

THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第 89 号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.89)

Nov. 10th 2015

研究室紹介

山口東京理科大学 機械工学科
鈴木・結城研究室 結城 和久

1. まえがき

山口東京理科大学は、東京理科大学、諏訪東京理科大学とならび学校法人東京理科大学の一大学であり、山口県山陽小野田市に所在しています。中国・四国エリアの産業界ニーズにより、平成 21 年度に機械工学科が新たに設立され、熱・流体工学分野として鈴木研究室および結城研究室が発足しました。平成 24 年度に第 1 期生を輩出し、現在、博士前期課程 2 名、学部 4 年生 14 名（うち、留学生 3 名）が所属しています。また、山口東京理科大学は平成 28 年 4 月に山陽小野田市立として公立化されることが決定していますが、建学の精神である「理学の普及を以て国運発展の基礎とする」を引き継ぐことは勿論のこと、これまで以上に地域に根ざし、「地域産業に貢献するキーパーソン」の育成への期待が高まっています。

研究室のキーワードは高熱流束除去であり、液体の蒸発潜熱ポテンシャルを有効的に活用するための基礎研究と技術開発に取り組んでいます。アプリケーションとして、核融合炉プラズマ対向壁の冷却・熱利用、電子機器のサーマルマネジメント、宇宙空間における熱輸送システム、連続鋳造工程における CC モールド冷却など、多岐に渡る研究が進んでいます。

本稿では、結城研究室の特徴でもある「ポーラス体の熱工学分野への応用」、特に極めて少ない液供給で 10 MW/m^2 の冷却を可能とする機能性ポーラス体を用いた除熱デバイス EVAPORON や、ポーラス体内の流動可視化、ナノ粒子バイポーラス体上での沸騰/蒸発現象、ならびに鈴木研究室で長年取り組まれている気泡微細化沸騰 (MEB) の最新の成果について紹介します。

2. 研究テーマの紹介

2.1 ポーラス体を用いた除熱デバイス EVAPORON

核融合炉プラズマ対向機器の一つであるダイバー

タ部には、核融合反応の約 20% ものエネルギーが流入し、熱流束として定常的に約 10 MW/m^2 の高熱負荷を受けます。ダイバータにおける除熱デバイスの開発は、商用炉の経済的成立性を左右する重要な R&D 項目となりますが、発電単価の軽減化に貢献する低ポンプ動力による冷却系の構築、ならびに軽水炉で問題となっている流動加速腐食や流動励起振動を回避することが出来るような低流速条件での冷却技術開発が望ましいと考えています。

一般に、数 MW/m^2 を超える発熱を低ポンプ動力で冷却するためには、蒸発潜熱ポテンシャルを利用する沸騰冷却技術の適用が現実的です。このような背景のもと、筆者らは金属ポーラス体内における相変化現象を応用した除熱デバイス EVAPORON (Evaporated-Fluid-Porous Thermodevice) の伝熱特性を実証実験ならびに数値シミュレーションにより評価してきました[1-4]。Heat Pipe や Vapor Chamber のような毛細管現象を利用した自立型の熱輸送デバイスと異なり、EVAPORON では、高熱負荷面の背面に金属ポーラス体を装着し、強制的にポンプにより圧送された若干の冷却液をポーラス体内で蒸発させながら除熱する対向型のエバポレータです。究極的には流入熱量に応じて供給液量を最小限に制御し、冷却液の蒸発潜熱ポテンシャルを最大限に活用できるデバイスの開発を目指しています。

これまで使用してきたポーラス体としては、Fig. 1 に示すような Foam 体、粒子焼結体（非球形、球形粒子）、ロータス体、繊維焼結体、2 重構造体など様々ありますが、共通する課題は熱流束の上昇に伴って大量に発生する蒸気をポーラス体外に如何に排出するかです。研究当初はポーラス体の構造を最適化して透過性能を調整することにも挑戦していましたが、劇的

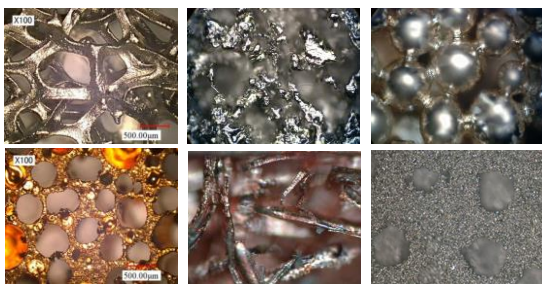


Fig. 1 Various kinds of porous media (Foam, Sintered particles, Lotus, fibrous porous, multi-scale porous)

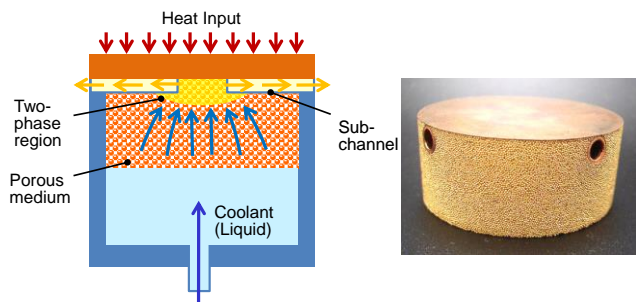


Fig. 2 Sub-channel-inserted Porous heat sink

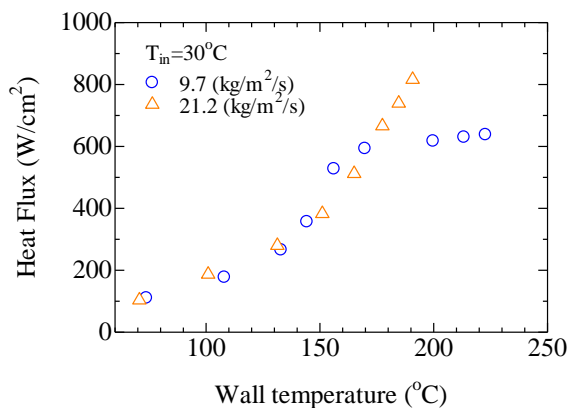


Fig. 3 Boiling curve for functional EVAPORON

な性能向上には至りませんでした。

このような背景のもと筆者らは、金属ポーラス体内に蒸気排出用のサブチャンネルを同時に焼結した Fig. 2 のような SCI 型 EVAPORON を開発し (SCI: Sub-Channel-Inserted porous), プラズマアークジェットを用いた高熱流束実験を実施して壁面温度 225°C の状態で約 10 MW/m² の除熱に成功しました[5]。またサブチャンネルの本数を増やして蒸気排出性能を促進することで 20 MW/m² を超える冷却にも成功しています[6]。更に、詳細な伝熱特性を評価するため高出力カートリッジヒータを用いた伝熱実験を実施し、Fig. 3 のような沸騰曲線を取得しました。Fig. 3 より壁面温度が 130 度以上において相変化が活発となり熱流束が急上昇していることが確認できます。特に高流量条件

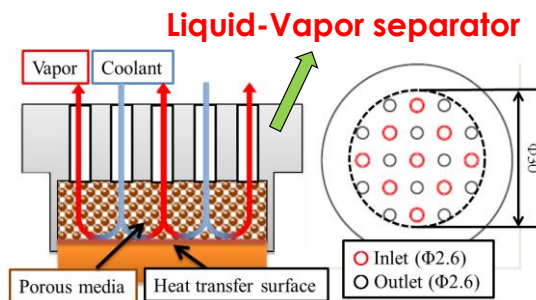


Fig. 4 Heat removal module with a liquid-vapor separator

では、熱流束 8.2 MW/m² を壁面過熱度 91 度で達成しており、この時の熱伝達率は 9.0×10^4 W/m²/K です。実験はヒータ温度が 950 度に達したため終了していますが、熱伝達率は増加傾向にあるため、更なる加熱によりプラズマアークジェット実験で得られた高熱流束データが得られると考えています。なお、上記の詳細な結果、更には流量、熱伝達特性については其々の文献を確認ください。

一方、EVAPORON をダイバータのような広い伝熱面に適用する場合、モジュール化して熱負荷面に並べて設置する必要があります。このような大面積除熱に対応するため、現在、新しい除熱デバイスの開発に取り組んでいます。Fig. 4 はその一例であり[7]、特徴として、ポーラス体の上部に気液を分離するためのセパレータを装荷し、液供給と蒸気排出を制御しています。このようなデバイスを用いることにより、現在、11 MW/m² の除熱性能を確認しています。

最後に、これまでの基礎研究において、ポーラス体を高熱流束環境で適用するためには、上記の蒸気排出だけでなく、①ポーラス体の有効熱伝導率の向上、②ポーラス体と伝熱面界面で発生する熱抵抗の緩和、③ポーラス体内での流動抵抗の軽減、などの課題も明らかになっています。このような課題を克服するための新しい EVAPORON を本年 10 月に開催される熱工学コンファレンス[8]で提案し、詳細な伝熱特性について評価を開始する予定です。

2.2 ナノ粒子バイポーラス体の沸騰伝熱特性

次世代のパワー半導体材料として期待されている SiC の実用化のためには、デバイスからの放熱を制御し、SiC の動作温度を最適温度 (200°C 以上) に確保する必要があります。特に次代の低炭素化社会を担う電気自動車や燃料電池車の車載用インバータでは、最大 3 MW/m² の発熱密度になることも予想されています。エンジン冷却水の共用が期待できないため浸漬環境における冷却技術・熱輸送システムを開発することが望ましく、平滑面飽和プール沸騰の限界熱流束を格

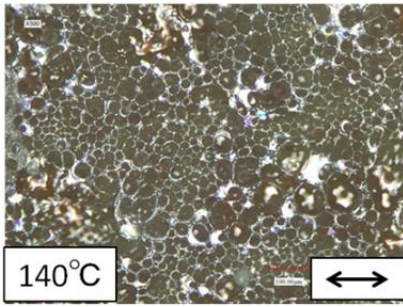


Fig. 5 Nanoparticles bi-porous structure

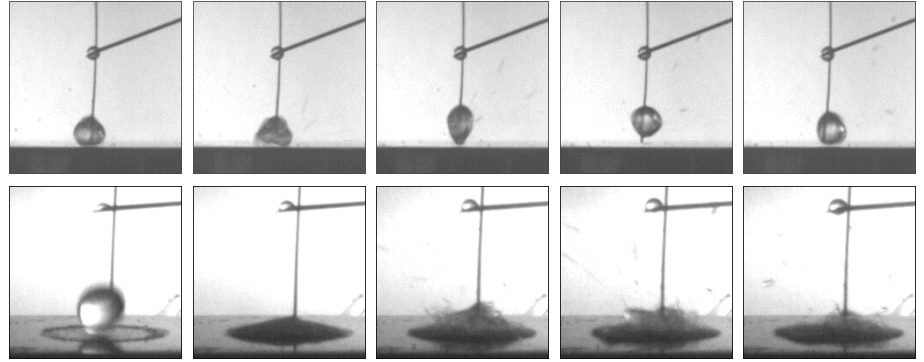


Fig. 6 Droplet behavior on a heated nanoparticle bi-porous layer
(Upper: Bare surface (100 Flame/s), Lower: TiO particles (30 Flame/s))

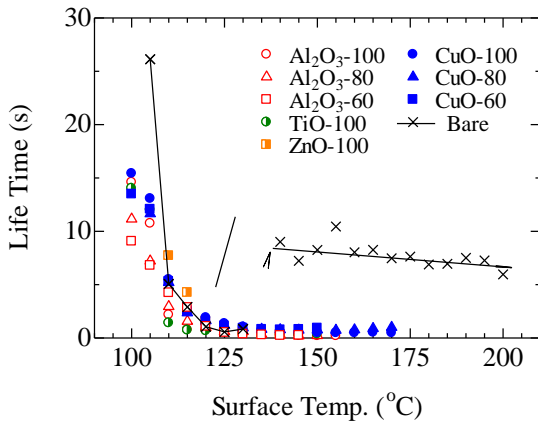


Fig. 7 Life time characteristics of a droplet

段に上昇させる必要があります。筆者はプール沸騰において 3 MW/m^2 を超える CHF を達成する伝熱面を製作するため、ナノ粒子の集積によって発現する強い濡れ性と毛細管現象に注目し、ナノ粒子の集積によって形成されるナノスケール孔と蒸気排出用のマイクロスケール孔が混在するナノ粒子バイポーラス体 (Fig. 5 参照) による沸騰伝熱促進技術を提案しています [9, 10]。また、制御されたナノ粒子バイポーラス体を伝熱面上に施工するための方法として「沸騰付着法」を提案しています。沸騰付着法とは、加熱した基板の上にナノ粒子を含有する溶液を塗布または滴下し、溶媒の沸騰現象を利用することで2重構造を有する機能性ポーラス体を施工する手法です。これまで、高温面上への液滴落下実験から、通常はライデンフロスト現象 (液滴が高温面上でボールのようにバウンドする現象) を起こすような高温条件 ($135 \text{ }^\circ\text{C}$) でも、ナノ粒子バイポーラス体を施工することで液滴が面上で広がり瞬時に蒸発することを確認しました (Fig. 6 参照)。特にアルミナ粒子を施工した面上では、Fig. 7 に示すように濡れ限界温度が通常面の $130 \text{ }^\circ\text{C}$ から $170 \text{ }^\circ\text{C}$ へ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ も上昇し、限界熱流束の向上の可能性を指摘しています。現在、実際にプール沸騰系の伝熱面にナノ粒

子バイポーラス膜を施工し、沸騰特性ならびに限界熱流束の向上について評価しています。更に、本技術はヒートパイプ、ベイパーチャンバーなどの熱輸送機器、ミスト冷却系へも展開する予定です。

2.3 ポーラス体内流動場の3次元可視化実験

以上のように結城研究室では、ポーラス体の熱工学分野への応用を中心に研究を進めています。ユニークな構造を有するポーラス体の伝熱特性評価は勿論ですが、最大の関心の1つとして、ポーラス体内流動の解明が挙げられます。特に二相流状態ではその可視化は非常に難しく、通常、X線CTやMRIによる高価な可視化装置が必要となります。そこで私達は、屈折率調合法を用いた可視化実験を実施してきました。この技術は、ポーラスの構造材と流体の屈折率を高精度に一致させてポーラス構造内部を直接可視化する技術です [11, 12]。これまで特に球充填間内の2次元流れ場をPIVにより詳細に評価してきましたが (Fig. 8 参照)、東京理科大学 佐竹信一教授との共同研究のもと DHPTV (Digital-Holographic Particle Tracking Velocimetry) の技術を応用し、Fig. 9 のような3次元流れ場の計測に世界に初めて成功しています [13, 14]。

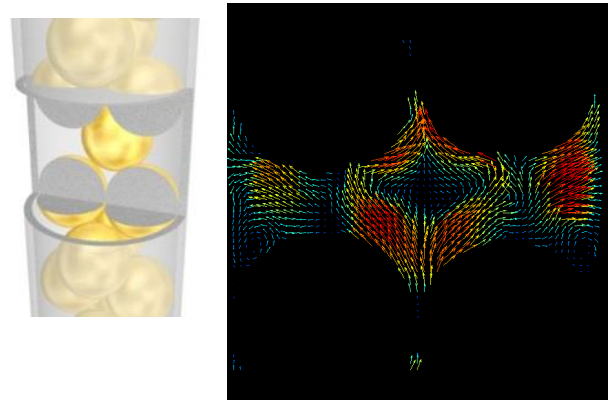


Fig. 8 Flow field in a spheres-packed pipe

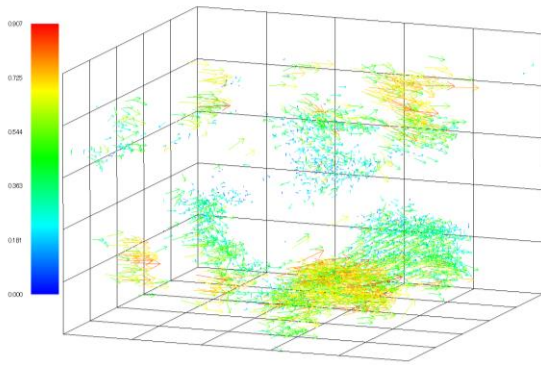


Fig. 8 3D Flow field in a spheres-packed pipe

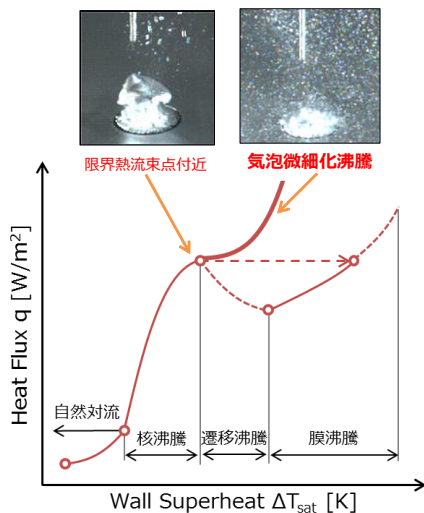


Fig. 9 Boiling curve with MEB

2.4 気泡微細化沸騰による沸騰伝熱の促進

先述の様に、大気圧下の平滑面の水飽和プール沸騰での限界熱流束は $1\text{MW}/\text{m}^2$ 程度であり、外部動力を用いないパッシブ型の伝熱促進では $3\text{MW}/\text{m}^2$ を超える限界熱流束を達成するのは至難の技です。鈴木・結城らは、パワー半導体素子の浸漬冷却技術を確立するためサブクール環境における沸騰浸漬冷却試験を実施し、高サブクール条件で発現する気泡微細化沸騰 (MEB: Microbubble Emission Boiling) を応用した冷却技術について検討しています (最近の文献では [15-17] 参照)。気泡微細化沸騰は、サブクールされた液中で凝縮崩壊した合体泡がマイクロオーダーの微細気泡を周囲に射出しながら気液交換が促進される現象であり、これにより限界熱流束以降において熱流束が急激に上昇します (Fig. 9 参照)。ここで気泡微細化沸騰の一例とその冷却性能について紹介します。

Fig. 10 は、50 vol%濃度のエチレングリコール水溶液 (EG 水溶液) を用いた際の沸騰曲線を表しています。

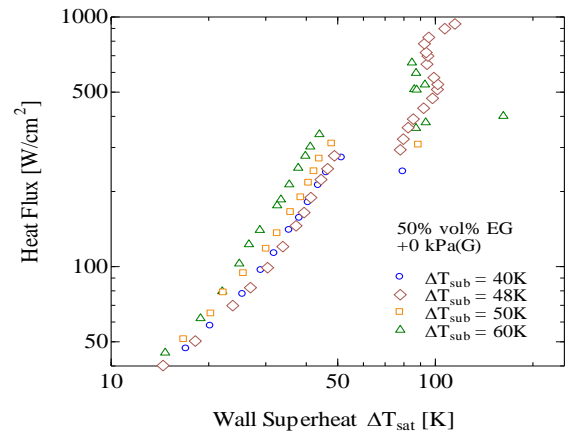


Fig. 10 MEB for ethylene glycol mixture

通常、水を冷却液とする場合、サブクール度が 20K より大きくなると気泡微細化沸騰が発現し、熱流束が急激に上昇することが分かっています。一方、EG 水溶液では図からサブクール度が 40K でも完全に発達した MEB には遷移しておらずサブクール度 50K 程度で完全な MEB が発生しています。サブクール環境を維持する上でなるべく低サブクール度での MEB の発生が期待されますが、MEB 状態では最大で約 $10\text{MW}/\text{m}^2$ の除熱に成功しています。また、加圧することによって MEB の発生域が高温側にシフトし、かつ MEB 領域の上昇勾配が緩やかになっていることも確認しています。可視化実験により加圧環境では MEB 状態での微細気泡の射出が緩慢になることを確認しており、このことが影響しているものと考えられます。現在、これらの MEB 特性を物理的に説明するための追加実験を実施しており、最終的には MEB メカニズムの解明とそれらの知見を反映した浸漬冷却デバイス開発を実施する予定です。

3. おわりに

本研究紹介では、鈴木・結城研究室で積極的に実施されている高熱流束除去に関連する代表的な研究テーマについて紹介させて頂きました。このような研究紹介の機会を頂きましたことに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Kazuhisa Yuki, Jun Abei, Hidetoshi Hashizume and Saburo Toda, Super-High Heat Flux Removal Using Sintered Metal Porous Media, Journal of Thermal Science, vol. 14, no. 3, pp. 272-280 (2005)
- [2] Hisae Togashi, Kazuhisa Yuki, Hidetoshi Hashizume, Heat transfer enhancement

- technique with copper fiber porous media, Fusion science and technology, vol. 47, no.3, pp. 740-745 (2005)
- [3] Kazuhisa Yuki, Jun Abei, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Numerical Investigation of Thermofluid Flow Characteristics with Phase Change against High Heat Flux in Porous Media, ASME Journal of Heat Transfer, vol. 130, Issue 1, 012602 (2008).
- [4] K. Yuki, H. Hashizume, S. Toda, K. Suzuki, Key issues to enable heat flux removal exceeding 10MW/m² by use of metal porous media as latent-heat transfer device, Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal, vol. 1, no.1, pp. 1-13 (2010).
- [5] Kazuhisa Yuki, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Sub-channels-inserted Porous Evaporator for Efficient Divertor Cooling, Fusion Science and Technology, vol. 60, pp. 238-242 (2011).
- [6] Kazuhisa Yuki, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Akio Sagara, Divertor Cooling With Sub-Channels-Inserted Metal Porous Media (Effects of the Sub-Channel volume and location on Heat Transfer Characteristics), Fusion Science and Technology, vol. 64, no. 2, pp. 325 – 330 (2013).
- [7] Kazuhisa Yuki, Kio Takai, Akio Sagara, Proposal of water-cooled divertor modules with high thermal conductivity porous media, 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2015.
- [8] 結城ほか, 高熱流束環境に適した新しいポーラス体の提案, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2015 講演論文集, 2015.
- [9] Yuki, K. and Suzuki, K., Heat transfer enhancement by nano-particles-assembled bi-porous structure, Proceedings of Thermal Engineering Conference '10, A214 (2010), pp.239-240 (in Japanese).
- [10] 結城和久, 杉浦鉄幸, 鈴木康一, ナノ粒子バイポーラス構造膜上での液滴沸騰/蒸発特性, 日本機械学会論文集, 81 巻, 824 号 (2015) .
- [11] Kazuhisa Yuki, Masumi Okumura, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Neil B. Morley, Akio Sagara, Flow visualization and heat transfer characteristics for sphere-packed pipes, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 22, no. 4, pp. 638-648 (2008).
- [12] Kazuhisa Yuki, Chapter 5. Visualization of Complex Flow Structures by a Matched Refractive-Index PIV Method, Aeronautics and Astronautics, Intech, (2011).
- [13] S. Satake, Y. Aoyagi, T. Tsuda, N. Unno, K. Yuki, Three-dimensional flow measurement of a sphere-packed pipe by a digital hologram and refractive index-matching method, Fusion Engineering and Design, Volume 89, Issues 7–8, pp.1064-1067 (2014).
- [14] Shin-ichi Satake, Yusuke Aoyagi, Takuma Tsuda; Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Three-dimensional flow measurement of a water flow in a sphere-packed pipe by digital holographic PIV, Fusion Engineering and Design (2015) (掲載決定).
- [15] Y. Chen, K. Yuk, K. Suzuki, Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Effect of Roughness of Heating Surface), Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014.
- [16] K. Suzuki, K. Yuki, Y. Chen, Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Applocation to High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics), Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014.
- [17] Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Chen Ghang, High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics: Subcooled boiling of water mixture of antifreeze coolants, Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-23), 2013.

運営委員会報告

熱流動部会 H27 年度第 1 回運営会議 議事録

1. 日時：平成27年7月30日（木）13:30～16:30
2. 場所：
日本原子力学会 会議室（新橋第二ビル3F）
3. 出席者：
上出 部会長（JAEA）

谷本 副部会長（三菱重工）
 西田 総務小委員会委員長（日立 GE）
 吉田 総務小委員会副委員長（JAEA）
 米本 広報小委員会委員長（熊本大学）
 金井 広報小委員会副委員長（電中研）
 野崎 研究小委員会委員長（テプコシステムズ）
 中村 国際小委員会委員長（INSS）
 永武 国際小委員会副委員長（JAEA）

小瀬 企画小委員会委員長(大和システムエンジニア)
山本 出版編集小委員会委員長(東芝)
杉本 表彰小委員会委員長(京都大学)

4. 配布資料

27-1-1: 日本原子力学会 熱流動部会運営会議

(平成 27 年度第 1 回)

27-1-2: 企画小委員会活動報告

27-1-3: 研究小委員会活動報告

27-1-4: 国際小委員会活動概要報告

27-1-5: 広報委員会活動報告

27-1-6: 出版編集小委員会活動概要

27-1-7: 表彰小委員会報告

5. 議事

1) 部会長挨拶(上出 部会長)

昨年度の春の年会における熱流動部会の全体会議において、皆様のおかげをもって、このような強力な体制でスタート出来ることになった。一年間、ご協力をお願いしたい、との挨拶があった。

2) H27年度熱流動部会役員

H27年度熱流動部会役員のリストが示された。出席した熱流動部会委員から自己紹介が行われた。

3) 総務小委員会活動報告(西田 委員長)

3-1) 原子力学会熱流動部会第45回全体会議について

9月10日の熱流動部会第45回全体会議について、部会等運営委員会議事などの説明があった。

3-2) 役員名簿の確認

H27年度の役員名簿について確認した。一部、誤字を修正することにした。

3-3) 部会等運営委員会報告

秋の大会での部会・連絡会セッションについて説明があった。また、今後の春の年会、秋の大会の予定について紹介があった。若手表彰の実施調査における熱流動部会の状況について、予算的な状況も含めて他部会と比べても活発に活動しているとの現状説明があった。

3-4) H27年度予算:

昨年度、沖縄で開催されたNUTHOS10の余剰金と学会への寄付に関する説明があった。その他、旅費などの用途について説明があった。

3-5) 予算の長期計画

これまで通り日本開催時の日韓学生セミナー、国際会議(NTHAS, NUTHOS, NURETH)、若手交流フォーラムを部会予算による主な事業とすることが紹介され

た。熱流動部会から筑波での開催を提案している NURETH17については、NURETH16期間中に紹介される予定であるが、中国の西安にほぼ決定との説明があった。

3-6) その他

「2015年秋の大会」でのポスターセッション発表の選考委員を上出部会長とする。

「2015年秋の大会」プログラム編成委員案の説明があった。2016年春の年会、2016年秋の大会のプログラム編成委員のリーダを、山野秀将氏(JAEA) お願いし、内諾頂いているとの紹介があった。再々任の波津久先生については、在任期間が長期に渡るため、ご本人の意志を確認し、最再考又は早期に交代していただくべきとの意見があり、検討を行うこととした。

4) 企画小委員会報告(小瀬 委員長)

4-1) 企画小委員会

小委員会の構成について、新任の委員を含め紹介があった。4月22日に開催された、第一回の企画小委員会の開催報告があった。第二回の企画小委員会を、第3回若手交流フォーラムに合わせて開催する予定しているとの説明があり、了承された。

4-2) 若手交流フォーラムについて

第3回の若手交流フォーラムについて、説明があった。第3回は、2015年9月11~12日、計算科学技術部会との共催で開催する。1日目は、2015年秋の大会(静岡大学静岡キャンパス)のポスター会場(共通教育A棟A106)でポスター発表、討論を行い、その後バスでホテル(敦賀市)に移動して懇親会を開催する。2日目は、浜岡原子力発電所の安全性向上対策工事現場等を見学し、掛川駅で解散する工程が示された。

参加費は学生会員無料、正会員は宿泊費5,000円、懇親会費は学会規定に基づき50%の熱流動部会からの補助を得て、学生会員・正会員ともに1,000円するとの説明があった。昨年度は委員もポスター発表を行っていたが、優秀賞の採点などで時間が取れないため、委員のポスター発表はやめることにし、委員と参加者との意見交換を行うことにした。学生の参加者を5名増員し、委員を含め25人の参加人数を前提に予算を検討している。また、計算科学技術部会側からの参加者については、計算科学技術部会からの助成をお願いしている。参加者が予定よりも増えた場合には、部会からの補助(一人あたり11千円)を増額するなどの説明があり、計画が承認された。若手フォーラムでの優秀発表賞の選考基準について説明があった。

5) 研究小委員会の活動概要(野崎 委員長)

「高温ガス炉の安全設計ガイド研究専門部会」、「熱水力技術戦略マップのローリング(継続的改訂)WG(仮)の状況について報告があった。検討中のWGの設立の手続きについて、総務小委員会で確認し、必要に応じて運営委員会でメール審議することが確認され

た。H26年度に活動を終了した、「シビアアクシデント評価研究専門委員会」の続きの専門委員会の設立については引き続き検討することとなった。

6) 国際小委員会の活動概要 (中村 委員長)

NUTHOS10 (2014年12月14～18日、沖縄コンベンションセンター) の決算について、7月に西田総務小委員会委員長に会計監査を受けたことが報告された。約320万円の余剰金が生じたことが報告された。

NTHAS-10 (2016年11月27日～30日、京都市、メルパルク京都) の開催準備状況について説明があった。25及び26日に併催される学生・若手研究者セミナーについても準備状況について説明があった。日本側の参加費(学生)は20,000円を予定しており、韓国側の学生の参加者の日本国内滞在費(40万円程度)を日本原子力学会が負担することになるとの説明があった。

NTHAS-10の講演論文、Copyrightに関して、General Chairの京都大学功刀先生より提案があり、審議が行われた。講演論文については、これまでのFull Paperと、Extend Abstractの二本立てとし、韓国側と協議することが了承された。Copyrightについては、個々の論文については取らない方向で検討することが了承された。ただし学会本部との調整を行い、CD/USBのデータを勝手にアップロードしないような制限をかけることを検討する。また、日本原子力学会への共催申請書について、提出することが了承された。

その他、熱流動部会関係の国際会議であるNURETH、NUTHOS、NTHASの開催計画について説明があった。

7) 広報小委員会の活動概要 (米本 委員長)

部会ホームページの更新、部会ニュースレター(88号(発行済み)、89号(作成中))の発行の状況、メーリングリストを用いた会員への情報提供の状況について報告された。

2012～2015年度までの熱流動部会員の変遷及び構成比率を分析した結果が示された。昨年度と比較して企業及び学生会員が減少したため、全体として減少加する結果となっている状況について報告された。H26年度の集計について学会の事務局に確認し、必要に応じて訂正する方向で検討することにした。

8) 出版小委員会報告 (山本 委員長)

編集委員として韓国から1名推薦され、10名態勢になっている。英文誌の投稿数が多く、一人あたりの論文数が数年前の数倍になっている状況が報告された。JNST一号あたりのページ数を100ページとするとの契約があり、1論文あたり8ページ以内を推奨するなど、1号あたりの掲載論文数を増やすために学会で検討されている方策について説明があった。原子力学会の英文誌はインパクトファクターが依然として1を超えている状況が説明された。

9) 表彰小委員会報告 (杉本 委員長)

表彰小委員会の構成について説明があった。2015年「春の年会」優秀講演賞の候補者の選考について説明され、優秀講演賞の内規に基づき3名の候補者案を表彰委員会で決定したことが報告された。表彰小委員会の決定について審議し、以下の通り3名の優秀講演賞が承認された(氏名(所属)、2015年春の年会における講演番号、講演題目、の順に記載)。

山田創平(早稲田大学)、I40、流路障害物付き管の限界出力予測に関する研究

上澤伸一郎(JAEA)、I49、シビアアクシデント時の炉内状況把握の関する海水の影響評価(4)二重管流路内の沸騰挙動における海水の影響評価

恒吉達矢(名古屋大学)、H06、オリフィス下流の物質移行係数の測定および数値計算 3. 流動場およびスカラー場のLES計算に基づく物質移行係数

また今年度の熱流動部会功績賞、熱流動部会業績賞および熱流動部会奨励賞の候補者を積極的に推薦頂きたいとの依頼があった。

10) その他

10-1) 熱流動部会ホームページの英語版について

海外等との協力を考えた場合、熱流動部会のコンタクトパースンなどを知らせるため、ホームページの英語版が必要であるとの指摘があった。広報小委員会で検討を行うことにした。

10-2) 熱流動部会繰り越し金の使途について (西田総務小委員会委員長)

NUTHOSの余剰金の使途について検討する必要がある。長期的に検討を行いたいので協力をお願いしたいとの依頼があった。

11) 副部会長挨拶 (谷本 副部会長)

熱流動部会は、日本の原子力を牽引する重要な部会である。部会員数の減少などの対策を含め、今後検討していくので御協力をお願いしたいとの挨拶があった。

以上

研究紹介～平成 26 年度熱流動部会奨励賞

ロッドバンドル内ドリフトフラックスモデルの開発に関する研究

尾崎 哲浩
原子燃料工業株式会社

1. まえがき

原子力発電プラントの設備の設計において、熱流動現象の把握と現象をモデル化し、解析によって安全に係るパラメータを評価することは、安全設計上、重要な要求事項である。沸騰水型軽水炉（BWR）プラントでは、炉心内の冷却材が沸騰 2 相流として流れるため、炉心内の熱水力的な挙動は、核的な挙動と相俟って、炉心出力の変動や炉心流量の変動といったプラント全体の挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている。BWR 向けの燃料集合体は個々の集合体がチャンネルボックスにより仕切られて、炉心内に配置されており、それぞれの集合体内のボイド率を適切に評価できることが安全設計上求められる。また、PWR の蒸気発生器（SG）は高温の 1 次系が流れる束状の細管と 2 次系との熱交換を行うが、SG 内のボイド挙動の評価は、SG 内の水位評価や構成する細管の健全性の評価に対して重要である。

安全設計に用いる 1 次元流体評価コードでは、従来は、2 相流を均質流として取り扱うモデル（3 方程式系）や、運動量保存式についてドリフトフラックスモデルにより相分布の非均質性を考慮して縮約したモデル（5 方程式系）が用いられてきたが、近年は最適評価に対する要求の高まりから、各相の質量、運動量及びエネルギー保存式を解く 6 方程式系コードでの評価が重要になってきている。6 方程式系のコードにおいて、ドリフトフラックスモデルは基礎式の中で直接扱われることはないものの、気液界面における物理量の交換量を表現する構成方程式のひとつとして、依然として重要な役割を果たす。

この研究は、管群（ロッドバンドル）内のボイド率評価の重要性を踏まえ、6 方程式系コードでの構成方程式の使われ方も視野に入れ、ロッドバンドルに適用できるドリフトフラックスモデルの開発を実施したものである。

2. ロッドバンドル系に対するドリフトフラックスモデル開発

冷却材の中を流れる 2 相流の評価方法としては、1 次元ドリフトフラックスモデルによる手法があり、実験結果との対比や設計手法としての適用など多くの実績がある。1 次元のドリフトフラックスモデルは、

$$\frac{\langle j_g \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \langle \langle v_g \rangle \rangle = C_0 \langle j \rangle + \langle \langle v_{gj} \rangle \rangle \quad (1)$$

として与えられる。ここで、 j_g 、 α 、 v_g 、 C_0 、 j 、 v_{gj} は、それぞれ、気相見かけ速度、ボイド率、気相速度、分布定数、全体積流束及びドリフト速度を示す。また、 $\langle \rangle$ は流路断面の平均量を示し、 $\langle \langle \rangle \rangle$ は流路断面のボイド率で重みづけした平均量を示す。(1)式のうち、全体積流束 $\langle j \rangle$ と気相見かけ速度 $\langle j_g \rangle$ は実験や計算の境界条件から求められるため、分布定数 C_0 とドリフト速度 $\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle$ に対する構成方程式が定まれば、断面平均ボイド率を評価することができる。

【分布定数】

Ishii(1977)は、気液の密度比が 1 に近づくと、相分布の非均質性が低下することから、分布定数を以下の関数形で表現した。

$$C_0 = C_\infty - (C_\infty - 1) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (2)$$

ここで、 C_∞ は密度比が $\rho_g/\rho_f \rightarrow 0$ のときの分布定数の漸近値、 ρ_g 、 ρ_f は、それぞれ、気相密度及び液相密度である。また、分布定数は幾何形状にも依存することが知られており、円管、矩形管の場合は、 C_∞ がそれぞれ 1.2 及び 1.35 (Ishii(1977))、環状流路の場合は、1.1 (Ozar(2008)) となることが知られる。

【ドリフト速度】

Ishii(1977)は流動様式に応じた気液界面の構造や重力、浮力及びせん断力のバランスから、ドリフト速度モデルを提案している。例えば、気泡流に対しては、以下の構成方程式が知られる。

$$\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle = \sqrt{2} \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} (1 - \langle \alpha \rangle)^{1.75} \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度、 σ は表面張力、 $\Delta\rho$ は気液の密度差である。

一方、Kataoka-Ishii(1987)は、流路が大口径の場合には、界面の不安定化により、気泡が分裂し、管全体

に亘るスラグ気泡を形成しないことから、2次流れが大きくなる影響を考慮して、以下の構成方程式を提案している（粘性数が0.00225以下の場合）。

$$V_{gj}^+ = 0.0019(D_H^*)^{0.809} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562}, \quad \text{for } D_H^* \leq 30,$$

$$V_{gj}^+ = 0.030 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562}, \quad \text{for } D_H^* \geq 30 \quad (4)$$

ここで、

$$V_{gj}^+ = \frac{\langle\langle v_{gj} \rangle\rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2}\right)^{1/4}}$$

$$N_{\mu f} = \frac{\mu_f}{\left(\rho_f \sigma \sqrt{g \Delta \rho}\right)^{1/2}}$$

$$D_H^* = \frac{D_H}{\sqrt{\sigma / g \Delta \rho}}$$

であり、 D_H は流路の代表長さを示す。

また、Hibiki-Ishii(2003)は、気相見かけ速度が小さい場合には、2次流れによる効果は抑制されるとして、Ishii(1977)とKataoka-Ishii(1987)のモデルを内挿した以下の構成方程式を提案している。

$$V_{gj}^+ = V_{gj,B}^+ \exp(-1.39 \langle j_g^+ \rangle) + V_{gj,P}^+ \{1 - \exp(-1.39 \langle j_g^+ \rangle)\} \quad (5)$$

ここで、 $V_{gj,B}^+$ は(3)式におけるドリフト速度、 $V_{gj,P}^+$ は(4)式におけるドリフト速度、 $\langle j_g^+ \rangle = j_g / (\sigma g \Delta \rho / \rho_f^2)^{1/4}$ である。

【NUPEC 管群バンドル試験】

ロッドバンドルに対するドリフトフラックスモデルを開発するための実験データベースとして、1990年代初頭にNUPECで実施された実機模擬燃料集合体ボイド率データを用いた。この試験は、BWRの運転条件を含む高温高圧条件下で、実機で用いられる8×8燃料の幾何形状を模擬した試験体を用いている（Fig.1参照）とともに、燃料集合体の有効発熱部出口において、X線CTによる高精度のボイド率測定が実施されており、燃料設計及びプラント安全設計上、極めて貴重なデータベースである。この試験の試験条件範囲は以下に示すとおりである。

- 圧力 : 1~8.6 MPa
- 質量流束 : 280~2000 kg/m²s
- 入口サブクーリング : 9~12 K

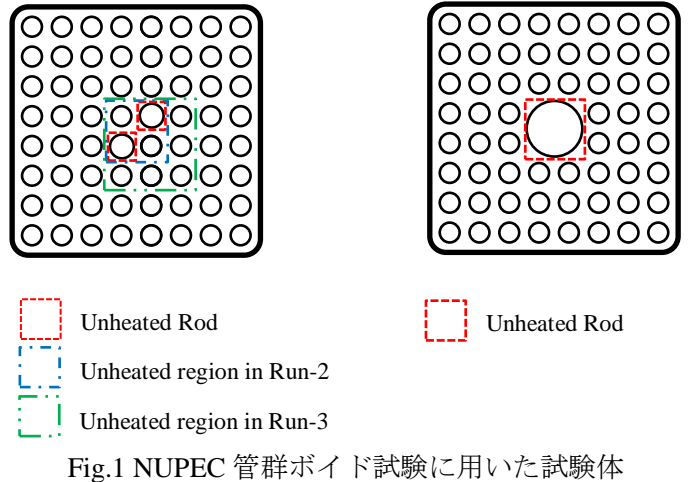


Fig.1 NUPEC 管群ボイド試験に用いた試験体
(左: Type-I, 右: Type-II)

【ドリフトフラックスモデルの開発手法】

ドリフトフラックスモデルに対する構成方程式は、実験データから $\langle j_g \rangle / \langle a \rangle$ を $\langle j \rangle$ に対してプロットし、その回帰直線の傾きを C_0 、切片を $\langle v_{gj} \rangle$ として求める手法が最も簡便であるが、こうして求めた二つのパラメータは、界面におけるせん断力等の物理量を求める場合において、常に両パラメータを一つの組として用いなければならない。一方で、TRACコードをはじめとする多くの2流体モデルにおける界面せん断モデルでは、両パラメータは独立して取り扱われるため、モデル開発においては、補償誤差の可能性を排除し、個々のパラメータが極力機構論的に適切となるように配慮しなければならない。測定される量が断面平均量であることから、この要求を双方のパラメータに求めることは困難であるが、この研究では、ドリフト速度は流路内の2次流れの影響を適切に表現したHibiki-Ishii(2003)モデルに従うとして、分布定数モデルをNUPEC管群ボイド試験データベースから以下のように導出した(Ozaki et al. (2013))。

$$C_0 = 1.10 - 0.10 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (6)$$

このドリフトフラックスモデルの実験データとの比較結果をFig.2に示す。この図はNUPEC管群ボイド試験のうち、Fig.1の8×8 StepI燃料を模擬したType Iバンドルに対する試験結果と計算値を比較したものである。

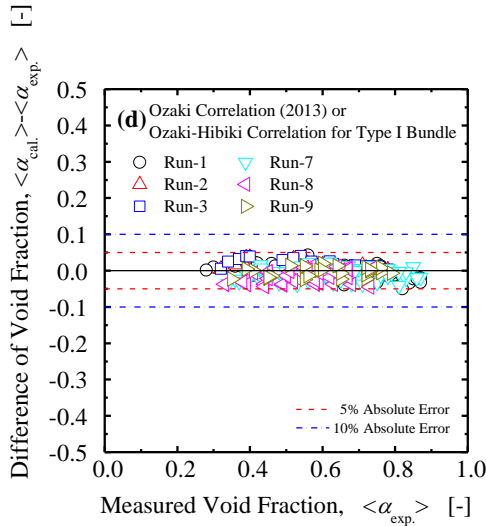


Fig.2 NUPEC 管群試験 (Type-I) に対する Ozaki et al. (2013)モデル ((6)式ベース) との比較

【バンドル形状の違いの影響】

NUPEC 管群ボイド試験は 8×8 燃料を模擬試験体としているが、国内では 9×9 燃料 (Step III 燃料) が主流となっており、8×8 燃料は国内においても 1 世代前の燃料設計である。分布定数は幾何形状の影響を受け得るため、燃料形状の差異がボイド率 (界面せん断力) に与える影響を把握することは、開発モデルの 9×9 燃料や将来の燃料タイプ (10×10 燃料など) への適用性を考察する上で重要となる。

Fig.1 に示すように、Type II バンドルは 8×8 Step II 燃料を模擬しており、Type I バンドルに対して、バンドル中央に口径の大きいウォータロッドを模擬した非加熱ロッドを配置している。この Type II バンドルに対するボイド率データと計算値の比較について、Type I バンドルとの比較と併せて Fig.3 に示す。この図に示すとおり、中央に非加熱ロッドを配置した場合には、Type I バンドルに対する予測特性に比べ、僅かではあるが、計算値が過小評価気味となることが分かる。Type II バンドルに対して、最適評価となる分布定数モデルは、

$$C_0 = 1.08 - 0.08 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (7)$$

となり (Fig.4 参照)、Type I バンドルに対して、分布定数が低下する結果である (Ozaki-Hibiki(2015))。これは、流速が早くなる流路中央域にボイドが存在できない領域が存在するためであり、前述のように円管に対して環状流路の場合に分布定数が低下する傾向 ($C_0: 1.2$ (円管) $\rightarrow 1.1$ (環状流路)) と一致する。

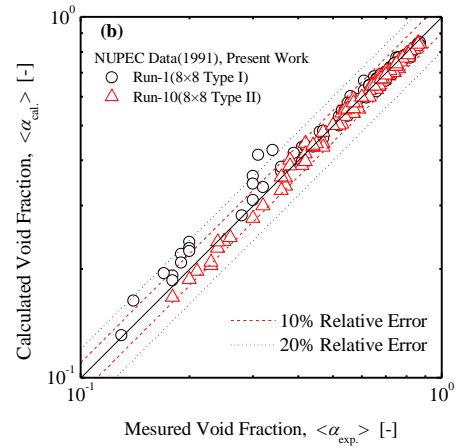


Fig.3 NUPEC 管群試験に対する Ozaki et al.(2013)モデルとの比較 (Type-I と Type-II の比較)

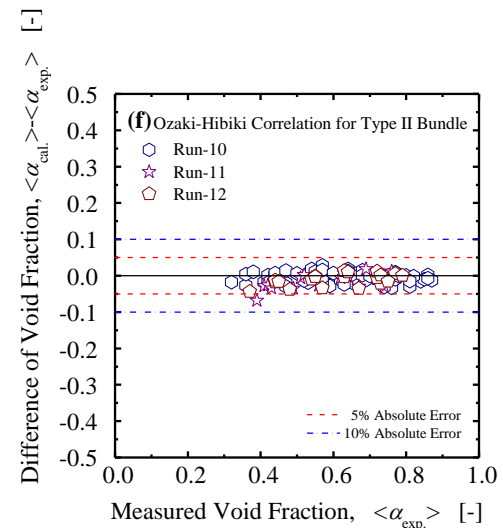


Fig.4 NUPEC 管群試験 (Type-I) に対する Ozaki-Hibiki(2015)モデル ((7)式ベース) との比較

また、NUPEC 管群ボイド試験と同様に高圧下でのボイド率測定試験として FRIGG 試験が有名である。FRIGG 試験は、BHW(R) (Boiling Heavy Water Reactor) 向けの燃料バンドルを対象としており、Fig.5 に示す断面形状のバンドルを試験体としている。FRIGG 試験で測定されたボイド率データと Ozaki et al.(2013)モデルとの比較結果を Fig.6 に示す。この図に示すように、Ozaki et al.(2013)の式はこの形状の試験体のボイド率を過小評価する傾向にある。FRIGG 試験は X 線 CT を用いる NUPEC 試験とは異なり、複数の γ 線ビーム (Fig.5 参照) による測定値から断面平均ボイド率を算出して求めているため、データの精度の影響はあるものの、定性的にはフローチャンネルが矩形ではなく円管であることやロッドの配列が正方格子状でないこと等が分布定数の差異となって現れていると考えている。

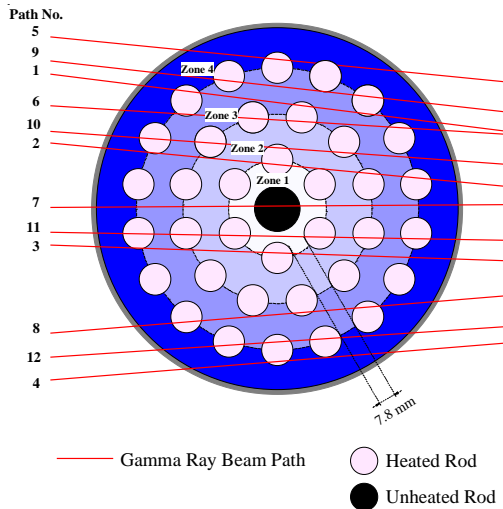


Fig.5 FRIGG 試験における管群幾何形状

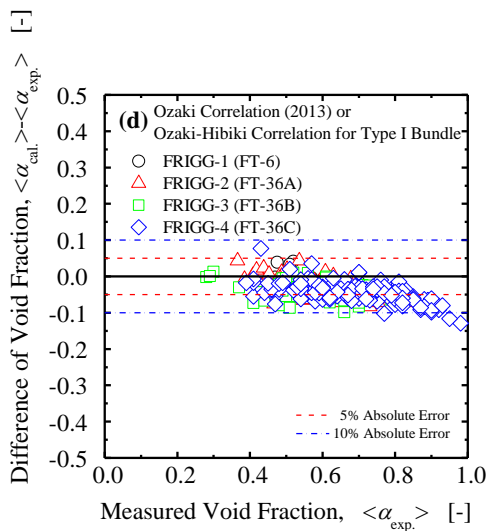


Fig.6 FRIGG 試験に対する Ozaki-Hibiki(2013)モデル ((6)式ベース) との比較

3. あとがき

管群系におけるドリフトフラックスモデルは、評価コードが2流体コードであっても、界面せん断力評価モデルとして分布定数及びドリフト速度の構成方程式が用いられることから、これらのモデルの適切性は管群内、特にBWRでは炉心ボイド率の評価結果に大きく影響を及ぼす。管群系のドリフトフラックスモデルは従来にも多くの研究が為されているが、本研究では2流体コードでのドリフトフラックスパラメータの使用法に留意し、管群系に対する分布定数モデル及びドリフト速度モデルを提案している。また、燃料形状の異なる試験データに対する分析やFRIGG試験との比較分析により、幾何形状がドリフトフラックスパラメータに与える影響も検討している。TRACコード等の2流体解析コードは将来の安全解析コードとして期待されているコードであり、本研究に示すモデル開

発手法や幾何形状に対する影響の検討は、統計解析評価におけるモデル不確かさの設定に対しても有用な情報であると考えられる。

参考文献

- Hibiki, T., Ishii, M., 2003. One-dimensional drift-flux model for two-phase flow in a large diameter pipe. *Int.J.Heat.Mass Transf.* 46, 1773-1790.
- Ishii, M., 1977. One-dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes. ANL-77-47. Argonne National Laboratory, Argonne(IL).
- Kataoka, I., Ishii, M., 1987. Drift-flux model for large diameter pipe and new correlation for pool void fraction. *Int.J.Heat.Mass Transf.* 30, 1927-1939.
- Ozaki, T., Suzuki, R., Mashiko, H., Hibiki, T., 2013. Development of drift-flux model based on 8x8 BWR rod bundle geometry experiments under prototypic temperature and pressure conditions. *J.Nucl.Sci.Technol.* 50, 563-580.
- Ozaki, T., Hibiki, T., 2015. Drift-flux model for rod bundle geometry. *Prog.Nucl.Energy* 83, 229-247.
- Ozar, B., Jeong, J.J., Dixit, A., Julia, J.E., Hibiki, T., Ishii, M., 2008. Flow structure of gas-liquid two-phase flow in an annulus. *Chem.Eng.Sci.* 63, 3998-4011.
- 財団法人 原子力工学試験センター, 燃料集合体信頼性実証試験に関する調査報告書 (BWR燃料集合体管群ボイド試験【総合評価】編) 平成3年度
- 財団法人 原子力工学試験センター, 燃料集合体信頼性実証試験に関する調査報告書 (BWR燃料集合体管群ボイド試験【補足資料】編) 平成3年度

国際会議等に関するお知らせ

「第11回原子力熱流動、運転と安全性国際会議 (NUTHOS-11)」に関しまして、以下の通りご案内させていただきます。会議への参加をぜひご検討ください。

第11回原子力熱流動、運転と安全性国際会議
11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-11)

〔主催 韓国原子力学会、米国原子力学会、韓国流体機械学会、日本原子力学会〕

1. 開催日 2016年10月9日(日)～13日(木)
2. 開催地 韓国 慶州 (Gyeongju) Hwabaek International Convention Center (HICO)
(詳細は下のリンクより熱流動部会の国際会議カレンダーに置いたファイル、もしくは会議のホームページ: <http://www.nuthos-11.org/> をご覧ください)

General information:

<http://www.aesj.or.jp/~thd/Calendar/NUTHOS-11-GInfo.pdf>

Leaflet:

<http://www.aesj.or.jp/~thd/Calendar/NUTHOS-11-leaflet.pdf>

3. トピックス

- (1) Fundamentals of Thermal Hydraulics
- (2) Computational Thermal-Hydraulics

- (3) Experimental Thermal-Hydraulics
- (4) Multi-disciplinary Thermal-Hydraulics
- (5) Severe Accidents
- (6) Plant Operation and Maintenance
- (7) Plant Diagnostics and Monitoring
- (8) Advances in Measurements and Instrumentations
- (9) Thermal-Hydraulics and Safety of Advanced Reactors
- (10) Special Sessions

4. 申込方法

ホームページからサインアップしてログインアカウントを作成。図表を含まない500語のアブストラクト1ページを登録してください。

5. スケジュール

アブストラクト申込期限 2015年12月15日(火)
ドラフト論文提出 2016年4月20日(水)
最終論文提出 2016年7月15日(金)

6. 問い合わせ先

NUTHOS-11 事務局: info@nuthos-11.org

東京大学 山口彰教授:

yamaguchi@n.t.u-tokyo.ac.jp

なお、NUTHOS-11の最新情報および事務局への連絡は下記ホームページのContactをご覧ください。

<http://www.nuthos-11.org/>

平成27年度 熱流動部会役員

部会長	上出 英樹 (JAEA)	同副委員長*	永武 拓 (JAEA)
副部会長	谷本 浩一 (三菱重工)	企画委員長**	小瀬 裕男 (大和 SE)
総務委員長	西田 浩二 (日立 GE)	出版編集委員長**	山本 泰 (東芝)
総務副委員長	吉田 啓之 (JAEA)	同副委員長*	帆足 英二 (大阪大学)
広報委員長**	米本 幸弘 (熊本大学)	表彰委員長	杉本 純 (京都大学)
同副委員長*	金井 大造 (電力中央研究所)	海外担当役員	二ノ方 壽 (ミラノ工科大学)
研究委員長*	野崎 謙一郎 (テプコンシステムズ)		
国際委員長**	中村 晶 (INSS)		

*:任期2年の1年目、 **:任期2年の2年目

<編集後記> 2015年度第2号のニュースレターをお届け致します。ニュースレターへの原稿は、随時受け付けております。研究室紹介、会議案内、エッセイ等寄稿お願い致します。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、e-mailをいただければ幸いです。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。尚、2014年度の部会員総数(462名)に誤りがございました。正

しくは408名です。関連するNo85号, No88号に一部訂正を加えました。ここにお詫び申し上げます。

e-mail宛先: yonemoto@mech.kumamoto-u.ac.jp
t-kanai@criepi.denken.or.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。