材料
○菊地時雄(福島県ハイテクプラザ), 小沢喜仁(福島大学), 渡邊真義(福島県立郡山技術専門校), 矢吹浩一((株)宮本樹脂工業)
- 11:40-12:05 エレクトロスピンニング法によるVGCF 補強ナノファイバーの作製
○山下義裕, 香川浩志(滋賀県大工), 三宅肇, 東山明央(滋賀県東北部工業技術センター)
- 12:05-12:30 ナノウイスキー強化セラミックス義歯の作製
○汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大・応力研)
- 12:30-12:35 閉会の挨拶
汪 文学(九大・応力研)

講演概要

表面処理されたCNT複合材料の力学的特性

広瀬秀俊(九大院), 宇田 暢秀, 小野幸生(九大)

カーボンナノチューブ(CNT)は軸方向に非常に高い剛性と強度を持ち, また電気伝導率や熱伝導率が高いことからナノ複合材料の強化材としての期待が高い材料である. しかしながらCNTとポリマーの複合材料において, ポリマー中におけるCNTの不均一な分散や界面強度の弱さが問題となりCNTの特異な性質を十分に発揮できないことが多々ある.

NajafiらはUV/ozoneにより多層CNT (MWNT) の表面を酸化することで、カルボン酸、エステル、キノン等の官能基が修飾されることを報告している。これら官能基がポリマーと水素結合することにより界面強度の向上、及びポリマーとの親和性が増すことから、分散性の向上も期待できる。しかしながらこの処理を施したCNTとポリマーの複合材料について力学的特性は報告されていない。そこで本研究ではMWNTの表面をUV/ozoneにより酸化した後、エポキシ樹脂を母材とした複合材料を製作して引張試験を行い、力学的特性を調べた。そして試験後の破断面をSEMにより観察することで母材中のMWNTの分散の様子やエポキシ樹脂との接着性を考察している。さらにMori-Tanaka理論により複合材料の剛性テンソルを求め、弾性率についての考察を行う。

Tensile properties of ramie yarns by cyclic load treatment

祝侶, 合田公一 (山口大)

In order to improve the mechanical properties of ramie yarns, in this study, a new mechanical method, namely, cyclic load treatment, was developed by applying a load on the ramie yarns up to a proper value and then unloading, for different number of cycles under high temperature or wet state. The results of tensile tests revealed that compared to the untreated yarns, a significant increase of around 20-50% in tensile strength and about 70-120% in Young's modulus was obtained for the cyclic load treated yarns. In comparison, after the individual heat or wet treatment without cyclic load, it was found that tensile strength of treated yarns remained unchanged as the original value while Young's modulus was decreased remarkably, which implies that the introduction of cyclic load to the individual heat or wet treatment plays a crucial role in strengthening and stiffening of ramie yarns. To interpret the inner microstructural changes in the cyclic load treated ramie yarn, X-ray diffraction (XRD) measurement has been used. The crystallinity and crystalline orientation degrees calculated from X-ray diffraction diagrams showed little change in ramie yarns after cyclic load treatment. This suggests that the improved tensile properties of ramie yarns can be supposed to relate to the decreased microfibrillar angle and the general orientation, mainly the part of amorphous orientation in the fiber microstructure.

歯質と光重合型コンポジットレジン界面における熱変形評価

中西 拓人(九大院), 新川 和夫, 森田 康之(九大), 内野 正和(福岡工技セ)

現在コンポジットレジン充填は形態付与の容易さなどから、歯科医療に幅広く使用されている。コンポジットレジン充填の欠点の一つとして、天然歯と充填されたコンポジットレジンの熱膨張係数が異なることが挙げられる。これは口腔内に温度変化が生じた場合、歯質とコンポジットレジンに熱応力を発生させ、界面の破壊につながるという報告もされている。しかしながら、温度変化によるコンポジットレジン熱特性はまだ十分には解明されていない。

そこで本研究では歯質とコンポジットレジン界面における熱変形を評価した。本手法としては、ウシの歯に穴を開け、コンポジットレジン充填し硬化後、加熱していく。このときの歯質とコンポジットレジン界面をデジタルカメラによって撮影し、温度変化による挙動を、デジタル画像相関法によって解析した。

一方向CFRPの引張特性に及ぼす繊維配向不良の影響とその改善

任 保勝(山口大・院), Azmi Nordin(山口大・学), 野田 淳二, 合田 公一(山口大)

本研究は一方向CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) の引張強度特性に及ぼす繊維配向不良の影響に着目したものである。著者らの経験によると、繊維束を用いてCFRPを成形する場合、繊維を伸張させずに作製したCFRPでは十分な強度が得られない。これは、材料

内部に局所的な繊維配向不良が存在するためと考えられる。本研究では、繊維を伸張させてCFRPを作製できる装置を用い、その伸長CFRPに対して繊維配向不良を人為的に設けるとともに、引張特性に及ぼす影響を調査した。さらに、繊維軸から傾斜して位置する配向不良繊維に対するシアラグモデルを提案し、繊維配向不良部周辺の繊維にかかる応力分布を調べた。さらに、カーボン繊維間の応力伝達を改善することを目的とし、エポキシ樹脂にナノクレイを添加し、そのナノクレイを添加したエポキシ樹脂の機械特性を調査した。

カーボンナノチューブと樹脂の界面強度測定およびそのMDシミュレーション

鄧飛(東大・院), 津田皓正(東大・学), 小笠原俊夫(JAXA), 武田展雄(東大・新領域)

カーボンナノチューブ(CNT)をポリマー樹脂に添加したナノ複合材料に関する研究が盛んに行われている。一方、CNTをポリマー樹脂に埋め込んだときに得られるその機械的特性は、理論的予測値よりも低いことが知られている[4]。CNT添加複合材に荷重が与えられたとき、その荷重は界面を介して樹脂からCNTへ伝達する。複合材料の機械的特性を向上させるには樹脂とCNTの界面特性をまず知ることが重要である。しかし、樹脂とCNTの界面領域のサイズが非常に小さいことや、その界面は複合材内部に存在する等の理由から、この領域に関する実験的な研究がほとんど行われないうのが現状である。

本研究では、走査電子型顕微鏡(SEM)内で、樹脂に埋め込まれたCNTを引き抜くことで、樹脂とCNTの界面強度を直接測定する。また、分子動力学法(MD)による実験のモデル化を行い、CNTの引き抜きをシミュレーションし、実験結果との比較を行う。

クレイ・ナイロン6ハイブリッドナノ複合材料の時間依存型力学特性

朱世杰, 岡崎雅則(福岡工大), 臼杵有光, 加藤誠(豊田中研)

近年、ナノ・テクノロジー・材料の発展は著しく速く、ナノ材料の一種であるポリマー/クレイナノコンポジットが注目を集めている。ポリマー/クレイナノコンポジットとはポリマーマトリックスに、クレイと呼ばれる粘土鉱物などがナノメートルオーダーで分散された複合材料のことを指す。ナノメートルオーダーで分散することにより、従来の複合材料と比べて高い物性値を得ることができ、さらに今まで得られなかった物性が発現する可能性がある。

近年、トヨタ自動車、宇部興産により、ナイロン6(ポリアミド6)クレイハイブリッド(NCH)が世界で初めて実用化され、このNCHの成功が発端となり、ポリマー/クレイナノコンポジットの概念が急速に世界に広まった。NCHの特徴としては、高強度、高剛性、高耐熱、高バリア性などが挙げられる。しかし、強度の負荷速度依存性や時間依存型特性疲労やクリープについての研究が少ない。また設計および寿命評価方法を確立しないことが現状である。

そこで、本研究では、クレイがナノメートルレベルで分散したナイロン6クレイナノコンポジットの疲労およびクリープ特性を明らかにするために、室温において疲労試験、クリープ試験を行い、最大応力と破断繰返し数による疲労強度、応力と破断時間によるクリープ寿命について調査を行った。得られた実験結果より疲労・クリープ破壊機構およびクレイの強化機構について考察を行った。

メカニカルコーティング法による複合光触媒薄膜の作製と機能評価

中山博之(千葉大・院), 吉田浩之(千葉県産技研), 佐野秀樹(千葉大・学),
魯云, 廣橋光治(千葉大・工)

近年、TiO₂光触媒は、汚染物質を分解・除去する環境浄化機能材料として注目され、研究開発が盛んに行われている。水中や空気中の汚染物質を分解・除去する場合一般的に担体に固定させて使用されるが、より汚染物質の吸着量を多くし効率を上げるため凹凸のある多孔性の表面が求められ、多孔質の担体への担持や表面積の大きな薄膜の作製が行われ

ている。光触媒薄膜の作製には、ゾル-ゲル法、PVD 法、CVD 法などの手法が用いられているが、これらの作製方法はプロセスが煩雑で、また大型装置が必要である。特にこれらの手法では球状などの複雑な表面に均一に成膜することが困難である。これまで粉末冶金における粉末混合の逆発想でポットミル、遊星ボールミルを用いて、アルミナ製のボール、ボタン（円盤）の表面にTi を成膜するメカニカルコーティング法（Mechanical Coating Technique, 以下MCT と略記）を提案してきた[13]。またTi 薄膜に酸化処理を行うことでTiO₂ 光触媒薄膜の作製、およびその機能評価を行ってきた。本研究ではMCT によりTi を成膜した後、更にMCT によりTi 薄膜表面上にアナターゼ型TiO₂ の複合化を行い、作製した複合光触媒薄膜の機能を評価すると共にこれまでの結果と比較検討を行った。

放電プラズマ焼結法によるTi/TiO₂ 複合光触媒の作製とその特性評価

吉田浩之(千葉県産技研), 中山博之(千葉大・院), 魯 云, 廣橋光治(千葉大・工),
佐野秀樹(千葉大・学)

近年、急激に危機感と問題意識の高まっている生活環境問題に対し環境の保全、また環境浄化の技術が求められている。このため、空気浄化、水浄化、抗菌、防汚等の機能を備えるTiO₂光触媒が注目されており、多孔質、ナノ化および複合化などによる高機能光触媒の研究・開発が盛んに進められている。複合化による高機能化においては、Pt やAg などの金属との複合光触媒が多岐に渡って報告されているが、大変高価な金属が使用されており広範な使用は難しい。本研究では、実用的な観点からTiO₂ナノ粉末を出発原料として、より安価な複合光触媒の作製を行った。複合には、放電プラズマ焼結（Spark Plasma Sintering, 以下SPSと記す）法を用いて複合光触媒を作製し、その結晶構造、表面形状および光触媒機能を解析するとともに、Ti 粉末の添加量による光触媒機能への影響について検討した。

ナノ薄膜の力学特性および微細組織の評価

巨 東英(埼玉工大)、長谷川浩一(石福金属)、石黒 諭(埼玉工大・院)

PVD 法によって導電ガラスITO 基板上に同じTi ターゲットから創製時の雰囲気ガスを変え、Ar ガス使用時にはTi 薄膜を、O₂ ガス使用時にはTiO₂ 薄膜を創製し、それぞれの薄膜について創製条件である創製ガス圧・創製時間・創製温度を変化させて創製する。TiO₂ 薄膜については、Ti ターゲットを用い、薄膜創製後に酸化処理を施すか、あるいはターゲットにTiO₂ を使うことで作られることが多い。しかしTi ターゲットを用いた薄膜創製中に酸化雰囲気を作ることでTiO₂ 薄膜を作る例は少ない、しかし薄膜の創製に当たって、雰囲気ガスのみが変わるため、物性の差異を評価するのに適当であると考えられる。また記録メディア用に使用されるAg 合金膜に関しては、Al 以上の高い反射率を維持しつつ耐熱性、対恒温恒湿特性、耐食性を有することが要求されている。そこで、ガラス基板上にAg 合金薄膜(添加元素Pd, Cu, P)を創製し、様々な熱処理を施す。これらの要求を満足させるために種々の添加元素が試されてきた中で、Cu, P を添加することにより、良好な特性が得られるが特性向上のメカニズムは十分に判明していない。この薄膜の評価を行い、メカニズム解明の一助となれば評価法の有用性の実証となると考えられる。これらの薄膜についてAFM を用い微細構造を観察し、またX 線によるin-plane 回折測定によって内部の微細構造評価を行い、残留応力解析を行う。さらにナノインデントを用い硬度等の力学特性についても評価を行う。これらの結果について比較・検討し、薄膜における微細構造および力学特性を明らかにする。

ナノファイラー充填ゴム組成物の高周波領域における粘弾性挙動

倪 慶清(信州大), 國澤鉄也(住友ゴム工業), 汪 文学(九州大)

タイヤ開発の重要な課題の1つに安全性向上の観点からグリップや制動距離の改善がある。タイヤのトレッド部表面が走行中に一般的なアスファルト路面のマイクロな凹凸から受ける振動の周波数はメガヘルツ領域の比較的高周波である。しかしながら、従来からの動的粘弾性測定における周波数は、装置の機械的能力の限界から 10^2 Hz レベルまでであり、直接的に高周波にて測定することは、これまであまり成されていない。通常、高周波領域の粘弾性特性は、温度-時間換算則を用いて、比較的低温領域での粘弾性特性に置き換えられ、検討されてきている。従来からの動的粘弾性特性に比べて、高周波振動にて直接的に粘弾性を測定することが出来れば、煩雑な換算が不要となり、より信頼性の高い物性指標を提案できると考えられ、摩擦特性やゴム物性発現のメカニズムを議論する上で有益であると考えられる。これまでも超音波装置を用いてゴム組成物の高周波領域における音速や減衰係数などの調査が行われている。

そこで、本研究では、ゴム組成物において動的粘弾性および超音波装置による高周波での粘弾性を測定し、両特性間の挙動の比較を行った。加えて、湿潤路面における摩擦係数の測定を行い、各粘弾性測定で求めた $\tan \delta$ との関係性を調査し、超音波粘弾性の有用性を検討したので報告する。

カーボンナノチューブポリマー複合材料の電気伝導特性および高感度ひずみセンサへの応用

胡 寧(東北大)、軽部嘉文(東北大・院)、福永 久雄(東北大)

In this research, we employ a 3 dimensional (3D) resistor network model to predict the electrical conductivity of a nanocomposite made from an insulating polymer containing randomly filled carbon nanotubes (CNTs). In this model, with the assumption of randomly distributed CNTs in the polymer, Kirchhoff's current law is used to set up the system of algebraic equations at different nodes in the network connected by CNTs. The macroscopic current of the composite can be calculated with applied external voltage by solving the system equations, and then Ohm's law is employed to predict the macroscopic electrical conductivity of the composite. Moreover, the corresponding experiments are performed. The present experimental results plus some previous experimental results by other researchers are employed to verify the numerical results. The verified numerical model is then employed to construct a simple and reliable empirical percolation theory. For the application of CNT/polymer composites as highly sensitive sensors, by considering the tunneling effect between CNTs, the present numerical model is further extended into the case of composites with prescribed strains. The relation between the strain and the electrical conductivity can be estimated numerically. A highly sensitive strain sensor is made from this new nanocomposite. Finally, both numerical and experimental results demonstrate that this new sensor possesses much higher sensitivity or gauge factor compared with traditional strain gauges.

CSCNT分散CFRPの力学的特性評価

横関智弘、青木隆平(東京大学)、岩堀豊(JAXA)、石橋勝、柳澤隆(GSIクレオス)

カーボンナノチューブやナノクレイをはじめとするナノ粒子は、ポリマーの強化材料や多機能化材料として注目されている。ナノ粒子をポリマーに分散し、複合材化することで、ポリマーの力学特性、熱特性、電気特性、ガス等のバリア特性などを向上させようとする研究が盛んであり、各種成形法の試みや評価試験の実施が行われてきた。カップスタック型カーボンナノチューブ(CSCNT)も注目されているナノ粒子の1つであり、ポリマー中に分散することで、力学特性や電気伝導特性の向上が報告されている。また、岩堀らはエポキシ樹脂に分散させた2相系の複合材、及びさらに炭素繊維織物に含浸させた3相系のCFRPを試作し、圧縮強度等の力学特性の向上を報告している。

CFRPは優れた比強度、比剛性を有するため、航空宇宙構造をはじめとする構造物へ適用されているが、ナノチューブ等のナノ粒子分散樹脂を構造部材として適用を試みる研究も少なくない。しかしながら、強化効率の高い、長いナノチューブを樹脂中に均一に分散する、あるいはボイドやクラスターを生じないように分散・製作するプロセスが実現に至っていないのが現状であり、ナノチューブと樹脂の界面特性にも課題があるため、優れた強度等を期待できる高性能な構造材料としての利用は期待できない状況である。そのため、力学特性だけでなく、熱・電気特性なども含めた多機能材料としての用途を目指す研究が多くなっている。

本研究では、従来のCFRPの優れた力学的特性を認めた上で、樹脂の力学特性をわずかも向上することにより、圧縮強度など、樹脂特性が支配するCFRPの特性を改善することを目的として、分散性・成形性の良好なCSCNT分散CFRPを用いて、その各種力学的特性を評価した。一方向材及び擬似等方性材を製作し、剛性、強度、破壊靱性等の総合的な評価試験を通じ、CSCNT分散によるCFRPの力学的特性の改善効果を調査した。

電導性ナノカーボン/有機ポリマー複合材料

陶有勝、加納博文、金子克美(千葉大・理)

Conductive polymer composites have been widely utilized in a range of applications such as medical devices, biosensors, and electromagnetic interference (EMI) shielding applications. They are generally synthesized with carbon-based fillers such as carbon black, carbon fibers, and recent single-wall carbon nanotubes (SWCNTs).

Single wall carbon nanohorn (SWCNH) is nanostructured graphitic tube ^[1], similar to single wall carbon nanotube (SWCNT). Since laser ablation method produces these nanostructural SWCNHs in bulk quantities with high yield (>95%) under ambient conditions without any metal catalyst, SWCNHs have high purity with comparison to SWCNTs. Properties like high surface area, high thermal stability and conductive atomic structures coupled to unique internal nanopore and interstitial nanopore structures make SWCNHs unique materials with numerous potential applications as adsorbents, molecular sieves, catalyst support, and drug delivery. To extend the applications of SWCNHs, we investigated to prepared conductive organic polymer composites with SWCNHs.

バクテリア・セルロースを用いた複合材料

菊地時雄(福島県ハイテクプラザ)、小沢喜仁(福島大学)、渡邊真義(福島県立郡山技術専門校)、矢吹浩一((株)宮本樹脂工業)

21世紀に入り、環境保全、省資源、リサイクルなどがこれまでよりも重要視されるようになってきた。特にエネルギー・資源の観点から過度の石油化石資源への依存からの脱却が要求されるようになり、風力、太陽光、バイオマスのような再生可能資源への転換が進められようとしている。その中でバイオマスは「カーボンニュートラル」であるため、生産―廃棄に伴う環境破壊を低減しながら持続可能な生産を恒久的に継続できる原料として注目を浴びている。最近では、大気中の二酸化炭素低減という環境適応性のみならず、原油価格の高騰に伴う原材料費の削減という観点からも急速に注目を浴びるようになり、バイオマスを用いた素材開発を推し進めるドライビングフォースとなっている。

複合材料開発においても、環境にやさしい材料が求められている。デンプンをマトリックス材料とした生分解性プラスチックの開発が進んでおり一部商品化に至っている。強化繊維としても竹、木材、麻、絹など天然繊維を用いた複合材料の開発も盛んになってきている。

天然高分子の中で多く生産されているものは、草や木から得られる植物性セルロースやデンプンなどの多糖類であり、植物性セルロースは年間約 1000 億トンが生産され⁵⁾、これ

らの新たな利用方法が検討されている。

一方、天然セルロースの中には微生物が生産するバクテリア・セルロース (Bacterial Cellulose, BCと略す) と呼ばれるものがある。これは食酢などの醸造過程において、酢酸菌 (*Acetobacter xylinum*) が造る副生成物であり、ダイエット食品のナタデココとして広く一般に知られている。バクテリア・セルロースは、ヘミセルロースやリグニンなどをほとんど含まない純度の高い生分解性にすぐれたセルロースである。BCはミクロンオーダー以下のマイクロフィブリルの微細な網目構造を特徴とし、力学的特性にすぐれることから、生分解性を有する機能性素材として注目され、その効率の良い培養技術の開発や用途開発が盛んに行われている。

そこで著者らは醸造酢メーカーで産業廃棄物として処理されているBCに注目し、その有効利用のため複合材料のナノファイバーまたはマトリックスとしての利用を検討してきたので紹介する。

エレクトロスピンニング法によるVGCF 補強ナノファイバーの作製

山下義裕, 香川浩志(滋賀県大工), 三宅肇, 東山明央(滋賀県東北部工業技術センター)

The making technology of the nanofiber and the nanocomposite by the electro spinning process was examined. The following two were chosen as a reinforced fiber. 1) Aramid nanofiber. 2) VGCF reinforcement nanofiber. As for the nanofiber reinforced with 5wt%VGCF, the modulus has tripled compared with the original. These nanofibers can make the nanocomposite by some methods. One is a method of spraying the resin (adhesive) at the same time as spinning the nanofiber. Another is a method of impregnating the resin after the nanofiber is made. The volume fraction of the nanocomposite can be controlled according to the compressibility of the molding.

ナノウイスキー強化セラミックス義歯の作製

汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大・応力研)

A hand made nano-whisker reinforced glass ceramics used for the artificial tooth is developed. Commercially available white nano-whiskers $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$ and dental glass-ceramic powders of porcelain AAA are used as reinforcement and matrix. A wet mixing process is conducted to ensure a homogeneous distribution of whiskers in the whisker/powder mixture by the use of a mortar. The remaining hand made procedures and the heating process of nano-whisker reinforced glass ceramics are the same as those of glass ceramics without whiskers used by ordinary dental technician. The hand made ceramics specimens are investigated by means of SEM, EPMA, hardness tester and testing machine for various whisker weight fractions. Slight increase in stiffness and a moderate increase in flexural strength and toughness are observed. The reinforcement does not give serious damage if the weight fraction of whiskers is less than 10%.

おわりに

今年度ナノ複合材料の創製及び評価というタイトルに絞って研究集会を初めて行った。今までは先進複合材料全般を対象とした研究集会を行ってきて学内外において先進複合材料の研究の促進に大きな役割を果たしてきた。

一方、カーボン・ナノチューブが1991年に発見されたから、15年が経つ。その間、世界各国において、カーボン・ナノチューブをはじめ、様々なナノ複合材料が研究されてきた。特に、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度から、カーボン・ナノチューブを補強材とする複合材料の研究は各国が競って研究を進めている。しかし、そのスケールの微小さに生じる様々な困難により、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度を有効に発揮できるナノ複合材料はまだ開発されていない。それを実現するには、数多くの研究者の更なる努力が必要である。また、カーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料のほか、シリカ・ナノ粒子強化複合材料やナノ・クレイ強化複合材料など様々

なナノ複合材料が研究されている。ナノ・テクノロジーを利用した新しい複合材料の開発には、その複雑さやコストの面から、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。このような考えに基づいて今回の研究集会を企画した。

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

研究集会「自由表面流れに関する線形・非線形解析」

大阪大学大学院工学研究科 高木 健

研究目的

応用力学研究所では、従来から水波の非線形問題、水波と浮体の相互作用を得意分野として研究を行っており、船舶や海洋構造物周りのいわゆる自由表面流体力学では水波と浮体の相互干涉を知る事が重要である。この問題に対するアプローチを大別すると、数理解析、数値解析、実験解析の3者が考えられる。近年、数値計算技術の発達に伴い数値解析手法によるアプローチが飛躍的に発展している。特に若手の研究者は大規模な数値計算を実施して目覚ましい成果を挙げている。しかし本来水波と浮体の干涉問題では数理解析によるアプローチが上手くいく場合が多いことが知られており、従来の研究では数理解析によって、多くの成果が得られている。実験解析はこれらの2つのアプローチに対して相補的に行われ、この分野の健全な発展のためにはこの3者が調和して発展することが望まれている。

本研究集会は、数理解析や実験解析に豊富な経験と知識を持つ研究者と大規模数値計算を精力的にこなす若手研究者が集い、アットホームな雰囲気の中で本音の議論を行い、今後の研究にシナジー効果をもたらすことを目的とする。具体的には、最近の研究成果のReview、進行中の研究の情報交換などを通して、今後の研究進展の方向や課題などに関して緊密な討議を行う。

申請代表者は13,14年度に応用力学研究所共同研究(研究集会)「自由表面流体力学に関する数理解析」を15,16年度に「浮体の流体力学に関する数理解析」を応用力学研究所との共同研究集会として主催した。さらに、「水波と浮体の相互干涉に関する力学」を17,18年度に主催した。初期の研究集会ではテーマを数理解析に絞っていたが、その後数値解析の研究者や実験的研究を行う研究者も加え、前述の3者が一同に会する応用力学研究所でのシリーズ研究会として定着しつつある。また、17,18年度の研究集会では海外からも数名の研究者を招待し、国際的な交流も行った。

昨年度の研究集会の参加者からは本年度も研究集会開催を望む声が大であった。また、この研究集会の特徴の一つである少数の研究者による集中的な討議は、他の研究会では難しい若手とベテランの交流や本音での討議ができることなどから大変好評であった。このような状況から、本年度も引き続き応用力学研究所で研究集会を開催することを企画した。特に本年度は、これらの流れを継承しつつ、線形問題としてのアプローチと非線形問題としてのアプローチの得失をさらに深く理解することを目的とした。

研究集会の内容

この研究集会では大まかに分けて下に示す3つのテーマをコアテーマとし、参加者による従来研究成果のReview、現在直面している問題点の提示、新規研究成果の発表をおこなった。

- 超大型浮体式海洋構造物の流力弾性問題(弾性膜に覆われた自由表面流れ,超多数浮体の相互干涉)
- 船舶や海洋構造物と波浪との干涉問題(界面物体の造波と波動の伝播)
- 浮体の水面衝撃問題(水,空気,弾性物体の相互干涉)

なお、従来の研究集会で採用していた少数の専門家による集中的な討議は好評であったが、メンバー固定化の傾向があった。そこで、一昨年度より海外からの参加も呼び掛けるとともに、新しい参加者、特に若手を中心に参加者を募り、集会の規模を少し大きくした。本年度はそれらの工夫が定着し始め、海外からのリピーターが増えた。以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

Numerical Simulation on Flooding and Damaged Stability of Ships by VOF Method

Zuogang CHEN and Ning MA (Shanghai Jiao Tong University)

CFD software FLUENT is adopted to simulate the viscous flows around a 2D damaged cabin section. VOF method is used for the tracking of the interfaces. Some important CFD elements are investigated in pilot computations. Based on prescribed motions and 6DOF respectively, the flooding phenomena are simulated. The simulations may predict a physically true flooding. The main challenges, such as smeared interfaces by VOF method, quality control of grid regeneration and pressure oscillation during 6DOF computations, are discussed. The computations will be expanded so that the numerical simulations can be used to take precautions against ship damage.

Influence of a Bottom Mud Layer on the Steady Wave Making Resistance

Masaaki Sano (Hiroshima University)

The rigid bed of many ports, harbors and river estuaries is covered by a mud layer, where ship's hydrodynamic characteristics are changed due to generating internal waves. For a safe navigation, ship behaviors must be predicted precisely.

In this research, three dimensional wave making problem in two layers with finite depth is solved by Rankin source method. And a new interface condition is derived, assuming both fluids are potential flow. As the results, it's shown that the waves on free surface are affected by the interactions from internal waves, causing the wave resistances to be changed. This research is just on the way at the present. So more verifications and discussions to their results must be needed.

Ship Performance Evaluation by Oceangoing Simulation

Noriko Hase and Munehiko Minoura (Osaka University)

We propose a new method to predict the ship performance by means of stochastic oceangoing simulation. This simulation clarifies ship's statistical behavior in actual seas where sea states vary hour by hour and provides the probability density functions of passage time and fuel consumption. We show the result of a test calculation of a container ship crossing the North Pacific.

The oceangoing simulation uses the time series of short-term sea states. We can make many cases of the time series from the stochastic process model determined for the occurrence probability distributions of short-term sea states.

The time series of nominal ship speed loss is simulated in the above sea state time-series. Nominal speed loss are obtained as the solution of an equilibrium equation among engine power, propeller thrust and stationary external forces/moments, i.e. hydrodynamic force/moment, rudder force/moment, maneuverability force/moment and wind force/moment. Through this simulation, short-term ship responses are provided. By using the two time series, namely the sea states and ship responses, we can make the quasi-navigation on a computer. As a result of this oceangoing simulation, passage time and fuel consumption are predicted. This method has the advantage that operational effects can be considered. We will try to calculate it.

Some Numerical Checks on the Acceleration Field in 2D NWT

Guanghua HE and Masashi Kashiwagi (RIAM, Kyushu University)

The problem of vibration of vertical wall by an initial elevation of free surface is solved in nonlinear numerical wave tank based on Mixed Eulerian Lagrangian method. However, we found several numerical problems, such as in satisfaction of the complete absorption of reflection waves. Then, in order to understand what keys in resolving the problems are, we started studying the linearized problem and a comparison was made between numerical results and an analytical solution provided by Sturova. The distribution of temporal derivative of velocity potential on the wavemaker surface is also illustrated with two methods.

Hydrodynamic Derivatives Investigation on Unconventionally Arranged Pusher-Barge Systems

Koh Kho King (Hiroshima University)

Unconventional arrangement of pusher-barge systems were studied in this paper. Pusher-barge systems consisted of 4 barges, 6 barges and 8 barges with one pusher were tested in various combinations. Captive model test was performed on the various combinations at Hiroshima University Towing Tank. Hydrodynamic derivatives of the systems were obtained from the model test data by using least square analysis method. For asymmetry condition, hydrodynamic derivatives Y'_0 , Y'_{bb} , N'_0 , and N'_{bb} were added in force and moment equations in order to get better fitting of the least square curves. Motion equations were modified to cover the asymmetry cases of pusher-barge system with lateral force and yaw moment due to the asymmetry arrangement included. Turning simulations (with 20 degrees in sudden angle change) were carried out and the comparison of advance distance and tactical diameter were made.

Motion Simulations of Tow and Towed Ships in Waves

Hironori Yasukawa (Hiroshima University)

A simulation method was developed for longitudinal motions of tow and towed ships in regular waves. Motion equations were derived of the tow and towed ships, and the towing cable which is expressed by the lumped masses connected by a truss element. Motion simulations of tow and towed ships in regular waves

were carried out by numerically solving the equations. As a result, the simulation shows that longer cable reduces the impact force acting on the towing cable in waves. The verification of the present method is needed through the comparison with model test results as the future work.

Hydroelastic Behavior of a Long Flexible Structure in Irregular Waves

Ken Takagi (Osaka University)

Using one year measured wind data and wave hind-cast data, we investigate the statistical property of the wind and waves in the EEZ of Japan and its surrounding area in which we assume VLMOS navigates. It is confirmed that the stochastic distribution of the wind speed and the significant wave height is approximated by the Weibulle distribution. In addition, we perform a navigation simulation of VLMOS in which we used 144h wave forecast data to increase the generated power and not to meet the high sea. Using the simulation results, the stochastic distribution of wave height experienced by VLMOS is discussed. It is found that deformation of the stochastic distribution obtained from the sailing simulation has a relation with its capacity factor and it is quite reasonable. The result of the fatigue assessment shows that VLMOS seems to have enough fatigue strength for twenty year operation even if its capacity factor exceeds 40%.

Control of Vertical Motion of Fast Ship

Jang-Whan Bai and Yonghwan Kim (Seoul National University)

The application of linear and nonlinear algorithms for controlling vertical motions of a fastship is considered. Three control algorithms, PID, LQR and sliding mode control algorithms, are used to minimize the vertical motion of the hydrofoil vessel considered by Kim and Yamato (2004). The motion responses in regular and irregular waves are compared for all the algorithms and also experimental data. Based on the present study, the followings are found:

- (i) PID control is easy to tune the set of control gains, but hard to get good results in every cases. Sensitivity toward wave height is very strong in irregular waves.
- (ii) LQR control shows a good performance in various wave environments, and it provides effective attenuation of the motion with small control inputs.
- (iii) Sliding mode control provides the most reduction of motion in most of cases with larger control input than LQR. However, motion easily tends to be unstable when with the poor information.

Analysis of Multiple-Body Problem by a Time-Domain Rankine Panel Method

Kyong-Hwan Kim and Yonghwan Kim (Seoul National University)

Demand on the motion analysis of adjacent multiple bodies is getting increased for the design of large offshore structures, e.g. FPSOs for LNG or crude oil, and FSRU. Existing studies on this problem – so called, N-body problem – have been based on frequency-domain method or impulse-response function approach which still requires the solution of frequency-domain solution. The present method adopts a time-domain approach, and Rankine panel method is applied as a method of solution. The linear motion responses of each body in the situations of ship-ship and ship-barge are computed, and the motion RAOs are compared with other computational results and experimental data, showing a fairly good agreement with experimental data.

Introduction of WISH JIP for the Prediction of Nonlinear Ship Motions and Loads in Waves

Yonghwan Kim, Kyong-Hwan Kim, and Yooil Kim (Seoul National University)

Currently WISH joint industry project is being carried out by Seoul National University under support of six sponsors, including Hyundai, Samsung, Hanjin Heavy Industries, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, STX Shipbuilding, and Korean Register. In this project, we are developing WISH (Wave-Induced SHip motion and loads) program to predict the seakeeping performance of real commercial ships. In this presentation, its theoretical background with some example results is introduced. WISH program is based on time-domain Rankine panel method adopting bi-quadratic B-spline basis function. It is capable to analyze linear and nonlinear ship motion, wave-induced loads, and other motion-related problems. It has other extensions such as springing analysis, multiple-body motion, and parametric roll motion.

Recent Progress of Numerical Modelling of Viscous Free Surface Flows Using Spectral Element Method

Hong Gun Sung and Key Yong Hong (Maritime and Ocean Engineering Research Institute)

With the aim of solving wave and current interaction problems when the background current flows are

non-uniform, we are developing an efficient numerical method for viscous free surface flows. The present methodology analyzes viscous free surface flows in the context of the Navier-Stokes (N-S) equations and this paper presents a numerical model for their simulation with a brief description and extensive numerical validations.

The governing equations are solved through the Spectral Element Method (SEM), which possesses the property of high-order spatial accuracy as proposed by Karniadakis & Sherwin (2005). In order to deal with the free surface motion in time, the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method is utilized. It is shown that the proposed SEM and its present implementation produce very accurate and convergent solutions to the Poisson equation, the Helmholtz equation, and a manufactured problem of the N-S equations. Numerical results of the lid-driven cavity flow are compared with other numerical results. As for the viscous free surface flows, viscous sloshing with a prescribed initial free surface profile is simulated and it is shown that the present methodology gives very reasonable results for the small-amplitude problem. Additional computations were done for soliton propagation and run-up against the vertical wall, and wave generation problem by variable pressure distribution.

We anticipate that the present flow model and numerical method produces more realistic and complex viscous free surface flows such as evolution of nonlinear free surface waves in the presence of uniform and non-uniform current in near future.

A Hybrid Method between Particle and Boundary Element method for 2D Simulation of Waves

Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)

A hybrid numerical scheme to compute complicated wave problems is developed. The present method is a kind of domain decomposition methods, which combine NS solver and potential flow solver. A Particle method is employed as the NS solver and a linear boundary element method is employed as the potential solver. In order to exchange flow information between divided regions, a special moving interface boundary is introduced. In this study, numerical details of the scheme and some numerical examples of 2D wave problems are presented and discussed.

Computation of the free surface flows using a conservative interface capturing method

Il-Ryong Park, Kwang-Soo kim, Jin Kim and Suak-Ho Van

(Maritime and Ocean Engineering Research Institute)

This presentation firstly provides a brief introduction of the validated Level-set results for the benchmark test cases adopted by CFD workshop Tokyo 2005 and presents a new developed VOF method, RHRIC (Refined High Resolution Interface Capturing) which is based on the HRIC's differencing schemes with different blending and linear weighting approaches. The present RHRIC solutions for the simple VOF advection problems show more compressive and sharp features of the interface than those of the HRIC and MHRIC (modified HRIC of FLUENT). In the dam break validation case, we found out that turbulent flow effects are apparent in the measured free surface elevations and pressure. The present numerical results obtained by using a high fidelity RANS computation show more reasonable agreements with the experimental data than the laminar flow results. We are performing further validations of the present VOF method for 3D steady and unsteady free surface flows including hull forms.

A Comparative Study on Numerical Methods for Wave-Body Interactions

Masashi Kashiwagi (RIAM, Kyushu University)

At Research Institute for Applied Mechanics (RIAM) of Kyushu University, extremely nonlinear wave-body interactions have been studied by means of CFD techniques and the developed computer code, named RIAM-CMEN (computational method for extremely nonlinear hydrodynamics), is validated in several ways. In this paper, the frequency response characteristics of the wave-induced motions and added resistance on a ship running at constant forward speed in waves are compared to various results measured in a newly conducted experiment and computed by NSM (New Strip Method), EUT (Enhanced Unified Theory), RSM (Rankine Source Method), and RIAM-CMEN. It is shown that the overall agreement of computed results by RIAM-CMEN is relatively good as compared to other linear-theory results.

(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：2008年3月3日(月)～3月4日(火)

会場：九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 新棟6階 W601号室

講演プログラム

3月3日(月)

○ 13:00-13:10 代表者挨拶

新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

○ 13:10-13:40 城戸 敦誉 (九州大学総合理工学府) 和方 吉信 (九州大学応用力学研究所)

金星大気大循環における多重平衡解の再現

Matsuda 1980, 1982 で指摘されていた金星大気大循環における多重平衡解について、大気大循環モデルを用い、その再現を試みた。その結果、帯状一様な加熱を与えた場合と、3次元的な加熱を与えた場合において、多重平衡解を再現することに成功した。しかしながら、3次元的な加熱を与えた場合では、そもその目標であった「昼夜間対流」と「スーパーローテーション」では無く、東西風速が速いか遅いかの違いという結果となった。

○ 13:40-14:10 山本 勝 (九州大学応用力学研究所) 高橋 正明 (東京大学気候システム研究センター)

惑星中層大気大循環の天文パラメーター依存性について

本研究では、エアロゾルで覆われた惑星中層大気を想定し、その加熱によって駆動される大気大循環のパラメーター依存性を、Yamamoto & Takahashi (2007) のモデルを用いて調べた。特に、その数値実験で見られた「超回転と逆回転のメカニズム」や「逆回転の風速が $-\Omega a$ (自転角速度 Ω , 惑星半径 a) に制限されること」について議論する。時間があれば加熱に対する中層大気大循環の依存性についても示した。

○ 14:10-14:40 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)

金星大気スーパーローテーションの力学

金星大気スーパーローテーションの成因はまだ十分に理解されていないが、近年大気大循環モデリングが盛んに行われるようになった結果、平均子午面循環(ギョーラッシュメカニズム)、熱潮汐波や重力波などによる運動量輸送の重要性が改めて指摘されると同時に、これらのメカニズムの相互の関係が問題となってきた。我々は雲層で励起された熱潮汐波によって大気スーパーローテーションが生成される可能性を示したが、平均子午面循環の効果は無視されていた (Takagi and Matsuda 2006, 2007)。熱潮汐波メカニズムに対する平均子午面循環の影響について議論した。

- 14:50-15:20 松田 佳久（東京学芸大学 自然科学系）高木 征弘（東京大学 理学系研究科）
金星大気の温室効果の特徴

金星大気の鉛直構造を理解するため、金星と地球における放射平衡の特徴、特に太陽光吸収の鉛直分布の違いが温室効果に与える影響を、簡単な放射モデルを用いて考察した。金星地表面の高温の維持には地表面に到達するわずかな太陽光が重要である。また、金星大気中では雲層での太陽光吸収が下層大気の安定化をもたらすが、その効果は量的には非常に小さいことが示された。灰色大気の仮定の下では、吸収係数の圧力増幅の効果がなくても、二酸化炭素の定圧比熱の温度・圧力依存性を考慮すると、金星下層大気の放射平衡温度分布は対流不安定である。

- 15:20-15:50 加藤 亮平（九州大学大学院 理学府）中島 健介（九州大学大学院 理学研究院）
木星大規模渦の数値モデリング

木星の大気現象を理解するためには、よくわかっていない大気の鉛直構造を知ることが必要である。この鉛直構造は、様々な基本場を仮定した数値実験を行い、大赤斑のような大規模渦の振る舞いを比較することで、推定できる可能性があることが示唆されている(Williams, 1996)。そこで本研究では、ブジネスク近似をしたプリミティブモデルを作成し、様々な数値実験を行っており、最終的には、木星大気の鉛直構造を推測することを目指している。本発表では、交互に変わる東西風を初期に与え、それが不安定を起こすことによって大規模な渦が生じ、長時間安定に存在した例を紹介した。

- 15:50-16:20 杉山 耕一郎（九州大学大学院 理学研究院）
小高 正嗣（北海道大学大学院 理学研究院）
中島 健介（九州大学大学院 理学研究院）
林 祥介（神戸大学大学院 理学研究科）
木星大気の雲対流の直接数値計算

木星大気の雲対流は、地球大気の場合と同様、大気の大規模な循環構造や物質分布の決定に重要な役割を担っていると想像されている。我々は H₂O と NH₃ の凝結および NH₄SH の生成反応を考慮した 2 次元雲対流モデルを新たに開発し、放射を模した一様冷却下で多数の雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる循環構造と物質分布を調べてきた。本研究会では、開発した雲対流モデルの概要と得られた結果を紹介した。

- 16:30-17:00 山崎 哲・伊藤 久徳（九州大学大学院 理学府）
ブロッキングの形成・持続機構に関する事例研究

大気ブロッキングに関するメカニズムについて、Shutts (1983)は、傾圧波（高周波擾乱）からフィードバック機構‘Eddy Straining Mechanism(以下ESM)’を提唱した。しかし最近、Arai and Mukougawa (2002)は、ESMは非常に限られた条件でしか成立しないと主張した。そこで、今回の研究では、事例解析により現実場においてESMが効果的に働く条件を探し、ESMに重要な要因を考察した。

- 17:00-17:30 齊藤 洋一・伊賀啓太（東京大学 海洋研究所）
離散進行型スコールラインの数時間変動に関する数値的研究

スコールライン型対流系では、cold poolの前進による空気塊の強制上昇が及ばない数十km前方で新たな対流雲が発生する‘forward convective initiation (forward CI)’が観測されている。さらに、十分発達した新しい対流セルが既存のストームと統合する際に対流系前面が転移することがある。これら一連の過程は‘discrete propagation event (DPE)’と呼ばれている。本研究では、非静力学数値モデルを使用し、下層が非常に湿った基本場を用意することで、理想化実験内でDPEを再現することができた。その結果、forward CIの発現メカニズムについて、先行研究と大きく異なる点が出てきたので、ここに報告した。

- 17:30-18:00 前島康光・伊賀啓太（東京大学 海洋研究所）

前線不安定による大気メソスケール擾乱の非線形発展

冬季日本海西部には帯状収束雲と呼ばれる雲が形成され、それに沿つメソ α スケールやメソ β スケールの擾乱が発生ことがある。本研究では前線状の構造をした基本場を考え、その時間発展を計算することによって擾乱の非線形発展期に見られる特徴を調べた。その結果、擾乱発生初期にはメソ β スケールの擾乱が卓越するが、時間が経過すると衰退し次第にメソ α スケールの擾乱に遷移した。このような振る舞いは、成分波間の非線形相互作用によって説明することができた。

3月4日(火)

○9:30-12:00 見延 庄士郎(北海道大学 大学院理学研究院)
十年スケール気候変動と大気海洋相互作用
【集中講義】

○13:00-13:30 坂本 圭・秋友 和典(京都大学大学院 理学研究科)
回転系において潮流が形成する乱流境界層に関する数値的研究

地球回転の下で潮流(時間振動流)によって海底に形成される乱流境界層について、3次元非静水圧モデルによる実験を行った。その結果、コリオリ・パラメータが潮流振動数に近いほど、厚い境界層が形成され、活発な乱流混合が起こることが示された。この緯度依存性の原因を、密度一様実験と成層実験の結果を用いて明らかにした。

○13:30-14:00 田中 潔(東京大学 海洋研究所)
海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の力学

海洋中において、大陸棚斜面を沈降する密度流に伴う傾圧不安定の力学とそれによる海水輸送を、数値実験によって調べた。特に、地球回転の効果と海底斜面の効果に焦点をあてた。地球回転、海底斜面はともに、傾圧不安定の発達期(微小振幅時)においては密度流の不安定性を強化するのに対して、成熟期(有限振幅時)にはそうした不安定によって生じる渦による高密度水輸送を弱める効果を持つ。

○14:00-14:30 松浦 知徳・下川 信也(独立行政法人 防災科学技術研究所)
季節変化風応力強制場における準地衡流ダブルジャイヤー海洋の非線形現象

海洋大循環を単純化したダブルジャイヤー海洋において、その固有振動と季節変化する風応力外力との非線形相互作用について、1.5層準地衡流渦位方程式及びエネルギー収支に関する力学系モデル(外力のあるブラッセレイター)を併用して調べた。周期的慣性サブジャイヤーの切離が発生する状況のレイノルズ数に固定し、外力の振幅を変化させていくと、非線形現象特有の引き込み現象や慣性サブジャイヤーの切離とモドン状の解との間で間歇的な不規則変動が現れることがわかった。これらは、海洋大循環ダブルジャイヤーの時間変化風応力のある場合における興味深い非線形現象をあらわしており、それらについて詳しく示した。

○14:40-15:10 横嶋 悟・三村 和男(東海大学大学院 理学研究科)
閉ループ内熱対流数値実験 - 2つの計算モデル -

2次元流を仮定したアニュラス型閉ループ内熱対流に関して、有限差分法(FDM)と有限要素法(FEM)の2つの異なる離散化モデルを用いて数値実験を行い、両モデルを比較検証した。さらに、ループのアスペクト比を変化させ、各無次元数(Pr, ϵ Gr)における流体の振る舞いを分類した。また、初期条件として用いた3変数定常理論解(三村, 2006)との比較により3変数理論について考察した。

○15:10-15:40 松島 和宏(東海大学 地球環境科学研究科)
三村 和男(東海大学 理学研究科物理専攻)
f面水槽とベータ面水槽に生じる惑星波動の比較

本研究は傾圧性による不安定波動の励起と惑星ベータ効果による中立波の共存状態を室内実験で観察する事を目的としている。実験方法として側面加熱・中心冷却を行える円筒型水槽を回転させ傾圧性を、流

体層厚を半径方向に変化させることで(放物底)で惑星ベータ効果を表示している。順圧ではないため地形性ベータと惑星ベータ効果は等価ではないが幾分の効果を期待している。今回は放物底と平面底の実験の比較を行い、結果として生じた流れについて報告した。

○15:40-16:10 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の低次カオス ～スペクトルモデルによる考察～

二重円筒型(アニュラス型)閉ループ内熱対流実験において、あたかもローレンツカオスのような主流の反転現象が見られる。それは、室内実験においても、数値実験においても確認されている。しかしながら、ローレンツシステムのように主流の定常安定領域から、直にカオス反転領域に遷移するのではなく、乱流安定領域を経てカオス反転が観られる点は、大きく異なる点である。この遷移過程を詳細に調査するため、小自由度から大自由度まで対応可能な専用のスペクトルモデルを構築し、無限自由度を持つ現実流体中の低次カオスについて考察した。

○16:20-16:50 百武 宏之・岩山 隆寛 (神戸大学大学院 自然科学研究科)

円形渦のもとで駆動される非線形エクマンポンピングの水平分布について

本研究では、自由大気が動径方向に滑らかに変化する軸対称な円形流の場合に、駆動される非線形エクマンポンピングによる鉛直速度の水平分布を数値的に求めた。非線形項の大きさを表す無次元パラメータであるロスビー数は5から10程度の大きさの場合を対象として研究を行った。下端境界に粘着条件を与えると、高ロスビー数の場合に、中心軸付近のみで鉛直速度は減少するため、ポンピングは中心軸付近で極小となる。

○16:50-17:20 雪本 真治 (東京大学 海洋研究所) 野口 尚史 (京都大学大学院 工学研究科)

新野 宏 (東京大学 海洋研究所) 木村 龍治 (放送大学)

吸い込み渦の構造と力学

吸い込み渦の構造と力学について室内実験・数値実験・境界層理論により調べた。吸い込み渦は一定の角速度で回転する円筒容器の底面に開けた小さな穴から一定の流量の水を流出させ、同量の水を側面から流入させることによって作った。実験の結果、渦核の外側のすべての半径で角運動量一定のポテンシャル渦が実現する場合と、すべての半径ではポテンシャルが実現しない場合の2つの異なる状態があることがわかった。境界層理論から求めたこの2つの状態を区別する判定基準は、実験の結果をよく説明する。

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、本研究集会在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20年3月3日(月)～4日(火)

代表者 組織名 新野宏 東京大学・海洋研究所

参加者 37名

乱流現象及び多自由度系の動力学，構造と統計法則

研究代表者・石原 卓（名古屋大学大学院工学研究科）

1 研究集会の開催目的

プラズマや大気・海洋の流れ，工学的応用分野における流れ，及び，身の回りの多くの流れは乱流である．これらの多様な乱流現象を理解し，予測する理論の構築及び手法を開発することが重要であり，現在，各々の分野で実験・観測，理論・解析，計算科学などの様々な方法論により精力的に研究されている．乱流研究の新たな展開のためには，異なる分野の乱流現象を扱う研究者，及び，異なる方法論を担う研究者が互いの議論を通して，現象を理解するための鍵となる動力学，構造，統計法則について知識を共有し，新たな概念を自らの方法論へフィードバックすることが重要であると考えられる．国際会議やワークショップを見る限り，欧米に比べて日本では，様々な分野と方法論の研究者には，このような機会が少ないのが現状であると思われる．

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 講演内容の概要

決定論的拡散における拡散係数の新しい決定法

小林 幹，森野佳生，宮崎修次

カオスの不安定性が原因で引き起こされる拡散現象，以下決定論的拡散と呼ぶ，における拡散係数を近似的に決定する方法を提案する．最近，カオス的に変動する物理量の時間相関関数を近似的に求めるための方法，以下マルコフ法と呼ぶ，が提案された．拡散係数は，拡散している対象における速度の時間相関関数を用いて得ることが出来るので，マルコフ法を用いて速度の時間相関関数を求めることで，拡散係数を近似的に決定することが出来る．本報告書では，マルコフ法を用いた拡散係数の決定法について簡単に説明した後，決定論的拡散を示す最も簡単な系である一次元区分線形カオス写像を用いて，本方法の妥当性を検証する．

混合を観る—クエット系の不安定周期流解析

木田重雄，田谷貴男

クエット系の不安定周期流中のパッシブ線素の混合特性を数値シミュレーションによって解析した．流れの領域を多数の小立方体に分割し，各立法体内の多数のパッシブ線素の方向分布を不安定周期流の各時間位相ごとに求めた．その結果，線素の方向分布の仕方は，線状（線素が一方方向にそろっている）と面状（線素の方向が面内にある）が大部分であった．この不安定周期流は流れ方向渦や低速ストリークといったクエット乱流の特性をよく再現するが，上記の線状領域は流れ方向渦の内部に，面状領域はその周辺に分布することがわかった．

大規模 DNS データを用いた Kolmogorov の 4/5 法則の検証

吉野順也，石原 卓，金田行雄

本研究では，格子点数が 2048^3 ，Taylor micro-scale で規格化された Reynolds 数が 732 である，周期箱内にしたがう 3次元非圧縮性強制乱流の直接数値計算データをもとに Kolmogorov の 4/5 法則を検証した．検証は非等方性乱流に対する厳密な一般化 Kármán-Howarth-Kolmogorov (KHK) 方程式にもとづいておこなった．検証に関して最も注目した点は，Reynolds 数の有限性とスケール領域の有限性，そして厳密に無視することはできない乱流場の非等方性の影響である．DNS データの解析結果により，KHK 方程式の粘性項と外力項がもつ役割についての定量的な知見が得られた．また解析結果は，乱流場がもつ非等方性が広いスケール領域にわたって 4/5 法則に対して顕著な影響をもつことを示唆した．

一様等方乱流におけるエネルギーカスケード

後藤 晋

一様等方乱流中では大きなスケールに注入されたエネルギーが次第に小さなスケールへと輸送される．このエネルギーカスケードの物理機構を直接数値計算 (DNS) のデータ解析により探った．流体運動の (ガリレイ不変な) エネルギーとその伝達率を位置，時刻およびスケールの関数として導入し，テイラー長に基づくレイノルズ数が 187 の一様等方乱流の DNS のデータ解析を行った．その結果，各スケールのエネルギーは各スケールの管状の渦構造が主に

担っており、一方でエネルギー伝達はそれらの管状の渦構造どうしの間引き伸ばし場で起こっていることが分かった。つまり、エネルギーカスケード（の少なくとも一部）は、より大きな管状渦間引き伸ばし場においてより小さな管状の渦構造が生成されることによるものであると考えられる。

格子ボルツマン法による非圧縮乱流の直接数値計算

米本 隆, 後藤 俊幸, 渡辺 威

乱流の数値計算において、スペクトル法による Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーション (DNS) では、精度の高い結果が得られることが知られている。しかし、大規模な数値計算では、計算効率が上がらないという事実もある。そこで、並列化が容易で通信量の少ない格子ボルツマン法での代用を考えた。本研究では、一様等方乱流の統計的性質を、格子ボルツマン法による DNS の結果とスペクトル法による Navier-Stokes 方程式の DNS の結果とを比較する。乱流場の一点統計量は、ほぼ誤差がない結果を得られたが、エネルギースペクトルや圧力スペクトルの散逸領域では値が一致しなかった。特に圧力スペクトルに関しては、高波数域にピークを持つ結果となり、乱流の計算手法としての格子ボルツマン法のスキームの限界を確認することができた。一方で、計算効率の面では、格子ボルツマン法による DNS が Navier-Stokes 方程式の DNS と比べて見劣りしない結果を得た。

固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響

細川 巖

It is proved that the famous third-order structure function of the velocity in homogeneous isotropic turbulence derived by Kolmogorov implies the statistical interdependence of the difference and sum of the velocities at two points separated by a distance r . However, this is inconsistent with Kolmogorov's hypothesis regarding the difference between such velocities, made in 1962, in the sense that it implies that the statistics of the non-dimensional prefactor of the velocity difference are not universal but, instead, depend on the velocity sum.

複雑時系列のパターン・エントロピー時系列解析

石崎 龍二, 井上 政義

私たちが開発しているパターン・エントロピー時系列解析法は、時系列を記号化し、ある時間内にあらわれるパターン数をエントロピーとして時系列の複雑性を特徴づける手法である。私たちは、これまでラットの睡眠覚醒状態のレベルの特徴づけを、脳波のパターン・エントロピー時系列解析により行ってきた。その結果、パターン・エントロピー時系列は、ラットの脳波の睡眠覚醒状態のレベルの解析に有用であることがわかってきた。そこで私たちは、パターン・エントロピーの統計的な意味を理解するために、複雑な時間変化をする定常時系列の典型としてカオス時系列を対象に、パターン・エントロピー時系列による解析を行った。

乱流粘性係数と流体乱流の統計力学

柴田 博史

ラーゼ・エディ・シミュレーション (LES) のサブグリッドスケール (SGS) に対する一モデルとして、統計力学を導入する。渦粘性係数（あるいは乱流粘性係数）は、流体乱流の速度を用いて表現される。これは、分子粘性係数に対する Helfand の公式のアナロジーになっているが、流体乱流の速度が近似的にガウス分布に従っている事に基づく。圧縮性乱流に対する LES を考えると、この統計力学と整合性を持つ熱力学が展開できることを提示する。

Duffing 振動子系の記憶関数スペクトルとローレンツ型パワースペクトル

富永 広貴, 森 肇, 石崎 龍二, 森 信之, 黒木 昌一

巨視変数の熱揺動の dynamics を定式化するために展開された射影演算子法 (H. Mori, 1965) を拡張して、カオス・乱流の random な揺らぎの dynamics を記述する線形確率発展方程式を導出する手法を典型的なカオス力学系の一つである Duffing 振動子系に適用した。この formalism において、非マルコフな線形確率方程式が導かれ、記憶関数とその Fourier-Laplace 変換である記憶関数スペクトルを理論的数値的に求めそれを使って、時間相関関数とパワースペクトルの構造を明らかにする。今回、パワースペクトルに現れる非対称ローレンツ型ピークを記憶関数スペクトルにより表すことができた。

マルチフラクタルなカオス系の状態確率分布：双対遷移確率と実効フラクタル次元

川崎光宏

強い非線形性を持ち自由度の大きなシステムに普遍的に見られる「時空カオス」の非平衡定常状態のマクロな特徴づけを行う理論的枠組みを探索した。定常状態を単に軌道の行先としてではなく具体的に特徴付け、ひいては、系の発展方程式を数値シミュレーションするよりも小さな計算量でマクロな性質を計算する手法を得ることを目的としている。baker's map, および、変形された baker's map の結合写像格子において、双対遷移確率という量を用いて定常確率分布を評価することができた。

非一様乱流の交差独立性完結仮説による統計理論

巽友正

Inhomogeneous turbulence in an incompressible viscous fluid is studied statistically using the cross- independence closure hypothesis introduced by the author for closing the Lundgren-Monin equations of the multi-point velocity distributions. First, the turbulent velocity is decomposed into the mean velocity and the fluctuation velocity around the mean, and then the equations for the mean velocity and the one- and two-point distributions of the fluctuation velocities are obtained. The mean energy dissipation rate is expressed in terms of the fluctuation-dissipation integral. General statistical characters of these equations are discussed and a few typical distributions for inhomogeneous fluctuating turbulence are derived as the solutions.

非平衡統計力学・非線形物理学の発展に向けて—故藤坂博一教授の見果てぬ夢—

宮崎修次

非線形物理学・非平衡統計力学の分野で大きな業績を上げてきた藤坂博一京都大学情報学研究科教授が2007年8月21日にくも膜下出血で急逝した。ここでは、大偏差統計解析に焦点をあて、時間変動する力学量の局所平均の大偏差統計特性や二時間相関関数やパワースペクトルの大偏差統計解析の枠組みでの拡張などの彼の過去の研究から死の直前に公表された大偏差統計解析とレベルダイナミクスを結び付ける研究までを一瞥し、彼の残した問題とその一部に対する答えや今後の展望を述べる。

乱流の秩序化過程と間欠性におけるスケーリング則

渡邊 威

発達乱流、及びそれによって輸送されるパッシブスカラーにおける間欠性とそのスケーリング則について、大規模直接数値計算のデータ(最大格子点数 2048^3 , $R_\lambda \simeq 600$)を用いた解析を行った。特に拡張された自己相似性(Extended Self-Similarity; ESS)とそのスケーリング構造の詳細について解析を行い、スケーリング関数の存在とその漸近形について明らかにした。また乱流におけるエネルギー輸送の自己相似統計を特徴付ける揺らぎスペクトルの解析を行い、その構造について議論した。

コロイド分散系の直接数値シミュレーション

名嘉山 祥也, 金鋼, 岩下拓哉, 山本量一

多様な分散媒中のコロイド多粒子系の挙動を予測するための直接数値シミュレーション法の開発について研究を行っている。Smoothed Profile 法と呼ぶコロイド系の直接数値シミュレーション法を定式化し、コロイド系の流体力学相互作用および電気二重層相互作用を解くことに成功した。

Nikolaevskii 乱流

田中ダン

自発的対称性の破れや保存則などにより、空間一様な中立モードを持つ系は偏在する。このような系では、空間周期的な散逸構造形成が阻まれ、一様静止状態から超臨界に時空カオスや乱流へ至る場合がある。本稿では、モデル系として Nikolaevskii 方程式を挙げ、幾つかの未解決課題を紹介する。

溶融と結晶沈殿、組成変化を考慮したマグマ溜りの数値計算

藤坂洋祐, 並木則行, 中田正夫, 竹広 真一

地中に貫入してできたマグマ溜りは、周囲の岩石を融かし込む。同時に内部では融点を下回った成分が結晶化し沈殿する。これらの溶融と沈殿は組成と組成依存の融点に変化を与える。一連の過程を定式化した。

カオス・乱流の時間相関関数の2重構造

森肇, 岡村 誠

カオス・乱流は、軌道不安定な非周期運動であり、その時間相関関数 $U_n(t)$ の減衰は、初期レジーム ($t < \tau_n^{(u)}$) では、可逆な力学的コヒーレンスによって作り出され、終期レジーム ($t > \tau_n^{(u)}$) では、カオス誘導摩擦や乱流粘性など、不可逆なエネルギー散逸によってもたらされる。したがって、時間相関関数 $U_n(t)$ の減衰は、終期レジーム ($t > \tau_n^{(u)}$) では、指数型減衰 $U_n(t) = \alpha_e \exp(-\gamma_{net}t)$ となるが、カオス・乱流に特有な初期レジーム ($t < \tau_n^{(u)}$) では、代数型減衰 $U_n(t) = U_n(0)/[1 + (\gamma_{na}t)^2]$ となることを見出した。したがって、パワースペクトル $I_{u_n}(\omega)$ は、ローレンツ型ピークと指数型ウイングとからなることが分かった。なお、これらは、カオス領域にある Kuramoto-Sivashinsky 方程式および周波数変調モデルについて、時間相関関数 $U_n(t)$ およびパワースペクトル $I_{u_n}(\omega)$ を直接数値計算することにより実証されたものである。

電磁流体乱流のエネルギースペクトル

吉田 恭, 有光敏彦

一様等方性電磁流体乱流に Lagrange 繰り込み近似 (LRA) を適用し、慣性小領域での全エネルギースペクトル $E(k) = E^u(k) + E^B(k)$ と残差エネルギースペクトル $E^R(k) = E^u(k) - E^B(k)$ を求めた。ただし、 $E^u(k)$ は運動エネルギースペクトル、 $E^B(k)$ は磁場エネルギースペクトルである。得られた全エネルギースペクトル $E(k) = 2A\epsilon^{1/2}B_0^{1/2}k^{-3/2}$ 、ただし k は波数、 ϵ は全エネルギー散逸率、 B_0 は磁場揺らぎの一方成分の二乗平均平方根、は Iroshnikov と Kraichnan の現象論と整合している。また残差エネルギースペクトルについては $E^R(k) = A^R\epsilon B_0^{-1}k^{-2}$ となった。現象論では決まらない無次元定数 A と A^R の定量的評価も行った。更に、外力を伴った一様等方性 MHD 乱流の直接数値シミュレーション (格子点数 512^3) を行い、LRA で得られたエネルギースペクトルの検証を行った。

Soft-mode turbulence in dissipative system

Michael I. Tribelsky

Patterns in dissipative systems with weakly broken symmetry are studied based upon the simplest canonical equation (generalized Nikolaevskiy model). The generic cubic dispersion equation governing stability of steady spatially periodic patterns is derived and analyzed. A domain of stable states in the space of the problem parameters (stability balloon) is obtained. It is shown that the domain is characterized by unusual scaling properties, so that its different parts obey different scalings. The results obtained may be applied to describe instabilities of advancing fronts and interfaces, pattern formation in reaction-diffusion systems, nonlinear evolution of seismic waves and other phenomena.

原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた量子乱流研究の実現

小林 未知数

我々は量子流体のダイナミクスを記述する Gross-Pitaevskii 方程式の数値シミュレーションを用いてトラップされた冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における量子乱流の実現可能性を調べた。2軸周りの歳差回転を用いることにより、量子渦が格子状態とはならず、複雑に絡まった量子乱流状態となり、非圧縮性運動エネルギーのスペクトルが乱流の重要な統計則である Kolmogorov 則に従うことを明らかにした。

ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる渦格子パターンの流体力学的解釈

梅木 誠

ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる2次元の渦格子パターンを、相互運動エネルギー (ハミルトニアン) を極小とする点渦系の安定かつ定常な配置として古典的な流体力学の立場より考察する。勾配系を用いてその配置を探索した数値例、特に渦の個数 $N = 3 \sim 10$ と $N = 100$ の場合を紹介し、後者では十分時間が経過するとその相対位置が正三角形に近い分布になることを示す。

古典乱流と量子乱流

宮崎巧也, 久保 涉, 中野 徹, 後藤俊幸

古典乱流と量子乱流における特異構造のトポロジーの次元依存性を調べた。両者を記述する方程式は異なるが、特異構造のトポロジカルな次元は同じである。2次元では点であり、3次元ではライン、4次元ではシートであることを確認した。それらの性質は、特異構造の間で繋ぎ換えが起こるかどうか、粘性のない量子乱流においてもエネルギー散逸が起こりうるかどうかを決める。

渦輪の不安定性の直接数値シミュレーション

服部裕司, 泥谷圭亮, 福本康秀

The instability of a vortex ring is studied by direct numerical simulation of the Navier-Stokes equations. We consider a vortex ring con.ned in a torus. The exponential growth of various modes is captured by direct numerical simulation. It is found that the vortex ring is unstable for all values of the parameter ϵ , the ratio of core to ring radius, although exact parametric resonance is limited to discrete values. The structure of destabilized vortex ring is investigated in detail.

音波とシア流(渦)の相互作用の力学的解釈

廣田 真, 福本康秀, 吉田善章

超音速シア流では音波が不安定化することで知られているが, これに対する力学的な解釈を行った. すなわち, 振動のエネルギーをハミルトン力学に基づいて導出し, 音波(固有モード)と渦モード(特異な固有モード)が相互作用して不安定化する過程をエネルギー論的に議論した. これは Krein による力学系の分岐理論とよく似ているが, 渦モードが固有値ではなく, 連続スペクトルに属するため, 流体のような無限自由度力学系に特有の現象である.

ラグランジュ座標でみた2次元オイラー方程式の解の振舞い

松本 剛, Jeremie Bec, Uriel Frisch

空間2次元周期境界条件下でのオイラー方程式についてスペクトル精度をもつ数値解をラグランジュ座標で計算する方法について述べる. この方法を用いて, ラグランジュ座標を解析接続した解が持つ複素特異性について議論する.

矩形オリフィス後方の非対称流における乱流構造と乱流統計量

牧野 総一郎, 河村 洋, 岩本 薫

矩形オリフィスを有する流路における乱流の直接数値シミュレーションの結果から, オリフィス後流の特徴的な乱流構造と乱流統計量の関連について調査した. その結果, 剥離・再付着流の代表例であるバックステップ乱流場では観察されない特徴がいくつか存在することがわかった. また, 急拡大流路などにも見られる, オリフィス後流の非対称現象についても調査し, その乱流モデルによる予測精度に関しても調べた.

正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーション: 二次流れのレイノルズ数依存性

関本 敦, 河原源太, M. Uhlmann, A. Pinelli

Spectral direct numerical simulations of fully developed turbulent flow in a straight square duct were performed in order to investigate flow structures at low Reynolds numbers. It was found that turbulence can be maintained for values of the bulk Reynolds number above approximately 1100, and the minimum value for the streamwise period of the computational domain is around 190 wall units, which is roughly independent of the Reynolds number. The flow state at marginal Reynolds numbers exhibits a 4-vortex secondary flow structure alternating in time, whereas the fully turbulent one presents the usual 8-vortex pattern. It is shown that buffer layer coherent structures play a crucial role in the appearance of secondary flow of Prandtl's second kind at the marginal Reynolds numbers. Coherent structures are observed to affect the mean primary and secondary flow even at higher Reynolds numbers.

3 プログラム

11月23日(金)

- 13:30-14:00 小林 幹, 宮崎修次, 森野佳生(京大情報)
シェルモデル乱流における時間運動の統計的性質
- 14:00-14:30 木田重雄, 田谷貴男(京大工)
混合を観る — クエット系の不安定周期流解析
- 14:50-15:20 吉野順也, 石原 卓, 金田行雄(名大工)
大規模 DNS データを用いた Kolmogorov の 4/5 法則の検証
- 15:20-15:50 後藤 晋(京大工)
一様等方乱流におけるエネルギーカスケード
- 16:10-16:40 米本 隆(名工大), 後藤俊幸, 渡辺 威(名工大, CREST)
格子ボルツマン法による非圧縮乱流の直接数値計算
- 16:40-17:10 細川 巖(電通大名誉教授)
Paradox in Kolmogorov's Refined Similarity Hypothesis

11月24日(土)

- 9:00-9:30 石崎龍二(福岡県立大), 井上政義(鹿大名誉教授)
複雑時系列のパターン・エントロピー時系列解析
- 9:30-10:00 柴田博史(崇城大)
乱流粘性係数と流体乱流の統計力学
- 10:20-10:50 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 振動子系の記憶関数スペクトルとローレンツ型パワースペクトル
- 10:50-11:20 川崎光宏(新潟大工)
マルチフラクタル・カオス系の非平衡定常状態の状態確率分布
— 双対遷移確率とアトラクタの実効フラクタル次元 —
- 11:20-11:50 巽友正(京大名誉教授)
非一樣乱流の交差独立性仮説による統計力学
+++++ 故藤坂博一教授の追悼講演セッション +++++
- 13:30-14:00 宮崎修次(京大情報)
非平衡統計力学・非線形物理学の発展に向けて— 故藤坂博一教授の見果てぬ夢 —
- 14:00-14:50 渡邊威(名工大)
乱流の秩序化過程と間欠性におけるスケーリング則
- 14:50-15:40 名嘉山 祥也(九大工), 金鋼(分子科学研), 岩下拓哉(京大工) 山本量一(京大工, CREST)
コロイド分散系の直接数値シミュレーション
- 16:00-16:50 田中ダン(福井大工)
Nikolaevskii 乱流
- 16:50-17:20 藤坂洋祐, 並木則行, 中田正夫(九大理), 竹広真一(京大数理研)
溶融と結晶沈殿, 組成変化を考慮したマグマ溜りの数値計算
- 17:20-17:50 森肇, 岡村 誠(九大応力研)
カオス・乱流の時間相関関数の2重構造
+++++

11月25日(日)

- 9:00-9:30 吉田 恭, 有光敏彦(筑波大数理物質科学)
電磁流体乱流のエネルギースペクトル
- 9:30-10:00 Michael I. Tribelsky (Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics and Automation)
Soft-mode turbulence in dissipative systems
- 10:20-10:50 小林 未知数(大阪市立大理)
原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた量子乱流研究の実現
- 10:50-11:20 梅木 誠(東大理)
ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる渦格子パターンの流体力学的解釈
- 11:20-11:50 宮崎巧也, 久保 涉, 中野 徹(中大理工), 後藤俊幸(名工大)
ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性
- 13:30-14:00 服部裕司, 泥谷圭亮(九工大工), 福本康秀(九大数理)
渦輪の不安定性の直接数値シミュレーション
- 14:00-14:30 廣田 真, 福本康秀(九大数理), 吉田善章(東大新領域)
音波とシア流(渦)の相互作用の力学的解釈
- 14:50-15:20 松本 剛(京大理), Jeremie Bec, Uriel Frisch(仏コートダジュール天文台)
ラグランジュ座標でみた2次元オイラー方程式の解の振舞い
- 15:20-15:50 牧野 総一郎, 河村 洋(東京理科大), 岩本 薫(東京農工大)
矩形オリフィス後方の非対称流における乱流構造と乱流統計量
- 15:50-16:20 関本 敦, 河原源太(阪大基礎工), M. Uhlmann, A. Pinelli (CIEMAT)
正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーション: 二次流れのレイノルズ数依存性

4 開催日程, 場所

- 開催日程 2007年11月23日(金) - 11月25日(日)
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 27件
参加者数 41人

(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年間の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ース科学推進事業」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「インターフェース」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ー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においては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。その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19年度共同利用研究集会19ME-S8の前刷集をご覧ください。

2. 講演概要

(1) 原子間力顕微鏡をプローブとした細胞構造応答特性についての数値的考察

妹尾昌尚(九大院工学府), 高雄善裕, 汪文学(九大応力研)

細胞の剛性に関し、内径数十ナノメートルのピペットで細胞を吸引したり、柔らかい基板上を細胞が運動する時に生じた基板の痕跡から運動時に発生した力を推定するなど様々な研究が行われてきた。しかし、それらは細胞の局所的な応力や剛性の分布を直接測定できなかつたため、運動や形態変化と細胞内に起こる構造的な変化を関連付けることはできなかった。

近年、急速に発展しつつある原子間力顕微鏡 AFM では、試料の局所的な剛性や粘性などの力学特性の分布を高精度に測定することが可能なことであり、様々な研究が行われている。しかし、その多くは実験的研究に集中しており、数値的な研究は単純な理論モデルを対象としたものにとどまっている。そこで本研究では、粘弾性や構造内部の不均質性といった細胞本来の特質を考慮に入れた細胞構造モデルを用い、AFM 試験の測定結果に影響を及ぼす要素に関して、有限要素法(Finite Element Method : 以下 FEM と記す)による数値的な考察を行う。

(2) 擬似咬合状態での歯周組織の力学状態解析

吉岡 友彦¹, 森田 康之², 東藤 貢², 松下 恭之³, 古谷野 潔³, 内野 正和⁴,
新川 和夫²

¹九大院総合理工学府, ²九大応力研,

³九大歯学研究院, ⁴福岡県工業技術センター機械電子研究所

咬合機能の解明において歯牙の動態・変形に関する研究は、歯科医学分野の大きな研究対象の一

つであり、以前より数多く行われている。しかしながらいずれの手法においても、歯牙の局所的変位量・ひずみを求めることを目的とした一点計測や、乾燥状態の歯牙単体における解析であり、咬合解析に十分な情報量とは言い難い。そこで本研究では、と畜されてすぐの生体に近い状態であるブタの試験片を用いて変形計測を行った。全視野計測による変形解析には、デジタル画像相関法を用いた。さらに、組織の力学的挙動を明らかにするために、組織の3次元モデルによる有限要素解析 (FEA) を行った。

(3) 3-D stress analysis of dental implant with model bone

Lihe QIAN, Mitsugu TODO (*RIAM, Kyushu Univ.*), Yasuyuki MATSUSHITA,
Kiyoshi KOYANO (*Faculty of Dental Sciences, Kyushu Univ.*)

With an increased application of implants in dentistry for rehabilitation of damaged or missing teeth in partially or completely edentulous patients, raising the long-term success rate of endosseous implants has become critically important. A reduced long-term success rate is due to various reasons including biomechanical interactions between implants and jawbone. Although such biomechanical interactions have been recognized to play an important role in prolonging the lifetime of the jawbone and implants, the underlying mechanisms are still unclear. It has been experimentally demonstrated that an overload acting on an oral implant can result in loss of the marginal bone or even complete loss of osseointegration. The loss of marginal bone can cause loss of implant, leading to the loss of implant function. It is also indicated that, however, if the strain or stress is below a critical value, disuse of the bone occurs and remodeling results in a loss of bone, i.e., atrophy occurs. Therefore there exists an optimal stress/strain for the bone formation, which is closely related to the design of the implant, and dentists' clinical operation. And therefore, in order to reduce the implant failure and to protect the surrounding bone, a thorough investigation of stress and strain distributions in the bone and the implant may be of vital importance. The aim of this work is thus, by means of a finite-element (FE) analysis, to investigate the effects of implant size, implant insertion depth and loading condition on the stress/strain distributions in an implant and in a jawbone surrounding the bone.

(4) インプラント支持オーバーデンチャーの有限要素法モデル化に関する基礎的検討

松下恭之、佐々木健一、江崎大輔、春田明日香、長嶋利夫²⁾、東藤貢³⁾、
古谷野潔
九大歯学研究院口腔機能修復学講座、²⁾上智大理工学部、³⁾九大応力研

下顎無歯顎症例に対して、当科ではインプラントを用いたオーバーデンチャーにより臨床的に良好な結果を得ている。その生体力学的特性について下顎模型に埋入したインプラントモデルでひずみ計測を行い、力学的影響について報告した。インプラントの形状、配置などが及ぼす影響を検討しようとする、多くの模型実験を必要とすることになる。一方有限要素法解析ではモデルの変更等が容易であり、個別の患者ごとのより実際的な応力分布を検討することが可能となる。そこで今回このひずみ計測モデルをもとに有限要素法モデルを構築することを目的とした。

(5) 造成骨再生評価のための光干渉型レーザー誘起超音波装置開発の試み

森田康之(九大応力研)、井上寿志(九大院総合理工学府)、東藤貢(応力研)、
松下恭之(九大歯)、新川和夫(九大応力研)、古谷野潔(九大歯)

We propose the non-contact displacement measurement method for various materials based on laser-induced ultrasound. We illuminate nanosecond pulse laser to the material surface. The various kinds of elastic waves whose maximum frequency is several hundreds MHz are excited by laser-induced ultrasound. And then, only elastic waves which depends on the thickness of specimen remains selectively. The elastic waves occur displacement. We propose the collector optics type Twyman-Green interferometer as non-contact measurement method for displacement of rough surface. Using the aluminum whose thickness is 1 mm, we can detect the resonance signal of elastic waves and the

resonance frequency that is 3.8 MHz by FFT.

(6) モノマー含浸・重合による医療用ポリマー複合型多孔質チタン材料の開発

仲井正昭、新家光雄、赤堀俊和（東北大金材研生体材料学研究部門）

チタン材料は、特に比強度、耐食性および生体適合性に優れる材料であり、生体用金属材料として骨代替器具等に利用されている。また、これらの特性に加え、ヤング率が骨の値（10-30 GPa）に近い材料を用いることが、骨の健全な治癒および再生に対して有利であるとされていることから、近年では、低ヤング率型チタン材料の開発が精力的に進められてきている。

金属材料の低ヤング率化に極めて有効な手段のひとつとして、多孔質化が挙げられる。しかしながら、その反面、多孔質化には、機械的性質の低下を招くという問題点も存在する。この機械的性質の低下は、多孔質体空隙部の応力集中に起因すると考えられることから、それが緩和されることにより、ある程度抑制されると推測される。応力集中の緩和には、空隙部への他材料の充填が有効と考えられる。このとき、充填物として低ヤング率の生体活性物質を用いれば、多孔質化によりもたらされる低ヤング率を維持しつつ機械的性質の低下が抑制されると同時に、金属材料には本来備わっていない生体機能が付与されることになる。

低ヤング率であり、かつ生体活性な充填物の候補材料として、種々の医療用ポリマー材料が挙げられる。これは、医療用ポリマー材料が、一般的に、生体用金属材料およびセラミックス材料と比較してヤング率が低く、また、特に生体軟組織あるいは血液等に対する生体活性に優れるためである。そこで、本研究では、モデル実験として、多孔質純チタンに医療用ポリマー材料のひとつであるポリメタクリル酸メチル（PMMA）を充填し、多孔質純チタンの機械的性質に及ぼすPMMA充填の影響を調査・検討した。

(7) Hydroxyapatite Formation on MOCVD-CaTiO₃ coated Ti

Mitsutaka Sato¹, Rong Tu¹, oTakashi Goto¹, Kyosuke Ueda¹, and Takayuki Narushima²

¹ Inst Mater Res, Tohoku U., ² Tohoku U. Biomed Engr Res Org

Ca-Ti-O films were prepared by MOCVD using Ca(dpm)₂ and Ti(OiPr)₂(dpm)₂ precursors. The phases, composition and morphology of Ca-Ti-O films changed depending on the molar ratio of Ca to Ti precursors (RCa/Ti), total pressure (*P*_{tot}) and substrate temperature (*T*_{sub}). CaTiO₃ films in a single phase were obtained at *T*_{sub} = 973 and 1073 K. CaTiO₃ films prepared at 873K had a dense structure and smooth surface. CaTiO₃ films prepared at *T*_{sub} = 1073 K had complicated rough surface with a cauliflower-like texture. Hydroxyapatite (HAp) formed in 3 days on the CaTiO₃ film prepared at *T*_{sub} = 1073 K.

(8) リン酸オクタカルシウムの物理化学的性質と骨再生促進能

穴田貴久¹、本田義知¹、熊谷崇²、島内英俊²、鈴木治¹

¹ 東北大歯学研究科顎口腔機能創建学分野、

² 東北大歯学研究科歯内歯周治療学分野

リン酸オクタカルシウム（OCP: Ca₈H₂(PO₄)₆・5H₂O）はヒドロキシアパタイト（HA: Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂）の前駆物質であり、実際に歯のエナメル質、象牙質や骨のHAマトリックス中に同定されている。これまでに我々は、合成OCPをマウス頭頂骨骨膜下あるいはラット頭蓋冠の規格化骨欠損部等に埋入すると、HAに比べ、生体内で吸収されつつ骨再生を促進することを報告してきた。OCPは骨再生過程において骨芽細胞やその前駆細胞等に作用することで骨形成を促進し、OCP自身が骨形成の核となって骨修復が促進する所見が得られている。本研究はOCPの骨再生能を明らかにすることを目的とし、骨再生材料として臨床応用されているHAセラミックスと比較することで、培養骨芽細胞の細胞増殖・分化に与える影響を検討した。

(9) PLLA scaffold の試作と圧縮変形挙動

倉岡宏行 (九大院総理工学府), 東藤 貢 (九大応力研)

金 鎮雄, 瀧健太郎, 大嶋正裕 (京大工学研究科)

生分解性高分子であるポリ(L-乳酸) (PLLA) は, その生体適合性や生体内での吸収性の高さから医療分野において幅広く使用されている。例えば, 再吸収可能なプレート, ロッドそしてスクリューなどといった骨固定材がPLLAから作られ, 整形外科, 口腔外科, 脳外科などで使用されている。また, 最近では, 生体内での分解速度, 機械的強度, 生体適合性を改善するために, PLLAにハイドロキシアパタイト (HA) 粒子を複合化したHA/PLLA複合材料の実用化が始まっている。一方, 再生医療においても生体吸収性材料としてPLLAは期待されており, 特に多孔質構造のPLLAはscaffoldとしての研究開発が進んでいる。Scaffoldとしては, PLLA単体に加えてHAやTCPのような生体活性セラミックスを複合化した材料が候補として考えられている。このような多孔質構造のscaffoldの内部で特定の細胞を培養することにより組織の再生を促進するといった効果が期待されている。しかし, 多孔質という特異な構造とその力学特性の関係については, いまだ未知の部分が多いのが現状である。そこで本研究では, PLLAの3次元多孔質構造を作製し, 構造と力学的挙動との関係を調べることを目的とした。相分離法を用いて多孔質構造を作製し, 圧縮試験を行って応力-ひずみ関係を評価した。また, 微細構造の特徴を明らかにするため, 試料の表面を電解放射形走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) で観察した。さらに, 圧縮変形前と後の表面のFE-SEM画像を比較することで, 圧縮変形メカニズムについて考察した。

(10) 三次元有限要素法による下顎骨に対する応力解析

寺嶋雅彦¹⁾, 中島昭彦¹⁾, 赤司篤政²⁾, 高雄善裕²⁾

¹⁾九大歯学研究院口腔保健推進学講座, ²⁾九大応力研

顎変形症の発現因子には, 遺伝要因に加え環境要因として咬合干渉など顎口腔機能の異常による下顎の偏位, 筋機能の不均衡など多様な要因が考えられ因果関係は複雑である。顎顔面骨格には咀嚼筋から種々の力が加わり, それによって骨の形成が誘起され, 個人特有の顎顔面形態が決まる。なかでも歯列に加わる機能圧は, その大きさや加わる時間の上で骨形成への影響力が最も高いと思われる。咬合異常などによって長期間に亘り異常な圧力が歯列に加わるとそれは顎顔面構造全体に伝達され, 若年者においては不均衡な成長が起こると考えられる。しかし, これら顎機能異常の原因は不明な点が多く, 患者個人の骨体に生じる力学的状態を応力解析する方法は未だ確立されていない。そこで, 本研究の目的は, spiral/helical computed tomography より構築した顎顔面骨格, 咀嚼筋, 歯根形態のデータに非接触型三次元形状計測装置を用いて計測した歯列咬合面データをもとに, 患者個人の三次元的な有限要素モデルを構築し, 下顎骨に対する応力解析を可能にするシステムを構築したので報告する。

(11) リン酸オクタカルシウム/コラーゲン複合体による膜性骨嵩上げ促進の可能性

鈴木祐子¹⁾, 鎌倉慎治²⁾, 羽鳥弘毅¹⁾, 佐々木和夫³⁾, 本田義知¹⁾, 穴田貴久¹⁾, 佐々木啓一¹⁾, 鈴木治¹⁾

¹⁾東北大歯学研究科 ²⁾東北大医学系研究科 ³⁾日本ハム株式会社

骨や歯を構成する生体アパタイトは, リン酸カルシウム的一种であるリン酸オクタカルシウム (Octacalcium Phosphate; OCP) を前駆物質として経由し形成される。これまでの研究で, OCP と collagen の複合体 (OCP/Col) は, 自然治癒しない大きさの骨欠損内に埋入した場合, 生体内吸収に伴って骨形成を促進することがわかっている。その骨形成能は従来骨再生材料として用いられてきたハイドロキシアパタイト (Hydroxyapatite; HA) や β -三リン酸 (β -tricalcium phosphate; β -TCP) よりも優れており, 骨欠損辺縁からの骨伝導のみならず, 欠損内に埋入された OCP 顆粒を核として骨形成が行われることが示唆された。しかし, 骨欠損内では旺盛な骨形成を示す本材料の骨上骨膜下における反応はほとんど知られていない。そこで本研究では, 厚さの異なる OCP/Col をラット頭頂骨上骨膜下に埋入し, 骨の嵩上げ促進の可能性を探ることを目的とした。

(12) アクリルレジン義歯床に潜む微生物の検出とその生物学的性質の解析

竹内裕尚^{1,2}、中條和子¹、佐藤拓一¹、佐久間陽子²、佐々木啓一²、高橋信博¹

(東北大学歯学研究科 ¹口腔生化学分野、²口腔システム補綴学分野)

これまでに、アクリルレジン義歯床表面に付着する微生物についてはいくつかの報告があるが、レジン内部への細菌の侵入を示したのは僅かに一報のみである。本研究演者である中條らは、長期使用したアクリルレジン義歯床を割断し、電子顕微鏡にてレジン断面の観察を行い、複数の微生物の存在を確認している。しかし、レジン義歯床内部の微生物の量や種類、そして生物学的性質を詳細に調べた報告は未だない。そこで本研究では、アクリルレジン義歯床内部から微生物を分離・同定し、さらにその生化学的性質を検討することで、義歯に起因する各種口腔疾患や義歯特有の腐敗臭との関係について明らかにするとともに、これら微生物の付着を制御しうる新しい義歯床レジンの開発することを目的とする。

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2回目の研究集会であり、3研究機関からそれぞれ7件、2件、3件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われた。参加者は東北大学から12名(内院生3名)、九州大学から27名(内歯学研究科2名、院生11名)の合計39名であった。平成20年度は平成20年秋に、同様の3回目の研究集会を開催したいと考えている。

