

# THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第 78 号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.78)

Nov. 21st 2012

## 研究室紹介

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻  
酒井研究室 酒井幹夫

2012 年 4 月より、著者は東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻に所属し、主として粉体が係る数値シミュレーションの研究に従事している。本報では、まず、粉体シミュレーションの原子力工学への応用について述べ、その後、著者らの研究内容を紹介する。

### 1. 研究室の構成と研究概要

酒井研究室は、教員 1 名、博士課程 3 名、修士課程 3 名、学部生 2 名の合計 9 名で構成される。本研究室では、主として、離散要素法 (Discrete Element Method: 以下、DEM と記す) と呼ばれるラグランジュ的手法を用いた粉体シミュレーションに関する研究、オイラー・ラグランジュ法およびラグランジュ・ラグランジュ法を用いた固体・流体連成問題の数値解析に関する研究、粉体・弾性体連成解析に関する研究、粉体シミュレーションの並列計算に関する研究および粉体シミュレーションの検証実験を行っている。

まず、粉体シミュレーションについて概説したい。意外なことかもしれないが、粉体工学は、原子力工学と密接に関わっており、例えば、核燃料製造工程や再処理工程がある。核燃料は一般的な多くの粉末プロセスを経て製造される。ガラス固化では高レベル廃液に含まれる白金族粒子などの微粒子挙動の評価が重要になる。このような粉体が係る実用的な問題について、近年の計算機性能の大幅な向上により、粉体シミュレーションが応用されるようになってきた。そのため、粉体と流体が相互作用するような数値解析手法が開発され、様々な体系に応用されつつある。著者らは、DEM とオイラー的手法またはラグランジュ的手法の流体解析 (Computational Fluid Dynamics: 以下、CFD とする) 手法を連成した新しい数値解析手法の開発に取り組んでいる。また、著者らは、ラグランジュ

的手法の流体解析手法の MPS (Moving Particle Semi-implicit または Moving Particle Simulation) 法に関する研究にも取り組んでいる。MPS 法のガラス固化プロセスへの応用のために、高粘性流体の数値解析を効率よく実行するための研究を行ったり、陽的アルゴリズムを用いた MPS 法の開発を行ったりしており、特にラグランジュ的手法による流体解析の産業応用に着目した研究を進めている。以下に、これらの研究内容について述べる。

### 2. 研究内容

#### 2.1 DEM-CFD 法による固気混相流の数値解析

DEM-CFD 法は、固相および気相を、それぞれ、DEM および格子法の流体解析を連成する手法である。DEM-CFD 法は、主として、化学工学や機械工学における流動層をはじめとする固気混相流に応用された。原子力工学においても流動層は使用される。例えば、高温ガス炉で使用される TRISO 型被覆燃料粒子は、流動層においてコーティングがなされる。

DEM は、個々の固体粒子の挙動を計算するため、解像度の観点から高精度である。他方、産業の粉体プロセスのような 10 億個超の固体粒子を処理する体系への DEM の応用は、計算負荷が著しく高くなるため、極めて困難になる。従って、DEM は計算粒子数の実質的に制限される。このような問題を解決するために、著者らはスケール則に基づく大規模体系モデルとして、DEM 粗視化モデル[1-3]を開発した。DEM 粗視化モデルは、オリジナル粒子群をひとつの大きなモデル粒子で代表して計算する手法である。すなわち、オリジナル粒子よりも粗視化率分大きくしたモデル粒子を使用する。著者らの開発したスケール則モデルは、モデル粒子とオリジナル粒子群の全エネルギーがバ

ランスするように定式化されている。当然ながら、ファンデルワールス力や液架橋力のような付着力を有する粉体の挙動も模擬することができる。なお、他にもスケール則に基づく DEM の大規模体系モデルがいくつか開発されたが、いずれも接触力のモデル化が不完全である。以下に、DEM 粗視化モデルの応用例を紹介する。

DEM 粗視化モデルの応用事例として、最小流動化速度の評価[3]を紹介する。0.03 m × 0.36 m の 2 次元流動層において、最小流動化速度を評価して、DEM 粗視化モデルの妥当性を検証するために、4 ケースの数値解析を実行した。Case 2-1 は粒子径 200 μm のオリジナル粒子体系である。Case 2-2 および 2-3 において DEM 粗視化モデルを適用し、オリジナル粒子よりも 2 倍および 3 倍大きな粗視化粒子を使用した。Case 2-4 の粒子径は DEM 粗視化モデルを使用しないで、ただ単に 3 倍大きな粒子（粒径 600 μm）とした。計算粒子径が等しい Case 2-3 および Case 2-4 を比較して、DEM 粗視化モデルの有効性を検証した。最小流動化速度を算定するにあたり、空塔速度は図 1 に示すように減少させた。気相の物性は空気を想定した。付着力としてファンデルワールス力を導入し、Hamaker 定数を  $1.0 \times 10^{-20}$  J に設定した。図 2 に Case 2-1 および Case 2-3 における数値解析結果を示す。気泡は、空塔速度の減少とともに小さくなり、最終的には出現しなくなった。気泡の大きさおよび層高の時間変化は、オリジナル粒子体系および DEM 粗視化モデルを適用した体系においてよく一致した。図 3 に数値解析より得られた空塔速度と粉体層の圧力損失の関係を示す。Case 2-1 から Case 2-3 において、空塔速度と粉体層の圧力損失の関係はよく一致し、最小化流動速度は約 0.02 m/s に見積もられた。これにより、DEM 粗視化モデルがオリジナル粒子体系の最小流動化速度を模擬できることが示された。なお、本報には示していないが、Case 2-4 のように DEM 粗視化モデルを使用しないで、ただ単に大きな粒子を使用した場合、粉体層はほとんど動かなかった。これより、ただ単に大きな粒子を使用して DEM の大規模解析を実行しても期待した結果が得られないことも示された。

数値実験により DEM 粗視化モデルの妥当性を検証しようとする、オリジナル粒子体系の計算負荷が大きくなるため、粗視化率はせいぜい 3.0 から 4.0 倍しか設定できない。これでは、産業界のように数十億粒子で構成される体系に DEM 粗視化モデルを応用できるのかどうかかわからない。粗視化率が大きな体系における DEM 粗視化モデルの検証は、実験と数値解析の結果を直接比較することが効率的である。そこで、著者らは、最近、流動層において、DEM 粗視化モデルを用いた 3 次元数値解析を行い、実験により検証した [4]。ラボスケールの流動層実験装置 (0.05 m × 0.2

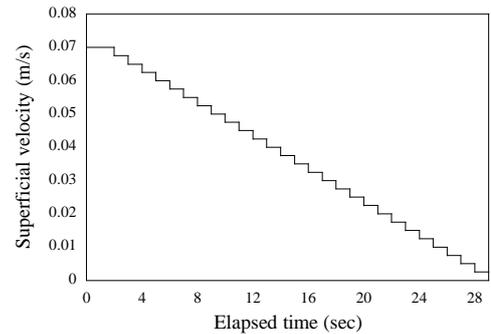
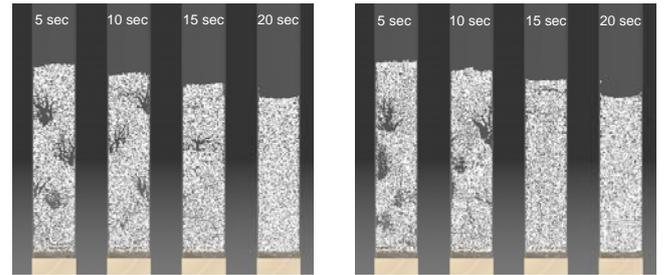


図 1 空塔速度の時間変化



(a) Case 2-1: オリジナル体系 (b) Case 2-3: 粗視化率 3.0

図 2 数値解析結果の一例

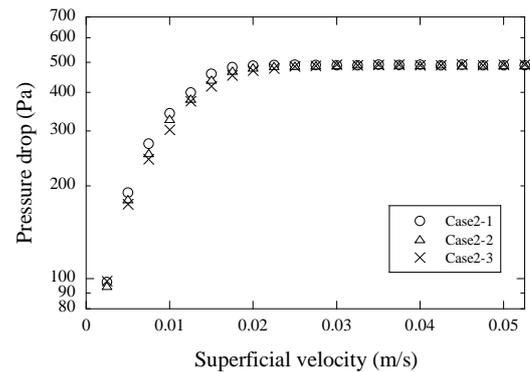
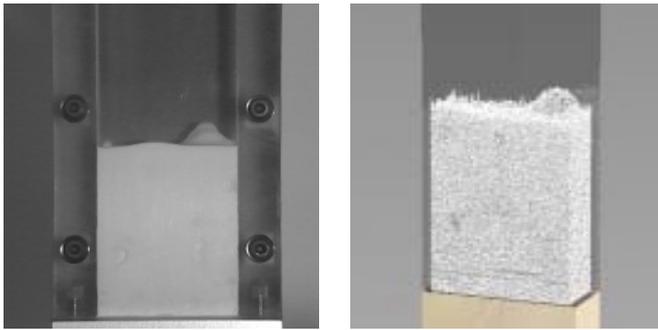


図 3 空塔速度と粉体層の圧力損失の関係

m × 0.02 m) に 6480 万個に相当するジルコニア粉末を充填し、炉底部に 0.05 m/s の流速でガスを注入し、粉体層の高さおよび圧力損失を測定した。図 4 に数値解析および実験より得られた典型的なスナップショットを示す。粉体層の高さを測定したところ、両者はよく一致した。図 5 に数値解析および実験より得られた圧力損失を示す。両者の圧力損失もよく一致した。このように、DEM 粗視化モデルを用いることにより、実際よりも少ない計算粒子で、大規模体系における粉体のマクロ挙動を模擬できることが示された。これは、スーパーコンピュータのような計算機を用いなくても、DEM 粗視化モデルを使用すれば、通常入手可能な PC を用いて、大規模体系を計算できることを意味する。

## 2.2 固液混相流のレオロジー特性に関する数値解析

固体粒子周りの流れ場を精度よく計算するために、



(a) 実験 (b) 数値解析  
図4 準定常状態における流動層の状態

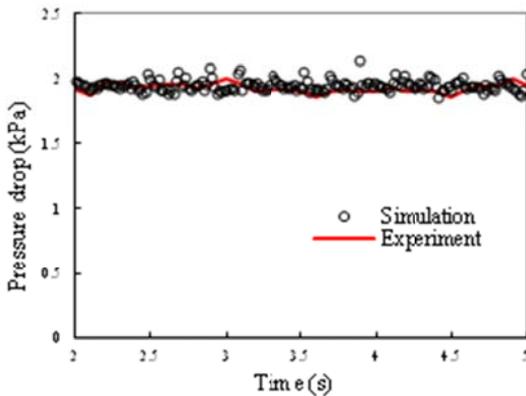


図5 準定常状態における流動層の状態

Direct Numerical Simulation (以下、DNS と記す) を用いることがしばしばなされる。DNS を用いて、固体粒子と流体の相互作用を計算するにあたり、埋込境界法を導入する。DEM と埋込境界法を用いた DNS を連成した手法は、しばしば、DEM-DNS 法と呼ばれる。固体粒子に作用する流体力学的相互作用力を直接計算により算定するため、凝集した複雑形状の粒子群であっても抗力などを評価することができる。このような技術は、熔融ガラス中の白金族粒子の挙動が見かけ粘度に及ぼす影響を評価することに応用できる。

著者ら[5]は、直径  $1 \mu\text{m}$  の白金族粒子が含まれる熔融ガラスにおいて、白金族粒子の凝集・分散状態と見かけ粘度の関係を計算した。本報では、分散状態における見かけ粘度に絞って説明する。分散状態における見かけ粘度の評価は、図6に示すような矩形の計算領域で行った(領域寸法  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 、固相の体積分率 20% を例示)。y 方向の上面および底面にずり速度を与え、x 方向および z 方向に周期境界を与えた。固相の体積分率を 5.0%、10%、20% および 30% に設定した。DEM-DNS 法を用いた計算結果について、ずり速度と相対粘度の関係は、図7のようになり、分散状態ではニュートン性流体になることがわかった。さらに、数値解析結果を分散状態における粘度の経験式(Kuriedger-Dorrey の式など)と比較した。図8に示すように、数値結果と実験結果はよく一致したため、

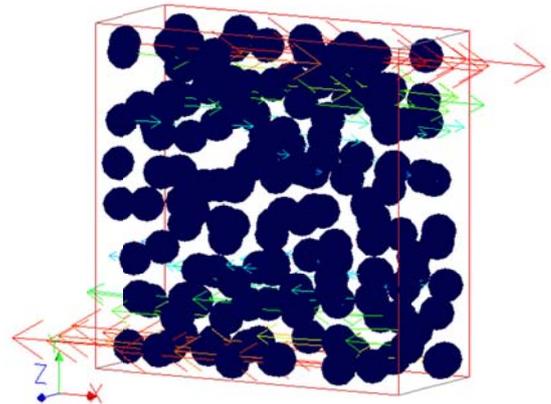


図6 ずり速度作用時のコロイド粒子の挙動

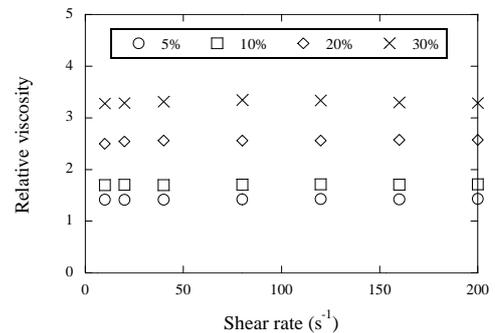


図7 ずり速度と相対粘度の関係

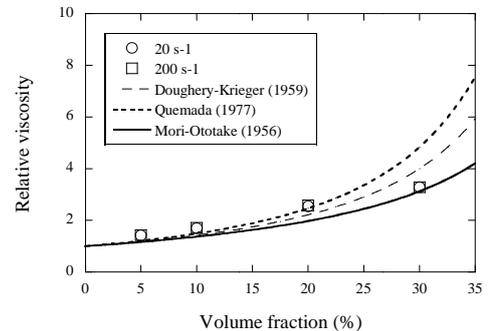


図8 固相の体積分率と相対粘度の関係

DEM-DNS 法により、分散状態における粘度を精度よく評価できることが示された。今後、白金族粒子が含まれる熔融ガラスのレオロジー特性は、数値解析を駆使して明らかになっていくと期待される。

### 2.3 高粘性流体の数値解析

MPS 法は自由液面流れを精度よくするための手法のひとつである。MPS 法の原子力工学への応用はかなり進んでおり、配管への液滴衝突[6,7]をはじめ、自由液面を伴う流体の挙動について研究が活発に行われている。最近では、微圧縮を取り入れ圧力を陽的に計算する Explicit MPS 法が開発[8-10]され、並列計算の容易さや時間刻みを大きく設定できることから、大規模体系の計算を効率的に実行できることが示されるようになってきた[10]。また、DEM と MPS 法を連成した



図9 実機スケール流下試験装置

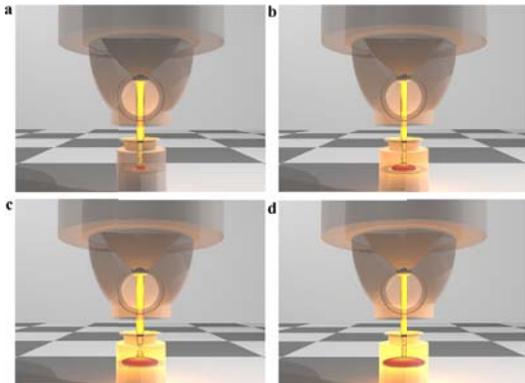


図10 熔融ガラス流下解析

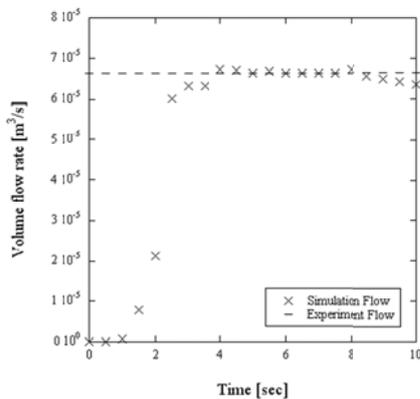


図11 数値解析と実験結果の比較

手法も開発[11]されており、大規模体系における自由液面を有する固液混相流の数値解析が実行できるようになりつつある。

著者ら[12]は MPS 法を再処理分野に応用した。既存の MPS 法をガラス熔融の流下プロセスに応用する際に、現実的な時間で計算を終了させることが困難であった。これは、熔融ガラスのような高粘性流体の数値解析を安定的に解析するにあたり、クーラン条件のほかに、拡散数を考慮する必要があるためである。このような既存の MPS 法の高粘性流体への応用に対する問題を解決するために、著者らはフラクショナル・ステップ法を MPS 法に導入した。フラクショナル・ステップ法では、粘性項を陰的に計算するため、それを陽的に計算する既存の MPS 法よりも時間を要するが、

安定条件をクーラン条件にすることができる。その結果、時間刻みを従来の MPS 法に比べて大きく設定することができる。

このように既存の MPS 法にフラクショナル・ステップ法を導入した解析手法を新たに開発し、本手法が熔融ガラスの流下プロセスに応用できることを実験により検証した。図9に示すような実機寸法の装置および模擬流体を用いた実験を行い、検証データとして定常時の体積流量を取得した。ガラス熔融炉底部をモデル化して、3次元体系の数値解析を実行した。数値解析は実験と公平に比較できる条件で実行した。図10に数値解析結果の典型的なスナップショットを示す。高粘性流体特有の流れを模擬できた。図11に示すように、定常状態における体積流量について、数値解析と実験結果を比較したところ、両者はよく一致した。

### 3. まとめ

粉体シミュレーションの原子力工学への応用について述べるとともに、著者らの研究内容の中で、粉体が係る混相流の大規模解析手法、固液混相流のレオロジー特性評価手法および高粘性流体の効率的な解析手法について紹介した。

著者らが開発した技術は、様々な原子力安全に応用できるため、今後、さらに原子力分野における研究を進めていきたい。

### 参考文献

- [1] M. Sakai, S. Koshizuka, Chem. Eng. Sci., 64, 533-539 (2009)
- [2] M. Sakai et al., Int. J. Numer. Meth. Fluids, 64, 1319-1335 (2010)
- [3] M. Sakai et al., Adv. Powder Technol., 23, 673-681 (2012)
- [4] 酒井, 越塚, 第17回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 53-56 (2011)
- [5] 酒井, 山田, 飯島, 藤原, 大竹, 越智, 日本原子力学会 2012 年秋の大会, E45 (2012)
- [6] J. Xiong, S. Koshizuka, M. Sakai, J. Nucl. Sci. Technol., 48(1), 145-153 (2011)
- [7] J. Xiong, S. Koshizuka, M. Sakai, H. Ohshima, Nucl. Eng. Des., 249, 132-139 (2012)
- [8] 大地, 越塚, 酒井, Transactions of JSCES, Paper No.20100013 (2010)
- [9] 大地, 山田, 越塚, 酒井, Transactions of JSCES, Paper No.20110002 (2011)
- [10] 山田, 酒井, 水谷, 越塚, 大地, 室園, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.10(3), 185-193 (2011)
- [11] M. Sakai, Y. Shigeto, X.S. Sun, T. Aoki, T. Saito, J. Xiong, S. Koshizuka, Chem. Eng. J., 200-202, 663-672 (2012)
- [12] X.S. Sun, M. Sakai, K. Shibata, Y. Tochigi, H. Fujiwara, Nucl. Eng. Des., 248, 14-21 (2012)

# 運営委員会報告

## 熱流動部会運営委員会(H24-1) 議事録

- (1) 日時：平成 24 年 7 月 17 日（水）14:00-16:30
- (2) 場所：電力中央研究所 本部第 3 会議室  
（大手町ビル 7F）
- (3) 配布資料：
  - ① 熱流動部会運営委員会（平成 24 年度第 1 回）議事次第、平成 24 年度熱流動部会役員、総務小委員会活動報告
  - ② 研究小委員会の活動概要
  - ③ 国際小委員会の活動概要
  - ④ 広報小委員会の活動概要
  - ⑤ 出版編集小委員会の活動概要
  - ⑥ 表彰小委員会の活動概要

### 議事

1. 平成 24 年度熱流動部会長挨拶  
第 1 回運営委員会の開催に当たって、木下部会長より挨拶があり、今年度、特に Dr フォーラムの改革検討、学会事故調への対応について部会運営委員会として協力をお願いする旨、所信が述べられた。
2. 熱流動部会平成 24 年度役員確認  
H24 年度の役員について確認がなされた。
3. 総務小委員会活動報告（西委員長）
  - 3-1 部会等運営委員会からの連絡
    - ・「2012 秋の大会」において福島関連企画セッションのうち公開のものが（全日程、A 会場）で束ねられたこと、熱流動部会提案の「シビアアクシデント評価」研究専門委員会活動中間報告は、非公開であったこともあり、従来どおり（全体総会の後、同会場）で開催されることが報告された。
    - ・部会等運営委員会での審議として以下が報告された。
      - ✓ NTHAS8 経費（平成 24 年度分）について、学会への国際会議等経費貸付申請（80 万円）が承認されたこと。
      - ✓ 年会・大会の実施について基礎ポイント制に基づく改善方策が提案されており、採用される方向で検討されていること。
  - 3-2 「2012 秋の大会」プログラム編成委員  
現在の熱流動部会からの委員 6 名について、任期

3 年目の委員が 3 名いることから、交代時期が重ならないような方策を今後検討することが議論された。

- 3-3 平成 24 年度予算  
H24 年度通常予算、セミナー予算、熱水力 WG 予算について報告された（セミナー内部共催金収入は、20 万円→30 万円の予定）。
- 3-4 長期計画  
部会予算上の主な事業である日韓学生セミナー及び国際会議（NTHAS, NUTHOS, NURETH）の日本開催分に関する長期予算計画について確認された。
- 3-5 その他
  - ・安全工学シンポジウムの実行委員選出（木下部会長）、部会等運営委員の選出（西総務小委員会委員長）、役員のリレーリスト作成、委嘱状の発送、平成 23 年度事業報告、JNST レビュー論文推薦（阪大・片岡氏、JAEA 秋本氏）について報告された。
  - ・熱流動部会からの学会事故調委員（「炉内熱流動解析などに関わる専門家」1 名）選出について議論した結果、準備会（7/25）に総務小委員会委員長が出席し、準備会での議論を踏まえて部会代表委員を選出することとなった。

4. 企画小委員会活動報告（江原委員長）  
Dr フォーラムの今度の開催について、江原小委員会委員長をとりまとめ役とし、木村前委員長、高田前々委員長を小委員会の委員として検討を進めることが提案され承認された。更に、部会からの予算投入、人材育成の観点からの意義、活性化するための具体的な方策（メーカ現場の見学、実務経験者の講演、実施日程等）、フォーラムの枠組み（「Dr」の縛りについて）、大学・研究所・メーカ相互に参加意義のある形態等について議論された。今後、運営委員会での議論を踏まえて小委員会で検討を進め、「2012 年秋の大会」全体総会で方針案を提示することとなった。

5. 研究小委員会活動報告（吉田委員長）
  - 5-1 専門委員会活動  
「熱水力安全評価基盤技術高度化検討 WG」、「シビアアクシデント評価研究専門委員会」について活動中である旨について報告された。

- 5-2 新規専門委員会

予定がない旨、報告された。

### 5-3 「2012 年秋の大会」部会企画セッション

「2012 秋の大会」において総合講演「シビアアクシデント評価研究専門委員会活動中間報告」が予定(9/19, 13:00-14:30, L会場)されていることが報告された。

### 6. 国際小委員会活動報告(山野委員長)

H24 年度の役員について確認がなされた。

#### 6-1 NTHAS8 及び日韓学生セミナー

「開催準備状況、NTHAS8 のアブストラクトの投稿数集計結果について報告された。

#### 6-2 NUTHOS-9, NURETH-15

共催・準備状況について報告された。

#### 6-3 NUTHOS-10

準備状況について、二ノ方海外担当役員に確認することとなった。

### 7. 広報小委員会活動報告(的場委員長)

部会ホームページの更新、ニューズレター(77号)の発行、会員への情報提供(メーリングリスト)、部会委員数(前年度比 35 名減)について報告され

た。また、広報小委員会において引き継ぎに支障が出ないように、今後は委員長、副委員長が全ての業務をシェアする体制とすることが報告された。

### 8. 出版小委員会活動報告(齊藤委員長)

論文編集委員(伝熱流動)の紹介と論文投稿掲載状況、JNST の Taylor & Francis 社との同出版化、JNST のインパクトファクター推移(2011 年は 0.707)の報告がなされた。

### 9. 表彰小委員会活動報告(片岡委員長)

本年度の委員会委員、「2012 年春の年会」における優秀講演賞の候補者(選考結果)について報告がなされた。

### 10. 副部長挨拶(中田副部長)

中田副部長より挨拶があり、熱流動分野の中心となって今後も元気のある部会活動を進めていきたい。特に、学生の人材育成の面から部会活動を活性化すべく努力したい旨の所信が述べられた。

以上

## 国際会議等の開催速報

### 第 8 回「原子炉熱流動と安全に関する日韓シンポジウム(NTHAS8)」

NTHAS8 (8th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety: 第 8 回原子炉熱流動と安全に関する日韓シンポジウム)を、12 月 9-12 日に大分県別府で開催しました。参加者総数 158 名、Plenary および Keynote を含む発表論文数 121 件と、これまでの NTHAS の中で最大規模となりました。韓国からの 54 名を含めて多くの方々にご参加頂き、皆様のおかげで盛況な会議を開催することができました。

### Student Seminar

上記の NTHAS8 に先立ちまして、日韓の学生および若手の研究者・技術者の方を対象とした 2 日間(12

ご協力、ありがとうございました。

**概要:** 日韓の原子力研究開発における協力関係の発展を目指すことを目的とした原子炉熱流動・安全などに関する 2 国間会議

**主催:** 日本原子力学会および韓国原子力学会

**共催:** 日本原子力学会・熱流動部会および韓国原子力学会・熱流動部会

**会場:** 別府国際コンベンションセンター (B-Con Plaza)

詳細は、次号にてご報告させていただきます。

月 7-8 日)の Student Seminar (4th Japan-Korea Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers)を開催しました。40 名(講師: 4 名、韓国側参加者: 17 名、日本側参加者: 19 名)の方が参加され、最新研究に関する情報交換などを行いました。

主催：日本原子力学会および韓国原子力学会  
協催：日本原子力学会九州支部  
共催：日本原子力学会・熱流動部会および韓国原子力学会・熱流動部会

会場：別府国際コンベンションセンター  
(B-Con Plaza)

## 平成 24 年度 熱流動部会役員

部会長	木下 泉 (電力中央研究所)	同副委員長*	木藤 和明 (日立製作所)
副部会長	中田 耕太郎 (東芝)	企画委員長**	江原 真司 (東北大学)
総務委員長	西 義久 (電力中央研究所)	出版編集委員長**	齊藤 泰司 (京都大学)
総務副委員長	守田 幸路 (九州大学)	同副委員長*	劉 秋生 (神戸大学)
広報委員長**	的場 一洋 (三菱重工)	表彰委員長	片岡 勲 (大阪大学)
同副委員長*	伊藤 啓 (JAEA)	海外担当役員	二ノ方 壽 (ミラノ工科大学)
研究委員長*	吉田 啓之 (JAEA)		
国際委員長**	山野 秀将 (JAEA)		

\*:任期2年の1年目、 \*\*:任期2年の2年目

### <編集後記>

今号では、東京大学の酒井先生より、非常に興味深い最新の数値解析手法についてご紹介頂きました。また、記事中にあります通り、NTHAS8およびStudent Seminarが日本(大分・別府)で盛大に開催されました。

ニュースレターへの原稿は、随時受付を行っております。研究室紹介、会議案内、エッセイ等寄稿お願い致します。またニュースレターに関するご質問、ご意見、ご要望等ありましたら、ぜひe-mailをいただければ幸いです

す。また、熱流動部会に入会したい方、入会しているがメールが届かない方が身近におられましたらご相談ください。

e-mail宛先： [ichiyo\\_matoba@mhi.co.jp](mailto:ichiyo_matoba@mhi.co.jp)  
[ito.kei@jaea.go.jp](mailto:ito.kei@jaea.go.jp)

熱流動部会のホームページ：

<http://www.aesj.or.jp/~thd/>

からニュースレターのPDFファイルは入手可能です。