ISSN 2185-372X

THERMAL ENGINEERING

TED Newsletter on the WEB

日本機械学会熱工学部門ニュースレター
TED Newsletter No.86 December 2018

目　次

1. TED Plaza
- 熱工学的観点から見た蓄電池の開発
  可知 直芳（CONNEXX SYSTEMS 株式会社）
- IHI におけるカーボンフリーエネルギーの実現に向けた取組み
  松尾 貴寛（株式会社 IHI）
- ［連載企画］乱流熱伝達モデル入門（第 1 回）
  服部 博文（名古屋工業大学）

2. 2018 年度年次大会 熱工学部門報告
3. 熱工学コンファレンス 2018 開催報告
4. 熱工学ワークショップ 2018 開催報告
5. 第 95 期（2017 年度）熱工学部門賞・部門一般表彰報告
6. 行事案内
- 部門企画行事案内
- 部門関連行事案内
- 国際会議案内

7. その他
- 編集後記

TED Plaza

熱工学的観点から見た蓄電池の開発

可知　直芳

CONNEXX SYSTEMS 株式会社
研究開発本部　開発企画室長
naok@connexxsys.com

１．はじめに

CONNEXX SYSTEMS 株式会社は，2011 年に京都で設立されたスタートアップ企業である．当時，米国にて医療・衛生等用リチウムイオン電池メーカーを経営していた創業者の塚本が，新たな蓄電技術を生み出すべく創業した。

弊社のビジョンは，「革新的蓄電技術と自然エネルギを組み合わせ，耐災害性と環境保全性に優れた未来社会を実現する」である．災害に強く持続可能な社会を実現するには，エネルギの自給自足が必要不可欠であり，そのためには，太陽光や風力といった，半永久的に利用可能で偏在のない自然エネルギから電力を生み出す必要がある．一方で，自然エネルギは時間による変動が大きい．例えば太陽光であれば，天候不良時や夜間の発電は期待できないし，風力であれば，局所的な風速はゼロから数十 m/s まで秒単位で変動する．

自然エネルギによる発電電力を有効活用するには，いったん電力を貯め，需要に合わせて放出するダムのような機能が必要である．この機能を担うのが蓄電池である．弊社は，自然エネルギの地産地消を可能にする蓄電池を核としたマイクログリッドを PowerNET と呼称し，未来社会に必要となる複数の蓄電池技術を開発している（図 1）．

Fig. 1 Conceptual image of PowerNET

これら蓄電池技術を開発する上で，熱工学は切っても切り離せないものである．本稿では，弊社が開発する蓄電池技術の一つである，パワー型リチウムイオン電池について，熱工学の観点から紹介させていただきたい．

２．パワー型リチウムイオン電池の開発

スマートフォンや電気自動車に用いられるリチウムイオン電池は，機器の動作時間を最大化するために，単位重量，体積当たりのエネルギを高めた，エネルギ型の蓄電池である．一方で，ハイブリッド自動車や電動工具など，瞬間的な入出力が求められる用途があり，これらには単位重量，体積当たりの最大入出力を高めた，パワー型の蓄電池が用いられる．

パワー型リチウムイオン電池は，これまでにもハイブリッド自動車用を中心に開発されてきたが，今後，新しい産業分野にも需要が拡大することが見込まれる．例えばドローンやロボット用の蓄電池では，発進時の大電力供給，制動時の回生電力受入が必要である．また，AGV やフォークリフト等の産業機器では，設備の稼働率を最大限にするために，短時間で急速充電を行える性能が求められる．

弊社ではこれらの新たな需要に対応可能なパワー型リチウムイオン電池を，「HYPER Battery」と名付け，開発を推進している．現在は，ロボット用途を想定した電池パックの開発を進めており，来年の製品化を目指している(日経新聞，2018).

３．発熱によるリチウムイオン電池の劣化

リチウムイオン電池は一般に，使用温度が高い程劣化が促進される．例えば，あるリチウムイオン電池は，25℃環境で 1200 回繰り返し使用しても 90%以上の容量を維持するが，45℃環境で使用すると，同じ 1200 回の使用で 70%付近まで容量が低下する(吉岡，2010).

リチウムイオン電池の劣化要因は，（1）負極表面上に成長する抵抗被膜に起因する内部抵抗の増加，（2）活物質層の電極集電体からの剥離による集電性能の低下，（3）活物質の利用率低下からなり，温度が高い程これらの現象が促進される(熊井，2001).

上述したパワー型リチウムイオン電池においては，入出力電流が従来品と比べて大きいために，発熱による温度上昇が顕著となる．従って，蓄電池の寿命を延長するために，蓄電池の温度管理が非常に重要となる．

ドローン，ロボット，AGV などの用途には，24～300V 程度の電圧が必要であり，用いるリチウムイオン電池は，単セルを直並列に接続した組電池を，保護回路等の他部品とともに筐体内に格納した構成が一般的である．このような構成を電池パックと呼ぶ．この電池パックの温度を管理することは，具体的には，パック内にある全ての単セルの温度を一定値以下に抑え，かつ，単セル内，および単セル間の温度ばらつきをできるだけ抑制することである．

４．リチウムイオン電池単セルの発熱挙動

リチウムイオン電池単セルの温度分布は一定ではなく，入出力電流による発熱により，セル内で温度分布が生じる．図 2 は，平板型リチウムイオン電池単セルに約 6C（10 分で完全に充電が完了する電流値）の急速充電電流を負荷した場合における，セル部位ごとの表面温度変化を示したものである．なおこの試験は，一般的なリチウムイオン電池セルの発熱挙動を定量的に示すために行ったものであり，本セルが当該条件で連続使用できるかを判断するためのものではないことに留意されたい．

90 秒間の急速充電によるセル表面温度の上昇は部位ごとに異なり，電流端子に近い部位 Front で約 12℃の上昇がみられた．一方，電流端子から遠い部位 Rear では 6℃の上昇にとどまった．また，急速充電後においては，部位 Front の温度は徐々に低下した一方，部位 Center ではほとんど変化が無く，部位 Rear ではわずかな上昇がみられた．

この結果は以下のように解釈できる．電流端子に近い部位 Front では電流集中が起こるため，温度上昇は顕著になった．一旦部位 Front に蓄積された熱は，外部に放出される一方で，同一セルの他部位にも伝導されたと考えられる．

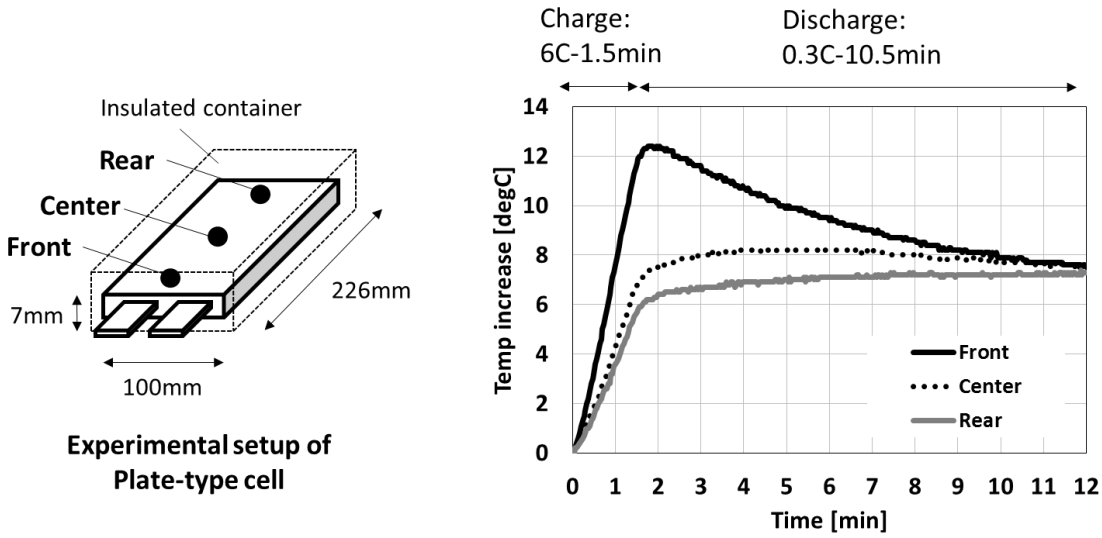


Fig. 2 Heat generation of plate-type Li-ion cell

このように，部位ごとの温度差が大きくなると，温度上昇の激しい電流端子近傍において電極の劣化が促進され，さらに発熱が増大するという悪循環に陥る．また抵抗上昇が顕著になると当該電極部位で金属リチウムの析出が発生するなど，安全性にも影響を及ぼす．

従って，リチウムイオン電池の温度管理を行う上では，まず想定される使用条件において単セルがどの程度温度上昇するか，またセル内の温度分布がどのように変化するかを確認することが重要である．

５．リチウムイオン電池パックの発熱挙動

最終製品となる電池パックには，前述のとおり複数の単セルが格納される．これらセル間での温度不均一性をできるだけ抑制することも重要である．電池パックにおけるセル間の温度分布を測定するために，平板型リチウムイオン電池を 28 個直並列に接続した組電池を，アルミ製の筐体内に格納し，約 6C の急速充電電流を負荷する試験を行った．結果を図 3 に示す．最端部のセル温度上昇は最も小さく，一方で中央に位置するセルの温度は最も高くなった．セル間の温度差は最大で約 4℃であった．

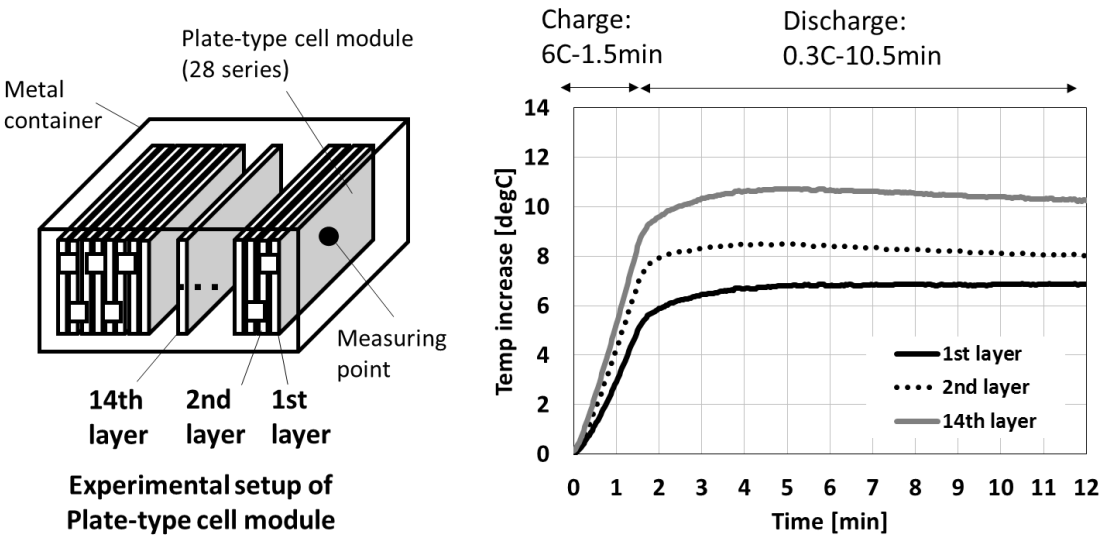


Fig. 3 Heat generation of plate-type Li-ion pack.

電池パックにおいては中央に位置する単セルに熱が蓄積し，セル間で温度差が生じる．セル間の温度差は，セル間の劣化速度の差に直結する．リチウムイオン電池パックは，温度や電圧をセル単位（または並列接続されるセルブロック単位）で監視しているので，いずれか一つの単セルの劣化が，パック全体の性能に影響を及ぼす．上述したように，25℃と 45℃では蓄電池の劣化速度が大きく異なることを鑑みると，セル間の温度差が 4℃というのは決して無視できる数値ではない．

６．電池パックの温度管理

これまでの議論から，パワー型のリチウムイオン電池パックにおいて，温度管理が重要であることを示してきた．ここでは，具体的にリチウムイオン電池パックにおいて行われている温度管理を，電気自動車用電池パックを例として述べる．

例えば日産の電気自動車「Leaf」の電池パックでは，密閉型の空冷方式を採用している．電池パック内には放熱性に優れるラミネート型セルを 8 枚積層したモジュールが配置されている．この方式はコスト性に優れる一方，冷却効率は十分でない場合があり，夏日に急速充電を繰り返して連続走行するような厳しい使用状況では，温度上昇を抑制するために充電電流が制限されることもある．

一方で，Tesla 社の電気自動車の電池パックは間接水冷式を採用している．円筒型リチウムイオン電池単セルが垂直方向に配置されたパック内に配管が配置されており，配管内に冷媒を循環させることで単セルを冷却する．この方式の冷却効率は高く，セルの均熱性も高く保つことができる．一方でパック全体としてのコストは高くなり，また冷媒の交換等，メンテナンスも複雑となる．

最適な冷却方式は，セル特性，コスト，重量，冷却効率，求められる温度均一性，消費電力等の条件により異なり，一概に決められるものではない．Chen らは，電気自動車用電池パックの冷却方式として，空冷，直接水冷（パック全体を冷媒中に浸漬する），間接水冷（配管を通して冷媒を循環させる），フィン方式の 4 方式のメリット，デメリットを比較した(Chen, et al., 2016)．これによると，同一体積という制約のもとでは，間接水冷方式が最も現実的かつ効果的な冷却方式であるという見解が示されている．

蓄電池は製品の競争力を左右する重要な機関部品である．一方で産業用等の分野においては，モーターなど他の要素部品を配置し，余ったスペースの中で電池パックの設計を行わざるを得ないなどの制約があることが多い．設置場所，コスト等の制約の中で，電池パックとしてのトータルコストを最適化するための冷却方式は，電池パックごとに様々であり，弊社でも今後，用途ごとに最適な電池パック設計を行う必要があると考えている．

７．おわりに

弊社では現在，ロボット用以外でも，HYPER Battery の開発を進めている．特に力を入れているものの一つが，トラックやバス等の重量車 EV である．重量車の場合，要求される寿命や入出力性能要求が乗用車よりもはるかに厳しい．このような高い要求に対して，弊社では，パワー型リチウムイオン電池（HYPER Battery）と，従来 EV で用いられるエネルギ型リチウムイオン電池とを併設した，ハイブリッド型の電池パック構成を提案している(Matoba, et al.，2018)．入出力性能を前者で，航続距離を後者でそれぞれ担わせることにより，設計の自由度を高めるとともに，バッテリ全体の総合的な性能を向上させる試みである（図 4）．

このようなハイブリッド型の電池構成でも，今後電池パックの熱設計を本格的に推進していく予定である．我々のようなスタートアップ企業が新しい技術を確立するには，外部機関との連携は必要不可欠である．この原稿を読んでいただいた方々と，蓄電池開発の仕事をいつかご一緒できれば大変幸甚である．

Fig. 4 Concept of Hybrid Battey for heavy duty vehicle

文献

Chen et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells, Applied Thermal Engineering, Vol. 94, No.5 (2016) pp. 846-854.

熊井一馬，リチウムイオン電池の劣化メカニズムの解明，電中研報告 (2001) T01033.

日経新聞 2018 年 3 月 26 日朝刊.

Matoba, T. et al., Lithium-Lithium BIND Battery: Innovative Hybrid Lithium-Ion Battery with High Energy Density and High Rate Capability, The 31st International Electric Vehicles Symposium, A5-2, (2018).

吉岡伸晃，Li イオン電池の寿命に影響を与える外部要因について，第 4 回平成 21 年度環境対応車普及方策検討会 (2010).

TED Plaza

IHIにおけるカーボンフリーエネルギーの実現に向けた取組み

松尾　貴寛

株式会社 IHI
技術開発本部基盤技術研究所
カーボンフリーエネルギープロジェクト部
matsuo_takahiro@ihi.co.jp

１．はじめに

地球温暖化問題の克服と脱炭素社会の実現に向けて，再生可能エネルギー（以下，再エネ）の導入が世界的に加速しており，メガソーラーやウィンドファームも次々と実現している．しかしながら，太陽光発電に代表される再エネは時間や季節による変動が大きいため，大規模な再エネ導入のためにはエネルギーの需要と供給のバランスが課題となっている．当社ではこの課題に対して，①再エネを貯蔵・輸送するためのエネルギーキャリアとしてのアンモニア，②スマートコミュニティによる再エネの地産地消に着目し，図１に示すカーボンフリーエネルギーサプライチェーンを目指して技術開発・事業構築に取り組んでいる．本報では，アンモニアを燃料としてガスタービン，微粉炭焚ボイラ，固体酸化物形燃料電池で利用するための技術開発および地産地消型エネルギーマネジメントシステムへの取組みについて紹介する．

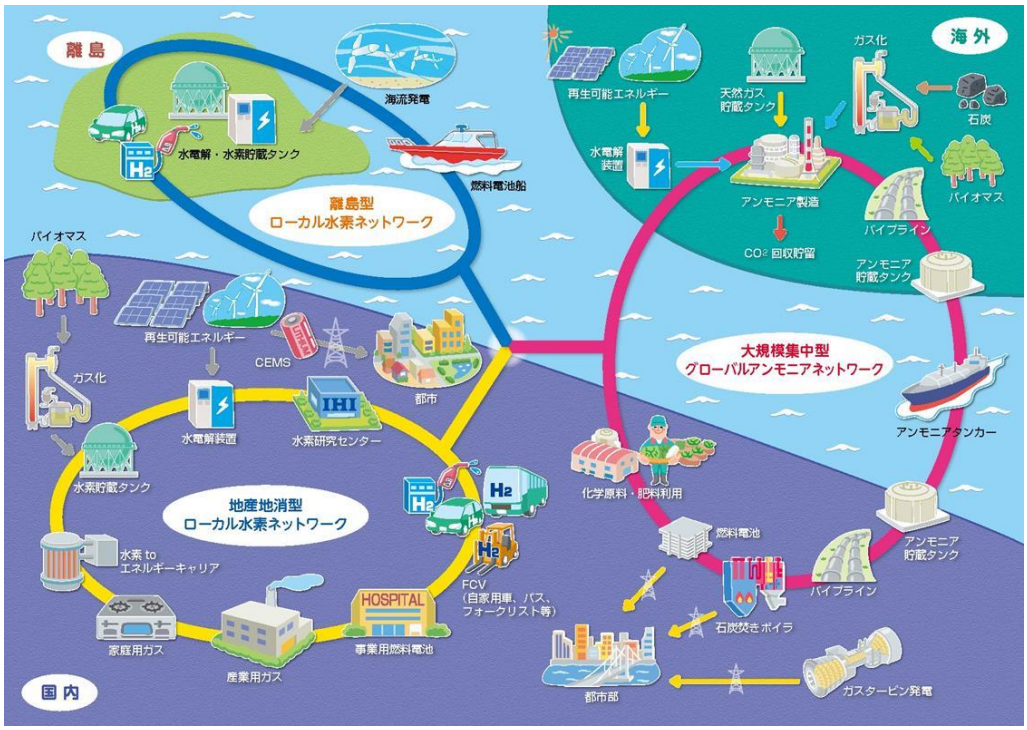


Fig. 1 Carbon-free energy supply chain targeted by IHI

２． アンモニア利用技術の開発

２・１　エネルギーキャリアとしてのアンモニア

現在，エネルギーキャリアとしては，図 2 に示す液体水素，有機ハイドライド（メチルシクロヘキサン：MCH），アンモニアなどが提案されている(塩沢，2014)．各キャリアはそれぞれ独自の特徴を持っているが，その中でもアンモニアは，表 1 に示す通り，製造・輸送・貯蔵・利用全ての領域において優れた特徴を持っており，早期に社会実装することが可能と考えられる．特に，水素に変換することなく直接燃料として利用可能なことは大きなメリットとなる．

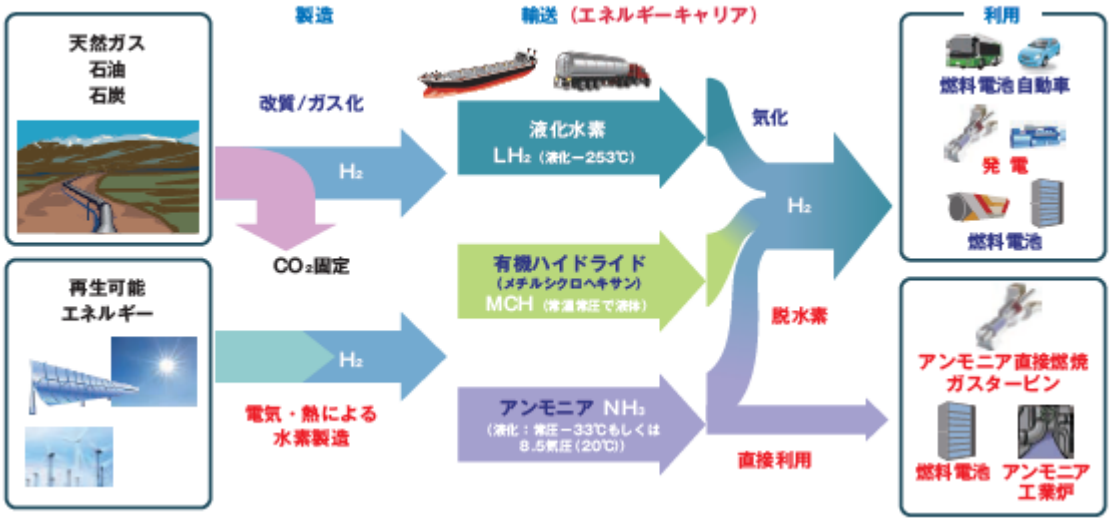


Fig. 2 Type of energy carriers

Table 1 Characteristics of ammonia as an energy carrier

目的	特徴
製造	・天然ガスからの高効率製造方法が確立されている（ハーバー・ボッシュ法） ・再生可能エネルギーからの水素（水電解）から製造が可能
貯蔵・輸送	・単位体積当たりの水素含有重量が大きい（121kg-H_2/m^3） ・容易に液化できる（-33℃） ・肥料や化学原料，脱硝設備などに広く利用されており，インフラがそろっている
利用	・水素に再変換することなく，直接燃料として利用可能である

２・２　アンモニアを燃料として利用する上での課題

アンモニアは，エネルギーキャリアとして表 1 に示すアドバンテージを持つ一方で，燃料として利用する場合はいくつか課題もある．アンモニアは可燃性ガスだが，天然ガス等に比較して燃焼速度が遅く（約 1/5）(Hayakawa, et al., 2015)，断熱火炎温度も低いため，火炎の安定性や伝熱特性に配慮する必要がある．燃焼条件によってはアンモニア中の窒素による Fuel-NOx を排出するため，低 NOx 燃焼法を開発する必要もある．また，固体酸化物形燃料電池にアンモニアを直接供給する場合，アンモニアの熱分解の吸熱反応により電池温度が低下してしまうため，電池を熱自立させるための放熱量低減が課題となる．その他，劇物としての取り扱いや，安価なカーボンフリーアンモニアの入手方法など，様々な検討を実施しているところである．

２・３　微粉炭焚ボイラ

微粉炭焚ボイラでアンモニアを混焼（熱量で 20%）するに当たり，火炉へのアンモニア投入方法や，ボイラとしての性能の検討を実施している．低 NOx 燃焼方法として，バーナー中心から炉

内の低酸素領域にアンモニア吹き込むことで酸化反応を抑制する手法を開発し，10MWth の燃焼試験装置（図 3）にて確認試験を行った．その結果，安定した火炎を達成するとともに（図 4），微粉炭専焼時とほぼ同等の NOx 濃度を達成することに成功した．

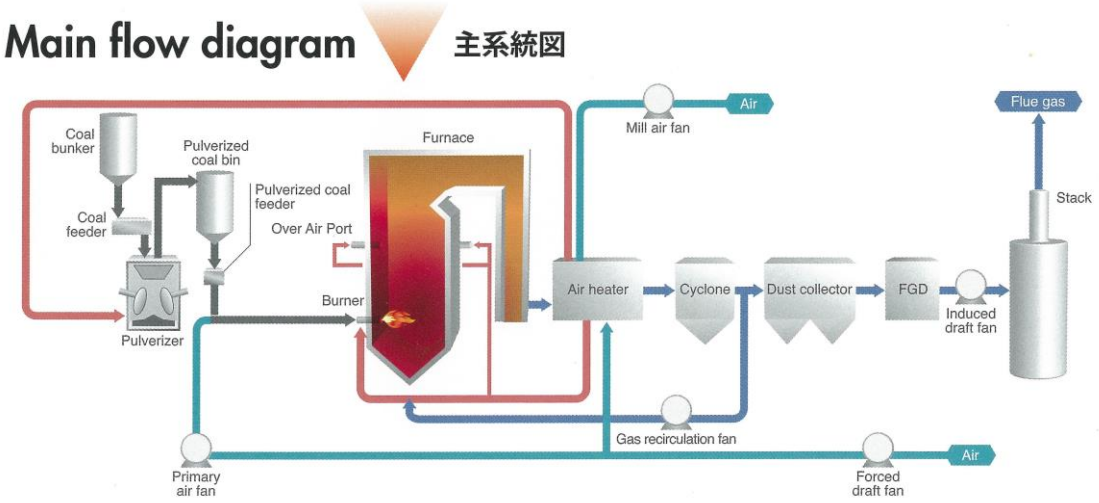


Fig. 3 Coal combustion test furnace

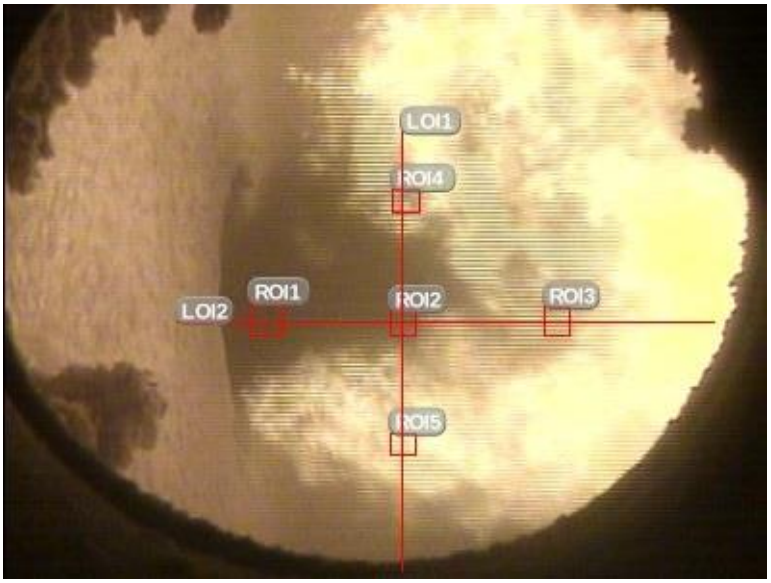


Fig. 4 Flame of ammonia co-firing with pulverized coal

2・4　ガスタービン

ガスタービンで用いられる希薄予混合燃焼をアンモニアに適用すると過大な Fuel-NOx を生成する恐れがある．そこで，微粉炭焚ボイラの場合と同様，火炎の低酸素領域にアンモニアを吹き込むバーナーを開発し，実機ガスタービンを用いた試験を実施した．IHI 製 2MWe 級ガスタービンである IM270 を用い（図 5），燃焼器のみをアンモニア/天然ガス混焼用燃焼器に換装した，高圧のアンモニアガスを安定して供給するため，液化アンモニアのままポンプで加圧し，気化器で気化させたのち燃焼器に供給する供給システムを設置した（図 6）．

天然ガスと混焼試験の結果（熱量で 20%），安定した発電に成功するとともに，NOx は天然ガス専焼よりは増加するものの，標準的な脱硝装置により環境規制を満たすことに成功した（図 7）．

Fig. 5 Appearance of IM270 gas turbine

Fig. 6 Ammonia supply unit

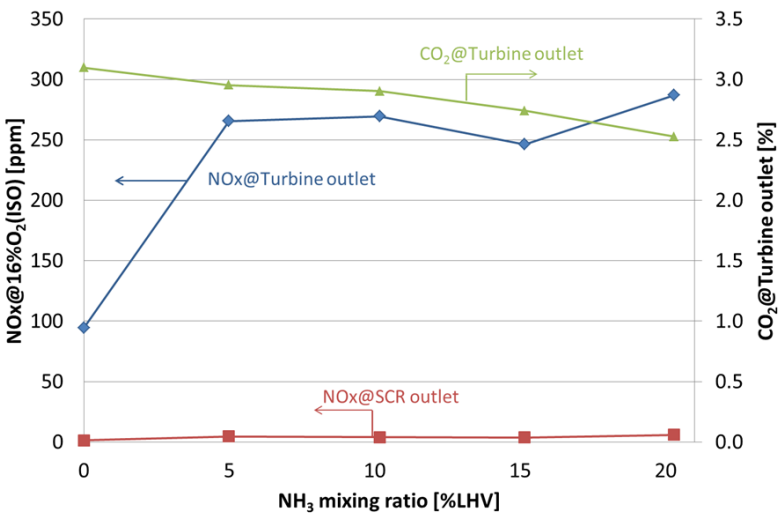


Fig. 7 Effect of ammonia co-firing ratio on NOx emission

2・5　固体酸化物形燃料電池（SOFC）

アンモニアからの高効率発電技術として，100%アンモニアを燃料として直接供給する SOFC 発電システムの開発を実施している．アンモニア直接供給型システムでは，燃料処理装置等が不要になるメリットがあるものの，アンモニアを燃料電池内で分解するため分解時の吸熱反応により電池温度が低下し，電池電圧の低下さらには熱自立運転ができない可能性がある．そこで燃料電池，熱交換器等の高温機器を収納したホットモジュール（図 8）の断熱性能を確保するため，熱流体解析ソフトを用いた３次元熱解析を行い，設計に反映した（図 9）．そして，ホットモジュールの要素試験結果を基に発電システムを試作した（図 10）．性能評価の結果，システムの熱自立を達成するとともに, 起動や停止も含めた安定した発電試験に成功し, DC 発電出力として 1,370W, DC 発電効率 56%を確認した.

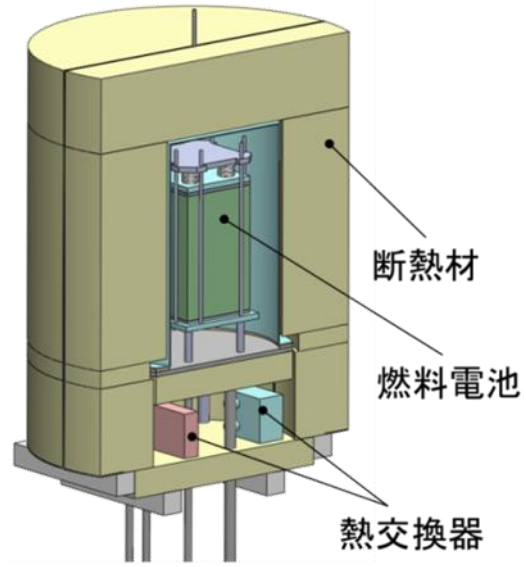


Fig. 8 1kW class SOFC hot module

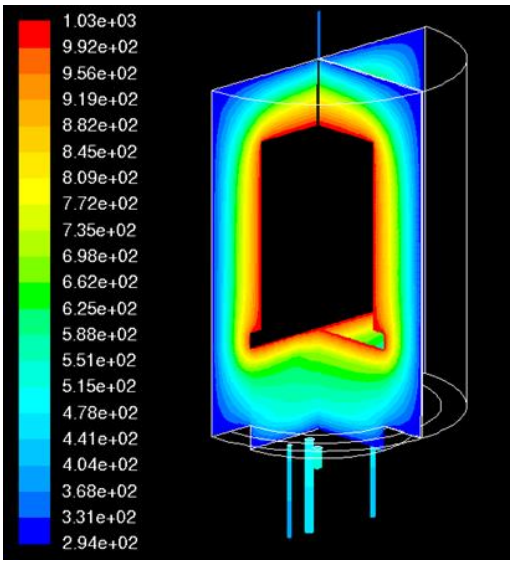


Fig. 9 Heat transfer calculation in hot module

Fig. 10 Appearance of SOFC system

３． 福島県相馬市における地産地消型スマートコミュニティ事業

再エネの電力を既存システムに供給せずに，地域社会のなかで最大限消費する「再エネの地産地消」を実現すると同時に，地域振興に寄与することを目指して福島県相馬市に，そうま IHI グリーンエネルギーセンター（広さ約 54,000 m^2）を 2018 年 4 月に開所した（図 11）.

Fig. 11 Equipment composition of soma smart community

出力 1,600kW の太陽光発電設備を設置し，太陽光発電からの電力を下水処理場等で利用しつつ，余剰電力は水電解によって水素を製造・貯蔵するとともに，電気ボイラからの蒸気によって汚泥の乾燥・減容化・再資源化に利用している（図 12）．本事業の特長は，太陽光発電量の変化に応じて水電解水素製造装置負荷・電気ボイラ負荷・大型蓄電池の充放電量・太陽光発電設備自体の発電量を制御する地産地消型エネルギーマネジメントシステムを導入し，太陽光発電設備からの発電量全量を一般送配電系統へ送ることなく地域で消費することである．今後予想される分散電源型再生エネルギーの大量導入時にも電力系統安定化に適用できるシステムとなる．製造・貯蔵した水素は，将来の水素社会を見据えた水素利用・エネルギーキャリア転換技術研究・実証試験等に使用する計画である．

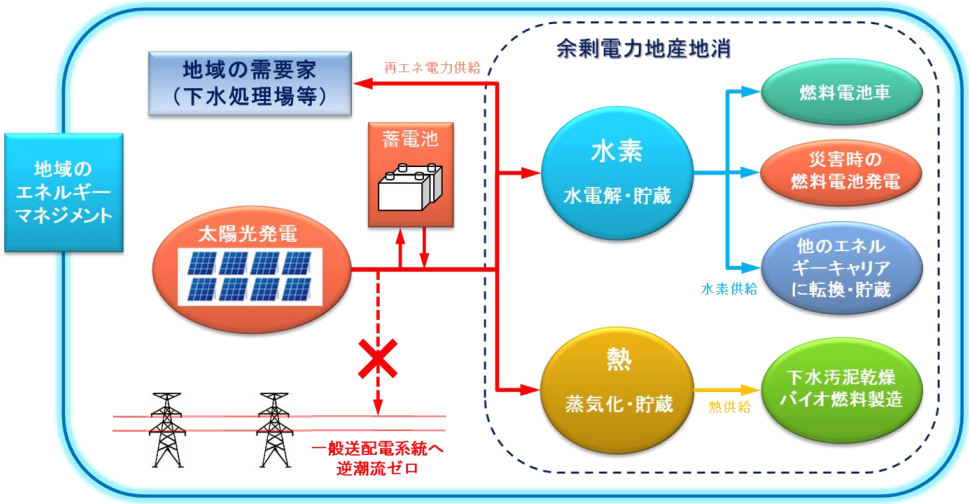


Fig. 12 Soma smart community model

４． おわりに

脱炭素社会の実現のためには，アンモニアの燃料利用技術と同様に CO_2 フリー水素/アンモニアサプライチェーンの確立が重要である．短期的には化石燃料や CCS の組合せにより CO_2 フリー水素/アンモニアを大量製造する方法が考えられるが，最終的には再生可能エネルギーから製造するのが望ましい．IHI では，バイオマスからの水素製造技術については二塔式ガス化炉 TIGAR®の開発を行っており，現在商用段階に入っている．さらに，太陽光発電からの電力による高効率水素製造技術についても研究開発を行っているところである．また，再生可能エネルギーの地産地消の実現と地域主導の新たな自律事業モデルを広く普及させるため，相馬で構築したモデルを他の近隣自治体へも展開していく予定である．カーボンフリーエネルギーサプライチェーンの構築を目指し，早期の技術確立・社会実装に挑戦していく．

謝　辞

本研究の一部は，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」（管理法人 : 国立研究開発法人　科学技術振興機構（JST））によって実施されました．ここに謝意を表します．

文献

Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Arakawa, Y., Kudo, T. and Kobayashi, H.,Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures, Fuel, 159(2015), 98-106.

塩沢文朗,「水素社会を拓くエネルギー・キャリア」，IEEI 解説記事

(http://ieei.or.jp/2014/09/expl140916/)，2014

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」資料より

TED Plaza

［連載企画］乱流熱伝達モデル入門（第１回）

服部　博文

名古屋工業大学　課長
技術部情報解析技術課
hattori@nitech.ac.jp

１．はじめに

熱や物質の輸送現象（Transport Phenomena of Heat and Mass Transfer）を物理的や工学的に正確かつ詳細に把握することは，伝熱問題，物質混合問題，気象問題，環境問題を解決するために必須事項である．その応用問題として，熱交換機器の熱交換効率問題や，機器や密閉空間からの排熱・換気問題，また異常熱による機器破損などの熱問題，化学薬品等の物質の混合効率問題，気象の風況・気温予測（大きく言えば天気予報）問題，都市部におけるヒートアイランド問題，これらをまとめたエネルギー問題等々があり，熱や物質輸送現象は多岐にわたる問題に絡んでいる．さて，熱や物質が輸送される現象の一つとして対流現象があり，工業製品や気象，環境など様々な場面で出くわす現象である．対流の形態には，浮力が影響しない強制対流場（Forced Convection），浮力が支配的な自然対流場（Natural Convection），それらが混合している共存対流場（複合対流場：Combined Convection）がある．それゆえ，熱に関する「温度場」とともに「流れ場」の解析が重要となってくる．その流れ場であるが，層流と乱流状態があり，現実の現象としては乱流となっていることが多い．乱流はその定義として，「流れ場の無次元パラメーターであるレイノルズ数（Reynolds Number）が高い時の流れの運動方程式の解」，「3 次元的な渦度の変動がある」，「大きな混合と拡散（Mixing and Diffusion）を伴う」，そして，「不規則で偶然的な時間，空間における変動を伴う流れ」であるとされている．この定義の最後に「不規則で偶然的な時間，空間における変動を伴う流れ」とあるが，流れの運動方程式（Navier-Stokes Equation もしくは Equation of Momuntum）と，連続の式（Equation of Continuty）を連立させて正確に解くことが出来れば，不規則で偶然的である乱流現象を捉えることは可能である（ということは，結果として不規則で偶然的ではないことになる）．このことは，バースト現象（Bursting Phenomena）やストリーク構造（Streak Structure）に代表される乱流の組織構造や準秩序構造（Coherent Structure）の発見により，乱流とは「必然と偶然の中間的な現象である」とされた．乱流の組織構造は，実験的研究で解明されたが，支配方程式（微分方程式）を乱流の条件（レイノルズ数が高い時）で解析的に解くことは困難である（Navier-Stokes 方程式の解の存在と滑らかさについては，数学のミレニアム問題（Millennium Prize Problems）の一つとなっており，数学的には一般解を求めることが要求されていると思われるが，初期条件が違えば層流解と乱流解が存在する時点で不可能ではないかと思われる？？）．そのため，計算機で数値的に解くこととなるが，時々刻々と変化し，様々なスケールを持つ 3 次元的な渦度の変動を数値的に解くには，計算機に多大な性能が要求される．

上述のような乱流の組織構造を発見した実験的手法では，乱流中における速度や圧力の空間分布を計測することや，可視化することが行われている（有名な Osborne Reynolds の実験（1883）では，染料による円管内流れの可視化によって臨界レイノルズ数（Critical Reynolds Number）の存在を証明した）．乱流空間における速度成分の計測器には，ピトー管や熱線流速計（佐々木，玉野，1941）などの接触式計測器，非接触式計測器として，レーザーを用いた流速計（LDV: Laser Dopplar

Velocimetory; Durst, et al., 1972 など）や，粒子画像流速計（PIV: Particle Image Velocimetory; Willert and Gharib, 1990 など），超音波ドップラー計測器などがある．前者のうち，熱線流速計では流速の時間変化の計測が可能でかつ計測精度が高いが，基本的にポイント計測となるため空間計測には多くの手間を生じることや，乱流場で重要となる３次元的な渦度の変動を計測する場合や逆流を伴う場合にはその適用が難しい．また後者の PIV は，逆流を伴う流れ場を含め，様々な流れ場の空間的な計測が可能であるため，広く普及してきている．さて，この乱流場に熱や物質移動が伴うことは，現実的な場では普通である．そのため，流れ場に加え，熱や物質の空間分布を計測することが重要となる．熱に関しては，その温度分布を計測することとなるが，乱流場において空間的に時間変動する温度分布を計測する方法は，熱電対や抵抗線を用いる方法が一般的であるが（例えば，田川他，1998），レーザーによる温度計測法もある（Nakajima, et al., 1990 など）．乱流熱・物質輸送現象を解析するためには，速度変動の直交する成分の相関であるレイノルズせん断応力（Reynolds Shear Stress）や，速度変動と温度もしくは濃度などのスカラー物質変動の相関値である乱流熱流束もしくは乱流スカラー流束（Turbulent Heat Flux もしくは Turbulent Scalar Flux）を正確に計測する必要がある．特に乱流熱流束の計測では，速度場と温度場の瞬時場を同時計測する必要があるが，熱線流速計と抵抗線の組合せによる速度温度同時計測(菱田他，1977)，もしくは LDV による速度温度同時計測(Nakajima, et al., 1990)，LDV と熱電対の組合せによる速度温度同時計測(田川他，1999)などの計測例がある．

本稿で扱う乱流熱・物質輸送現象は，境界条件の一つに「壁面」を持ち，そのため乱流境界層（Turbulent Boundary Layer）を形成する場における現象を扱う．また，より簡単に解説するため，作動流体の空間における密度と物性値を一定と考え，つまり非圧縮性流体と仮定して扱う．加熱された壁面上を流れる乱流境界層のように，壁面で熱伝達（Heat Transfer）を伴う場を解析するには，薄い乱流境界層内の更に薄い粘性底層（Viscous Sublayer）や伝導底層（Conductive Sublayer）も含んだ内層領域（Inner Region）における乱流熱流束を計測しなければならないが，上記に挙げた計測方法でも困難であることが多い．そのため，数値的な解析手法で乱流境界層内まで解くことが出来れば，実験的手法で計測が困難な領域における乱流熱流束分布が取得されるため，実験による計測値と合わせて乱流境界層における乱流熱・物質輸送現象をより正確かつ詳細に把握することが出来るであろう．しかしながら，乱流境界層を数値的に正確に解くためには，膨大な計算機資源を必要とする．上記のような乱流現象を正確に解くためには，支配方程式による連立微分方程式を解くためのより精度の高い計算スキームと，適切な計算格子が必要である．より精度の高い計算スキームは，スペクトル法による方法(Kim, et al., 1987)があるが，ある方向の境界条件に周期境界条件を用いる必要があるため，適用に限界がある．また，より汎用性が高い差分法による高精度スキームが考案され(Morinishi, et al., 1998)，こちらの方法によると様々な壁面形状を持つ乱流境界層にも適用できる．これらは，熱・物質輸送現象を支配する方程式を，何ら物理的もしくは数学的な付加項を用いずに直接解くため，直接数値シミュレーション（DNS: Direct Numerical Simulation）と呼ばれ，速度場に限れば，乱流スケールの最小スケールであるコロモゴロフスケール（Kolmogorov Scale）まで捉えるが，そのための必要な 3 次元空間における格子点数Nは，代表速度Uと代表長さL，動粘性係数νで定義される流れ場のパラメーターであるレイノルズ数($\mathrm{Re} = UL/\nu$)に対し，概ねN~$\mathrm{Re}^{9/4}$に比例する．そのため，例えば人が歩いている時の周りの流れの DNS を想定すると，代表速度$U = 1$ [m/s]（時速約 4 km/h），代表長さ$L = 0.25$ [m]（胴囲を 0.8m），空気の動粘性係数$\nu = 1.512 \times 10^{-5}$ [m^2/s]（気温が 293.15K の時）であるので，レイノルズ数は約 17,000 となり，必要格子点数は約 33 億点である．この格子点数に，４変数（3 速度と圧力）を 2 時刻で配置する必要があり，倍精度計算とすると，その記憶容量は約 100 ギガバイト（Giga=10^9）必要である．これは現在市販されているワークステーションで計算可能な範囲であるが，計算速度を考えると，初期条件から時々刻々と変化する速度と圧力を計算しながら，レイノルズ応力や乱流熱流束を算出するための十分な統計量（Tubulence Statistics）を取得するためには数カ月の時間が必要となるであろう．ここで統計量という用語を出したが，上述のレイノルズ応力や乱流熱流束は，次章に示す「レイノルズ平均（Reynolds Average）」(Reynolds, 1895)という統計処理を行った結果生じる乱流統計量である．

上述の事柄は，乱流熱・物質輸送現象を物理的や工学的に正確かつ詳細に把握するための手段として記述したが，これらの事を行うには膨大な時間と費用が掛かり，またそれ相当の知識も必要となるため，非常に敷居が高い．例えば，加熱された円管内を流れ，下流で発達する乱流熱伝

達場（Turbulent Heat Transfer of Fully-Developed Pipe Flow）の乱流統計量を得るとしよう．実験で統計量を得るためには，装置の開発から，測定装置の準備が必要である（場合によっては，測定装置の開発も必要となる）．これらの準備が終わったとしても，有意な計測結果を出すためには数日を有することであろう．では，DNS ではどうか？DNS の経験があれば，計算格子と境界条件の設定，初期値の準備が終われば計算に取り掛かることが出来るが，経験がなければ初期値の準備方法からして大きな問題となる．さらに適切な条件を設定しないと，計算も収束するとは限らない．また，両者に共通する事項として，狙ったレイノルズ数における実験装置の大きさ（格子の大きさ），計測装置の空間分解能（壁面近くの格子幅）等，装置や DNS を設計する上で考えなければならないことが幾つもある．そのため，測定対象の乱流熱伝達場からどんな乱流統計量が得られるかが「予測（Prediction）」出来れば，その計画段階で適切な設計が行える．

本稿では，乱流熱・物質輸送現象に対する予測手法で用いる「乱流熱伝達モデル（Turbulent Heat Transfer Model）」について，3 回に分けて解説する．そこでは，乱流熱伝達モデルに関する基礎的な知識を始めとして，乱流熱伝達モデルの開発秘話？等も出来る限り記述していくが，拙い表現がある場合にはご容赦いただければ幸いである．

２． 基礎方程式

2・1　支配方程式

デカルト座標系において，流体とエネルギー輸送の支配方程式は，次式で与えらえる（例えば，Hinze, 1975，エネルギー方程式については，田川, 2004 に解説がある）．

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial \tau}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]+f_i \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0 \tag{2}$$

$$\rho c_p\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}+u_j\frac{\partial t}{\partial x_j}\right)=q+\frac{Dp}{D\tau}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x_j}\right)+\mu\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)^2\right] \tag{3}$$

ここで, 式(1)は, Navier-Stokes（運動）方程式, 式(2)は連続の式, 式(3)はエネルギー方程式（Equaiton of Energy）であり，$D/D\tau=\partial/\partial\tau+u_j(\partial/\partial x_j)$は実質微分である．式中の記号は，$u_i$は$x_i$方向速度，$x_i$は$i$方向，$p$は圧力，$\rho$は密度，$\mu$は粘性係数，$f_i$は外力，$\tau$は時間，$t$は温度，$c_p$は定圧比熱，$\lambda$は熱伝導率，$q$は外部から与えられる熱量である．これらの式のように，本稿では式の記述にテンソルを用いるため，以下にテンソルで用いられる規約や式等を示す．まず，式(1)含まれるδ_{ij}はクロネッカーのデルタ（Kronecker delta）であり，以下で定義される．

$$\left.\begin{aligned}\delta_{ij}&=1:\quad i=j\\ \delta_{ij}&=0:\quad i\neq j\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

例えば, このクロネッカーのデルタを用いると, 微分の添字を以下のように変えることが出来る．

$$\delta_{ij}\frac{\partial}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_i} \tag{5}$$

このため，式（1）の右辺第 1 項は，$\partial p/\partial x_i=\delta_{ij}(\partial p/\partial x_j)$となり，右辺第 2 項の中に，圧力を含めた応力としてまとめることが出来る．また，テンソルにおける重要な規約として，同じ項に同じ添字がある場合には，以下のように添字を１～３（空間の方向数）まで加算する総和規約がある．

$$\delta_{ii}=\delta_{11}+\delta_{22}+\delta_{33}=1+1+1=3 \tag{6}$$

$$\delta_{ij}\frac{\partial}{\partial x_j}=\delta_{i1}\frac{\partial}{\partial x_1}+\delta_{i2}\frac{\partial}{\partial x_2}+\delta_{i3}\frac{\partial}{\partial x_3} \tag{7}$$

他に知っておくと便利なテンソル式として，次式で定義されるエディントンのイプシロン（Levi-Civita symbol）がある．

$$\left.\begin{aligned}\epsilon_{ijk} &= 1: ijk = 123, 231, 312\\ \epsilon_{ijk} &= -1: ijk = 132, 321, 213\\ \epsilon_{ijk} &= 0: i = j, i = k, j = k\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

本稿では作動流体の空間における密度変化を一定（ρ =一定）および物性値も一定と考え，つまり非圧縮性流体と仮定して扱うため，支配方程式は以下のように簡単になる．

$$\frac{\partial u_i}{\partial \tau} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \tag{9}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u_j \frac{\partial t}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x_j \partial x_j} + q \tag{11}$$

ここで，$\nu\ (= \mu/\rho)$は動粘性係数，$\alpha\ (= \lambda/c_p\rho)$は温度伝導率である．

DNS では，これらの微分方程式を連立させて解いているが，ここで連立方程式として解けるかの確認をしておく．式の数を数えると，式（9）はu_1，u_2，u_3の 3 方向速度について 3 本の式となり，式（10）の連続の式，式（11）のエネルギー方程式と合わせて 5 本の式がある．一方，変数の数は，u_1，u_2，u_3の速度成分と，圧力p，温度tの 5 つである．つまり，式の数＝変数の数となり，方程式は閉じているため解くことが出来る（f_iやqについては，速度や温度の関数であるとして，変数の数は増えないとしている）．

2・2　レイノルズ平均

さて，乱流現象は時々刻々と変化するため，瞬時の情報だけを見てもその全体の情報を把握することは困難である．そのため，現象を時間平均で考えるため，前章で述べた次式で与えられるレイノルズ平均（Reynolds Average，もしくはレイノルズ分解（Reynolds Decomposition））が考えられた（図 1 参照）．

$$\hat{U}_i(t, x_i) = \bar{U}_i(x_i) + u_i(t, x_i) \tag{12}$$

ここで，左辺は瞬時速度（Instaneous Velocity），右辺第 1 項は時間平均値（Time-Mean Velocity），第 2 項は乱れ成分（変動値，Velocity Fluctuation）である．この関係を速度（$u_i = \bar{U}_i + u_i$），圧力（$p = \bar{P} + p$），温度（$t = \bar{T} + t$）に適用し，式（9）～（11）に代入して，時間平均を取ると次式を得る（なお，式 (9) ～ (11) では，瞬時速度の記号を小文字として標記しているため，$\hat{U}_i(t, x_i) = u_i$ であるが，右辺の乱れ成分とは区別する）．

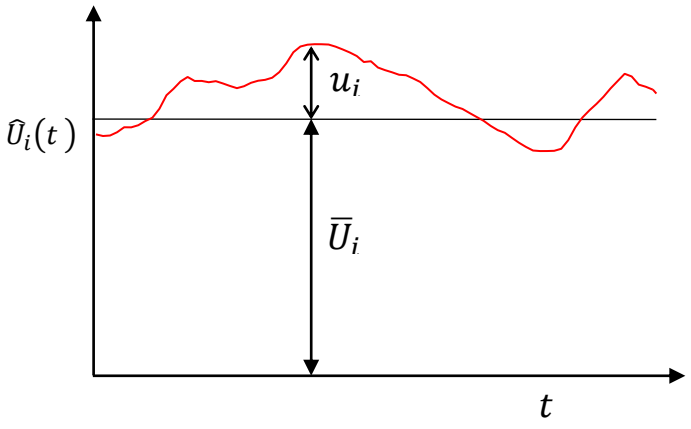


Fig. 1 Reynolds Decomposition

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} + \bar{F}_i \tag{13}$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{14}$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i t}}{\partial x_j} + \bar{Q} \tag{15}$$

上式を導出するにあたり，平均には次式の関係があることに注意されたい．

$$\left.\begin{array}{l} \bar{\phi} = \overline{\bar{\Phi} + \phi} = \bar{\bar{\Phi}} + \bar{\phi} = \bar{\Phi} + \bar{\phi} = \bar{\Phi} \\ \overline{\bar{\Phi}_A \bar{\Phi}_B} = \bar{\bar{\Phi}}_A + \bar{\bar{\Phi}}_B = \bar{\Phi}_A + \bar{\Phi}_B \\ \overline{\bar{\Phi}\phi} = \bar{\bar{\Phi}}\bar{\phi} = \bar{\Phi}\bar{\phi} = 0, \quad \overline{\phi_A \phi_B} \neq 0 \end{array}\right\} \tag{16}$$

式(13)と式(15)を見ると，右辺に新たな項が出現している．これらは，左辺の慣性項からレイノルズ平均をすることによって現れた乱流の本質を支配する項であり，それぞれレイノルズ応力，乱流熱流束である．レイノルズ応力は，その成分を行列で示すと以下のようになる．

$$\overline{u_i u_j} = \begin{pmatrix} \overline{u_1^2} & \overline{u_1 u_2} & \overline{u_1 u_3} \\ \overline{u_2 u_1} & \overline{u_2^2} & \overline{u_2 u_3} \\ \overline{u_3 u_1} & \overline{u_3 u_2} & \overline{u_3^2} \end{pmatrix} \tag{17}$$

行列の対角成分は，レイノルズ垂直応力（Reynolds Normal Stress）と呼ばれ，また非対角成分はレイノルズせん断応力（Reynolds Shear Stress）と呼ばれるが，対称性（例えば，$\overline{u_1 u_2} = \overline{u_2 u_1}$）によりレイノルズ応力の全成分は 6 成分となる．また，乱流熱流束$\overline{u_i t}$は，x_1~x_3のそれぞれの方向の 3 成分である．

これらの項は定数ではなく，場の未知数であるため，方程式の数が増えてないにもかかわらず，変数が合計 9 つ増えたことになる．そのため，方程式の数≠変数の数となり，連立方程式が閉じていないことになる．つまり，なんらかの方法でレイノルズ応力，乱流熱流束を与えなければ連立方程式は解けないこととなる．まず，直観的にレイノルズ応力の輸送方程式を導出し，解けばよいのではと？考える．レイノルズ応力の輸送方程式は以下の手順で作成できる．

最初に，Navier-Stokes 方程式より，変動速度成分u_iとu_jの輸送方程式を導出する．

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k} + \bar{U}_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(u_i u_k - \overline{u_i u_k}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} \tag{18}$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_k} + \bar{U}_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(u_j u_k - \overline{u_j u_k}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_k} \tag{19}$$

$\overline{(18) \times u_j + (19) \times u_i}$とすることで，次のレイノルズ応力$\overline{u_i u_j}$の輸送方程式を得る．

$$\begin{aligned} \bar{U}_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = & -\left(\overline{u_i u_k}\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k}\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k}\right) - \frac{\partial \overline{u_i u_j u_k}}{\partial x_k} + \overline{\frac{p}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)} \\ & -\frac{1}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial p u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p u_j}{\partial x_i}\right)} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i u_j}}{\partial x_j \partial x_j} - 2\nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}} \end{aligned} \tag{20}$$

ここで，注目すべきは，右辺第２項に 3 次モーメント（Third-order Moment）である$\overline{u_i u_j u_k}$を含む項が出現していることである．つまり，2 次モーメント（Second-order Moment）であるレイノルズ応力$\overline{u_i u_j}$の輸送方程式を作成しても，その 1 次高いモーメントが出現し，これも未知数であるため，この方法では永遠に方程式が閉じることがない．そのため，人為的，強制的に方程式を閉じさせる必要がある．このため，この問題のことをクロージャー問題（Closure Problem）という．そのクロージャー問題で行うことは，レイノルズ応力や乱流熱流束をなんらかの形で与える

ことに他ならない．乱流の本質であるレイノルズ応力や乱流熱流束を，なんらかの形で与えるため，このことを「乱流のモデリング（Turbulence Modeling）」という．

３． 乱流のモデリング

３・１　勾配拡散型モデル

レイノルズ平均を，乱流熱伝達現象の支配方程式に施すことにより出現したレイノルズ応力と乱流熱流束のモデリングに対し，一番基礎的なモデリングは勾配拡散型モデル（Gradient Diffusion Type Model）と呼ばれる乱流モデルである．これは，Boussinesq が最初に提唱した渦粘性（Eddy Viscosity）の概念(Boussinesq, 1877 を用い，次式で与えらえる．

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \overline{u_k u_k} \delta_{ij} \tag{21}$$

$$-\overline{u_i t} = \alpha_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \tag{22}$$

ここでν_tは，渦動粘性係数（Eddy Viscosity）もしくは運動量の渦拡散係数（Eddy Diffusivity for Momentum），α_tは熱の渦拡散係数（Eddy Diffusivity for Heat）である．また，式(21)はテンソル表記のため，添字が$i = j$となった時に右辺＝左辺とするために右辺に項が付加されている．

このモデルの利点は，これらの関係式を支配方程式(13)と(15)に代入すると理解できる．

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right] + \bar{F}_i \tag{23}$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha + \alpha_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] + \bar{Q} \tag{24}$$

これらの式を見ると，粘性係数（拡散係数）と渦拡散係数が，実効拡散係数（$\nu_e = \nu + \nu_t$，$\alpha_e = \alpha + \alpha_t$）としてまとめられることが分かる．層流の場合には$\nu_t = 0$，$\alpha_t = 0$となり乱流の作用が消え，乱流の場合にはこれらが値を持つことから実効拡散係数が増加し，運動量や熱の拡散が活発となることが説明できる（第 1 章の乱流の定義で記述した「大きな混合と拡散」は，これで説明が出来る）．

また，このモデルの欠点としては，レイノルズ応力の垂直応力成分（乱れの各成分）が正確に算出できないことにある．例えば，平行平板間で十分に発達したスパン方向に一様な乱流を考える．流れ方向を$x\ (= x_1)$，壁面垂直方向を$y\ (= x_2)$，スパン方向を$z\ (= x_3)$流れ方向平均速度を$\bar{U}\ (= \bar{U}_1)$，壁面垂直方向速度を$\bar{V}\ (= \bar{U}_2)$，スパン方向速度を$\bar{W}\ (= \bar{U}_3)$とすると，条件により$\bar{V} = \bar{W} = 0$，$\partial/\partial x = 0$，$\partial/\partial z = 0$となる．そのため，式(21)より，レイノルズ応力の垂直成分はそれそれ次式で与えらえる．

$$\overline{u^2} = -2\nu_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{1}{3} q = \frac{1}{3} q \tag{25}$$

$$\overline{v^2} = -2\nu_t \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{1}{3} q = \frac{1}{3} q \tag{26}$$

$$\overline{w^2} = -2\nu_t \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} + \frac{1}{3} q = \frac{1}{3} q \tag{27}$$

ここで，$q = \overline{u_k u_k}$である．上式から，$\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2}\ (= q/3)$となることが分かるが，発達した平衡平板間乱流における実際の各方向乱れ分布は. 実験や DNS の結果（図 2 参照（Nagano and Hattori, 2003））からも明らかのように，$\overline{u^2} > \overline{w^2} > \overline{v^2}$と非等方（Anisotoropy）的な分布である．このように，関連する平均勾配が存在しない場合には，レイノルズ応力を等方（Isotoropy）的に与えてしまう．

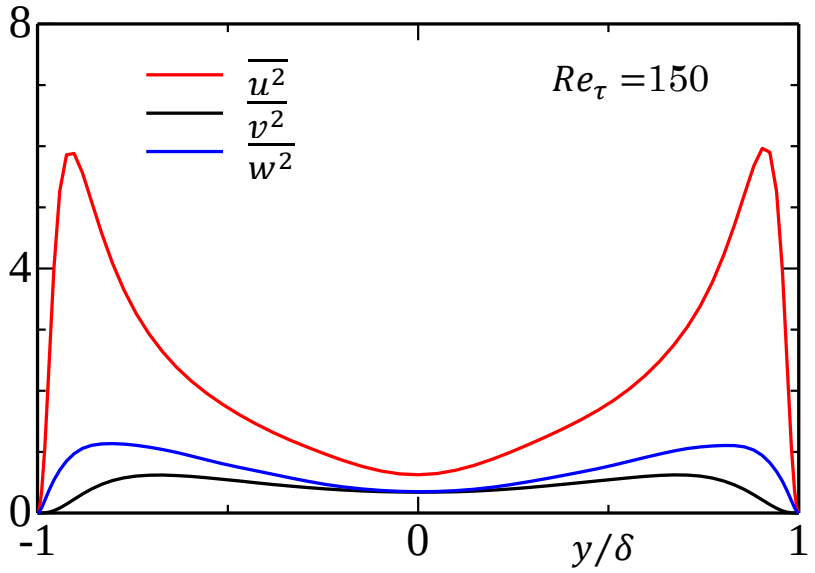


Fig. 2 Distributions of Reynolds normal stresses in filly-developed channel flow

さて，これら渦拡散係数は，作動流体の物質で決まる物性値ではなく，場の状態によって決まる変数である．そのため，勾配拡散型モデルでレイノルズ応力，乱流熱流束をモデル化しても，方程式は閉じていることにならない．よって，さらに渦拡散係数をモデル化する必要がある．

3・2　渦拡散係数を用いた勾配拡散型モデルの分類

渦拡散係数ν_t，α_tのモデル化は，分子粘性係数ν [m^2/s] が，分子の平均速度[m/s]×平均自由行程[m]で算出されることを参考に，乱れの速度V×乱れの空間スケールLでモデル化する．

$$\nu_t = CV \cdot L \tag{28}$$

ここで，Cはモデル定数である．また熱の渦拡散係数α_tについても，その次元が同じのため同様のモデル化を行うが，温度場の場合には乱れの空間スケールの概念が定義しづらいため，乱れの寿命$\tau\ (= L/V)$を用い，以下のようにモデル化する．

$$\alpha_t = CV \cdot V\tau \tag{29}$$

勾配拡散型モデルの分類は，この乱れの速度Vと乱れの空間スケールL（もしくは乱れの寿命τ）を解くための方程式の数で分類され，速度場の運動量の渦拡散係数に対する代表的なモデルとして以下のモデルがある．

(1)　0 方程式モデル：プラントルの混合距離理論（Prandtl’s Mixing Length Theory (Prandtl, 1925)）
乱れの空間スケールLを，実験的な知見から得られる混合距離ℓで与え，乱れの速度Vは，平均速度勾配と混合距離の積$\ell(\partial\overline{U}/\partial y)$で与える（$\overline{U}$は主流方向平均速度，$y$は壁面垂直方向座標）．そのため，渦拡散係数を求めるために新たな方程式を解く必要がなく，0 方程式モデルと呼ばれる．

$$\nu_t = CV \cdot L = C\ell(\partial\overline{U}/\partial y) \cdot \ell = C\ell^2(\partial\overline{U}/\partial y)$$

(2)　1 方程式モデル：乱流エネルギー輸送方程式モデル，渦拡散係数輸送方程式モデル(Boldwin and Barth, 1990)
乱れの速度Vを，$k = \overline{u_i u_i}/2$で定義される乱流エネルギー（Turbulent Kinematic Energy）の

輸送方程式で解き（速度スケールは$V=\sqrt{k}$），乱れの長さスケールは混合距離ℓで与える．また，渦拡散係数そのものの輸送方程式を解くモデルも 1 方程式モデルに分類される．

$$\nu_t = CV \cdot L = C\sqrt{k} \cdot \ell$$

(3) 2 方程式モデル：$k-\varepsilon$モデル(Launder and Spalding, 1974)，$k-\omega$モデル(Wilcox, 2008)
$k-\varepsilon$モデルは，乱れの速度Vに乱流エネルギーで定められる$\sqrt{k}$を，乱れの空間スケールLに乱流エネルギーの散逸率ε（Dissipation rate of Turbulence Energy）を用い，$L=k^{3/2}/\varepsilon$で与える．乱流エネルギーとその散逸率は，それぞれの輸送方程式から算出される．

$$\nu_t = CV \cdot L = C\sqrt{k} \cdot \left(k^{3/2}/\varepsilon\right) = C\,k^2/\varepsilon$$

$k-\omega$モデルは，乱れの速度Vは$k-\varepsilon$モデルと同様であるが，乱れの空間スケールLではなく，乱れの寿命$\tau\,(=L/V)$を用い，乱れの寿命τを乱れの特性周波数ωで$\tau=1/\omega$としたモデルである（$k-\varepsilon$モデルとは，$\omega=\varepsilon/\beta^* k$の関係がある（$\beta^*$はモデル定数））．

$$\nu_t = CV \cdot L = CV \cdot V\tau = C\sqrt{k} \cdot \left(\sqrt{k}/\omega\right) = C\,k/\omega$$

一方，温度場の熱の拡散係数に対する代表的なモデルとして以下のモデルがある．

(1) 0 方程式モデル：プラントル数（粘性係数と熱伝導率の比，$Pr=(\mu/\rho)/\left(\lambda/\rho c_p\right)=\nu/\alpha$））の考えを，運動量の渦拡散係数と熱の渦拡散係数の比の関係に拡張した乱流プラントル数（$Pr_t=\nu_t/\alpha_t$）によって与えられるモデル．通常，乱流プラントル数は定数で与えられるため，温度場 0 方程式モデルと呼ばれる．

$$\alpha_t = \nu_t/Pr_t$$

(2) 1 方程式モデル：熱の渦拡散係数輸送方程式モデル(裴他, 1990)
熱の渦拡散係数そのものを輸送方程式を解くモデル．

(3) 2 方程式モデル：温度場 2 方程式モデル(Nagano and Kim, 1988)
乱れの速度Vに乱流エネルギーで定められる$\sqrt{k}$を，乱れの寿命τに温度乱れ$\overline{t^2}$とその散逸率ε_tから定まる温度場特性時間スケール$\tau_t\left(=\overline{t^2}/\varepsilon_t\right)$を導入し，速度場の特性時間スケール$\tau_u(=k/\varepsilon)$とのタイムスケール比$R\,(=\tau_t/\tau_u)$を用いて$\tau=\tau_u f(R)$として与える（Nagano and Kim, 1988 の場合は，$f(R)=\sqrt{2R}$で与えらえる）．温度乱れとその散逸率は，それぞれの輸送方程式から算出されるが，別途速度場タイムスケールを出すための方程式が必要である．

$$\alpha_t = CV \cdot V\tau = C\sqrt{k} \cdot \sqrt{k}\tau_u f(R) = C(k^2/\varepsilon)f(R)$$

以上により，レイノルズ応力と乱流熱流束に対する，勾配拡散型モデルを用いた基本的なモデル化の概念を説明した．次回は，これらの更なる具体的なモデリング方法について説明をする．

文献

Boussinesq, J., Essai sur la théorie des eaux courantes, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences, Vol. 23, No. 1 (1877), pp.1-680.
Baldwin, B.S. and Barth, T.J., A one-equation turbulence transport model for high Reynolds number wall-bounded flows, NASA TM 102847 (1990).
Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J. H., The application of optical anemometry to measurement in combustion systems, Combustion and Flame, Vol.18 (1972), pp. 197-201.
Hinze, J. O., Turbulence (2nd Edition), McGraw-Hill (1975).
Kim, J., Moin, P., and Moser, R., Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 177 (1987), pp. 133-166.
Morinishi, Y., Lund, T.S., Vasilyev, O.V. and Moin, P., Fully conservative higher order finite difference

schemes for incompressible flow, Journal of Computational Physics, Vol. 143, No. 1 (1998), pp. 90-124.
Launder, B. E.　and Spalding, D. B., The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, No. 2 (1974), pp. 269-289.
Nagano, Y. and Hattori, H., Direct numerical simulation and modelling of spanwise rotating channel flow with heat transfer, Journal of Turbulence, Institute of Physics, Vol. 4-010 (15pages)　(2003).
Nagano, Y. and Kim, C., A two-equation model for heat transport in wall turbulent shear flows, ASME. J. Heat Transfer, Vol. 110, No. 3 (1988), pp. 583-589.
Nakajima, T., Utsunomiya, M., Ikeda, Y. and Matsumoto, R., Simultaneous measurement of velocity and temperature of water using LDV and fluorescence technique, Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Springer-Verlag, (1990) pp. 34-53.
Prandtl, L., Z. angew, Math. Mech. Vo. 5, No. 1 (1925), pp. 136-139.
Reynolds, O., An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 174 (1883), pp. 935-982.
Reynolds, O., On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A, Vol. 186 (1895), pp. 123-164.
Wilcox, D. C., Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited, AIAA Journal, Vol. 46, No. 11 (2008), pp. 2823–2838.
Willert, C.E. and Gharib, M., Digital particle image velocimetry applied to an evolving vortex ring, Proc. of the Fifth Intern. Symp. on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics and Workshop on the Use of Computer in Flow Measurements, 18.1 (1990).
佐々木達治郎，玉野光男，空気力学実験法，河出書房(1941).
田川正人，下地敏央，太田安彦，二線式熱電対による変動温度測定法の精度評価と改良，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 64, No. 625 (1998), pp. 3077-3083.
田川正人，永谷真一，下地敏央，太田安彦，高温乱流場における速度と温度の高精度同時測定，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 65, No. 634 (1999), pp.2157-2164.
田川正人，エネルギー式を巡る，日本伝熱学会誌「伝熱」，Vol. 43, No. 178 (2004), pp. 26-31.
菱田幹雄，長野靖尚，田代真一郎，速度変動と温度変動の同時測定，日本機械学会論文集，Vol.43, No.365 (1977), pp.225-232.
裴昌謙，服部博文，長野靖尚,新しい低レイノルズ数型１方程式モデルによる熱･流体解析（第２報：温度場１方程式モデルの構築），Thermal Science & Engineering，Vol. 7, No. 5 (1999)，pp. 31-39.

2018 年度年次大会 熱工学部門報告

第 95 期熱工学部門年次大会委員会
委員長　小田　豊（関西大学）
幹　事　網　健行（関西大学）

日本機械学会 2018 年度年次大会は，「多様化する社会・技術への機械技術者の挑戦」をキャッチフレーズに 9 月 9 日（日）～12 日（水），関西大学において開催されました．会期中には，「情報と機械の融合」，「社会構造変化への対応」，「革新技術への新展開」を大会テーマとして 1,180 件の学術講演発表が行われました．

熱工学部門に関連する学術講演では，4 セッションからなる「熱工学一般セッション」において，21 件（伝熱関連：14 件，燃焼関連：7 件）の講演発表が行われました．年次大会の特色である「部門横断セッション」については，以下に述べるオーガナイズドセッション 8 件が企画され，102 件の講演発表がありました．

2018 年度年次大会総合プログラム表紙

- 電子機器の強度・信頼性評価と熱管理（熱工学部門，計算力学部門，材料力学部門），セッション数：2，講演件数：8 件
- 分散型エネルギーとシステムの最適化（熱工学部門，動力エネルギーシステム部門，計算力学部門，環境工学部門），セッション数：1，講演件数：5 件
- 低炭素社会実現への礎：燃料電池・二次電池とナノ・マイクロ現象（材料力学部門，流体工学部門，熱工学部門，計算力学部門，動力エネルギーシステム部門，マイクロ・ナノ工学部門），セッション数：3，講演件数：16 件
- 乱流における運動量，熱，物質の輸送現象およびその応用（流体工学部門，熱工学部門），セッション数：4，講演件数：22 件
- マイクロ・ナノスケールの熱流体現象（流体工学部門，熱工学部門，マイクロ・ナノ工学部門），セッション数：4，講演件数：22 件
- 熱・流れの先端可視化計測（流体工学部門，動力エネルギーシステム部門，熱工学部門，バイオエンジニアリング部門，エンジンシステム部門），セッション数：2，講演件数：11 件
- 交通・物流機械の自動運転（交通・物流部門，機械力学・計測制御部門，技術と社会部門，機械材料・材料加工部門，流体工学部門，産業・化学機械と安全部門，設計工学・システム部門，法工学専門会議，ロボティクス・メカトロニクス部門，熱工学部門，スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門，生産加工・工作機械部門），セッション数：2，講演件数：9 件
- 医工学テクノロジーによる医療福祉機器開発（医工学テクノロジー推進会議，機械力学・計測制御部門，流体工学部門，計算力学部門，バイオエンジニアリング部門，ロボティクス・メカトロニクス部門，情報・知能・精密機器部門，材料力学部門，熱工学部門，マイクロ・ナノ工学部門，機素潤滑設計部門），セッション数：2，講演件数：9 件

熱工学部門では，例年通り熱工学部門に関連する講演に対して「若手優秀講演フェロー賞」の審査を行い，評価フォームによる採点を行っております．審査を行うにあたりご協力を賜りました多くの先生方には，この場をお借りして御礼申し上げます．

恒例の部門同好会は，流体力学部門，計算力学部門および材料力学部門との合同で，9 月 10 日夕方に関西大学生協で開催され，合計 36 名の参加を頂き，大変盛況でした．

最後になりましたが，年次大会の企画・運営にご尽力いただきましたオーガナイザー，講演者，座長の皆様に厚く御礼申し上げます．2019 年度に秋田大学で開催されます年次大会では，さらに多くの皆様のご参加を賜り，研究交流と親睦を深めて頂けますよう祈念致しております．

熱工学コンファレンス 2018 開催報告

実行委員会 委員長　富山大学 平澤良男

今年度の熱工学コンファレンスは，国立大学法人富山大学工学部（総合教育研究棟）にて，平成30年10月20日（土）と21日（日）の2日間にわたって開催されました．

これまでのように10月の末開催とするつもりでしたが，10月末は「とやまマラソン」が毎年開催されており，ホテル予約が非常に困難であると予想されたため，10月20日（土），21日（日）に変更いたしました．幸いにも他の学会等との重複もなかったようで学術講演212件，参加登録者430名（スタッフ含む）と，多くの皆様にご参加いただきました．懇親会登録参加者も170名と大盛況のうちに終えることができました．ご参加いただきました皆様方には，心よりお礼申し上げます．

コンファレンスの初日は，どうしても当日参加者の殺到によって受付の混乱が予想されたので，プログラム担当実行委員の提案で各セッションの開始時刻を分散させ，終了時刻をできるだけ揃えることとしました．その結果，受付に慣れない学生バイトも混乱しなかったようです．もちろん，学会本部で入念に作成された記入書類や，名簿類がほぼ完璧であったことも大きな理由です．

2018熱工学コンファレンスでは，以下のように13のOS，一般セッション，熱工学ワークショップ，部門表彰，特別講演，懇親会で構成することとなりました．

OS-1：沸騰・凝縮伝熱および混相流の最近の進展
OS-2：多孔質体内の伝熱・流動・物質輸送現象とその応用
OS-3：革新的技術のための燃焼研究
OS-4：凝固・融解伝熱および結晶成長の新展開
OS-5：マイクロエネルギーの新展開
OS-6：電子機器・デバイスのサーマルマネジメント
OS-7：火災・爆発
OS-8：燃料電池・二次電池関連研究の新展開
OS-9：外燃機関・排熱利用技術
OS-10：熱化学的バイオマス利用の基礎から応用まで
OS-11：ふく射輸送制御
OS-12：地中熱利用などの未利用熱エネルギシステムの次世代技術
OS-13：熱工学コレクション2018（熱コレ2018）

富山大学　総合教育研究棟
（2018年度学部案内から抜粋）

どのセッションも大きなトラブルもなく順調に進行したこと，オーガナイザーの皆様のご助力のおかげと感謝いたします．熱工学ワークショップも盛況であったと伺っております．

富山市（呉羽山公園からの眺望）

懇親会風景（開始直前の様子）

部門長宗像先生のご挨拶

次期実行委員長田川先生のご挨拶

部門表彰および特別講演の会場には，多目的ホールを利用しました．このホールは階段教室となっておりスクリーンも大型で非常に立派な部屋ですが，映写システムがやや使いにくく今だにコントロールパネルの操作が不安です．しかし，準備の時間が比較的たっぷりありましたので，唯一の心配はなくなり順調に進行いたしました．

今回のコンファレンスの特別講演は，Northwestern大学教授の堂田邦明先生に「生産加工の最前線と熱工学」と題してお願いしました．先生は塑性加工や切削加工など生産加工における最先端技術分野における研究実績が顕著であることは周知の事実ですが，その中でも最近は加工分野における伝熱現象も重要であるとのスタンスから，ご専門の研究分野での熱的現象も重視しておられます．参加された皆様も興味を持っていただけたものと推察いたします．

懇親会は大学内には適当な場所がないため，別会場（電気ビルレストラン富山県民会館店）で行いました．このレストランは本店が別のビル（富山電気ビル県民会館から歩いて５～６分）にあり，会場を勘違いされた参加者もいらっしゃいました．表示方法を地元の人間の思考だけで考えていたようで，工夫するべきであったと反省しています．　ただ，懇親会の内容は大盛会であったと思います．私を含めて挨拶はできるだけ簡素に短くいたしました．参加者に存分に富山を味わっていただき，存分に意見交換，歓談していただきました．言い過ぎかも知れませんが，懇親会さえ成功に終われば・・・・コンファレンスは大成功！？さらに，レストラン側も料理の内容や提供のタイミングに配慮してもらえたようです．

基本的には「例年通り」を柱としてコンファレンスを組み立て，シンプルで参加者の皆様が意義のある研究発

熱コレクション表彰者と２ショット

副部門長丸田先生の中締め

表・討論を行っていただき，かつ楽しみながら充実した２日間を過ごしてもらううというのが目的であり本音でありました．

今回のコンファレンス会場は，富山大学に新設された「総合教育研究棟」とさせていただきました．３年前に建設された建物で，共用実験室，イノベーションルームなどの特色のあるミーティングルームと一般的な講義室から構成されています．講義室は各セッション会場として音響，スクリーンの大きさ等，ほぼ満足な使用感であったと自負しています．ただ，全ての部屋を学会で利用できなかったのが残念な気もしますが，これは贅沢というものだと思います．

今大会をお引き受けしたときに，まずは実行委員会のメンバーをどうしようかと迷ったのですが，以前他の学会シンポジウム実行委員長をお引き受けした時のメンバー中心にお願いしようと真っ先に思い付きました．他の大学や高等専門学校の方がほとんどになってしまいますが，メール会議などが普通の時代でもあること，公共交通機関でおよそ１時間以内の距離であること，以前の共同作業の財産として私の考え方への理解もあると考えたからです．気心の知れた委員の皆様のおかげで，実行委員長は開催日時，場所，懇親会会場等の枠組みをしておき，あとはそれぞれの担当部署で自由に動いてもらえるようにするだけでした．（要するに何もしなかったような気もしますが・・・）

私の大学の部屋が種々の書類や備品置き場になっていたため，山積みとなっていた段ボール箱が一気に消えていきました．爽やかな気分と満足感だけが残っています．あとは富山県や富山市への補助金申請業務などが残るのみとなりました．

参加された方も十分に富山を味わっていただけたでしょうか？富山の人々との交流なども気持ちの良いものとして，心に残っておれば幸いです．

実行委員メンバー
浅岡 龍徳（信州大学），瀬田 剛（富山大学），寺岡 喜和（金沢大学），寺西 恒宣（富山工業高等専門学校），中川 慎二（富山県立大学），畠山 友行（富山県立大学）

熱工学ワークショップ 2018 開催報告

第 95 期熱工学部門講習会委員会
委員長　畠山友行（富山県立大学）
幹事　福江高志（金沢工業大学）

平成 30 年 10 月 22 日（土）12:15 ～ 14:15（熱工学コンファレンス 2018 初日）に熱工学ワークショップを開催いたしました．本イベントは，2015 年まで熱工学コンファレンスと併催していた熱工学コンファレンス・プレセミナーおよびプレコンファレンスワークショップの経緯を受け，その趣旨を継承した企画として 2016 年の熱工学コンファレンスより実施しております．今回は第 2 回目（2017 年は第 9 回日韓熱流体工学会議開催のため実施せず）で，2016 年と同様にランチョンセミナーとして実施いたしました．当日の朝はあいにくの小雨模様でしたが，100 名強の皆様にご参加を賜り，盛況なセミナーになりました．

開催の趣旨としては，産業界を中心とした講師をお招きし，熱工学に係る技術上の諸課題や，熱工学分野への期待を「熱マネジメント」をキーワードに提示頂き，関係者の今後の研究・開発活動の深化・拡大の萌芽となることを目指すものです．特に今回は，「産業界で求められる伝熱研究」をテーマに，広い視点から産業界において求められている現在の技術トレンドや，将来に向けた展望や期待について，下記の 3 名の講師の皆様からご講演を賜りました．

望月 正孝 氏　（ザ・ヒートパイプス）
「次世代ヒートパイプに求められる課題！」
瀧澤 登 氏　（ローム株式会社）
「車載ライトシステムの熱を含んだ LED 詳細モデル
Ter.1,2 に要求される光,熱 1D,回路によるマルチドメイン検証」
三好 一雄 氏　（株式会社ＩＨＩ）
「バイナリ発電と熱マネジメント」

プログラムは，最初に 3 名の講師の皆様から順番に話題のご提供を頂き，最後に 20 分弱のパネルディスカッションで総合討論を行う形で構成いたしました．前回と同様，講師各位には書き物のご用意は一切お願いしない形式としました．当日その場のご講演のみをお願いさせて頂いた中，タイムリーで興味深い話題を適切にご展開頂き，感謝に堪えません．なお，当日参加者のみが聴講できるという趣旨の元に開催しており，この場で講演の詳細の言及は避けたく思いますが，簡単に概要だけを紹介いたします．

まず望月様からは，ヒートパイプに関するこれまでの研究開発の変遷と，熱輸送デバイスとしての新しい技術展開の可能性を話題提供頂きました．望月様のヒートパイプの研究開発に関する長年の深遠なご経験に裏付けられた，広範な話題のご提供に感銘を受けました．また，小型で高熱流束に対応するための冷却デバイスとしてのヒートパイプのみならず，異なる視点でのヒートパイプの応用可能性についてご指導頂き，熱関連研究の懐の深さを改めて感じました．産業界で求められる伝熱研究に，未だ答えはないという望月様のお言葉が深く印象に残っております．

続いて瀧澤様からは，自動車の LED ライトのモデルベースデザインを事例に，熱だけではなく光と電気回路も含めたマルチドメインの設計について，特に部品ベンダー様のご視点からの話題提供を頂きました．自動車業界のように下流から上流までのサプライチューンが長い場合では，部品ベンダー，T1/T2，OEM，それぞれの階層において実施する設計の目線が異なることによる設計モデルのあり方が示されました．業界団体の取組も含めたご紹介を頂き，最終製品にて満たされるべき熱も含めたマルチフィジックスの設計目標を満たすための総合工学的な視点からの熱設計の重要性もお示し頂きました．

さらに三好様からは，十分な有効利用がなされていない低温熱源を活用するための，バイナリ発電を軸にしたシステムの熱マネジメントについての取組や今後の展望について話題提供を頂きました．熱のカスケード利用や，熱システムのスマート化の推進に向けたシステム全体の熱利用

状況やエネルギーフローの把握が第一歩である旨，ご指導頂きました．その上で，肝になる低温熱源を用いたバイナリ発電システム内部の熱マネジメントや作動媒体の設計，熱マネジメント市場の可能性についてご説明頂きました．後付けのシステム構築はコストの高騰を招くことから，経済性も踏まえた長期の視点に基づくシステム導入の重要性にも触れて頂きました．

最後のパネルディスカッションでは，3 つの話題を超えて今後に関する議論が活発になされました．とりわけ，熱の見える化に向けたより活発な取り組みや，マルチフィジックスやシステム視点に基づく広い視野からのエネルギマネジメントが重要である，という 3 名の講師の皆様のご意見を頂戴いたしました．また，学生の皆さんには，「一芸に秀でることも重要だが，その一芸だけに留まらず，広い視点を」「製品のブレイクスルーに向けて，学問分野を問わない学びの横串展開をしてほしい」という講師の先生方のご期待もありました．限られた時間ではありましたが，濃密な議論ができたと考えています．また，一部の講師の方には，そのまま熱工学コンファレンスの懇親会や，翌日の一般セッションにもご参加頂き，個別にさらに深い議論をして頂けたのではないかと思っております．

今回のワークショップにおいても，前回と同様，産業界において多種多様な形で存在する様々な熱マネジメントの課題に立ち向かうための，熱工学部門のさらなる進展への期待や，関係する技術者や研究者の間での深遠な議論の場を創成することの重要性を切に感じることができました．一方で，今回ご提供頂いた話題それぞれに，熱マネジメントに関する分野横断的な取組の必要性を見て取ることができました．ご参加の皆様にとって，熱マネジメントの新境地の開拓に向けた様々な検討の一助に，本ワークショップの議論をご活用いただければ幸いです．

なお開催に向け，プログラムの公開が通常より遅延したこと，想定より大幅なご参加の申し込みを賜り早期に受付が終了となったことなど，至らぬ点が多々ありご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げます．

最後に，ご多用の中，本ワークショップの趣旨にご賛同頂き，大変貴重なご講演を頂戴した 3 名の講師の皆様，調整にご協力頂いた皆様，会場設営や準備に多大なご支援を頂いた熱工学コンファレンス 2018 実行委員の皆様およびサポート頂いた学生の皆様，開催にご尽力頂いた日本機械学会 小倉辰徳様，当日の運営に際し暖かいご支援を頂いた京都大学 林潤先生，山口東京理科大学 木伏理沙子先生，ご参加頂いた皆様の多大なご支援とご協力を賜りまして，盛会のうちにワークショップを終えることができました．皆様に篤く御礼申し上げます．

望月様

瀧澤様

三好様

ご講演時の様子

パネルディスカッション

第 95 期（2017 年度）熱工学部門賞・部門一般表彰報告

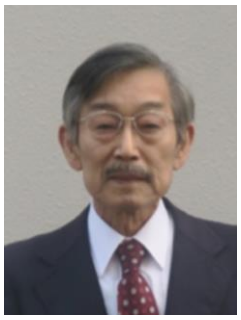
2017 年度部門賞委員会委員長
宗像　鉄雄（産業技術総合研究所）

熱工学部門では，第 95 期 （2017 年度）の部門賞・部門一般表彰について以下のように決定し，熱工学コンファレンス（富山大学）において贈呈しました．受賞者の方々は，本部門の「部門賞および部門一般表彰規程」により運営委員会構成員ならびに本部門登録会員に候補者を募り，部門賞委員会において部門賞 5 名・部門一般表彰 2 名・講演論文表彰（JK-TFEC9 講演論文より）4 件を選考し，運営委員会の審議を経て決定されました．また，贈呈式では，第 95 期（2017 年度）に本部門より若手優秀講演フェロー賞を受賞された 4 名の方々の紹介も行いました．

熱工学部門賞

功績賞（永年功績賞）

牧野 俊郎　氏



贈賞理由:国内外の熱工学，とりわけ物質の熱ふく射現象に関する基礎研究，表面の熱ふく射スペクトルの計測法・制御法の開発など，永年にわたるふく射物性学・ふく射工学への貢献が顕著である．

略歴：
1977 京都大学　大学院　博士課程単位修得退学
1977 京都大学　助手
1988 京都大学　助教授
1994 京都大学　教授
2013 京都大学　名誉教授
2013-18 近畿職業能力開発大学校校長
2011-17 日本学術会議連携会員

功績賞（国際功績賞）

高田 保之　氏

贈賞理由:第 1 回環太平洋熱工学会議をはじめとする各種国際会議の議長や副議長を務めるとともに，アジア熱科学工学連盟を設立し，日中韓を中心としたアジア諸国の熱工学研究に関する人的・学術的交流促進において，これまでに多大な功績を残している．

略歴：
1984　九州大学　大学院　総合理工学研究科　博士修了
1984　九州大学　工学部　講師
1986　九州大学　工学部　助教授
2003　九州大学　大学院　工学研究院　教授
2008　産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター　水素物性研究チーム長
2010　九州大学　カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所　主任研究者(併任)
2012　日本学術会議連携会員

功績賞（研究功績賞）
田川　正人　氏

贈賞理由:国内外の熱工学，とりわけ乱流の組織的構造や準秩序運動の役割を独自の計測手法により定量的に明らかにする等，熱工学研究の発展に貢献した功績が顕著である．

略歴：
1981　名古屋工業大学　工学部　機械工学科　卒業
1983　名古屋工業大学　大学院　工学研究科
　　生産機械工学専攻　修了
1983　名古屋工業大学　助手
1991　名古屋工業大学　助教授
1992　英国インペリアルカレッジ　客員研究員
　　（文部省在外研究員）
2006　名古屋工業大学　教授

業績賞
鹿園　直毅　氏

贈賞理由:熱工学，とりわけ細径管内気液二相流の薄液膜の高精度測定，さらに固体酸化物形燃料電池の実電極構造内ポテンシャル分布を明らかにするなど，多岐に亘る研究業績が顕著である．

略歴：
1994　東京大学 大学院工学系研究科 博士課程修了
　　博士（工学）
1994　(株)日立製作所 機械研究所　入社
2001　(株)日立製作所 研究開発本部
2002　東京大学 大学院工学系研究科 助教授
2007　東京大学 大学院工学系研究科 准教授
2010　東京大学 生産技術研究所 教授

功績賞（技術功績賞）
齋川　路之　氏

贈賞理由:国内外の熱工学，とりわけ自然冷媒である CO_2 冷媒ヒートポンプ給湯機の開発に成功するなど，熱工学技術の発展に貢献した功績が顕著である．

略歴：
1984　東京大学　工学部　機械工学科卒業
1986　東京大学　大学院　工学系研究科　舶用機械工学専門課程修了
1986　財団法人　電力中央研究所　入所
2017　博士（工学），九州大学　大学院　総合理工学府

部門一般表彰

貢献表彰

齊藤　卓志　氏（東京工業大学）

贈賞理由:熱工学，とりわけ材料加工における伝熱制御や物性コントロールなどの分野での研究への貢献，ならびに熱工学部門活動に対する貢献が顕著である．

深潟　康二　氏（慶應義塾大学）

贈賞理由:第９回日韓熱流体工学会議の Secretary General として開催に向けた準備を主導し，会議を臨機応変に運営するなど熱工学部門活動に対する貢献が顕著である．

講演論文表彰

贈賞理由：第９回日韓熱流体工学会議（JK-TFEC9）　実行委員会主導による厳正な審査の結果，本論文は，その研究アプローチは萌芽性・独創性が高く，この分野の進展に重要な貢献をするものと考えられると判断した．

論文題目「Effects of pressure on combustion characteristics of ammonia/air premixed turbulent flames in swirling flows」

A. Hayakawa (Tohoku University), Y. Arakawa, K.D.K.A. Somarathne, T. Kudo and H. Kobayashi

Hayakawa 氏

Arakawa 氏

Somarathne 氏

Kudo 氏

Kobyashi 氏

論文題目「Wavelength-selective absorber and emitter based on a magnetic polariton」

A. Sakurai (Niigata University) and Y. Matsuno

Sakurai 氏

Matsuno 氏

論文題目「Controlled phonon transport by silicon nanocrystals and polystyrene hybrid thin films」

F. B. Juangsa (Tokyo Institute of Technology), Y. Muroya, Y. Tanabe and T. Nozaki

Juangsa 氏

Muroya 氏

Tanabe 氏

Nozaki 氏

論文題目「Development of micro fluidic system for high-speed diffusion measurement」

M. Kamata (Keio University), K. Yamada, Y. Taguchi and Y. Nagasaka

Kamata 氏

Yamada 氏

Taguchi 氏

Nagasaka 氏

若手優秀講演フェロー賞

贈賞理由：年次大会実行委員会および第９回日韓熱流体工学会議（JK-TFEC9） 実行委員会，それぞれの厳正な審査の結果，以下の講演は，その内容が優れていると同時に，発表方法に創意工夫がみられ，質疑に対する応答も的確であった．講演者の能力と努力は敬意に値するものであり，今後の活躍に期待が持てると判断した．

論文題目「熱泳動現象を応用した水分子同位体分離システムの構築」

宮本 隼佑　氏（東海大学）

論文題目「A fractal dynamic SGS combustion model for LES of turbulent premixed flames under a pressure rising condition」

Rie Yamada（Tokyo Institute of Technology）

論文題目「印刷用紙の含水率による熱伝導率への影響に関する基礎的研究」

佐藤 功治　氏（岩手大学）

論文題目「Investigation of low temperature oxidation using a separated steady cool flame of n-heptane/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile」

Ryota Tatsumi（Tohoku University）

第 95 期（2017 年度）熱工学部門賞・部門一般表彰贈呈式 受賞者記念

行事案内

部門企画行事案内

－2019 年度－

●The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019)
開催日：2019 年 12 月 13 日（金）～17 日（火）
場　所：Hawaii, USA

部門関連行事案内

－2018 年度－

●日本伝熱学会 関東支部セミナー「分野外の技術者にもわかる伝熱工学-最新の数値解析と実験計測の研究事例-」
開催日：2019 年 1 月 23 日（水）
場　所：新有楽町ビル 2 階 Y202 室

●講習会「流体とインフォマティクス」
開催日：2019 年 1 月 16 日（水）
場　所：一般社団法人 日本機械学会 第 1・2 会議室

●講習会「混相流入門：実験・数値計算の基礎から実例まで」
開催日：2018 年 12 月 25 日（火）
場　所：一般社団法人 日本機械学会 第 1・2 会議室

●数値流体力学シンポジウム
開催日：2018 年 12 月 11 日（火）～13 日（木）
場　所：機械振興会館

国際会議案内

－2019 年－

●27th International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems（27th ICDERS）
開催日：2019 年 7 月 28 日（日）～8 月 2 日（金）
開催地：Beijing, China

●9th International Symposium on Radiative Transfer（RAD-19）
開催日：2019 年 6 月 3 日（月）～6 月 7 日（金）
開催地：Athens, Greece

●15th International Conference on Properties and Phase Equilibiria for Product and Process Design
開催日：2019 年 5 月 12 日（日）～5 月 16 日（木）
開催地：Vancouver, Canada

●4th Thermal and Fluids Engineering Conference, (TFEC 2019)
開催日：2019 年 4 月 14 日（日）～4 月 17 日（水）
開催地：Las Vegas, USA

●12th International Conference on Thermal Engineering Theory and Applications（ICTEA 2019）
開催日：2019 年 2 月 23 日（土）～2 月 26 日（火）
開催地：Gujarat, India

●Asian Conference on Engineering and Natural Sciences （2019 ACENS）
開催日：2019 年 1 月 22 日（火）～1 月 24 日（木）
開催地：Hokkaido, Japan

●3rd International Symposium on Convective Heat & Mass Transfer （CONV-19）
開催日：日付未定
開催地：Marrakech, Morocco

その他

編集後記

本号の TED Plaza では，新エネルギー・蓄電という大きめのテーマを設定した上で，企業における研究開発に関して２件のご寄稿をいただきました．CONNEXX SYSTEMS 株式会社の可知直芳様からは，リチウムイオン電池に代表される蓄電池の開発について，熱工学的視点から解説いただくとともに，開発中の新しい蓄電システムについて紹介いただきました．また，株式会社 IHI の松尾貴寛様からは，カーボンフリー社会を実現に向けた，アンモニアを用いた発電技術に関する解説と，福島県相馬市におけるエネルギーの地産地消を目指した実証事業について紹介いただいきました．ご多忙にもかかわらず執筆をご快諾いただきましたこと，心より御礼申し上げます．

また本号より３回にわたる連載企画で，名古屋工業大学の服部博文先生に「乱流伝熱モデル入門」の解説記事の第１回目をご執筆いただきました．こちらは直接数値シミュレーションが高負荷であることを背景に，乱流モデルを用いた流れおよび熱の連成解析が広く行われているため，今一度乱流伝熱モデルについて基礎から応用までをご紹介いただこうと企画いたしました．大変お忙しい中，執筆を快くお引き受けいただきました服部先生には心より感謝申し上げます．

（編集担当委員：岸本・李）

第 96 期広報委員会

委員長：	西 美奈	電力中央研究所
幹 事：	大徳 忠史	秋田県立大学
委 員：	岸本 将史	京都大学
	江目 宏樹	山形大学
	早川 晃弘	東北大学
	福江 高志	金沢工業大学
	松岡 常吉	豊橋技術科学大学
	李 艶栄	茨城大学

©著作権：2018　一般社団法人　日本機械学会　熱工学部門