

平成18年度

力学分野  
共同研究成果報告

## 共同研究報告（特定研究）

### 水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究

所内責任者 柏木 正

標記特定研究は、平成17年度から公募を開始し2年間で行ってきた。本年度（平成18年度）は下記のテーマについて研究集会・共同研究を実施し、下記のようにそれぞれに成果をあげている。特定研究のテーマとしては今年度で終了するが、水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究は継続して行い、共同研究は一般研究として受け入れていく予定である。

#### 18 特 1-1: 移動境界まわりの強非線形流れ解析(研究集会)

研究代表者: 青木尊之(東京工業大学)

船舶海洋工学のみならず、機械工学, 土木工学, 構造工学などの学際的な分野から、主として数値流体力学的手法による計算法, 実験との比較による Validation など多彩な研究発表があった。招待講演を含め海外から3名の参加があり、講演は全て英語で行った。

#### 18 特 1-2: THINC スキームを応用した強非線形スロッシングの数値シミュレーション

研究代表者: 肖 鋒(東京工業大学)

強非線形スロッシング問題では、特に水と空気の境界面の安定で鮮明な追跡が重要であるが、それに関する新しい手法として THINC (Tangent Hyperbola for Interface Capturing) 法がどの程度有効であるかを調べるため、数値計算法のノウハウに関する情報交換を行った。

#### 18 特 1-3: トランザム船尾を有する高速船の耐航性能推定法に関する研究

研究代表者: 岩下英嗣(広島大学)

船速の違いによるトランザム船尾での流れの変化を広範な水槽実験によって計測した。その計測結果をモデル化して非線形境界要素法に反映させる方法について研究した。

#### 18 特 1-4: 海洋巨大波の実態と生因の解明(研究集会)

研究代表者: 富田 宏(海上技術安全研究所)

Freak Wave として知られている海洋巨大波に関する研究最前線について研究集会を開催した。理学的・工学的観点からの講演があり、異分野における最新情報の交換が行われた。

#### 18 特 1-5: 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

研究代表者: 橋本博公(大阪大学)

応用力学研究所で開発した粒子法(MPS法)による計算と実験でアンチローリングタンク内の水の挙動と流体力を求め、それを船の横揺れ運動の解析に組み入れることにより、パラメトリック横揺れの特性とその防止法について研究した。

#### 18 特 1-6: 複合型数値計算法の開発に関する研究

研究代表者: 木原 一(防衛大学校)

粒子法は計算領域が広がると計算時間が膨大となるが、その欠点を克服するために境界要素法との Hybrid Method について基礎的研究を共同で行い、良い見通しを得た。

#### 18 特 1-7: 流体・構造の強非線形連成問題に対する数値解析法の研究

研究代表者: 藤久保昌彦(広島大学)

今後どのような強非線形問題が重要となり、どのような解析手法を適用・開発しなければいけないかについて、最新情報を基に主としてブレインストーミングを行った。

船舶海洋工学分野では今日的な重要研究課題である「水波と浮体の強非線形相互作用」に関する研究を応用力学研究所の特定研究課題として設定し、積極的に推進する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。

(研究集会)

## 移動境界まわりの強非線形流れ解析

研究代表者

東京工業大学学術国際情報センター

青木 尊之

### 1. 目的

移動境界と考えられているのは、波浪中での浮体や水中曳航体のように、規則的あるいは不規則に動く物体である。それによって引き起こされる物体まわりの流れ解析や、物体の運動と流れの相互作用に関する問題は、最近の発展が著しい数値流体力学の分野でも難しい研究テーマの一つである。それらに対する新しい解析手法を探り、種々の知見を得るために、同様の研究を行っている多くの分野の研究者が一同に会し、研究成果の議論を行うことが目的である。また、国内だけでなく海外からの参加者も加え、移動境界、界面、強非線形問題、などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

### 2. 研究集会の開催日時、場所

開催日時：平成18年12月7日（木） 13：15～17：55

12月8日（金） 9：00～15：40

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室（W601号室）

### 3. 講演プログラムと概要

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

最初に、この研究集会世話人である、応用力学研究所・柏木 正教授より、今回の海外からの招待講演者 (Prof. Derek Causon & Dr. Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK), Dr. Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany)) の紹介、並びに招待講演をお願いするに至った経緯などが披露され、研究集会がスタートした。

#### Fluid Simulation by Using Multi-Moment Scheme and Conservative Formulation

青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）

通常の数値計算のように格子点上の物理量だけを計算するのではなく、その空間勾配や区間積分値を従属変数として時間発展させて流体方程式を解くIDO (Interpolated Differential Operator) 法を説明し、これを用いた爆発解析、気泡流計算、高解像度台風シミュレーションなどを紹介した。最近の発展として、完全な保存形形式のIDO法について解説し、さまざまな分野での成果が期待できることを述べた。最後に個別要素法と、それを発展させた複雑形状の岩石落下のシミュレーションも紹介した。

#### Numerical Simulation on Turbulent Transports over Free Interface

山下 晋, 肖 鋒（東京工業大学大学院創造エネルギー専攻）

高橋桂子（海洋研究開発機構地球シミュレータセンター）

気流のシア応力と自由界面との相互作用により発生する風波での高精度な交換物理量評価のために本研究では、高精度且つロバストなCIPマルチモーメント有限体積法に基づく気液二相流計算コードを構築した。本手法の有効性を示すために気液二相流計算における検証計算を行い、自由界面の大変形にも十分に対応で

きる精度を有し、乱流現象解析においても妥当な結果を得ることができることを示した。

### **Solid-Fluid Interaction Analysis by Full Eulerian Formulation**

中尾賢司, 岡澤重信, 藤久保昌彦 (広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

これまでの固体・流体連成解析では、固体解析には解析格子が物体の変形に追従するラグランジェ型解法、流体解析には解析格子を空間に固定したオイラー型解法を適用して、それらを組み合わせる手法がほとんどであった。本研究では固体と流体を統一的なオイラー型解法の枠組みで取り扱えるような方法を新たに提案した。そして本研究で開発した解析コードの正当性を、固体解析、流体解析及び固体・流体連成解析において確認した。

### **Computational Modelling of Free Surface Flows Using a Surface Capturing Cartesian Cut-Cell Method**

Derek Causon & Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK)

Two flow solvers from the MMU AMAZON suite of free surface flow codes will be discussed. The AMAZON-CC model can cope with shallow water problems with arbitrarily complex flow geometries and bed topography. Cartesian cut cells are used to boundary fit and track solid boundaries at rest or in relative motion across a background uniform Cartesian grid. No re-meshing either globally or locally is necessary to accommodate moving boundaries. All that is necessary is to update the points of intersection between any moving boundary elements and the background Cartesian grid for as long as the motion continues. The general two-fluid numerical wave tank (NWT) AMAZON-SC is based on the solution of the incompressible Navier-Stokes equations for a variable density fluid system with a free surface. The computational domain encompasses fully both fluid regions and the free surface is treated as a discontinuity in the density field which is captured automatically, without special provision as part of the numerical solution using a time-accurate artificial compressibility method and high resolution Godunov scheme. Boundaries are fully fitted using the same Cartesian cut cell approach as used in AMAZON-CC. Several tests cases will be used to demonstrate the effectiveness of the methodology. These include wave overtopping and wave inundation of obstacles to the flow; modelling of a near-shore hinged-vane wave energy device; wave interaction with a floating body in a beam sea and slamming of a two-dimensional rigid wedge.

### **Comparison of Different CIP-Based Interface Capturing Methods for Sloshing Computation**

胡 長洪 (九州大学応用力学研究所)

This presentation is about a recent research on comparison of different CIP-based interface capturing methods, which have been implemented in our CFD code named RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extreme Nonlinear hydrodynamics). Emphasis is addressed to the effect of different interface-capturing schemes on the computation quality for a two dimensional violent sloshing problem. Five schemes are investigated: (1) original CIP, (2) CIP with tangent transformation, (3) CIP with linear transformation, (4) CIP-CSL3, and (5) THINC. The free surface compactness, the mass conservation, and the pressures at the tank wall are compared. It is found that the THINC method gives the best results for the discussed sloshing problem.

### **Numerical Simulation of Flow and Motion of Underwater Vehicle with Mechanical Pectoral Fin Devices**

鈴木博善, 加藤直三 (大阪大学大学院船舶海洋工学専攻)

オーバーラッピンググリッド法を援用した胸鰭運動装置付き水中ロボット周りの粘性流れ解析法を開発し、これと水中ロボットの運動方程式を同時に解くことにより、胸鰭付き水中ロボットの運動をシミュレートする方法を示した。これにより、単純な鰭運動(揚力型, 抗力型)で生じる水中ロボットの運動を計算した結果、計測で得られた運動と、シミュレーション結果は定性的に一致することを示した。

## **Numerical Prediction of Wave Loads and Ship Structural Response in Heavy Seas**

Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany)

The paper presents a numerical procedure based on the combined use of a boundary element method (BEM), a statistical analysis using random process theory, an extended (with rigid body motion module) Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANSE) solver, and a finite element method (FEM) to obtain the structural response of ships in a seaway. The BEM is used to compute the hydrodynamic database, needed for a statistic/probabilistic long-term analysis of the ship's operation to obtain so-called equivalent regular design waves. The RANSE solver then is applied to obtain ship motions and the corresponding pressure distribution acting on the ship in design wave conditions by solving the nonlinear rigid body equations of motions in the time domain. Wave-induced loads, including impact-related effects caused by slamming and green water on deck, were computed simultaneously. The resulting hydrodynamic pressures were transformed into nodal forces and became part of the input for the FE code. For two large containerships, extreme values of sectional loads for different loading conditions were analyzed. For one ship, the effect of slamming-related hull girder whipping on the stress level was investigated by one-way coupling the extended RANSE solver to the FE code. For a typical critical design wave situation, the whipping effects led to an increase in stresses in the hatch coamings of up to 20 percent.

## **Numerical Analysis on Dynamics of Pinch-Off in Immiscible Liquid/Liquid Jet Systems**

井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋 (東京大学大学院航空宇宙工学専攻)

液体分裂現象は、様々な分野で重要な役割を果たしている。そこで、界面形状の精緻な捕捉と、良好な体積保存性を有する数値解析手法 CIP-LSM(CIP-based Level Set & Mars)を用いて、界面張力が卓越して液柱が分裂に至る Pinch-Off を計算した。実験結果との比較を行い、CIP-LSM が Pinch-Off を概ね再現できることを確認した。また、液柱内部構造の形成機序を明らかにし、液柱内部構造と界面形状が密接に関連することを示した。

## **Liquefaction Analysis by Numerical Simulation Based on Fluid-Particle Interaction**

森口周二 (東京工業大学原子炉工学研究所)

青木尊之 (東京工業大学学術国際情報センター)

液状化地盤の挙動シミュレーションを目的とした粒子-流体系連成解析を紹介した。土粒子の挙動は DEM、間隙水の挙動は CFD により解き、Immersed Boundary Method (IBM) により流体と粒子の相互作用を表現することにより、全体として液状化地盤の挙動の再現を試みている。実地盤を対象とした大規模計算のための計算コードの改良および実現象との比較が今後の研究課題である。

## **Numerical Simulation Method for Free Surface Flows Using the Boltzmann Equation**

西 佳樹 (九州大学応用力学研究所)

This study develops a new numerical method for the simulation of free surface flows in ocean engineering problems using the Lattice Boltzmann equation, since this method has a good potential to provide a simulation work more comfortably in practical uses compared to some previous methods using the Navier-Stokes equation. The schemes for the capturing of free surface, the incorporation of a moving solid body, and dynamic boundary condition on the free surface have been formulated based on the kinetics of fluid molecules. Several 2-D preliminary computations (the deformation of water mass, forced oscillation of a body in a numerical wave tank, and propulsion of a body near the free surface) have been conducted, and show that this method can reproduce these phenomena at least qualitatively. The quantitative validation of this method will be performed in the future.

## **Momentum Conservative Sharp Interface Cartesian Grid Method for Free-surface Flow**

滝沢研二 (海上技術安全研究所)

近年、CFDによる自由界面問題は発展してきており様々な問題に適応されている。一方で、高レイノルズ数での計算は未だ精度が出ていない。そこで、高レイノルズ数流れを考慮して、保存形 IDO 法をベースとする自由界面付き流れの計算法を開発している。自由界面付き計算では、GFM のような非保存形モデルが主流であるが、本手法では運動量保存則に基づき、境界条件を与える手法を提案している。計算例として、4 次ストークス

波を初期条件とし、剛体伝播から、変形、碎波現象までを行った。

#### **A Computing Method for the Flow Analysis around a Prismatic Planing-Hull**

木原 一 (防衛大学校 機械システム工学科)

水面上を航走する滑走艇がつくる自由表面流れのシミュレーション法として、境界要素法を用いた MEL (Mixed Eulerian Lagrangian) 法による研究例を紹介した。特にチェーン部からの液体剥離やスプレーにいたる液体分離に関する数値計算モデルを適用し、物体近傍において自由表面が大変形するような非線形問題に対する解析法としての有効性を検討したものである。

#### **CFD Simulation of Resistance and Seakeeping Performance for Multi-Hull Vessels**

佐藤陽平 (海上技術安全研究所)

多胴船型の抵抗性能と耐航性能を推定可能な CFD シミュレーション法について発表された。抵抗性能のシミュレーションにおいては、抵抗値と姿勢(トリムとシンケージ)の計算結果が水槽試験結果と比較され、両者が高い精度で一致することが確認された。耐航性能においては、単胴船型、双胴船型および三胴船型について4自由度の船体運動の計算が行われ、シミュレータの有効性が示された。

#### **CFD Simulation of Diffraction Flow Fields about a Blunt Ship in Oblique Waves**

折原秀夫 (ユニバーサル造船(株)技術研究所)

CFD simulations have been carried out of flows about a blunt ship advancing in regular oblique waves. Unsteady RANS code called WISDAM-X is employed. This method employs an overlapping grid system to implement rigorous wave generation, the interactions of ships with incident waves, and the resultant ship motions. The motion of the ship is simultaneously solved by combining the solution of ship's rigid motion with the solution of the flow about the ship. The characteristics of diffraction waves in the vicinity of a full ship with a blunt hull form advancing in deep water are studied numerically. The computed results show that the features of diffracted waves vary significantly with the wave-incident angle and that the hull surface pressures due to the wave diffraction increases in the case of head waves. The effect of diffraction of incident waves on added resistance is also discussed.

#### **4. おわりに**

今年度も昨年度に引き続き、多くの分野で関連の深い「移動境界まわりの強非線形流れ解析」を取り上げ、種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め、情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会でも「数値流体力学」を共通のキーワードとしていろいろな分野における最新の研究成果を聞くことができ、学際的な研究の発展が強く実感できた。特に、数値計算法の中に強非線形現象に対して有効と考えられている「CIP 法」に関して、いくつかの論文が発表され、集中した議論・理解ができた。さらに、特別招待講演として、東京工業大学の青木尊之教授、イギリス Manchester Metropolitan University、ドイツ Germanischer Lloyd の Ould A. el Moctar 博士から最新の研究成果をじっくり聞くことができた。今回も外国からの研究者が参加していたため、すべての講演・議論を英語で行った。この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

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

## プログラム

期 日： 2006（平成18）年12月7日（木），8日（金）

場 所： 九州大学応用力学研究所西館6階W601号室

### 12月7日（木）

- 13:10～13:20 代表者挨拶  
青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）
- 13:20～14:20 基調講演：  
**Fluid Simulation by Using Multi-Moment Scheme and Conservative Formulation**  
青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）
- 14:20～14:55 **Numerical Simulation on Turbulent Transports over Free Interface**  
山下 晋， 肖 鋒（東京工業大学大学院創造エネルギー専攻）  
高橋桂子（海洋研究開発機構地球シミュレータセンター）
- 14:55～15:30 **Solid-Fluid Interaction Analysis by Full Eulerian Formulation**  
中尾賢司， 岡澤重信， 藤久保昌彦（広島大学工学研究科社会環境システム専攻）
- （休 憩）
- 15:45～16:45 招待講演：  
**Computational Modelling of Free Surface Flows Using a Surface Capturing Cartesian Cut-Cell Method**  
Derek Causon, Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK)
- 16:45～17:20 **Comparison of Different CIP-Based Interface Capturing Methods for Sloshing Computation**  
胡 長洪（九州大学応用力学研究所）
- 17:20～17:55 **Numerical Simulation of Flow and Motion of Underwater Vehicle with Mechanical Pectoral Fin Devices**  
鈴木博善， 加藤直三（大阪大学大学院船舶海洋工学専攻）

（懇 親 会）

12月8日(金)

9:00~10:00 招待講演：  
Numerical Prediction of Wave Loads and Ship Structural Response in  
Heavy Seas  
Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany)

10:00~10:35 Numerical Analysis on Dynamics of Pinch-Off in Immiscible Liquid/Liquid  
Jet Systems  
井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋 (東京大学大学院航空宇宙工学専攻)

(休 憩)

10:50~11:25 Liquefaction Analysis by Numerical Simulation Based on Fluid-Particle  
Interaction  
森口周二 (東京工業大学原子炉工学研究所)  
青木尊之 (東京工業大学学術国際情報センター)

11:25~12:00 Numerical Simulation Method for Free Surface Flows Using the Boltzmann  
Equation  
西 佳樹 (九州大学応用力学研究所)

(昼 食)

13:15~13:50 Momentum Conservative Sharp Interface Cartesian Grid Method for  
Free-surface Flow  
滝沢研二 (海上技術安全研究所)

13:50~14:25 A Computing Method for the Flow Analysis around a Prismatic Planing-Hull  
木原 一 (防衛大学校 機械システム工学科)

14:25~15:00 CFD Simulation of Resistance and Seakeeping Performance for Multi-Hull  
Vessels  
佐藤陽平 (海上技術安全研究所CFD研究開発センター)

15:00~15:35 CFD Simulation of Diffraction Flow Fields about a Blunt Ship  
in Oblique Waves  
折原秀夫 (ユニバーサル造船(株)技術研究所)

15:35~15:40 閉会の挨拶  
柏木 正 (九州大学応用力学研究所)

# THINC スキームを応用した強非線形スロッシングの数値シミュレーション

東京工業大学・大学院総合理工学研究科 肖 鋒

## 研究目的

液化ガス運搬船が波浪中を航行する場合、部分的に満たされたタンク内の液体が船の動揺によって激しいスロッシングを起こし、タンクの側壁や天井に高い衝撃圧力が発生する。場合によっては、この衝撃圧力によってタンクに損傷を起こすことがある。したがって、スロッシングによって発生する衝撃圧力に関する正確な予測は液化ガス運搬船の設計において非常に重要である。激しいスロッシング現象は強非線形な流体力学の問題であり、自由表面の砕波、空気巻き込み、壁への液体の衝突など非常に複雑な現象を伴うため、このような現象を数値シミュレーションする際現存の数値計算法（VOF 法、MAC 法など）では、大変形・砕波する自由表面の処理にまた問題が多くあり、よりロバストで、高精度な自由表面処理方法の開発が必要である。本研究では、研究代表者が開発された THINC (tangent of hyperbola for interface capturing) 方法を応用してこの強非線形スロッシング現象のシミュレーションを行い、THINC 法の強非線形スロッシングへの有効性を検証する。

## THINC 法概要

THINC 法は非圧縮性自由表面流体の界面捕捉スキームである。密度関数については各計算セル内の積分平均値（ここで簡単にセル平均値と言う）を使用し、時間積分は有限体積法により行われるからスキームの保存性が保証される。自由表面の捕捉にはセル平均密度関数が使われるため、流体の体積（質量）が保存される。また、セル境界を通過する流量の計算には Semi-Lagrangian 方法を採用し、界面の数値拡散を抑えることができる。非圧縮性流の場合はこのセル平均密度関数は VOF (Volume Of Fluid) 関数と同じ物理意味を持っている。密度関数は自由表面以外のところに 1 か 0 の値を持っており、自由表面において、0 から 1 まで急激に変化する特徴は、双曲正接関数 (hyperbolic tangent function) の性質に似ていることから、THINC 法の開発動機となった。式 (1) は 1 次元の場合にセル  $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$  内の密度関数  $\phi$  の分布を表す双曲正接関数の例である。

$$F_i(x) = \frac{\alpha}{2} \left\{ 1 + \gamma \tanh \left[ \beta \left( \frac{x - x_{i-1/2}}{\Delta x_i} - \delta \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式には 4 つのパラメータ、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  と  $\delta$  があり、それぞれ適切な方法で決められる。

本研究ではこの THINC 法を界面捕捉法として応用力学研究所で開発された強非線形流体現象の CFD コード RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computational Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics) に組み込んで、強非線形スロッシングの数値計算を行う。

## 数値シミュレーション結果

数値計算は応力研で行ったタンクスロッシングの実験に対応するものである。矩形タンクの寸法は Fig.1 のように  $60\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$  であり、静止水位  $h=12\text{cm}$  の水が満たされている。 $P_1 \sim P_3$  は圧

力の計測位置である。タンクは強制動揺装置で左右に  $x = A \sin(2\pi t/T)$  になるように振動させる。本計算では、 $A = 5 \text{ cm}$ 、 $T = 1.0 \text{ s}$  のケースに対して行った。数値計算には二つの等間隔格子を使用した。格子数はそれぞれ fine mesh:  $200 \times 100 \times 40$  と coarse mesh:  $100 \times 50 \times 20$  である。

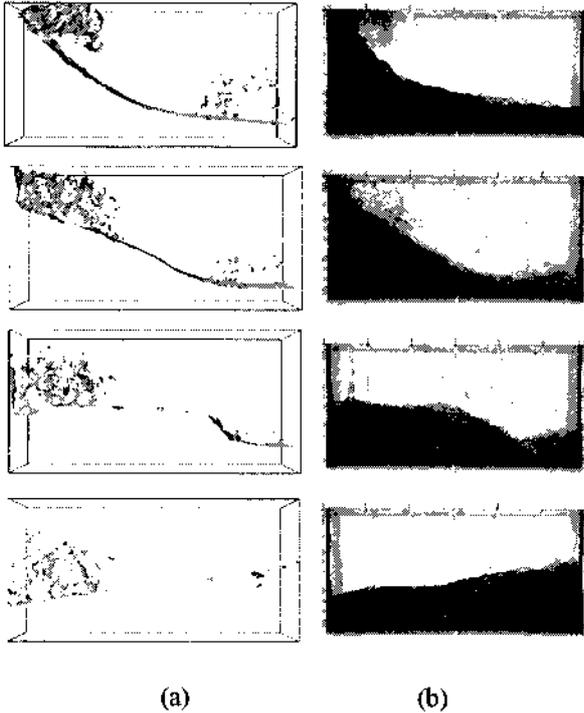


Fig.2 Comparison of free surface profiles for  $h = 12 \text{ cm}$ ,  $T = 1.00 \text{ s}$ . (a) Computation, (b) Experiment

に形成された液滴も再現できている。計算は安定で、タンク内の水の質量保存は完璧であることを確認した。Fig.3 には格子の解像度の影響について調べるために、fine mesh と coarse mesh により計算した自由表面を比較している。自由表面の形状については殆ど同じであるが、fine mesh ではより細かい液滴が再現できる。

### 結論と今後の課題

THINC 法を用いた液化ガス運搬船のタンク内スロッシングによる衝撃圧力の定量的推定法の開発はまだ進行中である。今回の共同研究により、THINC 法が界面捕捉法として強非線形スロッシングの数値計算に有望であることが分った。今後の課題として、並列化計算による数値計算の高速化と更なる解像度の向上、より複雑なタンク形状に対する計算とその検証などを行う予定である。

今回の共同研究の成果について応力研側との共著論文として、国際会議等に投稿する予定である。

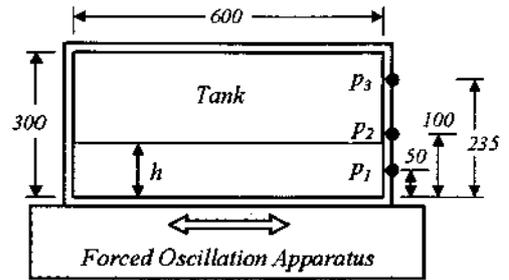


Fig.1 Schematic view of tank sloshing experiment

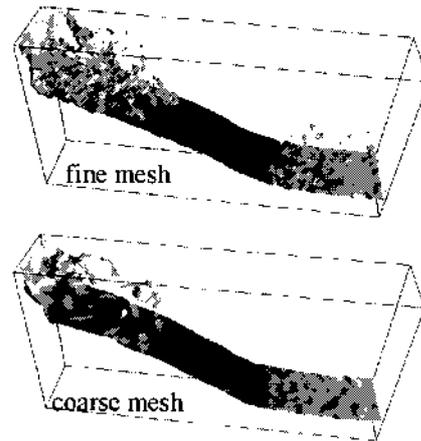


Fig.3 Computed free surface profile by different grids

Fig.2 は、自由表面の時間的変化に関する計算結果と高速ビデオカメラで撮影されたスナップショットの比較である。この計算結果は fine mesh を用いたものである。自由表面の変化は概ね一致しており、自由表面がタンクの天井に衝突した後

# 特定研究1「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」の副課題として トランザム船尾を有する高速船の耐航性能推定法に関する研究

広島大学大学院工学研究科  
助教授 岩下 英嗣

## 1. 研究目的

今回の特定研究課題にある「水波と浮体の強非線形相互作用」に関連する実際の問題として、波浪中を高速航走する船舶の耐航性能理論推定法に関わる問題がある。高速船の場合、トランザム船尾を有するため、その近傍の流場は非常に非線形性の高い部分となる。理想流体を仮定する実用的な理論推定法によってそうした問題を扱う場合には、トランザム近傍の流場に関して何らかのモデル化を導入する必要があるが、その適切な方法はまだ確立されていない。

本研究では、トランザム船尾を有する高速船の水槽曳航試験を実施し、船体運動および船尾近傍の波形データを取得した上、トランザム部の理論面での扱いについて検討を行う。それに基づいた数値計算を実施し、実験結果との比較を通してその妥当性を検証する。これらを通じてトランザム船尾の実用的な理論計算上での取り扱い方を提案することを目的としている。

## 2. 研究方法

トランザムスターンを有する高速船の模型実験と理論数値計算をベースに次の手順により研究を遂行する。

- (1) 1.5m 供試模型を製作し、深海機器力学実験水槽において、船体運動計測試験および波形計測試験を行い、非線形運動および船尾部に着目した非定常波を計測する。
- (2) 取得データを解析し、非線形性の特性についてまとめるとともにトランザム船尾の理論解析上の扱いについて検討する。
- (3) 非線形問題を扱える理論推定法として当方の開発したランキンパネル法を適用し、トランザム部の流場のモデル化を組み込んだ数値計算を実施して、その結果を実験結果と比較することにより推定法の妥当性や問題点等について考察する。
- (4) 一連の研究を総括する。

## 3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	助教授	代表者
渡部 雅晃	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	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
日下 綾美	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
芋野 亮介	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
山下 芳郎	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
延広 隆行	広島大学第四類生産基盤工学課程	4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

- (1) 斎藤宏幸, 伊東章雄, 岩下英嗣: 高速多胴船の波浪中応答解析, 第2回推進性能・運動性能合同研究会, 10月13日(2006)

#### 5. 研究結果

##### 5.1 理論計算

ポテンシャル理論をベースに船体が波浪中で非定常な動揺をする際に、トランザム船尾に適用するための条件式を導出し、ランキンパネル法による計算プログラムを開発した。本理論計算法の妥当性を検証するために水槽試験を実施し、特に船体運動に着目して比較を行なっている。

##### 5.2 供試模型

本研究で対象とした三胴船を Fig. 1 に示す。三胴船の主船体 ( $L = 4\text{m}$ ) を Series-64 船型をベースとする形状とし、船尾は高速域航行のためトランサム形状とした。副船体であるアウトリガーには、対象翼型の形状を用い、その大きさは主船体の排水量の 1% および 3% 相当の二種類としている。



Fig. 1 Trimaran model (1%  $\nabla$  outrigger and 3%  $\nabla$  outrigger)

##### 5.3 アウトリガー配置

主船体に対するアウトリガーの配置位置は、まずは造波抵抗の観点から非常に重要である。本稿で報告する耐航性能の検討に先立ち、その配置に関しては、アウトリガーの長さ、船長方向および船幅方向の配置位置について実験をベースに検討を重ね、いくつかの候補を抽出した後、本稿に示す以下の耐航性能の検討を行なっている。

検討するアウトリガーの配置を Fig. 2 に示す。主船体排水量比 1% の場合、船長方向の配置位置を  $X/L_{pp} = 0.1$  とした。X は主船体の A.P. からアウトリガーと中央までの距離を意味し、 $X/L_{pp} = 0.1$  の配置で主船体とアウトリガーの A.P. が並ぶことになる。このときのアウトリガーの船幅方向位置は  $Y/B = 0.5$  としている。Y は主船体側面からアウトリガー側面までの距離を表す。以後、このアウトリガー配置を Trimaran-1 と呼ぶ。

主船体排水量比 3% の場合は、船幅方向配置を  $Y/B = 1.0$  とし、船長方向には  $X/L_{pp} = 0, 0.5$  の二種類の場合を検討している。 $X/L_{pp} = 0$  のアウトリガー配置を Trimaran-2-aft、 $X/L_{pp} = 0.5$  を Trimaran-2-mid と呼ぶことにする。なお、アウトリガーのない主船体だけの状態を Monohull と称する。

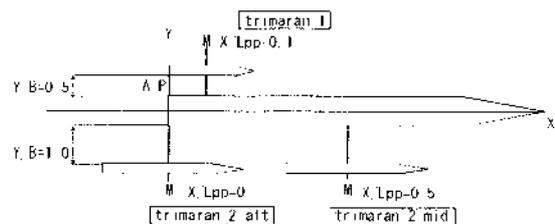


Fig. 2 Arrangements of outriggers

## 5.4 試験条件

理論計算法検証の目的も含めて、まず供試模型 Trimaran-1 の正面規則波中試験を実施した。計測項目は heave 運動、pitch 運動、および主船体の船底圧力（船長方向7点）であり、船速は  $F_n = 0.76$  とした。続いて、アウトリガーの配置影響を検討するために、供試模型 Trimaran-2-aft および Trimaran-2-mid の正面規則波中試験を実施し、 $F_n = 0.69$  にて heave 運動、pitch 運動を計測している。

## 5.5 計算結果と実験結果の比較

Trimaran-1 供試模型に対し、実験状態と同じ  $F_n = 0.76$ ,  $\chi = 180$  degs. の条件でランキンパネル法 (RPM) による計算とストリップ法 (NSM) による計算を行なった。Fig. 3 に RPM で使用した要素分割を示している。主船体の分割数は、 $x$  方向、 $y$  方向に  $75 \times 20$ 、アウトリガーは  $31 \times 21$ 、自由表面は  $156 \times 26$  としている。RPM による計算については、定常攪乱影響の取り入れ方等を変えた以下の3種類の計算を実施して実験結果と比較している。

- 1) RPM-1: 自由表面条件式において  $\Phi = -x$  として計算。いわゆる一様流近似。トランサム条件なし。
- 2) RPM-2: 二重模型流れベースの計算。トランサム条件なし。
- 3) RPM-3: RPM-2 に2節に記したトランサム条件を付加。

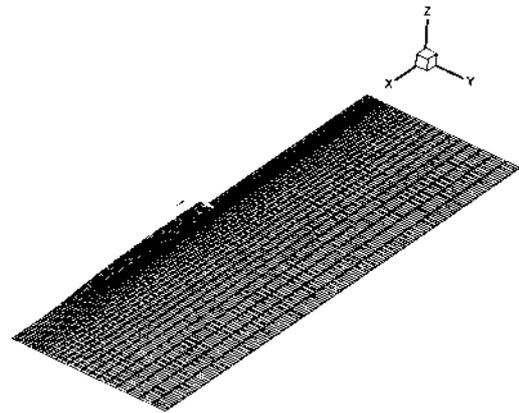


Fig. 3 Computation grids of trimaran-1 for RPM

Fig. 4 は Trimaran-1 に対する heave 運動振幅、pitch 運動振幅の計算と実験の結果を示したものである。図中、ストリップ法および RPM-1, RPM-2, RPM-3 の結果はアウトリガーを無視した主船体のみに対する計算結果を示している。ストリップ法は運動の同調点の位置が実験結果と比べてズレるなど不具合が見られるのに対し、RPM の結果は実験結果と良い一致を示していると言える。3種類のRPMの結果を実験と比較すると、定常攪乱の影響を考慮した方が、またそれに加えてトランサム条件を付加した方が実験結果とより良い一致を示すことが明瞭に現れている。

まず、RPM-1 と RPM-2 の結果から、二重模型流れベースの計算の方が実験結果を良く説明していることが分かる。前述のように、二重模型流れの定式化は定常問題においては低速を仮定した理論であるが、非定常問題においては今回のような  $F_n = 0.76$  というかなりの高速域であっても、一様流近似と比べて二重模型流れの影響を取り入れた方が波浪中運動等の推定精度が向上することが示されたことになる。また、RPM-2 と RPM-3 の結果を実験と比べると、トランサム条件の付加により推定精度がかなり向上することが分かる。更に、RPM-3 と、アウトリガーを考慮した結果である RPM-3 trimaran-1 とを比較すると、その相違は顕著でない。Trimaran-1 船型のアウトリガー配置に対してはアウトリガーと主船体との干渉が、少なくとも運動振幅のレベルで評価したときに小さいことを示している。特に pitch 運動に関しても相違が小さかったことは、アウトリガーの主船体に対する排水量が小さかったためと考察されよう。

Fig. 5 に、Trimaran-1 に対する RPM-3 およびストリップ法による主船体船底圧力の計算結果を実験結果と比較して示している。RPM による圧力分布は、おおむね実験結果を説明している。 $\lambda/L = 1.5$  の運動の同調点付近において船首尾での圧力の計算値と実験値との差が大きい、これは船体運動が大きいことによる非線形影響と考えられる。こうした波長域でも船体中央近傍での RPM と実験の合致度は良好で、その積分量を介して算定される運動の結果も、先に示したように良好であったものと思われる。

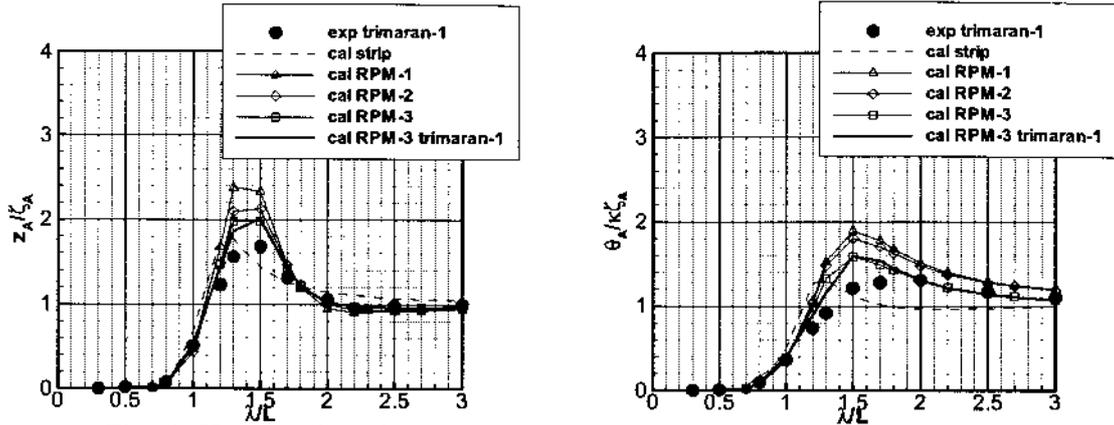


Fig. 4: Heave and pitch motions of Trimaran-1 at  $F_n = 0.76$ ,  $\chi = 180$  degs.

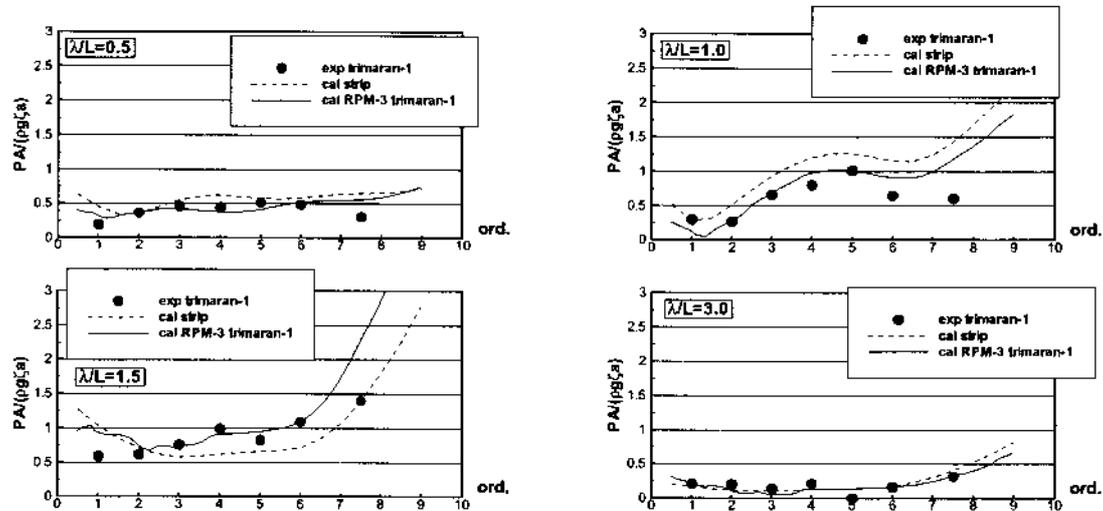


Fig. 5: Unsteady pressure distributions on hull bottom of Trimaran-1 at  $F_n = 0.76$ ,  $\chi = 180$  degs.

### 5.6 アウトリガー配置による影響

Trimaran-2-aft, Trimaran-2-mid について RPM-3 による数値計算を行い、アウトリガーの配置位置について検討を行なってみた結果を Fig. 6 に示している。実験に使用した供試模型の大きさに対して治具が大きく、慣動半径や重心高さなどが設計上想定したものと大分異なってしまったが、数値計算内で同じ値を用いることで実験に対応した計算を行なっている。計算結果は、heave の同調点付近で僅かながら実験値との相違は見られものの、全体的には実験との合致は良好である。

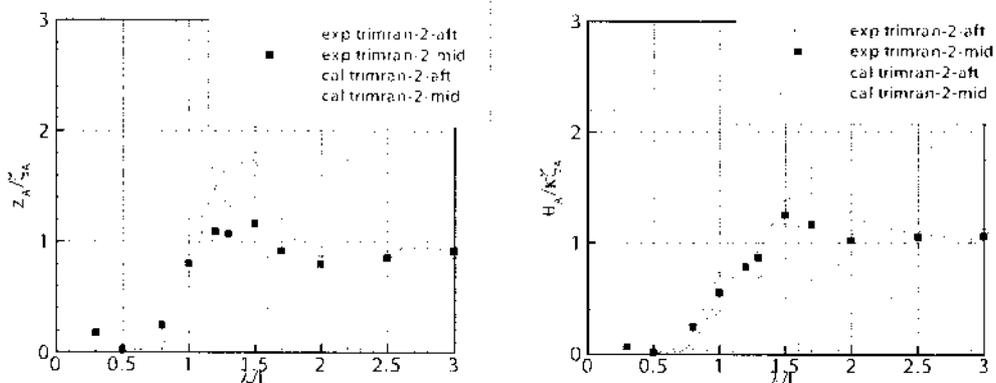


Fig. 6 Comparison of heave and pitch motions among three hull-forms at  $F_n = 0.69$ ,  $\chi = 180$  degs. (computed with experimental conditions)

## 6. まとめ

トランザム船尾を有する高速船の造波問題を理論的に扱いための船尾条件を提案し、ランキンパネル法による計算プログラムを開発した。その検証のために多胴船を含めた各種高速船の水槽実験を実施し、提案した理論計算法による結果との比較を通じて検証を行なった。多胴船に関してはアウトリガーの配置影響等についても船体運動の観点から議論している。ここで得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 本理論計算法は、ストリップ法と比べ実験結果を良く説明している。また、推定精度を高めるためには、自由表面条件として二重模型流れを用いると同時にトランサム条件として本稿で提案するものを適用することが有効であることが分かった。
- (2) 本計算法は、アウトリガーの配置を変更した場合の試験結果を良く説明しており、多胴船の計算に有効であることを示した。
- (3) アウトリガーの位置によるシリーズ計算では、アウトリガーを後方に配置した場合に船体動揺が小さくなることが示された。

(研究集会)

## 海洋巨大波の実態と成因の解明

研究代表者

海上技術安全研究所

富田 宏

### 目 的

最近、従来の設計基準では想定されていなかった巨大な波が船舶や海洋構造物に大きな被害をもたらすことが認識されてきた。これらは freak wave あるいは rogue wave と呼ばれ、長い間船乗りの伝説としては語り伝えられていたものであるが、目撃情報や観測データなどの集積によって、最近になって研究者の注目を引くようになったのである。このような巨大波の実態や生成機構を理解することは船舶や海洋構造物を設計する上で極めて重要である。freak wave は深海域でも浅海域でも起こるといわれており、また様々な生成機構が提案されている。わが国でもいくつかのグループが異なる観点・手法で freak wave の研究に取り組んでいる。これらのグループの成果・情報を交換することは互いの研究の発展に対して極めて有意義と考えられる。そのため、昨年度に引き続いて「海洋巨大波の実態と成因の解明」という題目及び上記のような組織で小規模な研究集会を開催することを提案する。また、この研究計画は、特定研究「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」のサブテーマとして最適であると考えられる。

### 研究集会の日時・場所

日時：2007年3月9日（金）・10日（土）

場所：九州大学応用力学研究所 W601(多目的研究交流室)

### プログラム

3月9日（金）

13:00-13:05 開会の挨拶

富田 宏（海上技術安全研究所）

13:05-14:05 海洋波研究における狭帯域仮定の有効性の数値的検証

田中 光宏（岐阜大・工）

14:05-15:05 Freak wave 予測のための2, 3の検討

森 信人（大阪市大・工）

15:20-16:05 WAVE GROUP 中の浮体の挙動と安全性

影本 浩（東京大・工）

16:05-16:50 水面孤立波の横方向不安定性

片岡 武（神戸大・工）

- 16:50-17:35 **マイクロ波レーダによる平塚沖波浪観測**  
林 昌奎 (東京大・生産研)
- 17:35-18:20 **Analysis of observed wave data to investigate of characteristics of freak waves**  
Seung-Ho SHIN, Keyyong Hong (KORDI, Korea)

3月10日(土)

- 9:00-9:45 **Structural and Motion Responses on Large Container Ships in FreakWaves**  
石 江水, 早稲田 卓爾, 鈴木 克幸 (東京大・工)  
木下 健 (東京大・生産研)
- 9:45-10:30 **実海域波浪データの統計解析 (北海におけるフリーク波)**  
富田 宏 (海上技術安全研究所), 早稲田 卓爾 (東京大・工)
- 10:45-11:30 **フリーク波の生成理論の現状と問題**  
富田 宏 (海上技術安全研究所)
- 11:30-12:30 **不規則波列の非線形発達における方向性と砕波の影響**  
早稲田 卓爾 (東京大・工)
- 13:30-14:15 **GISを利用した航行支援情報提供フレームワークの開発**  
稗方 和夫, 大和 裕幸 (東京大・工)
- 14:15-15:00 **地形の影響を受ける浅水孤立波の二次元相互作用**  
辻 英一, 及川 正行 (九州大・応力研)
- 15:00-15:05 **閉会の挨拶**  
及川 正行 (九州大・応力研)

## 講演概要

### 海洋波研究における狭帯域仮定の有効性の数値的検証

田中光宏：岐阜大学工学部数理デザイン工学科

近年、分散性をより高次まで取り込んだ修正非線形シュレーディンガー方程式 (mNLS) に基づく海洋波の研究が盛んに行われ、JONSWAP スペクトルなど現実的なスペクトルを有するような状況にまでその適用範囲を広げている (例えば Socquet-Juglard et al. JFM(2005)). 同一条件の波動場を対象にして、狭帯域仮説とは無縁の直接シミュレーションを遂行することにより、現実的スペクトルを有する波動場に対する mNLS 方程式の適用可能性を検証する。

### Freak wave 予測のための 2, 3 の検討

森 信人：大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

ヨーロッパ中期気象予報センターでは Operational Model に Freak Wave 予測システムを導入しようとしている。本研究では、現在用いられている狭帯方向スペクトルモデルを適用した Freak Wave 予測結果の検証例を紹介すると共に、Freak Wave 予

測に必要な 1) 多方向性の影響 (2D-NLS Eq.), 2) 有限のデータ数による線形的な統計変動の影響に関するの検討結果について講演する.

#### **WAVE GROUP 中の浮体の挙動と安全性**

影本 浩：東京大学大学院 工学系研究科

浮体にとって 1 発大波 (Freak Wave) よりも, 比較的大きな波高を持つ中程度の波が数波連続して押し寄せる Wave Group 中の方が危険な状態に陥る場合もあると考えられる. 本講演はこのような Wave Group 中の浮体の挙動と安全性について論じる.

#### **水面孤立波の横方向不安定性**

片岡 武：神戸大学

水面孤立波の横方向安定性を Euler 方程式系を基に調べた結果を報告する. 水面孤立波は, その最大波高が水深の 0.781 倍よりも小さいときに, 進行方向に安定 (孤立波の進行方向のみに依る攪乱に対して安定) であるが, 0.713 倍よりも大きいと, 横方向に不安定 (孤立波の峰方向にも依る攪乱に対しては不安定) であることを理論的に示す. さらに数値計算による線形安定性解析および横方向攪乱を受けた孤立波の時間発展数値シミュレーションをおこなった結果も合わせて示す.

#### **マイクロ波レーダによる平塚沖波浪観測**

林 昌奎：東京大学 生産技術研究所

X-バンド連続波マイクロ波レーダを用いて相模湾平塚沖にて行った波浪観測例を示す. マイクロ波レーダは海面におけるマイクロ波の照射幅より短い波長の水面波をフィルタリングする働きがあるため, 空中式超音波波高計で計測した波浪に比べて波長の短い水面波成分が少ない. そのため, 観測波高においてはレーダ観測値と空中式超音波波高計値との間には非常に良い相関を示しているが, 風波成分が卓越する波浪分布の場合の平均波の波周期の相関が良くない. 連続波マイクロ波レーダによる海洋波浪観測は, 比較的波長の長いうねり成分の波浪観測に適している.

#### **Analysis of observed wave data to investigate of characteristics of freak waves**

Seung-Ho SHIN, Keyong Hong：韓国海洋研究院 海洋システム安全研究所

This study is carried out the investigation of nonlinear characteristics of the ocean based on the field wave observation data acquired the western sea area in Jeju island during one year. It is aimed to offer the fundamental data for Freak wave forecasting in real sea. For this, the nonlinearity parameters of ocean waves, which are Skewness, Atiltness, Kurtosis and Spectrum band width parameter, are introduced, and the parameters are compared and discussed with some characteristic wave components, ie, significant wave height, maximum wave height, and so on.

## Structural and motion responses on large container ships in freak waves

石 江水, 早稲田卓爾, 鈴木克幸, 木下 健

石 江水, 早稲田卓爾, 鈴木克幸: 東京大学大学院 工学系研究科

木下 健: 東京大学生産技術研究所

Freak waves are extraordinary larger water waves with potentially devastating effects on ships as well as offshore structures. The recent remote sensing data shows that freak waves occur more often than it had ever been thought. From 1969 to 1994 twenty-two super-carriers were lost due to collisions with freak waves in the Pacific and Atlantic Oceans causing 525 fatalities. Hence, it is of great importance to understand wave impact load on ship hulls subjected to abnormal waves and corresponding structural and motion responses so as to enhance the safety of ships and offshore structures. Freak or rogue waves can be generated by different mechanisms and there is not a clear criterion to identify such a wave. In the present research, taking linear dispersive focusing and Benjamin-Feir instability as possible freak wave generation mechanisms, linear dispersive focusing waves and unstable waves were generated in the laboratory wave tank. Before that, a series of regular waves were made to validate and verify our experimental instrumentation. Then the seakeeping tests were carried out in such freak and regular waves using a full elastic container ship model made of urethane foam whose scaling ratio is 1:141.9. Furthermore, the influences of the freak wave parameters such as wave height and wave length on wave loads and ship motion are systematically investigated. At the same time, the numerical simulation based on time domain strip theory code is also performed to verify the experiment. Finally the effect of whipping responses on the longitudinal strength of the hull is examined using FEM. The objective of this research is to explore the possibility of using rogue or freak waves as additional wave load conditions to be considered in the design of ship and offshore structures.

## 実海域波浪データの統計解析 (北海におけるフリーク波)

富田 宏, 早稲田卓爾

富田 宏: 海上技術安全研究所

早稲田卓爾: 東京大学大学院 工学系研究科

北海北部海域に設置されたノルウェーの観測点 Kvitebjorn における 2003 年から 2005 年にわたる荒天時波浪・風速・風向観測データを解析して、実海域におけるフリーク波を含む大波高波の長期にわたる性質を調べた。極めて典型的な孤立型フリーク波の存在を確認したが、20 分毎のレコードに分割して解析する限りは有義波高に対する BFI インデックスや高次統計量 (クルトシス) の相関は非常に低かった。

## フリーク波の生成理論の現状と問題

富田 宏: 海上技術安全研究所

フリーク波の生成機構についての理論的研究は今世紀に入ってから急速に進み, Benjamin-

Feir 不安定, NLS 方程式のプリザー解, 逆散乱スペクトル問題 (IST), 非ガウス過程における 4 波相互作用理論からの時間-空間統計量の関係の導出等 2, 3 の理論体系に絞り込まれている. ここではこれらのコンセプト間の関係について整理し, さらにこれらの 1 次元理論の隘路としてここ 1, 2 年再浮上してきた波浪の方向分散について議論する.

#### **不規則波列の非線形発達における方向性と砕波の影響**

早稲田卓爾: 東京大学大学院 工学系研究科

フリーク波の発生確率は, いまのところ, 与えられた方向スペクトルを持つ不規則波列における波高の確率密度分布に, 弱い非線形性の効果をどのように考慮すべきかということで, いくつかの理論が提唱されている. これまでに, 束縛波 (BoundWave) の存在, 非共鳴相互作用 (Benjamin-Feir 不安定) の影響が, 弱非線形理論, もしくは保存系の非線形数値計算で検討された. この発表では, 東大生研海洋工学水槽 (木下研・林研) で行った, 方向性を考慮した不規則波実験の結果から, 強い非線形性 (砕波) と方向分散性が波浪の発達に及ぼす影響を明らかにする. 方向分散性が大きくなると非共鳴相互作用が弱くなり異常波発生確率が急速に減ることがわかった. また, 砕波の影響でスペクトルは 4 波共鳴による非線形伝達による発達よりも, はるかに早い速度でダウンシフトし, 波浪の岨度, スペクトルバンド幅双方が波浪の発達とともに変化することがわかった. この結果は, 既存の方向性を考慮しない理論, 砕波の影響を考慮しない実験結果の解釈に新たな視点を与えるとともに, 海洋波の発達において, 4 波共鳴と砕波を伴う非共鳴相互作用とのどちらが本質的であるかという根源的な疑問を投げかける.

#### **GIS を利用した航行支援情報提供フレームワークの開発**

稗方和夫, 大和裕幸

稗方和夫: 東京大学 工学系研究科 環境海洋工学専攻 大和裕幸: 東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻

OPeNDAP (Open-source Project for a Network Data Access Protocol) というインターネットを介して海洋や気象データを流通させる仕組みの普及により, 研究用途のデータの一般公開が進んでいる. OPeNDAP 形式のデータを GIS 形式に変換し, 航海中の船舶の航路計画に利用可能な可読性の高い形式で提供可能なフレームワークを提案する. また, 複数のデータソースから提供されるデータを GIS に統合・可視化するシステムのプロトタイプを開発し, その有効性, 実現可能性について検討する.

#### **地形の影響を受ける浅水孤立波の二次元相互作用**

辻 英一, 及川正行: 九州大学応用力学研究所

地形効果によって, 浅水孤立波の二次元相互作用によって生成される新しい波の振幅が大きく影響をうけるかどうかについて調べた結果を報告する.

## おわりに

目的にあるような趣旨でこの研究集会を開催することを企画した。昨年度に引き続き2回目である。昨年度の開催が3月であったため、今回も3月の開催となった。freak waveは国際会議の開催や雑誌の特集号が組まれるなど注目を集めている話題である。昨年度は、理論、実験、数値シミュレーション、深水域から浅水域までの話題と当初目論んだ通りの多様な講演がなされ、大変有益であった。講演における議論でそれぞれ課題も指摘され、今回はそれらの課題がどう解決されたか楽しみである。前回よりもさらなる発展が期待される。

## 研究組織

富田 宏（海上技術安全研究所）	研究代表者・海洋波浪
川村 隆文（東京大学工学系研究科）	研究協力者・計算流体力学
木下 健（東京大学生産技術研究所）	研究協力者・海事流体力学
早稲田 卓爾（東京大学工学系研究科）	研究協力者・海洋環境流体力学
森 信人（大阪市立大学工学研究科）	研究協力者・海岸環境工学
田中 光宏（岐阜大学工学部）	研究協力者・非線形波動
及川 正行（九州大学応用力学研究所）	研究協力者・非線形波動
辻 英一（九州大学応用力学研究所）	研究協力者・非線形波動
柏木 正（九州大学応用力学研究所）	所内世話人・海洋工学

# 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、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による深刻な事故が数多く報告されている。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とされているが、その性能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。

そこで本研究では、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 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推定のための船体運動シミュレーションを組み合わせることで、実海域での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・評価手法の確立を目指す。

## アンチローリングタンクの自由減衰試験

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調整可能な U 字型タンク模型をアクリルで製作した。実際の船舶に取り付けるアンチローリングタンクには、減衰効果を高めるためにスリット状の板を取り付けるなどの工夫がなされているが、MPS 法による推定精度の検証の第一歩として、今回は 2 次元 U 字型形状を採用した。

製作したアンチローリングタンク模型を用いて、ダクト高さおよびタンク水位を変更しながら、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減衰試験を実施し、その様子を撮影したビデオカメラの映像からタンク水の傾斜角と移動周期の計測を行った。その結果、タンク両舷の水位は移動周期および減衰にほとんど影響がなく、ダクト高さが両者に対して支配的であることを確認した。

## 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ポストパナマックスコンテナ船のデッキ上に搭載し、ダクト高さを 0.75cm に調整したタンクに水を入れた場合と入れない場合について、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 1.6、波高波長比 1/30 の規則向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。この際、横揺れ固有周期に多少の差が生じるが、曳航速度を調節してパラメトリック横揺れの条件を満たすようにした。

はじめに、タンクに水を入れない場合（アンチローリングタンク非装備に相当）は、横揺れ振幅約 26 度のパラメトリック横揺れが観測された。次にタンクに水を入れた状態では、水位が底面から 1、2cm までは横揺れ振幅約 17 度のパラメトリック横揺れが観測されたが、水位 3cm の場合は完全に横揺れが消滅した。これと同様の手順にて、ダクト高さを 1.0cm に変更した場合についても同様の実験を行い、パラメトリック横揺れ発生限界を探索した。

## MPS 法による自由減衰試験の再現

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固有周期に一致させる必要があることから、移動周期の

推定が不可欠である。また、摩擦や渦によって横揺れエネルギーを散逸させる減衰力の推定も設計時には重要であり、従来はこれらの推定に模型実験が主に用いられてきた。本研究ではこの模型実験の代替として、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減衰試験の再現については、応用力学研究所界面動力学分野の末吉が担当し、タンクの自由減衰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、粒子間距離を約 0.15cm（総粒子数 5000 程度）に設定することで、タンク両舷の水位やダクト高さに関わらず、タンク水の移動周期および自由減衰の程度を精度良く推定できることを確認した。

### MPS 法を採用したパラメトリック横揺れの推定

アンチローリングタンクを装備した状態での船体自由横揺れ試験から求めたタンク単独の減衰係数と MPS 法を用いて得られたそれぞれの減衰係数を、船体横揺れ運動とタンク水の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モデルに用いて、タンクの減衰係数の推定精度がタンク装備船のパラメトリック横揺れの推定にどの程度影響を及ぼすのかを検証した。ここで、タンク水挙動を記述する数学モデル中の係数および連成項の係数はタンクの各寸法から求めた値を両者ともに用いているので、シミュレーション結果に見られる差は、純粋にタンクの減衰係数の影響と考えることができる。

はじめに自由横揺れ試験より得られた減衰係数を用いた場合のシミュレーション結果では、水位が 1cm、2cm の場合には横揺れ振幅約 12 度のパラメトリック横揺れが得られ、水位が 3cm の場合にはパラメトリック横揺れは非発生であった。これは自由航走模型実験の結果と定性的に合致している。また、MPS 法により得られたタンク単独の減衰係数を用いた場合でも、自由横揺れ試験から得られた実験値を用いた場合と同程度の精度にてパラメトリック横揺れの発生領域、およびその最大振幅を推定できることを確認した。

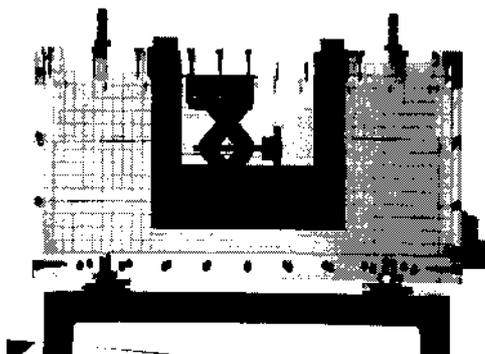
### 考察と課題

MPS 法を採用したパラメトリック横揺れ推定手法を構築し、自由航走模型実験にて観測されたパラメトリック横揺れの発生限界と横揺れ最大振幅を定性的に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。今後は強制動揺試験結果と MPS 法計算の横揺れモーメントの比較、3 次元形状のタンクへの適用、タンク形状や水量の最適化などが課題として挙げられる。

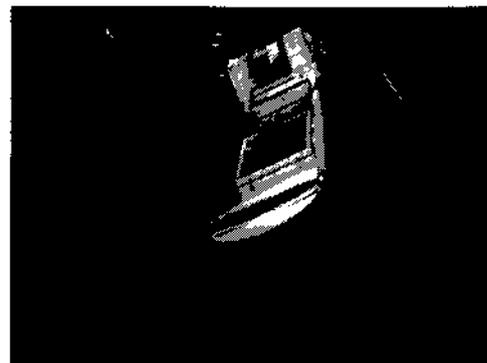
### 成果報告

平成 19 年 5 月 24、25 日開催の日本船舶海洋工学会春季講演会にて成果発表予定

「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の性能推定」 著者：橋本博公、末吉誠、峯垣庄平



アンチローリングタンク模型



パラメトリック横揺れ観測実験

## 複合型数値計算法の開発に関する研究

防衛大学校機械システム工学科 木原 一

### 研究目的

水波と浮体の相互干渉問題について高精度の計算を効率的に行うために、全く異なるアルゴリズムをもつ複数の数値計算法を組み合わせ、それぞれの利点を生かした複合的な数値計算法を新たに創造することを目的とし、本研究を実施した。

### 研究内容

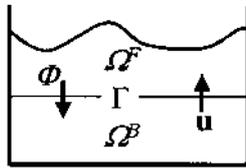
自由界面の大変形への対応が容易な粒子法と、水波の問題に高精度かつ高速な計算が可能な境界要素法を組み合わせることで、効率的で柔軟性の高い計算法の構築を試みた。この2種類の計算方法は自由表面問題の計算方法としては両極端に位置付けられる手法で、実際の数値計算プログラム上でもそのデータ構造など根本的な面で差が大きく接手法は確立されていなかった。粒子法は MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を使用し、境界要素法として線形ポテンシャル理論に基づき構成されたものを使用した。粒子法には水面近傍の界面変形が大きな領域を担当させ、境界要素法には界面の変形が小さなその他の計算領域を担当させることで、計算負荷の大きな粒子法の担当領域を局限し、効率化を図る方針で計算法の設計を行った。この種の異種計算法を組み合わせる方法としていくつかのアプローチが存在するが、今回採用したものはディリクレ型と呼ばれる各時間タイムステップに境界上で速度ポテンシャルとそのフラックスをやり取りしながら各計算手法間での値を相互作用させるものである。本研究で開発を試みた計算手法では、計算法間の境界面において粒子法側で計算された圧力から境界要素法側に引き渡すポテンシャル値を計算し、境界要素法側では速度ポテンシャルのフラックスから粒子法に引き渡す界面の変位速度を計算する構成を採用した。境界要素法と粒子法の接合面は線形近似を行うことで仮想移動境界を設定し境界要素法の計算において最も負荷の高い部分である影響係数の計算やマトリクスの逆行列の計算回数を計算格子構成時の一回だけにとどめ高速化を図った。この仕組みでは境界要素法側で各時間ステップに必要な計算はほぼ三角行列とベクトルの後退代入だけであり、線型連立方程式をはじめから解く必要がないため、将来的に3次元問題を取り扱い計算規模が大きくなった場合でも粒子法を含めた全体の計算量と比較して少ない計算量に抑えることが可能な構成となっている。

開発において初期段階では粒子法側で計算される速度ポテンシャルの空間分布が数値的な高周波振動などを含んでおり、これをそのまま境界要素法側の境界からの入力とした場合、計算が数値的に不安定となり正常な結果が得られなかった。そこで一種の空間的ローパスフィルタ処理と線形化に伴うポテンシャル計算位置のずれに起因する静水圧力差の補正処理をかけることで、安定した正常な計算結果を得ることが可能になった。

この開発した複合計算方法を用いて、2次元水路における造波問題の計算を行った結果、水深、波長、周波数の理論関係である分散関係をほぼ満たしており、正常に異種計算方法同士の接合が行われていることの確認材料が得られている。本研究の成果は2007年8月開催の The 9<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics で発表される予定である (Abstract 受理済)。

粒子法 (MPS法)

担当領域: 水面近傍  $\Omega^F$   
 境界条件: 境界  $\Gamma$  での流速  $\mathbf{u}$



線形境界要素法

担当領域: その他水底側  $\Omega^B$   
 境界条件: 境界での速度ポテンシャル  $\phi$

図 1 : ディリクレ型複合計算手法

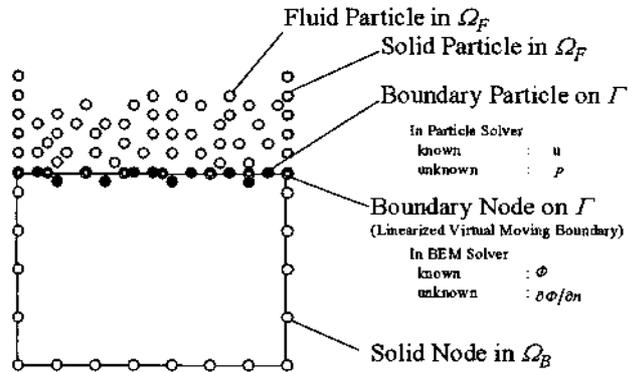


図 2 : 計算点等配置構成概念図

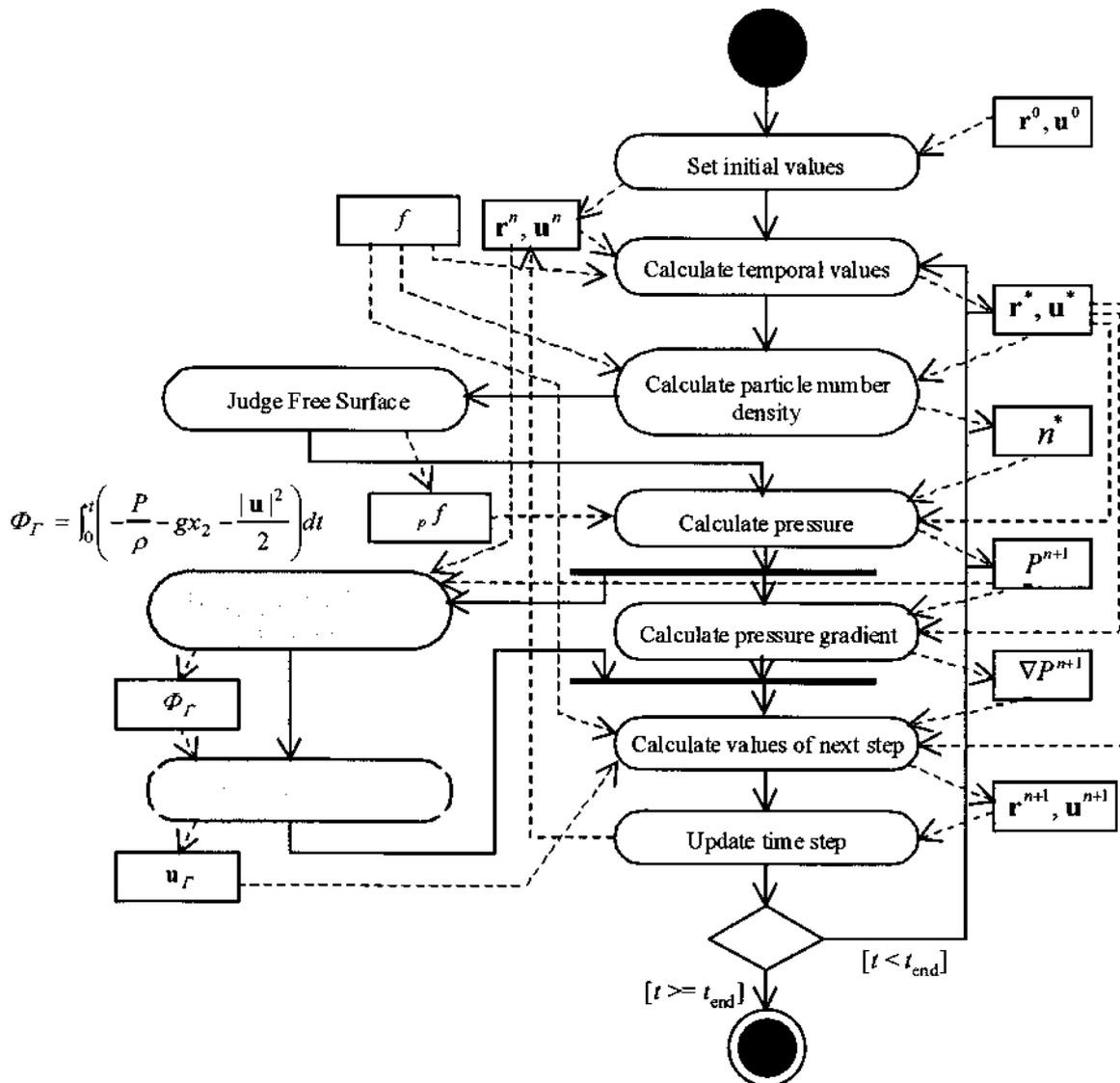


図 3 : 開発手法の UML アクテビティダイアグラム

# 完全オイラー型解法による固体-流体連成解析

藤久保昌彦・岡澤重信

広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻

## 1. 背景

有限要素法における数値解析手法は、大きく2つの方法に分類することができる。1つはラグランジュ型有限要素法であり、物質の変形をラグランジュ的に捉えて時間毎に位置を追跡していく方法である。もう1つはオイラー型有限要素法であり、物質の変形をオイラー的に捉えて解析領域のどこに位置しているかを評価する方法である。一般的に固体解析においてはラグランジュ型有限要素法が用いられ、流体解析においてはオイラー型有限要素法が好んで用いられる。

固体と流体の連成問題を有限要素法で解析する際は、固体変形が微小な連成度合いの弱い問題では、Fig.1(左)に示すように、固体に対してラグランジュ法を、流体に対してオイラー法を適用し、それぞれ独立に取り扱って解析を行うことが可能である。この方法は、固体にラグランジュ法を用いて解析しているため、固体の境界面の追跡が正確にできるという利点がある。しかし、固体に大変形や破壊の伴う問題では境界面形状が複雑になり、メッシュの破綻が発生する。また、流体と固体それぞれの解析コードが存在し、その境界面では互いにデータをやり取りすることで連成解析が行われるため、そのアルゴリズムの複雑さから計算コストの面でも効率的な方法ではない。



Fig. 1 従来の手法(左)と本手法(右)での連成解析

## 2. 目的

本研究では、Fig.1(右)に示すように、固体と流体の双方をオイラー法により表し、1つの解析コードで解析を行う方法を提案する。解析コードとしてはオイラー型固体解析コードをベースとし、これに流体の応力と圧力を考慮し、流体用コードを付加する形で固体-流体連成解析に拡張する。

この方法では、固体に対してもオイラー法を用いて解析するため、固体の境界面の正確な追跡ができないという課題は残るが、メッシュが変形しないため大変形や破壊問題にも対応することが可能である。また、解析コードが1つであるため、計算コストの面からもより効率的に解析を行うことができる。この時、流体と固体の境界面での接触力の計算には混合物理論(Mixture Theory)<sup>1),2)</sup>と呼ばれる考え方を用いる。本研究では、以上のようなアプローチで固体と流体の連成問題の解析を試みる。そして、その妥当性や有効性を検討し、より効率的で汎用性の高いシミュレーション手法の構築を目指す。

## 3. 解析手法

本手法はオイラー型解法であるため、支配方程式は移流項を含む。本研究ではこの支配方程式の解くために、計算を非移流ステップと移流ステップに分ける<sup>2)</sup>。解析の流れとしては、Fig2に示すように、非移流ステップでラグランジュ的に計算した後、変形したメッシュは元の位置に戻され、続いて移流計算が行われる。

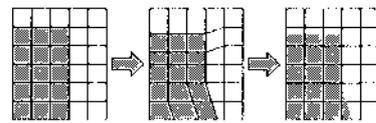


Fig. 2 非移流ステップと移流ステップ

### (1) 非移流ステップ

非移流ステップでは、通常ラグランジュ型解法の解析手法をそのまま適用することができる。本手法では、既存の動的問題における固体解析コードを解析の流れの軸とする。この流れに対して、流体の応力を考慮するために、後に述べるように混合物理論を用いて固体と流体の応力を平均化し、固体解析の流れにフィードバックさせる。さらに、流体の圧力による速度の変化を考慮するために、非圧縮流体のナビエ-ストークス方程式を基に Fractional Step 法と呼ばれる方法を用いて速度更新を行う。

### (2) 移流ステップ

オイラー型解法における計算精度は、その大部分は移流ステップに依存している。本研究では、2次の移流精度を持つ差分法を用いた MULCS(Monotone Upwind Schemes for Conservation Laws) 法<sup>3)</sup>と呼ばれる移流解法を用いる。非移流ステップでは固体と流体の解変数はそれぞれ独立に計算されるのに対し、移流ステップでは混合物理論により固体と流体が混合された後に、これらの解変数の移流がまとめて計算される。

## 4. 混合物理論 (Mixture Theory)

本手法では Fig.3 に示すように、固体と流体の接触面で2物質以上を含む要素が存在することがある。この要素の取り扱いに混合物理論を用いる。本研究で用いる混合物理論では、1要素内に存在する全ての物質についてひずみ速度は同じであると仮定する。この仮定を元に要素内の各物質の応力を計算し、密度関数で平均化して要素の応力を求める。

## 5. 解析結果

### (1) 障害物の存在するダムブレイク問題

解析モデルとして Fig4 に示すような、水柱が崩れ弾塑性体である棒(壁)に衝突するシミュレーションを取り挙げる。流体は密度  $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘性係数  $0.001[\text{Ns}/\text{m}^2]$  の水であり、固体は仮想的なもので変形の様子が良く確認できるよう、比較的やわらかい物質を想定している。物性は密度  $1200[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、ヤング率

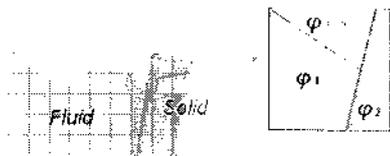


Fig. 3 固体と流体の境界面での2物質以上を含む要素

は15[MPa], ポアソン比は0.3, 降伏応力は0.1[MPa]となっている. また, メッシュの分割数は $60 \times 40$ である.

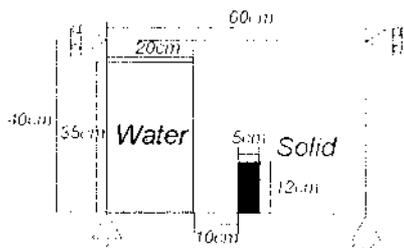


Fig. 4 障害物の存在するダムブレイク問題: モデル

Fig.5はシミュレーション結果である. 水が衝突した後, 水の圧力により棒が流れの方向に曲げられる様子が良くシミュレートできている. 棒は弾塑性体であるため, その可塑性により曲げられた後も元の形に戻ろうとせず変形したままになっている. また, 水の流れは棒を超えた後に渦を作るように自由表面が巻き込む挙動を示している. このように, 流体力により変形する固体の挙動と, 流体が作る複雑な自由表面形状をよく捉えることができています.

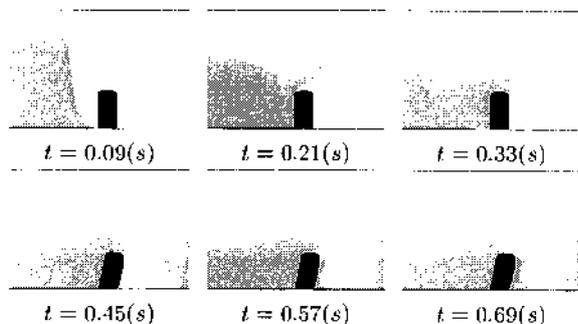


Fig. 5 障害物の存在するダムブレイク問題: 解析結果

## (2) 波浪中の船体挙動

Fig.6に示す解析モデルのように, 水槽中の水平方向の動きを拘束された船体に波がぶつかる様子をシミュレートする. 流体は水を仮定しており, 船体はプラスチック模型船を仮定している. 物性は密度 $950[\text{kg}/\text{m}^3]$ , ヤング率 $600[\text{MPa}]$ , ポアソン比0.3である. また, メッシュの分割数は $50 \times 20$ である.

Fig.7は解析結果である. 前方からの波の力によって船体が持ち上げられ, その後船首部分から水面にたたきつけられている様子が分かる. また, 船体の動きにより船体の前後方にできる波の様子もシミュレートできている. このように, 固体と流体の相互作用による挙動の変化をよく捉えることができています.

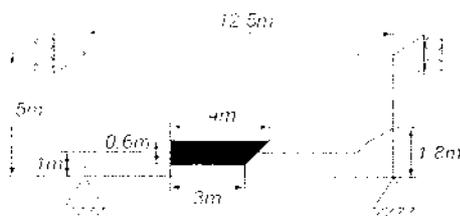


Fig. 6 波浪中の船体挙動: モデル

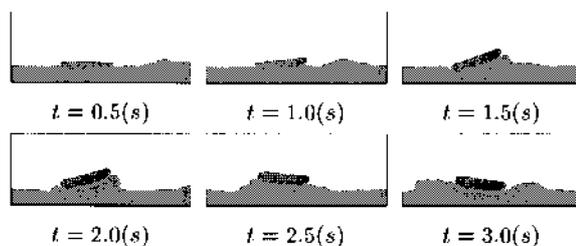


Fig. 7 波浪中の船体挙動: 解析結果

## 6. 結言

本研究により, 比較的剛性の低い固体と流体との連成問題に対しては本解析手法で良好な結果を得ることができていることが分かった. また, 既存の固体解析コードを拡張することで, 本手法の汎用性の高さも示すことができた. 一方, 本手法で金属などの固体と流体の連成解析を行うと, 混合物理理論で応力を平均化する際に金属と水とで剛性の違いが大きすぎるために, 流体側から見ると応力が大きく計算されてしまい, 良好な結果を得ることができないという知見も得た.

以上のことより, 本手法の適用範囲としては, 比較的柔らかい固体と流体の連成問題と考えられ, 適用分野としては例えば, 血液の流れ解析などの生体力学の循環器系シミュレーション等が挙げられる.

今後の課題としては, 他手法の解析結果や実験結果との比較による定性的, 定量的な評価をすることにより, 本手法の正当性の評価が必要である. また, 本研究室では粒子法<sup>4)</sup>による完全ラグランジュ型解法による固体-流体連成解析の研究も行い, オイラー型解法との比較, 検討を進めていく方針である.

## 参考文献

- 1) Benson D.J., Okazawa S.: Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193:4277-4298, 2004.
- 2) Benson D.J.: A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 140:59-86, 1997.
- 3) Van Leer B.: Towards the ultimate conservative difference scheme iv, Journal of Computational Physics, 23:276-299, 1977.
- 4) 越塚誠一: 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 2005

# 生体吸収性プラスチック複合材料の力学的特性に及ぼす微視的分解の影響

首都大学東京 都市教養学部 小林 訓史

## 1. 緒言

従来用いられている骨折固定材は、その多くが金属製であり、周囲組織の炎症や骨の弱化を防ぐために、治癒後速やかに体内から取り除く必要がある。そこで現在、この再手術による患者の負担を低減するために、生体吸収性を有するポリ L 乳酸 (PLLA)を用いた骨折固定材が臨床応用されている。しかし PLLA 単体のデバイスでは、強度・剛性の面から使用部位を限定されることや、分解までに一年以上かかること、結晶化度が高い場合における線維状分解生成物による周囲組織の炎症などの問題が生じる。そのため、強度及び生体適合性を改善する目的で、PLLA と生体活性セラミックスとの複合材料の研究がなされている。これまでに生体活性セラミックスとして、骨の無機主成分として知られるハイドロキシアパタイト(HA)や同じリン酸カルシウム系で生体吸収性を示す  $\beta$  型リン酸三カルシウム( $\beta$ -Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,  $\beta$ -TCP)をフィラー材とした複合材料の研究が行われ、その機械的特性や分解特性が評価されてきた。その中でも、これらの複合材料が長期間にわたって生体内で使用されることから、生体内にインプラントした場合の複合材料における特性の経時変化を明らかにすることは、生体安全性の観点から非常に重要であるといえる。

そこで本研究では、生体吸収性骨治療材の長期間にわたるインプラントによる力学的特性への影響を明らかにすることを目的として、生体活性セラミックスのうち、生体親和性に優れ、高い生体溶解性を示す  $\beta$ -TCP を用い、PLLA との複合材料の作製し、その *in vitro* 環境における力学的特性について評価を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片作製

フィラー材である  $\beta$ -TCP(太平化学工業製、リン酸三カルシウム)と、マトリックス材である PLLA(島津製作所(株)製、ポリ乳酸ラクティ#5000)を重量比 10/190, 20/180, 30/170 でそれぞれ混合後、射出成形機を用いて 100mm×10mm×4mm の曲げ試験片形状に成形した。また混合に用いた容器内の  $\beta$ -TCP 残量を測定し、その値を差し引くことにより、最終的な混合比を決定した。

### 2.2 浸漬試験

擬似生体環境として pH6.4 及び pH7.4 のリン酸緩衝液(PBS)を用いた。射出成形によって作製した試験片を、突出棒の痕のある面を下面として、37°C のインキュベーター内にて PBS への浸漬を行った。浸漬期間は、各 pH で 8, 16, 20 週間とした。

### 2.3 力学的特性評価

各期間浸漬した試験片の力学的特性は、引張試験及び大気中 4 点曲げ試験によって評価した。引張試験は、試験片端部にアルミタブを接着後、試験片の両面にひずみゲージを接着後、試験片の両面にひずみゲージを接着し、クロスヘッド速度 1mm/min にて行った。また、大気中 4 点曲げ試験では、試験片の圧縮面にひずみゲージを接着し、外支点間距離 66mm、内支点間距離 22mm の治具を用い、クロスヘッド速度 1mm/min で行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 力学的特性評価

射出成形によって作製した  $\beta$ -TCP/PLLA 複合材料の、各 pH における  $\beta$ -TCP 含有率を以下に示す。

pH6.4 : 5.2, 9.1, 13.6wt%

pH7.4 : 5.0, 9.5, 14.0wt%

作製した試験片はバリ、ひけなどのない良品であったが、どの試験片においても  $\beta$ -TCP の凝集体が観察された。  $\beta$ -TCP の凝集体は含有率の増加に伴いより多く観察された。未浸漬の試験片の力学的特性は、引張及び曲げの負荷形態に関わらず、  $\beta$ -TCP の含有率の増加によって、強度は低下し、弾性率は増加した。

Fig.1 に pH7.4 の PBS に一定期間浸漬した  $\beta$ -TCP/PLLA 複合材料の引張試験結果を示す。浸漬による影響は、5.0wt%の試験片において、引張強度及び引張弾性率に関して 20 週まで確認されなかった。その一方で、9.5wt%及び 14.0wt%の試験片では、浸漬 20 週後で、引張強度・引張弾性係数において顕著な低下がみられた。14.0wt%の試験片に関しては、浸漬後 16 週において、すでに弾性率の低下がみられる。これは 9.5 及び 14.0wt%の試験片では、5.0wt%の試験片と比較して多くの  $\beta$ -TCP 凝集体が観察されたことを考慮すると、  $\beta$ -TCP 凝集体が浸漬による影響を優先的に受けていることに起因すると考えられる。つまり複合材料の内部における  $\beta$ -TCP 凝集体は、吸水によって荷重を負担できないほど脆弱になっていたと示唆される。また Fig.2 に pH6.4 の PBS に浸漬した試験片における引張試験結果を示す。pH6.4 の PBS における浸漬では、20 週の浸漬後、全ての試験片において引張強度及び弾性率の低下がみられ、9.5 及び 14.0wt%の試験片に関しては、それらの低下率が pH7.4 における浸漬よりも大きかった。浸漬 20 週後の最も  $\beta$ -TCP 含有率の高い試験片において、引張強度の低下率は pH7.4 及び pH6.4 でそれぞれ 22%及び 27%、引張弾性係数の低下率はそれぞれ 17%及び 23%であった。浸漬 20 週後において、9.1wt%及び 13.6wt%の試験片の引張弾性率は 5.2wt%の試験片よりも低い値を示した。

Fig.3, 4 は、pH7.4 及び pH6.4 の PBS に浸漬した各浸漬期間後の曲げ試験結果を示している。pH7.4 において、引張試験結果同様に、20 週の浸漬後 5wt%の試験片では、その影響が見られなかったのに対し、9.5 及び 14.0wt%の試験片では、曲げ強度及び弾性率ともに顕著に低下することが確認された。また pH6.4 の PBS に浸漬した試験片の曲げ試験結果は、引張試験と同様の

傾向を示し、浸漬 20 週後の最も  $\beta$ -TCP 含有率の高い 13.6wt% の試験片において、曲げ強度は 33% 低下し、曲げ弾性率は 26% 低下した。

これらの結果から、本研究で作製した  $\beta$ -TCP/PLLA 複合材料の力学的特性は、pH6.4 の PBS における浸漬において pH7.4 と比較して、浸漬による力学的特性の低下が顕著であることが確認された。pH に関わらず力学的特性の低下は、 $\beta$ -TCP と PLLA 界面や  $\beta$ -TCP 凝集体が、浸漬によって荷重を負担できないほどに脆弱になったことに起因すると考えられる。pH6.4 のような低 pH における浸漬では、生体内において PLLA よりも優先的に分解すると考えられる  $\beta$ -TCP の挙動を再現できる可能性があることが示唆された。

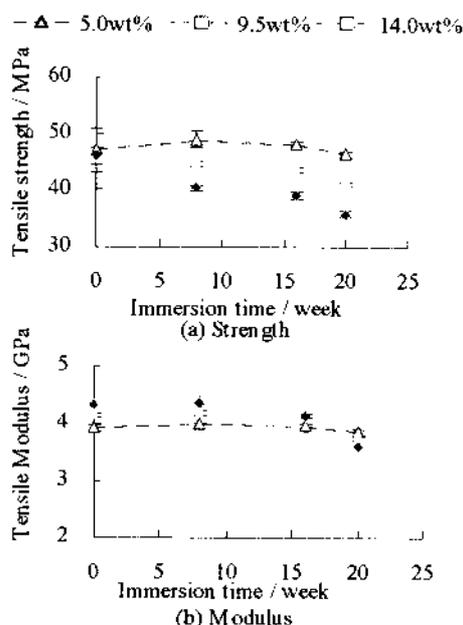


Fig.1 The results of tensile tests of  $\beta$ -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:7.4)

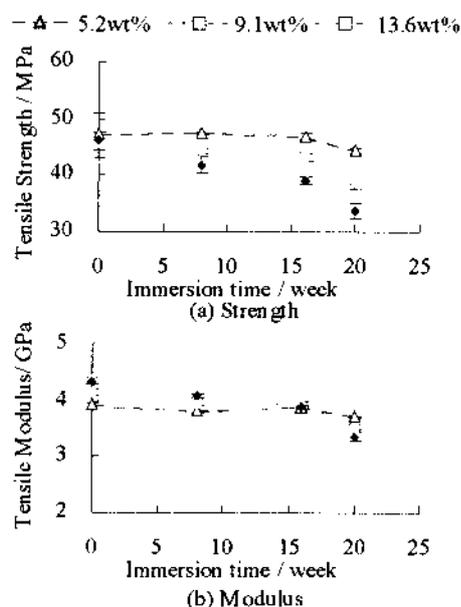


Fig.2 The results of tensile tests of  $\beta$ -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:6.4)

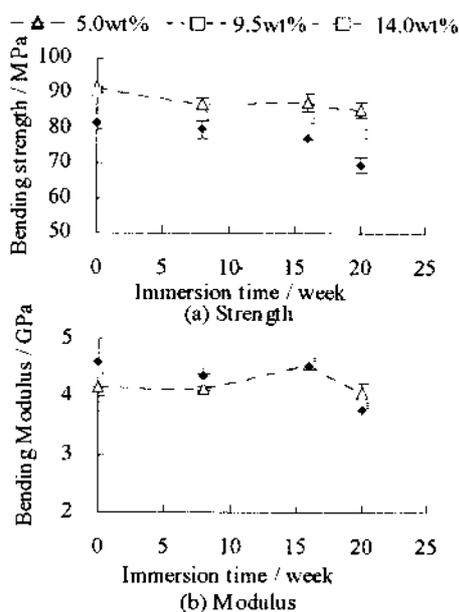


Fig.3 The results of bending tests of  $\beta$ -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:7.4)

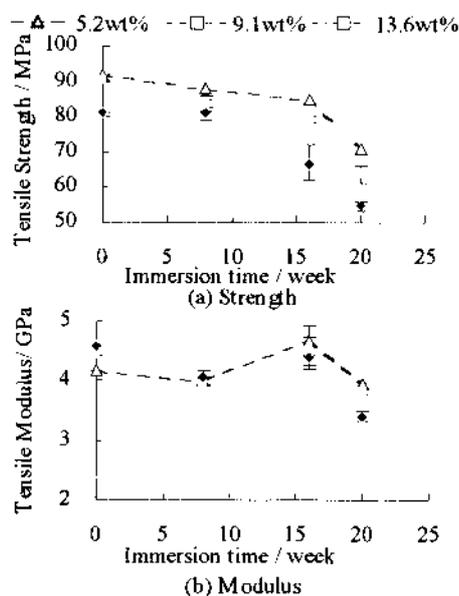


Fig.4 The results of bending tests of  $\beta$ -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:6.4)

#### 4. まとめ

本研究では、異なる pH の PBS に  $\beta$ -TCP/PLLA 複合材料を浸漬し、その力学的特性の変化に関して以下の結論を得た。

- (1) pH7.4 の PBS 浸漬において、曲げ及び引張荷重下における強度及び弾性率は、5wt% に関して 20 週の浸漬では変化せず、9.5 及び 14.0wt% の試験片においては、未浸漬のものと比較して顕著な低下が見られた。
- (2) pH6.4 の PBS における浸漬では、pH7.4 と比較して、複合材料の力学的特性に与える影響が大きかった。

## 1. 研究目的

カオスや乱流状態にある流体について、その輸送特性を明らかにする。昨年度は、レーリー・ベナール対流における流体の粘性係数の発散の他、熱伝導率の発散も見出すことができた。これを受けて、粘性係数の発散のメカニズムを理解することを一つの目的とする。また、蔵本-シバシンスキー方程式やヘノン-ハイレス系を取り上げ、射影演算子法を用い、渦粘性を数値的に評価したり、物理量と揺動力の時間スケールの比較を行う。

## 2. 研究方法

研究のデザインは、共同研究者各々の意見を尊重し、共同研究者各々がその方針を決める。ある程度研究がまとまった段階で研究についての報告を互に行ない、内容について議論をし研究内容を吟味する。応用力学研究所での研究集会をはじめ、研究集会や学会会合での発表を積極的に行ない、計算結果や研究内容の吟味を必ず行う。意見をもらった場合は、研究の再検討や今後の研究のデザインに役立てる。

## 3. 研究結果

昨年度までレーリー・ベナール対流を扱ってきたが、レーリー・ベナール対流のシミュレーションを行うのに柳田-金子モデルを用いてきた。柳田-金子モデルは、その連続極限がナビエ-ストークス方程式になることが証明されていない。そこで、シミュレーションを行うのに、さらに信頼性の高い格子ボルツマン法を用い、乱流粘性係数の計算を行なった。具体的には、空間3次元一様乱流における運動量流れとその2時間相関関数の計算を行なった。結果は、レイノルズ数が大きいほど運動量流れの2時間相関関数のとる値は大きく、レイノルズ数が大きいほど乱流粘性係数が大きいことを示していた。(柴田)

森の射影演算子法を援用して、ヘノン-ハイレス系の運動方程式を非マルコフ的な線形確率方程式に変換した。さらに、非線形力の時間相関関数を用いて、振動数依存性のあるカオス誘導摩擦係数や記憶関数を数値的に求めた。その結果、ヘノン-ハイレス系のカオス運動は、時間相関関数の相関時間と記憶関数(揺動力の時間相関関数)の相関時間に、あまり差がなく、長いタイムスケールと短いタイムスケールの揺らぎに分離できないということがわかった。(石崎)

#### 4. 研究成果

##### 論文による発表

- [1] R. Ishizaki, H. Mori, H. Tominaga, S. Kuroki and N. Mori,  
The Memory Function and Chaos-Induced Friction in the Chaotic Henon-Heiles System,  
Progress of Theoretical Physics, 116(6), 1051-1067(2006).
- [2] M. Ioualalen, M. Okamura, S. Cornier, C. Kharif and A. J. Roberts,  
Computation of short-crested deepwater waves,  
Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 132, 157-165(2006).
- [3] M. Okamura,  
Evaluation of the time correlation function for the Kuramoto-Sivashinsky equation with a projection operator method,  
Progress of Theoretical Physics, 116(1), 47-59(2006).
- [4] M. Okamura,  
Validity of the essential assumption in a projection operator method,  
Physical Review E, 74, 046210(2006).
- [5] H. Shibata,  
Correlation Length in the Rayleigh-Bénard Convection,  
Journal of the Physical Society of Japan, 76(2), 024002(2007).

##### 会議や会合における主な発表

- [1] 石崎龍二, 森肇, 富永広貴, 黒木昌一, 森信之,  
ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数,  
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.
- [2] 岡村 誠,  
射影演算子法における渦粘性の数値的評価,  
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.
- [3] 岡村 誠,  
射影演算子法における渦粘性の数値的評価,  
日本物理学会 2007年春季大会, 鹿児島大学, 2007年3月.
- [4] H. Shibata,  
Percolation in the Rayleigh-Bénard convection,  
The American Physical Society (59th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics), Tampa, Nov. 2006.
- [5] 柴田博史,  
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数,  
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.

- [6] 柴田博史,  
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数,  
京都大学数理解析研究所研究集会「乱流と輸送現象: コーヒーカップから宇宙まで」,  
2007年1月.

## 5. 研究組織

柴田博史 (崇城大学・工学部), 石崎龍二 (福岡県立大学・人間社会),  
岡村 誠 (九州大学・応用力学研究所).

# カーボンナノチューブ/NiTi 粒子/ポリマーによる三相複合材料の開発

信州大学繊維学部  
機能機械学科 倪 慶清

## 1. 目的

近年、金属粒子、カーボン粒子、カーボン繊維などの導電性フィラーを高分子に添加することにより、静電防止材、半導体材、電磁波遮蔽材、正的温度係数材として電子電気分野への応用が展開されている。材料性能に対しては、十分な強度と電気特性を要求されるとともに耐熱性、ダンプ特性も必要である。これらの要求を満たすには、カーボンナノチューブ/形状記憶合金(NiTi)粒子/耐熱性ポリマーによる三相複合材料が有力な候補である。そこで、本研究では気相法で合成された平均直径 150nm のカーボンナノチューブと形状記憶合金(NiTi)粒子を用い、ポリマーマトリックスに添加することにより電気伝導性に優れた三相複合材料を創製した。形状記憶合金(NiTi)粒子を添加したため、形状記憶効果を保持すると同時に電気伝導機能を兼備することができた。形状記憶効果については別途に報告するが、ここで創製した三相複合材料の電気伝導安定性について報告する。

## 2. 材料開発および電気伝導性評価

◆三相材料の創製 導電性フィラーとして、気相法により合成された高結晶性のカーボンナノチューブ(昭和電工(株), VGCF®)およびニッケルチタン合金粒子(Ni/Ti=50/50, 高純度科学研究所)を用いた。マトリックスとして不飽和ポリエステル(UPR)と硬化剤はパーメック N(日本油脂株式会社)を用いた。耐熱性ポリマー母相に平均直径 150nm または 80nm のカーボンナノチューブをフィラーとして用い、マイクロサイズの形状記憶合金(NiTi)粒子を添加することにより、形状記憶効果を有すると同時に電気伝導機能を兼備することのできる三相複合材料を創製した。

◆性能評価 基本的力学的に特性のほか、開発した三相複合材料に対して、形状記憶効果を熱力学的サイクル試験により検討した。また材料の電気抵抗や伝導性について、デジタルマルチメータ VOAV7510 IWATSU(株)を用いて、CNF 含有率が異なる各 5 個の試験片の電気抵抗値を測定した。また電気抵抗の温度依存性及び時間依存性、電流・電圧特性(V-I)と電流減衰特性(I-t)を測定した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 電気抵抗と含有率の関係

Fig.3 に 10wt%NiTi 粒子を充填した CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の体積抵抗率と CNF 含有率の関係を示す。CNF の含有率の増加に伴い、CNF/UPR 複合材料及び CNF/NiTi10wt% 粒子/UPR 三相複合材料の体積抵抗率は減少した。特に、CNF の含有率 3wt%前後までは抵抗率が急に低下し、この含有率を超えると抵抗率が緩やかに変化して、パーコレーション現象が発生したことがわかった。これは、パーコレーション閾値で、絶縁体であるポリマーマトリックス中に、伝導性フィラーのつながりからなる導電ネットワークが形成されたことを意味している。2wt%CNF に限定した CNF2wt%/NiTi/UPR 三相複合材料の体積抵抗率と NiTi 粒子含有率の関係からは、NiTi 粒子の含有率の増加に伴い、体積抵抗率は線形的に増大した。

### 3.2 電気抵抗の温度依存性及び熱サイクルとの関係

1 回目の熱サイクル(昇温後冷却)測定結果から、CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の電気抵抗率と温度の関係を Fig.2 に示す。CNF 含有率が 2wt%-5wt%の範囲で温度の上昇に伴い電気抵抗値が徐々に上昇し、160°C前後に最大値になり、PTC (Positive Temperature Coefficient)効果が発生し、その後抵抗値が低下し、NTC (Negative Temperature Coefficient)効果も発生したことがわかった。また CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の昇温・冷却の熱サイクル後の電気抵抗率

変化から(図は省略), 1回目よりも2回目の低下幅は小さくなっている。これは非結晶性ポリマーを用いた伝導性複合材料ではポリマーの網状化が電気抵抗率に大きな影響を与えていることが起因している。一般に反応温度を高くするとその抵抗値が低くなる。ここで、昇温・冷却サイクル試験に伴い不飽和ポリエステル樹脂の網状化が進むほど体積は収縮するため、実際のマトリックスの体積は小さくなり、従ってカーボンナノチューブ間の接触面積が増加し抵抗率が小さくなる。

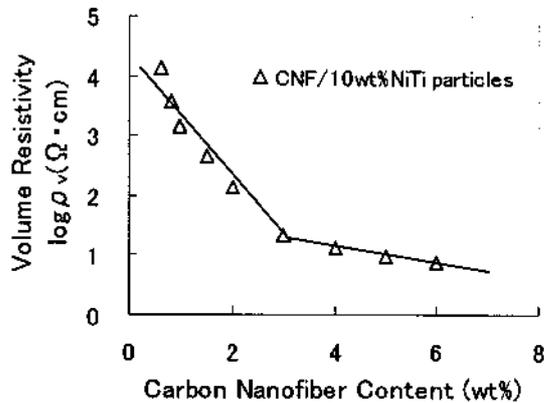


Fig. 1 Relationship between electrical volume resistivity and CNF content for CNF/NiTi10wt%/UPR composites.

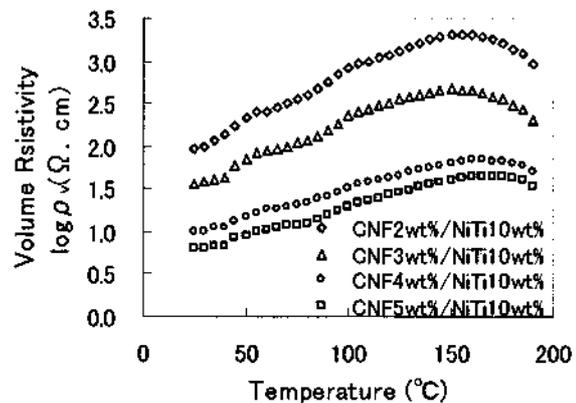


Fig. 2 Temperature dependence of volume resistivity in CNF/NiTi10wt%/UPR composites.

以上の研究成果をまとめると、次の諸見が得られた。

(1) チタン粒子の重量含有率 10wt%の三相複合材料, CNF/NiTi10wt%/UPR, に対して, CNF 含有率の増加に伴い電気抵抗が減少した。この場合, パーコレーション閾値は CNF 含有率約 3wt%であることが示され, カーボンナノチューブのパーコレーション閾値への寄与が認められた。

(2) 創製した三相複合材料は温度の増加に伴い電気抵抗率が増加し, PTC 効果が表れたが, PTC 強度は大きくなかった。

(3) 熱サイクル数が増えることに従い電気抵抗率は減少した。一定温度条件下で電気抵抗の時間依存性は, 初期では電気抵抗が急激に上昇し, 最大値になってから急激に低下するという動的パーコレーション現象を示した。電圧と電流の間はほぼ直線的関係にあり, オームの法則に従うことが示された。また, 過電流保護効果を発現することが分かった。

#### 4. 研究成果報告

(1) 武世宏, 倪慶清, 小岩康三, 倉鋪憲, 岩本正治, CNF/NiTi 粒子/UPR 三相複合材料の電気的特性, 材料(日本材料学会), Vol. 55, No.8, pp.766-771, 2006.8.

(2) Q.-Q. Ni, S. Wu, Y. Fu, T. Natsuki, K. Kurashiki, Properties of CNT/NiTi/UPR three-phase Composites, NANOTUBE 2006

(3) Chun-Sheng Zhang, Qing-Qing Ni, Wen-Xue Wang, Ken Kurasiki, Masaharu Iwamoto, Development and Damping Properties of Hybrid Laminates with Shape Memory Polymer, *Innovative Development, Characterizations and Applications of Composites*, 2006, pp.141-149, China Agricultural Science & Technology Press.

#### 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

# デジタル画像相関法による歯周構造の変形解析

福岡県工業技術センター 機械電子研究所  
内野 正和

## 1. まえがき

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。したがって、その計測手法も多様に開発されており、ひずみゲージを用いたもの<sup>(1)</sup>、レーザー変位計を用いたもの<sup>(2)</sup>、磁気効果を用いたもの<sup>(3)</sup>などがある。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であり、咬合解析に十分な情報量とは言えない。

全視野計測による変形解析は、Sobolewskiら<sup>(4)</sup>およびKishenら<sup>(5)</sup>のグループによって行われている。しかしながら、乾燥状態の歯牙単体における解析であり、咬合機能の解明には不十分と言える。咬合機能を考えるとき、歯牙のみでなく、歯根膜・歯槽骨（顎骨）も重要な役割を果たしており、それらの機能を無視できない。しかし歯根膜・歯槽骨に関しても、それら単体の動態解析・物性評価<sup>(6,7)</sup>などの研究は行われているが、歯牙・歯根膜・歯槽骨の歯周組織を構造体として考え、それらの動態解析を全視野で行った研究は光弾性材料を用いたモデル実験<sup>(8)</sup>のみであり、実際の構成物での計測は我々の知る限りない。

そこで本研究では、可及的に生体に近い状態を実現するため、前日に食肉用としてと畜されたブタを使用した。ブタの下顎骨を分離し、大白歯・歯根膜・歯槽骨で構成された薄片の試料を作製した。その試験片に、万能試験機により強制変位を付与することで咬合形態を模擬し、変形計測を行った。また、その試験片が十分乾燥した後、同様の実験を行い、変形形態の比較を行った。変形解析には、デジタル画像相関法を用いた。実際の歯周組織を用いたこのような研究はこれまでになされておらず、咬合機能における歯周組織の変形形態の解明に大変意義深い知見を与えるばかりでなく、歯根膜という緩衝材を介さず直接歯槽骨とオッセオインテグレートされる歯科インプラントにおいて、目指すべき理想的変位分布の指標となると考えている。

## 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測定対象物表面に何らかの模様（例えば、塗料スプレーなどの噴霧によるランダムパターン）を作成し、測定対象物の変形前後をCCDカメラなどで撮影する。そして、得られたデジタル画像に画像処理を施すことにより、試験片表面の変形量と変形方向を同時に計測することが可能な方法である。変形量と変形方向は変形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、変形後の画像より最も相関の良い画素領域を求め、その中心を変形後の移動位置とする。相関値  $C$  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。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+u+i, Y+v+j) - I_a(X+i, Y+j)}{\sqrt{\left( \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+u+i, Y+v+j) \right)^2 - \left( \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+i, Y+j) \right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $I_a(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変形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、実際の移動量は一面素の大きさよりも小さく移動するために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。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{l=-M}^M \sum_{m=-M}^M I_a(X+l, Y+m)}{\sqrt{\left( \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \right)^2 \times \left( \sum_{l=-M}^M \sum_{m=-M}^M I_a(X+l, Y+m) \right)^2}} \quad (2)$$

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、前日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、歯牙（大白歯）・歯根膜・歯槽骨を有する厚さ 2mm の薄片を作製した。試験片の一例を図1に示す。大白歯と歯槽骨は、歯根全域で厚さ数十～数百  $\mu\text{m}$  の歯根膜を介して接着されている。

### 2.3 実験手順

咬合機能を模擬した圧縮荷重を付与する測定は、下記の手順で行った。①試験片の観測領域の水分を、デジタル画像相関法に用いる塗料スプレーが塗布できる程度に乾燥させる。②塗料スプレーにより観測領域にランダムパターンを形成させる。③髄腔周辺の顎骨をバイスにより固定し、小型卓上試験機（東京試験機社製 LSC-1）に設置する。④歯冠上端の一部に圧縮

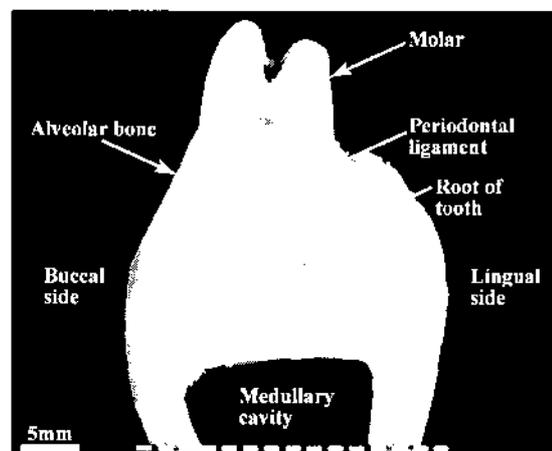


Fig.1. Structure of periodontium.

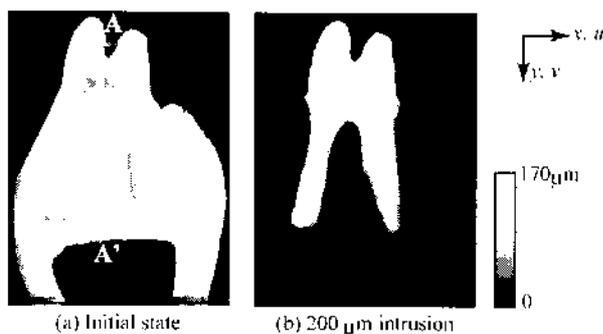


Fig.2. v-displacement field of the periodontium specimen (wet state).

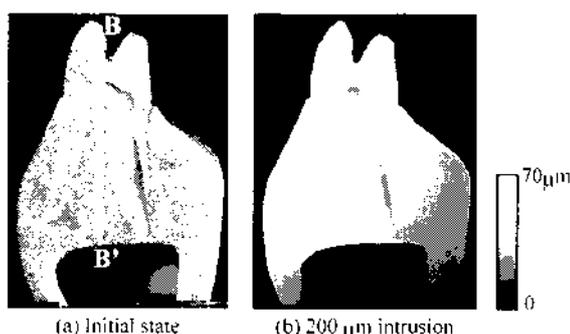


Fig.3. v-displacement field of the periodontium specimen (dry state).

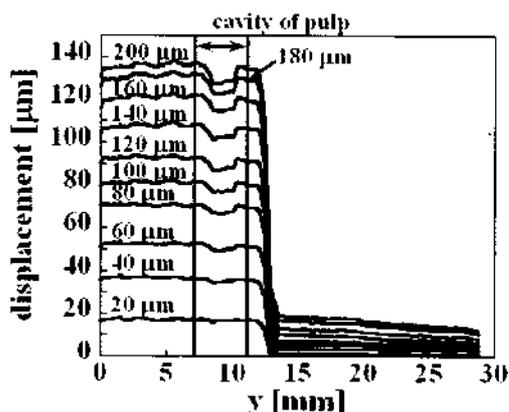


Fig.4. v displacements of the periodontium specimen (wet state).

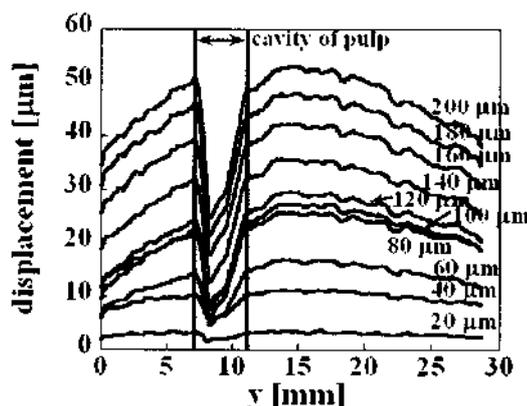


Fig.5. v displacements of the periodontium specimen (dry state).

荷重を付与する。⑤CCDカメラにより変形画像を撮影する。

薄片の試料に作用する実際の荷重は不明であるため、本研究では試験機による強制変位を採用した。押し込み量を0~200 μmとし、20μmごとにカメラ撮影を行った。

### 3. 実験結果

デジタル画像相関法により得られたy方向の変位分布の一例を図2に示す。(a)は初期状態、(b)は200μm押し込んだときの状態を表している。(b)において歯牙の形状が明確に示されており、歯牙と歯槽骨の境界、すなわち歯根膜に大きな変形が生じていることを示している。

図3に、同じ試験片を十分乾燥させた後に計測を行った変位分布を示す。(a)は初期状態、(b)は200μm押し込んだときの状態を表している。図2(b)と比べて、変位分布が大きく異なることがわかる。図2に示す生体に近い状態では、歯根膜の緩衝作用により歯槽骨がほとんど変形していないのに対し、図3に示す乾燥歯では、歯槽骨が大きく変形している。すなわちこれは、歯周組織の咬合機能を解析する場合、生体歯を用いることの重要性を示唆している。

図4は、図2(a)のA点を原点としA'方向のyの変位量を表している。図中の変位量はそれぞれ20μmずつ押し込んだときのものである。歯髄腔の変位量はノイズが大きく正確に測定できなかったため、無視する。この図より、①咬合の初期段階では、歯根膜のみが大きく変形すること、②歯根膜の変形後、歯槽骨が変形すること、③歯牙はほとんど変形せず、剛体変位していることがわかる。図5は、図3(a)のB点を原点としB'方向のy方向の変位量であるが、この図からも生体歯と乾燥歯の変位形態が大きく異なることが見てとれる。

### 4. まとめ

デジタル画像相関法を用いて、咬合機能に対する歯周組織の変位分布を可視化した。そして、歯根膜が重要な役割を果たしており、咬合時の歯周組織の変形解析には生体歯を用いることが重要であることがわかった。

### 参考文献

- (1) 清水明彦, 鈴木明彦, 岸本裕充, 長谷川誠実, 吉岡濟, *日保歯誌*, 38-2, (1995), 370-374.
- (2) 陳俊呈, *九州歯会誌*, 52-1, (1998), 200-209.
- (3) 大塩恭仁, *補綴誌*, 44-2, (2000), 254-264.
- (4) Sobolewski, P.A. and Wood, J., *Proc. 2004 SEM X International Congress*, (2006), Paper No.266.
- (5) Kishen, A. and Asundi, A., *J. Biomed. Opt.*, 10-3, (2005), 034010.
- (6) 松本俊郎, 杉村忠敬, *光学*, 10-3, (1981), 184-189.
- (7) 小松浩一郎, 金指幹元, 川田次郎, 千葉元丞, *顎顔面バイオメカ*, 5, (1999), 76-78.
- (8) 遠藤英昭, 山野浩樹, 佐々木具文, 伊藤秀美, 安倍敏, 島内英俊, 小松正志, *実験力学*, 6-1, (2006), 24-30.

### 研究成果報告

- (1) 森田康之, 内野正和, 新川和夫, 東藤貢, *機講論*, No.06-1, Vol.1, pp.835-836, 2006.
- (2) 内野正和, *日本実験力学学会合同ワークショップ2006*, pp.36-39, 2006.
- (3) 森田康之, 内野正和, 吉岡友彦, 東藤貢, 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔, 第33回日本臨床バイオメカニクス学会プログラム・抄録集, pp.129, 2006.
- (4) 森田康之, 内野正和, 吉岡友彦, 東藤貢, 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔, *機講論*, No.06-65, pp.206-207, 2007.
- (5) 内野正和, (社)日本非破壊検査協会九州支部技術サロン講演, 2007.

## 1. 緒言

現在人工膝関節全置換術(TKA)に用いられている人工膝関節は、術後の屈曲角度について正座等を伴う日本人の和式生活に完全に適応していない。屈曲可動域が比較的大きい人工膝関節としてBi-surface model [1]があるが、これよりさらに屈曲可動域日本人の和式生活に適応した改良型として、完全屈曲型の人工膝関節が提案されている。そこで、この完全屈曲型の人工膝関節(CFK)の設計を行うためには生体骨内部や人工膝関節にどのような応力が生じているかを知ることが重要になる。特に、CFKは形状的に従来の人工膝関節と異なる部分があるために、このような生体骨内部や人工膝関節に生じる応力の予測は有限要素法により可能となる。ここでは、従来の人工膝関節と形状が異なる脛骨コンポーネントと脛骨内を中心にして有限要素法による解析を進める。

## 2. 解析方法

汎用有限要素法コードを用いて、精度の検証を行うために複数の要素数により結果の検証を行った。用いた二つのモデルに対して、四面体二次要素を用いて複数の要素分割により解析を行い、要素分割数を決定した。それぞれ、脛骨も含め約26万要素に分割して解析を行った。

脛骨は人工的に作成した疑似脛骨として Fig.1のように海綿骨と皮質骨のモデルを作成し、脛骨コンポーネントと脛骨における局所の影響について解析を行った。このとき材料定数は以下のものを用いた。

脛骨コンポーネント (Co-Cr-Mo材)

ヤング率：115000 MPa, ポアソン比：0.3,

皮質骨

ヤング率：18000 MPa, ポアソン比：0.3,

海綿骨

ヤング率：2000 MPa, ポアソン比：0.3

CFKの脛骨コンポーネントは1<sup>st</sup> modelと2<sup>nd</sup> modelの二種類の脛骨コンポーネントについて行った。この二つの脛骨コンポーネントはCFKの特有な脛骨への切れ込み形状に差がある。これ

らに2パターンの荷重を負荷し、脛骨コンポーネントと脛骨に生じる応力の解析を行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 2に示す二つの異なる形状のCFK脛骨コンポーネント(1<sup>st</sup> model, 2<sup>nd</sup> modelモデル)に、[2]の文献を参考に膝の屈曲角度が80°(2点で接触)120°(ポストとカムで接触)の状態、すなわち接触形態が異なる状態のうちで最も脛骨コンポーネントに厳しい荷重を選定し、垂直方向と水平方向に設定した。その結果をFig.3に屈曲角度120°のときの脛骨の最大主応力の分布図、Fig.4に屈曲角度80°のときの最大主応力の分布図を示す。これらより、二種類の脛骨コンポーネントによって発生する最大主応力の差はないものの、屈曲角度120°の場合により高い応力が発生しているのがわかる。また、1<sup>st</sup> modelでは、切込み部にやや高い応力が発生している。

次に脛骨コンポーネントに生じる相当応力の分布図を屈曲角度120°と80°についてFig.5とFig.6にそれぞれ示す。これらの場合も最大応力については、二つのモデルについて大きな差は見られない。屈曲角度についての比較では、120°のときの方が大きな応力が生じている。

荷重条件はそれぞれの接触条件において最も厳しい荷重であるが、脛骨コンポーネントおよび脛骨には、相対的に高い応力が見られるが、絶対的には高い値は現れていない。

## 4. 結言

二種類の脛骨コンポーネントの2パターンの荷重を加えたが、脛骨コンポーネントの形状により、脛骨コンポーネントおよび脛骨に、局所的に応力が集中する部分が見られることが分かったが、絶対的な値は低い結果が得られた。

## 参考文献

- [1]上尾豊二, 関節外科, 22-3, (2003), 57-62
- [2]Dahlkvist, N. J., et al., Engineering in Medicine, 11-2, (1982), 69-75

5. 研究組織 (共同研究者)  
九州大学応用力学研究所 東藤貢

佐賀大学医学部 佛淵孝夫  
佐賀大学医学部 馬渡正明

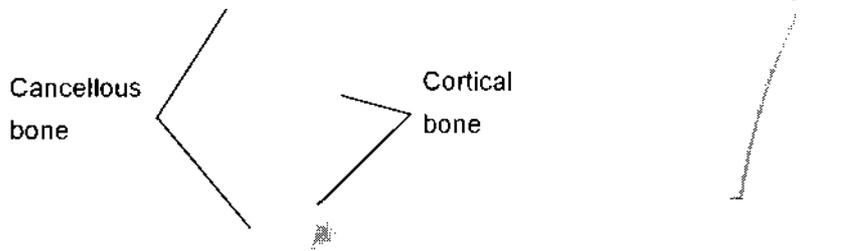


Fig.1 海綿骨と皮質骨の擬似モデル

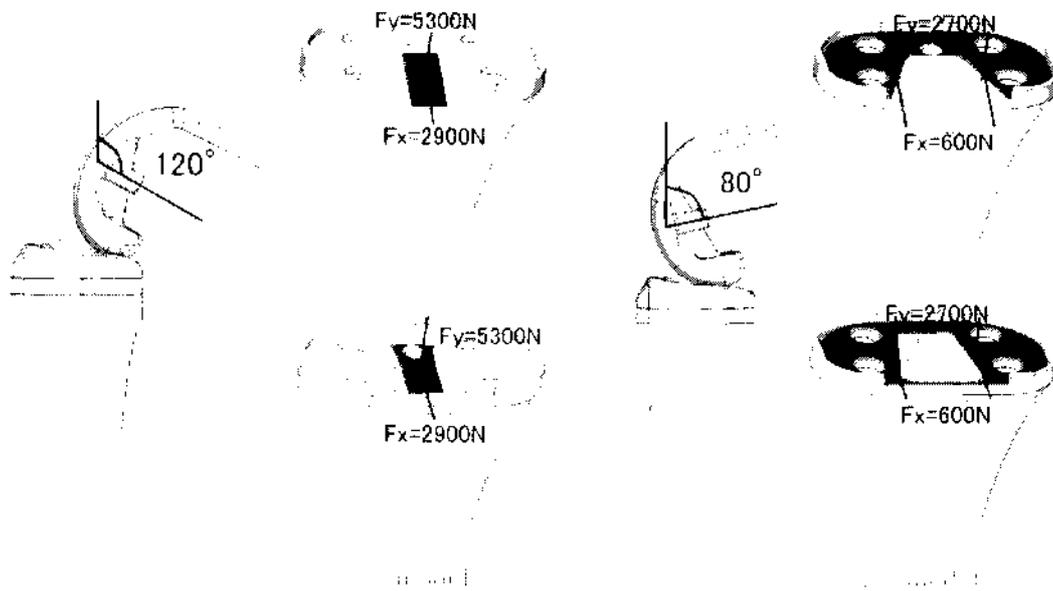


Fig.2 膝の屈曲角度と負荷荷重

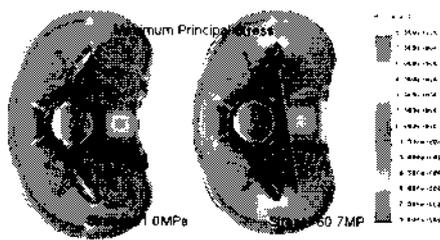


Fig.3 屈曲角度120° の最大主応力の分布

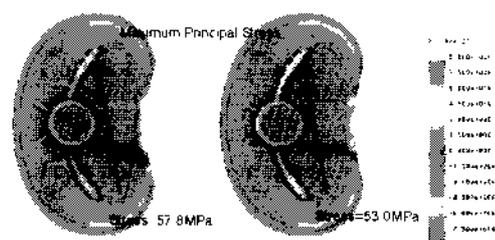


Fig.4 屈曲角度80° の最大主応力の分布

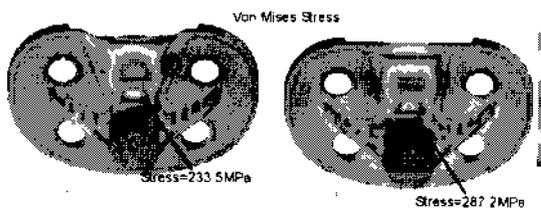


Fig.5 屈曲角度120° の相当応力の分布 (脛骨コンポーネント)

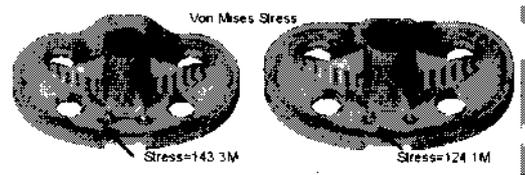


Fig.6 屈曲角度80° の相当応力の分布 (脛骨コンポーネント)

## 廃 GFRP の複合材料強化材としての再利用に関する研究

九州大学工学研究院 青野雄太

### 1 目的

強化プラスチック協会によれば、2005 年の廃 FRP 発生量は 45.6 万 t であり、今後もこの 40 万 t オーダーでの廃棄が見込まれている。現在、この廃 FRP の多くは GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) であり、全発生量の 1.7% はセメント原燃料化が行なわれている。しかし、残りのほとんどは埋立て処理(焼却後埋立てするものも含めて)または投棄されているが、最終処分地の不足が問題になっている。一方、焼却はダイオキシン発生など環境汚染の恐れや、GFRP の場合、ガラス繊維が焼却炉を傷めるため焼却には向かない。したがって、今後は廃 FRP を再利用することでごみを減らすことが望ましい。

本研究では分離を含まない簡単なリサイクル方法として、破碎によって廃 FRP を再利用することについて検討する。具体的には、破碎した廃 FRP を、Lee らが開発した不織布層間強化材としての利用方法の開発したい。そのため、新品の FRP の層間に、廃 FRP 破砕片の層を挿入した FRP 板を製作し、層間強化材として有効に使用できる条件について明らかにすることを目的とする。

### 2 実験方法

試験片を切り出す板材は VaRTM (vacuum assisted resin transfer molding) によって製作した。通常の FRP となる層のガラス繊維には日東紡ロービングクロス、樹脂にはビニルエステルを用いた。層間に挿入する材料の調達と破碎はラサ工業に製造をお願いした。用いた廃 FRP は水槽として使用されたもので、破砕片は図 1 に示すように大きさ 10~20mm 程度である。この大きさは Lee らにより開発された層間強化材の大きさと目視では同じ程度である。各層はスプレーのりを用いて接着し、接着しなかった破砕片と厚い破砕片を落とした。図 2 に破砕片の積層の様子を示す。通常の FRP は 4 層積層した。一方、破砕片を入れる場合、4 層全ての層間に挿入した。

図 3 と 4 はそれぞれ通常の FRP と廃 FRP 破砕片を挿入した FRP の断面写真である。今回の条件では、破砕片を挿入した試験片は板厚が板厚 2~3mm 程度の間で波打ち、また、樹脂が含浸していない部分も多く見られた。

次に図 5 に示す引張試験片を製作し、引張試験を行なった。引張試験機には島津 AG-5000A を使用した。クロスヘッド速度 0.5 mm で試験し、ゲージ長 50mm の伸び計で伸びを測定した。

### 3 実験結果

図 6 に引張試験で得られた応力ひずみ線図を示す。ヤング率は通常の GFRP は 27.3 [GPa]、破砕片を用いた GFRP は 17.2 [GPa] であった。破砕片を用いた GFRP はつかみ内側で破断した。

### 4 考察

破砕片を挿入した FRP がつかみ内側で破断した理由は、試験片が板厚方向に波打っていることが原因と考えられる。また通常の FRP に比べてヤング率が極端に低いのは空窩が多く存在するためであると考えられる。

波打ちと空窩を減らす方法の一つに、含浸する樹脂の量を増加させるが考えられる。Lee らの開発した不織布挿入方法では不織布と共にレジフィルムを挿入することで、この問題を解決している。VaRTM においてどのようにできるか今後検討したい。

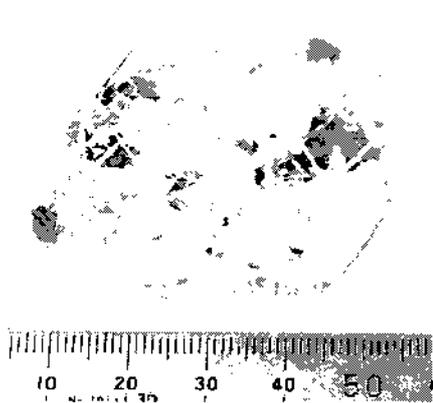


Fig. 1 GFRP chips by milling

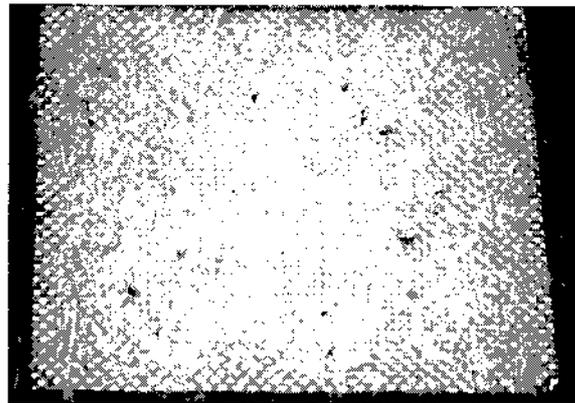


Fig. 2 Lamination of wasted GFRP chips



Fig. 3 Section of normal GFRP

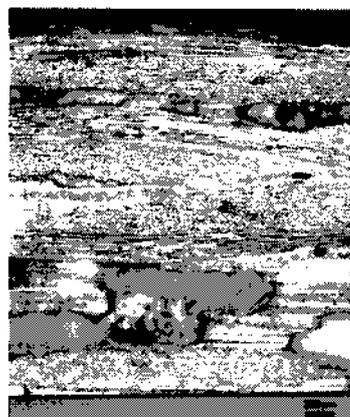


Fig. 4 Section of GFRP with wasted GFRP chips

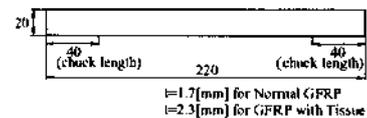


Fig. 5 Specimen configuration

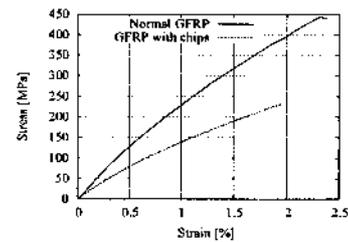


Fig. 6 Stress-strain curve

また、破碎片の大きさおよび廃 FRP 破碎片の層の厚さを揃えることも有効であると考えられる。波打ちの原因は強化繊維の層が厚さにばらつきがあることが原因と考えられる。通常の FRP も板厚方向の波打ちがあり、最大で  $150\mu\text{m}$  ほど板厚の差があった。これが生じるのはロービングクロスが元々波打っているためであるが、板厚方向のガラス繊維の剛性が高いため、波打ちの大きさが積層枚数に比例して増加することはないと考えられる。

同様に破碎片の場合も、破碎片個々の大きさと板厚方向への剛性が問題になると考えられる。破碎片断片それぞれの厚さを測定すると、およそ  $10\sim 80\mu\text{m}$  程度の厚さであったが、ガラス繊維そのものに比べて剛性が低いように思われた。したがって、破碎片個々の寸法を小さくして破碎片同士をより密にして板厚方向剛性を上げることができれば、層間強化材としての機能が期待できると考えられる。

## 5 研究組織

研究代表者	青野雄太	九州大学工学研究院機械科学部門
所内世話人	高雄善裕	九州大学応用力学研究所基礎力学部門
研究協力者	古山隆	九州大学工学研究院地球資源システム部門
研究協力者	宇田暢秀	九州大学工学研究院航空宇宙工学部門
研究協力者	野口博司	九州大学工学研究院機械科学部門

# 下顎骨に埋入された歯科インプラントの3次元モデルの構築と応力解析

九州大学大学院歯学研究院  
松下 恭之

## 1. 緒言

近年、天然歯を失った場合の新たな治療法としてインプラント治療が注目を浴びている。また、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。このような治療法において、インプラントの埋入位置や長さ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も大変重要である。しかし、そのような観点からの研究は少ないのが現状である。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、FEAによるインプラント解析は一部行われているものの、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次元有限要素解析(3D-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。

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モデルを構築しインプラント解析へ応用することを目的として、標準的なヒト頭蓋骨の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、歯についてもCT画像よりモデル化を行い、人工的に歯根膜を導入することで歯を含む下顎骨モデルについても構築を試みた。次に、前述の下顎骨モデルに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物を装着したオール・オン4を模擬したFEAモデルを構築した。実際の下顎骨に即した境界条件を設定し応力解析を行うことで、インプラント、補綴物および下顎骨について力学的検証を行うことを目的としている。

## 2. 下顎骨モデルの構築

標準的なヒト頭蓋骨の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が施してある。ソフトウェアの性質上、着目する部分の外周しか抽出できないため、まず緻密骨について輪郭を抽出し3次元の表面点群データを得た。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。Fig.1 に作成した下顎骨モデル (緻密骨のみ) を示す。以上の作業を下顎骨の海綿骨についてもを行い、緻密骨と海綿骨モデルを組み合わせることで、実際の下顎骨の形状を模擬する2層構造のモデルを構築した。3D-下顎骨モデルの断面形状を Fig.2 に示す。

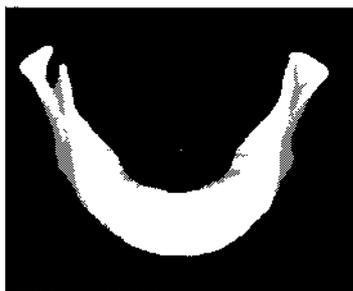


Fig. 1 3D-model of mandible.

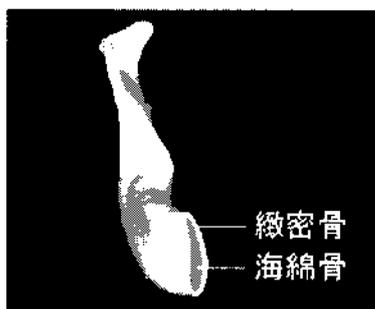


Fig.2 Cross-section of mandibular model.



Fig.3 Mandibular model with implants.

## 3. FEA インプラントモデルの構築と応力解析

下顎骨に埋入するインプラントは直径 4mm、長さ 20mm のシリンダー型とした。このインプラントを Fig.1 に示した下顎骨モデルの臼歯部に 2 本、前歯部に 2 本埋入した。ただし、臼歯部の 2 本のインプラントに関してはおよそ 45° の傾斜角をつけて埋入した。また、固定式補綴物に関しては顎骨を参考に作成した。4 本のインプラントを下顎無歯顎モデルに埋入して作成したオール・オン4モデルを Fig.3 に示す。

境界条件としては、骨体に働く筋力として 4 種類の筋群の作用を考えた。咀嚼筋の作用方向、各歯

列に加わる反力は元の CT 画像および、伊能らによる一連の研究を参考にした。なお、咀嚼筋の力による下顎頭まわりのモーメントと歯列の力による下顎頭まわりのモーメントがつりあうように設定してある。また、拘束を与えた下顎頭の一節点に応力が集中するのを避けるため、下顎頭に加わる反力を計算し、固定式補綴物の表面下に分散荷重として与えている。設定した境界条件を Fig.4 に示す。

用いた要素は 4 節点 4 面体要素であり、要素数は 51657、節点数は 16487 である (Fig.5)。今回の解析では緻密骨、海綿骨、インプラントおよび固定式補綴物はすべて線形弾性体とし Table1 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みなした。

解析結果の一例として、ミーゼス相当応力分布図を Fig.6 に示す。今回の解析モデルでは、前歯部に埋入したインプラントよりは臼歯部に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見られた (Fig.6(b)の矢印)。このような高応力の発生がインプラントの緩み等に関連することが考えられる。骨吸収等のモデルを組み込んだ FEA 解析は今後の検討課題としたい。

Table 1 Material properties for FEA.

材 料	ヤング率(GPa)	ポアソン比
緻密骨	17.2	0.3
海綿骨	0.35	0.3
インプラント	124	0.3
固定式補綴物	10	0.3

#### 4. まとめ

下顎無歯顎症の治療法のひとつであるオール・オン4の FEA モデルの構築を目的として、標準的なヒト頭蓋骨の CT 画像を基に下顎骨の 3D モデルを作成した。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、固定式補綴物モデルを組み合わせることで、オール・オン4のモデルを構築した。下顎骨に働く筋力を想定した境界条件を設定し、応力解析を行った結果、臼歯部に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。

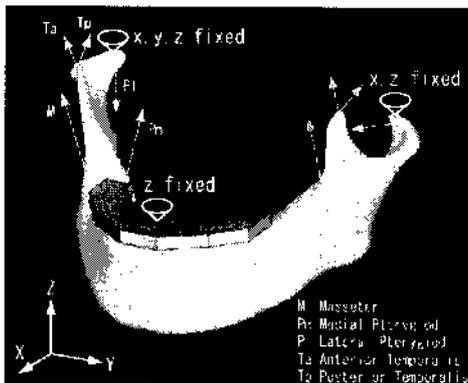


Fig.4 Boundary conditions for FEA.

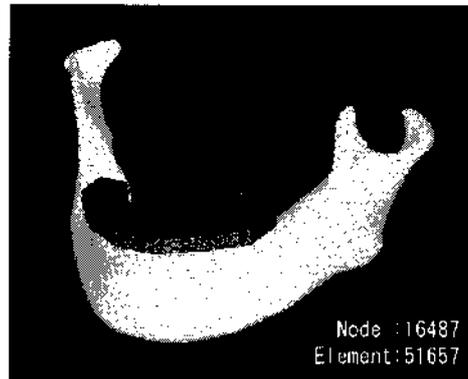
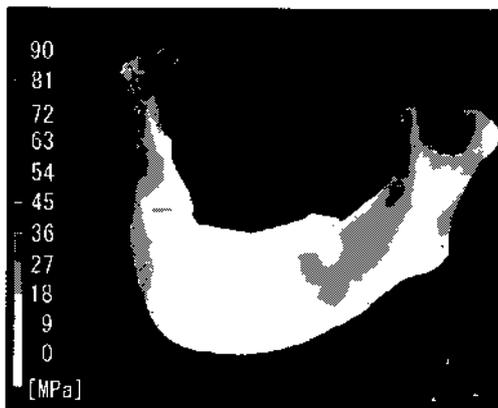
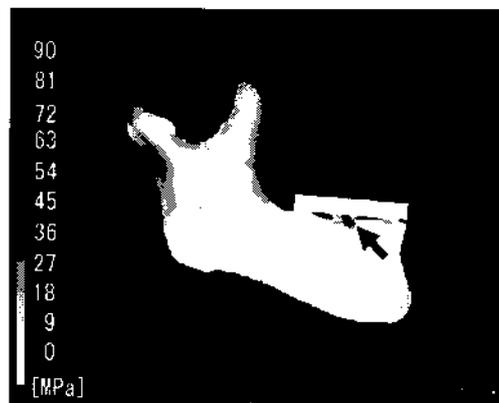


Fig.5 Finite element mesh.



(a)



(b)

Fig. 6 Mises equivalent stress distribution.

#### 研究組織

研究代表者：松下恭之(九大歯学)，所内世話人：東藤 貢，研究協力者：入江皓平(九大院)

# 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り、平成17年度には回流水槽においてダリウス形水車の実験を行ってきた。実験では、1枚翼、2枚翼、3枚翼のダリウス形水車をモーターで回転させ、トルク計によって水車のトルクを計測した。そして、水車のパワー係数を求め、水車の性能を評価した。それらを、ダリウス形風車の実験結果と比較したところ、回流水槽でのパワー係数は3割ほど高くなっていた。その原因としてまず考えられるのは回流水槽の断面積に比較して模型寸法が大きすぎる時に現れるブロッケージの影響である。ただし、回流水槽の計測部は幅1.5m、水深1.2mであり、水車は直径0.6m、スパン長0.6mであるので、断面積比は5であり、ブロッケージ影響は小さいと思われた。しかし、パワー係数で3割の違いは無視できないので、ブロッケージ影響を無視できる大型水槽での実験を行い、結果を比較すれば回流水槽実験の評価が可能となる。このことを確かめること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。実験日程の都合上、2枚翼と3枚翼の水車について実験を行った。翼断面は、翼弦長が0.08mのNACA0018(以後、対称翼)と翼弦長を0.1mとし、円弧キャンバーをつけたもの(以後、円弧翼)の2種類を用いた。曳航速度は0.5m/sと1m/sとしたが、標準速度は1m/sを採用した。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。

## ● 実験結果

図1は、円弧翼の起動トルクの実験結果であり、2枚翼の起動トルクとそれを角度で120度および240度ずらして足し合わせた6枚翼の計算結果を翼角に対してプロットした。つまり、2枚翼を3段にした水車の起動トルクに等しい。2枚翼の起動トルクはある角度で負の値をとるが、6枚翼では全周で0を取る所がないことが分かる。

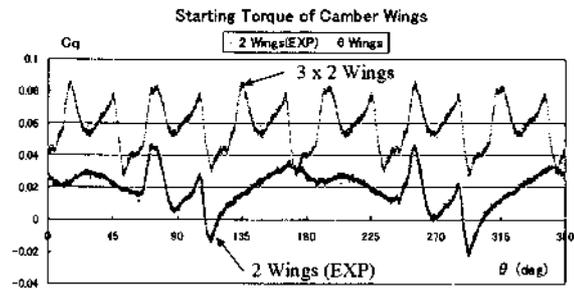


図1 円弧翼の起動トルク (2翼と2翼3段の比較)

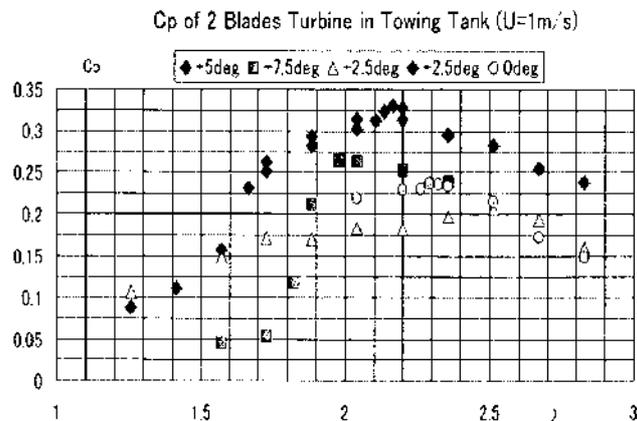


図2 2枚円弧翼水車のパワー係数

図2は、2枚円弧翼水車のパワー係数であり、5種類の翼の取付け角について比較した。この結果から2枚翼では取付け角によってパワー係数がかなり変化すること、最高効率は周速比が2.2付近であることなどが分かる。

図3は、周速比が2.2におけるパワー係数を翼取付け角に対してプロットしたもので、5点を使って多項式近似すると、最大値は3.5°であることが分かる。

図4は、回流水槽と曳航水槽における2枚円弧翼のパワー係数を比較したものである。翼取付け角は0°と+5°である。0°については、回流水槽の結果が一般に曳航水槽の結果を大きく上回っていること、しかし、+5°については $\lambda=1.5\sim 2.0$ まで両者はほとんど同じになっていることが分かる。 $\lambda=+5^\circ$ の結果から回流水槽のプロローグ影響は大きくないと結論できる。 $\lambda=0^\circ$ に現れた両水槽の違いは、水槽幅の影響ではなく、一様流の乱れの影響などによるものと考えられるが、更に他の原因についても検討を要する。

● まとめ

以上の実験結果により以下の結論を得た。

- ・翼の取付け角は、水車性能において重要である。2枚円弧翼では周速比が2.2で最適取付け角は+2.5°である。
- ・回流水槽においてパワー係数が大きくなる原因はプロローグ影響ではなく、一様流の乱れ強さが曳航水槽とは異なるためと思われるが、これについては更なる検証が必要である。

以上の実験結果を受けて、図5のように実海域実験用に直径2m、スパン長1mの2翼3段のダリウス形水車を製作し、平成18年11月20日に現場に設置した。現在、実海域で実験中である。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括  
若濱久敬 九大・総理工 M2 実験解析

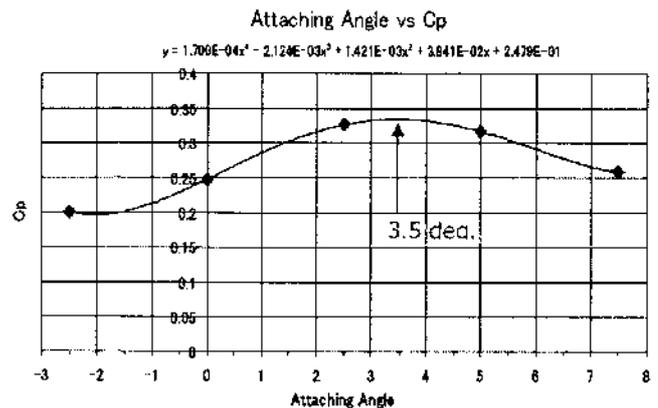


図3 取付け角による円弧翼のパワー係数 ( $\lambda=2.2$ )

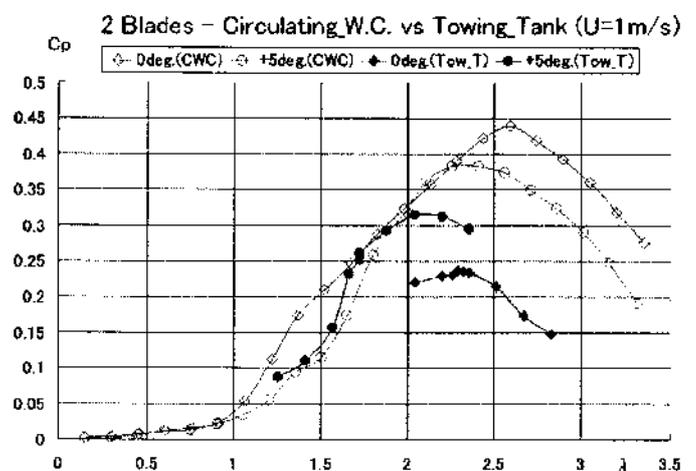


図4 回流水槽と曳航水槽におけるパワー係数の比較 (2枚円弧翼)



図5 2翼3段実海域水車 (直径2m、高さ3m)

# 機能性化合物半導体の結晶成長と成長時の融液流動解析

宮崎大学 工学部 電気電子工学科 吉野 賢二、木下 綾、野元 恵太

## 1. 序論

I-III-VI<sub>2</sub> 族カルコパイライト型半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、バンド端より大きい光エネルギーに対して吸収係数が大きいので、太陽電池吸収層として期待されている。中でも CuInGaSe<sub>2</sub> 太陽電池については広く研究されており、変換効率 19.5% という報告もある<sup>1)</sup>。CuInS<sub>2</sub> は禁制帯幅 1.5 eV を持ち、太陽光スペクトルの強い波長領域に対応し、また、光の吸収係数は 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup> 程度であることから、太陽電池の吸収層として期待できる材料である<sup>2)</sup>。我々は、これまでに 22.5 MPa の高圧下で、成長温度を 400~700°C まで変化させ、CuInS<sub>2</sub> の融点である 1050°C よりもはるかに低温である 700°C で CuInS<sub>2</sub> バルク結晶を得ることに成功した<sup>3)</sup>。

本研究では Cu/In の比を変えて CuInS<sub>2</sub> バルク結晶を作成し、太陽電池作成のための電気的物性を調べることを目的とした。

## 2. 実験方法

CuInS<sub>2</sub> バルク結晶をホットプレス法を用いて育成するために、粉末二元系材料 Cu<sub>2</sub>S(99.9%)、In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>(99.99%)を用いて、Cu/In の比が 0.6~1.5 となるようにそれぞれ混合させた。化学量論的組成の場合は、基本的に以下の化学式が成り立つと考えられる。



ホットプレス法は、加圧形成を高温で行い、形成と焼結を同時に進行させるものである。原料の Cu<sub>2</sub>S と In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> は今回の成長温度 400~700 °C では固体のため、室温で粉末同士を接触させても反応することはないが、融点以下の高温に加熱すると、イオンや原子が結合を断ち切って動き始め、固相焼結が起こる。焼結の過程をモデル的に図解すると図 1 のようになる。まず、(a) のような形成形態を拡散が十分に起こる高温になれば、(b),(c) を経て (d) のような単結晶粒子となる。焼結過程においては、表面自由エネルギー最小状態へ変化する過程で粒子間隙の空孔の消滅が起こり、その過程は初期段階での粒子接点におけるネックの成長に基づく焼結体の大きな収縮に伴う緻密過程、次いで中間段階での粒成長を伴う課程における孤立した空孔形態で、中間段階の円筒形空孔は単調に収縮して緻密化が進行し、粒子の接する角に存在する空孔が完全に消えたとき、焼結体は理論密度に到達する。いずれの段階でも何らかの物質移動が起こる。物質移動の機構としては、①蒸発・凝縮、②体積拡散、③粒界拡散、④表面拡散、⑤粘性流動、⑥塑性流動の各機構が考えられる。

試料はカーボンダイスに原料を充填し、Ar-5%<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 雰囲気中で、設定温度 700 °C、圧力 25 MPa、焼成時間 1 時間で CuInS<sub>2</sub> バルク結晶を育成させた。育成後研磨を行い、カーボン箔を除去した。ホットプレス法は、真空を必要とせず、大気中で低温かつ短時間で結晶成長ができるという利点がある。評価として、X線回折によって格子定数と粒径を求め、比重測定から密度を求めた。また断面の SEM 写真を取り、電子プローブマイクロ分析 (EPMA) により組成を行い、サーモプローブ測定により伝導型、四探針法により抵抗率を測定した。

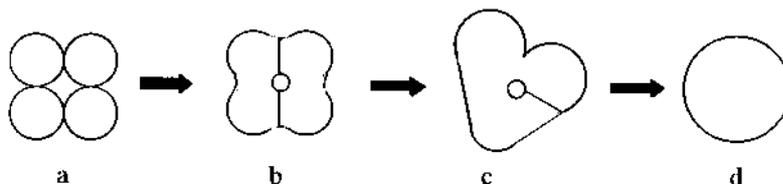


図 1 粒子の焼結過程モデル

### 3. 結果と考察

図2に、25 MPa、700 °C、Cu/In=8/12~12/8 で、ホットプレス法によって作成した  $\text{CuInS}_2$  バルク結晶を示す。作成した試料はカーボンダイスの形状により、直径 20 mm、厚さは約 2~3 mm の円柱状であった。融液成長法やブリッジマン法等の方法と比べ、ひびや穴は見られず、比較的きれいなバルク結晶であった。In-rich になる程黒く光沢はなく、Cu-rich になる程光沢が観測されるようになった。

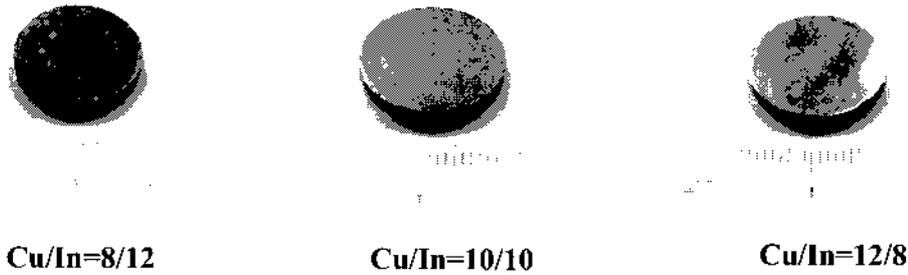


図2 samples(25MPa、700°C)

図3にX線回折の実験結果を示す。 $\text{CuInS}_2$  と  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  の JCPDS データも示す。多数のピークが観測されたことより、全ての試料が多結晶であることを示している。In-rich である Cu/In=8/12~9.5/10.5 において  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  の異相がみられた。しかしながら、Cu/In 比を増加させるにしたがって、この異相は減少し、ストイキオメトリーで  $\text{CuInS}_2$  の単相が得られた。Cu-rich の試料においても異相は観測されず、 $\text{CuInS}_2$  の単相が得られた。したがってCu-rich において式(1)が促進され、 $\text{CuInS}_2$  が作成された。Cu-rich で異相がなくなるという傾向は、スパッタ法やスプレー法で作成された試料でも報告されている<sup>4,6)</sup>。

X線回折から求めた格子定数は、Cu/In=1.1 付近で JCPDS の値に最も近くなり、その前後で In-rich では JCPDS より小さくなり、Cu-rich では JCPDS より大きくなった。In-rich で格子定数が小さいのは、異相が観測されたことにより、立方晶の  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  の影響が考えられる。特に  $c$  軸では  $a$  軸に比べその影響が強くみられた。Cu/In の比を増加させるにしたがって、格子定数は増加した。これらは格子間原子の増加によるものと考えられる。移動ヒーター法 (THM) によって作成された単結晶<sup>7)</sup>と比較すると  $a$  軸は小さく、 $c$  軸は大きい傾向を示した。

X線回折から求めた粒径は、In-rich から Cu-rich になるにしたがって、粒径は増加している。In-rich、Cu-rich で粒径が異なる理由として、Cu 原子が粒界の成長を促進させた、または、In 原子または異相が粒界の成長を妨げたということが考えられる。スプレー法によって作成された試料でも同様の結果が得られている<sup>6)</sup>。

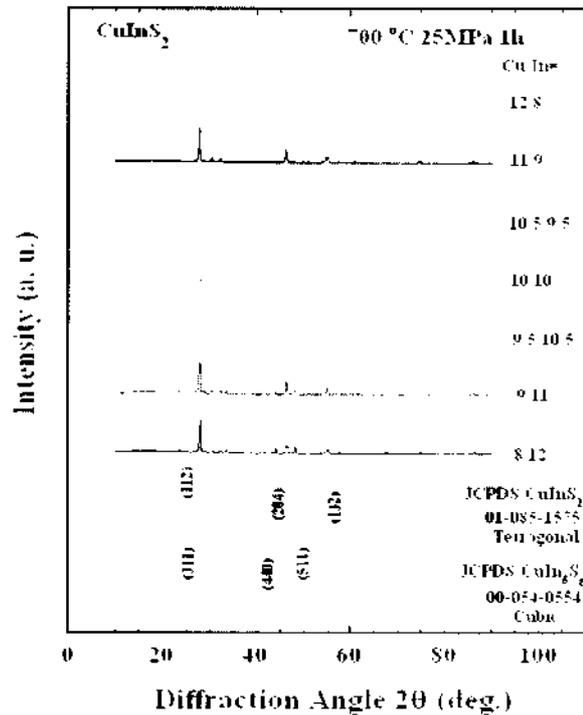


図3 XRD patterns

EPMA ではすべての試料で S-poor、Cu-rich、In-rich となった。しかし、 $[[\text{Cu}]-[\text{In}]]$  に対する S 原子空孔の割合は、Cu/In=12/8, 11/9 の試料では $[[\text{Cu}]-[\text{In}]]$ が支配的となり、Cu/In=10.5/9.5, 10/10 の試料では S 原子空孔が支配的となり、同じ Cu-rich の試料でも違いがみられた。サーモプローブ分析により、Cu-rich の試料で p 型、In-rich の試料で n 型を示した。EPMA の結果より、p 型伝導の起因の欠陥は、 $\text{Cu}_{\text{In}}$  で、n 型伝導の起因は、 $\text{V}_{\text{S}}, \text{In}_i, \text{In}_{\text{Cu}}$  が考えられる。

#### 4. 結論

粉末二元系材料  $\text{Cu}_2\text{S}$ 、 $\text{In}_2\text{S}_3$  を用いて、ホットプレス法により、 $\text{CuInS}_2$  バルク結晶を育成させた。Cu/In の比は 0.6~1.5 と変化させた。X 線回折の結果により、In-rich の試料で異相が観測された。一方で、ストイキオメトリー、Cu-rich の試料では  $\text{CuInS}_2$  の単相が得られた。Cu/In の比を増加させるにしたがって、格子定数、粒径は増加した。サーモプローブ分析により、Cu-rich の試料で p 型、In-rich の試料で n 型を示した。EPMA の結果により、p 型伝導の起因の欠陥は、 $\text{Cu}_{\text{In}}$  で、n 型伝導の起因は、 $\text{V}_{\text{S}}, \text{In}_i, \text{In}_{\text{Cu}}$  が考えられる。Cu/In の比を変えることによって、伝導型を変えることができた。

#### 5. 引用文献

- 1) M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, J. Keane, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, *Prog. Photov. Res. Appl.* **13**, 209 (2005).
- 2) J. Klaer, J. Bruns, R. Henninger, K. Siemer, R. Klenk, K. Ellmer and D. Bräunig, *Semicond. Sci. Technol.* **13**, 1456 (1998).
- 3) H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, *J. Crystal Growth* **236**, 256 (2002).
- 4) Y. Shi, Z. Jin, C. Li, H. An and J. Qiu, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 3737 (2006).
- 5) M. Krunk, V. Mikli, O. Bijakina and E. Mellikov, *Appl. Surf. Sci.*, **142**, 356 (1999).
- 6) M. Krunk, V. Mikli, O. Bijakina, H. Rebane, A. Mere, T. Varema and E. Mellikov, *Thin Solid Films*, **361**, 61 (2000).

### 1. 緒言

基板に電子部品を実装する場合、機械的特性、熱的特性の異なる異種材を接合するため、成形時及び運転時に定常または非定常な熱応力（熱残留応力）が発生する。この熱応力はしばしば接合部のはく離・損傷や、素子・部品の機能低下につながる有害な変形を生じる。最近の鉛フリーはんだの使用は、接合部の実装信頼性に対して新たな問題点を生んでいる。すなわち、鉛フリーはんだは濡れ性が悪く、ボイド、界面剥離、凝固割れ、あるいは金属間化合物の異常成長などの欠陥を生じ易い。またスーパーコンピュータの電子部品接合や高精度センサーのダイボンドやパッケージングに使用されている Au-Sn 系鉛フリーはんだの場合も、金属間化合物の抑制が課題になっている。現在、PVD-Au-Sn/Au/Pt/Ti の多層膜を使用して電子部品をマイクロ接合させる技術が一部実用化されている。本稿ではサンプル接合層のせん断試験と破壊表面の XRD 分析の結果について報告する。

### 2. 実験方法

せん断試験用のサンプルは、PVD-Au/Pt/Ti ( $t=0.3/0.2/0.1 \mu\text{m}$ ) の金属膜でメタライジングされた AlN セラミックス ( $L \times D \times t=1.3 \times 0.8 \times 0.3 \text{ mm}$ ) と Si 板 ( $3 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$ ) を、PVD-Au-Sn のはんだ膜 ( $1.3 \times 0.4 \text{ mm}$ ,  $t=3 \mu\text{m}$ ) を使用して約  $300^\circ\text{C}$  で接合させたものである。接合界面は Si 板/Ti/Pt/Au/Au-Sn はんだ/Au/Pt/Ti/AlN セラミックスである。PVD-Au-Sn のはんだ膜はメタライジング AlN セラミックス表面上にフォトレジスト法で蒸着されている。せん断試験は MTS 試験機を使用した。サンプルを高炭素鋼のスリットに差し込み、上から  $0.1 \text{ mm/min}$  の変位速度で押し、Au-Sn 接合層がせん断破壊するまでの荷重-変位データを PC に採取した。せん断破壊表面の金属間化合物の同定にはリガク XRD を使用した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 せん断試験用サンプル

図 1 (a) (b) (c) はせん断試験用のサンプルの光学写真とせん断の模式図である。(a) が接合を行う前のメタライジングされたセラミックス表面である。フォトレジスト法で蒸着した PVD-Au-Sn はんだ膜も観察される。(b) は Si 板とセラミックスを接合した後のサンプルである。破線から下の部分をスリットに差し込み (c) のせん断試験を行った。

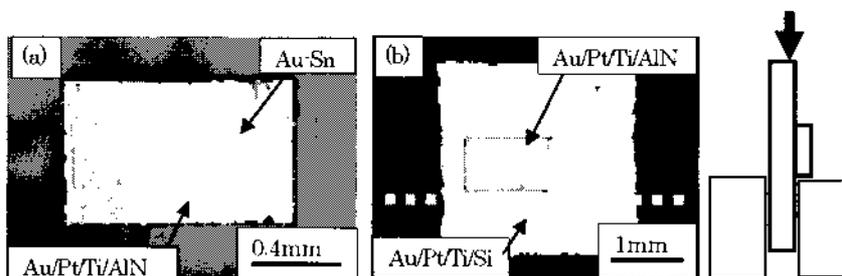


図 1 サンプルの光学写真と模式図 (a)接合前のセラミックス (b)接合後のサンプル (c)模式図

#### 3.2 せん断試験

図 2 (a) (b) はせん断応力-変位の線図である。ミクロに見ると値が上昇する途中に小さな変動が箇所が見られるが、この変動がき裂の進展とサンプルの塑性変形の主にどちらに対応しているかの判定は難しい。マクロに見るとせん断応力の最大値で破壊しているが、これは金属よりもセラミックスによく見られる傾向である。また、線図 (b) の方が破壊のせん断応力  $\tau$  の値は小さいが、しかし、せん断応力/変位の傾きは大きい。これは次の 3.3 項で述べるが、硬くて脆

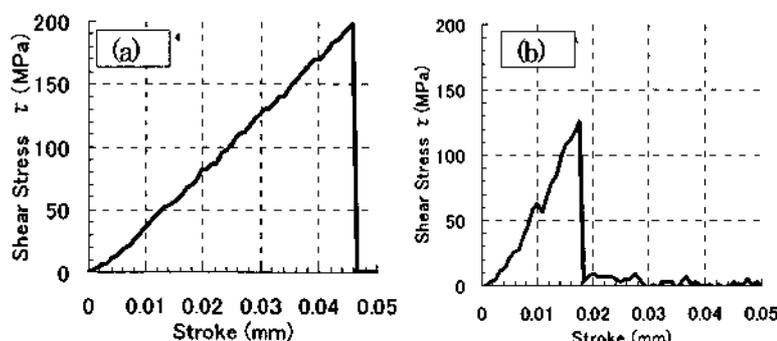


図 2 せん断応力-変位の線図 (a)破壊  $\tau$  値大 (b)破壊  $\tau$  値小

い金属間化合物を多く形成したためと思われる。

表1は今回のPVD-Au-Sn接合層のせん断強度 $\tau$ の値と、文献から引用したAu-20%Snはんだの引張強度 $\sigma$ の値の比較である。せん断強度 $\tau$ の平均の値は165MPaで、これは引張強度 $\sigma$ の値290MPaの約57%に相当する。純粋せん断と単純引張の応力状態を比較したトレスカ(Tresca)の条件のせん断降伏応力は引張降伏応力の約50%で、ミーゼス(von Mises)の条件のそれは約58%になることが知られている。今回のサンプルがAu-Sn系合金のほぼ本来の強度で接合されていたのが分かる。

PVD-Au-Sn 接合層のせん断強度 $\tau$ (MPa)	Au-20%Sn はんだの引張強度 $\sigma$ (MPa)	せん断強度 $\tau$ / 引張強度 $\sigma$ (%)
165 (130-200)	290	57(45-69)

### 3.3 破壊表面の観察

図3(a)(b)は接合層の破壊面の光学写真である。せん断試験で純粋せん断を生じさせるのは難しいが、今回のサンプルの接合層のほぼ全体がせん断で破壊されているのが分かる。破壊のせん断応力 $\tau$ の値が小さな方の面に、金属間化合物に特有な菱形の組織(写真(b)の矢印)が多く観察された。金属間化合物の形成がサンプル接合層のせん断強度の値を小さくしているのが分かる。

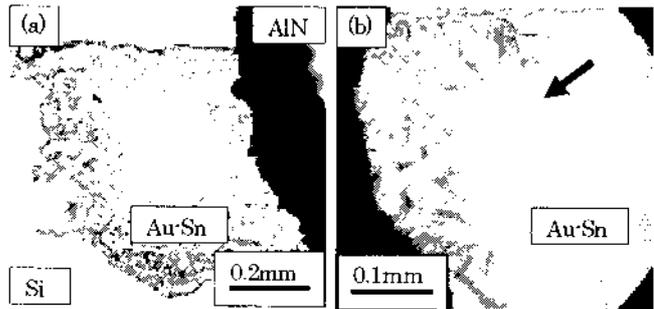


図3 破壊面の光学写真 (a)  $\tau = 200\text{MPa}$  面、(b)  $\tau = 130\text{MPa}$  面

### 3.4 XRD 分析

図4(a)(b)はXRD分析のプロファイルである。接合する前の(a)のプロファイルには、 $2\theta$ の角度が小さい方から金属のAuや金属間化合物の $\text{Au}_5\text{Sn}$ とAuSnの強いピークが現れる。しかし、接合した後のせん断破壊面(b)のプロファイルではAuSnのピークが弱くなっている。報告済みのEPMA分析から明らかのように、接合の際に、PVD-Au-Sn接合層の上部と下部のPVD-Au/Pt/Ti多層膜からAuとPtが拡散し、Au-Sn共晶反応による金属間化合物の形成を抑制したと思われる。

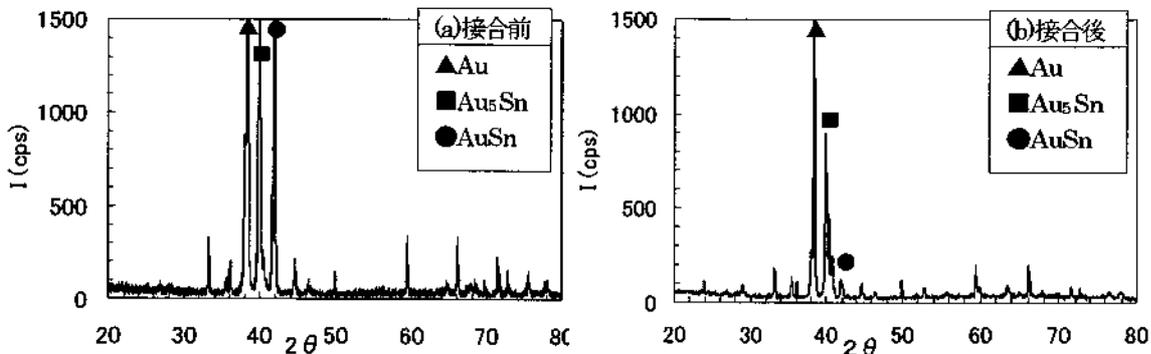


図4 XRD分析の結果 (a)接合する前サンプル数6個、(b)接合した後サンプル数5個

## 4. 研究成果報告

[1] 松原監壮, 黄木景二, 高雄善裕, 岡部永年, 電子部品マイクロ接合用はんだPVD-Au-Sn/Au/Pt/Tiの金属間化合物抑制機能, 表面技術協会第115回講演大会(2007).

## 5. 研究組織

研究代表者: 黄木景二, 所内世話人: 高雄善裕 (九州大学応用力学研究所)

## 6. 謝辞

本共同研究にあたって全面的に協力をしてくださいました九州大学応用力学研究所松原監壮氏に感謝いたします。

# 太陽電池用高品質バルク多結晶シリコン成長に関する研究

大下祥雄

豊田工業大学 半導体研究室

## 1. はじめに

近年、太陽電池生産量は急速な伸びを示しており(図1)、2005年度の生産量は1.7GWに至っている[1]。その中で、結晶シリコン太陽電池の生産量は太陽電池総生産量の90%以上を占めている。特に、多結晶シリコン太陽電池の比率は総生産量の60%であり、2030年における日本の総電力需要の10%を太陽電池で担うという目標を実現するには、基板材料である多結晶シリコンのさらなる品質向上やコスト低減が必須な状況にある。

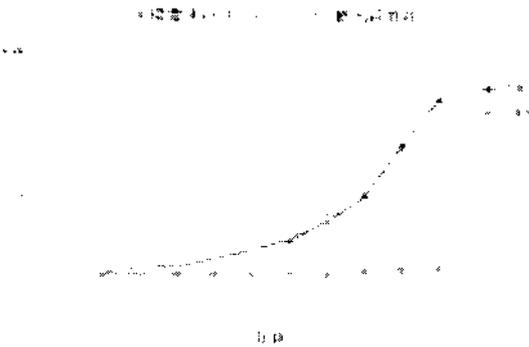


図1 太陽電池市場

一方、結晶シリコン太陽電池の生産量拡大に伴い、原料シリコンが不足する問題が生じている。原料の需給バランス改善には、今後数年を要すると予想されている。また、今後の市場拡大に対しては、従来の高純度原料のみでの対応は難しく、低品位原料を用いた太陽電池の製造が必要となると考えられる。

このような状況のもと、コスト低減、高効率化、原料不足への対応、などを目的として、単位発電量あたりのシリコン使用量の削減(図2)、すなわちシリコン結晶基板の薄型化が進められている。具体的には、将来において、50 $\mu$ m以下の極薄シリコン基板を用い、25%の高変換効率を有した太陽電池を実用化することが目標となっている。この目標を達成するには、1) 間接遷移型の半導体であるシリコン結晶において、入射した光を効率よく吸収させる、2) 少数キャリアの界面での再結合を抑制する、

3) 基板の機械的強度を上げる、4) 薄型基板のハンドリング技術の開発、など多くの技術課題が存在する。加えて、シリコン原料供給の観点からは、5) 低品位原料からの高品質結晶成長技術、の開発が重要である。

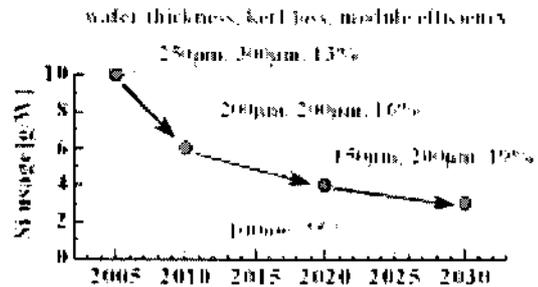


図2 極薄化による低シリコン消費の実現

多結晶シリコン太陽電池の変換効率向上を議論する上で最も重要な事項は、粒界そのものよりもむしろ、多結晶シリコン中に含まれる  $5 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{16}$  atoms/cm<sup>3</sup> 程度の鉄、結晶成長時の雰囲気から混入する  $10^{17} \sim 10^{18}$  atoms/cm<sup>3</sup> 程度の酸素ならびに  $10^{17} \sim 10^{18}$  atoms/cm<sup>3</sup> 程度の炭素、転移などの結晶欠陥、格子間シリコンや空孔などの点欠陥、ならびにそれらの複合体である。また、多結晶シリコンプロセス中に生じる、酸素析出、ゲッターリング、不純物拡散などは、多結晶シリコンの電気的特性に大きな影響を与える。それゆえ、多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、これら欠陥ならびに不純物が複合した複雑な欠陥構造、さらには、それらに与える多結晶シリコン太陽電池プロセスの影響を明らかにする必要がある。特に、先に述べたように原料の品質が低下した場合には、上記が原因となる結晶性の劣化の問題がより顕著に現れることが予想される。それゆえ、それら不純物が結晶成長やデバイスに与える影響を詳細に調べる必要がある。

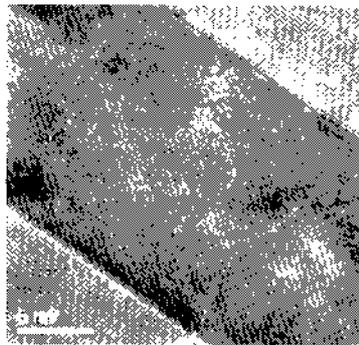
以上に述べたような状況において、資源量や信頼性などの観点から、結晶シリコン太陽電池に関する研究開発は以前にまして

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。

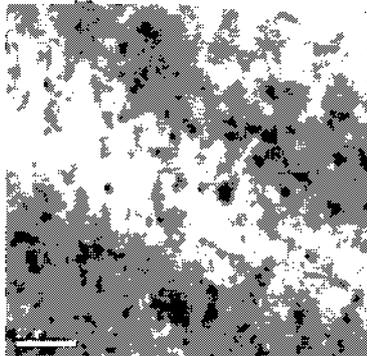
## 2. 多結晶シリコン

### 2-1: 結晶評価

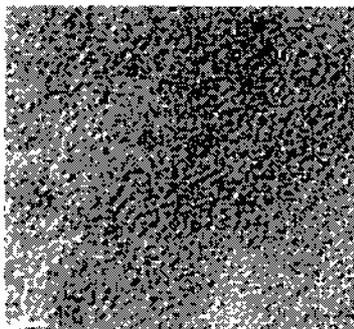
多結晶シリコンにおいては、粒界に加えて結晶欠陥が再結合中心として働く。これまでは、少数キャリア寿命を長くすることを目的として、粒径の拡大が図られてきた。その結果、p型半導体における少数キャリアである電子の拡散長と比較し、キャスト法で成長させた現在の多結晶シリコンの粒



(a)



(b)



(c)

図3 断面 TEM 像：結晶欠陥

径は十分に大きく、粒界よりも結晶欠陥が平均的なキャリア寿命を決定するに至っている。昨年度までの研究の結果、それら欠陥生成には結晶成長中に析出した炭化珪素が深く関与している可能性が高いこと、また、結晶成長後に固相中を拡散する鉄がそれら欠陥にトラップされ再結合中心となっている可能性があることなどが、実験ならびに九州大学におけるシミュレーションの結果から明らかになっている。

しかし、エッチングによりピットとして現れる欠陥の構造は明らかではなく、その構造、さらにはそれら欠陥が形成される理由を明らかにする必要がある。そこで現在、透過型電子顕微鏡(TEM)観察、Spring-8のSOR光を用いた鉄を中心とした XANES 測定ならびに炭素や酸素に関する IR 測定、PL 観察などにより欠陥構造の解明を進めている。

これまでに得られた TEM 像の一部を図3に示す。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(a)、それら転位の集合体(b)、非晶質に近い領域(c)、などが観測されている。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と考えている。

一方、キャスト法により成長させた多結晶シリコン中には、時には  $10^{13}$  個/cm<sup>3</sup> を超える多くの鉄が含まれている。それら鉄のいくらかは結晶欠陥にトラップされ電氣的に悪影響を与えることが予想される。それらの多くは、結晶成長が終了した後、結晶の冷却時に固相中を拡散していることが九州大学柿本研究室のシミュレーションから明らかになっている。すなわち、太陽電池特性を向上させるには、欠陥構造に加え、結晶中のこれら鉄の分布とその電子状態を明らかにすることが重要である。これまでの XANES の測定等からは、特定の場所における鉄の偏析やその電子状態に関する情報が得られつつある[2]。また、PL 測定からは、先の TEM により観察された欠陥よりも大きな構造を有し、再結合中心として働く欠陥の存在が確認されている[3]。それら欠陥の低温 PL 測定では、いわゆる D ラインが観測され、再結合中心として働く欠陥の一部が、転位と鉄の複合欠陥である可能性が示唆されている。

## 2-2: 多結晶シリコン成長技術

結晶中の欠陥評価の結果、特定の領域に生じた析出物が原因となり、結晶欠陥が形成された可能性が高いことが示された。一方、キャスト法による結晶成長の実験では、成長速度が速い場合に、成長の後半で欠陥を多く含む微小結晶粒が形成された。また、結晶全体に渡り固溶限程度の格子位置炭素が存在するとともに、微小結晶粒が形成された領域では SiC の析出が観測された (図 4)。

以上の結果から、欠陥形成の原因として次の可能性が考えられる。キャスト法による結晶成長時においては、融液中には多くの炭素原子が存在する。結晶成長に伴い、固液界面近傍の融液側の炭素濃度は偏析により上昇する。その結果、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し、最終的に SiC の析出が生じた。



図 4 EDS 像 : SiC の析出

融液中の炭素による組成的過冷却が、SiC を析出させ結晶性が劣化させた原因である可能性を確認するため、次の成長を試みた。最初に、ヒーターを上昇させてある程度結晶を成長させた後、再度ヒーターを下方に移動させて成長した結晶の一部を再度融解させ、固液界面近傍の炭素濃度を低下させる。以上のことを繰り返して結晶を成長さ

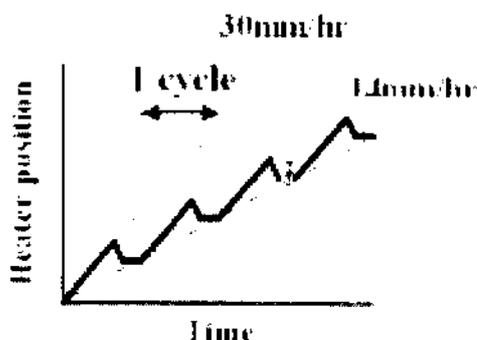


図 5 Growth-Remelt-Cycle (GRC) 法

大きな結晶粒 Top

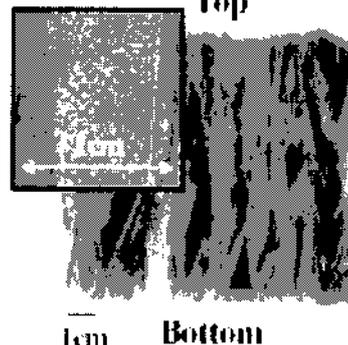


図 6 GRC 法により成長させたインゴット

せた (GRC 法 : 図 5)。その結果、微小結晶粒の発生が抑制され、粒径の大きな結晶が成長した (図 6)。

以上の欠陥評価ならびに結晶成長実験の結果から、結晶性が劣化する理由の一つが、組成的過冷却による SiC の析出である可能性が示された。しかし、熱勾配に加えて、結晶方位や欠陥など他の因子が、局所的な過冷却に与える影響は明らかではない。今後結晶成長過程をより明らかにし、高品質な結晶成長技術の実現を目指す。

## 3. まとめ

実験ならびにシミュレーションの結果から、固液界面近傍における過冷却状態が結晶性を劣化させている可能性が示された。具体的には、融液中に多く含まれる炭素が固液界面近傍で析出し、それが結晶欠陥発生の原因となっている可能性が高い。そこで新たに GRC 法開発し結晶性が改善できることを示した。

今後、現在進めている九州大学との共同研究をさらに深め、将来における高効率・低コスト結晶シリコン太陽電池の実現を目指す。

## 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。

## 参考文献

- [1] PV News, Vol. 25 (No. 3), (2006)
- [2] K. Arafune, E. Ohishi, H. Sai, Y. Terada, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys., **45**(8A) (2006) 6153.
- [3] H. Sugimoto, M. Inoue, M. Tajima, A. Ogura, and Y. Ohshita, Jpn. J. Appl. Phys., **45**(25) (2006) L641.

# レーザー誘起衝撃波の医療応用に関する破壊力学的検討

豊橋技術科学大学 鈴木新一

## 1. 研究の背景と目的

近年、体内結石の治療には、水中衝撃波による結石の破砕が用いられている。この方法は、パルス放電、ピエゾ素子などにより発生した水中衝撃波を体内の結石に集束して破砕するものであり、手術なしに治療できる特長をもつ。しかし、実際の治療においては、衝撃波が周辺臓器に損傷を与える問題があり、その解決が必要である。

衝撃波が周辺臓器を損傷する力学的機構は、未だ十分には明らかでないが、損傷を低減する方策がいくつか考えられている。そのひとつに、擬似位相共役衝撃波の方法がある。

衝撃波による結石の破砕治療では、結石に向かって集束する球面衝撃波を体外から入射する。しかし、人体には脂肪や筋肉など、音速の異なる組織が存在するため、異なる方向から入射した衝撃波は、結石に同時には到達しない。そのため、結石に加えられる衝撃力が低下し、効果的な結石破砕に繋がっていないのではないかと指摘されている。

この問題を解決するための方法のひとつとして、筆者らは、レーザー誘起衝撃波を用い、体内の音速分布に合わせて衝撃波の波面をあらかじめ変形させる方法（擬似位相共役法）を提案している。

本研究では、円筒凹面にパルスレーザー光を照射し、円筒中心軸に向かって集束する衝撃波を発生させる。発生した衝撃波をシャドウグラフ法で可視化し、集束衝撃波の圧力波形を測定する。また、得られた圧力波形を、破壊力学的観点から検討する。

## 2. レーザー誘起水中集束衝撃波

図1に示すように、多数の薄い金属板を積層し、その薄板をスライドすることにより、積層版の端面を円筒形にする。したがって、円筒面は、階段状の段差から構成されている。この積層版を水中に設置し、円筒面にパルスレーザー光を照射する。レーザー光は円筒表面で吸収され、表面近傍の水と固体を瞬間的に加熱する。瞬間的な加熱による体積膨張の結果、水中には衝撃波が発生する。レーザー誘起衝撃波は、発生した固体表面と同じ形状を持ち、且つ、固体表面に直角な方向に伝播する。したがって、円筒凹面で発生した衝撃波は、円筒中心軸に向かって集束する。

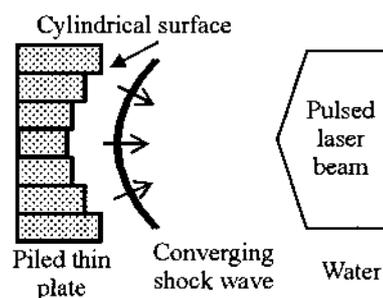


Fig. 1. Generation of laser induced cylindrical shock wave.

## 3. 衝撃波の可視化

レーザー誘起衝撃波のシャドウグラフ写真を図2に示す。図2(a)は、パルスレーザー照射から0.84μs後の写真である。写真中の左側に見える黒い部分が薄板で構成された円筒面である。薄板一枚々々から発生した円筒形の要素衝撃波の包絡線として円筒中心軸に集束する衝撃波が現れている。図2(b)は、衝撃波が円筒中心軸に集束した瞬間を示している。

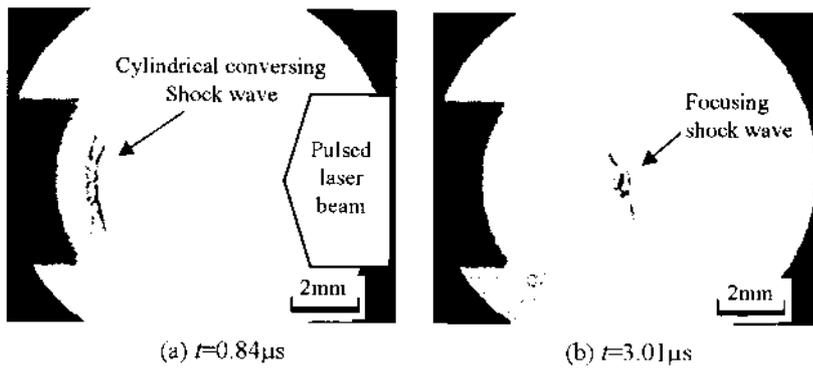


Fig. 2. Laser induced cylindrical shock wave.

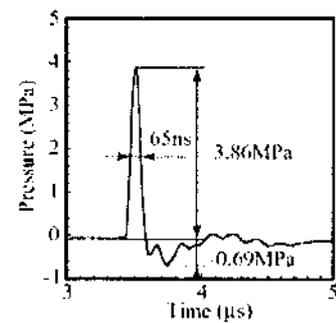


Fig. 3 Pressure of focusing laser induced cylindrical shock wave.

#### 4. 集束衝撃波の圧力波形

レーザー誘起衝撃波が、円筒中心軸に集束したときの圧力波形を図3に示す。横軸は、パルスレーザー照射からの時間である。衝撃波の圧力波形は、正圧の部分と負圧の部分から構成されている。最初に正の圧力領域が到達し、その背後に負の圧力領域が現れる。正の圧力の半値幅は 65ns であり、パルスレーザー光の半値幅 30ns より長い。負の圧力の半値幅は、約 200ns である。正の圧力の最大値は、負の圧力の最大値の約 5.6 倍大きい。

#### 5. 破壊力学的検討と結論

レーザー誘起衝撃波の有効性： 図2からも明らかなように、レーザー誘起衝撃波の方法は、レーザー光が照射される固体表面と同じ形の波面を持つ衝撃波を発生させることが出来る。したがって、薄板をスライドさせることにより、任意形状の波面を持つ衝撃波を発生させることが出来る。これは擬位相共役法に適した方法であり、結石に強い衝撃力を付加することが可能である。

き裂分岐の発生： 固体材料に衝撃的に力が加わると、秒速数百m以上の高速で進展するき裂が発生することがある。き裂速度が十分速いとき、き裂は突然2つに分岐することが知られている。結石に強い衝撃力を負荷し、結石内部でき裂を分岐させることが出来れば、結石をより細かく破碎することが出来る。これにより、より効果的な治療に繋がる可能性がある。

インキュベーション時間仮説から反論： 図3に示すように、レーザー誘起衝撃波の半値幅は、65ns と短い。動的破壊力学におけるインキュベーション時間仮説は、衝撃力の持続時間が短くなるにつれて、より高い破壊応力が必要になることを主張する。これは、レーザー誘起衝撃波の場合、より強い衝撃力が要求されることを意味する。しかし、インキュベーション時間仮説の正当性は、未だ立証されていない。

#### 6. 成果の公表

日本機械学会へ投稿準備中

#### 7. 研究組織

研究代表者	鈴木新一	豊橋技術科学大学 機械システム工学系
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
研究協力者	森田康之	九州大学応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野

# 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

滑面の平板上に発達する乱流境界層は、カノニカルな流れ場の1つであり、従来から多くの研究対象となってきた。特に、平均速度プロファイル型（普遍速度分布）をめぐる論争は、依然として混沌としており明確な指標は得られていない。普遍速度分布を定める際には、物理量を摩擦速度と動粘性係数によって無次元化するが、そのためには壁面での摩擦応力の計測が不可欠となる。工学の分野では、Schoenherr と Karman が70年ほど前に独自に導いた半理論式（以降、KS式と略す）が広く用いられてきた[1]。しかし近年、測定技術の進歩に伴う精度の向上から、計測値はKS式との間に約5%の相違があることを報告している[2]。本研究では、Schoenherr がおこなった実験を再度ふりかえり、高精度の計測機器を用いることで、測定精度の改善を試みることを目的とする。

## 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5kg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3m×1m×0.03mで製作し、前縁は半楕円形（10:1）とした。平板Aは木製、平板Bはアルミ製（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70mmH<sub>2</sub>O）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2m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。

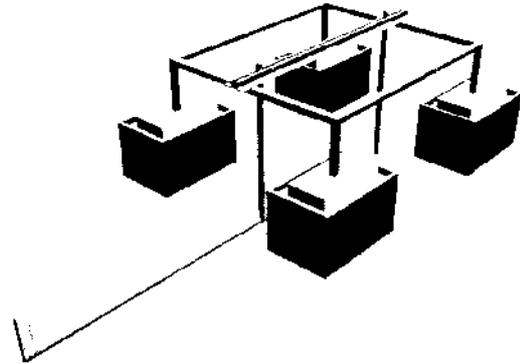


図1 平板及びフロート部、先端がロードセル

## 3. 結果及び考察

測定される全抗力には、平板の抗力のみならず、(a)造波抵抗、(b)粘性圧力抵抗（渦抵抗、剥離抵抗）、(c)トリッピングワイヤ抵抗、(d)自由表面抵抗などが含まれる。喫水深さ $h$ における全抗力（測定値）を $F(h)$ とすると、曳航速度が一定の場合には、便宜的に

$$F(h) = F^*(h) + F_D(h) = F^*(h) + F_a(h) + F_b(h) + F_c(h) + F_d(h) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $F^*(h)$ は真の平板抗力であり、 $F_D(h)$ には(a)~(d)の抗力が含まれている。しかし、両者を明快に分離することは難しく、幾つかの試行錯誤の結果を以下にまとめる。

図2はトリッピングワイヤを設置しない場合の結果である。この状況では、平板先端から発達した層流境界層はある距離まで持続され、自然遷移を経て乱流となる。局所摩擦抵抗係数は、 $C_f = 0.455 / (\log Re)^{2.58} - A/Re$ と見積もられる。ここで、レイノルズ数 $Re$ は平板長さ $L$ と曳航速度に基づき計算され、 $A$ は遷移位置に関するパラメータである。仮に造波抵抗（ $F_a$ ）が喫水深さ $h$ に依存しないとすると、異なる喫水での全抵抗力を引き算することにより、その影響をキャンセルすることがで

きる。従って、粘性圧力抵抗 ( $F_b$ ) を軽減することによって真の抗力が計測できることになり、実験ではシャープエッジを平板後縁に取り付けて渦抵抗の軽減を試みた。比較のために Hughes による測定結果も載せた。両者とも理論式に傾向はよく一致している。

トリッピングワイヤを設置した場合には、測定される全抵抗にトリッピングワイヤによる抵抗 ( $F_c$ ) が加わることになる。議論を複雑にしないために、シャープエッジを取り付けて粘性圧力抵抗 ( $F_b$ ) の影響を無視できる場合について考える。つまり、測定される全抗力から  $F_a$  および  $F_c$  を精度よく除去できれば良いこととなる。いま、両者が独立で喫水深さに依存しないと仮定すると、 $h$  を変えて全抗力を計測すれば、その差から真の抗力  $F^*(h)$  を得ることができる。しかし、この方法を試みた結果、局所摩擦抵抗係数は、レイノルズ数  $Re$  が小さな場合には、K S 式や他の計測結果と同程度の一致を示すが、 $Re$  数が高く ( $> 4 \times 10^6$ ) になると傾向が異なってくるのがわかった。これは、トリッピングワイヤ自身が自由表面に波をつくり、平板による造波抵抗  $F_a$  と独立には扱えないためと考えられる。

薄い平板がつくる造波抵抗を見積もる方法として、Michell が考案した Thin Ship Theory がある [3]。この理論では幾つかの仮定が用いられているため、実測値とは定量的な一致は望めないが、定性的傾向は再現できると考えられている。トリッピングワイヤの抵抗に関しては、一様流中の円柱の抗力としてオーダーを見積もることが可能である。そこで、 $F_a$  を Thin Ship Theory から見積もり、 $F_c$  を円柱の抗力 (ただし、その定数  $\alpha$  倍) として見積もることにより、真の抗力  $F^*(h)$  を計算した。レイノルズ数  $Re$  が小さな場合には、 $F_a$  と  $F_c$  を独立と仮定でき、その際にもとまる抵抗係数の値が一致するように、定数  $\alpha$  倍を  $\alpha = 0.6$  と定めた。局所摩擦抵抗係数を図 3 に示す。全ての計測結果が Osaka から、Osterlund らの計測結果に定量的にもよく一致していることがわかる。

最後に粘性圧力抵抗  $F_b$  について考えたい。これは主に平板後縁でのカルマン渦の生成や剥離抵抗に起因していると考えている。平板後縁では、深さ方向に約 15cm 間隔で背面圧力を計測しているので、この値を用いて、 $F_b$  を算出した結果を図 4 に示す (ただし、造波抵抗は、喫水を変えた計測から補正をおこなった)。シャープエッジを取り付けた場合と比較すると明らかなように、背面圧力の直接計測に基づく補正は十分な精度を補償しないことが分かる。

#### 4. まとめ

平板抗力の計測にはフロートを用いた方法が有効である。平板後縁にはシャープエッジを取り付けることが不可欠であり、乱流への促進にはトリッピングワイヤを用いず、全抗力に加味されない方法で乱流遷移をおこなう必要がある。今後は、これらの点を踏まえ、平板をより軽量化して測定精度を向上させることを試みたい。

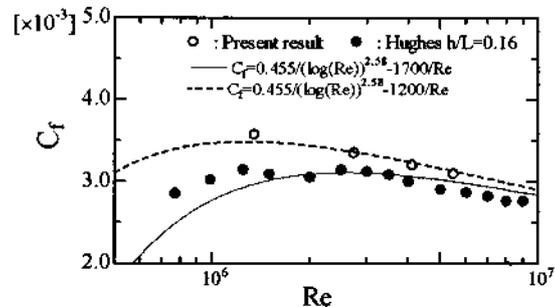


図 2 トリッピングワイヤを用いない場合の抵抗係数

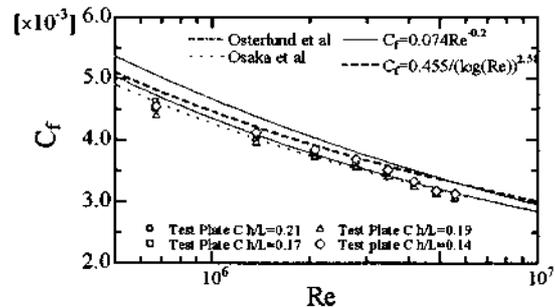


図 3 トリッピングワイヤを用いた場合の抵抗係数

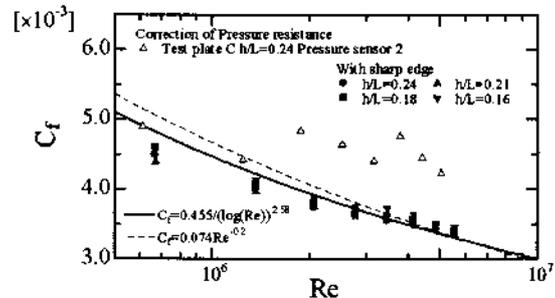


図 4 背面圧力補正とシャープエッジを取り付けた場合の比較

- [1] Schoenherr, K. E., 1932, Resistance of Flat Surfaces Moving through a Fluid, Trans. Soc. N. A and M. E., 279-313  
 [2] Hideo Osaka, Takatsugu Kameda, Shinsuke Mochizuki, 1996, Local Skin Friction Coefficient Evaluated by Direct Measurement Method and Mean Flow Quantities in a Turbulent Boundary layer, JSME Int. J. Fluids and Thermal Engineering, Series B, 138-145 [3] 柏木ノート、第 10 章定常造波抵抗理論 pp.302-370

# 人工関節とバイオメカニクス

研究代表者  
佐賀大学医学部 佛淵 孝夫

## 1. 序言

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

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

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

今回、昨年に引き続き、九州大学応用力学研究所研究集会「人工関節とバイオメカニクス」を開催できたことは感銘深いことである。研究集会開催に奔走いただいた東藤貢助教授はじめ遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます。

## 2. プログラム

開催日：2006年10月21日(土)

会場：全労済マルチビル天神ビル(福岡市)

10:00 開会の辞 佛淵孝夫(佐賀大学医学部)

セッション1 座長：東藤 貢(九州大学応用力学研究所)

(1) 10:10-10:25 「ツインリップカップの臨床成績」

馬渡正明(佐賀大学医学部)

(2) 10:25-10:40 「人工膝関節置換に関する有限要素法」

萩原世也(佐賀大学理工学部)、小木健一郎、東藤 貢(応力研)

長嶺隆二(片井整形外科病院)、佛淵孝夫(佐賀大学医学部)

(3) 10:40-10:55 「下肢の3次元力学モデルを用いたPSタイプおよびCRタイプ人工膝関節の接触状態解析」

坂口淳平(九大院)、勝原忠典、廣川俊二(九大工学研究院)、大月彩香

特別招待講演1 座長：村上輝夫(九大工学研究院)

(4) 11:15-11:45 「数値シミュレーションを用いた人工股関節周りの骨リモデリングに関する研究」

- 鄭 徳泳(国立医薬品食品衛生研究所), 姜 有峯(京都大学再生医  
科学研究所), 山本貴士, 丘 進卿, 堤 定美  
(5) 11:45-12:15 「人工膝関節の耐久性向上」  
富田直秀(京都大学国際融合創造センター)

特別招待講演2 座長: 佛淵孝夫(佐賀大学医学部)

- (6) 13:45-14:15 「膝関節形成術に対する生体力学的検討ーアライメント3次元評価法  
開発の背景ー」  
古賀良生(新潟こばり病院)  
(7) 14:15-14:45 「人工股関節におけるカップネックインピンジメントまでの理論可動域と  
その応用(至適 oscillation angle 大きさと至適カップネック設置位置に  
ついて)」  
吉峰史博(東京都保険医療公社大久保病院)

セッション2 座長: 廣川俊二(九大工学研究院)

- (8) 15:05-15:25 「人工関節の高機能化とその実験室評価」  
村上輝夫(九大工学研究院), 澤江義則, 中嶋和弘, 坂井伸朗  
(9) 15:25-15:40 「局座標を用いた股関節可動域」  
北島 将(佐賀大学医学部)  
(10) 15:40-15:55 「内骨格型パワーアシストロボットの研究」  
木口量夫(佐賀大学理工学部)

セッション3 座長: 馬渡正明(佐賀大学医学部)

- (11) 16:15-16:30 「深屈曲可能な人工膝関節置換術の問題点」  
長嶺隆二(片井整形外科病院), 東藤 貢(応力研)  
(12) 16:30-16:45 「完全屈曲人工膝関節の研究」  
井手衆哉(佐賀大学医学部)  
(13) 16:45-17:00 「新型人工膝関節の深屈曲状態での応力解析」  
東藤 貢(応力研), 井手衆哉(佐賀大学医学部), 宮崎真樹  
伊藤 純, 佛淵孝夫

17:00 閉会の辞 東藤 貢(応力研)

### 3. 講演の概要

#### (1) 「ツインリップカップの臨床成績」 馬渡正明

人工股関節の臨床状況, 脱臼, 可動域を拡大した新しいデザインのカップであるツインリップカ  
ップの開発とその臨床応用について説明があった。

#### (2) 「人工膝関節置換に関する有限要素法」 萩原世也

人工膝関節全置換術による人工膝関節装着の影響を知るために, 医療用 X 線 CT 画像から3  
次元膝関節有限要素モデルを作成し, 有限要素解析を行い, 生体骨における応力分布の違いを  
確認した。また, 人工膝関節内の応力分布も求めた。人工膝関節挿入後の骨リモデリング挙動をシ  
ミュレートするため, 汎用有限要素解析コード MSC.MARC に成長ひずみ解析を組み込むためのユ  
ーザーサブルーチンを作成した。

#### (3) 「下肢の3次元力学モデルを用いたPSタイプおよびCRタイプ人工膝関節の接触状態 解析」 坂口淳平

大腿・膝蓋ー脛骨関節を一体とした人工関節置換膝の3次元力学モデルを構築した。このモデ  
ルは, これまでのモデルにみられたような膝蓋骨の省略や関節面形状の単純化などを行わない厳  
密なものであるため, 関節コンポーネント間の過大な前後移動, 以上回旋運動, 内外側接触面の片

当たりやリフトオフなどの現象も取り扱うことができる。今後はこのモデルを用いてシミュレーション解析を行い、種々の人工膝関節タイプと歩行条件の組み合わせの下で、人工膝関節の運動形態や関節面接触状態などを定量的に求める予定である。

#### **(4) 「数値シミュレーションを用いた人工股関節周りの骨リモデリングに関する研究」**

**鄭 徳泳**

人工股関節埋入後における問題点の一つとして、人工関節の固定が不安定となり、部材が動揺する「ゆるみ」現象、あるいはステムやカップが本来の埋入位置から「移動」する現象があげられる。これらは人工股関節と生体骨との力学的特性の違いによる力学的不適合や、人工股関節の不適切な埋入位置による応力集中などに起因する応力分布状態の変化によって、骨の形状や構造が変化したために生じる。こうした問題を解決するためには、まず人工股関節周辺での応力分布状態を知ることが重要である。しかし、生体内に発生する応力の実測は不可能であるので、有限要素解析法などによる数値計算を用いた応力分布解析が有効な手段となる。さらに、「ゆるみ」や「移動」現象は応力変化に伴う骨の経時的な形状・構造変化の結果であるため、応力の変化に伴う骨の変形過程を考慮したシミュレーションが必要となる。しかし、これまでの技術では単純な応力分布状態について計算するだけであった。そこで我々は骨吸収にとまなう「ゆるみ」や「移動」現象を再現し、影響を及ぼす人工関節の力学的設計パラメータを明らかにするために、骨の力学的適応変形(リモデリング)を考慮した、リモデリングシミュレーション技術を開発した。

#### **(5) 「人工膝関節の耐久性向上」 富田直秀**

人工関節置換後の関節運動は、かなりの程度の動揺性、つまり「がた」を有している。その動揺性の範囲が実際の患者の日常生活に不便を来さないとしても、人工関節の耐久性には重大な影響を与え得る。また、人工膝関節の可動域の議論でも、この動揺性の問題を無視することはできない。動揺性を考慮しなくてもいいのであれば、人工膝関節の可動域は思いのまま広げることができるはずである。本講演では、キネマティクスの原点に戻って、動揺性といった視点から人工膝関節のデザインを捉えなおし、また最後に、ビタミンE含有のポリエチレンが、デラミネーション破壊のみならず、人工膝関節の磨耗特性も改善する知見が得られたので、これを紹介する。

#### **(6) 「膝関節形成術に対する生体力学的検討ーアライメント3次元評価法開発の背景ー」**

**古賀良生**

人工関節置換術が登場して半世紀になろうとしている。膝関節において人工関節はデザインや蝶番型など機構の変遷を経て semi-constrain type が一般化し、20年生存率も90%を超える報告もでて、外科手術として最も成功した治療法と評価されている。しかし、この間の発展において耐久性向上の検討は、デザイン、金属や骨セメントの問題を始め、術後臨床例の問題点解決という形で進んできた。設置位置が耐久性に、軟部組織緊張や表面形状が機能に影響することも臨床検討から指摘され、それらの課題を後に生体力学的検討が行われることが多かった。下肢アライメントの3次元評価法の開発を開始し15年以上経過し、商品実用化に至った。この研究開発の背景と言及について報告を行う。

#### **(7) 「人工股関節におけるカップネックインピンジメントまでの理論可動域とその応用 (至適 oscillation angle 大きさと至適カップネック設置位置について)」**

**吉峰史博**

本講演では、理論的可動域の算出数式の作成、各ネック前捻角におけるカップ至摘設置位置範囲の作成、oscillation angle がカップセーフゾーンに及ぼす影響、カップ前捻角とネック前捻角の至摘組み合わせ、oscillation angle の大きさとヘッド径、ネック径、回転中心位置との関係について発表を行う。

#### **(8) 「人工関節の高機能化とその実験室評価」 村上輝夫**

超高齢化社会への接近に際して、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。たとえば、変形性関節症や関節リウマチが進行し、歩行等が困難となり疼痛が強くなった場合には、人工関節置換術が適用される。近年では、人工股関節、人工骨董、人工膝関節を主体

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通という恩恵が得られている。寝たきり状態から自分で活動できる状態になると、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。しかし、特に微小な磨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磨耗特性の適正な評価と低磨耗・低摩擦化が要望されている。本講演では、人工関節における摩擦磨耗の問題点やそれらの問題解決のための高機能化、およびその実験室評価について概説する。

#### **(9) 「局座標を用いた股関節可動域」 北島 将**

カップインピンジメントまでの理論上の股関節可動域(理論的 ROM)を算出するために、極座標の考え方を用いて算出することを試みた。本講演では、その算出法の概略について講演する。

#### **(10) 「内骨格型パワーアシストロボットの研究」 木口量夫**

筋力が衰えた高齢者や障害者等の日常生活での活動を維持するため、体内に直接埋め込み、体の内側から動作を補助する2自由度の内骨格型パワーアシストロボットを提案する。内骨格型パワーアシストロボットは、基本的には人工関節として用いられることから、動力付人工関節、あるいは次世代型人工関節として位置づけられ、装着者の意思通りの動作補助を行うものである。動作ロボットシステムとしての基本的な原理は、これまで研究を進めてきた日常生活補助用あるいはリハビリテーション補助用の外骨格型パワーアシストロボットと同じである。

本報では、装着者の肘の屈伸運動と前腕部の回内外運動を補助する2自由度の内骨格型パワーアシストロボットを提案する。

#### **(11) 「深屈曲可能な人工膝関節置換術の問題点」 長嶺隆二**

PS型TKAにおいて、コンポーネントのデザインの進歩に伴い深屈曲を獲得することが可能となってきた。しかし、深屈曲が可能のために逆に出現してきた問題点も多数存在する。それらの多くは依然、解決するための方法や手段が確立されていないものもある。本研究では、手術手技とコンポーネントのデザインに関して4つの研究を行った。

#### **(12) 「完全屈曲人工膝関節の研究」 井手衆哉**

In the present study, three different kinds of mechanical analyses such as 3D model analysis of lower limb, motion analysis of cadaveric knee and finite element analysis are combined to understand the mechanics of the newly developed joint, and the problems found through those analyses are thoroughly examined to accomplish clinical application of the knee joint.

#### **(13) 「新型人工膝関節の深屈曲状態での応力解析」 東藤 貢**

現在臨床応用されている人工膝関節のほとんどは屈曲角度に制限があるため、日本人の生活様式たとえば畳の上への着座や和式トイレなどには適応しない。したがって、TKA後も和式の生活に適応するためには、さらなる屈曲角度を実現する新しいデザインの人工膝関節が必要不可欠である。このような背景の下、佐賀大学医学部整形外科を中心とした我々研究グループは、完全屈曲を目指した新型人工膝関節の研究開発を進めている。本研究では、我々が提案する新型モデルの3D-CADデータからFEM解析モデルを構築し、0度から135度の深屈曲状態までの応力解析を行った。得られた結果より、特に脛骨インサートの応力状態について考察した。

### **4. あとがき**

本研究集会は、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、今年度で2回目を迎えた。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13件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、病院、企業より合計45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。

(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

生体-バイオマテリアル界面（インターフェース）におけるマテリアルサイエンス、生物学、力学の連携を図ることで、自己組織化能、生体力学適応能、生体応答制御能を具備した高機能インターフェースに関する新たな学問領域を創出し、口腔、生体の精緻な形態と機能の新たな創建治療法開発に資するための3分野3研究機関、すなわち、東北大学金属材料研究所生体材料グループ、東北大学歯学研究科口腔健康科学グループ、九州大学応用力学研究所生体工学グループによる研究集会を開催する。

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っている。

なお、本共同利用研究集会は当初平成19年3月福岡で開催する予定であった。しかし、この研究集会に関連の深い口腔健康科学に関する国際シンポジウムが2月18日午後から19日にかけて仙台市国際センターで開催されることになったので、これに合わせ、2月17日から18日にかけて、東北大学歯学研究科で開催した。報告内容の概要を示す。

#### 2. 講演概要

##### 1. ECRプラズマ酸化法による酸化チタン被膜上へのOCP誘導

佐々木啓一、折居雄介、増本 博\*、鈴木 治\*\*、本田義知\*\*、穴田貴久\*\*、後藤 孝\*  
(東北大学 大学院歯学研究科口腔システム補綴学分野、\*金属材料研究所  
\*\*大学院歯学研究科顎口腔機能創建学分野)

金属チタンは、生体適合性や機械特性に優れていることから、インプラント材料として歯科、整形外科で用いられている。チタンの具備する生体適合性、オッセオインテグレーション能は、チタンの表面酸化膜（酸化チタン（TiO<sub>2</sub>）膜）の性質に負うところが大きであると考えられている。

しかしチタン、チタン合金と酸化チタンの熱膨張率は大きく異なるため、チタン材料表面へ優れた特性を有する酸化チタン膜を作製するには、プロセス温度を低下させる必要がある。

電子サイクロトロン共鳴（ECR：Electron Cyclotron Resonance）プラズマは、他のプラズマに比べてプラズマ密度や電子温度が高い高活性なプラズマであるため、チタン材料上への低温での酸化チタン膜生成を期待できる。本研究では、チタン基板のECRプラズマ酸化を行い、その酸化条件と結晶構造および石灰化能との関係を検索した。

##### 2. 歯科CAD/CAM 用チタン合金の開発

菊地聖史（東北大学 大学院歯学研究科歯科生体材料学分野）

チタンの歯科鑄造には表面硬化層の形成や鑄造欠陥の発生など、完全には解決し難い問題が残されている。そのため最近では歯科CAD/CAM システムによる機械加工も行われるようになってきたが、チタンは代表的な難削材であり、長い加工時間や短い工具寿命が問題となっている。また強さの面でも純チタンは大型のブリッジのように大きな力が加わる用途には不十分である。工業用快削合金は基本となる金属にほとんど固溶しないような元素（快削添加物）を細かく分散させることで機械加工性を向上させ、機械的性質との両立も図っている。本研究では安全性や耐食性などの点から従

来の快削合金のような快削添加物を用いず、代わりにチタンを合金化して脆性相を適度に析出させることで機械加工性に優れた新しい歯科用チタン合金を開発できないか試みている。

今までチタンに様々なβ安定化元素を添加した合金をアルゴンアーク溶解炉で試作し、歯科用として様々な評価を行ってきた。その結果、いくつかの組成で機械加工性と機械的性質が純チタンより優れていることが明らかになってきた。ここではTi-Ag合金について紹介する。

### 3. リン酸オクタカルシウム (OCP) の骨芽細胞分化促進能

穴田貴久<sup>1</sup>、本田義知<sup>1</sup>、鎌倉慎治<sup>2</sup>、佐々木啓一<sup>3</sup>、鈴木治<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>東北大学 大学院歯学研究科顎口腔機能創建学分野、<sup>2</sup>医学研究科創生応用医学研究センター  
<sup>3</sup>歯学研究科口腔システム補綴学分野)

リン酸オクタカルシウム (OCP:  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) はヒドロキシアパタイト (HA:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) 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。OCPは生理的pHにおいて熱力学的に不安定で、HAへ不可逆的に加水分解(転換)する傾向がある。私たちは、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<sup>(1-6)</sup>。OCPは生体内および培地中でHAに転換することや<sup>(1,6)</sup>、OCPとコラーゲン(CoI)との複合体(OCP/CoI)による骨再生においても、OCP-HA転換が認められることがわかった<sup>(6)</sup>。今回、OCPの骨再生能を明らかにする目的で、骨再生材料として臨床応用されているHAセラミックスとの比較で、培養骨芽細胞による細胞増殖能・分化能を検討した。また、骨再生においてOCP-HA転換が重要と考えられることから、OCPをコラーゲン(CoI)に析出させたOCP/CoIにおける結晶転換を検討した。

### 4. MOCVDによる生体適合セラミックスコーティングの作製

後藤孝、佐藤充孝、塗溶(東北大学 金属材料研究所)

TiおよびTi合金は高い生体適合性や加工性、優れた機械特性を有することから、医療分野において人工歯根や人工骨などのインプラント材料として広く使用されている。近年、セラミックス材料が持つ骨伝導能の高さを生かし、インプラントの生体適合性をさらに高めるためにセラミックスコーティングに関する研究が数多く行われている。しかし有機金属化学気相析出(MOCVD)法を用いた生体適合性セラミックス膜の作製例はない。本研究ではMOCVD法を用いてCaTiO<sub>3</sub>膜を始めとするCa含有セラミックス膜を合成し、微細組織、成膜速度に及ぼす成膜条件の影響および疑似体液溶液中でのヒドロキシアパタイト(HAp)の生成の様子を調べた。

### 5. Metal-on-metal wear behavior in biological environment of high carbon cast and low carbon forged Co-29Cr-6Mo alloys

Akihiko Chiba, IMR, Tohoku University

Cobalt chromium molybdenum (cobalt chrome or CoCr) alloys are widely used as implant materials such as hip and knee prosthesis due to their excellent corrosion and wear resistance as well as their good mechanical properties. Although the use of the CoCr/UHMWPE bearing couple has provided consistent results in total hip arthroplasties, wear of the UHMWPE component is a major obstacle limiting the longevity of these reconstructions. There is renewed interest in metal-on-metal (MOM) bearings in view of their potential for greatly improved wear performance. There are at least two possibilities for establishing the CoCr/CoCr MOM bearing couples with the greatest wear resistance; one is the couple of the low carbon forged CoCrMo with itself and the other is one of the high carbon forged CoCrMo with itself. Thus the aim of the present investigation is to reveal the wear behavior of the MOM pairings of the obtained forged CoCrMo alloy with fine-grained structure and without carbon addition in comparison with a high carbon commercial cast CoCrMo alloy (standardized ASTM F75).

### 6. 生体用β型Ti-Nb-Ta-Zr系合金の表面活性化処理と力学的特性

新家光雄(東北大学 金属材料研究所)

生体用Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ)合金は溶体化処理状態において約60GPaの低弾性率を示し、加工熱処理によって強度・延性バランスを比較的容易に制御可能であり、さらに細胞毒性が他の生体用金属材料と比較して極めて低いことが実証されている<sup>1)</sup>。しかし、生体適合性が他の生体用金属材料と比較して良好とされるTNTZ合金においても、骨に対して生体活性を得るためには表面処理等によるさらなる生体適合性の向上が必要と考えられる。現在、TNTZ合金表面へリン酸カルシウム系ガラスを塗布後、大気中にて1000K以上の温度で焼成することにより、その表面にリン酸カルシウ

ム結晶化ガラスを強固に接合させるディップコーティング処理が研究されている<sup>2)</sup>。しかし、同処理に含まれる焼成工程では、試料が大気中にてTNTZ合金の通常の溶体化温度(1063K)以上に加熱され長時間保持されるため、本合金の機械的性質の低下が懸念される。したがって、コーティング処理後に時効処理等による機械的性質の改善が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、リン酸カルシウム結晶化ガラスコーティングした生体用Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr合金の力学的特性を調査し、特に疲労特性に及ぼすコーティング処理の影響について調査・検討した。

#### 7. 個々の患者の下顎骨に対する応力解析方法についての研究

高雄善裕、\*高橋純平、\*\*寺嶋雅彦、汪 文学、\*\*中島昭彦  
(九州大学 応用力学研究所、\*工学府大学院、\*\*歯学研究院)

近年、先天異常や顎変形症等の下顎の不全を訴える患者数が増加し、治療の際に様々な困難な対応が必要となってきている。顎矯正手術では顎骨の平行移動および回転が組み合わさった複雑な移動が行われるため、術後に問題が起きることがある。そのため、診断、治療方針の決定の際に3次元的な顎骨の形態把握の必要性が高まってきている。特に、術後の下顎骨に発生する咀嚼時応力状態の予測は2次的な合併症を防ぐために重要である。

ここでは、個々の患者の解析モデルを比較的短時間に市販の解析コードを使用し比較的高速なPCで解析できることが求められている。そこで、頭部下顎の有限要素解析モデルを個々の患者について短時間で作成するシステムを作り、下顎骨の外科手術の力学的支援を行おうと考えた。本研究では、下顎骨の組織に準じた要素数の少ない有限要素基本モデルを作成し応力解析を行い、また、この基本モデルを変形させることにより複数患者の下顎骨有限要素モデルを再現する変形アルゴリズムを確立する。

#### 8. Nano-whisker Reinforced Glass Ceramics for Artificial Tooth

Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara, and Shin-ichi Ukon\*  
RIAM, Kyushu University, \*Fukuoka Dental College

A hand made ceramics used for the tooth crown and worked by a dental technician, that is practically a glass ceramic crown, is reinforced by white whiskers  $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$  in an ordinal dental furnace at  $930^\circ C$  under between atmospheric and 29mmHg pressure. Stiffness, strength and melting points of the matrix and whisker are 35GPa, 85MPa,  $1500^\circ C$  and 400GPa, 8GPa,  $1440^\circ C$ , respectively. The resulted products are investigated by the use of SEM, EPMA, hardness tester and testing machine for various whisker weight fractions. A slight increase of stiffness and a moderate one in toughness are observed, though the strength increase is not detected. The reinforcement does not give serious damage if the weight fraction is less than 10%.

#### 9. 歯科インプラント埋入下顎骨の3次元モデルの構築と応力解析

東藤 貢、\*入江皓平、\*\*松下恭之、\*\*古谷野潔  
(九州大学 応用力学研究所、\*総合理工学府大学院、\*\*歯学研究院)

近年、天然歯を失った場合の新たな治療法としてインプラント治療が注目を浴びている。また、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。このような治療法において、インプラントの埋入位置や長さ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を知ることは臨床的にも大変重要であるが、そのような観点からの研究は少ないのが現状である。また、有限要素法を応用した応力解析も一部行われているものの、簡略化したモデルを用いた解析がほとんどである。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モデルを構築しインプラント解析へ応用することを目的として、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。次に、前述の下顎骨モデルに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物を装着したオール・オン4を模擬したFEAモデルを構築した。実際の下顎骨に即した境界条件を設定し応力解析を行うことで、インプラント、補綴物および下顎骨について力学的検証を行った。

#### 10. 咬合時における歯周組織の変形解析

森田康之、\*内野正和、東藤 貢、\*\*松下恭之、新川和夫、\*\*古谷野潔

(九州大学 応用力学研究所、\*\*歯学研究院、\*福岡県工業技術センター)

咬合時における歯周組織の変位・変形動態の解明は、歯科医学分野において大きな研究テーマの一つであり、古くから行われている。しかしながら現状では、実際の生体歯周組織を使用する場合

には、レーザー変位計等で歯牙の局所的な変位量およびひずみを求めることを目的とした一点計測、あるいは多点計測の場合には、歯周組織を高分子材料によりモデル化し、従来の実験力学的手法により測定が行われているのみであり、咬合解析に十分な情報量とは言い難い。すなわち、実際の歯周組織を使用し、全視野で変位・変形動態の可視化を行う必要がある。そこで本研究では、可及的に生体歯に近い状態を実現するため、数日前に食肉用としてと畜されたブタの下顎骨を使用した。下顎骨から歯周組織の薄片を採取し、咬合試験を行うことによりその変位・変形様態を可視化した。計測手法にはデジタル画像相関法を使用した。結果として、咬合時における歯周組織の変位・変形過程を可視化した。また同一の試験片において、試験片が乾燥後、同様の咬合試験において生体歯と変位分布が大きく異なることを示し、咬合時における歯根膜の働きの重要性を示した。

### 3. まとめ

高機能バイオマテリアル-生体インターフェースの創製に関する第1回目の研究集会であり、3研究機関からそれぞれ3件、3件、4件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われた。各研究の詳細は平成19年3月発行予定の応用力学研究所研究集会講演論文集 18ME-S2「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」をご覧ください。平成19年度は平成19年秋に、同様の2回目の研究集会を開催したいと考えている。

# 高分子固体のメカニクス

研究代表者  
金沢大学 新田晃平

## 1. はじめに

いまや高分子材料は様々な分野で利用されており、種々多様な力学環境下で使用されている。したがって、各種高分子材料の力学的挙動を実験的あるいは理論的に解明することが重要である。本研究集会では、高分子固体の力学に関する研究分野で活躍している研究者が一堂に介し、研究の最新動向について紹介し、議論を通じて今後の研究の方向性を見出すことを目的とした。

なお、本研究集会は、九州大学筑紫キャンパスで開催された第54回レオロジー討論会の1セッションとして行われた。レオロジー討論会の実行委員長であられる先導物質化学研究所の高原淳教授、実行委員の先生方ならびに関係者各位に謝意を表する。

## 2. プログラム

実施日：2006年10月5日（木）

会場：九州大学筑紫キャンパス総理工講義室

セッション1 9:30-10:45 座長：東藤 貢（応力研）

- (1) 「結晶性ポリマーの階層性に基づく構造と変形のモデル化とその応用」  
内田 真（岡山工大）、富田佳宏（神戸工大）
- (2) 「球状ドメインを有するブロック共重合体の力学的性質への流動履歴の影響」  
長谷川 聡（九大院総理工）、高野敦志（名古屋大院工）、松下裕秀  
高橋良彰（九大院総理工）
- (3) 「延性高分子材料の弾塑性構成式」  
佐野村幸夫（玉川工大）

セッション2 10:45-12:00 座長：内田 真（岡山大）

- (4) 「結晶性高分子における Poisson's ratio のひずみ依存性」  
山名真佐宏（金沢大院自然）、新田晃平
- (5) 「ガラス転移点近傍における環状ポリオレフィン系材料の力学特性」  
久野忠昭（金沢大院自然）、河村幸伸、新田晃平
- (6) 「分子鎖すべりモデルと自由体積変化に基づく非弾性応答則を用いた非晶性ポリマーの大変形 FEM 解析」  
灘 裕統（慶応大理工）、志澤一之

セッション3 13:00-13:50 座長：新田晃平（金沢大）

- (7) 「ポリ L 乳酸の力学特性に及ぼすリジントリイソシアネート添加の影響」  
高山 哲生（九大院総理工）、東藤 貢（九大応力研）、新川和夫
- (8) 「ポリ L 乳酸の破壊メカニズムに及ぼす延性生分解性樹脂のブレンドの影響」  
原田亜矢子（九大院総理工）、東藤 貢（九大応力研）、新川和夫

セッション4 13:50-15:05 座長：志澤一之（慶応大）

- (9) 「変形下におけるポリイソプレングムの動的粘弾性[II]」  
宮本嘉久（京都大人環）、田口 健、関本 謙（Paris 第7大 MSC）
- (10) 「エポキシ/CTBN 反応ブレンドによるエネルギー吸収樹脂設計」  
岸 肇（兵庫県立大院工）、長尾厚史、小林友作、松田 聡、浅見敏彦、村上 惇

- (11)「ポリシアノビフェニルアクリレートのエンタルピー緩和：活性化エネルギーに対する分子量の影響」  
田中 穰（福井大工）

### 3. 講演概要

#### (1)「結晶性ポリマーの階層性に基づく構造と変形のモデル化とその応用」内田 真

軽量かつ成形性に優れるポリマー材料の構造部材としての用途をさらに拡大するためにはその力学特性を適切に評価することが不可欠である。ポリマー材料は一般的に非晶性と結晶性に分類できる。これまで、分子鎖が秩序構造を持たない非晶性ポリマー、あるいはそのブレンド材の変形挙動に関する研究が数多くなされてきた。一方、結晶性ポリマーは非常に複雑な階層構造を有しており、その取り扱いが困難なため、解析的な研究としては、主として巨視的に平均化された変形応答の解明に焦点が置かれていた。

本研究では、均質化法に基づく有限要素法を用いて結晶性ポリマーのミクロおよびメゾ領域の構造と変形を表現可能なマルチスケールモデルを構築し、その変形挙動を解明することを目的としている。本稿では、結晶性ポリマーのメゾ領域に存在するラメラが放射状に成長した球晶の変形挙動、および材料の耐衝撃性を向上させるために軟質なゴム粒子を充填したゴム/結晶性ポリマーブレンド材の変形挙動を評価する。

#### (2)「球状ドメインを有するブロック共重合体の力学的性質への流動履歴の影響」

長谷川 聡

ポリスチレン-ポリイソプレン-ポリスチレントリブロック共重合体 (SIS) などの ABA 型トリブロック共重合体は工業的に広く用いられている。ABA 型トリブロック共重合体はミクロ相分離構造をとり、A/B の比率によって、球、シリンダー、ラメラといった構造を示す。ABA 型トリブロック共重合体の B 分子鎖は両末端が異なる A ドメインに固定されているブリッジ構造と両末端が同じ A ドメインに固定されているループ構造をとり、その割合は誘電率測定および引張測定などを行うことで定量されてきた。

本研究では、ずりを印加した SIS フィルムをずりに対して平行および垂直方向で引張測定することにより、ずり流動が SIS の構造に与える影響について考察した。

#### (3)「延性高分子材料の弾塑性構成式」佐野村幸夫

プラスチックは押出加工することによって、押出方向の剛性と強度が著しく改善される。このような押出材料の異方弾性定数は横等方性となる。また、延伸フィルム成形、延伸ブロー成形のように、2 軸の延伸変形を成形の際に付与して、成形品の力学的性質を向上させている。

本研究では、有理連続体力学理論に基づいて、延伸材料の弾塑性構成式を定式化する。まず、延伸高分子材料の異方弾性を予測する理論の概要を説明する。続いて、延伸高分子材料の塑性構成式を導出する。

#### (4)「結晶性高分子における Poisson's ratio のひずみ依存性」山名真佐宏

結晶性高分子は、延伸過程中に生じるくびれを伴う不均一変形を示す。変形過程中における寸法変化から算出されるポアソン比を評価することは、不均一変形を伴う力学的非線形挙動を理解する上で非常に重要になる。本研究では、一軸延伸過程中で生じる寸法不安定領域におけるポアソン比を精密に測定し、不均一変形がおよぼす応力-ひずみ挙動への影響について検討した。さらに、3 次元寸法測定の結果より、結晶性高分子について、一軸延伸過程中における不均一変形下での真応力の値を算出し、力学的非線形性について検討した。

#### (5)「ガラス転移点近傍における環状ポリオレフィン系材料の力学特性」久野忠昭

平面ディスプレイの市場拡大に伴い、透明・高耐熱・高強度の特性を有するガラス状高分

子である環状ポリオレフィン(CPO)系材料が近年注目され市場で広範囲に使用されている。一方、CPOの使用環境と材料破壊の機構とに関してはほとんど知られていない。我々はCPOの力学特性について調査しており、今回はガラス転移点近傍の温度における延伸特性について報告する。

#### (6) 「分子鎖すべりモデルと自由体積変化に基づく非弾性応答則を用いた非晶性ポリマの大変形 FEM 解析」瀬 裕統

筆者らは、非晶性ポリマに対して結晶塑性論のアナロジーから「分子鎖すべり系」の概念を提案し、「分子鎖すべり理論」を構築した。さらに、Hasanらによって確率論的立場からモデル化された非弾性応答則を硬化則に採用することで、非晶性ポリマの大変形応答を分子鎖挙動の観点から再現するモデルを構築した。

本報では、上述の理論を用いて非晶性ポリマに対する大変形 FEM 解析を行い、分子鎖の配向を可視化するとともに、せん断帯形成とその伝播を再現する。さらに、従来の硬化則では表現できなかった非線形粘弾性挙動をも再現する。また、非弾性応答則に新たにひずみ速度を導入し、その影響について検討する。

#### (7) 「ポリ L 乳酸の力学特性に及ぼすリジントリイソシアネート添加の影響」高山 哲生

植物を原料とするポリ乳酸(PLA)は、生分解性樹脂として注目されており、医療、自動車、電化製品、食品などの各産業で使用が始まっている。筆者らは PLA/PCL ポリマーブレンドにリジントリイソシアネート(LTI)を添加することで、LTI が PLA および PCL と架橋反応することで相構造が劇的に変化し、破壊特性が大幅に向上することを報告している。この反応は PLA 単体に LTI を添加した場合についても発生すると考えられるが、この検討は未だなされていない。そこで本研究では、PLLA に LTI を添加した材料を試作し、LTI 添加が PLLA の力学特性、破壊特性および破壊メカニズムに及ぼす影響について検討した。

#### (8) 「ポリ L 乳酸の破壊メカニズムに及ぼす延性生分解性樹脂のブレンドの影響」原田亜矢子

生分解性プラスチックの一種であるポリ(L-乳酸)(PLLA)は、環境にやさしい材料として一般成形品や自動車、農業など様々な分野で使用されている。また、生体内でも分解されることから医療の分野でも利用されている。しかし PLLA は脆性破壊を示すことがあり、汎用性を持たせるためには破壊特性の向上が必要である。比較的単純に破壊特性を改善させる方法として、延性生分解性樹脂とのブレンドが挙げられる。本研究では、PLLA の破壊特性の向上を目的として、PLLA に PBSC や PCL をブレンドし、破壊特性について比較を行った。さらに試験後の破面を電解放射形走査型電子顕微鏡にて観察し、破壊メカニズムについて考察した。

#### (9) 「変形下におけるポリイソブレンゴムの動的粘弾性[II]」宮本嘉久

ガラス転移点近傍で網目状高分子に変形を与えると、粘弾性応力が生じ、温度の低下・変形速度の増加とともに、一様な粘弾性変形から、不均一な塑性変形、破壊へと変形様式が変化する。このような変形挙動の変化を定量的に解析するためには、系の緩和挙動についての詳細なデータが必要である。本研究では、平衡に近い状態での基本緩和時間および緩和時間分布の温度・ひずみ依存性を求めることを目的として、線形粘弾性測定、解析を行った。複素ヤング率と複素コンプライアンスを用いた解析が進行中であり、現在までに得られた結果について報告する。

#### (10) 「エポキシ/CTBN 反応ブレンドによるエネルギー吸収樹脂設計」岸 肇

熱硬化性樹脂の中でも接着性に優れているエポキシ樹脂は、一般にエポキシ主剤と硬化剤の反応により得られる架橋高分子であり、反応させる分子構造の選択次第でさらなる機能を付与できる可能性を秘めている。本研究はエポキシ樹脂と反応性エラストマーである CTBN

オリゴマーとのアロイ化により広い温度領域において高いエネルギー吸収能力を有する樹脂組成を見出した。さらには、その相構造、動的粘弾性挙動と、エネルギー吸収機構の関係について考察した。

#### (11)「ポリシアノピフェニルアクリレートのエンタルピー緩和：活性化エネルギーに対する分子量の影響」田中 穰

ポリ・シアノピフェニル・ヘキシルアクリレート (PCBA) は液晶ポリマーとしてよく知られており多方面で研究されている。そのガラス転移温度は 37 度付近にある。ガラス転移温度以下の温度で熱処理するとエンタルピー緩和が現れる。こういった緩和現象は以前より良く知られていることであるが、本研究では、活性化エネルギーモデルを考慮して緩和現象の解析を試みた。

#### 4. おわりに

本研究集会では、高分子化学系と機械工学系の異なる研究分野で活動し、通常交流することが少ない両分野において高分子の力学に携わる研究者が一同に介し、情報交換を行うとともに活発な討論を行った。高分子力学の研究を遂行し今後ますます発展させるためには、ミクロな分子鎖レベルからマクロな力学挙動までを関連付けて取り扱うが必要であり、そのためには、高分子化学、高分子物理から連続体力学までの幅広い知識が必要とされるため、高分子力学に関連する異分野間の連携が今後ますます必要になるであろう。そのような背景の下、この研究集会が高分子力学研究の今後の発展に寄与することを願ってやまない。

(研究集会)

## 複合材料の強度とその損傷モデル

研究代表者

九州大学応用力学研究所

高雄 善裕

### 1. 研究集会の目的

応用力学研究所は複合材料強度に関する研究拠点の1つであり、各種複合材料の損傷や破壊の計測、解析、実験を行ってきた。これまで、およそ隔年おきに各種環境下での挙動と強度モデリングについて応用力学研究所・力学専門部会・共同研究集会を開催してきた。この結果、応用力学研究所は複合材料強度分野の研究ネットワークの拠点としても全国的に定着してきており、より一層アカデミックな観点から基礎力学に貢献したい。以下に各講演の概要を示す。

### 2. 講演概要

#### 1. 天然繊維グリーンコンポジットの特性発現性の解明

合田 公一 (山口大)

The purpose of this study is to improve the strength and stiffness of natural fiber green composites through mechanical treatment, and to equalize the mechanical properties of the composites with those of glass fiber composites. Cyclic tensile stress at 50% or 70% level of their initial strengths was applied five or twenty times for single ramie fibers, twenty or a hundred times for ramie fiber green composites. Tensile strength of the as-supplied fibers was improved approximately 50% higher than their initial value, if the cyclic stress is their 70% level and the number of cycles is twenty, while this mercerized fibers was improved in strength approximately 20% higher than the original value. On the other hand, the mechanical treatment was not so largely affected in strength for ramie fiber green composites, approximately 10% higher than that of the untreated green composites, while Young's moduli of cyclic-loaded green composites were significantly improved, 56% to 67% higher than that of untreated green composites. Young's moduli of the improved composites are comparable to the level of glass fiber composites.

#### 2. CFRP ピン継手の疲労と準静的引張負荷における強度と損傷進展の比較

清家 聡 (九大院)、高雄善裕、汪 文学、松原監壮 (九大応力研)

機械継手は分解可能で表面処理の工程を必要としないなどメリットも多く重要な技術である。本研究では、機械継手の基本的理解のために板厚方向拘束が無いピン継手のベアリング強度の静的試験と疲労試験を積層構成 $[0/\pm 45/90]_{90}$ と $[90/\pm 45/0]_{90}$ について行い、それらの強度と損傷進展様式を比較検討した。両者の損傷を比べると、外観に違いは認められないが内部の損傷形態が異なる。静的試験の破壊では0度層のキックを起点として剥離やせん断亀裂が発生するのに対し、疲労破壊では接触部の圧壊が起点となる。この機構の違いは、疲労の(総剥離長さ)/(総せん断亀裂長さ)の比が静的負荷時の場合より大きくなることの原因にもなっている。

#### 3. Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation of Fiber/Particle Hybrid Metal Matrix Composites

K.H. Oh and K.S. Han (Dept. Mechanical Engineering, Pohang University of Science & Technology)

We have studied the effect of short-fiber/particle hybrid reinforcement on fracture toughness and fatigue crack growth in metal matrix composites. Reinforcement hybridization was achieved by a hybrid preform process, and composites were fabricated by the squeeze casting method. Al6061 matrix alloy and four composites having different short-fiber/particle ratio were tested. The fracture toughness ( $K_{IC}$ ), and the fatigue threshold ( $\Delta K_{th}$ ) increased with increasing particle contents, whereas the Paris' exponent ( $m$ ) was insensitive to the short-fiber:particle ratio. These results were emerged as a shift of the crack growth curve which implies on enhanced crack resistance over the whole stress intensity factor range. The positive aspect of particulate reinforcement is advocated by observation of the crack path and surfaces. Based on the hybrid effects of these

composites, the difference in crack growth behavior between matrix and composites is set out. The clear advantage of hybrid composites both economically and in damage tolerance, is emphasized.

#### 4. 耐熱複合材料の高温環境における層間破壊挙動とファイバーブリッジング

村田知代子 (九大院)、宇田暢秀、小野幸生、永安忠 (九大工)

耐熱性複合材料IM600/PIXA-M を用いてモード I 層間破壊挙動を解明することを本研究の目的とし、一方向積層板の板厚を変化させて常温及び高温環境下でDCB 試験を実施した。実験結果には高温環境下でのエネルギー解放率に板厚による依存が見られた。また高温環境下の試験では破壊面に多量のファイバーブリッジングが発生し、板厚が薄い場合にはマイクロクラックも多数発生していることが観察された。そこでDCB 試験結果から、ファイバーブリッジングの定量的評価を行うとともに、マイクロクラックの多少とエネルギー解放率の関係を検証する。

#### 5. CFRPの超音波探傷評価

松嶋正道 (JAXA 複合材技術開発センター)

複合材料の炭素繊維強化樹脂材料が広範囲に適用されている。軽くて強い性質を利用して軽量構造に最適であり、全体重量が軽減されて燃料消費が少なくする事が可能となる。しかし、損傷形態が金属材料と比較して複合材料特有は複雑であり、この損傷形態を定量的に評価する場合に超音波探傷を用いると板厚(積層)方向のはく離が明瞭に観察することができる。ここでは、CFRP板に衝撃損傷を与えて、はく離損傷を超音波探傷で観察を行った。

#### 6. Damage Analysis of a Type 3 Cryogenic Propellant Tank after LN<sub>2</sub> Storage Test

S.G. KANG, M. G. KIM, S.W. PARK, C.G. KIM (KAIST), C.W. KONG (KARI)

The application of composites to cryotanks has been one of major concerns for lightweight launch vehicles. In this study, a prototype of a Type 3 cryotank was fabricated with the composite developed for cryogenic application and an aluminum liner, and the cryogenic conditions that general cryotanks undergo in service were applied to it. For this purpose, liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) was stored in the cryotank as cryogenic medium and gaseous nitrogen (GN<sub>2</sub>) was used to pressurize it. During the test, the delamination inside the cryotank happened. Several attempts were made to investigate this phenomenon through both analytical approach with thermo-elastic analysis in consideration of the progressive failure and experimental one with a LN<sub>2</sub> immersion test of composite/aluminum ring specimens which are suitable for simulating a Type 3 tank structure.

#### 7. エッジ効果と熱残留応力を考慮したトランスバースクラックを有するCFRP積層板の応力解析

細井厚志、八木志奈子 (早大院)、永田啓一 (東レ)、川田宏之 (早大)

本研究は、変分原理を用いて90°層内にトランスバースクラックを含む{(S)/90<sub>n</sub>}<sub>k</sub>積層板の3次元応力状態について評価をおこなった。なお(S)は、任意の直交異方性材料を示している。この解析によって、トランスバースクラックが存在する積層板において、エッジデラミネーションを引起す原因となるエッジ効果を考慮した面外方向応力を表現することが出来た。また提案されたモデルは、有限要素法を用いて算出された結果と良い一致を示した。

#### 8. マイクロボンド試験法に対する損傷解析モデルを用いた複合材料界面破壊特性の評価

西川雅章、逸見啓、武田展雄 (東大)

T800S 炭素繊維・エポキシ樹脂を用いてマイクロボンド試験を行い、従来の複合材料界面特性評価方法の妥当性を検証した。また、樹脂の塑性変形、樹脂に発生するき裂の影響を考慮して、マイクロボンド試験の繊維引き抜き過程における損傷発生・進展の有限要素シミュレーションを行い、界面特性の定量的評価を試みた。マイクロボンド試験において、ある埋め込み長さに対する引き抜き荷重はばらつくが、実験を繰り返していくと、得られる上限値にはき裂の影響が無視できることがシミュレーションにより明らかとなった。従って、樹脂の塑性変形を考慮した界面はく離進展解析によって上限値のみを評価すれば、界面特性のより適切な定量化が可能と考えられる。

#### 9. 結合力要素を用いたFRP直交積層板における損傷進展に関する数値シミュレーション

岡部朋永 (東北大・工)

本研究では結合力要素を用いたFRP直交積層板における損傷進展に関する数値シミュレーションモデルを提案する。特に、トランスバースクラックの初生・進展過程を再現するために、結合力要素領域内に初期欠陥領域を導入した。これにより、90度層厚が薄くなった場合のクラック発生

に関する抑制効果とクラック増加特性の両方を再現することが可能となった。この点に関しては、他の破壊力学モデルと比較することで、より詳細に検証してある。最後に数値シミュレーション結果と実験結果とを比較し、本モデルが実験結果をよく説明できるモデルであることを確認した。

#### 10. 結合力要素を用いた CFRP 積層板の疲労損傷進展シミュレーションの提案

矢代茂樹 (AIST 計測フロンティア研究部門)

本研究では、複合材料積層板に対する新たな疲労損傷進展シミュレーションを提案する。Mindlin 板要素とき裂面を表す結合力要素を用い、複合材料積層板の損傷解析を行うレイヤーワイズ有限要素モデルを構築した。ここで、結合力要素の残留強度の低下プロセスに疲労損傷進展則を適用することで、積層板における疲労損傷の進展を表現した。本研究では、引張疲労負荷下の切り欠きを有する CFRP クロスプライ積層板に対し、提案した疲労損傷進展シミュレーションを適用した。本シミュレーションで得られた損傷形態は実験結果を概ね表現でき、提案した手法の妥当性を示した。

#### 11. 複合材料構造の粘弾性挙動のマルチスケール解析

渋谷 嗣 (秋田大)、関根英樹 (東北大)

熱可塑性樹脂を母材とした炭素繊維複合材料は高靱性な複合材料として注目されているが、耐熱性の高い樹脂の開発によって高温環境下での応用がさらに期待できる。その環境下において材料設計を含めた複合材料構造の全体特性評価のためには、マクロ・メゾレベルからのマルチスケール解析が必要不可欠である。

本研究では、高温環境における複合材料構造の粘弾性挙動の評価のためにマルチスケールモデルについて検討した。均質化理論に基づく一方向繊維複合材料のラミナの粘弾性特性から各種の積層構成を有する複合材料構造の挙動の解析を行った。粘弾性特性解析は弾性とラプラス変換における粘弾性解との対応原理が適用できることから、ラプラス変換の粘弾性解から Duhamel 積分を用いて逆変換して定式化した。数値計算においては円孔を有する積層複合板を対象とし、ラミナの解析から積層板の円孔周りのマクロな粘弾性挙動を明らかにした。

#### 12. Mechanical and electrical characteristics of carbon noatube (CNT)/Polymer nanocomposites

Q.Q. Ni (Shinshu Univ.), C.S. Zhang (Kyto Institute of Technology), W.X. Wang (Kyushu Univ.)

The nanocomposites with carbon nanotubes (CNTs) and shape memory polymer (SMP) were developed for mechanical and electrical applications. The specimens with different CNTs weight fractions were prepared. Their mechanical property, electrical resistivities and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) were investigated. As a result, for the developed nanocomposites, the mechanical strength and modulus increased obviously due to the filler of carbon nanotubes. Even lower weight fraction of CNTs could achieve a high level of conductivity and a low percolation threshold was confirmed. The electrical resistivity for the developed nanocomposites is dependant obviously on temperature with a linear relation like metals. The interconnected conducting network was formed more easily than other fillers. The experiments to evaluate EMI SE were carried out in three different frequency bands, 8~26.5 GHz (K band), 33~50 GHz (Q band) and 50~75 GHz (V band). The EMI SE of CNT/SMP nanocomposite had a strong dependence of carbon nanotube content and the specimen thickness at all of three frequency bands. The higher the frequency, the larger EMI SE is.

#### 13. Prediction of electrical properties of carbon nanotube polymer composites

N. Hu (Tohoku Univ.), Z. Masuda (Graduate School of Engr., Tohoku Univ.), H. Fukunaga (Tohoku Univ.)

Carbon nanotubes (CNTs) of high aspect ratio possess excellent electrical conductivity. Therefore, with a little amount of CNTs, which are dispersed in insulating polymers, it is possible to produce the composites with high electrical conductivity. This kind of conductive composites can be applied to various fields, such as highly sensitive strain sensors, electromagnetic-wave shielding materials etc.

In this research, first we propose a 3 dimensional (3D) numerical model to predict the behavior of electrical conductivity in polymers filled by CNTs. In this numerical model, with the assumption of uniformly and randomly distributed CNTs in polymer materials, the percolation threshold is predicted at the volume fraction of CNTs when a complete conductive pathway connected by some CNTs is built up. Furthermore, a 3D resistor network model for electrical conduction problems of composites is proposed, in which Kirchhoff's current law is used to build up the system equations at different nodes in the network connected by CNTs, and finally Ohm's law is used to predict the global electrical conductivity of composites.

Second, the CNT/polymer composites are practically made by us. The various DC and AC electrical properties of composites, such as electrical conductivity, are measured by LCR meter. The obtained experimental results and other researchers' results are employed to verify the present theoretical model.

Third, for the purpose of application of CNT/polymer composites as sensors, the present theoretical model for predicting the electrical conductivity of CNT/polymer composites is further extended into the case of composites subjected to external loads. The relationship between the strain of composites and the electrical conductivity of composites is estimated theoretically. It was found that when the volume fraction of CNTs is closer to the percolation threshold, the electrical conductivity of composites changes more significantly when composites are deformed. Also, the experiments are carried out. Both theoretical and experimental results demonstrate that the composites possess much higher sensitivity or gauge ratio compared with the traditional strain gauge.

#### 14. Models for piezoresistance in CFRP laminates

K. Ogi (Graduate School of Sci. & Engr., Ehime Univ.)

This paper presents the mathematical models describing the piezoresistance behavior in carbon fibre reinforced plastics (CFRP) laminates. First, two-dimensional models are proposed to predict the change in the resistance and impedance due to tensile loading in unidirectional (UD) laminates. The equivalent DC and AC circuits consisting of the resistance and capacitance elements are considered to express the piezoresistance and piezoeimpedance behavior in the UD laminates. Especially, the temperature effect is taken into account in the piezoresistance model. The gage factors and temperature coefficients are expressed as functions of off-axis angle. Secondly, a one-dimensional model is proposed to describe the piezoresistance behavior in CFRP cross-ply laminates with transverse cracking loaded in tension. The residual resistance change and gage factors are associated with transverse crack density on the basis of an equivalent resistance circuit.

### 3. まとめ

複合材料に関する集会は今回で10回目であり、大学、国立研究所、企業から14件の講演発表があり活発な討論が行われた。韓国 KAIST 及び POSTECH からの若手研究者による2件の発表もあった。POSTECH の HAN 教授には昨年に続き参加して頂いた。各研究の詳細は平成19年1月発行の応用力学研究所研究集会講演論文集18ME-S4「複合材料の強度とその損傷モデル」をご覧いただきたい。平成19年度からは複合材料の中でも特に興味深い話題に焦点を絞った集会企画を予定している。研究所側の世話人も汪先生に変わって頂く事にした。九州大学工学部の宇田先生に代表者になって頂き、ナノ複合材についての研究集会の申請が計画されていると聞いている。省エネルギーや環境問題に新たな展開を切り開いて行く複合材料に関する力学研究者の活発な意見交換サロンとして引き継いで頂けると期待している。

(研究集会)  
**非線形波動現象における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー**

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**

非線形現象の解明は、現在ほぼすべての理工学での中心的な研究テーマとなっており、そのための基礎理論の構築、現象のモデル化とその数値計算法などが盛んに研究されている。さらに様々な実験や観測により、新しい非線形現象も次々と見出されている。その中でも、非線形波動に関連する研究は歴史的にも最も良く研究されてきており、これまで多くの研究成果が生まれてきた。非線形波動論の特徴のひとつに、その手法や結果が分野を超えた普遍性を持つことがあげられる。例えば特異摂動論により様々な基礎方程式から弱非線形現象を抽出すると、その縮約された式は様々な分野で共通に現れるものになる。こうしてソリトン理論やカオス理論が発展し、広く研究者の間で非線形現象の解析に使われる標準的な手法になってきた。そして得られた縮約方程式の高精度な数値計算法も精力的に研究されている。もとの基礎方程式を直接数値計算するのではなく、理論的な現象の理解を目指して精度のより高い差分法などが工夫されている。さらに実験に関しても、流体、プラズマなどは工学の応用と結びついて近年ますます技術レベルの高いものになってきている。装置や測定器の限界に挑戦するようなものから、既存のシステムの全く新しい組み合わせの実験などを通して、新たな非線形現象の発見や工学的諸問題の解決方法などが提案されている。しかし一方で近年は数学理論、数値計算および実験の乖離も進んでいるのも現状である。非線形波動研究初期の頃はこれらが有機的に関連していた時期があり、そのことがお互いの進展に相補的に貢献した。そこで現在の状況を鑑みて、再び共通の非線形波動という対象のもとに、理論から実験まですべての研究者が一度に会して議論し、お互いの問題意識を確認して話し合う場が必要であると考えられる。応用力学研究所は歴史的にも非線形研究の中心の一つであり、理論から実験までこれまでの非線形研究をリードしてきた。従って、本研究集会による理論、数値計算および実験分野の非線形波動研究者のクロスオーバーは応用力学研究所の共同利用事業にふさわしいものだと考えられる。

**成果の概要**

本研究集会では3日間で特別講演4件、一般講演42件(内ポスターセッション20件)の計46件の講演が行われた。また2日目のポスターセッションでは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行われ、盛況であった。また、ベストポスター賞を選ぶことをあらかじめ告知していたため、良い意味での競争的環境が実現できたと思われる。そして、今回新しくパネルディスカッションが開かれ、5名のパネリストを迎え本研究集会のメインテーマである「非線形研究における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー」について話し合った。5名は、それぞれこの3つの分野を横断的に研究している第一線の研究者であり、それぞれの考え方を述べた後、会場の多数の参加者を交えて活発な討論がなされた。この討論は会場の若手研究者にも大いに刺激を与え、新しい試みは大いに成功したのではないかと考えている。特別講演も基礎理論、数値計算および実験の3分野を意識したもので、基礎理論1名、数値計算1名、実験2名の話のクロスオーバーを意識して講演していただいた。特に、実験の背後には理論が必要であることや、数値計算と理論の相互関係など様々な具体例とともに講演していただき、最新の研究の話題とあわせて参加者には好評であった。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人近くのにぼり、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。そして基礎研究と実験の立場の人がお互いに研究討論することも活発であった。これによって研究集会の目的は十分に達成できたと考える。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6日(月)

### ○13:00~13:30 Computation of high order pull-back transformations for algebraic Painlevé VI solutions

Raimundas Vidunas (九州大・数理学研究院)

Pull-back transformations of the hypergeometric differential equation occur prominently in the theory of algebraic solutions of second order ordinary differential equations (thanks to a famous theorem of Klein), and with algebraic transformations of Gauss hypergeometric functions. Properly branching pull-back transformations can be applied to algebraic solutions and algebraic transformations of Painlevé equations as well, as was noticed first by R. Fuchs, and recently by Ohyama and Kitaev. The talk demonstrates computation of high order pull-back transformations that give several complicated icosahedral solutions of the Painlevé VI equation.

### ○13:30~14:00 渦輪を用いた渦のつなぎ変え実験

松村直樹, 渡辺慎介 (横浜国大・工)

同じ方向に進む二つの渦輪の相互作用に関する実験を行い, 渦輪対が一つの歪んだ楕円渦輪につながり, その後再び二つの渦輪へとつなぎ換わる様子を実験により観測した.

### ○14:15~14:45 時間差分間隔の規格化と超離散化

岩尾 昌央 (東京大・数理学)

超離散化が可能になるメカニズムを知りたい. 以下の手続きを考える.

(イ) あるハミルトン系の一般解を作る

(ロ) 一般解をそのまま保存するように, 方程式の離散化を行う

(ハ) 離散系と一般解の双方を超離散化する

以上の手続きの(ハ)において「時間差分間隔の規格化」を行うことにより, 自動的に「超離散化」が可能になることを解説する.

### ○14:45~15:45 分岐制御による非線形現象の制御と利用の実例(特別講演)

藪野 浩司 (筑波大・システム情報工学)

機械システムモデルに発生する2, 3の非線形共振現象をビデオで紹介し, その励振メカニズムを明らかにしつつ分岐制御による安定化制御法を提案する. さらに, 分岐現象の積極的な利用の一例として劣駆動マニピュレータの運動制御を紹介する.

### ○16:00~16:30 周期箱玉系の逆散乱法

国場 敦夫 (東京大・総合文化), 高木 太一郎 (防衛大・応物), 竹野内 晃 (東京大・総合文化)

最も基本的な周期箱玉系において(Bethe仮説を利用し)逆散乱法を定式化する. これにより周期箱玉系の初期値問題が解かれる. また逆散乱法の副産物として周期公式および状態数上げ公式が導かれる.

### ○16:30~17:00 極低温原子気体における非線形ダイナミクス

佐々 成正 (日本原子力研究開発機構)

近年, 極低温下で量子凝縮状態にある原子気体系が注目されている. この系の(古典的)ダイナミクスは, ボーズ粒子系なら非線形シュレーディンガー方程式, フェルミ粒子系ならギンツブルグランダウ方程式で記述される. それぞれの系に特徴的なダイナミクスについて議論したい.

### ○17:00~17:30 From canonical bilinear forms to bi-hamiltonian structures

ウイロックス ラルフ (東京大・数理学)

KP階層の簡約として得られる1+1次元可積分系のbi-hamiltonian構造を考える. 1+1次元可積分系に関するrecursion operatorを「canonical」と呼ばれている双線形形式という形で表現し, その「canonical bilinear form」に対応するBaeklund変換を用いて, 元の可積分系のbi-hamiltonian構造を導き出す.

11月7日(火)

### ○9:30~10:00 確率的に拡張された交通流セルオートマトンの相転移ライン導出

酒井 聡士 (龍谷大・理工), 西成 活裕 (東京大・工), 飯田 晋司 (龍谷大・理工)

交通流セルオートマトンモデルについて, 車の慣性の効果, 運転手の見通しの効果, ランダムブレーキ効果をそれぞれ確率的に与えるモデルを提案し, そのシミュレーションと解析結果を発表する. この交通流モデルは, 確率パラメータを変えることで, これまでに発表された交通流モデルを表すことができる. シミュレーションについては, 現実の基本図と似た現象を再現した. 一方, 解析では, 開放系相図の相転移ラインについて, 主に平均場近似を用いて理論式を導くことができた.

○ 10:00~11:00 パターン・ダイナミクスの数理モデリングとシミュレーション (特別講演)

柳田 達雄 (北海道大学電子科学研究所)

パターン形成現象に関する話題として、

1. 粉体分離現象 (偏析現象) のセル・オートマトンによるモデリング
2. 反応拡散系におけるパルスダイナミクスに関する講演を行った。

粉粒体はサイズ、質量、表面の材質などの違いにより分離することが知られている。その典型例が回転円筒中の2種混合粉粒体である。この分離過程は短時間で径方向分離した後、回転軸方向のバンド状パターンの形成とその粗視化過程の3段階の時空間スケールから成る。偏析現象は多数粒子の相互作用に起因しているため、離散要素法などの直接的 (第一原理的) アプローチが困難な系である。また、なんらかの縮約なしにパターン生成機構を明らかにする事は難しいであろう。そこで、粒子の滑り運動と円筒回転運動を時間空間的に離散化されたセル・オートマトン (CA) によるモデル化を行い、分離3過程のメカニズムを解析した。

1次元 FitzHugh-Nagumo 方程式は、神経軸索の信号伝播現象を定性的に記述する簡単なモデルであり、波形を保ち一定速度で伝播する安定なパルス解を持つ。この興奮媒質の境界に周期的刺激により現れる伝播不全と共鳴伝播なる現象を見出した。これらの現象の生成機構は、パルス間相互作用が興奮的または抑制的にパルス間距離に依存する結果として生じることを数値的に示した。

○ 11:15~11:45 弾性棒の運動に対する変分原理と進行波解

福本 康秀 (九州大・数理学)

断面が円形で長さ方向に一樣な弾性棒の運動方程式を変分原理によって導いた。剛体的に並進運動するひもの形を渦ジェット糸とのアナロジーを援用して計算した。

○ 11:45~12:15 Wigner formula of rotation matrices and quantum walks

宮崎 玄洋, 香取 眞理 (中央大・理工), 今野 紀雄 (横浜国大・工)

量子的な拡散過程のモデルとして導入された量子ウォーク模型は、量子情報理論などとも関係して注目されている。最近、今野 (横浜国大工) は1次元上の2状態量子ウォーク模型に対して、量子ウォークの擬速度分布のモーメント収束定理を証明した。この極限分布は、古典的なランダム・ウォークで見られるガウス分布とは対照的で、中心 (出発点) 近くでの値が小さい逆釣鐘状の関数 (今野の密度関数) で表される。本講演では、多状態 (( $2j+1$ ) 状態) に拡張した1次元量子ウォーク模型を提案し、一般にその弱極限分布が、今野の密度関数を適当にスケール変換したものの重ね合わせで与えられることを示す。計算機シミュレーションの結果との比較も報告する。

○ 13:30~14:30 球と多面体のあいだの形: 合金中の微細な粒子の形状に関する考察 (特別講演)

尾中 晋 (東京工業大・総合理工)

ある組成の合金に適切な条件の熱処理を施すと、母相と呼ばれる地になる金属中に析出物と呼ばれる微細な粒子が出現する。析出物の形状は様々であるが、合金の種類と熱処理条件によっては、球と立方体のあいだの形状を持つ析出物が生じる。球と立方体のあいだの形を与える数式を用いて、この場合の析出物形状の由来と遷移を材料科学の観点から考察する。また、球と立方体のあいだの形を与える数式を発展させ、球と種々の凸型多面体のあいだの形状を与える数式を導出する。それらの数式は、何種類かの異なる低指数結晶面で構成される析出物の形状を考察する際に有用になる。

○ 14:45~15:15  $2+1$ 次元多成分長波短波共鳴相互作用

及川 正行 (九州大・応力研), 太田 泰広 (神戸大・自然科学), 丸野 健一 (The University of Texas-Pan American)

自由表面をもつ二層流体系における長波と短波の2次元相互作用を考える。短波の搬送波の波数ベクトルが長波短波共鳴の条件を満たす  $(k_x, k_y), (k_x, -k_y)$  の2つの場合に、近似方程式系を導き、簡単な解を与える。また、共鳴条件を満たす短波が多数ある場合の近似方程式系が推測される。

○ 15:15~15:45 Laurent 双直交多項式の持つ組合せ論的側面について: Schroeder 路を用いた行列式の計算と漸化式の導出

上岡 修平 (京都大・情報学)

Laurent 双直交多項式の行列式表現に現れる行列式の値を、複数の Schröder 路の配置の重みの総和を用いて書き下す。さらに、そこに現れる配置の構造から多項式の満たすべき三項間漸化式が導かれることをみる。

○ 15:45~16:15 新しい型のソリトン方程式

広田 良吾 (早稲田大名誉教授), 太田 泰広 (神戸大・自然科学)

現在までよく知られているソリトン方程式の  $N$ -ソリトン解はソリトンの相互作用を表す phase-shifts の項がすべて2体の積で表されている。phase-shifts の項が2体の積として表現できないソリトン方程式を発見し、 $N$ -ソリトン解の pfaffian による表現および方程式の差分化に成功した。

○ 15:20~17:00 パネルディスカッション

「非線形波動現象における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー」について

パネリスト

加藤 毅 (京都大学大学院理学研究科)

藪野 浩司 (筑波大学大学院システム情報工学研究科)

柳田 達雄 (北海道大学電子科学研究所)

中村 佳正 (京都大学大学院情報学研究科)

梶原 健司 (九州大学大学院数理学研究院)

司会 西成 活裕 (東京大学大学院工学系研究科)

非線形現象の解明は、現在ほぼすべての理工学での中心的な研究テーマとなっており、そのための実験や基礎理論の構築、現象のモデル化とその数値計算などが盛んに研究されている。しかし一方で研究が進み高度に専門化してきたため、理論、数値計算および実験の研究者の間の乖離も進んできているのも現状である。そこで、これら3分野において分野横断的に第一線で活躍している5名の研究者を迎え、今後いかにしてクロスオーバーしてゆくかについて考えを述べてもらった。また、約60名の会場参加者からも活発な意見を頂き、今後の非線形研究における新しい進展と異分野同士の有機的な結びつきについて話し合った。

○ 17:10~18:30 ポスターセッション

(1) 経路積分に基づく音場 (おんば) 解析の試み

小柳 慎一郎 (九州大・芸術工学)

波の伝播速度が不均一な媒質における音波の運動を記述する経路積分を、停留位相法を用いて解析的に調べる。そして、高周波近似によって得られる従来の幾何音響理論の結果と比較し、より現実的な音波伝播の記述を探る。

(2) Nahm 方程式の  $q$ -離散化とその解析

中村 厚 (北里大・理), 鎌田 勝 (木更津高専)

昨年に引き続き、モノポール方程式として知られる Nahm 方程式の  $q$ -離散化について考察する。特に戸田方程式型に簡約した系について、特異点解析、保存量の構成等を行う。

(3) 特異値分解を用いた画像分解における特異値クラスタを緩和するアルゴリズム

笹田 昇平, 近藤 弘一 (同志社大・工), 岩崎 雅史 (JST, SORST), 中村 佳正 (京都大・情報学)

本論では Kakarala-Ogunbona (KO) の画像分解アルゴリズムについて考察する。KO アルゴリズムは行列の特異値分解 (SVD) により画像分解を行う手法である。KO 分解における特異値はある画像においてクラスタをなすことがある。一般的な数値計算法は特異値がクラスタをなすとき左特異ベクトルを高精度に求められない。このとき、KO アルゴリズムの分解、再構成に悪影響を与える可能性がある。そこで本論では特異値クラスタを緩和するアルゴリズムを提案する。元画像にランダム模様を付加した画像から得られる左特異ベクトルをフィルタとして用いる。数値実験により提案アルゴリズムの有効性を示す。さらには、フィルタ行列の量子化について議論する。

(4) B スプラインガラーキン法による数値シミュレーション

杉本 昌平, 近藤 弘一 (同志社大・工)

発展方程式に対する数値スキームの多くは不連続な波やなめらかな波に対して不向きである。ウェーブレット変換は不連続な波に対して有効である。しかし、ウェーブレット変換の代表的な直交基底は明示的な関数で表されない。基底関数のサンプリング点は数値計算のみで計算可能であり、計算結果には数値誤差が含まれ得る。一方、双直交なウェーブレット基底の1つに B スプラインがある。B スプラインは区分多項式として明示的な関数で定義される。したがって、B スプラインを用いた数値計算においては基底関数に起因する数値誤差は少ないと期待される。本論では B スプラインガラーキン法による微分方程式の数値解法に関する詳細な実験を行い、実用上の有効性を検証する。

(5) Lie Symmetry を用いたくりこみ群の方法の差分方程式系への応用

巖佐 正智, 野崎 一洋 (名古屋大・理)

力学系における摂動問題について、系の対称性 (Lie Symmetry) を利用してその漸近解を構成するくりこみ群の方法を常微分方程式系に対して考案し、昨年の本研究会において発表した。今回、その方法を差分方程式に対して拡張し得たので、発表する。

(6) 等方的な BZ 反応セルオートマトンについて

西山 了允, 時弘 哲治 (東京大・数理科学), 田中 宏志 (島根大総合理工)

従来のセルオートマトンモデルではパターンを等方化するために非常に広範囲な近傍セルを選ぶ必要があり、反応拡散方程式を数値的に解くのに比べてセルオートマトンの利点を十分に生かしきれていなかった。我々のモデルでは、ルールに適当なランダムネスを加えることで、ムーア近傍程度でこれが可能

能となる。これにより大規模な系で、より現実的な解析が容易に行えるようになる。

#### (7) シンプレクティック変換で不変なソリトン方程式

土田 隆之 (岡山光量子科学研究所)

直交変換で不変なソリトン方程式 (例えば、結合型 mKdV 方程式) やユニタリ変換で不変なソリトン方程式 (例えば、結合型非線形シュレディンガー方程式) については、比較的多くの研究がなされてきた。この講演では、これまでほとんど調べられていないシンプレクティック変換で不変なソリトン方程式について報告する。

#### (8) 超離散 QRT 系の性質と拡張 Newton 多角形の形状との対応

坂元 琢治 (東京大・総合文化)

超離散 QRT 系の保存量を (tropical 幾何学の意味で) 逆 tropical 化してできる拡張 Newton 多角形の形状により分類した。その上で、超離散 QRT 系の性質をその拡張 Newton 多角形の形状との対応を利用して調べた。更に拡張 Newton 多角形の形状をもとに、ある保存量での周期に対する明示公式も得た。

#### (9) 対面二体流における異常現象

飯塚 剛 (愛媛大・理工)

セルオートマトンを用いて対面二体粒子の流れを考えた。流れが詰まる現象を、流れの持続時間および、粒子のクラスター化という立場で解析した。これは、歩行者流や粘性流における粉体などに応用できると考える。

#### (10) 3 粒子系戸田ポテンシャルと軌道の関係

河辺 哲次 (九州大・芸術工学)

可積分系である 3 粒子系戸田ハミルトニアン  $H(q, p)$  の軌道は、 $p=0$  とした任意の初期値  $q$ 、つまり、“自由落下運動”に対しては、特別な振舞をする。この原因を、ポテンシャルの対称性、可積分性、および、同次性などの観点から考察する。

#### (11) ソリトン理論を用いた 1 次元弾性体離散モデルのシミュレーション

崔 大宇 (東京大・工)

宇宙工学の分野のテザーで代表されるような 1 次元弾性体の挙動を、ソリトン理論を融合した離散モデルを用いてシミュレーションする。今回の発表ではこの理論を用いて、振動する 1 次元弾性体の安定化を図ってみる。

#### (12) 空中に浮遊した液滴表面の固有振動数について

榎 祐作, 井上 道雄 (東京大・工)

液滴表面を伝わる表面波の、液滴形状依存性を考察する。実験によると、空中に浮かんだ液滴を一定角速度で回転させて扁平形状にしたとき、その表面の固有振動数は無回転のときに比べ上昇することがわかっている。本研究では、その現象をシミュレーションで実現することを目的としている。

#### (13) 離散確率過程と $q$ -超幾何関数

何 健志 (立教大・理)

Claudio Albanese は Feynman-Kac の定理の偏微分方程式から、ラプラス変換を利用して 2 階の常微分方程式を導き、その解を超幾何関数で表現した。また、E. Csaki は、確率過程として対称ランダムウォークを用いて Feynman-Kac の定理の差分化を提案した。ここではパラメータ  $q$  を含む確率過程の Feynman-Kac の定理の差分化の 1 つを提案し、その解を  $q$ -超幾何関数を用いて表現する。

#### (14) 超幾何関数の関数等式と算術調和平均

榎 武史 (立教大・理)

算術幾何平均と超幾何関数との関係は Gauss によって、また 3 次の算術幾何平均と超幾何関数との関係が Borwein によって発見された。一方、算術調和平均は、中村らによって行列の平方根の数値計算に応用されている。

今回の研究では、超幾何関数の関数等式と積分で表される保存量を持つ差分方程式との対応について調べることで算術調和平均と、ある超幾何関数の関数等式との関係を考察する。さらに同様の手法を用いて得られる差分方程式のリストを作る。

#### (15) 富松-佐藤解の Legendre 多項式表現に関する考察

島崎 朋之 (立教大・理)

Ernst 方程式に対して、Neugebauer-Kramer 解という行列式型の特解が知られており、富松-佐藤解はそこからの退化で得られる。今回は、その場合の行列式の成分が Legendre 多項式で表わせることを示す。

(16) 確率共鳴に基づいた温度制御

小泉 一弥, 石渡 信吾 (横浜国大・工)

確率共鳴に基づいた確率的温度制御の方法を提案し, その実現を図った. 微弱な温度変化にノイズを加え閾値応答させるとチャタリング状態となる. このチャタリング出力でペルチェ素子の加熱-冷却を直接 ON/OFF 制御することによってマイコンを用いずに従来のパルス幅制御に比較し得る安定性を得る事ができた.

(17) 出入口付近でトラップされるキンクの運動

光藤 哲也, 早川 尚男 (京都大・基礎物理学研究所)

一次元 TASEP において, 系の端以外の場所で出入口を作るとキンクがトラップされることがわかった. 分子モーターモデルにおけるキンクの運動についても報告したい.

(18) 密度変化に伴う車線占有率の逆転現象関係についてのシミュレーション

山田 剛 (東京大・工)

2車線以上の高速道路において起こる, 密度によって車線占有率が逆転する現象についての研究成果発表

(19) 織込部における交通流シミュレーション

西 遼佑 (東京大・工)

織込部とは, 車線間の流量交換が頻繁に行われる「X」字型の道路であり, 渋滞が多発している. そこで, 実測データをもとに織込部をモデル化し, 数値シミュレーションを行うことにより, 渋滞発生メカニズムの解明および渋滞の改善を目指す. 交通流モデルとしては, CA モデルの一つである SOV モデルを用い, 車線変更のルール化にあたっては, 進路変更する車の占有セルを拡大させることにより, 後続車への影響を見積もる. シミュレーションの結果, 織込部の合流部への流入条件が渋滞の発生に大きく寄与していることがわかる.

(20) 踏み切りで一時停止は必要か?

友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工), 原田 義昭 (衆議院議員, 自民党)

本研究では, 従来の SOV モデルを改良したモデルを用いて踏切での一時停止の有無による流量について考察した. 遮断機が開いている状態の踏切での一時停止は日本特有の法律であり, この一時停止により様々な問題が生じていると考えられる. 中でも, 踏切での一時停止により流量が制限され, 踏切がボトルネックとなる深刻な渋滞が引き起こされている. そこでまず, 意図的に止まる状態と意図せずに止まる状態を区別することで, 従来の SOV モデルを改良したモデルを構成した. さらに, このモデルを用いて踏切での一時停止の有無による流量の比較をした結果, 一時停止がない場合は一時停止がある場合に比べて最大二倍多い流量になることがわかり, これは実際の実験データにも対応していることがわかった.

11月8日(水)

○9:30 ~10:00 回り込みと壁・障害物の効果による人の移動流量の変化

柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

自己駆動粒子である人が多数集まった群集は統計的性質を示すため, その運動を予想することが可能になる. 我々はこれまでセルオートマトンを用いたフロアフィールドモデルで群集運動を研究してきた. 群集運動の重要な指標の一つに出口などのボトルネックを通過する人の流量がある. 流量が大きいことは人がスムーズに移動していることを意味し, 小さいことはボトルネック付近で渋滞が起きていることを意味する. 本研究では居室にいる全ての人が共通の出口に向かって移動していく場合における出口付近での人の振る舞いをモデル化し, シミュレーションを行うと同時に平均場近似により出口から出る人の流量の式を導いた. 式を解析することにより, 出口が狭い場合は人とお互い協力した方が流量が大きい, 広い場合は競争した方が大きくなることが分かった. また人がゆっくりと出口に向かっている場合は出口が部屋の壁の真ん中にある方が流量が大きい, 急いで出口に向かっている場合は出口が部屋の角にある方が大きくなるということも発見した.

○10:00~10:30 黒微分と DS 方程式のはなし

井ノ口 順一 (宇都宮大・教育)

多くの 1+1 次元可積分系は微分幾何学的なモデルをもつことが知られている. 本稿では 1+2 次元の可積分系の例である Davey-Stewartson 方程式 (DS 方程式) の幾何学的意味を共形曲面論とシュワツ微分 (黒微分) を用いて考察する.

○10:45~11:15 確率量子化の手法で導かれる確率過程と非線形シュレディンガー方程式

矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 宇治野 秀晃 (群馬高専)

非線形シュレディンガー (NLS) 方程式の適切な保存則を選び, 密度関数の保存則である Kolmogorov の前進方程式に対応させると, 確率微分方程式が得られる. この方程式に従う確率変数は, NLS 方程式のソリトン解に付随して変化するが, 確率量子化の手法で, NLS 方程式を通じて対応づけられるハミル

トニアンを用いてその振る舞いを解釈することができる。

○ 11:15~11:45 **Connection matrices for ultradiscrete linear problems**

Chris Ormerod (The University of Sydney)

One may consider the appropriate domain for ultradiscrete equations to be the max-plus semiring. An analog of associated linear problems over the semiring are considered. Our main result being that despite the restrictive nature of this semiring, it is still possible to define a theory of monodromy analogous to that of Birkhoff and his school for systems of linear difference equations over the max-plus semiring. We use such theory to provide evidence for the integrability of some ultradiscrete difference equations.

○ 11:45~12:15 **液体シートのマランゴニ現象を表す二つの非線形方程式**

吉永 隆夫, 菅 健太郎 (大阪大・基礎工)

最近, 両面間で温度差のある液体シートに現れるマランゴニ現象を記述する二つの新しい非線形方程式を導出した. 講演ではこれらの方程式に対して解析的, 数値的に得られた定常, 振動, 爆発解などのいくつかの解や安定性について報告する.

○ 13:30~14:30 **力学系からのパターン形成とファミリーのくり返し写像 (特別講演)**

加藤 毅 (京都大・理)

ファミリーのくり返し写像から構成される力学系は, 極めて複雑なふるまいをし, その挙動を推測することはほとんど不可能といってよい. 一方で, 射影やスケール変換をして多くの情報を落とすことで, ある種のパターンを持ちうるものへと変換することが可能である場合がある. それをここでは力学系からのパターン形成とよぶ. ここでは非常に具体的なファミリーの写像から KdV 方程式の解への力学系のパターン形成を構成する. その過程で, トロピカル幾何学を用いる.

○ 14:45~15:15 **Calogero-Moser 模型の超可積分離散化 - Suris の可積分離散化との比較**

宇治野 秀晃 (群馬高専), Luc Vinet (Univ. Montreal), 矢嶋 徹 (宇都宮大・工)

, 吉田 春夫 (国立天文台)

Calogero-Moser 模型の可積分離散化には, Nijhoff-Pang による方法の他に, Suris による方法も知られている. 射影法の離散化によって導かれる超可積分離散化とこれらの可積分離散化を比較し, 相違点を挙げる.

○ 15:15~15:45 **ボトルネックによる渋滞形成**

只木 進一 (佐賀大・総合情報基盤センター), 山元 祥平 (佐賀大・工), 日永田 泰啓 (佐賀大・総合情報基盤センター)

ボトルネックのある高速道路を考える. ボトルネックは, トンネルやサグなど, 最高速度の低下を起こすことで, 実質的に流量の制限を行う. ボトルネックのある開放端の系について, 結合写像型最適速度交通流模型を用いたシミュレーションを行う. ボトルネックのすぐ上流には高密度の様な流れが発生し, その様な流れが不安定化することで, 上流に渋滞が発生する. ボトルネック強度 (速度低下の割合) と, 渋滞発生の有無, start-and-stop 波の発生位置, 移流不安定性との関係を議論する. さらにボトルネック強度と渋滞発生に関する現象論を構築する.

○ 15:45~16:15 **超離散 KdV 方程式のベックルント変換について**

磯島 伸 (青山学院大・理工), 久保 奨 (総務省統計局), 村田 実貴生 (東京大・数理学)

, 薩摩 順吉 (青山学院大・理工)

KdV 方程式のベックルント変換については代数計算のみで原理的に  $N$  ソリトン解を構成できる「重ね合わせ公式」が知られている. 本講演では, まず離散 KdV 方程式のベックルント変換と重ね合わせ公式を明示した. 重ね合わせ公式を用いて有界な  $N$  ソリトン解を得るためには, 連続系と同様に特異点を持つ  $(N-1)$  ソリトン解が必要になることを示した. 次にベックルント変換の超離散類似を導出した. 離散ソリトン解の超離散類似がこの変換を満たすことは明らかである. 一方, 重ね合わせ公式を超離散化するには特異解を扱う必要があるため, さらに研究が必要であることも報告した.

○ 16:25~16:55 **バスルートモデルとクラスター形成の解析**

友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では, CA を用いて新しいバスの運行システムを構築し, バスルートのシステム効率というものについて考察した. バスの運行システムにおける大きな問題点として「だんご運転」が挙げられる. これは, バス停での乗客の乗り降りの時間の影響で生じる問題であり, バスの運行システム効率に大きく関わってくる. そこで今回のモデルでは, まずバス停を設置するシステムとバス停を設置しない Hail-and-Ride システムとの比較をすることで, バス停を設置する条件について考察した. さらに, 今回導入した乗客の乗り降りに要する時間の効果で, バスのクラスター形成が再現でき, この結果は平均場近似による計算との整合性も確認できた. また, バス停に Information を持たせバス同士の間隔を調整することで, バスのクラスターが分散されることも示し, このことがより良いシステムにつながることもわかった.

○ 16:55～17:25 1/f noise の生成

佐藤 陽輝, 石渡 信吾, 渡辺 慎介 (横浜国立大・工)

1/f noise に関して, ある1つの生成メカニズムを提案した。これは, スペクトルが  $1/f$  を示すパルスの多数の重ね合わせによって 1/f noise を構成するものであり, RC回路を用いた指数緩和の組み合わせによって 1/f noise generator circuit を実現した。また, 同メカニズムで 1/f noise が破綻する条件についても考察した。

開催の期間 平成18年11月6日～平成18年11月8日

参加者 94名

# 研究集会「水波と浮体の相互干渉に関する力学」

研究代表者

大阪大学大学院工学研究科 高木 健

## 1. 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渉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渉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。

応用力学研究所の船舶海洋工学グループは、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、過去においても、「船体運動理論研究会」という少人数での研究会を主催していた。これを発展的に引き継いだ研究グループとして、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」、17 年度に「水波と浮体の相互干渉に関する力学」を主催した。これらの研究集会ではテーマを数理解析に絞って一定の成果を得た。特に、昨年度の研究集会では、海外から3名の参加者があり、国際的な裾がりを持つこともできた。また、(社)日本船舶海洋工学会西部支部の協賛を受け、研究集会参加者募集における、メール等での宣伝に便宜をはかってもらった。本年度もこのような動きをさらに発展させることを目的として研究集会を開催した。

## 2. 開催日時、場所

開催日時：平成18年10月27日(金) 13:00~18:00

10月28日(土) 9:00~12:30

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階

共同利用セミナー室(606号室)

## 3. 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渉)
- 船舶や海洋構造物と波浪との干渉問題(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, 弾性物体の相互干渉)

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、昨年度に引き続いて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。以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

## 1. A Numerical Analysis of Coupled Dynamics of Ship Motion and Sloshing Including Multi-Body Interactions

Sa Young Hong and Seok-Kyu Cho (MOERI/KORDI, Korea)

A numerical analysis method is developed to investigate coupled dynamics of ship motion and sloshing as well as multi-body interaction, which can effectively describe global behavior of FPSO and shuttle tanker and FSRU and LNG carrier. Ship motion including multi-body interaction effect is analyzed using a higher-order boundary element method to effectively describe multi-body interaction problem. Time-domain ship motion analysis is made using Cumins' model to utilize frequency-domain analysis results. Sloshing behavior is solved by Finite volume method and free surface is captured using VOF. Hamming method is used to couple ship motion and sloshing in time-domain, iteration is repeated until required convergence criterion is satisfied. Coupled effect due to ship motion and sloshing investigated for the case of ITTC stability committee comparative study on free decay problem of a tanker. The result showed very good agreement with experimental one. Finally coupled effect between FSRU-LNGC is solved for partially filled FSRU and LNGC. It is found that filling ratio of LNGC influences significantly on LNGC motion and the sloshing motion gives favorable effect to the LNGC near resonance period range.

## 2. Motion of LNG-FPSO, Coupled with Sloshing: Experiment vs. Computation

Boo-Woo Nam (Seoul National Univ., Korea), Don-Yeoul Yu (Samho Shipbuilding Co., Korea)  
Dae-Woong Kim (Daewoo Shipbuilding & Marine Eng. Co., Korea),  
Yong-Soo Kim (Daewoo Shipbuilding & Marine Eng. Co., Korea) and  
Yonghwan Kim (Seoul National Univ., Korea)

In the present study, the coupled problem has been solved by not only numerical method but also experiment. The numerical method to be considered is based on the coupling of an impulsive-response-function approach for ship motion and a finite difference method for sloshing flow. In particular, the sloshing flows are assumed to be governed by the Euler equation, and then the fully nonlinear sloshing-induced forces and moments are added to the wave excitation for ship motion. This implies the ship motion is solved in linear regime with nonlinear excitation. When this is the case, the motion responses of ships can be nonlinear with respect to wave condition. A series of model tests is carried out for the validation of the developed numerical scheme. The experimental model is the 1/100-scale model of a 284-m LNG-FPSO with two prismatic tanks. The ship motions are measured at different wave frequencies and amplitudes, and the motion RAOs are compared with numerical results. In actual ship design, the difference of sloshing-induced impact loads is of great interest between the coupled and uncoupled cases. Comprehensive computations are carried out for the observation of impact pressure on the tank walls when the ship motions are both coupled and uncoupled. In the present model, i.e. the LNG-FPSO, the ship motion shows coupling effects in shallow filling conditions, particular at high frequencies. When the coupling effects appear, it is found that the sloshing-induced loads can have significant difference with those of uncoupled case. Furthermore, due to the nonlinearity of sloshing flows, such difference is dependent on wave condition. A fair agreement of motion response is found between the numerical results and experimental data

## 3. Resistance Characteristics of a High-Speed Multi-Hull Ship

早川 功 (大阪大学大学院工学研究科学生)

本研究では超高速三胴船の性能向上とさらなる発展を目指し、超高速船について抵抗特性の見地から三胴船の可能性を追求する。まず、現在稼働中の高速船約 150 隻について統計分析をおこない、それらの船型要目、推進性能、輸送効率についての傾向を把握でき、高速船における三胴船の位置づけを確認できた。また、Wigley model を用いた模型実験（抵抗試験、波形解析）による造波特性と線形理論を比較し、理論の応用性を確認できた。次に、排水量一定の元で Wigley 型の単胴船、双胴船、三胴船の抵抗性能についてシミュレーションをおこない、Ship scale の全抵抗において、三胴船は単胴船に比べ有利であったが双胴船よりは不利であった。

最後に、三胴船の安定性、操縦性を考慮して、船長 114.8m の三胴船を船長 130m に伸ばして、同じ抵抗性能についてシミュレーションをおこなったところ、三胴船は双胴船よりも全抵抗を低くすることができた。これらより、三胴船は単胴船より全抵抗が小さいことはもちろん、双胴船よりも全抵抗を小さくすることが可能であることがわかった。

#### 4. Approximation of the Kochin Function

黒田麻利子(大阪大学大学院工学研究科学生)

A resistance of a ship with forward velocity in waves is larger than that in still water. It is known as the added resistance in waves. As the calculation method of added resistance in waves, Maruo's linear theory has been generally used. In this theory, a disturbance of waves is expressed by distributing singularities on wet ship surface, and this function is called Kochin function. However because of a long calculation time and a precision, an approximation method based on the slender assumption is used. Under this assumption, the calculated results agree with experimental data in slender ships. In case that a ship has a blunt bow or a ship is in the shallow draft condition, the results do not agree. In order to improve results in ships other than a slender ship, we propose approximation methods of the Kochin function according to ship shape type.

#### 5. Reflection and Transmission Waves Past an Antisymmetric Body Oscillating in Waves

柏木 正(九州大学応用力学研究所)

A theoretical study is made first on the reflection and transmission of surface waves by a 2-D antisymmetric floating body which is oscillating in response to a regular incident wave. As a consequence, a proof is given for the 'reciprocity' relationships associated with the transmission and reflection waves in the incident wave incoming from the right and incoming from the left, and also for the energy splitting law for the symmetric and antisymmetric components of the waves about a body. Next these findings are confirmed to be true by numerical computations performed with an antisymmetric Lewis-form body for all cases where the body motions are completely fixed, only the heave motion is free, and all modes of body motion are free.

#### 6. Sensitivity Study on SPH Method

Yoo-II Kim and Yonghwan Kim (Seoul National Univ., Korea)

A sensitivity study on the smoothed particle hydrodynamics method (SPH) has been carried out. This gridless Lagrangian particle method has been of great interest, particularly to simulate violent free surface flows. Despite the recent popularity of this method, unlike traditional grid-based numerical schemes, systematic sensitivity study for computational parameters is very limited for SPH. In the present study, the effect of computational parameters in SPH simulation is explored through two-dimensional dam-breaking and sloshing problems. The parameters to be considered are the speed of sound, the type of kernel function, the frequency of density re-initialization, particle number, and smoothing length. Through a series of numerical test, detailed information can be obtained about how SPH solution can be more stabilized and improved by adjusting computational parameters. So far, it is found that (i) naturally, increasing number of particles is beneficial, (ii) the speed of sound is one of most critical parameters in SPH simulation, (iii) applying density re-initialization in regular base shows huge improvement of results, (iv) the kernel function should cover a enough region for better accuracy, but the type of function does not provide dramatic difference, and (v) pressure quantity is dependent on numerical scheme to interpolate/extrapolate.

#### 7. Time Domain Approach on Hydroelastic Analysis of VLFS in an Extreme Wave

Johyun Kyoung and Sa Young Hong (MOERI/KORDI, Korea)

A numerical method is developed for transient hydroelastic response of VLFS in time domain. A finite element method is adopted for both the hydroelastic deformation of a pontoon-type very large floating structure and fluid motion with fully nonlinear free surface conditions. In the previous researches, the transient responses of VLFS are mainly treated by mode-expansion method and Fourier transform which uses so called retardation function which accounts the memory-effect. Because those approaches are basically linear problem, its use is not appropriate to solve the nonlinear problem such as storm surge response by a huge solitary wave elevation. In this study, a three-dimensional free surface flow is formulated in the scope of potential flow theory with the nonlinear free surface conditions. A finite element method based on Hamilton's principle is employed as numerical scheme for fluid domain. To describe the motion of VLFS the Mindlin plate modeling is adopted. The equation of plate motion is discretized by finite element method using virtual work principle and solved by Newmark method. To consider the fluid-structure interaction, the nonlinear problem is numerically solved through an iterative method at each time step. The developed numerical method is proved to be very robust and applicable to any arbitrary shape

of VLFS and fluid domain due to unified finite element formulation for fluid domain and plate.

## 8. A pFFT-FE Coupling for Hydroelastic Analysis of Floating Flexible Structure in Waves

高木 健(大阪大学大学院工学研究科)

A pFFT-FE coupling method, which can calculate the hydroelastic behavior of floating flexible structures, has been developed. The method can handle a very large number of constant hydrodynamic panels in a reasonable CPU time. The scheme uses a consistent way of the data passing in which the energy is conserved between the generalized modal damping and the radiation waves if the hydrodynamic analysis is accurate enough. In addition, the scheme satisfies the generalized Haskind-Newman relation between the modal diffraction force and the Kochin function. These properties are important to ensure the numerical accuracy. The numerical convergence and the accuracy of the method are demonstrated in various ways including the comparison with an experimental data. Finally an application to the sailing type offshore wind-power plant is shown to demonstrate the applicability of this method to the challenging problem.

## 9. Simulation of Wave-Induced Motions of a Turning Ship

安川宏紀(広島大学大学院工学研究科)

A practical method for simulating both ship maneuvering and wave-induced motions is presented. Separating the basic motion equations into 2 groups where one is for high frequency wave-induced motion problem and the other is for low frequency maneuvering problem, we derive the total 10 motion equations which are composed of 6DOF equations for high frequency problem and 4DOF (surge, sway, roll and yaw) equations for low frequency problem. New Strip Method was used for estimating the hydrodynamic force components such as added mass, wave damping and wave exciting forces for high frequency problem. The present method coincides with the time domain strip method when dealing with a ship straight moving problem. And when the wave height is set to be zero, the method coincides with the maneuvering simulation method in still water, so-called MMG model. Wave-induced motions for SR108 container ship model in turning condition were predicted using the present method. The predicted results are compared with the free-running model test results. The results roughly agree with the test results. The present method can capture the overall tendency of the wave-induced motions of the turning ship in time domain.

## 10. Applying THINC Scheme for Computation of Strongly Nonlinear Wave-Body Interaction

胡 長洪(九州大学応用力学研究所)

This presentation is about a recent research on implementation of THINC (tangent of hyperbola for interface capturing) scheme as an interface-capturing method to our CFD code named RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extreme Nonlinear hydrodynamics). The THINC scheme is a high efficient conservative interface-capturing scheme that can guarantee a sharp and non-oscillatory interface. However, treatment of the interaction between free surface and floating body is rather complicated. In this research, a new approach is shown with some numerical examples to simplify such treatment.

## 11. Numerical Computation Including the Free Interface by Means of a Conservative IDO Method

滝沢研二(海上技術安全研究所)

近年、CFDによる自由界面問題は発展してきており様々な問題に適応されている。一方で、高レイノルズ数での計算はあまり精度のよくないものが多い。そこで、本研究で既存の手法よりも高い精度で計算が行えるように、自由界面追跡に、位相誤差の小さな手法であるパーティクルレベルセット法を用い、流場の計算には非圧縮性流体の1相モデルとしてIDOを用い、これを保存形に拡張した。IDO法は乱流DNSでも精度が確かめられ、特に高レイノルズ数での計算を得意とする手法である。保存形IDO法は、保存形CIP法との類似点が多く、既存の手法の延長として扱えるが、保存性を重視し、また計算精度を損なわない工夫をするために様々な方法を検討している。計算例として、線形近似できる非常に小さな波高の伝播テストを行った。このテストでは高さ方向に2セル以下という荒いメッシュでも十分解析できることがわかった。

# 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

### 固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響

鈴木敏夫，渡邊 威，後藤俊幸

乱流中に浮遊する固体粒子の拡散の基本的性質（1粒子拡散，2粒子拡散，粒子の分布法則）とその乱流場への影響を直接数値計算を用いて解析を行った。固体粒子は点として扱い，ストークスの抵抗法則に従うと仮定した。この時，粒子の相対拡散がストークス数にどのように依存するかを調べた。また，固体粒子が存在することにより乱流がどの程度変形を受けるか，スペクトルやエネルギー輸送の観点から解析を行った。その結果として，ストークス数の増加に伴い乱流場への影響，特にエネルギースペクトルの散逸領域の増加という大きな影響がみられ，逆に散逸領域より低い低波数帯では若干のエネルギースペクトルの減少が確認された。それに伴ってエネルギー散逸率とレイノルズ数の減少，全エネルギーの減少が確認できた。粒子拡散係数についてもストークス数が増加すると大きく影響を受けて増大するのが確認された。

### 超流動場における渦輪の運動の数値解析

栢原正行，後藤俊幸

超流動場における渦輪の運動を，渦系法を用いて解析した。Biot-Savartの法則に加えて，常流体・超流体の二流体モデルを導入し，1つ，2つと少数の量子渦輪の運動から，多数の渦輪へと順を追って調べた。また，渦輪のつなぎ換え・分離条件の検証を行った。多数の量子渦輪の解析を行った結果，量子乱流は温度を変化させることで，振る舞いが大きく異なることがわかり，さらに長時間にわたる渦輪の拡散を調べた。

### 有限温度の減衰量子乱流における散逸構造の研究

小林 未知数，坪田 誠

我々は量子乱流とその周りの素励起を記述する Gross-Pitaevskii 方程式と Bogoliubov-de Gennes 方程式の連立系を数値的に解くことにより，量子乱流における散逸の微視的構造を調べた。低温では散逸が渦芯よりも小さなスケールでのみよく働くのに対して，高温では散逸が渦芯よりも大きなスケールにまで広がることによって量子渦のダイナミクスに直接影響を与えるようになる。我々はこの効果を超流動液体  $^4\text{He}$  における量子渦の相互摩擦力の効果と関連づけることにより，希薄原子気体ボース凝縮体中の量子渦における相互摩擦力係数の温度依存性を初めて導き出すことに成功した。

### 4次元乱流の微細構造

志賀義孝，中野 徹，後藤俊幸

直接数値計算によりシミュレートされた4次元(4d)乱流と3次元(3d)乱流を比較することにより，乱流の統計性や間欠性の次元依存性を調べた。4次元乱流の2-form(渦度に対応する)  $\Omega_{ij}$  の空間分布の可視化した結果や歪テンソル  $s_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) / 2$  の固有値の確率密度関数から，3次元乱流の  $\Omega_{ij}$  がライン状に分布するのに対して4次元ではシート状に拡がりを持って分布する。4dでのtotal散逸率  $\nu \sum_{i,j} (\partial u_j / \partial x_i)^2$  とそれに対応するスケール  $r$  での

速度差(球対称速度差)の間欠性は3dよりも弱く, surrogate 散逸率  $\nu(\partial u_1/\partial x_1)^2$  とそれに関係する縦速度差はわずかに強い。球対称速度差と縦速度差のスケーリング指数も調べた結果, 球対称速度差は4dのほうの間欠的でなく, 縦速度差は4dのほうの間欠的であった。

## ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

石崎龍二, 森肇, 富永広貴, 黒木昌一, 森信之

決定論的な時間発展方程式を非マルコフな線形確率方程式に変換し, 記憶関数を数値的に求める方法を, ヘノン-ハイレス系を例にして報告した。具体的には, 森の射影演算子法を援用して, ヘノン-ハイレス系の運動方程式を非マルコフな線形確率方程式に変換した。さらに, 非線形力の時間相関関数を用いて, 振動数依存性のあるカオス誘導摩擦係数や記憶関数を数値的に求めた。その結果, ヘノン-ハイレス系のカオス運動は, 時間相関関数の相関時間と記憶関数(揺動力の時間相関関数)の相関時間に, あまり差がなく, 長いタイムスケールと短いタイムスケールの揺らぎに分離できないということがわかった。

## Duffing 振動子系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

富永広貴, 森肇, 石崎龍二, 黒木昌一, 森信之

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周波数依存カオス誘導摩擦係数を理論的に求め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。

## 二軸回転球を用いた乱流生成装置

後藤 晋, 石井伸和, 木田重雄, 西岡通男

歳差運動する球体を用いた新しい乱流生成維持装置を提案する。球体の歳差運動は一定角速度  $\Omega_p$  で回転するターンテーブル上で, 一定角速度  $\Omega_s$  で球体を回転(自転)させることで容易に実現される。われわれは自転軸と歳差軸とが直交する場合の室内実験を遂行した。その結果, 自転角速度に基づくレイノルズ数  $Re = a^2\Omega_s/\nu$  (ここで  $a$  は球体半径,  $\nu$  は流体の動粘性係数) が数 1000 以上であれば, 十分に弱い歳差でも乱流状態が維持されることが示された。また,  $Re = O(10^4)$  程度の乱流の複雑度は, 同じレイノルズ数なら歳差強度  $\Omega_p/\Omega_s$  が 0.1 程度で最大化することも明らかとなった。

## 2 軸回転球体流れの安定性

木田重雄, 松原大樹

一定角速度  $\Omega_s$  で回転する球の回転軸が, その軸に垂直な軸のまわりに別の一定角速度  $\Omega_p$  で回転している。この球の内部の非圧縮粘性流体の運動の様相は, レイノルズ数  $Re = a\Omega_s/\nu$  ( $a$  は球の半径,  $\nu$  は流体の動粘性係数) と歳差強度  $\Gamma = \Omega_p/\Omega_s$  の大きさに依存して異なる。ここでは, これら 2 つの支配パラメータで張られる面上において, 流れの定常状態と非定常状態の境界をナビエ・ストークス方程式の直接数値シミュレーションにより求め, 臨界値が約  $(Re, \Gamma) = (1, 270, 0.14)$  であることを示す。

## 経済物理と乱流現象

中野 徹

経済での価格の変動と乱流での速度の変動は大変似ているので, 両者を共通の手法で持って理解出来るはずである。経済と乱流での揺らぎの分布とその増分の構造関数に焦点を絞った講演をする。

## 連結階層シミュレーションで探るマルチスケール・マルチフィジクス・ダイナミクス— 現状と展望—

草野完也

極めてスケールの異なる物理プロセスの相互連関が本質的役割を果たすマルチスケール・マルチフィジクスダイナミクスのシミュレーションは様々な科学技術分野における共通した課題になっている。連結階層シミュレーションはマクロスケールとミクロスケールに適合した計算モデルを有機的に連結することで, マルチスケールの連関を計算に取り込む試みであり, 流体力学のみならず固体力学, プラズマ物理学, 大気科学などにおける応用が期待されている。本稿では粒子モデルと連続体モデルの連結を中心に, 典型的な階層間連結手法の概要を説明すると共に, その応用として地球シミュレータセンターで実施している燃焼流体および雲形成に関する連結階層シミュレーション研究の成果を紹介する。

## カオス力学系の大偏差統計, ギブス測度, 位相共役変換に関する若干の考察 宮崎修次

Chaotic piecewise linear map whose statistical properties are identical to those of a random walk on directed graphs such as the world wide web (WWW) is constructed, and the dynamic quantity is analyzed in the framework of large deviation statistics. Gibbs measures include the weight factor appearing in the weighted average of the dynamic quantity, which can also quantitatively measure the importance of web sites. Currently used levels of importance in the commercial search engines are independent of search terms, which correspond to the stationary visiting frequency of each node obtained from a random walk on the network or equivalent chaotic dynamics. Levels of importance based on the Gibbs measure depend on each search term which is specified by the searcher. Also is discussed topological conjugate transformation between one dynamical system with a Gibbs measure and another dynamical system whose standard invariant probability measure is identical to the Gibbs measure.

## 不安定周期軌道を用いた多自由度カオス力学系における動的相関関数の決定 小林 幹, 藤坂博一

近年, 乱流に埋め込まれた一本の不安定周期軌道を用いて, 乱流の静的特性を再現する研究がなされた。それに対し, 我々はカオスに埋め込まれた一本の不安定周期軌道を用いて, 多自由度カオス力学系の動的な特性である時間相関関数を近似的に決定する方法を提案した。ここでは, 多自由度カオス力学系の一つである大域結合ロジスティック写像を用いて, 我々の方法の妥当性を検証した。

## 液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己

Directed Percolation (DP) クラスに属する相転移の実験的証拠を示す。独立な臨界指数全てが良い精度で一致したのは実験研究では初めてのことである。

DP は吸収状態への相転移を議論する際の基本モデルであり, そのユニバーサリティクラスは多種多様なモデルで見られることが数値的・理論的に確立されているが, 実験的にそれが十分な信頼性をもって観測されたことは未だかつてなく, 大きな未解決問題の1つとして認識されている。本研究では, 時空間欠性乱流が DP で記述できるという Pomeau の予想に着目し, ネマティック液晶の電気対流系でみられる2種類の乱流状態間 (DSM1-DSM2) の時空間欠性を扱う。実験は電圧一定の定常状態と電圧急降下の際のクエンチ状態の2通りについて行い, 臨界指数も含めて DP と精度よく一致する結果が得られた。

我々はまた, DSM1-DSM2 転移において知られていた, 電圧の掃印速度に依存する特異なヒステリシス現象が DP と稀な自発生成を仮定することで説明できることを示した。それにより, このヒステリシスがほぼ吸収状態への相転移でユニバーサルに見られるものであろうことが判明した。

## 三次元一様等方性乱流直接数値計算データベースのウェーブレット解析—エネルギー伝達について— 岡本直也, 芳松克則

十分に発達した高レイノルズ数乱流における, エネルギートランスファー(グリッドスケールに含まれるあるスケールから, サブグリッドスケールへのトランスファー)の小スケールの統計について調べた。テラーマイクロスケールレイノルズ数  $R_\lambda = 167$  から 732 にわたる三次元非圧縮一様等方性乱流の正規直交ウェーブレット解析を行った。位置とスケールで局在したエネルギートランスファーの各スケールにおけるゆらぎや, グリッドスケールからサブグリッドスケールへの流入に対する, グリッドスケール中の各スケールの役割を調べた。また, そのエネルギートランスファーとエネルギーの各スケールにおける相関を調べた。本報告では,  $R_\lambda = 471$  のデータに対する結果の一部について述べる。

## パッシブスカラーの異常スケーリングに関する固有値問題の数値計算 水野吉規, 金田行雄, 山本有作

Kraichnan モデルに基づいて, 乱流中のパッシブスカラー場の4点相関関数の支配方程式を得ることができるが, 4次構造関数などの微小なスケールにおけるスケール依存性は, この方程式から導かれる固有値問題の解によって決定される。ここでは, この固有値問題を数値的に解くことを行った。計算された固有値は, 同じ方程式に対する漸近解析の結果と, パッシブスカラーの直接数値シミュレーションから得られる構造関数のスケーリング指数ともよく一致していることが確認された。ただし, 本計算の特色は固有値としてさまざまな統計量のスケーリング指数が得られるだけでなく, 固有関数としてそれらの観測点の配置への依存性も得られることにある。ここでは, この固有関数を用いて, スカラー差  $(\psi(\vec{x}_1) - \psi(\vec{x}_2))^2$  と  $(\psi(\vec{x}_1) - \psi(\vec{x}_3))^2$  の相関を調べた。パッシブスカラーに対する相関はガウス場に対する相関よりも, 特に  $\vec{x}_1 - \vec{x}_2$  と  $\vec{x}_1 - \vec{x}_3$  の方向が大きく異なる範囲で強くなることがわかった。

## 渦輪の非線形不安定性

服部裕司, 福本康秀

渦輪の不安定化現象について, 非線形領域における挙動を調べるため, 直接数値シミュレーションを行った. 曲率不安定性をとらえることを目的として, トーラス内部に閉じ込められた渦輪を対象とし, トロイダル座標系における Navier-Stokes 方程式の数値解法を開発した.

## Modeling of a vortex ring flow at high Reynolds number

Felik Kaplanski

Typical shapes of laminar and turbulent vortex rings were demonstrated in paper by Glezer and Coles (1990). The first one is characterized by a relatively thin core compared with the second one. It was shown that the hydrodynamic impulse in both cases is conserved within the experimental error. Based on the above-mentioned findings an approximate model for describing of the vortex ring at high Reynolds numbers is suggested. The present contribution extends the analysis reported previously (F. Kaplanski, and Y. Rudi, 2005), where only the diffusive scale was considered. As expected, the formulation of the problem with the arbitrary scales allowed us to select cases when approximate solutions exist and take into account the turbulent length scales. Introducing the time-dependent turbulent eddy viscosity (Lugovtsov, 1976), the model for a laminar vortex ring is generalised to flows at high Reynolds numbers. This generalised model, based on the computational methodology reported in (B.J. Cantwell, Introduction to Symmetry Analysis, 2002), is used to obtain the topological change of the flow.

## 低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数

柴田博史

空間 3 次元一様乱流について, 乱流粘性係数の計算を行なった. 系の大きさは  $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$ , 格子点を  $100 \times 100 \times 100$  にとり, 格子ボルツマン法を用いて一様乱流のシミュレーションを行なった. 比較した一様乱流のレイノルズ数は 19.09 と 4.44 である. また, 周期境界条件を設定した. 実際には運動量流れの 2 時間相関関数の計算を行なった. 結果は, 運動量流れの 2 時間相関関数の取る値が, レイノルズ数が 19.09 のとき 4.44 のときに比べ, 圧倒的に大きかった. これは, レイノルズ数が大きいほど乱流粘性係数が大きいことを示唆しており, 乱流運動が発達するほど乱流粘性係数は大きくなると思われる.

## 射影演算子法における渦粘性の数値的評価

岡村 誠

空間 1 次元の乱流モデルである Kuramoto-Sivashinsky 方程式を基礎方程式として, 射影演算子法の定式化において渦粘性を数値的に評価した. 別の方法によって渦粘性を評価した過去の研究の結果とほぼ同じ値が得られた.

## ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性

金田行雄

発達した乱流中の単位時間あたりのエネルギー散逸率  $\varepsilon$  の統計を非圧縮一様等方性乱流の直接数値計算 (最大格子点数  $2048^3$ , テイラーマイクロスケールレイノルズ数約 728) のデータを用いて調べた.  $\alpha < 1$  と  $r_0$  を定数,  $r_n = r_0 \alpha^n$  とし,  $\varepsilon_n$  を散逸率  $\varepsilon$  の半径  $r_n$  の球内における平均,  $\alpha_n = \varepsilon_{n+1}/\varepsilon_n$  とするとよく知られているように  $\varepsilon_{n+1} = \alpha_n \varepsilon_n$  と書くことができ, 数列  $\{\varepsilon_n\}$ , ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) はランダムな係数  $\alpha_n$  が次々と掛け算される乗算過程とみなすことができる. DNS データによれば  $\{\alpha_n\}$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) どうしの相関は  $\varepsilon_n$  の統計に無視できない影響を持つ. また,  $\alpha_n$  と  $\alpha_{n+k}$  の相関の  $n$  への依存性が弱いという意味で相似的なスケール領域が存在する.

## 低レイノルズ数正方形ダクト乱流の秩序構造

河原源太, 関本 敦, M. Uhlmann, A. Pinelli

正方形断面をもつ真っ直ぐなダクト内の十分発達した乱流の直接数値シミュレーションを行った. 乱流が持続する限界状態に現れる秩序構造, 及びプラントルの第二種二次流れの出現と秩序構造との関連性について議論する.

## 壁乱流における圧力統計量のスケーリングについて 辻 義之

境界層中で計測された圧力変動データを基に、その標準偏差やスペクトルなどの統計量のスケーリングについて考察する。とくに、従来から議論されている内層変数、外層変数での無次元化が圧力等計量にどの程度有効なのかを、速度変動との相違に触れながら報告する。また、幾つかのDNS（境界層、チャンネル、円管）などとの比較とRe数依存性についても考察する。

## 乱流シェルモデルの準周期解 梅木 誠

2つの代表的な乱流シェルモデルである、Gledzerのオリジナルな実変数モデルと、Gledzer-Ohkitani-Yamada (GOY) 複素変数モデルの少数(4~10)モードでの数値計算を、粘性係数 $\nu$ を詳細に変化させて行い、2重周期解を含むアトラクターの詳細な分岐構造を明らかにした。2重周期解のポアンカレ写像は、一般化したサークル写像でよく近似できる。また、複素変数モデルの対称性について考察し、対称性を課せば、外力の数が1または2の場合には複素モデルが実モデルを含んでいることを示した。

### 3 プログラム

11月23日(木) ◯印は特別講演

- 13:30-14:00 鈴木敏夫, 渡邊 威, 後藤俊幸(名工大)  
固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響
- 14:00-14:30 栢原正行, 後藤俊幸(名工大)  
超流動場における渦輪の運動の数値解析
- 14:50-15:20 小林 未知数, 坪田 誠(阪市大院理)  
有限温度の減衰量子乱流における散逸構造の研究
- 15:20-15:50 志賀義孝, 中野 徹(中大理工), 後藤俊幸(名工大)  
4次元乱流の微細構造
- 16:10-16:40 石崎龍二(福岡県立大), 森隆(九大応力研), 富永広貴(佐賀大医), 黒木昌一(福岡女子大), 森 信之(九州共立大工)  
ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数
- 16:40-17:10 富永広貴(佐賀大医), 森隆(九大応力研), 石崎龍二(福岡県立大), 黒木昌一(福岡女子大), 森 信之(九州共立大工)  
Duffing 振動子系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

11月24日(金)

- 9:00-9:30 後藤 晋, 石井伸和, 木田重雄, 西岡通男(京大工)  
二軸回転球を用いた乱流生成装置
- 9:30-10:00 木田重雄, 松原大樹(京大工)  
2軸回転球体流れの安定性
- 10:20-11:20 中野 徹<sup>○</sup>(中大理工物理)  
経済物理と乱流現象
- 13:00-14:00 草野完也<sup>○</sup>(海洋研究開発機構地球シミュレータセンター)  
連結階層シミュレーションで探るマルチスケール・マルチフィジックス・ダイナミクス—現状と展望—
- 14:20-14:50 宮崎修次(京大情報)  
カオス力学系の大偏差統計, ギブス測度, 位相共役変換に関する若干の考察
- 14:50-15:20 小林 幹, 藤坂博一(京大情報)  
不安定周期軌道を用いた多自由度カオス力学系における動的相関関数の決定
- 15:40-16:10 竹内一将, 黒田真史(東大理物理), Hugues Chaté (CEN Saclay), 佐野雅己(東大理物理)  
液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ
- 16:10-16:40 岡本直也, 芳松克則(名大院工)  
三次元一様等方性乱流直接数値計算データベースのウェーブレット解析—エネルギー伝達について—
- 16:40-17:10 水野吉規, 金田行雄, 山本有作(名大院工)  
パッシブスカラーの異常スケーリングに関する固有値問題の数値計算

11月25日(土)

- 9:00-9:30 服部裕司(九工大工), 福本康秀(九大数理)  
渦輪の非線形不安定性
- 9:30-10:00 Felik Kaplanski (Tallinn University of Technology)  
Modeling of a vortex ring flow at high Reynolds number
- 10:20-10:50 柴田博史(崇城大工総合教育物理)  
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数
- 10:50-11:20 岡村 誠(九大応力研)  
射影演算子法における渦粘性の数値的評価
- 13:00-14:00 金田行雄<sup>○</sup>(名大院工)  
ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性
- 14:20-14:50 河原源太, 関本 教(阪大基礎工), M. Uhlmann, A. Pinelli (CIEMAT)  
低レイノルズ数正方形ダクト乱流の秩序構造
- 14:50-15:20 辻 義之(名大院工)  
壁乱流における圧力統計量のスケーリングについて
- 15:40-16:10 梅木 誠(東大理)  
乱流シェルモデルの準周期解

#### 4 開催日程, 場所

開催日程 2006年11月23日(木) - 11月25日(土)  
開催場所 九州大学応用力学研究所多目的研究交流室(W601号室)  
講演数 23件  
参加者数 37人

