

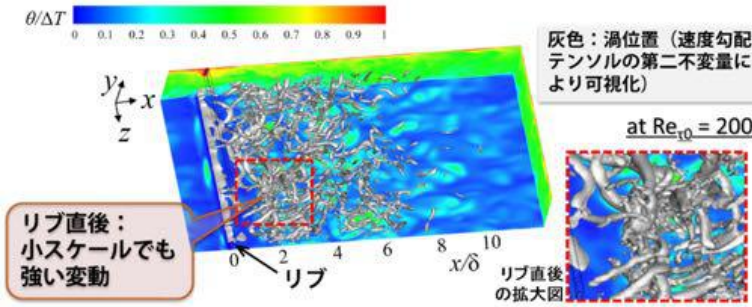
# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

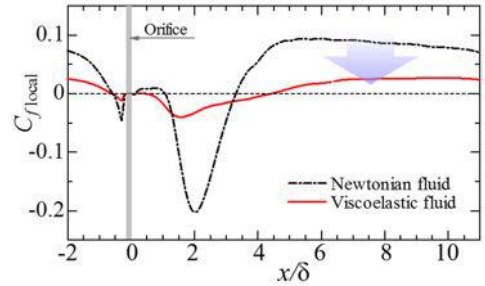
ISSN 1344-8692 Vol. 55, No. 231  
2016. 4

*HTSJ*

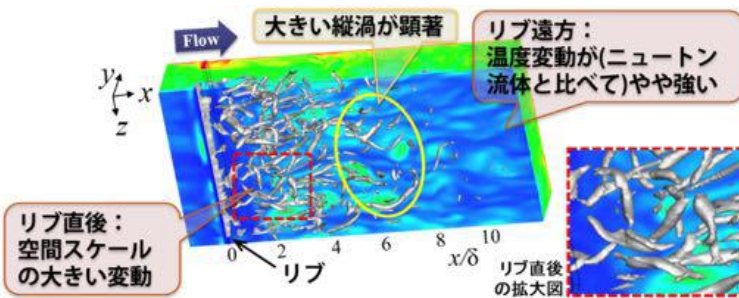
◆特集：強制対流伝熱の昨今



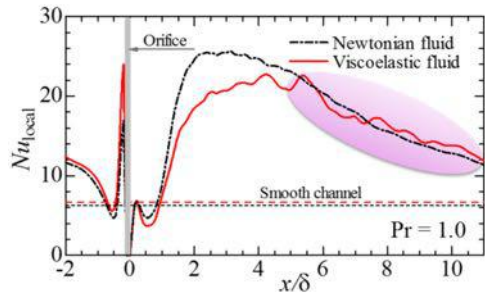
オリフィス状に設置したリブ直後のニュートン流体流れにおける瞬時場（温度を壁上の色で、渦を灰色で表示）流れは左から右，伝熱は熱流束一定（CHF）条件．チャンネルの上面にも対称的な位置にリブがあるが，視認しやすいように下面側半分の領域のみを示す．



リブ下流におけるニュートン流体（黒線）と粘弾性流体（赤線）の比較，摩擦係数が顕著に（チャンネル全体で15 - 20%）減少することがわかる．

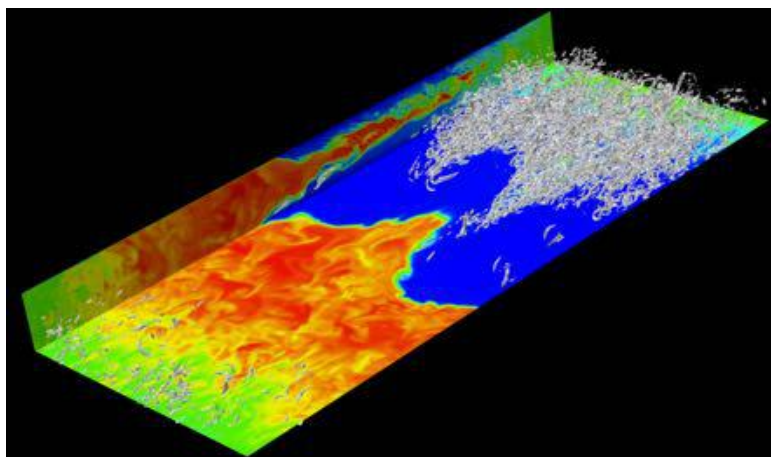


同上，粘弾性流体流れの場合．渦構造の変化と，それに伴って壁温の分布が変化することがわかる．



局所熱伝達率の比較，熱伝達率低下はそれほど顕著でない（チャンネル全体で5%）．

（特集記事「界面活性剤水溶液流れの乱流と熱伝達（川口靖夫，塚原隆裕）」より）



完全発達平行平板間乱流における非相似伝熱制御を施した際の流れ場と温度場の様子

渦の可視化のため，速度勾配テンソルの第2不変量の等値面を白で表し，赤と青のコントラストは，それぞれ高温領域と低温領域を表す．最適制御理論により導かれた，主流方向に伝播する吹き出し／吸い込みの進行波を付与することによって，圧力損失の増加を抑えつつ，熱伝達を飛躍的に促進させることに成功した．

（特集記事「積分的恒等式に基づく乱流伝熱の解析と制御（岩本薫，長谷川洋介，福島直哉，深淵康二）」より）

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

- 界面活性剤水溶液流れの乱流と対流熱伝達 ……川口 靖夫, 塚原 隆裕 (東京理科大学)  
完全発達平行平板間乱流における非相似伝熱制御を施した際の流れ場と温度場の様子  
……………岩本 薫 (東京農工大学), 長谷川 洋介 (東京大学)  
福島 直哉 (東京理科大学), 深淵 康二 (慶應義塾大学) ……表紙裏

### 〈特集：強制対流伝熱の昨今〉

- 積分的恒等式に基づく乱流伝熱の解析と制御  
岩本 薫 (東京農工大学), 長谷川 洋介 (東京大学)  
……………福島 直哉 (東京理科大学), 深淵 康二 (慶應義塾大学) …… 1  
界面活性剤水溶液流れの乱流と対流熱伝達 ……川口 靖夫, 塚原 隆裕 (東京理科大学) …… 9  
壁面乱流熱伝達現象における精密測定と DNS, モデリング  
～実験と数値シミュレーションの融合に向けて～  
……………服部 博文, 保浦 知也 (名古屋工業大学) …… 15  
対流伝熱解析の進展と圧力補正法 SIMPLE……………中山 颯 (静岡大学) …… 26  
最適形状設計・最適制御に基づく高性能熱流体機器の開発に向けて  
……………森本 賢一, 鈴木 雄二 (東京大学) …… 30

### 〈国際会議報告〉

- 第 8 回乱流・熱物質輸送国際会議 (THMT '15) 報告 ……服部 博文 (名古屋工業大学) …… 36

### 〈海外レター〉

- 英国インペリアルカレッジ滞在記……………岸本 将史 (京都大学) …… 40

### 〈行事カレンダー〉

- …………… 47

### 〈お知らせ〉

- 第 53 回日本伝熱シンポジウムのご案内…………… 49  
第 53 回日本伝熱シンポジウムプログラム (暫定版) …… 52  
優秀プレゼンテーション賞 (第 53 回日本伝熱シンポジウム) について …… 68  
日本伝熱学会主催 第 4 回 国際伝熱フォーラム…………… 69  
事務局からの連絡  
・編集出版部会からのお知らせ…………… 70  
・新入会員一覧…………… 71

### 〈編集出版部会ノート〉

- …………… 75

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science)	
Takahiro TSUKAHARA (Tokyo University of Science)	
Kaoru IWAMOTO (Tokyo University of Agriculture and Technology)	
Yosuke HASEGAWA (The University of Tokyo)	
Naoya FUKUSHIMA (Tokyo University of Science)	
Koji FUKAGATA (Keio University) .....	Opening Page

< Special Issue: Recent Developments of Forced Convection Heat Transfer >

Analysis and Control of Turbulent Heat Transfer Based on Integral Identities	
Kaoru IWAMOTO (Tokyo University of Agriculture and Technology)	
Yosuke HASEGAWA (The University of Tokyo)	
Naoya FUKUSHIMA (Tokyo University of Science)	
Koji FUKAGATA (Keio University) .....	1
Turbulence and Convective Heat Transfer in Flow of Surfactant Solution	
Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science)	
Takahiro TSUKAHARA (Tokyo University of Science) .....	9
Precision Measurement, DNS and Modeling on Turbulent Heat Transfer Phenomena	
– Toward Fusion of Experiment and Numerical Simulation –	
Hirofumi HATTORI (Nagoya Institute of Technology)	
Tomoya HOURA (Nagoya Institute of Technology) .....	15
SIMPLE Algorithm Advanced with Convective Heat Transfer Analysis	
Akira NAKAYAMA (Shizuoka University) .....	26
Toward Development of High-Performance Thermo-Fluids Devices Based on Optimum Shape Design and Control Methodologies	
Ken-ichi MORIMOTO (The University of Tokyo)	
Yuji SUZUKI (The University of Tokyo) .....	30

< Reports on International Conference >

Report on the 8 <sup>th</sup> International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer	
Hirofumi HATTORI (Nagoya Institute of Technology) .....	36

< International Letter >

Recollection of the days in Imperial College London	
Masashi KISHIMOTO (Kyoto University) .....	40

< Calendar > .....	47
< Announcements > .....	49
< Note from the JHTSJ Editorial Board > .....	75

## 積分的恒等式に基づく乱流伝熱の解析と制御

*Analysis and Control of Turbulent Heat Transfer Based on  
Integral Identities*

岩本 薫 (東京農工大学), 長谷川 洋介 (東京大学)

福島 直哉 (東京理科大学), 深淵 康二 (慶應義塾大学)

*Kaoru IWAMOTO (Tokyo Univ. of Agriculture and Technology), Yosuke HASEGAWA (The Univ. of Tokyo)*

*Naoya FUKUSHIMA (Tokyo Univ. of Science), and Koji FUKAGATA (Keio Univ.)*

*e-mail: iwamotok@cc.tuat.ac.jp*

### 1. はじめに

「乱流および付随する伝熱，拡散，音，燃焼などのさまざまな乱流現象は，産業分野あるいは環境に関わる諸問題において重要な因子である．たとえば，航空機などの高速輸送機器や高効率で安全な機械やプラントの設計，製造プロセスにおける高品質の安定確保，住・都市環境のアセスメントには，乱流を含む複雑な熱流動を数値的に予測する技術が不可欠である．また，乱流を応用し，あるいは乱流現象を制御して新しい技術を創成することは，今後さらに重要になるだろう．」[1]

乱流現象が古くから人々の興味の対象であったことは，例えばルネサンス期の Leonardo da Vinci が遺した詳細なスケッチからも見て取れるが，近代流体力学においても，Navier-Stokes 方程式の確立および Osbourne Reynolds の実験以来，乱流現象の解明は常に大きな研究テーマであり，20 世紀前半には Prandtl の壁法則の提案，Taylor の等方性乱流理論，Kolmogorov の理論のなどの重要なマイルストーンが築かれ，さらに 1960~70 年代になると先進的な計測手法の開発や計算機の発達により，壁面近傍の乱流の準秩序的な構造やその力学的な役割が次々と解明されていった[2]．

その後 1980~90 年代には，比較的低いレイノルズ数ながら，Navier-Stokes 方程式を直接数値シミュレーション(DNS)を用いて解けるようになり，フィードバック制御をはじめとする様々な制御手法の効果が DNS を用いて評価されてきた[3]．さらに，流体力学と制御理論の融合やマイクロマシン技術の発展も著しく，マイクロセンサ・マイクロアクチュエータを用いた乱流のフィードバック制御[4]が一挙に現実味を帯びてきたのもこの頃である．このような背景のもと，2000~2004 年度には文部科学省開放的融合研究プロジェクト「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」をは

じめとして，日本国内においての乱流制御研究も一気に加速した．

筆者らは，その 2000 年代前半に，大学院生（岩本，長谷川，福島）および博士研究員～助手（深淵）と立場は違うが，同時期に東京大学・笠木伸英先生の研究室に所属し，乱流を自在に制御し，そして乱流伝熱も自在に制御したいという夢を叶えるべく，一丸となって研究を進めてきた．本稿ではその一連の研究で得られ，今日乱流制御研究および乱流伝熱制御研究において大きな柱となっている，積分的恒等関係式（FIK 恒等式[5]およびその伝熱版[6]）とその応用について概説する．

### 2. FIK 恒等式とその応用

#### 2.1 FIK 恒等式

Fukagata-Iwamoto-Kasagi (FIK) 恒等式[5]は，レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式の主流方向成分を 3 回積分して形式的にバルク平均速度を求め，それに部分積分を適用することによって導出される，摩擦抵抗とレイノルズせん断応力の間の厳密な関係式である．例えば完全発達チャネル流に対する壁面摩擦係数  $C_f$  とレイノルズせん断応力  $-\overline{u'v'}$  との関係は，

$$C_f = \frac{12}{\text{Re}_b} + 24 \int_0^1 (1-y)(-\overline{u'v'}) dy \quad (1)$$

と書ける．ここに全ての物理量はチャネル半幅  $\delta$  とバルク平均速度  $U_b$  の 2 倍で無次元化されており， $C_f$  およびバルクレイノルズ数  $\text{Re}_b$  は，それぞれ  $C_f = 2\tau_w / (\rho U_b^2)$ ， $\text{Re}_b = 2U_b \delta / \nu$ （ここに  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $\tau_w$  は，それぞれ密度，動粘度，壁面せん断応力）と定義される．

式(1)の右辺第 1 項は同じレイノルズ数で流れが層流であった場合の抵抗（層流寄与項）であり，第 2 項の乱流寄与項はレイノルズせん断応力

$-\overline{uv}$  を壁面からの距離  $y$  で重みづけした積分になっていることが分かる。即ち、壁面に近い場所でのレイノルズせん断応力ほど摩擦抵抗に寄与していることが定量的に分かり、逆に、摩擦抵抗を減らしたい場合には壁面近傍のレイノルズせん断応力を低減させるような制御を考えれば良い。

## 2.2 乱流摩擦抵抗低減制御への応用

米国では 1990 年代前半から、日本でも 1990 年代後半から、フィードバック制御を用いた壁乱流の摩擦抵抗低減に関する研究が盛んに行われてきた[3, 4]。その時点における乱流摩擦抵抗低減の戦略は主に縦渦構造の抑制であったが、FIK 恒等式の示唆によると、必ずしも縦渦の抑制にこだわらずとも、壁面近傍のレイノルズせん断応力を抑制するような制御入力を与えれば摩擦抵抗を低減させられるはずである。

そのような試みとして、Fukagata ら[7]はフィードバック体積力を用いることによって、また UCLA の John Kim 教授のグループ[8]はセンサを用いず壁面から主流と逆方向に進む進行波状の吹出し・吸込みを行うことによって、それぞれ壁面近傍のレイノルズせん断応力の符号を反転して式(1)の右辺第 2 項を負に出来ること、およびその結果として層流値以下の摩擦抵抗が達成されることを、直接数値シミュレーション (DNS) を用いて示した。またその後、進行波状吹出し・吸込みによるレイノルズせん断応力の符号の反転は、壁面近傍の粘性によるポテンシャル場からの位相のずれによって統一的に説明できることが分かった[9]。さらに最近では、下流方向に進む進行波状吹出し・吸込みや壁面変形によって、低レイノルズ数チャンネル乱流が再層流化できることが、DNS を用いて示されている[10, 11]。

しかしながら、上述の DNS 等は低レイノルズ数 (非制御時における摩擦レイノルズ数  $Re_\tau \sim 100$ ) で実施されており、実用化のためには高レイノルズ数 ( $Re_\tau \sim 10^4 - 10^5$ ) における制御効果の評価が必要不可欠である。FIK 恒等式からは、抵抗低減効果は壁近傍だけでなく壁から離れた領域における重み付レイノルズ応力の減少量に依存し、レイノルズ数が増加すると後者が支配的になる。よって、Iwamoto ら[12]は、壁近傍を対象とした制御アルゴリズムの理想的な最大制御効果、またそのレ

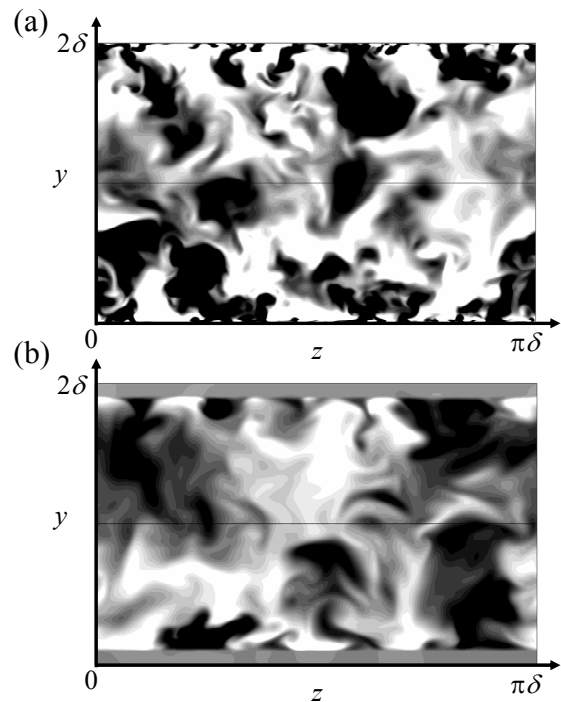


図 1 壁近傍の乱れのみを抑制したチャンネル乱流の可視化[12]. (a) 非制御時 (b) 制御時

イノルズ数効果を調べるために、壁近傍のみの乱れ成分を仮想的にダンピングしたチャンネル乱流における抵抗低減率の準理論的關係式 (非制御時でのレイノルズ数  $Re_\tau$ 、チャンネル半幅に対するダンピング層厚さ  $y_d/\delta$ 、及び摩擦抵抗低減率  $R_D$  の関数) を導出した (近年、同様の理論式が乱流境界層においても導出されている[13])。その結果、 $y_d^+ = y_d u_\tau / \nu = 10$  ( $u_\tau$  は摩擦速度) で一定の場合、 $Re_\tau = 10^3$  では  $R_D = 43\%$  であるが、高レイノルズ数  $Re_\tau = 10^5$  (航空機 Boeing 747 の代表的な巡航条件に相当) においても  $R_D = 35\%$  となることが予測された。この場合、ダンピング層の厚さ  $y_d$  はチャンネル半幅  $\delta$  に対し、 $y_d/\delta = 0.01\%$  とごく壁近傍のみである。つまり、レイノルズ数依存性がほとんど無いことが分かる。

流量一定条件を課した  $Re_\tau = 642$  のチャンネル乱流の DNS を用いて、なぜ壁近傍の乱れを抑制するだけで大きな抵抗低減効果が得られるのか、FIK 恒等式を用いて考察する (図 1)。ここでは、ダンピング層の厚さを  $y_d^+ = 60$  としている。通常の流れ場に対し、ダンピング層内の速度変動はすべて抑制される。他方、ダンピング層から外側は、も



との乱流構造と比べて微細な構造が存在せず、実質的なレイノルズ数が減少していることが分かる。この場合の摩擦抵抗低減率  $R_D$  は約 74% であり（理論式からは 78%）、チャンネル領域の約 10% 以下の領域のみの乱れを抑制したにも関わらず、大きな摩擦抵抗低減効果を得ることができる。その内訳を FIK 恒等式に内包される重み付レイノルズ応力の減少率から算出すると、壁近傍のダンピング層での  $-\overline{u'v'}$  の直接的減少による摩擦抵抗低減効果は 18% であるのに対し、ダンピング層以外での  $-\overline{u'v'}$  の間接的減少による効果は 54% である。高レイノルズ数では、チャンネル半幅に対するダンピング層厚さ  $y_d$  は減少するため、ダンピング層以外での貢献度が支配的となる。つまり、高レイノルズ数乱流で摩擦抵抗低減効果を得るためには、壁から離れた位置でのレイノルズ応力を減少させる必要があるが、壁近傍の乱れを完全に抑制することで、結果として壁から離れた位置でのレイノルズ応力も大きく減少させることが可能と言える。

以上、高レイノルズ数流れにおいても、壁面ごく近傍の乱れのみをダンピングすれば大きな摩擦抵抗低減効果が得られることを定量的に示すことができた。この結果は、従来の壁面近傍の縦渦構造を弱める乱流制御が、実アプリケーションの高レイノルズ数乱流場でも有用であることを示しており、著者らだけでなく笠木先生も大いに勇気づけられたと思う。

### 3. 伝熱と摩擦の非相似制御

#### 3.1 工学的ニーズと学術的関心

工学応用では、管内壁に働く粘性摩擦のみならず、流れに付随する熱・物質輸送の制御に対する強いニーズがある。そこで、最も単純な例として、管内流において壁面から流体へ熱輸送がある系を考える（図 2）。ここでの不可逆損失の要因として、圧力損失に伴う運動エネルギーの熱エネルギーへの変換、および温度差の異なる流体間での熱移動の二つがある。したがって、管内のエントロピー生成を最小化するためには、圧力損失を最小化しつつ、

(1) 流体内の熱移動の抑制

(2) 流体内の混合促進による温度差の最小化のいずれかを実現する必要がある。前者は断熱技術、後者は伝熱促進技術である。上記の二つの目

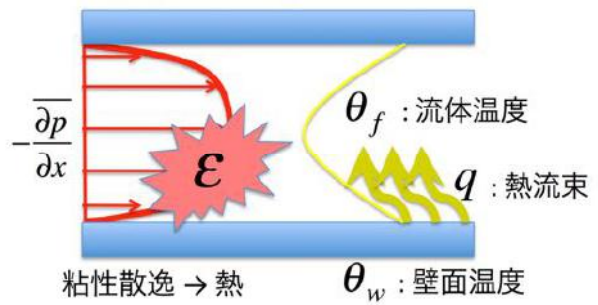


図 2 伝熱を伴う管内流の不可逆損失の要因

標のうち、後者の伝熱促進は、学術的にも興味深い課題がある。これを見るために、流れ方向の運動量と熱エネルギーの輸送方程式を見てみよう。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}_b} \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = Q + \frac{1}{\text{Pr Re}_b} \nabla^2 \theta \quad (3)$$

両者は、いずれも移流拡散方程式により記述されている。圧力損失を低減しつつ、伝熱を促進するためには、主流方向の速度成分  $u$  と温度場  $\theta$  を独立に（逆方向に）制御することが必要である。しかし、両者の支配方程式の高い相似性は、その実現が極めて難しいことを示唆している。この速度場と温度場の相似性の概念は、Reynolds [14] により提唱され、のちに物質輸送へ拡張された [15]。これらは、現在利用されている熱・物質輸送の予測式の理論基盤となっている。

上記の通り、壁面摩擦と伝熱の非相似制御は容易ではないが、式(2)、(3)を見比べると必ずしも両者は同一ではない。例えば、完全発達流では、流れは空間的に一様な平均圧力勾配で駆動されるが、温度場の発熱項  $Q$  はその限りではない。プラントル数  $\text{Pr}$  も流体に応じて様々なので、拡散項の効果も異なる。更に、境界条件に関しても、速度場は伝熱面において滑り無し条件が妥当であるが、温度場に関しては、等温条件、等熱流束条件など様々な場合が想定される。したがって、方程式や境界条件に含まれるわずかな非相似因子を利用することで、ある程度は速度場と温度場の独立な制御が可能となる。以下では、笠木研究室で行われた乱流伝熱制御に関わる研究事例を紹介する。

### 3.2 非相似因子を利用した制御例

式(2), (3)における非相似因子として, まずプラントル数効果が挙げられる. 笠木研究室では, Kasagi ら[16]により, 壁乱流熱伝達の DNS が始められ, 低プラントル数効果が調べられている[17]. 一方, Hasegawa & Kasagi [18]は, 高プラントル数乱流熱伝達の数値計算法として, 壁面近傍に DNS, 壁面遠方に LES を用いる hybrid DNS/LES 法を提案し, 温度統計量の壁面漸近挙動を明らかにした.

高プラントル数流体での伝熱促進の試みとして, Benhalilou & Kasagi [19]は, 伝熱面にリブレットを適用することによって, 摩擦抵抗低減効果を得る一方で, 粗度による実効的な伝熱面積の増加により熱伝達促進の可能性を示した. この場合, 高プラントル数では, 温度境界層が速度境界層に対して薄く, リブレットの粗度の影響が, 速度場と温度場で異なることが非相似制御の鍵となった.

速度場と温度場の境界条件の違いに注目した研究では, Fukagata ら[20]が上下壁の温度差が一定に保たれる場合を考えた. このとき, 上下壁面間のスタントン数  $St$  は, 平均化した式(3)を壁垂直方向に 2 回積分することにより,

$$St = \frac{4}{Pr Re_b} + 4 \int_0^1 (-\overline{\theta'v'}) dy \quad (4)$$

と求められる. これは, FIK 恒等式(1)の温度場への拡張である. 式(1)と比較すると, 乱流寄与項(第2項)に掛かる重み係数が異なる. そこで, チャネル中央部において, 仮想的な体積力を付与し, 乱流混合を促進することにより, 摩擦抵抗の増加を抑えつつ, 伝熱促進が可能であることが示された.

上記の研究例は, プラントル数  $Pr$  や境界条件の非相似性を利用することで, 速度場と温度場を独立に制御できる可能性を示唆している. しかし, 空気のプラントル数は常温で 1 付近であり, 水も高々 10 程度である. また, 冷却デバイスや熱交換器では, 速度場と温度場の境界条件も相似に近い. したがって, 上記のアプローチに加えて, より普遍的な非相似制御の指針が必要とされていた.

### 3.3 ベクトルとスカラーの本質的な違い

ここで, 思考実験として, 流体内に一定の発熱

( $Q = \text{const.}$ ) を仮定し, 壁面で等温条件を課した理想的な系を考えよう. このとき, 速度場を駆動する平均圧力勾配項と温度場を駆動する発熱項, および速度場と温度場の境界条件は相似となる. さらに, プラントル数も  $Pr = 1$  とする. 温度場に FIK 恒等式を適用すると, スタントン数  $St$  は

$$St = \frac{12}{Re_b} + 24 \int_0^1 (1-y)(-\overline{\theta'v'}) dy \quad (5)$$

と表される. 明らかに式(5)は壁面摩擦の FIK 恒等式(1)と同形であり, この式のみからは非相似制御の指針を得ることは難しい.

Hasegawa & Kasagi [21]は, 上記のような平均速度場と平均温度場の支配方程式と境界条件が相似となる系において, 非相似制御を試みた. 上述の通り, FIK 恒等式から制御指針を得ることは難しいため, 最適制御理論を応用し, FIK 恒等式をコスト関数に組み入れることを考えた. 具体的には, 制御入力を壁面からの吹出し/吸込み速度  $\phi$  とし, 以下のようにコスト関数  $J$  を設定した.

$$J = \frac{1}{ST} \int_{S_0}^T \int_0^1 \frac{1}{2} \phi^2 dS dt + \frac{\beta}{VT} \int_{V_0}^T \int_0^1 (1-y)(-u'v') dV dt - \frac{\gamma}{VT} \int_{V_0}^T \int_0^1 (1-y)(-\theta'v') dV dt \quad (6)$$

ここで, 右辺第 1 項は, 全壁面  $S$  における制御入力強度 (コスト), 第 2 項には FIK 恒等式に基づく乱流の壁面摩擦への寄与, 第 3 項は同じく乱流の伝熱への寄与である. また,  $\beta$  と  $\gamma$  は, 摩擦と伝熱のコストとメリットを表す重み係数である. 第 3 項の負符号に注意すると, コスト関数(6)の最小化は, 極力小さい制御入力により, 壁面摩擦を低減しつつ, 伝熱を増進させることを意味する. 制御対象期間  $T$  は, 一般に長い方が良いが, それに伴い計算負荷は増大する. そこで, Hasegawa & Kasagi [21]は,  $T \rightarrow 0$  の極限に対応する準最適制御を適用した. その結果, 非制御時に対して伝熱を 3 倍増加させつつ, 圧力損失は 2 倍程度の増加に抑えられることを示した. これを受けて, Yamamoto ら[22]は, 有限の制御対象期間における最適制御を行い, 伝熱を 2 倍に増加させ, 圧力損失は 30%低減させることに成功した. これは, 長



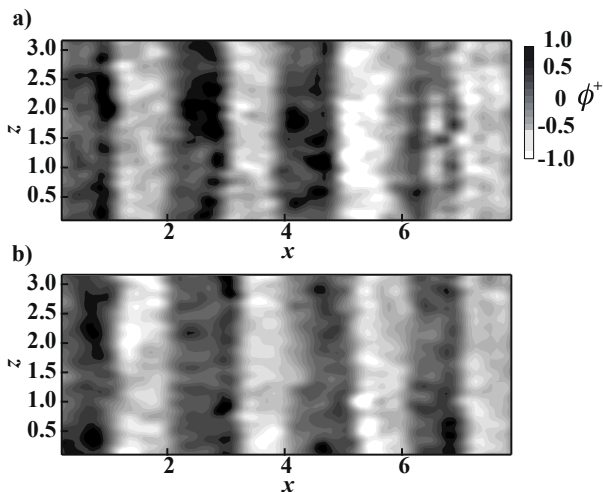


図3 平行平板間チャンネル乱流における非相似伝熱制御における瞬時の最適制御入力分布 (a) 上壁, b) 下壁 (黒: 吹き出し領域, 白: 吸い込み領域), Yamamoto et al. [22]より引用

い伝熱研究の歴史において、伝熱促進と摩擦抵抗低減を実現した初めての例となった。最適制御時における上下壁面における瞬時の制御入力分布を図3に示す。ここで、濃い領域は、壁面からの吹き出し領域、薄い領域は吸い込み領域を表す。これより、最適な制御入力は、上下壁面で同位相かつ、流れ方向に一定の波長を持つ波であることが分かる。さらに、その時間発展を追った結果、最適な制御入力は、流れ方向に一定の位相速度で伝播する進行波であることが分かった。

さて、上記の研究例では、平均速度場と平均温度の方程式と境界条件が相似となる系において、なぜ非相似制御が実現できたのであろうか？当然のことであるが、方程式と境界条件が相似であれば、その解も相似となるはずである。実際には、各瞬時局所において、式(2)、(3)は完全に相似形ではないのである。速度場はベクトルであり、その3成分は連続の式の制約により、圧力変動を介して相互に影響を及ぼし合う。一方、スカラー場にはそのような制約はない。元来、笠木研究室では、乱流現象とそれに伴う伝熱現象を統一的に扱うことが強みであった。それは、速度場とスカラー場の支配方程式(2)、(3)が、いずれも移流拡散方程式に支配されるためであった。しかし、伝熱と摩擦の非相似制御研究では、最終的には、ベクトル場とスカラー場の本質的な違いに気付かされた。この

結果には、筆者らのみならず笠木先生も驚かれ、乱流研究の面白さを再認識されたことと思う。

なお、本節で紹介した伝熱と摩擦の非相似制御については、2010年の国際伝熱会議の William Begell Medal 受賞記念論文[6]として纏められているので、詳細は同論文を参照されたい。

#### 4. 複雑流路への積分的恒等式の適用

##### 4.1 熱流体機器の伝熱・摩擦特性

前節までに、完全発達チャンネル乱流に積分的恒等式を適用し、高レイノルズ数流れにおいても壁面ごく近傍の乱れのみをダンピングすれば大きな摩擦抵抗低減効果が得られることを定量的に示すとともに、平均速度場と平均温度の方程式と境界条件が相似となる系においても伝熱と圧力損失の非相似制御が実現可能であることを示した。

しかし、工学的に応用されている熱流体機器はその伝熱・摩擦特性向上のため、複雑な流路形状を有している。例えば、マイクロガスタービン発電機などで用いられる隔壁型熱交換器では、高温・低温流体をそれぞれの流路に流し、圧力損失をペナルティとし熱交換によりエネルギーを再生する。したがって、隔壁型熱交換器の設計とは、熱交換器の占める全空間（三次元空間）を高温・低温流路に最適に分割することである。最適な分割とは、発電効率向上の点からは、ある圧力損失の下で最大の熱交換を得る分割であり、熱交換器小型化の点からは伝熱面積あたり最大の熱交換を得る分割である。

本節では、熱交換器全断面（二次元空間）の分割を考える。熱交換器断面の分割形状としては平行平板や三、四、六角形などが考えられる。非円形管内乱流では、レイノルズ応力の非一様性、非等方性を生成項とし、主流方向垂直断面内に第二種二次流れが生じ、伝熱促進・摩擦抵抗増大をもたらす。第二種二次流れに着目し、その伝熱・摩擦特性へ与える影響を、積分的恒等式を応用して定量的に評価する。

##### 4.2 層流・乱れ・二次流れの寄与の定量的評価

伝熱・摩擦特性の角度依存性を明らかにするために、ここでは菱形管内完全発達乱流の DNS 結果 [23]を用いた。図4に示すように、鋭角角度 $\theta$ が正

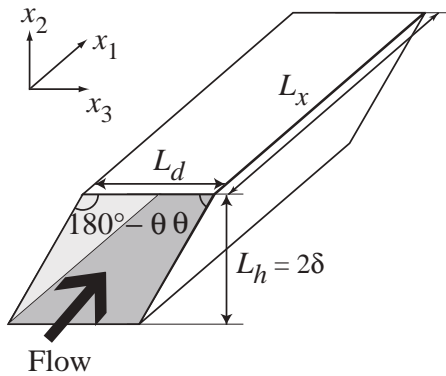


図4 菱形管の計算領域

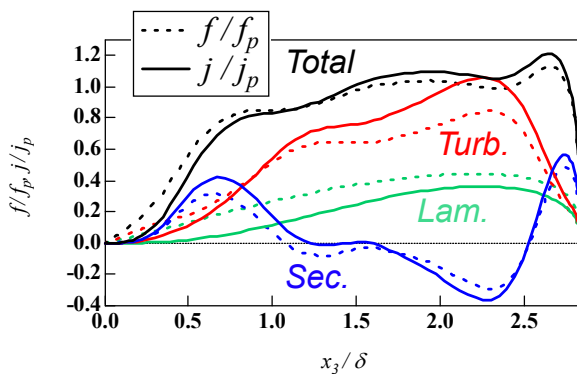


図5 菱形管内乱流 ( $\theta=45^\circ$ ) における局所平均摩擦係数  $f$  (実線), 熱伝達ファクター  $j$  (点線) への層流・乱れ・二次流れからの寄与

方形管を示す  $90^\circ$  から  $30^\circ$  までの5種類の菱形管を対象とした。質量流量と単位長さ当たりの伝熱面積 (ぬれ長さ) との比が一定の条件の下で、流路断面の幾何学形状が伝熱・摩擦特性に与える影響を評価するために、水力学的直径  $D_h$  とバルク速度  $U_b$  に基づくバルクレイノルズ数  $Re_b$  を約 4500 で一定とした。温度場境界条件としては、主流方向に等熱流束条件を課し、プラントル数を  $Pr = 0.71$  とした。詳細については、Fukushima & Kasagi [23] を参照されたい。

これらの DNS 結果に積分的恒等式を適用し、摩擦係数  $f$  及び熱伝達ファクター  $j$  への層流、乱れおよび二次流れの寄与を定量的に評価した。その際、平均速度  $U$ 、平均温度  $T$ 、および平均圧力勾配  $dP/dx$ 、流れ方向平均温度勾配  $dT/dx$  を層流、乱れ、および二次流れからの寄与の和と定義することにより、数値的に積分を行い、 $f$  及び  $j$  への各寄与を定量的に評価した。

その結果、菱形管内乱流における平均摩擦係数  $f_0$  への層流、乱れ、二次流れの寄与はそれぞれ 36–37%、58–60%、2–6% であり、 $\theta$  が小さくなると、2 次流れの寄与が小さくなり、層流および乱れの寄与が大きくなる。一方、平均熱伝達ファクター  $j_0$  への層流、乱れ、二次流れからの寄与はそれぞれ 23–25%、68–72%、5–7% であり、 $\theta$  が小さくなると、層流の寄与が小さく、乱れの寄与が大きくなる傾向がある。 $f_0$  に比べると、 $j_0$  では層流の寄与が相対的に小さく、乱れ、二次流れの寄与が相対的に大きい。さらに、 $\theta=45^\circ$  の菱形管内乱流の局所平均摩擦係数  $f$ 、熱伝達ファクター  $j$  を層流・乱れ・二次流れの寄与へと分解し、図5にそれぞれ示す。角近傍、特に鋭角近傍での伝熱・摩擦特性の悪化は主に層流・乱れの寄与が原因である。乱れは、角から離れた場所で  $j, f$  ともに増加へ寄与するが、 $j$  の増加への寄与がより大きく、レイノルズ・アナロジーファクター  $j/f$  の向上へ寄与している。二次流れは鋭角側・鈍角側とも角近傍で  $j$  の増加の観点から伝熱性能向上へ寄与している。全ての菱形管において、層流・乱れ・二次流れの寄与として、同様な傾向が定性的に観察される。定量的には、鋭角角度  $\theta$  が小さくなるほど、鋭角側で層流・乱れ・二次流れの寄与が全て減少し、鈍角側で全ての寄与が増大する。以上から、平均摩擦係数及び平均熱伝達ファクターへの第二種二次流れの寄与はいずれも数%であり、局所摩擦係数及び局所熱伝達ファクターを均一化するように寄与することが定量的に示された。

今後、工学的に実際に応用されている熱流体機器において、平均及び局所伝熱・摩擦特性への層流・乱れ等の寄与を定量的に評価し、更なる伝熱・摩擦特性向上のために、積分的恒等式の応用範囲はさらに広がっていくものと期待される。

## 5. おわりに

以上、本稿で概説したように、FIK 恒等式およびその伝熱版の積分的恒等式は乱流伝熱の解析と制御において新しい指針を与える重要な基礎理論となっており、本稿で紹介した例以外にも世界中の研究者によって、これらの積分的恒等式を利用した研究が報告されている[24]。

残念ながら、その FIK 恒等式の論文に対して授かった 2012 年度日本流体力学会論文賞の授賞式



図6 日本流体力学会論文賞授賞式(2013年9月)にて(左から, 岩本, 深瀬, 笠木先生)

における写真(図6)が, 著者のうち2名(岩本, 深瀬)にとって笠木先生との最後の写真となってしまったが, 壁乱流の摩擦抵抗や乱流伝熱の解析と制御に対してこのような重要な貢献ができたのも, 笠木研究室という恵まれた土壌があったからこそであり, 未熟な著者らを絶えず叱咤激励して下さった故・笠木伸英先生に対して, 著者一同, 改めて感謝を申し上げるとともに, 笠木先生のご冥福を切にお祈りする次第である。

#### 参考文献

- [1] 笠木伸英, 鈴木雄二, 深瀬康二, 乱流の制御, パリティ, **18-02** (2003) 20.
- [2] 笠木伸英, 乱流: この困難な課題, 第52回理論応用力学講演会(2008) PL2.
- [3] Kim, J., Control of turbulent boundary layers, *Phys. Fluids*, **15** (2003) 1093.
- [4] Kasagi, N., Suzuki, Y., and Fukagata, K., Microelectromechanical system-based feedback control of turbulence for skin friction reduction, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **41** (2009) 231.
- [5] Fukagata, K., Iwamoto, K., and Kasagi, N., Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows, *Phys. Fluids*, **14** (2002), L73.
- [6] Kasagi, N., Hasegawa, Y., Fukagata, K., and Iwamoto, K., Control of turbulent transport: Less friction and more heat transfer, *J. Heat Transfer*, **134** (2012) 031009.
- [7] Fukagata, K., Kasagi, N., and Sugiyama, K., Feedback control achieving sublamina friction drag, *Proc. 6<sup>th</sup> Symp. Smart Control of Turbulence* (2005) 143.
- [8] Min, T., Kang, S. M., Speyer, J. L., and Kim, J., Sustained sub-lamina drag in a fully developed channel flow, *J. Fluid Mech.* **558** (2006) 309-318.
- [9] Mamori, H., Fukagata, K., and Hoepffner, J., The phase relationship in laminar channel flow controlled by traveling wave-like blowing or suction, *Phys. Rev. E* **81** (2010) 046304.
- [10] Nakanishi, R., Mamori, H., and K. Fukagata, Relaminarization of turbulent channel flow using traveling wave-like wall deformation, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **35** (2012) 152.
- [11] Mamori, H., Iwamoto, K., and Murata, A., Effect of the parameters of traveling waves created by blowing and suction on the relaminarization phenomena in fully developed turbulent channel flow, *Phys. Fluids*, **26** (2014) 015101.
- [12] Iwamoto, K., Fukagata, K., Kasagi, N., and Suzuki, Y., Friction drag reduction achievable by near-wall turbulence manipulation at high Reynolds numbers, *Phys. Fluids*, **17** (2005) 011702.
- [13] Banner, A., Garnier, E., and Sagaut, P., Friction drag reduction achievable by near-wall turbulence manipulation in spatially developing boundary layer, *Phys. Fluids*, (2016) in press.
- [14] Reynolds, O., On the extent and action of the heating surface of steam boilers. (3rd edn.) *Manchester Proc. Lit. Phil. Soc.*, Vol. 14 (1874) 7.
- [15] Chilton, T. H. and Colburn, A. P., Mass-transfer coefficients, prediction from data on heat transfer and fluid friction, *Ind. Engng Chem.*, **26** (1934) 1183.
- [16] Kasagi, N., Tomita, Y., and Kuroda, A., Direct numerical simulation of passive scalar field in a two dimensional turbulent channel flow, *J. Heat Transfer*, **114** (1992), 598.
- [17] Kasagi, N. and Ohtsubo Y., Direct numerical simulation of low Prandtl number thermal field in a turbulent channel flow, *Turbulent Shear Flows*, Vol. 8, Springer, Berlin (1993) 7.
- [18] Hasegawa, Y. and Kasagi, N., Hybrid DNS/LES

- of high Schmidt number mass transfer across turbulent air-water interface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **52** (2009) 1012.
- [19] Benhalilou, M., and Kasagi, N., Numerical prediction of heat and momentum transfer over micro-grooved surface with a nonlinear k- $\epsilon$  model, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **42** (1999) 2525.
- [20] Fukagata, K., Iwamoto, K., and Kasagi, N., Novel turbulence control strategy for simultaneously achieving friction drag reduction and heat transfer augmentation, *Proc. 4th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena* (2005), 307.
- [21] Hasegawa, Y. and Kasagi, N., Dissimilar control of momentum and heat transfer in a fully developed channel flow, *J. Fluid Mech.*, **683** (2011) 57.
- [22] Yamamoto, A., Hasegawa, Y., and Kasagi, N., Optimal control of dissimilar heat and momentum transfer in a fully developed turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, **733** (2013) 189.
- [23] Fukushima, N. and Kasagi, N., Heat transfer and friction characteristics in turbulent rhombic duct flows, *Therm. Sci. Eng.*, **10-4** (2002) 7.
- [24] 深淵康二, 岩本薫, 笠木伸英, 論文賞受賞記念解説：壁に沿う流れの摩擦抵抗に対するレイノルズ応力分布の寄与, *ながれ* **32** (2013) 211.
-

## 界面活性剤水溶液流れの乱流と対流熱伝達

*Turbulence and Convective Heat Transfer in Flow of Surfactant Solution*

川口 靖夫, 塚原 隆裕 (東京理科大学)

Yasuo KAWAGUCHI, Takahiro TSUKAHARA (Tokyo University of Science)

e-mail: yasuo@rs.noda.tus.ac.jp

## 1. はじめに

界面活性剤は生活のうえでよく目にするありふれた化学物質である。界面活性剤は両親媒性を持つので水に溶解すると界面活性剤分子は特定の濃度・温度条件下でミセルと呼ばれる集合体を作り、溶液に特異なレオロジー的性質を与える。石けん水やシャンプーは、手に取ってみると粘性が高いばかりでなく、「ぬるつき」があつて滑り易く、糸をひく場合もあることから通常のニュートン流体とは異なることが実感できる。界面活性剤には水溶性ポリマーと同様に流体の摩擦抵抗を大幅に減少させる、トムズ効果[1-4] があることが知られている。

本稿では、界面活性剤ミセル水溶液の乱流熱伝達の研究について紹介する。界面活性剤水溶液は熱媒体として一般的なものではないが、管路の抵抗低減による水循環のためのポンプ動力費削減を期待してビル空調の温水・冷水循環系[5]や地域暖房の一部に試験的に用いられた事例[2, 3] がある。本稿ではニュートン流体と対比しつつ、界面活性剤水溶液の対流伝熱の特異性について紹介する。

## 2. 対流伝熱の界面活性剤添加による変化

対流伝熱は流体の移動にともなう熱の移動であり、暑い日に団扇や扇風機を使って涼をとる事例を思い浮かべることができる。その際には風速が高いほど熱伝達率は高くなる。この現象は流れの速度をレイノルズ数  $Re$  で表し、熱伝達率をヌセルト数  $Nu$  で表すと  $Nu$  が  $Re$  の増加関数であることに相当する。ところが流れがあつても熱伝達率に影響しない例もある。それは管内の層流において流れと温度場が十分発達した場合の熱伝達である。この場合、 $Nu$  は一定値となり  $Re$  によらない。つまり流れの速度が壁に沿う方向 ( $x$ ) 成分 ( $U$ ) のみを持ち、壁に垂直方向 ( $y$ ) 成分 ( $V$ ) をもたないとき、エネルギー保存式には熱伝導の項のみ

が現れるので、流れの有無が熱伝達率に影響しないことになる。

流れの  $Re$  が高くなると流れが不安定化し、乱流となる。乱流では乱れ変動が発生するが自発的に壁垂直方向の速度変動 ( $v'$ ) が現れ、これが壁面に垂直方向の熱流束を生み出すため、例えば Colburn の式のように  $Nu$  は  $Re$  に対し 0.8 乗に比例する強い依存性を示す。つまり層流とは異なり、自然な状態であっても乱流には乱れ変動  $v'$  の作用で熱伝達率を増加させる仕組みが備わっていると理解できる。

それでは乱流熱伝達率をさらに上昇させようとするときどのような手段が可能だろうか。熱伝達率  $h$  は

$$h = \frac{\dot{q}_w}{T_w - T_\infty} \quad (1)$$

と定義されるが、壁近傍の限られた範囲で熱流束  $\dot{q}$  は一定で壁での値  $\dot{q}_w$  に近いものと近似でき、さらにこれは

$$\dot{q} = \rho c_p \overline{v'\theta'} - \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial y} \quad (2)$$

と表現できる。右辺第1項は乱流熱流束と呼ばれる量で、乱流の作用による熱輸送を表すものである。いま壁面温度  $T_w$  と壁から離れた位置の流体温度  $T_\infty$  は一定であるとし、伝熱促進を乱流熱流束のうち物性値を除いた量  $\overline{v'\theta'}$  を上昇させる問題と見なすことにする。ここで  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  は流体の密度、定圧比熱、熱伝導率、 $\theta'$ ,  $\Theta$  は温度変動、時間平均温度、 $\overline{\quad}$  は時間平均を表す。まず上述した乱れによる熱伝達上昇を強化するために、乱流促進体を設置し、流れを攪拌することが考えられる。乱流促進体によって乱れ変動  $v'$  を生むためには仕事が必要であるが、与えた仕事が無駄なく熱伝達率上昇に寄与する速度変動エネルギー  $\rho v'^2$  に転換



することが理想である。ところが乱流においては平均流れの失うエネルギーはまず乱流エネルギーの流れ方向成分  $\overline{\rho u'^2}$  に与えられ、次に再配分作用により壁垂直方向成分  $\overline{\rho v'^2}$  が生み出されることがわかっている。この再配分作用は乱流エネルギーの方向成分  $\overline{\rho u'^2}$ 、 $\overline{\rho v'^2}$  間に強度差があるとそれを均等化させる。そのため乱れ変動エネルギーを生み出す仕事のせいぜい 1/3 程度が  $\overline{\rho v'^2}$  に与えられ、自然に任せればこの比率が大きくなることはない。

そこで、もし乱流伝熱を大幅に促進しようとするなら、壁面に小噴流を用意して流体を吹き出すことや、流体に能動的に働く機構（例えば、速度変動  $v'$  だけを選択的に強化させるマイクロマシン、言わば「 $v'$  強化マシン」）を分散させて働かせることも想像できるが、いずれも実現には遠い状況である。

一方、水流に添加した界面活性剤ミセルは、流れ要素の伸長変形に抵抗する。石けん水が「糸を引く」性質（曳糸性）を思いうかべると、そのことが想像されるが、この性質は乱れの再配分作用で重要となる渦の伸長過程を制約するため、あたかも前項に紹介したマシンとは逆の作用をもつ「 $v'$  抑制マシン」が分散している場合と同様の効果を持つことになる。実際、界面活性剤を添加した壁乱流においては、通常的水流とは異なり  $\overline{\rho v'^2}$  が小さく、 $\overline{\rho u'^2}$  が大きいことが観測されている[2]。

図 1 は水に CTAC と呼ばれる界面活性剤を種々の濃度で溶解し、発達したチャンネル流 ( $Re = 1.0 \times 10^4$ ) を形成し、LDV により乱れ変動強度を調べたもので、図 1a は乱れ変動強度の流れ方向成分  $u'_{rms}$ 、図 1b は壁垂直方向成分  $v'_{rms}$  の分布をそれぞれ粘性スケールで無次元化して表している。図中の記号は、界面活性剤濃度の違いに対応する(表 1)。参考のため水の流れにおける実験値 (●) と DNS による計算値 DNS ( $Re = 10039$ , Iwamoto ら [6]による) (実線)を示す[7]。界面活性剤を添加した場合、 $u'_{rms}$  の大きさは水の場合と同程度に留まるが、 $v'_{rms}$  は全域において数分の 1 に低下していることがわかる。これに加えて、界面活性剤ミセル水溶液には弾性的なレオロジー性質があり、

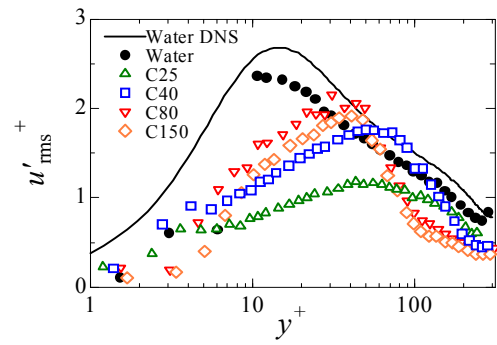


Fig.1a Streamwise velocity fluctuation intensity profiles in wall coordinates.

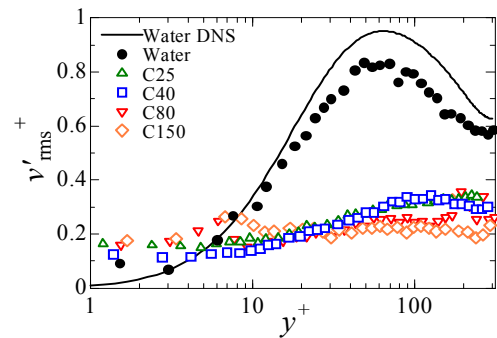


Fig.1b Wall-normal velocity fluctuation intensity profiles in wall coordinates.

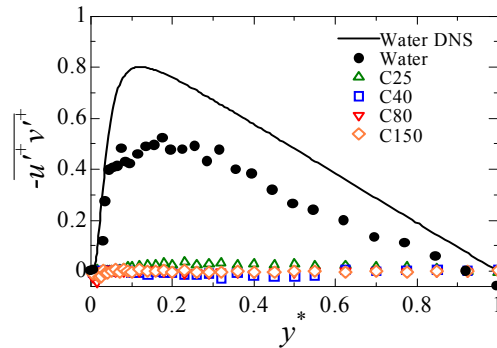


Fig.1c Profiles of Reynolds shear stress.

変形に対して応力が時間遅れ（緩和時間）を伴うので、2つの速度変動 ( $u'$ と  $v'$ ) が同期せず、著しい場合には相互相関係数が 0 に近い値をとるという「 $u' - v'$  相関消滅」も現れ、その結果レイノルズせん断応力  $-u'^+ v'^+$  も 0 に近い値をとる(図 1c)。このことが流れの摩擦抵抗を大幅に減らす直接的な原因となっている。乱流熱流束については「 $v'$  抑制」と「 $\theta' - v'$  相関消滅」の2つの作用の結果、乱流熱流束  $\overline{v'\theta'}$  も低下するので、界面活性剤を添



加すると伝熱は抑制されることになる。

このように界面活性剤の添加は伝熱を抑制するように働くので、伝熱機器に対して好ましくない影響を与えることになるが、伝熱が低下する機構を実験的・数値解析的に調べることは学術の面からは興味深い。界面活性剤添加によって乱流熱流束が抑制された状況は、大幅に伝熱促進が行われる場合を想像する際の「ネガ」と位置づけることができるからである。

チャンネル乱流の十分発達した領域の中で途中から加熱を開始する系は境界条件が単純であり、熱交換器の要素の一つとしても重要なのでよく検討が進んでいる。この流れに界面活性剤を添加すると顕著な抵抗低減が起こり、温度場に関しても興味深い現象[8-10]が観察されるので紹介したい。十分発達したチャンネル流 ( $Re = 1.0 \times 10^4$ ) の、途中から片面のみ等温条件で加熱を開始する場合を実験的に検討した。図2に実験の概念図を示す。加熱面に接して温度境界層が発達していくのでその場所での熱伝達と温度場に注目する。表1に実験条件（界面活性剤であるCTACの添加濃度）と抵抗低減率 DR%，熱伝達率の低下割合 HTR%，チャンネル半幅  $h$  で無次元化した温度境界層厚さ  $\delta_t^*$  を示す。DR%と HTR%は、同じ Re 数における水流と比べて摩擦係数と熱伝達率の低下割合を示している。ここで高濃度溶液において DR%が負になることは、粘弾性応力が增大することによる。

温度変動を細線熱電対で計測したのでその強度  $\theta'_{rms}$  の分布[11]を図3に示す。界面活性剤を添加した場合には、境界層のかなり広い範囲 ( $y^+ = 10-100$ ) において温度変動は大きな値をとり、水の流れのそれと比べて数倍から10倍にもなる。一般には温度変動  $\theta'$  を強化することは、 $\overline{v'\theta'}$  を強化することにつながるが、別途測定された Nu は40%前後低下する（表1）ので、温度変動強度の増加と熱伝達率低下の間には矛盾があるように見える。

平均温度、平均速度など境界層中の乱流統計量の分布を吟味することにより、以下のような推論が成り立ち、異常な温度乱れ強度の発生理由が説明できる。

Table 1. Experimental condition: DR%, HTR% and  $\delta_t^*$  for different surfactant concentration  $C$ .

$C$ (ppm)	DR%	HTR%	$\delta_t^*$
0 (Water) (●)	—	—	0.92
25 (▲)	38	43.4	0.52
40 (□)	16	39.9	0.37
80 (▽)	-2.3	39.6	0.27
150 (◇)	-24	40.9	0.27

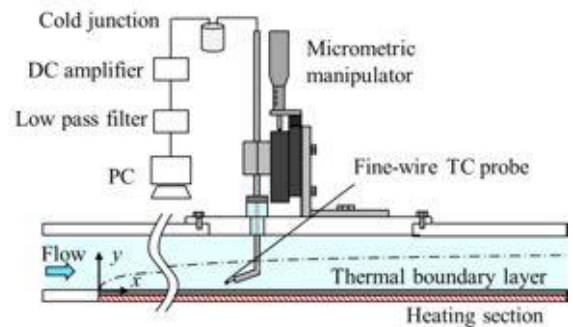


Fig.2 Schematic diagram of the thermocouple probe and measurement apparatus.

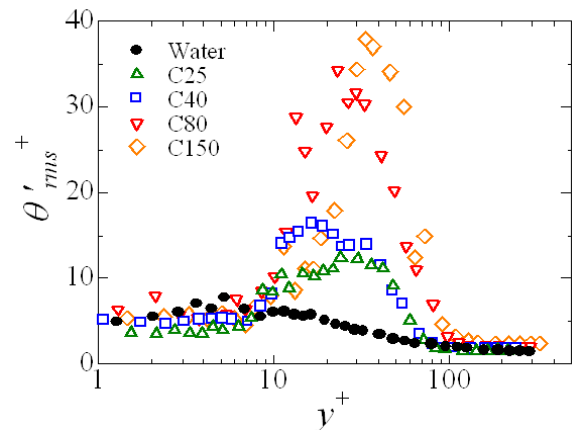


Fig.3 Temperature fluctuation intensity profiles in wall coordinates.

- A. 界面活性剤は乱流拡散係数を低下させるため、温度境界層厚さ  $\delta_t^*$  は薄くなる。
- B. A. の性質があるため、発達途中の温度境界層内の温度勾配は大きい。
- C. 温度境界層内では強い速度変動  $u'$  が存在するため、これと連動して温度変動  $\theta'$  も強くなる。
- D. ただし、乱れ再配分の弱化に伴って速度変動  $v'$  は小さく、また粘弾性的位相遅れのために「 $u' - v'$  相関消滅」、 「 $\theta' - v'$  相関消滅」が起こ

るため、 $-\overline{u'v'}$ と $\overline{v'\theta'}$ は小さな値をもつ。

E. D.のため、流れの摩擦抵抗と熱伝達率は大幅に低下する。

このように、界面活性剤の添加は乱流拡散係数の低下という形で流れと伝熱に主たる作用をするが、一方高い温度勾配の形成と乱流変動強度の異方性がこれに重なって特異な温度変動強度分布を生み出している。文献[11]ではさらに乱れに関する長さスケールや乱流拡散係数といった構造パラメータの議論を行っている。

ミセル相変化と伝熱に関して複雑で興味深い課題がある。界面活性剤ミセルは界面活性剤の濃度、温度、イオン性活性剤の場合は対イオン濃度、さらにはその場のせん断率によって結合状態を変える。従って、単純な液体と異なり、外部から作用を加えることにより、流れと伝熱を一変させられる。例えば、熱交換器の入口に金網などミセルのネットワークを破壊できる要素を取りつけておくだけで、熱伝達率を飛躍的に向上できると考えられている[12-15]。

### 3. 対流伝熱の DNS による数値解析的研究

界面活性剤水溶液は、微視的には水分子に棒状あるいはネットワーク状のミセルが分散した溶液である。その乱流域での流れと伝熱の挙動をコンピュータシミュレーションによって調べる場合、ミセルと渦の長さスケールに大きな格差があることが、直接的な解析を困難にしている。そこで実用的な観点から、ミセル水溶液を渦スケールの範囲では連続体であると見なし、粘弾性流体として扱うことができる。流れとエネルギー保存則は DNS (直接数値シミュレーション) の手法によって離散化・数値積分し、粘弾性的性質を組み込んだ構成方程式と連立して数値解を求める。

適当な無次元化を施した連続の式と運動方程式は以下の式(3), (4)の形をとり[16, 17], 式(4)の右辺第3項には粘弾性に起因する項が含まれる。流体の粘弾性的性質は式(5)の構成方程式に Giesekus モデルを組み込むことにより与えた。エネルギー保存則は式(6)で表される。ここで  $t$  は時間,  $p$  は圧力,  $x_i$  は直交座標,  $u_i$  は速度の3方向成分,  $c_{ij}$  は無次元化した構成テンソルの要素,  $T$  は温度,  $\beta$

は溶液に対する溶媒の粘度比,  $\delta$  はクロネッカーのデルタ,  $Re_\tau$ ,  $We_\tau$  は摩擦速度を代表速度とするレイノルズ数とワイゼンベルグ数,  $Pr$  はプラントル数である。なお  $\beta = 1$  とおくと, 式(4)は Navier-Stokes の式に一致する。これまでにも同様の考えで乱流の直接計算を行った研究例[18-20]があるが, 構成方程式や数値解析手法に若干の差異がある。なお計算方法の詳細は文献[21, 22]を参照されたい。

$$\frac{\partial u_i^+}{\partial x_i^*} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_i^+}{\partial t^*} + u_j^+ \frac{\partial u_i^+}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p}{\partial x_i^*} + \frac{\beta}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i^+}{\partial x_j^{*2}} + \frac{1-\beta}{We_\tau} \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_j^*} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{ij}}{\partial t^*} + u_k^+ \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_k^*} - \frac{\partial u_i^+}{\partial x_k^*} c_{kj} - c_{ik} \frac{\partial u_j^+}{\partial x_k^*} \\ + \frac{Re_\tau}{We_\tau} [c_{ij} - \delta_{ij} + \alpha(c_{ik} - \delta_{ik})(c_{kj} - \delta_{kj})] = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\frac{\partial T^+}{\partial t^*} + u_j^+ \frac{\partial T^+}{\partial x_j^*} = \frac{1}{Re_\tau Pr} \frac{\partial^2 T^+}{\partial x_j^{*2}} \tag{6}$$

Table 2 Computational conditions.

Case	Fluid	$We_\tau$	$\beta$
Case 1	Newtonian	0	1.0
Case 2	Viscoelastic	10	0.5
Case 3a	Viscoelastic	30	0.5
Case 3b	Viscoelastic	30	0.3
Case 4	Viscoelastic	40	0.5

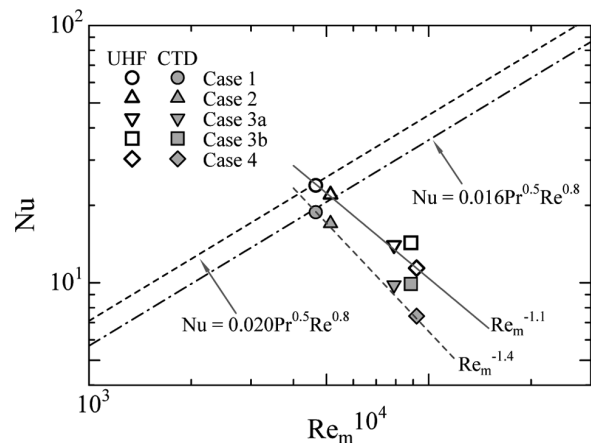


Fig.4 Nusselt number vs. bulk Reynolds number for Cases shown in Table 2. Thermal conditions: UHF, uniform heat flux heating; CTD, constant temperature difference condition.

## 4. おわりに

DNSにより伝熱特性を含む流れの状況を調べた研究事例を紹介する。乱流に作用し、抵抗低減を起こす界面活性剤は様々な種類のものが知られている。界面活性剤の種類・濃度・温度によって強い抵抗低減、伝熱低減を起こすものが存在することはわかっているが、多種類の活性剤を現実的な用途（例えばビル空調システム）の範囲でモデル試験することはコストも時間もかかる作業になる。一方、界面活性剤水溶液をレオメータ試験する際には、比較的簡単にレオロジー特性を把握できる。新規界面活性剤を開発する際に、合成品は微量しか得られないことが普通である。合成量がレオメータ試験を行うに足る分量（数mg）で済むなら、開発サイクルを速くできるメリットもある。

そこでレオロジー性質から抵抗低減流れの状況を予測することが必要になり、DNSによるシミュレーションを有効に使うことができる。構成方程式中のパラメータである $We_\tau$ と $\beta$ を変え、いくつかのケースに対してヌッセルト数 $Nu$ の予測を行った。図4には5種類の溶液について $Nu$ を計算した例を示す。このような系統的な伝熱予測が可能になることを実証できた。さらに $We_\tau$ 増大によって乱れ強度が抑制される効果と、 $\beta$ 低下によって有効拡散係数が低下する効果があって、どちらも抵抗を低減させるものの、それぞれの伝熱抑制する効果は異なるために、速度場と温度場の間の非相似性が現れることがわかった[17]。

DNS 計算のメリットとして、ある程度複雑な壁面形状に対しても、埋め込み境界法により解析できることが挙げられる。このことは熱交換器のように複雑な形状で構成される流路における伝熱を忠実に予測する際に便利である。熱交換器の要素の簡単なものとして、チャンネルに一定間隔でリブを配置した系のシミュレーションを試みた[23, 24]。図5には結果の一例を示す。オリフィス状に設置したリブの下流の流線、摩擦速度 $u_\tau$ で無次元化した乱れ強度 $k$ の分布は粘弾性の影響に寄って大きく変化することがわかる。この方法によりリブ下流における乱流の状況と局所熱伝達率が詳細に予測できた。

水や空気といったニュートン流体の乱流伝熱は研究し尽くされ、教科書にも確定した成果として記述されているように見受けられる。ところがより広い領域の中でこれを位置づけると新たな側面が見えて来て、しばしば常識を塗り替えられるような思いをする。界面活性剤を添加した溶液は粘弾性を持ち、粘弾性は乱流に複雑な形で作用して対流伝熱特性を根本から変えていて、現れてくる複雑な乱流と熱伝達の実験解析は発見的な課題である。またその現象を深く理解し、実用的判断に繋げる意味をもつ計算機シミュレーション技術はまだ発展途上である。このように豊富な内容を含む対流伝熱の世界に巡り合えたことを幸せと感じている。

## 参考文献

- [1] Toms, B.A., *Proc. 1st Int. Congress on Rheology* (1978) 135.
- [2] Gyr, A. and Bewersdorff, H.-W., *Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives*, Kluwer Academic Publishers (1995).
- [3] Li, F.-Ch., Yu, B., Wei, J.J. and Kawaguchi, Y., *Turbulent Drag Reduction by Surfactant Additives*, John Wiley & Sons (2012).
- [4] 川口靖夫, 塚原隆裕, 本澤政明, 粘弾性流体に現れる乱流渦構造, 日本機械学会論文集 B編, 79-808 (2013) 2660.
- [5] Takeuchi, H., Kawaguchi, Y., Tokuhara, K. and Fujiwara, Y., *Proc. 8th Int. Conf. on Sustainable Energy Technology* (2009).
- [6] Iwamoto, K., Suzuki, Y. and Kasagi, N., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23-5, (2012) 678.
- [7] Kaiho, Y., Watanabe, K., Hara, S., Tsukahara, T. and Kawaguchi, Y., *Proc. ASME, FEDSM* (2016).
- [8] 川口靖夫, 台坂恒, 矢部彰, 菱田公一, 前田昌信, 界面活性剤添加による抵抗低減流れの温度境界層の構造と熱伝達特性, 日本機械学会論文集B編 67巻 658号 (2001) 15.
- [9] Li, F.-Ch., Wang D.-Z., Kawaguchi, Y. and Hishida K., *Experiments in Fluids*, 36-1 (2004) 131.
- [10] Li, F.-Ch., Kawaguchi, Y. and Hishida, K.,

- Physics of Fluids*, 16-9 (2004) 3281.
- [11] Watanabe, K., Kaiho, Y., Hara, S., Tsukahara, T. and Kawaguchi, Y., *Proc.8th Int. Sym. on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT15)*, (2015).
- [12] Li, P.W., Kawaguchi, Y., Daisaka, H., Yabe, A., Hishida, K. and Maeda, M., *Trans. ASME: Journal of Heat Transfer*, 123 (2001) 779.
- [13] Li, P.W., Kawaguchi, Y. and Yabe, A., *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 8 (2001) 23.
- [14] Qi, Y., Kawaguchi, Y., Lin, Z., Erwing, M., Christensen, R.N. and Zakin, J.L., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44-8 (2001) 1495.
- [15] Qi, Y., Kawaguchi, Y., Christensen, R.N. and Zakin, J.L., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46-26 (2003) 5161.
- [16] Tsukahara, T., Ishigami, T., Yu, B. and Kawaguchi, Y., *Journal of Turbulence*, 12-13 (2011) 1.
- [17] Tsukahara, T. and Kawaguchi, Y., *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 11-3/4 (2011) 212.
- [18] Orlandi, P., *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 60-2-3 (1995) 277.
- [19] Den Toonder, J.M.J., Hulsen, M.A., Kuiken, G.D.C. and Niewstadt, F.T.M., *Journal of Fluid Mechanics*, 337 (1997) 193.
- [20] Sureshkumar, R., Beris, A.N. and Handler, R.A., *Physics of Fluids*, 9-3 (1997) 743.
- [21] Yu, B. and Kawaguchi, Y., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24-4 (2003) 491.
- [22] Yu, B. and Kawaguchi, Y., *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 116-2/3 (2004) 431.
- [23] Tsukahara, T., Kawase, T. and Kawaguchi, Y., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32-3 (2011) 529.
- [24] Tsukahara, T., Kawase, T. and Kawaguchi, Y., *Computational Thermal Sciences*, 6-1 (2014), 79.

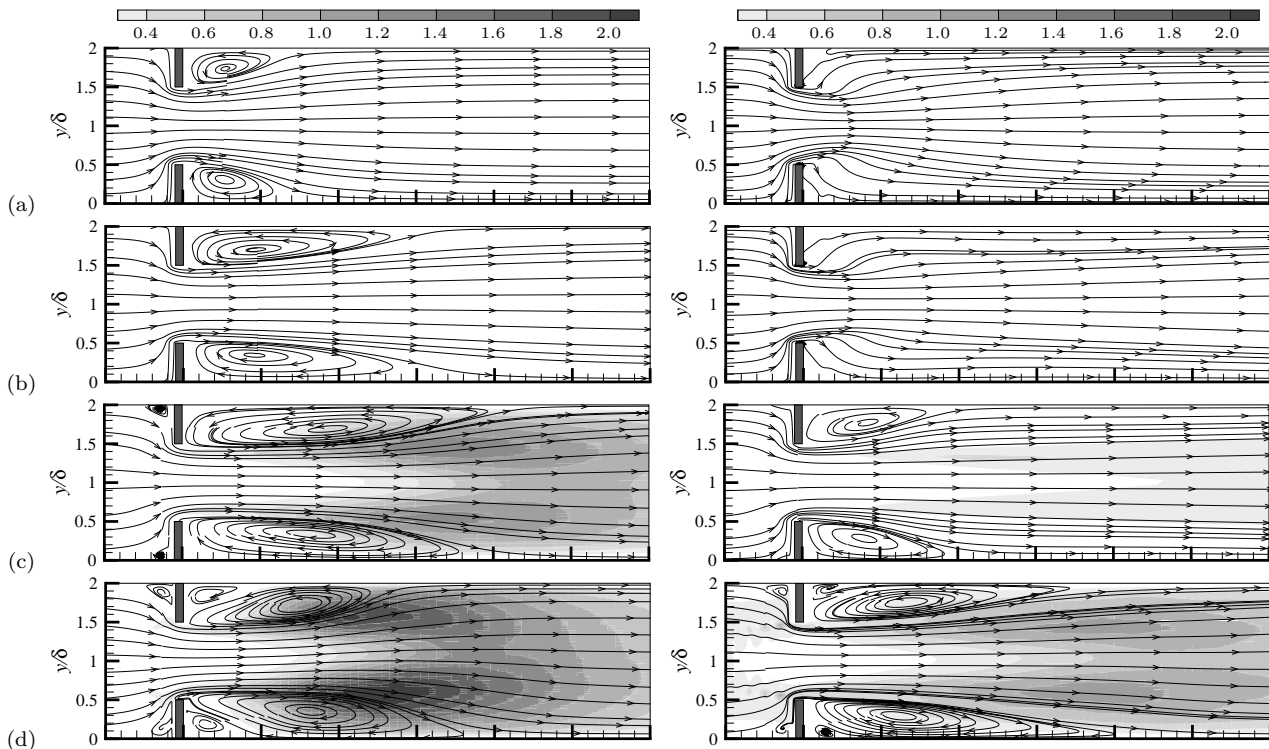


Fig.5 Mean streamlines and contour of turbulent kinetic energy,  $k/u^2$ , with emphasis on the region downstream of the ribs for Newtonian-fluid flow (shown in the left column) and for viscoelastic-fluid flow (in the right), at different Reynolds numbers: (a)  $Re_{\tau 0} = 10$ , (b) 20, (c) 50, and (d) 100. The mainstream is from left to right. See ref. [24].

## 壁面乱流熱伝達現象における精密測定とDNS, モデリング ～実験と数値シミュレーションの融合に向けて～

*Precision Measurement, DNS and Modeling on Turbulent Heat Transfer Phenomena  
-Toward Fusion of Experiment and Numerical Simulation-*

服部 博文, 保浦 知也 (名古屋工業大学)

Hirofumi HATTORI and Tomoya HOURA (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: hattori@nitech.ac.jp

### 1. はじめに

伝熱現象の一形態である対流による熱伝達現象には、ポンプなどで円管等に流体を流して起こる強制対流場と、加熱された気体や液体が、浮力によって誘起されることで起こる自然対流場、また、その両方が起こる共存対流場がある。熱交換器等の一般的な伝熱機器内における伝熱現象は、通常、強制対流場であり、またその流動場は乱流状態であることが多い。強制対流場で起こる熱伝達現象は、熱が固体壁から流体へ、もしくは流体から固体壁に伝わることで現象を支配していることから、壁面近くの乱流熱伝達構造を探ることは、熱交換器等の伝熱性能を向上させる上で重要な研究対象である。

熱移動を伴う強制対流場において、非圧縮性、物性値一定を仮定すると、流体の温度は受動スカラー量とみなされ、場の支配方程式は次式で示される連続の式 (continuity equation), 運動方程式 (Navier-Stokes equation), エネルギー式 (energy equation) となる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 $u_i$ は*i*方向速度、 $x_i$ は*i*方向、 $\theta$ は温度、 $p$ は圧力、 $t$ は時間、 $\nu$ は動粘性係数、 $\alpha$ は温度伝導率、 $\rho$ は密度であり、添え字は総和規約に従う。これらの方程式を連立して解けば、強制対流場における速度、温度、圧力を求めることができるが、3次元非定常現象である乱流状態の場合には、解析的に解くことは難しい。そのため、以下のレイノルズ分解を用いて、方程式を変形する。

$$\phi = \bar{\Phi} + \phi' \quad (4)$$

ここで、 $\phi$ は瞬時の物理量、 $\bar{\Phi}$ は平均値、 $\phi'$ は変動値 (平均からのずれ) である。この関係式を式(1)~(3)に代入し、平均操作を施すと次式を得る。

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (7)$$

ここで、変動値における()'は省略している。支配方程式に、レイノルズ分解を適用することにより得られた式(6)と式(7)の右辺には、新たな物理量 $\bar{u}_i \bar{u}_j$ と、 $\bar{u}_j \bar{\theta}$ が出現している。これらは、乱流の本質を示す物理量で、それぞれレイノルズ応力と乱流熱流束と呼ばれ、物性値ではなく状態量である。そのため、強制対流場で乱流状態の場合には、レイノルズ応力と乱流熱流束の大きさや分布の状態を知ることが重要となる。

ところで、ある固体壁面上を沿う流れが乱流の場合、その乱流状態を壁乱流と呼ぶ場合があるため、本稿では、壁面近くの乱流熱伝達現象を壁乱流熱伝達と記述する。壁乱流熱伝達場では、壁面の存在のため流体は境界層を形成し、支配方程式は境界層近似を施した次式で記述することが出来る。

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} - \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial y} \quad (9)$$

$$0 = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \quad (10)$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \frac{1}{PrRe} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} - \frac{\partial v\theta}{\partial y} \quad (11)$$

ここで、各物理量は、境界層外縁の速度 $\bar{U}_e$ 、代表長さ $L$ 、密度、壁温 $\bar{\theta}_w$ 、主流温度 $\bar{\theta}_e$ で無次元化され、 $Re = \bar{U}_e L / \nu$ はレイノルズ数、 $Pr = \nu / \alpha$ はプラントル数である。これらの境界層近似された方程式から分かることは、式(9)の運動方程式で示される速度場においては、レイノルズ応力 $\bar{uv}$ が、式(11)のエネルギー式において示される温度場においては、壁垂直方向乱流熱流束 $\bar{v\theta}$ が、壁面から、もしくは壁面への熱移動を伴う乱流場における熱伝達現象で支配的な物理量であるということである。そのため、レイノルズ応力 $\bar{uv}$ と、壁垂直方向乱流熱流束 $\bar{v\theta}$ が、壁面からどんな大きさで、どのように分布しているかを知ることが、壁乱流熱伝達現象を理解する上で最重要課題となる。

本稿では、壁乱流熱伝達場におけるレイノルズ応力と壁面垂直方向乱流熱流束の分布を知るために有力なツールとなる計測法と計算手法に関する解説と、それらの連携について述べる。

## 2. 速度と温度の同時計測

レイノルズ応力 $\bar{uv}$ を計測するためには、壁乱流熱伝達場における流れ方向と壁垂直方向の瞬時速度を、壁垂直方向乱流熱流束 $\bar{v\theta}$ を計測するためには、壁垂直方向の瞬時速度と温度を同時に、同じ場所で計測しなければならない。現在のところ、流体の速度と温度を同一センサーで計測できる機器は見当たらないため、流速計と温度計を組み合わせる計測することになる。流速計としては、熱線流速計、レーザードップラー流速計(LDV: Laser Doppler Velocimetry)、粒子追跡流速計(PTV: Particle Tracking Velocimetry)、粒子画像流速計(PIV: Particle Image Velocimetry)などがある。これら流速計と温度計を組み合わせれば、同時計測が可能となるが、非接触型で常温空気流の乱流計測に適用できる温度計は見当たらないようである。そのため、線径の細い金属線からなる抵抗線(冷線)もしくは細線熱電対による温度計が用いられるが、一般に応答遅れの補償が必要となる[1]。

壁乱流熱伝達場におけるレイノルズ応力 $\bar{uv}$ と

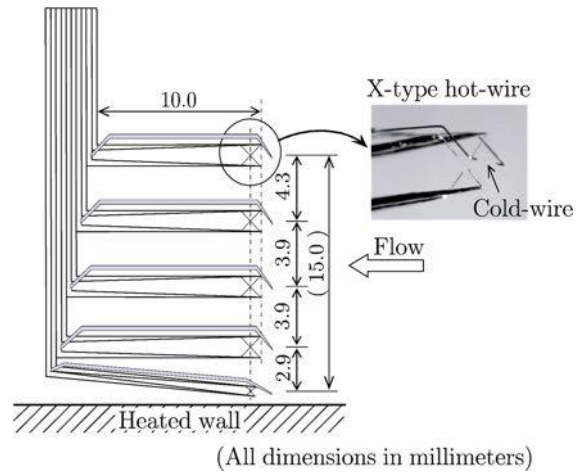


図1 速度・温度多点同時測定用プローブ[2]

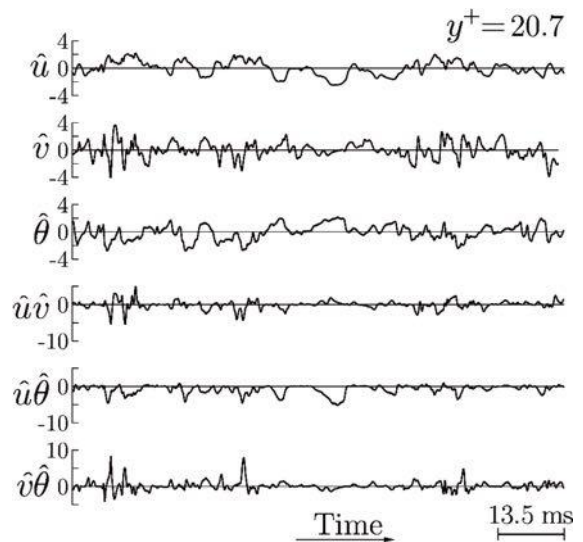


図2 速度と温度変動の瞬時波形[2]

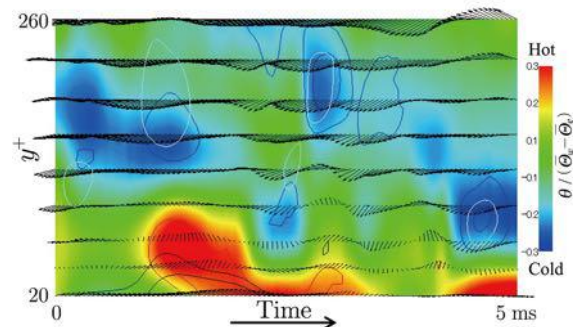


図3 速度ベクトルと温度変動の時空間分布[2]

壁垂直方向乱流熱流束 $\bar{v\theta}$ を測定するために、熱線流速計と冷線温度計を組み合わせたプローブ(図1)を利用した例を示す。このプローブはX型熱線(直径 $3.1 \mu\text{m}$ のタンゲステン線)と線径が非常



に細いため応答遅れを補償する必要がないサブミクロンサイズの冷線（直径  $0.63 \mu\text{m}$  の白金ロジウム線）を複数組み合わせた多点同時測定プローブとなっている[2]。図2は、このプローブを用いて加熱壁上を発達する逆圧力勾配流れのバッファ領域において計測された速度変動と温度変動の瞬時波形である。これらの積から求まる瞬間的なレイノルズ応力、壁垂直方向乱流熱流束を時間平均することで  $\overline{uv}$ ,  $\overline{v\theta}$  が計測される（図中の  $\wedge$  は rms 値により正規化されている）。瞬時のレイノルズ応力  $uv$  が負値で出現している大部分の時刻（図左方）において、流れ方向速度変動が正值 ( $u > 0$ )、壁垂直方向速度変動が負値 ( $v < 0$ ) を示しており、高速流体が壁へ向かう  $Q4$  運動が多く発生している。この時、温度変動は負値 ( $\theta < 0$ ) であることから、低温流体を伴う壁垂直方向乱流熱流束も出現していることが分かる。プローブによる壁乱流熱伝達場の測定は、基本的に点測定となるが、複数の点で同時測定し、固有直交分解を利用して補間する[2]ことも可能である。図3はそのようにして得られた壁近傍のバースティング現象を抽出した時空間分布である。変動波形の時系列データには乱れの強さだけでなく時間スケールの情報が含まれており、壁乱流熱伝達構造を知るうえで大変重要である。

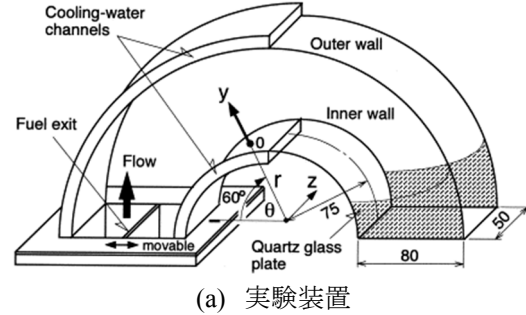
壁乱流熱伝達場における速度・温度同時測定の例として、LDV と熱電対または抵抗線との組み合わせによる計測がある[3, 4, 5]。この同時計測では、速度場に対して非接触型の流速計を用いているため、高温乱流場[3, 5]や剥離・再循環領域[4]における計測が可能であることが特長である。

図4は、LDV と細線熱電対（直径  $40 \mu\text{m}$ , R 型）を用いて、曲り管内の燃焼を伴う乱流熱伝達場を同時計測した例[5]である。曲り管により、強い圧力勾配がかかり、火炎が下壁面に沿って形成される。図4(b)に平均温度、温度変動、乱流熱流束の分布を示す。乱流熱伝達場においては、乱流熱流束は次式の熱の渦拡散係数  $\alpha_t$  を用いた勾配拡散型モデルで表現できる[6]。

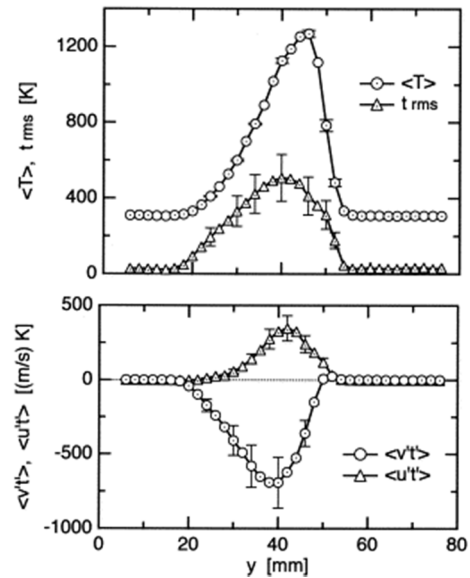
$$-\overline{v\theta} = \alpha_t \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial y} \quad (12)$$

図4(b)で示した結果は、平均温度勾配の符号が曲り管中央付近で逆転しているにもかかわらず、壁垂直方向乱流熱流束が常に正值を示している。

これは、式(12)における熱の渦拡散係数  $\alpha_t$  の符号が逆転することを示し、この符号が負値となる現象を逆勾配拡散現象という（勾配拡散型モデルの詳細については、後述する）。



(a) 実験装置



(b) 温度、温度変動、乱流熱流束分布

図4 曲り流路内乱流場における同時測定[5]

以上、風洞実験によるレイノルズ応力と乱流熱流束の測定例を示した。壁乱流熱伝達場においては、壁面から、もしくは壁面へ熱が伝わるため、壁面極近傍における粘性底層や伝導底層の乱流諸量分布の把握が重要となる。しかしながら、最新の計測技術を用いても、壁面極近傍における精密な計測は困難を伴う。そのため、後述する直接数値シミュレーションによる壁乱流熱伝達場の解析が有効となる。

### 3. 壁乱流熱伝達場の DNS

#### 3.1 直接数値シミュレーション

直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation: DNS) は、熱流体の支配方程式に何らモデルを課さずに数値的に高精度で解く方法であり、壁乱流熱伝達場の計測実験では得難い壁極近傍の詳細な統計量の取得、時空間構造の可視化、乱流モデル予測精度評価や構築の援用データとしての利用等々、その利用価値は高い。壁乱流熱伝達場の DNS は、スペクトル法[7]による方法が当初発展していたが、スペクトル法は、その数学的手法の制限から、周期境界条件を課す必要があるため、壁乱流における DNS は、完全発達した平行平板間流れで主に実行されていた[7-9]。乱流境界層に対する DNS は、スペクトル法による計算も早い時期に発表されていたが[10]、周期境界条件を用いるために、境界層の発達を計算空間内で抑える手法が用いられていた。その後、計算空間内で乱流境界層を発達させつつ、計算部最下流点で発達した乱流境界層を抑制する“干渉領域 (fringe region)”と呼ばれる領域を付加することによって周期境界条件を適用できるようにした乱流境界層の DNS も開発された[11]。スペクトル法による DNS は、計算精度が高く非常に信頼のおける結果を得られるが、上述したように周期境界条件を用いることの制約から、バックステップ流れなどの壁面形状が急激に変化する場や、流れ場が下流に向けて外力により変化する場、温度場を伴う場合における壁面温度境界条件が急激に変化する場等には適応が難しい。そのため、様々な計算場への適応性が高い高次差分による DNS も開発されてきた[12-14]。空間的に発達する乱流境界層に対する高次差分の DNS は、乱流生成法の開発[15]によ

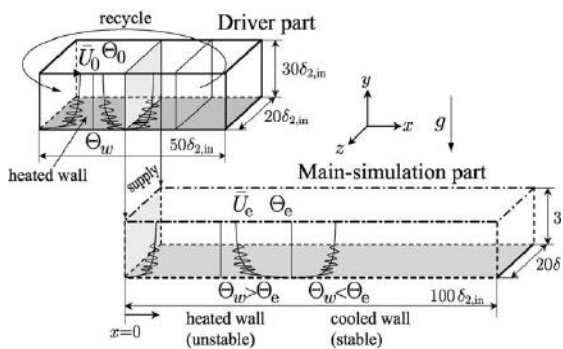


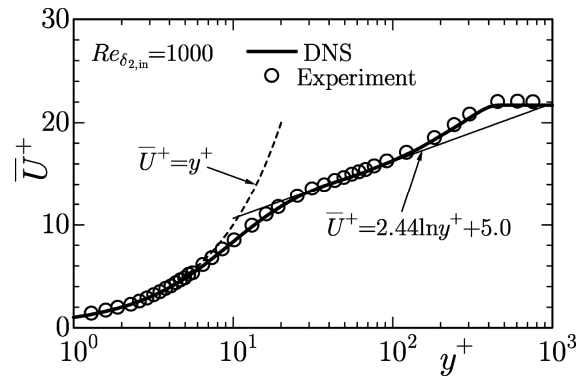
図5 乱流境界層熱伝達場 DNS の計算領域

り実行できるようになった[16,17]。この方法を用いることにより、熱移動を伴う前向きステップ流れ[18]や、温度成層を伴う乱流境界層[17]の DNS が実行可能となり、複雑な乱流熱伝達場の解析ができるようになった。ここでは、乱流生成法を用いた差分法による乱流境界層熱伝達場の DNS について述べる。

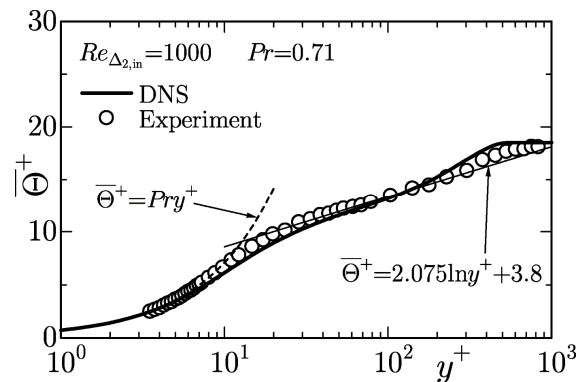
#### 3.2 乱流境界層熱伝達場の DNS

乱流境界層熱伝達場 DNS における計算領域を図5に示す。乱流生成部 (Driver part) で乱流境界層が生成され、主計算部 (Main simulation part) の流入境界条件として、データが時々刻々と引き渡される。

ここで、乱流生成法について述べる。乱流境界層熱伝達場の DNS で用いた乱流生成法では、速度と温度の相似則を利用することにより、図5に示した乱流生成部の計算領域内下流にある断面 (リサイクル面) の速度と温度成分を、乱流生成部の

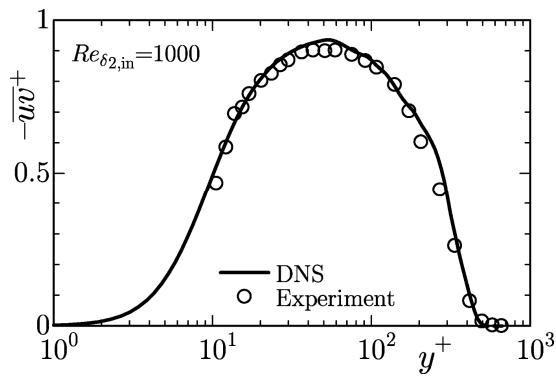


(a) 主流方向平均速度

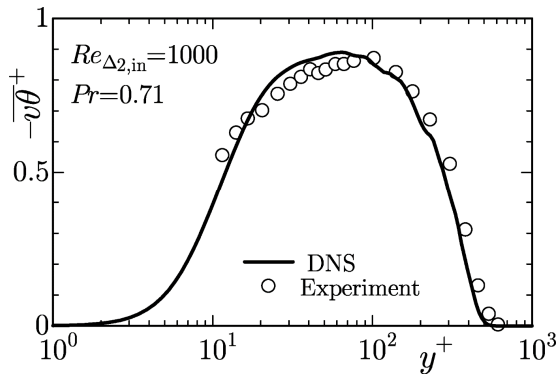


(b) 平均温度

図6 乱流境界層熱伝達場 DNS の結果



(a) レイノルズ応力



(b) 壁垂直方向乱流熱流束

図7 レイノルズ応力と乱流熱流束分布

流入境界条件として再生利用し、乱流状態を維持させる[15, 16]. この時、乱流生成部入口とリサイクル面の距離は、2点相関値が十分に下がりきった距離の2倍程度の距離を取っている.そのため、主計算部に渡すデータは、乱流生成部入口とリサイクル面のほぼ半分の位置のデータを使用している.

DNSで用いる基礎方程式は、式(1)~(3)である. 方程式の無次元化は、乱流生成部入口における運動量厚さ $\delta_{2,in}$ 、主流速度 $\bar{U}_0$ 、主流温度 $\bar{\Theta}_0$ 、壁面温度 $\bar{\Theta}_w$ を用いて施される. そのため、レイノルズ数は乱流生成部入口における運動量厚さと主流速度で停止された $Re_{\delta_{2,in}} (= \bar{U}_0 \delta_{2,in} / \nu)$ を用いる. また、プラントル数は $Pr = \nu / \alpha$ である.

周期境界条件を用いた乱流境界層のDNS[11]では、乱流生成部が必要ないため、ここに使用する計算資源を主計算部に集中させられることや、スペクトル法が利用できるため計算精度が高いなどの利点があるが、本稿で紹介する乱流生成法を用

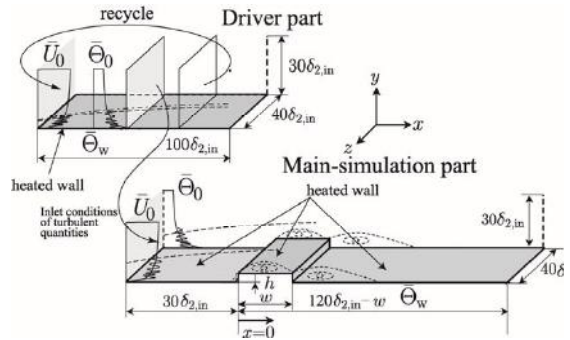


図8 剥離・再付着を伴う2次元ブロック壁乱流境界層熱伝達場DNSの計算領域

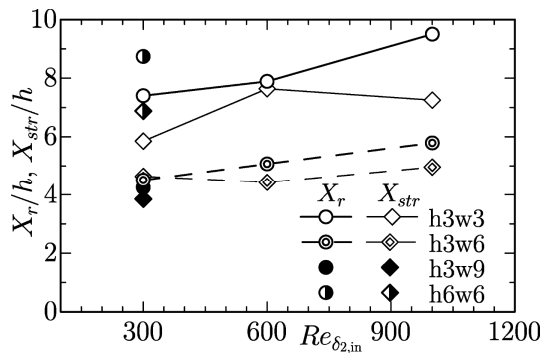


図9 2Dブロック下流の再付着点と、 Stanton数の最大値点

いたDNSでは、乱流生成部を装置実験による送風機と見立て、主計算部で壁面の温度境界条件を任意に変更することや、壁面に障害物を設置するなどの様々な条件のDNSが実行できるなどの利点がある.

上述の手法を用いて行った零圧力勾配乱流境界層熱伝達場(壁温一定条件)のDNS結果[17]を、同様な場で行われた実験での結果[19]と共に図6に示す. 図6(a)に示した主流方向平均速度は実験値と粘性底層から対数領域、外層に至るまでほぼ完全に一致し、平均温度についてもほぼ同様である. 図7に、レイノルズ応力と壁垂直方向乱流熱流束の分布を示す. レイノルズ応力と壁垂直方向乱流熱流束については、実験では粘性底層もしくは伝導底層まで計測することが困難なため値がないが、対数領域から外層にかけてはほぼ一致し、DNSが妥当な計算結果を与えていることが分かる. そのため、レイノルズ応力と壁垂直方向乱流熱流束の壁極近傍の分布や乱流熱伝達構造を調べるには、

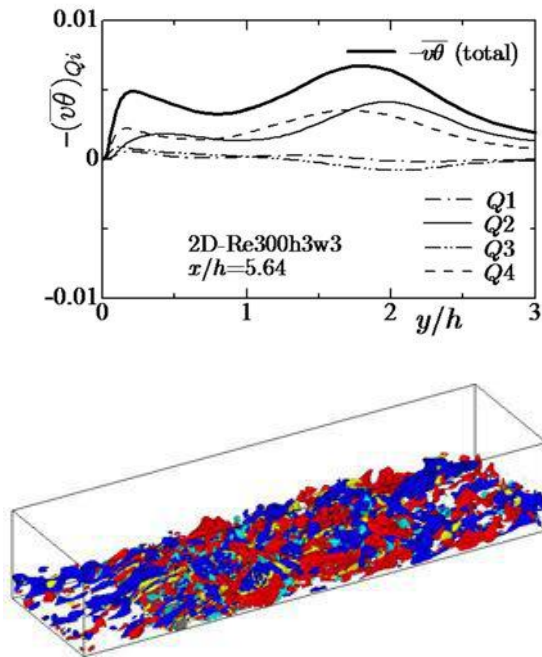


図 10 四象限分類法による壁垂直方向乱流熱流束と乱流運動との関係 (Q1: 水色, Q2: 青, Q3: 黄色, Q4: 赤)

DNS を援用することが非常に有効である。

### 3.3 複雑壁乱流熱伝達場の DNS

差分法による DNS の利点は上述したようであるが、その一例として、熱伝達率の促進に有用な剥離・再付着現象を伴う壁乱流熱伝達場の DNS について述べる。ここでは、剥離・再付着現象を伴う複雑な壁乱流熱伝達場として、図 8 に示す壁面に 2 次元ブロックを配置した壁乱流熱伝達場の DNS の結果[20]について示す。図 9 に、2D ブロック下流における再付着点とスタントンの数の最大値点を示す。図中の凡例記号について、例えば h3w3 は 2D ブロック高さ  $h$  が  $3\delta_{2,in}$ , 幅  $w$  が  $3\delta_{2,in}$  であり、 $X_r$  は再付着点距離、 $X_{str}$  はスタントン数が最大値となる距離である。また、レイノルズ数は前述の乱流境界層の DNS と同じ定義である。図より、ブロック下流では再付着点距離とスタントン数最大値距離が一致する場合は殆どなく、流体抵抗と熱伝達率の相似性が崩れていることを示している。そのため、伝熱促進のために壁面の突起物を設置することに対しては、流体抵抗と伝熱促進のバラ

ンスを考えることに注意を要する。DNS を用いた壁乱流熱伝達場解析の例として、四象限分類法による壁垂直方向乱流熱流束と乱流運動の関係を図 10 に示す。Q1 は高速流体が壁から離れる運動 (Outer-ward interaction;  $u > 0, v > 0$ :  $u, v$  は変動値), Q2 は低速流体が壁から離れる運動 (Ejection;  $u < 0, v > 0$ ), Q3 は低速流体が壁へ向かう運動 (wall-ward interaction;  $u < 0, v < 0$ ), Q4 は高速流体が壁へ向かう運動 (Sweep;  $u > 0, v < 0$ ) であり、レイノルズ応力の生成には、Q2 と Q4 運動が寄与している。図 10 のグラフは、2D ブロック下流地点における壁垂直方向乱流熱流束とこれらの乱流運動との関係を示しているが、壁極近傍においては Q4 運動が大きく寄与していること、壁から離れた領域では Q2 と Q4 運動の寄与が大きくなっていることが分かる。このことを計算空間全体で、ある瞬間において観察したのが図 10 の下図であり、2D ブロック上流では、Q2 運動が主に観察できるが、その下流では Q4 運動が活発に起こっていることを見ることができる。このように、DNS では、速度と温度場の時空間相関関係を視覚的に観察することが容易であることから、複雑な壁乱流熱伝達現象の解明に非常に有益なツールである。

以上、実験と DNS から壁乱流熱伝達場における現象解明の有益性について述べたが、さらに容易に場の情報を得るためには、予測手法が有用であるため、予測手法の 1 つである乱流モデルについて次節で述べる。

### 4. 壁乱流熱伝達現象のモデリング

熱機器等を設計する時など、それに必要な基本熱伝達場のデータを、実験計測や DNS で得ることは、大変な時間と労力を要するため、簡易な方法で知ることができれば、それに越したことはない。例えば、管壁が加熱された円管内の熱伝達率は状態量であるが、よく知られた次の実験式を用いて知ることができる。

$$Nu = CRe^n Pr^m \quad (13)$$

ここで、 $Nu$  はヌセルト数、 $Re$  はレイノルズ数、 $Pr$  はプラントル数であり、 $C, n, m$  は実験定数である。この実験式を用いれば、発達した円管内の熱伝達率が、速度場の情報と作動流体の物性値のみで知ることが出来る。しかしながら、流れが未発

達な場合や、壁面の過熱状態によっては局所的に熱伝達率が変化するため、この式は使うことができず、場所ごとの速度場と温度場の状態を算出しなければならない。この場合、その場合に合わせた実験や DNS を行うことも考えられるが、より簡易的な計算で状態が分かればと思うはずである。そこで、レイノルズ平均化された式(5)~(7)を解けば、より計算負荷が低い計算が行えるが、式(5)~(7)は変数の数と方程式の数が合っていないため、解くことができない。これは、レイノルズ平均を施すことによって出現したレイノルズ応力 $\overline{u_i u_j}$ と、乱流熱流束 $\overline{u_i \theta}$ が変数であるためである。そのため、何らかの方法を使って方程式を閉じさせなければならない(変数の数と、方程式の数を揃えなければならない)。この方法のことをモデリングと呼び、次式で示す勾配拡散型モデルが、実際問題では計算負荷や予測精度のバランスから良く使用される。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{u_k u_k} \quad (14)$$

$$-\overline{u_i \theta} = \alpha_t \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} \quad (15)$$

ここで $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ、また、 $\nu_t$ は運動量の渦拡散係数、 $\alpha_t$ は熱の渦拡散係数であり、どちらも状態量である。勾配拡散型モデルにより、レイノルズ応力と乱流熱流束をモデル化したが、モデルの中に状態量があり、まだ方程式を閉じることができていないため、さらにモデル化が必要である。そこで、 $\nu_t$ と $\alpha_t$ の次元は物性値である動粘性係数 $\nu$ と温度伝導率 $\alpha$ と同様のため、以下のようにモデル化する[6, 21, 22].

$$\nu_t \propto C_V V \cdot L_V = C_V V^2 \cdot \tau_V \quad (16)$$

$$\alpha_t \propto C_T V \cdot L_T = C_T V^2 \cdot \tau_T \quad (17)$$

ここで、 $C_V, C_T$ はモデル定数、 $V$ は乱れの速度スケール、 $L_V, L_T$ は乱れの長さスケール、 $\tau_V, \tau_T$ は乱れの寿命であり、これらスケールを決定してやればよい。

もっとも簡単なモデルは、プラントルの混合距離理論であり、乱れの長さスケール $L_V$ を混合距離 $\ell$ で、乱れの速度スケール $V$ を $\ell \times (\partial \overline{U} / \partial y)$ で表現し、次式で与えられる。

$$\nu_t = \ell^2 \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} \quad (18)$$

混合距離 $\ell$ は $\ell = \kappa y$ で与えられ、 $\kappa$ はカルマン定数(0.38-0.41)、 $y$ は壁面からの距離である。このモデルは、 $\nu_t$ を平均速度勾配と壁面からの距離だけで表し、これ以上の方程式を必要としないため、0方程式モデルと呼ばれる。この時、 $\alpha_t$ は乱流プラントル数 $Pr_t$ を用いて、次式のようにモデル化される。

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (19)$$

乱流プラントル $Pr_t$ も状態量であるが、 $Pr_t=0.9$ と定数で与えられる場合が多い。

壁乱流熱伝達場でこれらのモデルを使用する場合には、壁面近くのスケール補正を施す必要があるため、次式が用いられる。

$$\nu_t = (\ell f_D)^2 \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} \quad (20)$$

ここで、 $f_D = 1 - \exp(-y^+/A)$ は、Van Driestの壁面影響関数[23]であり、 $y^+$ は無次元距離、 $A$ はモデル定数で $A = 26$ である。

0方程式モデルは、渦拡散係数を算出するために新たな方程式を必要としないことから使いやすいモデルであるが、状態量である渦拡散係数を乱流熱伝達場の状態に応じて適切に与えることができないため、単純な場を除き、予測精度は低下する。そこで、渦拡散係数を乱流熱伝達場の状態で適切に与えるために、乱流エネルギー $k$ と、その散逸率 $\varepsilon$ 、温度乱れ $k_\theta$ とその散逸率 $\varepsilon_\theta$ を用いて、乱れの速度スケール $V$ を $\sqrt{k}$ で表し、乱れの寿命 $\tau_V$ を $k/\varepsilon$ 、 $\tau_T$ を $f(k/\varepsilon, k_\theta/\varepsilon_\theta)$ として次式のようにモデリングを施す[6, 21, 22].

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21)$$

$$\alpha_t = C_\lambda f_\lambda k \tau_m \quad (22)$$

ここで、 $C_\mu, C_\lambda$ はモデル定数、 $f_\mu, f_\lambda$ は壁面影響関数、 $\tau_m = f(k/\varepsilon, k_\theta/\varepsilon_\theta)$ は、速度場と温度場の混合時間スケールである。壁乱流熱伝達現象を予測するために提案されたNagano-Kim(NK)モデル[6]では、 $\tau_m = \sqrt{(k/\varepsilon)(2k_\theta/\varepsilon_\theta)}$ と両スケールを相乗平均してモデル化されている。ここで用いた変



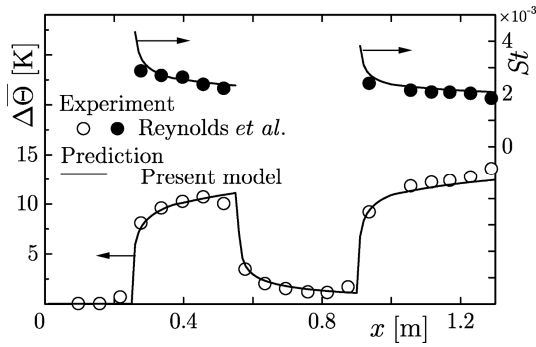
数は、以下に示したそれらの輸送方程式からすべて求められ、 $v_t$ に対して2つの方程式、 $\alpha_t$ に対して温度場の2つの方程式を用いることから、2方程式モデルと呼ばれる。特に速度場では、乱流エネルギー $k$ とその散逸率 $\varepsilon$ から $k$ - $\varepsilon$ モデルと呼ばれ、最も普及している乱流モデルである。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (23)$$

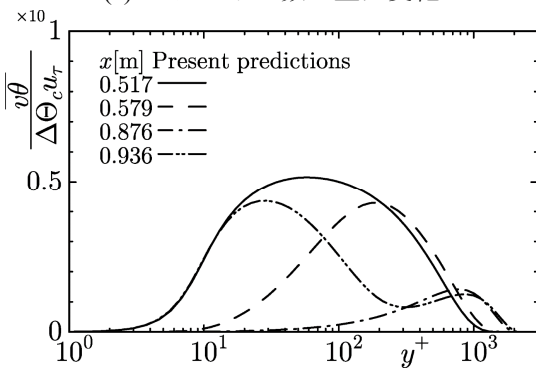
$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (24)$$

$$\frac{Dk_\theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_h} \right) \frac{\partial k_\theta}{\partial x_j} \right] + P_{k_\theta} - \varepsilon_\theta \quad (25)$$

$$\frac{D\varepsilon_\theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_\phi} \right) \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon_\theta}{k_\theta} (C_{P1} f_{P1} P_{k_\theta} - C_{D1} f_{D1} \varepsilon_\theta) + \frac{\varepsilon_\theta}{k} (C_{P2} f_{P2} P_k - C_{D2} f_{D2} \varepsilon) \quad (26)$$



(a) スタントン数と壁温変化

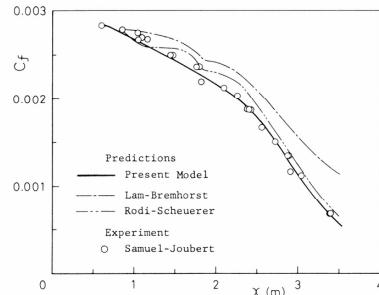


(b) 壁垂直方向乱流熱流束

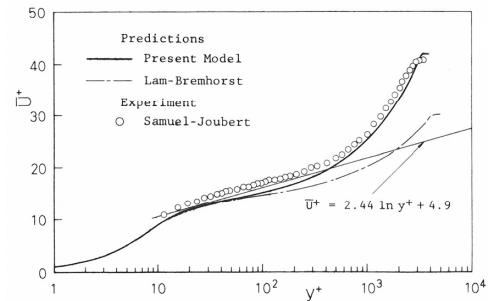
図11 壁面熱流束がパルス状に変化する壁乱流熱伝達場の乱流モデルによる予測[25]

ここで、 $D/Dt = \partial/\partial t + \bar{U}_j \partial/\partial x_j$ は実質微分、 $P_k = -\bar{u}_i \bar{u}_j (\partial \bar{u}_i / \partial x_j)$ 、 $P_{k_\theta} = -\bar{u}_j \bar{\theta} (\partial \bar{\theta} / \partial x_j)$ は生成項、 $f_{\varepsilon 1}$ 、 $f_{\varepsilon 2}$ 、 $f_{P1}$ 、 $f_{P2}$ 、 $f_{D1}$ 、 $f_{D2}$ はモデル関数、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{P1}$ 、 $C_{P2}$ 、 $C_{D1}$ 、 $C_{D2}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_\phi$ はモデル定数である。モデル定数や、モデル関数は提案されたモデルごとに相違があり、設定には注意が必要である。また、温度場モデルは、組み合わせる速度場モデルによって予測精度が変わる可能性があることにも注意が必要である（論文に記してある速度場モデルを使用することが望ましい）。

図11に、乱流境界層が通過する壁面が、断熱壁から熱流束一定加熱壁へ、その後断熱、加熱を繰り返す壁乱流熱伝達場[24]を、速度・温度場2方程式モデルで予測した結果[25]を示す。この壁乱流熱伝達場は温度助走区間を含むために式(13)のような実験式では熱伝達率の推定は不可能な非常に複雑な乱流場であるが、モデルの予測値は実験値[24]をよく捉えていることから、このような場において、2方程式モデルによる予測が有効であることを示している。また、この壁乱流熱伝達場は、実験値[24]が壁温変化とスタントン数しかなく、空間に分布する乱流諸量の状態が不明である



(a) 壁面摩擦係数



(b) 平均速度分布

図12 低レイノルズ数型乱流モデルによる逆圧力勾配乱流境界層の予測[22]



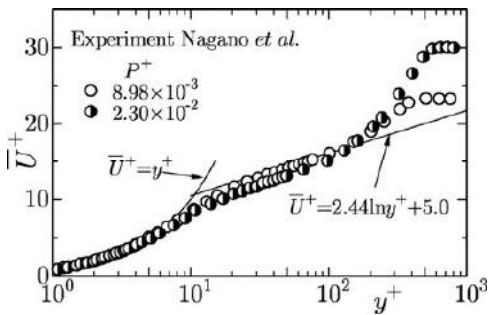


図 13 熱線流速計による逆圧力勾配乱流境界層の速度分布 [27]

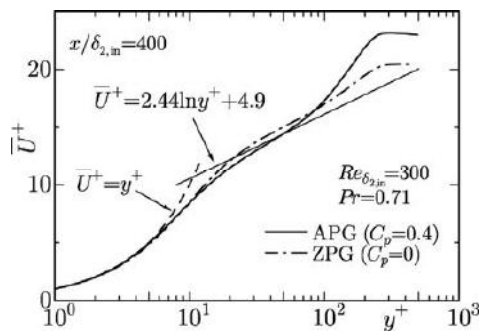


図 13 DNS による逆圧力勾配乱流境界層の速度分布 [28]

が、図 11(a)に示した予測値が実験値を捉えていることから、図 11(b)の予測された壁垂直方向乱流熱流束分布は、確からしい状態であると推測することが出来る。

このように、乱流モデルを援用することで、実験値を得ることや、DNS を実行することが困難な壁乱流熱伝達場のより詳細な情報を推測することが可能であるといえるが、乱流モデルの予測はまだまだ万能ではなく、今後も改良が必要である。

### 5. 実験と DNS とモデリングの融合

前節までは、壁乱流熱伝達場で重要な乱流諸量の計測や算出、そして予測手法について述べたが、これらの手法を融合させて壁乱流熱伝達現象を解析した事例を示す。

図 12 に低レイノルズ型乱流モデル[22]による逆圧力勾配乱流境界層における壁面摩擦係数と平均速度分布の予測結果を示すが、この時、一つの疑問が湧いたという。モデルの予測は、壁面摩擦係数をよく捉えており、そのことは摩擦速度で無次元化された平均速度分布の境界層終端における最

大値を予測していることになる。しかしながら、対数領域における速度分布予測値が、図中に示した対数速度分布  $\bar{U}^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B$  (ここでは、カルマン定数  $\kappa$  は 0.41, 定数  $B$  は 4.9 を用いている) から下方にずれることが疑問となった。実験において摩擦速度を求めるには、壁面における平均速度勾配を求めなければいけないが、乱流境界層のように薄い粘性底層の速度を計測することは非常に困難であるため、対数領域で計測されたデータを上述の対数速度分布に乗るようにして摩擦速度を決定する方法がしばし取られる (Clauser chart method [26])。この方法では、対数速度分布の係数  $\kappa$  と  $B$  を予め決定するので、実際には対数速度分布の係数が変化していたとしても、それは分からない。そのため、この方法によらず、熱線流速計によって壁面極近傍の速度を計測し、新たな壁面摩擦係数の決定方法を用いて、逆圧力勾配乱流境界層の対数速度分布を決定した結果[27]が図 13 である。この結果によれば、逆圧力勾配乱流境界層では、対数速度分布  $\bar{U}^+ = 2.44 \ln y^+ + 4.9$  が保持されず、下方に速度分布がシフトしていることが分かった (後に、さらに非平衡な条件の時に、下方へシフトすることが明らかになった)。そのため、モデルで予測した結果が実験で証明されたことになったわけである。また、この結果は後に DNS でも証明されることとなり (図 13[28])、さらに逆圧力勾配乱流境界層熱伝達場についても同様の研究 [2] [28] が重ねられ、モデルの予測結果から湧いた疑問が、実験、DNS、新たなモデリングへの研究と繋がり、実験と計算が融合して壁乱流熱伝達現象のさらなる理解が深まった例である。

### 6. おわりに

本稿では、壁乱流熱伝達場における実験と計算、モデリングについて述べ、これらが融合することでさらなる現象への理解につながることを示した。これは、故長野靖尚先生が目指した研究であり、先生の研究成果があつて、原稿を執筆することができた。ここに先生のご冥福をお祈りするとともに、偉大なる研究成果を残していただいたことに感謝する。

### 参考文献

[1] Tagawa M., Kato, K. and Ohta, Y., Response

- compensation of fine-wire temperature sensors, *Review of Scientific Instruments*, **76** (2005), 094904.
- [2] Houra, T. and Nagano, Y., Spatio-temporal turbulent structures of thermal boundary layer subjected to non-equilibrium adverse pressure gradient, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **29-3** (2008), 591.
- [3] Tagawa M., Nagaya, S. and Ohta, Y., Simultaneous measurement of velocity and temperature in high-temperature turbulent flows: a combination of LDV and a three-wire temperature probe, *Experiments in Fluids*, **30-2** (2001), 143.
- [4] Hirota M., et al., Promotion of turbulent thermal mixing of hot and cold airflows in T-junction, *Flow, Turbulence and Combustion*, **81-1** (2008), 321.
- [5] Tagawa, M., Matsubara, F. and Ohta, Y., Heat transfer characteristics of a non-premixed turbulent flame formed in a curved rectangular duct, *Combustion and Flame*, **129-1-2** (2002), 151.
- [6] Nagano, Y. and Kim, C., A Two-Equation Model for Heat Transport in Wall Turbulent Shear Flows, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **110-3** (1988), 583.
- [7] Kim, J. et al., Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, **177** (1987), 308.
- [8] Kasagi, N. et al., Direct numerical simulation of passive scalar field in a turbulent channel flow, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **114** (1992), 598.
- [9] Nagano, Y. and Hattori, H., Direct numerical simulation and modelling of spanwise rotating channel flow with heat transfer, *J. Turbulence, Institute of Physics*, **4-010** (2003).
- [10] Spalart, P. R., Direct simulation of a turbulent boundary layer up to  $R_\theta = 1410$ , *J. Fluid Mech.*, **187** (1988), 61.
- [11] Schlatter, P. et al., Simulations of spatially evolving turbulent boundary layers up to  $R_\theta = 4300$ , *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **31-3** (2010), 251.
- [12] Morinishi, Y. et al., Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow, *J. Comput. Physics*, **143-1** (1998), 90.
- [13] Kawamura, H. et al., DNS of turbulent heat transfer in channel flow with low to medium-high Prandtl number fluid, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **19-5** (1998), 482.
- [14] Le, H. et al., Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step, *J. Fluid Mech.*, **330** (1997), 349.
- [15] Lund, T. S. et al., Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations, *J. Computational Physics*, **140-2** (1998), 233.
- [16] Kong, H., et al., Direct numerical simulation of turbulent thermal boundary layers, *Physics of Fluids*, **12** (2000), 2555.
- [17] Hattori, H., Houra, T. and Nagano, Y., Direct numerical simulation of stable and unstable turbulent thermal boundary layers, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **28-6** (2007), 1262.
- [18] Hattori, H., Houra, T. and Nagano, Y., Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing step via direct numerical simulation, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **31-3** (2010), 284.
- [19] Houra, T. and Nagano, Y., Effects of adverse pressure gradient on heat transfer mechanism in thermal boundary layer, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **27** (2006), 967.
- [20] Hattori, H. and Nagano, Y., Structures and mechanism of heat transfer phenomena in turbulent boundary layer with separation and reattachment via DNS, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **37** (2012), 81.
- [21] Nagano, Y. and Hishida, M., Improved form of the  $k-\epsilon$  model for wall turbulent shear flows, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **109-2** (1987), 156.
- [22] Nagano, Y. and Tagawa, M., An Improved  $k-\epsilon$  Model for Boundary Layer Flows, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **112-1** (1990), 33.

- [23] Van Driest, E. R., On turbulent flow near a wall, *J. the Aeronautical Sciences*, **23** (1956), 1007.
- [24] Reynolds, W. C., et al., Heat transfer in the turbulent incompressible boundary layer, III-arbitrary wall temperature and heat flux, *NASA MEMO*, 12-3-58W (1958).
- [25] Hattori, H. and Nagano, Y., Rigorous formulation of two-equation heat-transfer model of turbulence using direct simulations, *Numerical Heat Transfer B*, **33** (1998), 153.
- [26] Clauser, F. H., The turbulent boundary layer, *Adv. Appl. Mech*, **4** (1956) 1.
- [27] Nagano, Y., Tagawa, M. and Tsuji, T., Effect of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer, *Turbulent Shear Flows 8*, (1993), 7.
- [28] Hattori, H., Kono, A., Houra, T. and Tagawa, M., DNS of thermally-stratified turbulent boundary layers subjected to adverse pressure gradient, *Proc. 9th Int. Sympo. Turbulence and Shear Flow Phenomena*, (2015), 5D-4.
-

## 対流伝熱解析の進展と圧力補正法 SIMPLE

*SIMPLE Algorithm Advanced with Convective Heat Transfer Analysis*

中山 颯 (静岡大学)

*Akira NAKAYAMA (Shizuoka University)*

*e-mail: nakayama.akira@shizuoka.ac.jp*

### 1. はじめに

英国放浪を終え、通常より2年遅れて静岡キャンパスから浜松キャンパスに移ってきたため、講座配属の際の優先順位は最下位だった。早く就職せねばとの思いから楽に卒研が終えられればという下心はあっても、行きたい研究室はとりたててなかった。所属学生がまだ一人しか決まっていなかった児山仁先生の熱工学講座を選んだのは、先生が見るからに寛仁大度な紳士だったからである。卒研と一緒に取り組んだ先客の学生とは生涯の親友となり、恩師児山先生の導きで対流伝熱の研究に踏み出すことになるわけであるから、一人の人生は確かに出会いで大きく変わるものである。

### 2. 数値解析への熱い思い

卒研は回転翼からの対流熱伝達に関するもので、物質移動とのアナロジーより、実験および解析の両側面から層流および乱流局所熱伝達を検討するものであった。当時、カード読み取り式のコンピュータは既にあつたが予約がいっぱいで、我々はテープ読み取り式の日立のコンピュータ HIPAC (図1参照) を使わざるを得なかった。朝は熱電対用の氷水を準備することから始め、夜は実験のデータ処理や回転系の境界層方程式を解くため、穿孔機でテープのプログラムを打ち直してはつぎはぎをする作業に没頭した。

Schlichting の Boundary layer theory [1] をよりどころに、積分法 (プロフィール法) を3次元の回転系にがむしゃらに適用して解析解を求め、実験値と比較した。当時, ASME Journal of Heat Transfer のチーフエディターのスパロウ (E. M. Sparrow) が、熱と物質移動のアナロジーの擁護者であったためか、英語の添削を買って出てくれた。論文は間もなく無事に Journal of Heat Transfer に掲載された [2]。

積分法しか知らなかったところに、Journal of

Heat Transfer や International Journal of Heat and Mass Transfer などに掲載されるパタンカー (S. V. Patankar) をはじめ多くの人々の数値計算結果を目にするようになった。論文中のグラフィクスは芸術作品に近く、数値解析は魔法のように思えた。その魔法の技を習得せねばとの思いが次第に強くなった。

スパロウから頂いた掲載決定の手紙と校正刷りを手当たり次第に米国の大学に送り、3校から Research Assistant のオファーを受けた。その中で、電算機のメッカであり一番条件の良さそうなイリノイ大学 (University of Illinois at Urbana-Champaign) へ行くことに決めた。70年代半ばは、米国の大学もまだまだ余裕がある良き時代であった。

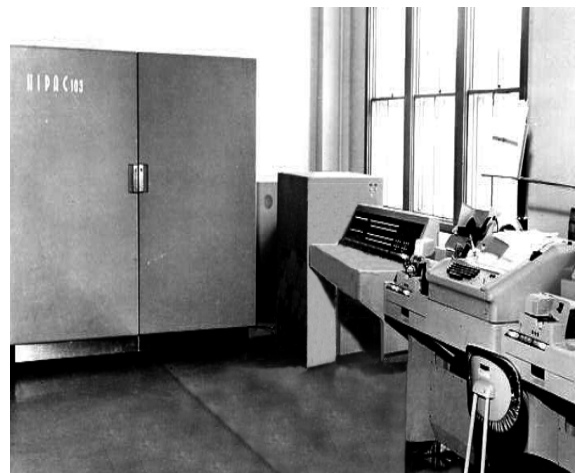


図1 日立のコンピュータ HIPAC と穿孔機

### 3. パタンカーとスポールディング

1976年夏、広大なとうもろこし畑に囲まれたウイラード空港 (大学所有) に降り立った。イリノイ大学では Korst-Chapman model で有名な Korst 教授の空気力学グループに属する W. L. Chow 先生の研究室に所属し、後方ステップの圧縮性流れから非圧縮性乱流まで様々な研究テーマに関わった。

その頃、パタンカーは、噴流などの解析用に開発した2次元放物型流れのコンピューターコード GENMIX を博士論文上で公開しており、この論文がハードカバーの本 [3] になったこともあり、既に著名人であった。一旦、インド工科大学に戻ったようであるが、まもなくスパロウの招きでミネソタ大学に籍を移した。

彼は、GENMIX を公表後しばらくして、圧力補正法 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) の名称で誰もが知ることとなる基礎変数 (原始変数：速度と圧力) に基づく流体解析アルゴリズム (SIMPLE algorithm) を提案した。パタンカーとスポールディング (D. B. Spalding) の有名な論文 “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows” [4] の中で初めて紹介されている。この SIMPLE アルゴリズムは、GENMIX の2次元放物型流れのアイデアを3次元放物型流れに拡張したものである。事実、GENMIX には、ハイブリッド差分も含め、後に SIMPLE に組み込まれる様々なアイデアが既に取り入れられている。



図2 お祝いのスピーチをするパタンカー教授

パタンカーが SIMPLE アルゴリズムにたどり着いたのは、GENMIX を開発した時と同様に、個々のコントロールボリューム要素内での保存則にこだわったからこそだと思ふ。輸送現象に関わるすべての基礎方程式群を一般形保存式でとらえることを古くから提唱してきたスポールディングの影響であろう。コントロールボリューム法をパタンカーに示唆したであろうスポールディングの功績は大きい。

2008年5月、モロッコで de Vahl Davis や長野靖尚先生が実行委員を務められ、Advances in Computational Heat Transfer (CHT'08) が開かれた。コンファレンスの前日には、B. E. Launder, W. Rodi, A. Runchal などインペリアルカレッジ時代の大勢の仲間に加え招待講演者も招かれ、スポールディングの85歳の誕生日をお祝いする会が設けられた。図2および3の写真はその折に筆者が撮ったものである。

パタンカーにお会いするのは、学生時代にミネソタの研究室を訪問した時以来であった。スポールディングからは、筆者が講演で紹介した局所体積平均理論が彼のコマーシャルコード PHOENICS の Landscape simulation に適用できないかとのメールをその後数回頂いた。



図3 感謝状を受け取るスポールディング教授

#### 4. SIMPLE の波及効果

ところで、SIMPLE アルゴリズムは、当該論文の本論としてではなく、本論とは別のディテールの一部 (管路断面の二次流れの解析用ツール) として扱われている。すなわち、パタンカーとスポールディングの論文 [4] の力点は、あくまでも流れの主軸 ( $x$  軸) を時間軸 ( $t$  軸) に対応させることで、非定常2次元計算のように、2次元メモリーだけで多くの3次元流れが計算可能になるという「3次元放物型流れ」の物理的視点にあった。

今日では、放物型 (境界層) 近似など気にせずコマーシャルコードで完全3次元 (楕円型) ナビエストークスの式を解けば足りるケースも多いであろうが、メモリーの制限で3次元計算が難しかった当時としては、このような視点は極めて有意

義であり重要であった。

基礎変数に基づく手法としては、既に MAC 法や SMAC 法などがあったためか、パタンカー本人は、自身が編み出した SIMPLE アルゴリズムの波及効果をしばらく過少評価していたようである。それもあって、その後も彼は Partially parabolic flow, Partially elliptic flow, Three dimensional parabolic flow など 3 次元放物型流れのタイトルにこだわって論文を書いている。SIMPLE アルゴリズムの改良版である SIMPLEC [5], SIMPLER [6] や SIMPLEST [7] がパタンカー本人や彼の同僚により提案されるのは、その後しばらく時間が経過してからである。

確かに、パタンカーの貢献は、圧力補正量や速度補正量を用いることで、限られた流体解析の専門家のみが享受していた基礎変数ベースの解析法の利便性を、一般ユーザーのレベルにまで噛み砕き提供したに過ぎないとの見方もある。しかし、SIMPLE の出現が、難解とされていた熱流体解析を多くのエンジニアにとって身近なものにしたことは間違いない。

また、パタンカー自身の著作物 [8] や他者の関連著作物 e.g. [9, 10, 11] の出版部数の総計が膨大な数にのぼるであろうこと、現存する多くの熱流体解析コマースソフトウェアが SIMPLE 系の手法を採用していることから分かるように、今日まで SIMPLE がもたらした経済的効果は計り知れないものがある。

### 5. 乱流モデルの確立への寄与

ここまで広く SIMPLE アルゴリズムが受け入れられた背景には、何と言っても、コントロールボリュームに基づく考え方がある。各要素内での諸量の保存に立脚した有限体積法の考えが、機械工学分野の者にとってなじみ深いからである。とりわけ、GENMIX および SIMPLE が各レベルの乱流モデルを確立していく過程のツールとして果たした役割は極めて大きい。

例えば、2 方程式乱流モデルのレベルにおいては、乱れエネルギー  $k$  と対となる最適な従属変数  $k^m l^n$  (ここで  $l$  は渦スケール) についての議論が繰り広げられた。その従属変数が乱れエネルギーの散逸率  $\varepsilon \propto k^{3/2} l^{-1}$  に絞られていく過程で GENMIX および SIMPLE は大きく貢献した [12]。

これら乱流モデル確立の過程および低レイノルズ数モデルの改良を含むその後の乱流対流伝熱の発展において、長野靖尚先生、笠木伸英先生、河村洋先生をはじめ多くの日本人研究者が世界的に活躍し大きく貢献したことは記憶に新しい。当時、乱流に関わっていた者であればだれもが、インペリアルカレッジやスタンフォード大学の研究者らとしてのぎを削る日本の諸先生の姿を頼もしくまた誇らしく感じたに違いない。

### 6. SIMPLE の 3 次元計算への順応性

非圧縮性流体の解析法として流れ関数-渦度法に親しんできた者にとっては、SIMPLE 系における基礎変数での境界条件設定の利便性や圧力補正量を用いることによる取扱いの容易さを訴えられてもピンとこない。むしろ、SIMPLE やその改良型を用いることの最大の利点は、2 次元プログラムを 3 次元プログラムに拡張する手続きが明快でスムーズであるところ、すなわち 3 次元計算への順応性の高さにあると考える。このことは、任意形状断面を有する 3 次元乱流の数値解析を博士論文のテーマとして与えられた際に直感した。

そんなわけで、まずは公表されて間もなかったパタンカーとスポールディングの論文 [4] を繰り返し読んでは 2 次元コンピュータープログラムを再現する作業にかかった。故意であるか否かは別として、論文の情報は不十分な場合がほとんどであり、そこからすべての情報を読み取り具象化するのは極めて困難である。パタンカーの名著 [8] はまだ出版されておらず、情報不足の中で試行錯誤が長く続いた。やはり圧力補正式でつまづいた。

独りならばあきらめていたであろうが、公聴会の日程が決まった者、就職が内定した者など、どんどん先に行く周りの優秀な同僚の勢いに押されてなんとか 2 次元プログラムを完成することができた。プレリミまでこぎ着けた時には既に数年の歳月が流れていた。

完成した SIMPLE ベースの 2 次元プログラムを 3 次元プログラムへ拡張することは、さほど難しくはなかった。しかし、"Three-dimensional flows in conduits of arbitrary geometrical configuration" というタイトルで博士論文を書き上げるには、その後長い時間を要することになる。3 次元流路の乱流



で最も基本的とされる正方形断面流路の解析さえ、レイノルズ応力の異方性に起因する第二種二次流れ (Reynolds stress driven secondary flow, Secondary flow of the second kind) の影響が強く反映するためである。

結局、非円管内乱流に発生する第二種二次流れを予測するためのレイノルズ応力輸送モデルを代数化し、これを任意曲線座標系の3次元離散化支配方程式群と共に組み込むにはさらに数年を要したのであった[13]。博士号を頂くころには30も間近になっていた。

## 7. おわりに

静岡大学に赴任した年に、緊張に震えながら伝熱シンポジウムで発表した。確か1982年の19回で、開催地は名古屋であったように記憶している。1981年のStanford会議で発表した内容とほぼ同じ正方形管路の二次流れに関するものであった。

詳しい経緯は忘れてしまったが、長野先生より厳しい質問を受けた記憶がある。動転気味でうまく答えられず発表後に沈んでいると、長野先生がにこにこしながら声をかけて下さった。「東海地区にもレイノルズ応力輸送方程式の研究をする若い人がいて頼もしい」というようなことをおっしゃったように思う。

ところがその後、長野先生の期待には応えられず、多孔質伝熱の分野など、乱流熱伝達からは遠いところへ駆け出してしまった。乱流関連の難解な論文と苦戦した学生時代の劣等感からくるトラウマが、乱流から距離を置くようになった理由である。長野先生にはわけをお話していないが、きっと気づいておられたと思う。

## 参考文献

- [1] Schlichting, H. (J. Kestin 訳), *Boundary layer theory*, 7th Edition McGraw-Hill, New York (1979).
- [2] Koyama, H., Nakayama, A., Sato, K. and Shimizu, T., Local mass transfer from rotating wedge-shaped blades, *Trans ASME J. Heat Transfer* 99-4 (1977) 634-640.
- [3] Patankar, S. V. and Spalding, D. B., *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers: A General Calculation Procedure*, 2nd Edition, Intertext Books, London (1970).
- [4] Patankar, S. V. and Spalding, D. B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat Mass Transfer* 15 (1972) 1787-1806.
- [5] Van Doormaal, J. P. Raithby, J. P., Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows, *Numerical Heat Transfer B Fundamentals* 7-2 (1984) 147-163.
- [6] Patankar, S. V., A calculation for two-dimensional elliptic problems, *Numerical Heat Transfer* 4 (1981) 409-426.
- [7] Spalding, D. B., *Mathematical Modelling of Fluid-Mechanics, Heat-Transfer and Chemical-Reaction Processes: A Lecture Course*, HTS/80/1, Computational Fluid Dynamics Unit, Imperial College, University of London, London, (1980).
- [8] Patankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill, New York (1980).
- [9] スハス V. パタンカー (水谷・香月訳), コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版 (1985).
- [10] 香月正司, 中山顕, 熱流動の数値シミュレーション, 森北出版 (1985).
- [11] Nakayama, A., *PC-Aided Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, CRC Press (1995).
- [12] Artemov, V. et al., A tribute to D. B. Spalding and his contributions in science and engineering, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 3884-3905.
- [13] Nakayama, A., et al., Calculation of fully developed turbulent flows in ducts of arbitrary cross-section, *Journal of Fluid Mechanics* 128 (1983) 199-217.

最適形状設計・最適制御に基づく高性能熱流体機器の開発に向けて  
*Toward Development of High-Performance Thermo-Fluids Devices Based on  
Optimum Shape Design and Control Methodologies*

森本 賢一, 鈴木 雄二 (東京大学)

*Kenichi MORIMOTO, Yuji SUZUKI (The University of Tokyo)*

*e-mail: morimoto@mesl.t.u-tokyo.ac.jp*

## 1. はじめに

省エネルギー・低環境負荷を実現する観点から、マクロスケールからマイクロスケールにわたる大小様々な熱流体機器のさらなる高性能化は重要な技術的課題である。従来、複雑な熱流動現象を伴う多くの熱流体機器の開発において、物理現象の直観的な理解や、膨大な試行錯誤のもとに蓄積された経験的な知見に基づく設計アプローチがとられてきた。

一方、近年の飛躍的な計算機性能の向上に伴い、CFD（計算流体力学）解析技術が急速に進展し、詳細かつ高精度な熱流動解析が可能となっている。既存の熱流体機器の性能評価には、適切な物理モデルの構築、およびその妥当性を評価するための信頼性の高い実験／解析データを得ることが必要である。高精度な CFD 解析技術は、実験的評価が困難な系に適用することによって、設計段階での実デバイス評価を部分的に不要にする基本特性評価ツールとして位置付けられる。しかし、各種設計変数と結果として生じる詳細な熱流動現象の関係性を統一的に捉えることは一般的に容易ではなく、今なお熱流体機器の最適設計・最適制御手法は確立されていない。

本稿では、近年著者らのグループで取り組んできた、最適形状設計手法・最適制御理論に基づく高性能熱流体機器の開発に向けた取り組み[2, 3, 5, 7-12]について、概要を紹介する。

## 2. 随伴解析

本稿で紹介する最適形状設計・最適制御スキームは、目的を評価関数として表現し、現象を支配する熱流動変数の随伴解析により得られる制御変数の感度情報を用いてその停留条件を求める手法である。物理場の支配方程式と対応した随伴方程式を導入することで、一連の数学的な手続きに基づき、評価関数の勾配を得ることが可能となる。

多入力・多出力系に対応した現代制御理論では、線形の常微分方程式で表される状態方程式を制御対象とし、その線形 2 次形式の最適化問題は、リカッチ方程式を解くことに帰着される。一方、非線形の偏微分方程式で記述される熱流体系において、随伴方程式がリカッチ方程式に対応し、評価関数および制御対象の支配（状態）方程式、初期条件・境界条件をもとに制御量が導出される[2]。制御入力は各制御問題において、予めその形式（独立変数、定義域など）を規定した上で、境界形状を制御入力とする形状最適化問題、あるいは境界における流速や温度、熱流束などの時空間関数を制御入力とする最適制御問題として定式化される。

随伴解析の大きな利点として、基底関数が未知の任意関数を制御入力とすることが可能な点が挙げられる。さらに本手法は確率論的手法と比較し、設計解近傍の局所的な最適性保証や計算コストの点で優れる。また、本手法は、制御目的とする順方向解析の結果から逆に制御入力を同定する逆問題解析[20]の一種と捉えることができる。近年の計算機性能の飛躍的な向上に伴い、本手法の計算コストが現実的なものとなり、多くの適用例が報告されるようになっている[13-19]。

## 3. 層流熱交換器の形状最適設計

### 3.1 単相流熱交換器

本研究に先行して、単相流コンパクト熱交換器のための斜め波状壁を用いた高性能伝熱面形状を提案した[1]。従来用いられてきた伝熱促進技術は、1)フィンによる前縁効果（温度境界層の発達への阻害）、2)渦促進体（流れ方向に軸を持つ渦運動の導入）、3)表面粗さ（剥離・再付着による伝熱促進）、4)伝熱面の変形／加工（2次流れの誘起）、を利用した方法に大別される。一般に、上記 1)~3) の場合、伝熱促進を得るのに要する圧力損失が極めて大きく、乱流域で用いられる場合のみ有効な手

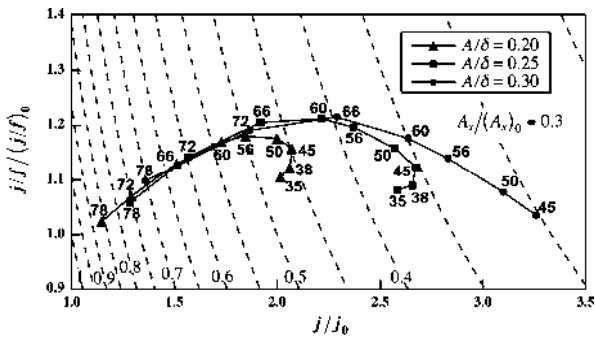


図1 斜め波状壁熱交換器のコンパクト性評価[1]

法である。一方、低レイノルズ数域においては上記 4)の手法が最も合理的と考えられる。

図1に斜め波状壁熱交換器における同一ポンプ動力条件下での必要総伝熱面積（正方形断面直管ダクトとの相対値）の等値線を示す。各データ点に付された数字は波状壁の傾き角を表している。斜め波状壁熱交換器では、傾き角の減少に伴い、2次流れの強度が増大するとともに、剥離域の拡大により圧力損失が上昇するため、 $j$  因子および  $j/f$  因子（伝熱特性の圧力損失に対する比）に最適値が存在することが判る。波状壁の傾き角・振幅を適切に選択することにより、正方形断面直管ダクトからなる対向流型熱交換器を50%以上小型化することが可能である[1]。さらに、平行平板系への適用に対する検討も行われ、実用的な新規コンパクト熱交換器の開発が進められている[5]。

支配方程式の随伴系を用いる形状最適化手法は、Pironneau[14]によって流動損失の最小化に用いられ、森本ら[2]によって伝熱・圧力損失の同時最適化に拡張された。森本らは、固体壁の壁厚を無限小と仮定した等温加熱条件における随伴方程式の定式化を行い、上記斜め波状壁熱交換器の形状最適化に適用した。その結果、 $j/f$  因子の4%の向上を実現した。

また、崎下ら[3]は、壁内熱伝導を伴う熱的境界条件を考慮し、連成伝熱問題における随伴解析に基づく形状最適設計手法を構築した。

図2に斜め波状壁を用いた基本流路形状、および本形状最適化の概念図を示す。流れ方向には周期境界条件を課し、壁面の熱的境界条件には、外面( $\Gamma_m$ )に等温加熱条件、内面( $\Gamma_M$ )に流体/固体間の温度連成条件を課した。作動流体は空気（プラントル数  $Pr = 0.71$ ）を仮定し、流量、流入混合平

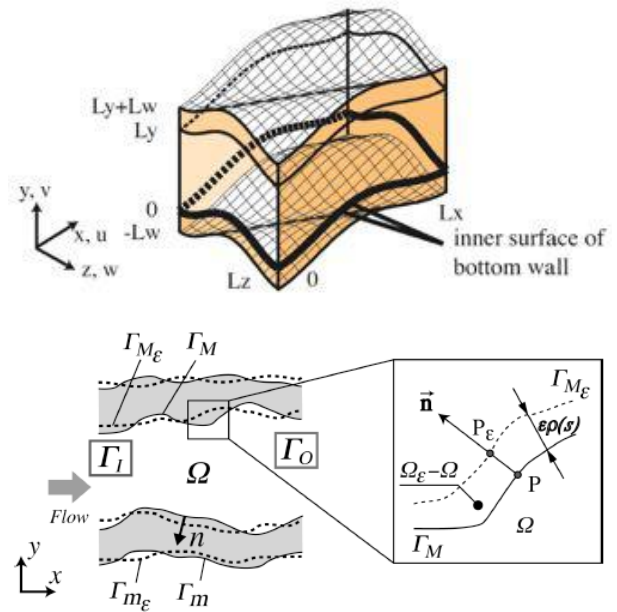


図2 斜め波状壁を用いた熱交換器流路形状と形状最適化の概念図[3]

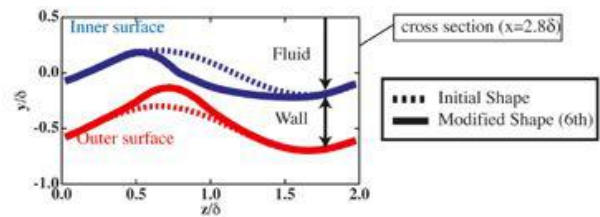


図3 固体壁内熱伝導を考慮した形状最適化[3]

均温度を一定とした。流れ方向バルク平均流速  $U_b$ 、平均ダクト半幅  $\delta$ 、および動粘性係数  $\nu$  で定義されるレイノルズ数を  $Re_\delta = 100$  で一定とした。なお、物性値一定の非圧縮流れを仮定し、浮力の影響、粘性散逸による発熱を無視している。

本最適化では、伝熱・圧力損失特性の向上を目的とし、評価関数  $J$  を圧力  $p$ 、流れ方向流速  $u$ 、温度  $\theta$  を用いて、次式で定義する。

$$J(\Gamma_M) = \int_{\Gamma_I + \Gamma_O} p d\Gamma / P_0 + \int_{\Gamma_I + \Gamma_O} u \theta d\Gamma / Q_0 \quad (1)$$

ここで、 $\Gamma_I, \Gamma_O$  は流路入口・出口部を表している。式(1)の右辺第一項は圧力損失、第二項は熱的連成面での伝熱量を表し、添字 0 は変形なしの直管ダクトにおける値を示す。式(1)で表される評価関数を最大化することが本最適化の目標であり、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、およびエネルギー方程式の随伴熱流動解析を用いた形状最適化

手法により、運動量・熱輸送の同時最適化を行った。

図3に、本最適化を斜め波状ダクトに適用した解析結果を示す。ここで、固体、流体の熱伝導率比を  $C = \lambda_s / \lambda_f = 100$ ，上下壁の鉛直方向厚みを  $L_W / \delta = 0.5$  とし、基本矩形ダクト形状からの上下内外面の初期変位は次式により与えた。

$$y = -A \cos\left\{2\pi/L_x \cdot (x + z \tan \gamma)\right\} \quad (2)$$

本解析において、初期形状の波状壁振幅および傾き角はそれぞれ  $A/\delta = 0.2$ ， $\gamma = 60^\circ$  とする。

本最適化を行った結果、圧力損失  $fRe$  は 24% 増大するものの、平均ヌセルト数が 34% 増加することにより、 $jff$  因子を初期値から 8% 向上できることを明らかにした。

図3に示されるように、本形状最適化においては、壁面における温度連成効果を反映し、波状壁の内面と外面で異なる形状変形が得られる。熱的連成条件の内面では谷領域が左右に広がり、山の上流側斜面が急峻な形状変化を示すのに対し、等温加熱条件の外面では山領域が全体的に高くなり、山領域の上流側斜面部分における下壁の厚みが薄くなるよう変形する。波状壁の谷領域は下流に向かって徐々に拡大し、全体的に滑らかになる一方、山領域では上流側斜面において急峻な形状が得られる。このことから、山領域の上流側斜面における熱流束が顕著に増大し、熱流束の小さな領域が減少することが判る。

### 3.2 気液2相流熱交換器

また著者らは、低沸点作動流体を用いた小型バイナリー発電システムへの応用を想定し、斜め波状壁を用いた強度な2次流れによる伝熱促進コンセプトの気液2相流熱交換器における有効性評価および形状最適化に向けた解析を進めている[5]。

従来、バイナリーサイクル用の蒸発器、凝縮器には、高い伝熱性能とメンテナンスの容易さからプレート式熱交換器が用いられることが多い。しかし、コルゲート型伝熱面[6]に代表される複雑な流路形状が用いられており、蒸発・凝縮を伴う2相流熱流動は形状に依存して極めて複雑な様相を呈し、プレート式熱交換器における形状最適化は困難な課題となっている。そこで、まず第一段階として、相変化を伴わない気液スラグ流における

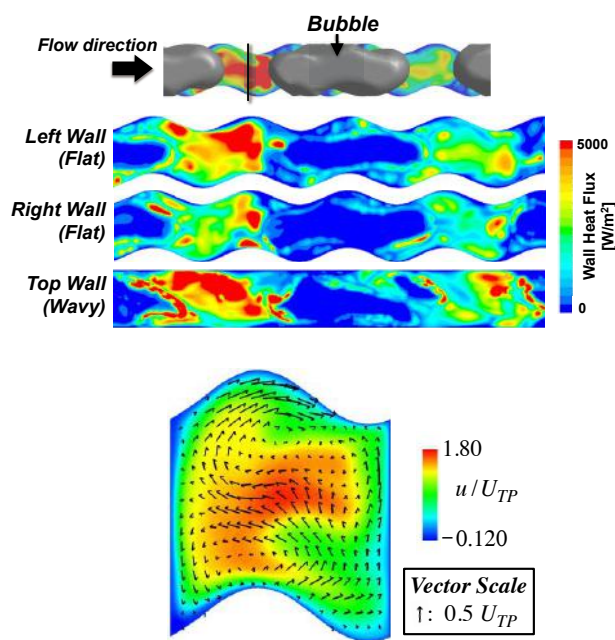


図4 斜め波状壁流路における気液2相流熱流動 ( $Re_{TP} = 400$ ) [5].

熱流動特性をCFD解析により評価した。

図4に、バイナリー発電を想定し、作動流体をR245faの飽和液/飽和蒸気とした解析結果の一例を示す。本解析では、許容計算時間内で液膜厚さを再現するのに必要な格子解像度を見積り、総格子点数を約400万点としている。上図には等温加熱条件における各壁面上の熱流束分布、下図には液スラグ中央部における流れ方向垂直断面内の速度ベクトルおよび流れ方向速度分布を示している。また、入口クオリティを0.05、液相の物性値および入口部での気/液見かけ流速の和で定義される2相レイノルズ数を  $Re_{TP} = 400$  としている。斜め波状壁により形成される液スラグ内の2次流れ分布に応じて、気泡挙動が変化し、気泡スラグ内の液膜厚さの空間分布が壁面ごとに異なることが明らかとなった。相変化を伴う伝熱過程において液膜厚さが極めて重要な役割を果たすことを踏まえ、さらなる高性能伝熱面の形状設計を行うべく検討を進めている。

### 4. 半導体パルスレーザーの高時間応答温度制御

近年、半導体レーザーなどの高速温度変動を有する電子デバイスの高性能化を実現する観点から、非定常な温度制御が求められるようになってきている。



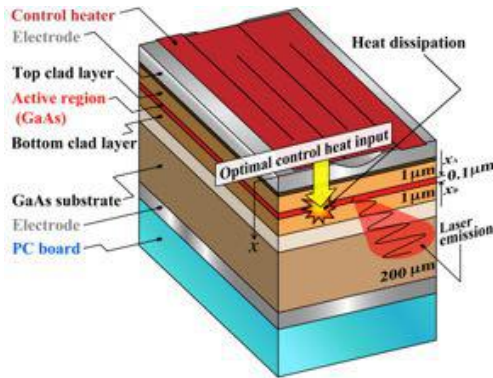


図5 半導体パルスレーザーの模式図[8]

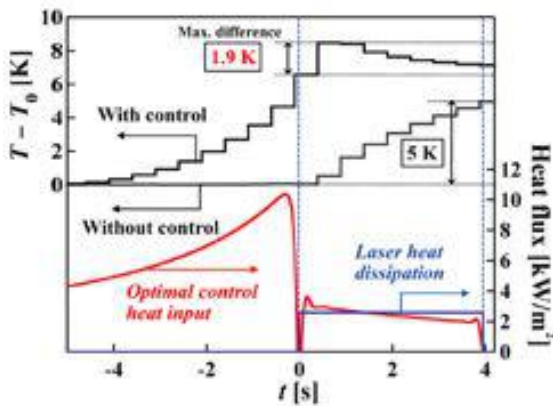


図6 活性層内の均一温度分布制御[8]

例えば、半導体パルスレーザーにおいては、レーザー波長のドリフトを低減するため、パルス発振に伴う熱散逸による急激な温度変動を抑制することが重要である。しかし、従来の冷却技術では、熱容量が大きいために時間応答性は不十分であり、例えば1 μsオーダーの半導体素子の熱時定数に対応することができず、高時間応答性を有した温度制御技術が必要である。そこで、固体壁熱伝導の随伴解析を用いることにより、半導体素子内部の最適温度制御手法を提案した[7-10]。

ここでは、GaAs/AlGaAs レーザーを想定し、素子上面に配置した制御用薄膜ヒーターによりレーザー照射部の温度制御を行う(図5) [7, 8]。実デバイスにおける活性層の厚さ(0.1 μm)、およびレーザーパルスの時間幅(1 μs)は、フォノンの時空間スケールに比べて十分大きいと考えられ、固体層内の熱伝導はフーリエ型の拡散型熱伝導に支配されるものと仮定した。レーザー素子の発熱量は、実際のレーザー出力および投入電力から算出し、

発熱はヒーターを模擬した活性層内中心部のみで生じるものと仮定した。

本解析において、評価関数は、活性層内の温度  $T$  と目標温度  $T_{\text{target}}$  の差の時空間的な二乗積分として定義される。制御熱入力  $q(t)$  は、上部境界 ( $x = 0 \mu\text{m}$ ) における正のみの熱流束とする。本制御では、レーザー発光時間内 ( $t = 0 \sim \tau$ ) におけるレーザー照射部である活性層 ( $x = x_A \sim x_B$ ) の温度変動が最小となるよう、すなわち評価関数を最小化するように熱入力  $q$  が時間関数として求められる。随伴温度変数を用いた制御入力の詳細な導出過程は既報[7, 8, 10]を参照されたい。

また、非定常温度変動を計測するため、レーザー各層のフーリエ数を実モデルと一致させ、計測可能な時間スケール(パルス時間幅: 4 s)まで拡大した3層モデルを試作し、解析/実験の両面から本手法の有効性を評価した[8]。図6に最適制御実験の結果を示す。本MEMSデバイスにおいて、制御用ヒーターはクラッド層上部に形成し、パルス発熱用ヒーターは活性層中心に配置した。上部クラッド層/活性層間に4個、活性層/下部基板間に1個の白金測温抵抗体を配置し、温度測定を行った。本最適制御実験では、目標温度を  $T_{\text{target}} = (T_0 + 20) \text{K}$  とした。図6上部に示すように、上部ヒーターからの制御入力を加えない場合、レーザー発光に伴う内部発熱により活性層内の温度は約5 K上昇する。図6下部には、本3層構造モデルに対して算出した最適制御入力の分布を示す。赤線および青線はそれぞれ制御熱入力、パルス熱入力を表している。大半の熱入力はレーザー発光前に与えられており、単位面積当たりの制御熱入力の最大値は活性層内発熱率の約5倍となっている。パルスレーザーの熱流束のみを入力した場合(非制御時)、パルス時間内 ( $t = 0 \sim 4 \text{s}$ ) に約5 Kの温度変動が生じるのに対し、制御用ヒーターからの制御入力を加えた場合(制御時)、パルス入力開始後の温度変化は大幅に緩和され、最大温度差が約1.9 Kまで抑制されていることがわかる(図6上部)。つまり、パルス入力開始後の最大温度差は、本制御実験において約60%低減されたことが判る。

なお、本制御では加熱のみの制御入力としているため、レーザーの発熱に加えてヒーター加熱による熱量が発生する。しかし、バルク基板内の熱

伝導の時間スケールはレーザーパルス幅に比べて十分大きいいため、通常用いられる冷却システムを用いて基板裏側から除熱することにより、レーザー素子の温度を目標値に保つことは容易である。

また、本手法を面内温度分布を有する多次元熱伝導を考慮した最適温度制御手法に拡張し、面発光型のレーザーモデル (VCSEL) に対しても本制御が有効に機能することを示している[9, 10].

### 5. 固液相変化問題における形状最適化

現在、樹脂成形技術や蓄熱材料を用いた冷却技術などの相変化を伴う伝熱制御問題への実応用を視野に入れ、随伴解析を用いた形状最適化手法の拡張を進めている。そのための第一段階として、相変化境界の移動を考慮した伝熱促進用フィンの形状最適設計問題を対象とし、凝固を伴う熱伝導問題における形状最適化手法の構築を行った[11, 12].

本解析では、相変化界面の取り扱いを容易にするため、解析手法としてエンタルピー法[21]を導入する。また、数値計算手法として、計算格子を必要としないメッシュレス解析手法の一種であるMLPG (Meshless Local Petrov-Galerkin) 法[22]を用いることで、境界形状の大変形への対応を可能としている。

図7に本研究における形状最適化の概念図を示す。上端、左端、および右端をノイマン境界  $\Gamma_N$ 、下端をディリクレ境界  $\Gamma_D$  と定義し、計算領域全体を  $\Omega$  とする。初期条件は、温度  $T_0$ 、エンタルピー  $H_0$  で一定とする。形状最適化の評価関数  $J$  を次式で定義し、下端のフィン形状を最適化する。

$$J = \int_{\Omega} (H - H_0)^2 \Big|_{t=t_{\max}} d\Omega \quad (3)$$

本評価関数は、終時間  $t_{\max}$  における凝固領域  $\Omega$  全体のエンタルピー変化量の二乗積分であり、エネルギー変化量、すなわち  $t_{\max}$  までの伝熱量を最大化することを意図している。

図8にフィン表面の温度を一定とした場合の形状最適化結果の一例を示す。図にはフィン形状および同一時刻における温度分布を示しており、点線および実線がそれぞれ初期形状、最適形状における分布に対応している。フィン高さが拡大する方向に形状変形し、固液相変化界面が上方に移動していることが判る。本形状最適化は、形状表現

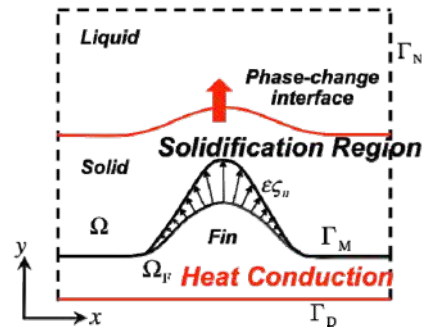


図7 フィン形状最適化の概念図[12]

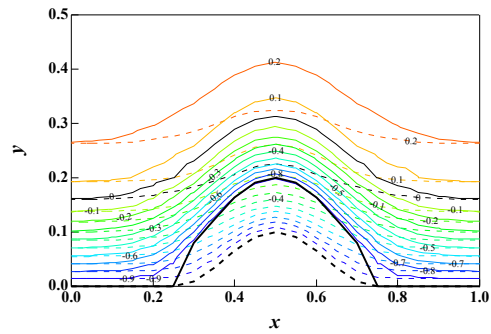


図8 凝固促進のためのフィン形状最適化[11]

の空間解像度に強く依存することが予想され、高解像度解析の必要性が認識される。現在、MLPG解析における任意密度分布を有する節点配置方法、および節点探索の高速アルゴリズム[23]の実装を行っており、形状最適化に及ぼす空間解像度依存性を系統的に評価することが可能になるものと考えている。また、実環境に即した熱的境界条件として、フィン内熱伝導と相変化流体の温度連成を考慮した形状最適化を行い、フィン効果が最適形状に及ぼす影響を調べることに着手している。

### 6. おわりに

本稿では、随伴解析を用いた最適設計・最適制御理論の適用例として、層流コンパクト熱交換器の形状最適設計、半導体パルスレーザーの非定常温度分布制御、および固液相変化熱伝導プロセスにおける形状最適化について紹介した。

随伴解析を用いた最適制御スキームは、詳細な熱流動現象と設計・制御変数を結び付ける強力かつ汎用性の高い手法と考えられる。今後、現実的な工学応用を前提とした様々な熱流体プロセスに対し、随伴解析に基づく理論的な設計・制御指針



を獲得し、新たな高性能熱流体機器の開発に役立てていきたい。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学故笠木伸英名誉教授に多くの貴重なご助言を賜った。また、元東京大学大学院生・崎下佳賢氏、および東京大学大学院生・金民城氏、木下英典氏には多大なご協力を頂いた。本研究の一部は、日本学術振興会科研費若手B (24760158)、およびNEDO地熱発電技術開発による支援を受けて行われた。記して謝意を表す。

### 参考文献

- [1] Morimoto, K., Suzuki, Y., Kasagi, N., High performance recuperator with oblique wavy walls, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 130(10), 101801 (2008).
- [2] Morimoto, K., Suzuki, Y., Kasagi, N., Optimal shape design of compact heat exchangers based on adjoint analysis of momentum and heat transfer, *J. Therm. Sci. Tech.*, 5(1), pp. 24-35 (2010).
- [3] 崎下ら, 第45回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 623-624 (2008).
- [4] 鹿園ら, 2011年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, pp. 397-398 (2011).
- [5] Noguchi, Y., Morimoto, K., Suzuki, Y., Proc. 1st Pacific Rim Therm. Eng. Conf., PRTEC-15159 (2016).
- [6] Stasiek, J., et al., Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages - I. Experimental results, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 39(1), pp. 149-164 (1996).
- [7] Ito, S., Suzuki, Y., Proc. ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011-44574 (2011).
- [8] Kim, M., Ito, S., Morimoto, K., Suzuki, Y., Proc. 25th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'12), pp. 1085-1088 (2012).
- [9] 森本・木下・鈴木, 第49回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 293-294 (2012).
- [10] Morimoto, K., Suzuki, Y., Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf., IHTC15-9636 (2014).
- [11] Morimoto, K., Suzuki, Y., Proc. 68th Annu. APS DFD Meeting, (2015).
- [12] Morimoto, K., Suzuki, Y., Proc. 1st Pacific Rim Therm. Eng. Conf., PRTEC-15161 (2016).
- [13] 笠木編, 乱流工学ハンドブック, Chap. 19-3, pp. 443-447, 朝倉書店 (2009).
- [14] Mohammadi, B., Pironneau, O., Shape optimization in fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36, pp. 255-279 (2004).
- [15] Pironneau, O., Optimum profiles in Stokes flow, *J. Fluid Mech.*, 59, 117-128 (1973).
- [16] Molho, J. I., et al., Optimization of turn geometries for microchip electrophoresis, *Anal. Chem.*, 73(6), pp. 1350-1360 (2001).
- [17] Lim, S., Choi, H., Optimal shape design of a two-dimensional asymmetric diffuser in turbulent flow, *AIAA J.*, 42(6), pp. 1154-1169 (2004).
- [18] Walther, B., Nadarajah, S., Constrained adjoint-based aerodynamic shape optimization of a single-stage transonic compressor, *Trans. ASME J. Turbomach.*, 135(2), 021017 (2012).
- [19] Papoutsis-Kiachagiara, E. M., et al., The continuous adjoint approach to the  $k-\epsilon$  turbulence model for shape optimization and optimal active control of turbulent flows, *Engineering Optimization*, 47(3), pp. 370-389 (2015).
- [20] Alifanov, O. M., Solution of an inverse problem of heat conduction by iteration methods, *J. Engng Phys.*, 26, pp. 471-476 (1974).
- [21] Voller, V. R., An overview of numerical methods for phase change problems, *Advances in Numerical Heat Transfer*, 1, pp. 341-375 (1996).
- [22] Atluri, S. N., Zhu, T., A new meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics, *Comput. Mech.*, 22, pp. 117-127 (1998).
- [23] Awile, O., et al., Fast neighbor lists for adaptive-resolution particle simulations, *Comput. Phys. Comm.*, 183(5), pp. 1073-1081 (2012).

## 第8回乱流・熱物質輸送国際会議 (THMT'15) 報告

*Report on the 8<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*

服部 博文 (名古屋工業大学)

*Hirofumi HATTORI (Nagoya Institute of Technology)*

*e-mail: hattori@nitech.ac.jp*

### 1. はじめに

乱流・熱物質輸送国際会議 (International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer : THMT) は、その名の通り、乱流と熱物質輸送現象をトピックスとした国際会議であり、熱物質輸送国際センター (ICHMT) の1国際会議としても位置付けられています。

THMT 組織委員会は、第1回からオランダデルフト工科大学教授の Kemo Hanjalić 先生と京都大学名誉教授の故鈴木健二郎先生が共同議長として運営され、第3回目からは鈴木先生に代わり、名古屋工業大学名誉教授の故長野靖尚先生が第7回まで共同議長を務められました。ここで報告させていただく第8回からは、東京工業大学名誉教授の宮内敏男先生が共同議長を務められ、共同議長の1名は日本の先生が引き継がれています。

THMT の歴史は、1980年のクロアチアのドゥブロヴニクで開催された The Joint ICHMT/IUTAM Symposium on Structure of Turbulence, Heat and Mass Transfer をその祖として、第1回が1994年にポルトガルのリスボンで開催され、第2回がオランダのデルフト (1997年)、第3回が名古屋 (2000年)、第4回がトルコのアンタルヤ (2003年)、第5回がクロアチアのドゥブロヴニク (2006年)、第6回がイタリアのローマ (2009年)、第7回のイタリアのパルレモ (2012年) 開催を経て、2015年に第8回がボスニア・ヘルツェゴビアのサラエボで開催されました。筆者も、THMT には、第3回の名古屋での開催から組織委員、科学諮問委員を務めるなどでなじみが深く、第8回の会議に参加しましたので、伝熱学会誌の紙面をお借りしまして参加報告をさせていただきます。

### 2. サラエボ

今回の会議の会場都市となったサラエボは、ボスニア・ヘルツェゴビアの首都であり、第一次世

界大戦のきっかけとなったサラエボ事件として有名な都市です (写真1上: サラエボ事件が起こったラテン橋)。また、ご存知の方もおられると思いますが、ボスニア・ヘルツェゴビアは1990年代に紛争があり、紛争が終結して20年余り経った今でも戦場となったサラエボではその爪痕が残っていましたが、現在では復興も進み、観光客も増えて平和な街になっていたという印象です。

今回の会議は、共同議長の Hanjalić 先生が、ご自身の所縁があるサラエボでの開催を希望され、実現に至ったわけですが、当初予定されていた旧

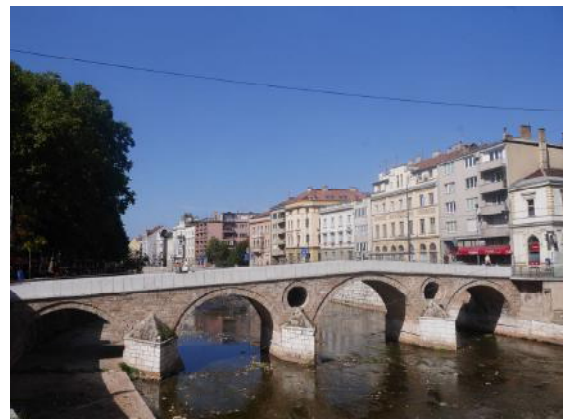


写真1 ラテン橋 (上) と旧市街地



写真2 シンポジウム会場

市街地（写真1下）にある会場のホテルが、会議開催前に倒産の憂き目にあい、会場の変更が急遽必要となりました。急な話で開催も危ぶまれましたが、Hanjalić先生と現地スタッフのご尽力によって、ラテン橋に程近い Officer's Hall（写真2）が会場となりました。こちらの会場の方が、参加者の滞在しているホテルに近く、利便性はよかったです。この施設は1881年建造で歴史的な会場であったためか、使い勝手はそれほど良くはなく、会場変更の苦労が感じられました。

### 3. 会議について

#### 3.1 概要

THMT'15は、会期が2015年9月15日（火）から18日（金）の4日間で行われ、会期に先立ち9月14日（月）の夕刻から参加登録と、Welcome Receptionが開催されました。最近では、国内会議でもそうですが、プロシーディングスが電子媒体の



写真3 プロシーディングス

みの配布となる会議が多くなりましたが、THMT'15では、今回も950ページからなる立派なB5サイズのプロシーディングスが配布されました（写真3）。プロシーディングスには、4ページの発表概要が掲載され（基調講演は12ページ）、これとは別にCDによるプロシーディングスも配布され、こちらには12ページの会議論文が掲載されています（基調講演は18ページ）。この冊子体によるプロシーディングスの配布には、賛否両論ありますが、この会議ならではのこだわりでしょう（配布された会議プログラム冊子には、これまで配布した冊子体プロシーディングスの写真が掲載されていました。これは、平成28年1月現在、<http://www.thmt-15.org/>にて閲覧可能です）。

研究発表の構成は、基調講演6件、特別講演1件、基礎研究（Fundamentals）12件、組織構造（Coherent Structures）7件、実験と実験方法（Experiments and Experimental Techniques）8件、DNSとLES研究（DNS and LES Studies）7件、乱流のモデリング（Turbulence Modelling）10件、RANSとLESの融合（Combined RANS and LES）8件、衝突、はく離、旋回と回転（Impingement, Separation, Swirl and Rotation）12件、乱流と浮力（Turbulence and Buoyancy）11件、圧縮性と高速流れ（Compressible and High Speed Flow）8件、混合（Mixing）5件、燃焼と反応流（Combustion and Reacting Flows）17件、粒子流れ（Particle-Laden Flows）18件、噴霧、気泡と液滴（Spray, Bubbles and Droplets）16件、環境と地球物理学流れ（Environmental and Geophysical Flows）9件、乱流抵抗と熱伝達の制御（Turbulence-Related Drag and Heat Transfer Control）13件、電気伝導流体とMHD（Electrically Conductive Fluids and MHD）6件、エネルギーと環境（Energy and Environmental）13件、産業問題（Industrial applications）17件の計204件です。会議の採択率は、270件の応募に対して、採択論文が204件ですので、約75%となっています。38件はポスターでの発表となっています。日本からの発表件数は、一般公演が20件で、これまで開催されたこの会議に比べて参加が少なかったように思えます。これは、会議当時のヨーロッパの政情不安から投稿が控えられたとも聞きましたが、定かではありません。



写真4 オープニングにおける追悼

### 3.2 オープニング

上述のように、会場変更の憂き目にあった本会議ですが、オープニングでも悲しいお知らせがありました。本伝熱学会誌でも既報のように、元共同議長で本会議組織委員の名古屋工業大学名誉教授の長野靖尚先生、本会議科学諮問委員で東京大学名誉教授の笠木伸英先生の2名の先生方に加え、同委員でイスラエル工科大学名誉教授の Gad Hetsroni 先生のご逝去の報告があり、参加者でご冥福をお祈りいたしました(写真4)。著名な日本人乱流伝熱研究者2名の訃報は、世界中の研究者にとっても衝撃的であったに違いありません。また、長野靖尚先生は、元共同議長だったこともあり、共同議長の宮内先生、Hanjalić 先生のお力添えをいただき、著者から追悼ポスターを会場入り口に会期中掲載させていただきました(写真5)。

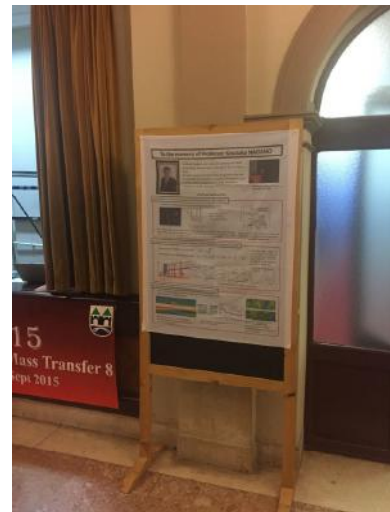


写真5 長野靖尚先生追悼ポスター

### 3.3 基調・特別講演

基調講演と特別講演は以下のように合計7件ありました。

#### 基調講演

- Using physics to predict the effect of climate change on hurricanes, *Brian E. Launder* (University of Manchester, UK) and *Kerry Emanuel* (Massachusetts Institute of Technology, USA)
- Modern optical techniques for diagnostics of cavitation in hydroturbine elements, *Dmitriy Markovich* (Institute of Thermophysics SB RAS/ Novosibirsk State Univ., Russia)
- Multi-domain blood flow simulation using multimodal image data, *Mari Oshima* (The University of Tokyo, Japan)
- Challenges in simulation of coal and biomass combustion in power plant, *Mohamed Pourkashanian* (University of Sheffield, UK)
- Micro Energy - Crossroad between thermal engineering and MEMS technology, *Yuji Suzuki* (The University of Tokyo, Japan)
- Physics of aircraft icing: A predictive challenge, *Cameron Tropea* (Darmstadt University of Technology, Germany)

#### 特別講演

A turbulence model for the fully-stirred reactor, *D. Brian Spalding* (Concentration, Heat & Momentum Limited, London, UK)





写真6 B. Spalding 教授による特別講演

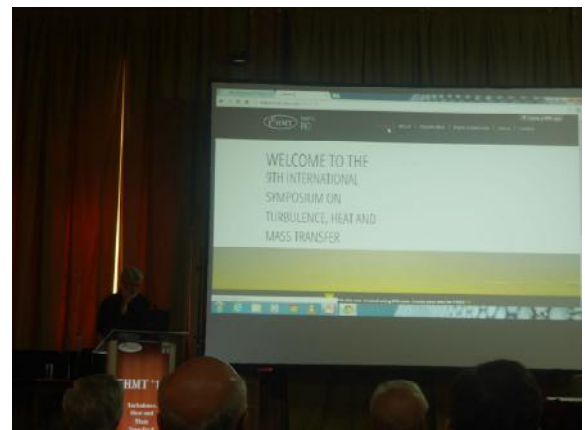


写真7 クロージングでの次回会議予告

基調講演の2件は、東京大学の大島まり先生と鈴木雄二先生がご講演され、今回は、日本の研究の寄与が大きいことを示しています。また、特別講演をされた Spalding 先生は、年齢 93 歳にしてご健在であり、足元は年齢を感じさせることがありませんでしたが、言葉もしっかりされ、今風でいえば乱流伝熱研究者のレジェントのご発表にはひたすら感動を覚えるとともに、生で拝聴出来たことを幸運に思いました (写真6)。

### 3.4 クロージング～次回開催案内

4 日間の日程では、200 件を超える発表を 3 室で行ったため、朝から夕方までびっしりとセッションが詰まっていますが、初日夜に旧市街地にある Town Hall, “Vijećnica”で開催されたレセプションでは、サラエボ市長からの祝辞があり、2 日目の夜には会場近くの Hotel Europe でバンケットが開催され、現地の料理と参加者らとの会話を

楽しみました。

クロージングでは、次回(第9回)の開催地として、ブラジルのリオで2018年に開催されることが発表されました(写真7)。リオのある南アメリカ大陸での開催は初めてであり、数年前からオファーがあったと聞いていますが、ようやく開催が実現となったので、会議の成功と日本からの参加者が多くなることを祈るばかりです。

### 4. おわりに

筆者自身も開催をお手伝いさせていただいた会議の参加報告を、紙面をお借りしてさせていただいたことには、お声をかけていただいた編集委員長の三重大学廣田先生には深く感謝を申し上げます。また、筆者の恩師である長野靖尚先生が共同議長として長く関わった会議でもありますので、参加報告が先生との思い出の一つとなればと思いつつ、ここに筆を置くことといたします。



## 英国インペリアルカレッジ滞在記

*Recollection of the days in Imperial College London*

岸本 将史 (京都大学)

Masashi KISHIMOTO (Kyoto University)

e-mail: kishimoto.masashi.3m@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

筆者は日本学術振興会 (JSPS) の「組織的な若手研究者等海外派遣事業」、および「海外特別研究員制度」を利用して、延べ2年と3か月の間、英国インペリアルカレッジ・ロンドンに滞在した。研究面だけでなく、様々な面で成長する機会に恵まれ、大変有意義な期間を20代の間に過ごすことができた。本稿では筆者が英国滞在中に学んだことや、気づかされたことなどを紹介したい。

### 2. 滞在先の紹介

筆者が滞在したのは、Department of Earth Science and Engineering の Nigel Brandon 教授のグループである[1]。インペリアルカレッジは1907年にロンドン大学のカレッジのひとつとして開校された、工学部、理学部、医学部の3学部からなる理系大学である。各種大学ランキング上位の常連校であり、世界を代表する研究・高等教育機関である。世界中から優秀な学生が集まっており、留学生比率は60%程度と極めて高いことも特色である。メインキャンパスはロンドン中心部の South Kensington エリアにあり、周囲を高級住宅街や博物館などの文教施設に囲まれ、さらに北側にはロンドン市民の憩いの場のひとつである Hyde Park が広がっている。

私が所属した Department of Earth Science and Engineering は、インペリアルカレッジの前身のひとつである Royal School of Mine の流れを汲み、地質学や鉱物学などを専門とするグループからなる。私の研究テーマは固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) に関するもので、少々異質な感じがするのだが、イオン伝導性セラミックスを使っているというところに関連があるのだろう。

受け入れていただいた Nigel Brandon 教授は、SOFC を始めとする電気化学、エネルギー工学の分野で著名な方であり、最近ではリチウムイオン電

池やレドックスフロー電池の研究にも意欲的に挑戦され、多くのポスドク・博士学生を率いられている。また、インペリアルカレッジの中でエネルギー関連の研究を行っている複数のグループによって発足した Energy Futures Lab[2] (最近日本でも重視されつつある領域横断型研究を推進するための機関) の初代 Director でもある。

SOFC の分野では、革新的な電子顕微鏡観察技術の開発により、電極に用いられる多孔質体の微構造解析に関する研究の大きな流れが2006年頃から始まっており、日、米、英、独などの研究機関が競って研究成果を発表していた。その中に京都大学とインペリアルカレッジもあった。このような背景もあって、私の滞在は両グループ間の技術交流という側面も兼ねたものであった。

所属したグループはインペリアルカレッジの中でも特に国際色豊かであり、所属メンバーの出身を挙げると、英国、ドイツ、オランダ、ルーマニア、ラトビア、ロシア (本人曰くソ連)、フィンランド、イスラエル、イラン、パキスタン、インド、スリランカ、中国、マレーシア、アメリカ、メキシコなどとなり、生粋のイギリス人はマイノリティであった。宗教的にも文化的にも異なる背景を持った人たちと共に時間を過ごすことで、毎日が気づきと学びの連続であった。

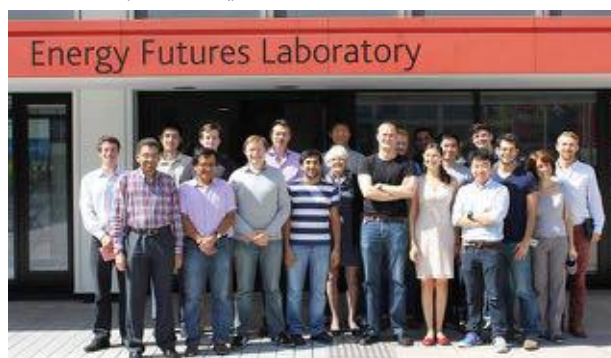


図1 グループ写真 (2013年夏)。後列中央が筆者、左隣が Nigel Brandon 教授

### 3. 英国滞在中に得たもの

#### 3.1 異なる研究環境の経験

初めて異国の研究環境に飛び込み、様々な場面で日本との違いに気づかされた。時には戸惑うこともあったが、見習うべき点もたくさんあった。まずは研究を遂行する際の体制である。所属した研究室には様々な分野を専門とするメンバーが集まっていたので、常にその中でのコラボレーションの可能性を模索していた。研究室内でプロジェクトを自主的に立ち上げ、それに何人かのポスドクや学生が参加し、役割分担をして遂行するという流れである。タスク管理をうまくやらないと同時にたくさんのプロジェクトを受け持つ羽目にもなるが、あるプロジェクトにおける知見が他のプロジェクトの進展につながることもあり、メリットもある。基本的にはひとつのプロジェクトに専念する日本での研究とは異なる進め方だった。一概にどちらかが優れていると言えるわけではないし、博士学生の場合は自分の研究に専念すべきだという考えもあるだろう。とはいえ、異なる研究スタイルを経験できたことは、今後の研究人生の中でいずれ生かせる時が来るのではないかと思っている。

もうひとつは日々の生活スタイルである。世界でもトップクラスの大学なのだから、皆必死で夜遅くまで研究しているのかと思っていたら、決してそうではなかった。だいたい18時くらいには家路についていた。日本で18時と言えば、とりあえず夕ご飯でも食べてもうひと頑張り、という感じであったが、あちらでは家に帰るか、スポーツジムに行くか、友人と一杯やるかという感じであった。筆者が遅くまで残っていると、“Don't work too late.”と声をかけられることも多かった。21時頃まで粘っていようものなら、ジムでの運動を終えて荷物を置きに来た同僚に見つかって、“Masashi, go home!”とたしなめられることもしばしばあった。もちろん研究が佳境の時などは居残っていた同僚もいたが、それは例外的なケースだった。皆、家族や友人と過ごすプライベートな時間をとても大切にしているように見えた。

遅くまで残って研究することは必ずしも素晴らしい成果に結びつくわけではなく、仕事とプライベートのバランスを取り、健全な生活を送ることこそがまずは必要なのではないかと感じた。

#### 3.2 異なる宗教・文化・考え方の受容

世界を席卷した大英帝国の名残で、ロンドンに住む人たちの人種は実に多様である。前述のように所属した研究室のメンバーも様々な文化的・宗教的背景を持っていた。日本にいとあまり宗教について話すことはないし、そもそも意識することすらあまり無いが、ロンドンでは宗教の違いによる文化の違いに気づかされる機会が多かった。

特に印象に残っているのがムスリムの人たちによる断食である。太陽が昇っている間は一切の飲食をしないのだが、筆者が英国に滞在していた際は6-7月に行われていた。緯度の高いイギリスでは、夏の日の出は4時台、夜は22時近くまで明るい。同僚のポスドクがムスリムで、日中はしっかりと絶飲食を守っていたが、さすがに暑い夏の日にはしんどそうであった。また、筆者は中東系の人々がよく集まる地区に住んでいたのだが、日が落ちると家族や友人で集まって、食事や水たばこを楽しんでいる人々の様子を垣間見ることができた。そしてラマダンが終わる日にはお祭りのような雰囲気になり、夜遅くまで大変な騒ぎようであった。

キリスト教においても断食の習慣があることも知った。イースター（復活祭）の1ヶ月半ほど前から始まるのだが、そのルールはイスラム教の場合よりは緩く、「肉を食べない」「お菓子を食べない」「好きなもの1種類を抜く」など、自分で努力目標を定めればよいというものであった。

断食などの宗教的文化については、テレビや書物などから得ていた知識もあったが、同じ場所、同じタイムスケールで見たり体験したりすることで、より深い理解が得られたように思う。



図2 ロンドンの夏はせいぜい8月まで。それが終わればクリスマスに向かって街はどんどん盛り上がっていく。クリスマスイルミネーションは必見。

### 3.3 新しい人脈

欧州に住むというメリットを生かして、日本からは参加しづらい比較的小規模の会議に出席したり、各国の大学を訪問したりすることで、新しい人脈を築くことができた。英国国内はもちろん、ドイツ、スイス、オランダなどで開かれた会議において、自分の研究をアピールする機会を多く持つことができた。また、これまで論文の著者としてしか知らなかった同業者に直接会って話をする機会が得られたことは有益であった。

そういった直接の出会いから、英国 University College London, ドイツ Karlsruhe Institute of Technology および Heidelberg University, そしてポーランド AGH University of Science and Technology に招かれ、講演をする機会にも恵まれた。英語で1時間の講演をするというのは大変なことだったが、やり終えた後は一皮むけたような気分であった。英語によるプレゼンテーション力が大きく鍛えられた機会であった。



図3 ポーランド AGH University of Science and Technology での講演 (2014年11月)

### 3.4 欧州の歴史・文化・地理の理解

欧州には実に様々な文化が詰まっており、飛行機に2時間も乗れば、街並みも交わされる言葉も大きく異なる文化圏に飛び込むことができる。陸上で国境を接することで、争いも絶えなかったという歴史的背景があり、その爪痕も所々で窺い知ることができた。日本からこういった場所を訪ね回することは容易ではないが、欧州に拠点を置けば比較的容易である。格安航空会社が多く飛んでいるので、国内旅行感覚で移動できるのはありがたかった。欧州に滞在できる期間が決まっているのなら、無理をしてでも飛び回ることをお勧めする。



図4 Dubrovnik (クロアチア) の街で食べた地中海の幸。英国の料理とは大きく異なっていた (どちらも美味しいかはお察しの通り)。

### 3.5 日本の歴史・文化の理解

海外経験をした日本人が共通して感じることもかもしれないが、海外の人は予想以上に日本の文化について興味を持っており、私たちが知らないような日本の知識も持っていたりする。日本に関する話題を振られたときに、答えに窮するということも度々あった。

70年代のアニメ作品に関することなどは、私の生まれる前だから知らんと言って笑い飛ばすこともできたが、原爆投下、日米関係、極東情勢などに関して問われると、適当な返事はできなかった。一般論ではなく、あくまでも私自身の意見を求められることが多く、普段あまり顧みることのない自国の歴史や文化について、改めて考えさせられることになった。

ちなみに大英博物館には日本に関する展示があり、日本や日本人が外国人からどのように見られているのかを端的に知ることができるので、機会があればご覧になることをお勧めする。



図5 日本で開催された国際会議に出席した際にはツアーガイドのようなことをしたのだが、質問攻めに遭って大変だった。(2013年10月)



### 3.6 コミュニケーション力

副次的なものにすぎないかもしれないが、英語によるコミュニケーション能力は各段に向上したように思う。特に成長を感じたのは、TPOによって表現を使い分けられるようになった点である。どんなに単語やフレーズを暗記したところで、どのような状況で使うのが適切かを知らないという意味がない。自分自身を様々なシチュエーションに置くことで、自然な表現と不自然な表現を峻別することができた。もちろん実験を伴うので、失敗をした経験を数えると両手では足りない。

渡英したての頃は、周囲の人たちの「聞く姿勢」にとっても助けられた。たとえ拙い英語であっても、真正面から向き合って聞いてくれたので、頑張っただけで伝えようという気にさせてくれた。ロンドンに住む人の多くは非ネイティブであるため、必ず同じように英語に苦労をした経験を持っている。そのためか言葉に関しては寛容であった。それまでの私を含め、日本人の多くは外国語を話す際に間違えることを極端に恐れる傾向があると思うのだが、実際は少しくらい間違えてもだいたいのことは伝わるし、相手も理解しようとしてくれる。精一杯伝えようとする姿勢を見せることが、コミュニケーションにおいては何よりも大切なのだと知った。

同時に、日本における英語教育が、いかに現実と乖離しているかを痛切に感じた。例は枚挙にいとまがないが、あえてひとつ卑近な例を挙げれば、時刻に関する表現がある。Ten to five (5時10分前) や Ten past five (5時10分過ぎ) といった表現は、日常的にはあたりまえのように使用するにも関わらず、学校で教えられた記憶はない。文法や読解力という点では日本人は優れているが、偏りが甚だしい。英語力を磨きたいなら、日本には限界があるだろう。

## 4. 英国滞在中に失ったもの

### 4.1 家族や友人と過ごす時間

ある程度仕方ないことだが、日本にいる家族や友人と過ごせる時間は限られてしまう。毎年恒例としていたようなイベントに参加できなかつたりすると、やはり寂しい気持ちになる。筆者はそれまで年末年始は必ず家族と過ごしていたのだが、渡英1年目で初めて異国の地で年越しを迎えた。同僚たちが皆帰省する中、寂しい年越しだったこ

とを覚えている。ただ、海外に行くこと決めたのは自身なのだから、海外でしかできないことに打ち込むという割り切りが必要なかもしれない。

### 4.2 健康

異国の地で暮らすというのは想像以上にストレスが溜まるようで、体調を崩しやすかった。健康はすべての基本であるため、海外に住もうという人は、現地の医療事情をしっかりと調べておくことを勧めたい。以下、イギリスの場合を紹介する。

イギリスの医療制度 (National Health Service: NHS) は、日本のものとは大きく異なり、基本的に無料で利用できる。登録した General Practitioner (GP, 町医者のようなもの) に行けば、診察と薬の処方をしてくれる。ただ近年は、予算と人員の不足が問題となっており、GP も少ない予算と人員でサービスを提供するために奮闘しているようだが、診察の予約に1週間以上待たされることはざらであった。風邪程度では門前払いされるという話もある。歯科治療も NHS の枠内では無料だが、新しく患者を受け入れてくれる歯科医院を探すのは大変で、急ぐ場合はプライベートで診察を受けることになる。もちろんその場合は有料で、結構な額になる。私はロンドンに行っても間もない頃に歯髄炎を患ってしまい、現地の日本人歯科医の下に駆け込んだのだが、治療に一か月分の家賃が飛んで行ったという苦い経験がある。

筆者は緊急に備えて海外旅行保険に加入しておいたのだが、それでも慢性疾患や歯科治療はサポートされないなど、不便と不安をぬぐい去ることはできなかった。日本の医療制度は、ユーザー一側から見た場合は極めて便利なものだと感じた。



図6 アトピー性皮膚炎の治療は海外旅行保険ではカバーされないとのことで、仕方なく10日ほど待ってGPで診てもらった。信じられない量の薬を処方されたが、薬は意外と安かった。

## 5. 英国滞在中に大切だと感じたこと

### 5.1 先人達への感謝の気持ち

異国で生活するにあたり、自分が日本人であるということに助けられる機会が何度もあった。日本人であるというだけで「勤勉であり信用できる」といった印象を持たれ、最初から対等な土俵で話をさせてもらえた。そもそも英国で働くためのビザを申請する際も、日本人は他国の人と比べるとはるかに通りやすい。滞在中に延べ1年間ほど住んだ部屋については、大家さんの意向で日本人限定であった。日本人は部屋をきれいに使うということで評判で、似たようなケースはしばしば見ることができた。

こういった日本人に対する良い評価は、これまで英国で必死に努力されてきた先輩方の地道な努力による積み重ねの結果だと思うと、感謝に堪えない。大袈裟な言い方に聞こえるかもしれないが、海外で働く日本人は、日本という看板を背負っていることを忘れず、この良い評価を次に続く後輩たちに引き継いでいかねばならないと強く感じた。

1900年に英国に留学した夏目漱石は、ロンドンの物価の高さ、アジア人に対する差別などから、「倫敦に住み暮らしたる二年は尤も不愉快の二年なり。余は英国紳士の間にあつて狼群に伍する一匹のむく犬の如く、あはれなる生活を営みたり。」[3]と回想している。それと比べれば、私のはるかに恵まれていた。

### 5.2 危機管理の意識

ロンドンでは欧州の中でも比較的治安の良い都市であるとはいえ、それでも出歩くのは勧められない地区も存在するし、スリや置き引きといった単純犯罪も多い。財布をズボンの後ろポケットに入れて歩いたり、カバンで席取りをしたりしても大丈夫な日本は、世界でも極めて異質なところであるということを実感させられた。身寄りのない異国の地で犯罪などに巻き込またら大変なので、程度の差はあれ常に緊張感を持つ必要があり、精神的にはしんどいものであった。

### 5.3 Yes という勇気と、No という判断力

いろいろな人がいれば、様々なイベントへの誘いも来る。新天地において新しいことを経験しようと思うなら、できるだけ参加した方がよい。そ

うすることで交友関係も広がり、入ってくる情報も増える。異国で生活をする際にこの2つは極めて重要である。また、普段の同僚との会話は「研究」という共通項の下でのものであるため、パターンがある程度限られてしまうが、全く異なるシチュエーションでの会話を経験すると、新しい単語やフレーズを覚えることができるメリットもある。研究においても同様で、自分の分野を勝手に限定せず、他分野のプロジェクトにも積極的に参加することで、新しい視点を持つことができる。

私の場合は、全くの素人だったリチウムイオン電池に関するプロジェクトに参加することで、研究の幅を大きく広げることができたし、初めて挑戦したウォールクライミングは、滞在中の重要なリフレッシュの時間になった。

たとえ小さなことであっても、新しいことに初めて挑戦する際には躊躇いもあるだろうが、思い切って飛び込む勇気、卑近な言葉に言い換えれば「ノリの良さ」を持つことが大切だと感じた。

しかし、しばらくすると全ての誘いに対してYesと言うことは無理だと気づくだろう。毎日スポーツや飲みに興じているのは体力が持たないし、同時に捌けるプロジェクトも限られる。そこで参加するイベントやプロジェクトについて取捨選択が必要になり、時には参加できないと伝えることにもなる。それによって今まで頑張って築いた関係にヒビが入るのではないかと不安になることもあるだろう。ただ、自分の体はひとつしかない。自分のパフォーマンスを維持するためにも、場合によってはNoと伝える冷静な判断も必要だった。決して遊び人や、都合の良い便利屋になってはいけない。



図7 大学のスポーツジムでウォールクライミング。日本ではあまり機会が無いのが残念。



#### 5.4 日本語を話せる友人・環境

語学留学の場合は、日常生活から日本語を一切絶ち、英語漬けにすることが勧められたりもするが、それは語学の習得が主目的である場合であろう。海外ポスドクの場合は、研究をして成果を出すことが主目的である以上、研究に集中できる体力や精神力を維持することこそが重要である。そのためには、やはり母語である日本語による会話を楽しむ時間を持つことは必要だと思う。私の場合は、日本人によるウォールクライミングの同好会と、その後の夕食会にほぼ毎週参加し、リフレッシュの時間としていた。

住む場所についても、筆者は2年の間に3度引越ししたものの、すべて日本人とのシェアだった。やはり全く文化の違う人達と住むと、どうしても摩擦が生じるものである。研究を第一に据え、家での生活をできるだけストレスフリーにするためには、日本人と住むことは決して悪い選択肢ではないだろう。

また、たった2年間の滞在とはいえ、日本語をあまり使わない生活をしていると、予想以上に日本語力は低下する。特に単語を出してくる瞬発力の低下が明らかだった。日本語での交流は、日本語力維持のためにも必要だろう。



図8 ロンドンでお世話になった方々。パブでビールを飲みながら日本語で世間話ができるというのは大変ありがたかった。年齢や職業に関係なく様々な人に知り合える機会が多いというのもロンドンの良い所だろう。

#### 6. 最後に

筆者にとっての英国滞在は、これまでの人生の中でも飛びぬけて刺激的で充実した時間であった。単純に研究の幅が広がったとか、成果が出たということだけにとどまらず、人間として大きく成長する機会を得ることができた。今から約150年前の幕末期には、長州や薩摩の若者たちが英国に留学し、世界を学び、そして維新後の日本で重要な役割を果たした。彼らと私自身を重ね合わせるのはおこがましい限りであるが、それでも思うところは同じである。まずは英国における経験から学んだことを本稿に記すことで、これから海外に飛び立とうとする後輩たちの背中を少しでも押すことができれば幸いである。

最後に、博士3年の冬に進路について迷っていた私に、英国滞在を強く進めていただいた京都大学の吉田英生教授と岩井裕准教授に、心から謝意を表したい。また、滞在中いつも体を気遣ってくれた両親、寂しい思いをしながらも日本で待っていてくれた妻に感謝したい。



図9 グループのメンバーから送別にもらったメッセージカードと、インペリアルカレッジのロゴ付きネクタイとカフスボタン。大切な仲間達と過ごした時間は何物にも代えがたい。

#### 参考文献

- [1] <http://www.imperial.ac.uk/electrochem-sci-eng/>
- [2] <https://www.imperial.ac.uk/energy-futures-lab/>
- [3] 夏目漱石「文学論」序

## 行事カレンダー

## 本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2016年					
5月 24(火) ～ 26(木)	第53回日本伝熱シンポジウム (開催場所: グランキューブ大阪 (大阪府立国際会議場))	2016.1.15	2016.3.11	実行委員会委員長 吉田篤正 大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学分野内 Email: symp2016@htsj-conf.org Fax: 072-254-9231	
11月 2(水) ～ 4(金)	The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT2016) (開催場所: Sendai International Center)	2016.4.29	2016.7.29	Organizing Committee Chair Taku Ohara URL: http://ifht2016.org/index.html	

## 本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2016年					
2月 7(金)	自動車技術会 No.15-15 シンポジウム 省エネを支える伝熱技術-熱マネジメント- (開催場所: 発明会館ホール)			自動車技術会 育成・イベントグループ 中野/福田/藤本 Tel: 03-3262-8214 Fax: 03-3261-2204	
3月 7(月) ～ 8(火)	The 27th International Forum on Advanced Technologies (IFAT2016) (開催場所: Tokushima University (Japan))			実行委員長 河村保彦 (徳島大) (連絡先 出口祥啓 (徳島大)) Tel: 088-656-7375 E-mail: ydeguchi@tokushima-u.ac.jp	
3月 8(火)	第2回理論応用力学シンポジウム (開催場所: 日本学術会議講堂)			問合せ先 宮内敏雄 (明治大) Tel: 045-401-1090 E-mail: tmiyauchi@mes.titech.ac.jp	
3月 22(火)	第63回応用物理学会春季学術講演会特別シンポジウム 「フォノンエンジニアリングの広がり」 (開催場所: 東工大岡山キャンパス)			応用物理学会講演会担当 E-mail: meeting@jsap.or.jp	
4月 13(水) ～ 15(金)	第50回空気調和・冷凍連合講演会 (開催場所: 東京海洋大学海洋工学部85周年記念会館)	2016.1.8	2016.2.26	日本機械学会/第50回空気調和・冷凍連合講演会係 (担当職員 伊達) Tel: 03-5360-3506 E-mail: date@jsme.or.jp	
4月 20(水) ～ 22(金)	TECHNO-FRONTIER 2016 (開催場所: 幕張メッセ (国際展示場))			TECHNO-FRONTIER 事務局 一般社団法人日本能率協会産業振興センター Tel: 03-3434-0587 E-mail: tf@convention.jma.or.jp	
5月 17(火) ～ 18(水)	日本機械学会関西支部第343回講習会「破壊力学の基礎と応用」 (開催場所: (株) 島津製作所三条工場研修センター)	2016.5.10		日本機械学会関西支部 Tel: 06-6443-2073 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
5月 31(火) ～6月 2(木)	第21回計算工学講演会 (開催場所: 朱鷺メッセ (新潟コンベンションセンター))	2016.1.20	2016.3.25	日本計算工学会事務局 石塚弥生、渡邊浩志 Tel: 03-3868-8957 E-mail: office@jsces.org	
6月 16(木) ～ 17(金)	No.16-10 第21回動力・エネルギー技術シンポジウム (開催場所: 横浜市開港記念会館)	2016.1.29	2016.4.29	日本機械学会 (担当職員 櫻井恭子) Tel: 03-5360-3505 E-mail: sakurai@jsme.or.jp	
7月 19(日) ～ 20(水)	第44回可視化情報シンポジウム (開催場所: 工学院大学新宿キャンパス)	2016.3.11	2016.5.13	実行委員会幹事 内田竜明 (東芝) Tel: 045-510-5925 E-mail: tatsu.uchida@toshiba.co.jp	
8月 7(日) ～ 10(水)	第20回国際乾燥シンポジウム (IDS2016) (開催場所: 岐阜市長良川国際会議場)	2015.11.30	2016.3.10	実行委員長 板谷義紀 Tel: 058-293-2532 E-mail: yitaya@gifu-u.ac.jp	
8月 8(月) ～ 10(水)	日本混相流学会混相流シンポジウム2016 (開催場所: 同志社大学今出川キャンパス)	2016.3.18	2016.6.10	混相流シンポジウム2016 実行委員会事務局 土屋活美 Tel: 0774-65-6625 E-mail: konsosymp@jsmf.gr.jp	
9月 1(木) ～ 3(土)	日本実験力学学会2016年度年次講演会 (開催場所: 近畿大学東大阪キャンパス)	2016.5.6	2016.6.30	問合せ先 澤井徹、山本衛 (近畿大学) Tel: 0736-77-3888 E-mail: sawai@mech.kindai.ac.jp, ei@waka.kindai.ac.jp	
9月 20(火) ～ 23(金)	The 27th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-27) (開催場所: Hawaii Convention Center(Honolulu, USA))	2016.4.1	2016.7.1	代表者 富村寿夫 (熊本大) Tel: 096-342-3752 E-mail: tomi@mech.kumamoto-u.ac.jp	
9月 26(月) ～ 28(水)	日本流体力学会年会2016 (開催場所: 名古屋工業大学)	2016.6.14	2016.7.25	日本流体力学会年会2016 実行委員会 E-mail: nenkai16@lab-ml.web.nitech.ac.jp	

行事カレンダー

10月	2(日) ～ 6(木)	11th Asian Thermophysical Properties Conference(ATPC2016) (開催場所:パシフィコ横浜アネックスホール)	2016.3.2		問合せ先 田口良広 (慶応大学) Tel: 045-566-1809 E-mail: tag@sd.keio.ac.jp	
10月	8(土) ～ 9(日)	可視化情報全国講演会 (日立 2016) (開催場所:茨城大学日立キャンパス)	2016.6.3	2016.7.29	実行委員長 稲垣照美 (茨城大学) Tel: 0294-38-5044 E-mail: terumi.inagaki.mech@vc.ibaraki.ac.jp	
10月	29(土) ～ 11月 2(水)	The 5th International Conference on Human-Environment System(ICHE2016 Nagoya) (開催場所:名古屋大学)			ICHE2016 Nagoya 事務局 E-mail: iches2016office@davinci.nuac.nagoya-u.ac.jp	
11月	1(火) ～ 4(金)	The 11th International Symposium on Advance Science and Technology in Experimental Mechanics (11th ISEM'16-Ho Chi Minh, Vietnam) (開催場所: Saigon Vissai Hotel)			日本実験力学会事務局 小林 Tel: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
12月	8(木) ～ 9(金)	第6回潜熱工学シンポジウム (開催場所:京都工芸繊維大学センターホール)	2016.9.16	2016.10.21	問合せ先 日出間るり (神戸大学) Tel: 078-803-6657 E-mail: hidema@port.kobe-u.ac.jp	
2017年						
3月	19(日) ～ 22(水)	The 6th International Symposium on Micro and Nano Technology in Experimental Mechanics(ISMNT-6) (開催場所: Fukuoka (Japan))			実行委員長 高橋厚史 (九大) Tel: 092-802-3015 E-mail: takahashi@aero.kyushu-u.ac.jp	

## 第 53 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 53 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 吉田篤正

幹事 木下進一

開催日：平成 28 年 5 月 24 日（火）～5 月 26 日（木）

会場：グランキューブ大阪（大阪府立国際会議場，<http://www.gco.co.jp>）

所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島 5 丁目 3 番 51 号 電話 06-4803-5555

アクセス 京阪電鉄中之島線・中之島（大阪国際会議場）駅すぐ

JR 大阪環状線・福島駅より徒歩約 15 分，JR 東西線・新福島駅より徒歩約 10 分

阪神電鉄本線・福島駅より徒歩 15 分

大阪市中央公会堂 3 階中集会室（中之島公会堂，<http://osaka-chuokokaido.jp>）（重要文化財）

所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島 1 丁目 1 番 27 号

アクセス 地下鉄御堂筋線／京阪電鉄・淀屋橋駅より徒歩約 5 分

京阪電鉄中之島線・なにわ橋駅より徒歩約 1 分

特別講演：平成 28 年 5 月 25 日（水）15:10～16:00（グランキューブ大阪（大阪府立国際会議場）A 室）

講演者：大阪歴史博物館 企画広報課課長 大澤 研一 氏

題目：「なにわ・大阪の歴史」

総会：平成 28 年 5 月 25 日（水）16:10～17:40（グランキューブ大阪（大阪府立国際会議場）A 室）

事前参加申込締切：平成 28 年 4 月 8 日（金）

ホームページ URL：<http://htsj-conf.org/symp2016/>

### 【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
  - a) 一般セッション（口頭発表）
  - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分，個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 53 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

### 【参加費等】

- シンポジウム参加費

会員一般	事前申込：12,000 円，会場申込：15,000 円
非会員一般	事前申込：15,000 円，会場申込：18,000 円
会員学生	事前申込：5,000 円，会場申込：7,000 円
非会員学生	事前申込：7,000 円，会場申込：8,000 円

※特別賛助会員は 1 口につき 3 名，賛助会員は 1 口につき 1 名，参加費が無料になります。
- 講演論文集 CD-ROM  
日本伝熱学会会員：無料（講演論文はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日，講演論文集 CD-ROM を配布します。参加されない会員のうち希望者には講演論文集 CD-ROM を事後にお送りします。）  
非会員：9,600 円（会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は無料となります。）

お知らせ

【懇親会】

- 開催日： 平成 28 年 5 月 25 日（水）18 時 30 分～20 時 30 分
- 会 場： 大阪市中央公会堂（中之島公会堂）
- 参加費： 一般（事前申込：8,000 円，会場申込：10,000 円，同伴配偶者無料）  
学生（事前申込：4,000 円，会場申込：5,000 円）

【参加費等の支払い方法】

- シンポジウムのホームページから事前参加登録を行った後に、本紙とは別途郵送した「払込取扱票」を用い、以下の記入例を参考にしてお支払いください。なお、郵便局にある一般の「払込取扱票」、またはネットバンキングでもお支払い頂けます。その際は、記入例に準じた内容（**参加登録 ID**、参加者氏名、支払い内容、金額、代表者名、連絡先など）を記入して下さい。
- 参加費等の払込をもって「事前申込完了」とします。ホームページからの登録だけでは「完了」ではありません。払込が平成 28 年 4 月 8 日より後となった場合は会場当日申込扱いとし、会場受付にて差額をお支払いいただきます。
- 4 月 8 日以降も 5 月 10 日までは、当日申し込み扱いでウェブからの参加登録および払い込みを受け付けます。当日に受付でお渡しすべきものを予め準備しておく等の作業を行いますので、できるかぎりウェブからの登録および事前の払い込みを行って下さいますようご協力をお願いいたします。なお、例年のように、シンポジウム当日の参加申し込みもできます。
- 銀行より振込まれる場合は、下記のゆうちょ銀行口座にお振込みください。その際、**氏名の前に参加登録 ID 番号を付けてください。**

店名（店番）：〇九九（ゼロキュウキュウ）店（099）  
 預金種目：当座  
 口座番号：0308882  
 口座名称（漢字）：第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
 口座名称（カナ）：ダイゴジュウサンカイニホンデンネツシンポジウムジッコウイインカイ

— 記入例 —

登録IDは参加申込時に発行される「4桁の数字（予定）」です。

お支払いいただく項目を○で囲んでください。

払込手数料はご負担ください

「通信欄」の合計金額をこちらにご記入ください

払込取扱票		振替払込請求書兼受領証	
口座記号・番号はお間違えのないよう記入してください。 口座記号 00 口座番号(右詰で記入) 09908 308882 金額 34000		口座記号番号 009908 308882 加入者名 第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会 金額 34000	
加入者名 第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会 内容(該当に○) シンポ 懇親会 金額 20,000 円 1. 2015 伝熱 太郎 2. 2138 難波 花子 3. 2457 大坂 大介 事前払込締切 2016年4月8日(金) 合計金額 34,000 円 〒123-4567 大阪市〇〇区〇〇1-2-3 伝熱大学 工学部 伝熱学科 伝熱 太郎 (ご連絡先電話番号 012-345-6789)		おなまえ 伝熱 太郎 (伝熱大学) 代表者のお名前をご記入ください。	
裏面の注意事項をお読みください。(ゆうちょ銀行) これより下部には何も記入しないでください。		この受領証は、大切に保管してください。	

1枚の用紙で複数の参加者の登録が可能です。本登録の代表者の方のご所属の連絡先・お名前・電話番号を「ご依頼人」の欄にご記入ください。



【講演論文集（電子版）】

講演論文集として電子版（CD-ROM 版）のみを発行し、印刷版は発行しません。

- 講演論文集（電子版）は、日本伝熱学会会員（平成 28 年度会員）の皆様に対し、シンポジウムのホームページにリンクされたウェブサイトを通じて公開します。公開日は平成 28 年 5 月 16 日（月）を予定しています。
- 電子版は、シンポジウムのホームページより「講演論文集」のページに入り、以下の閲覧 ID とパスワードを用いてログインの後、閲覧・ダウンロードすることができます。なお、このサイト上での講演論文公開は、従来から行ってきました日本伝熱学会会員への郵送による講演論文集 CD-ROM 事前配布に代わるものです。
- 講演論文集（電子版）閲覧 ID : nhts53osaka, パスワード : 2016osaka
- シンポジウムで座長ご担当の皆様におかれましては、この電子版を当日のセッションの参考資料として下さい。

【講演論文の公開日】

- 講演論文集（電子版）の公開日は、平成 28 年 5 月 16 日（月）を予定しています。特許に関わる公知日もこの日になります。シンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意下さい。

【交通】

- 交通につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照下さい。

【ご注意】

- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、プロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- 参加費、懇親会費等は参加取消の場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- その他、ご不明の点がありましたら、実行委員会事務局まで e-mail または FAX でお問い合わせください。

【お問い合わせ先】

第 53 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局  
大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学分野内  
Email: symp2016@htsj-conf.org FAX: 072-254-9231

第53回日本伝熱シンポジウム[大阪]

タイムテーブル[第1日: 5月24日(火)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室	J室	K室
	B11 OS 水素・燃料電池・二次電池1 9:00-10:20	C11 電子機器の冷却1 9:20-10:20	D11 マイクロ伝熱1 9:00-10:20		F11 関西企業からの製品開発・技術開発の紹介1 9:20-10:20	G11 多孔質体の伝熱1 9:00-10:20	H11 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進1 9:20-10:20	I11 OS 燃焼研究の最前線1 9:00-10:20	J11 沸騰1 9:00-10:20	K11 計測技術1 9:00-10:20
	B12 OS 水素・燃料電池・二次電池2 10:30-11:50	C12 電子機器の冷却2 10:30-12:10	D12 マイクロ伝熱2 10:30-12:10	E12 物質移動 10:30-11:50	F12 関西企業からの製品開発・技術開発の紹介2 10:30-11:50	G12 多孔質体の伝熱2 10:30-11:30	H12 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進2 10:30-11:50	I12 OS 燃焼研究の最前線2 10:30-12:10	J12 沸騰2 10:30-11:50	K12 計測技術2 10:30-11:50
	B13 OS 水素・燃料電池・二次電池3 13:10-14:50	C13 ヒートパイプ 13:10-14:30	D13 マイクロ伝熱3 13:10-14:30	E13 OS 非線形熱流体現象と伝熱1 13:10-14:50		G13 多孔質体の伝熱3 13:10-14:30	H13 OS 外部空間の環境設計のための熱環境解析 13:10-14:50	I13 日本伝熱学会特定推進研究 特別セッション 13:00-17:20		K13 計測技術3 13:10-14:30
15:00-17:00 優秀プレゼンテーション賞 ポスターセッション (A室)										

第53回日本伝熱シンポジウム[大阪]

タイムテーブル[第2日: 5月25日(水)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室	J室	K室
A21 強制対流1 9:00-10:20	B21 OS 水素・燃料電池・二次電池4 9:00-10:20	C21 電子機器の冷却3 9:00-10:20	D21 マイクロ伝熱4 9:00-10:20	E21 ふく射 9:00-10:20		G21 OS 伝熱工学が作る医工学と医療機器の新展開1 9:00-10:20	H21 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進3 9:00-10:20	I21 OS 燃焼研究の最前線3 9:00-10:20	J21 沸騰3 9:00-10:20	K21 OS ナスケール伝熱機能発現とその応用への展望1 9:00-10:20
A22 強制対流2 10:30-12:10	B22 OS 水素・燃料電池・二次電池5 10:30-12:10	C22 電子機器の冷却4 10:30-11:50	D22 分子動力学1 10:30-12:10	E22 OS 非線形熱流体現象と伝熱2 10:30-12:10	F22 大阪近郊の地元企業による技術紹介1 10:30-12:10	G22 OS 伝熱工学が作る医工学と医療機器の新展開2 10:30-12:10	H22 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進4 10:30-11:50	I22 OS 燃焼研究の最前線4 10:30-12:10	J22 沸騰4 10:30-12:10	K22 OS ナスケール伝熱機能発現とその応用への展望2 10:30-12:10
A23 強制対流3 13:10-14:10	B23 OS 水素・燃料電池・二次電池6 13:10-14:50	C23 電子機器の冷却5 13:10-14:30	D23 分子動力学2 13:10-14:50	E23 OS 非線形熱流体現象と伝熱3 13:10-14:50	F23 大阪近郊の地元企業による技術紹介2 13:10-14:50	G23 融解・凝固1 13:10-14:10	H23 バイオ伝熱 13:10-14:30	I23 熱物性 13:10-14:50	J23 沸騰5 13:10-14:30	K23 OS ナスケール伝熱機能発現とその応用への展望3 13:00-15:00
15:10-16:00 特別講演 (A室)										
16:10-17:40 総会 (A室)										
18:30-20:30 懇親会 (大阪市中央公会堂(中之島公会堂))										

第53回日本伝熱シンポジウム[大阪]

タイムテーブル[第3日: 5月26日(木)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室	J室	K室
	B31 OS 水素・ 燃料電池・ 二次電池7 9:00-10:20	C31 空調・ 熱機器1 9:20-10:20	D31 自然エネル ギー1 9:20-10:20	E31 自然対流1 9:20-10:20	F31 熱音響1 9:20-10:20	G31 融解・凝固2 9:00-10:20	H31 OS 化学プロセスに おける熱工学 1 9:00-10:20	I31 OS 燃焼研究の 最前線5 9:00-10:20	J31 混相流1 9:00-10:20	K31 OS ナスケール 伝熱機能発 現とその応用 への展望4 9:00-10:20
	B32 OS 水素・ 燃料電池・ 二次電池8 10:30-12:10	C32 空調・ 熱機器2 10:30-11:50	D32 自然エネル ギー2 10:30-11:30	E32 自然対流2 10:30-11:50	F32 熱音響2 10:30-11:30	G32 融解・凝固3 10:30-12:10	H32 OS 化学プロセスに おける熱工学 2 10:30-11:50	I32 OS 燃焼研究の 最前線6 10:30-11:50	J32 混相流2 10:30-11:50	K32 OS ナスケール 伝熱機能発 現とその応用 への展望5 10:30-12:10

## 第 53 回日本伝熱シンポジウムプログラム（暫定版）

このプログラムは 3 月 31 日現在の暫定版です。修正・変更する場合があります。必ず、最新版を本シンポジウムホームページでご確認ください。著者として登録された方が同一時間帯のセッションで重複しないようにしておりますが、それ以外の個別のご要望には応じられないことをご了承ください。

### 第 1 日 5 月 24 日（火）

#### <A 室>

SP1 15:00 - 17:00 優秀プレゼンテーション賞セッション（ショートプレゼンテーションはありません）

SP101 毛細血管網の流れと物質輸送の数値シミュレーション

\*三橋史樹(東大), 亀谷幸憲, 中山雅敬(マックス・プランク研究所), 長谷川洋介(東大)

SP102 カーボンナノチューブ生成における各種炭素源の熱分解生成物

\*山本優菜(広島大), 井上修平, 松村幸彦

SP103 ナノ構造化バルク熱電材料の熱伝導率およびフォノンドラッグ効果のサイズ依存性

\*三浦飛鳥(東大院), 内田健一(東北大), 塩見淳一郎(東大院)

SP104 透明・不燃な光アップコンバージョンイオノゲルの開発と分子輸送特性の解明

\*氷室佑樹(東工大院), 伊藤寿之, 新見一樹(日本化薬), 森田陵太郎, 清柳典子, 村上陽一(東工大院)

SP105 微小スケールにおける熱物質輸送を伴う気液混相流解析手法の開発

\*山本卓也(阪大), 岡野泰則

SP106 ナノ粒子層が固液界面熱抵抗に及ぼす影響に関する分子動力学的研究

\*宮崎靖広(阪大), 芝原正彦, 植木祥高

SP107 モデル可視化と LBM シミュレーションによる PEFC ガス拡散層内の液水挙動解析

\*境田悟志(北大), 鈴木研悟, 田部豊, 近久武美

SP108 デシカント塗布型熱交換器を用いた等温吸脱着性能

\*東朋寛(東大), 張莉(電中研), 山口真央(東大), 飛原英治, 斎川路之(電中研)

SP109 自励振動型ヒートパイプの流路形状による熱輸送特性への影響

\*岡伸幸(神戸大院), 杉本勝美(神戸大), 竹中信幸, 浅野等, 村川英樹

SP110 自励振動ヒートパイプにおける液柱の往復振動に伴い生ずる液膜厚さに関する研究

\*三浦正義(東工大院), 長崎孝夫(東工大), 伊藤優

SP111 プラスチック平板に形成したペーパーチャンバーに関する研究

\*秀山文彦(熊本大), 野々下衆人, 小糸康志, 富村寿夫

SP112 光ファイバーを用いた高効率採光に関する数値解析

\*渡邊知也(芝浦工大), 山田純, 江目宏樹, 河野貴裕

SP113 共有ばねを有する近接場効果を用いた高開口率 MEMS ラジエータの開発

\*呉承哲(東大), 林佑樹, 中島寛貴, 上野藍, 森本賢一, 鈴木雄二

SP114 加熱面下の二次元温度場および沸騰蒸気泡挙動の同時計測を利用した沸騰熱伝達機構に関する研究

\*井上将志(工学院大院), 大竹浩靖(工学院大), 長谷川浩司

SP115 減圧下における撥水斑点加工面上の沸騰伝熱および気泡挙動

\*山田将之(九大), 今村拓哉, SHEN Biao, 日高澄具, 河野正道, 高橋厚史, 高田保之

SP116 低位熱エネルギー回収向け多段型相変化蓄熱熱交換システムの開発と熱輸送機構の解明

\*飯島友(茨城大), 武田直哉, 堀邊将人, 稲垣照美, 李艶榮

SP117 作動媒体の諸物性に及ぼすナノ粒子の影響

\*橋本竜瑠(日大), 齋藤亮輔(シオーワ), 井上行雄, 田中三郎(日大), 佐々木直栄

SP118 レーザー誘起誘電泳動を用いた光 MEMS 拡散センサーの開発

\*鎌田慎(慶大院), 山田幹(協同インターナショナル), 田口良広(慶大), 長坂雄次

SP119 熱伝導率および熱伝達率の同時測定装置の開発

\*峯良太(和歌山高専), 中村優介, 井上諒, 辻直希, 大村高弘

SP120 単視野マイクロ 3DPTV による壁面せん断応力分布の計測

\*市川賀康(東理大院), 山本誠(東理大), 元祐昌廣

SP121 可視光の RGB 明度計測による水中の物体の温度測定

\*上村龍永(北里大), 上村光宏(東大)

SP122 水の屈折率を持つマイクロ構造体周りの全反射蛍光顕微鏡による 3 次元計測

\*藤波卓(東理大), 仲田修一郎, 海野徳幸, 佐竹信一, 谷口淳

SP123 セラミックスフィラー添加高分子材料の熱伝導および電気絶縁特性の数値解析

\*曾我宏輔(東工大), 齊藤卓志, 石川和紀(日本化薬株式会社), 佐藤勲(東工大), 川口達也

SP124 水溶液の不安定な反応拡散現象における近赤外吸収イメージング

\*川嶋大介(首都大), 角田直人, 近藤克哉(鳥取大), 有本英伸(産総研), 山田幸生(電通大)

SP125 ソーレー強制レイリー散乱法を用いた水溶液系の相互拡散係数測定に関する研究

\*藤田雅之(慶大), 松浦弘明(慶大院), 長坂雄次(慶大)

- SP126 地中熱利用における土壌熱物性に関する研究  
\*柏木啓夢(日大), 田中三郎, 佐々木直栄
- SP127 ステージング燃焼器における燃焼振動のオンライン検知手法  
\*小林大晃(東理大), 辻本綾佑(立命館大院), 船津基以(東理大), 後藤田浩, 立花繁(JAXA), 吉田征二
- SP128 イグニッションコイルを用いた水中放電による金属スズからのナノ粒子合成  
\*木村栄斗(愛媛大), 向笠忍, 須本裕也, 豊田洋通, 野村信福
- SP129 燃料極支持型 SOFC における薄膜電解質厚さの不均一が発電に与える影響  
\*佐々木雅也(京大), 岩井裕, 岸本将史, 齋藤元浩, 吉田英生
- SP130 in-situ ラマン分光による SZY 添加 SOFC 燃料極の炭素析出抑制メカニズムの解析  
\*長澤剛(東工大), チェン ドンチャン(ジョージア工科大), ライ サムスン, リウ メイリン, 花村克悟(東工大)
- SP131 植物の人工栽培における CO2 消費量を指標とした短期間成長評価  
\*西村徳斗(芝浦工大), 熊谷直紀, 石渡雅成, 江目宏樹, 河野貴裕, 山田純
- SP132 空間凝縮時の凝縮量とミスト発生臨界条件の実験的考察  
\*杉山純也(山形大), 安原薫
- SP133 中高温太陽熱利用のためのソーラー多孔質集熱器の三次元伝熱解析  
\*中倉満帆(新潟大院), 大竹真貴, 松原幸治(新潟大), 児玉竜也
- SP134 界面活性剤溶液流れにおいて粘弾性応力が乱流シュミット数に及ぼす影響の実験的評価  
\*原峻平(東理大院), 松本拓也, 塚原隆裕(東理大), 川口靖夫
- SP136 インナーフィン型プレート式熱交換器の性能予測に関する研究  
\*三沼卓也(日大), 田中三郎, 佐々木直栄
- SP137 熱音響システムにおけるエネルギー変換部のモデル構築に向けた検討  
\*福田誠弥(同志社大), 坂本眞一(滋賀県立大), 渡辺好章(同志社大)
- SP138 湿度操作空気清浄法における SPM 除去性能の改善  
\*芳賀俊行(明治大院), 中別府修(明治大)
- SP139 常温大気中におけるふく射場が乱流自然対流伝熱特性に及ぼす影響  
\*古川琢磨(東北大院), 櫻井篤(新潟大), 岡島淳之介(東北大), 小宮敦樹, 円山重直
- SP140 鉛直磁場下における磁性流体の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達  
\*糸賀裕哉(茨城大), 阿部将史, 稲垣照美, 李艶栄
- SP141 QCM 法によるシリカゲル微粒子塗布層への水蒸気の等温平衡吸着量測定  
濱本芳徳(九大), \*中森雄大, 森英夫
- <B 室>  
B11 9:00 - 10:20 OS 水素・燃料電池・二次電池 1
- B111 固体高分子形燃料電池における膜厚方向の水分布に関する研究  
\*西崎証峻(神大院), 澤田将貴, 村川英樹, 杉本勝美, 浅野等, 竹中信幸, 齊藤泰司(京大)
- B112 PEFC 流路壁面の濡れ性制御が GDL 内液水排出とフラッディング軽減に及ぼす効果  
\*河野佑大(京工織大), 西田耕介
- B113 カソード集電体のぬれ性調整による水素クロスオーバーの抑制  
坂口拓也(九大), 槌谷勇太, 稲田顕子, 狩俣貴大, 中島裕典, \*伊藤衡平
- B114 固体高分子型水電解における高圧条件下での電流効率の数値解析  
\*齊藤遼(九大), 坂口拓也, 稲田顕子, 中島裕典, 伊藤衡平
- B12 10:30 - 11:50 OS 水素・燃料電池・二次電池 2
- B121 MEMS センサーを用いた CL/MPL 界面の湿度分布測定  
\*南凌太郎(横国大), 小林航輝, 辻川順, 宮川聖史, 荒木拓人(横国大, JST さきがけ)
- B122 CCM 作製方法が PEFC 触媒層内液水分布と輸送現象に及ぼす影響  
\*饒庭竹(東工大), 笹部崇, 吉田利彦, 植村豪, 平井秀一郎
- B123 親水性カーボンファイバー MPL による固体高分子形燃料電池のフラッディング改善メカニズム  
\*青山祐介(北大院), 鈴木研悟(北大), 田部豊, 近久武美, 田沼敏弘(旭硝子)
- B124 分子動力学法による PEFC アイオノマー表面における酸素分子散乱・表面拡散現象の解析  
\*中内将隆(東北大院), 馬淵拓哉, 杵淵郁也(東大), 武内秀樹(高知高専), 徳増崇(東北大)
- B13 13:10 - 14:50 OS 水素・燃料電池・二次電池 3
- B131 高電流密度運転時における物質輸送性がセル性能に与える影響  
\*池田修久(日産自動車), 田淵雄一郎
- B132 PEFC 触媒層アイオノマーにおける酸素透過特性の分子論的解析  
\*栗原祐也(東北大院), 馬淵拓哉, 徳増崇(東北大)
- B133 固体高分子形燃料電池の発電性能に対する抵抗要素解析  
\*鈴木孝尚(豊田中研), 山田春彦, 森本友
- B134 触媒インク攪拌条件が PEFC 内輸送現象に及ぼす影響  
\*笹部崇(東工大院), 新谷彩(東工大), 青木慶彦, 饒庭竹(東工大院), 吉田利彦, 植村豪, 平井秀一郎
- B135 固体高分子形燃料電池における触媒層内カーボン/アイオノマー構造が酸素輸送抵抗に及ぼす影響解析  
\*林伴哉(北大院), 鈴木研悟(北大), 田部豊, 近久武美

## &lt;C室&gt;

## C11 9:20 - 10:20 電子機器の冷却 1

C111 高密度実装機器の簡易熱設計に向けたファン性能モデル化手法

\*福江高志(岩手大), 廣瀬宏一, 畠山友行(富山県大), 石塚勝, 小泉雄大(コーセル)

C112 パワーエレクトロニクス機器における冷却構造と防塵構造の両立性の検討

\*黒川健也(東芝), 首藤正志, 和田冷, 小池昇

C113 複数箇所の温度情報に基づくコンピュータ冷却性能診断

\*鈴木智之(東芝), 高松伴直

## C12 10:30 - 12:10 電子機器の冷却 2

C121 複数蒸発器/凝縮器を有するループヒートパイプの熱輸送特性

\*常新雨(名大), 長野方星, 岡崎峻(JAXA), 永井大樹(東北大), 小川博之(JAXA)

C122 傾斜ループ管ヒートパイプの伝熱特性

\*大串哲朗(広島国際大), 山蔭久明(山蔭技術士事務所), 竹市剛志(悠高)

C123 ヒートパイプを利用した自動車用高熱流束冷却技術

\*望月正孝(フジクラ), 斉藤祐司, 益子耕一, レイトーマス, シン ランディープ

C124 LED 冷却に応用可能な球面ヒートパイプの伝熱特性

\*原村嘉彦(神奈川大)

C125 Self-rewetting 溶液を用いた自励振動型ヒートパイプの内部圧力測定

\*笹弥幸(弘前大院), 山上廣城, 麓耕二(弘前大), ラファエロ サビーノ(ナポリ大), 川南剛(神戸大), 稲村隆夫(弘前大)

## C13 13:10 - 14:30 ヒートパイプ

C131 二重管形円周方向溝形ウィックヒートパイプの伝熱特性

小佐井博章(東海大), \*大高下和也(東海大院)

C132 高速回転ヒートパイプの熱輸送性能に及ぼす封入率の影響

依田悠太郎(東工大), \*和田裕樹, 鈴木祐二, 井上剛良

C133 X線CTによるウィック式ヒートパイプ内作動液の可視化計測

\*今井貴司(東工大), 植村豪, 笹部崇, 平井秀一郎

C134 超親水沸騰面と冷媒を用いる自然循環式相変化型電子機器冷却器

梅本翔平(長崎大), \*近藤智恵子, 小山繁(九大), 水戸岡豊(岡山工センタ)

D112 ポリマー濃度および分子量がポリマー溶液中のマイクロバブルのサイズに与える影響

\*川井健太郎(東大), 櫻井大地, 大宮司啓文, 竹村文男(産総研)

D113 シリコン表面における微小水滴の凝縮機構の解析

\*本多拓哉(東大), 藤本研也, 吉本勇太, 茂木克雄(東工大), 杵淵郁也(東大), 杉井康彦(東工大), 高木周(東大)

D114 マイクロ液滴の界面張力駆動対流に関する研究

\*数野信夫(東理大院), 塚原隆裕(東理大), 元祐昌廣

## D12 10:30 - 12:10 マイクロ伝熱 2

D121 ゴルゲル法によるユーロピウム添加黄色蛍光体の合成とその温度特性

\*林彦臣(広島大), 井上修平, 松村幸彦, 陳志臣(国立中央大)

D122 近傍での集束イオンビームの照射による白金薄膜の電気伝導率の変化

\*檜崎将弘(九大), 生田竜也, 西山貴史, 高橋厚史

D123 近赤外吸収イメージング法を利用した水溶液の拡散係数の温度依存性に関する研究

\*山下大樹(首都大院), 角田直人(首都大), 川嶋大介(首都大院), 近藤克哉(鳥取大), 有本英伸(産総研), 山田幸生(電通大)

D124 Enhanced thermal conductivity of phase change material with hybrid graphite nanocomposites

\*Sivasankaran Harish(九大), Orejon Daniel, 高田保之, 河野正道

D125 カーボンナノチューブ薄膜への水分子の吸着

\*古株拓弥(広島大), 井上修平, 松村幸彦

## D13 13:10 - 14:30 マイクロ伝熱 3

D131 単層カーボンナノチューブの熱輸送特性の構造依存性

\*吉田周平(東大), 馮雅, 井ノ上泰輝, 項榮, 千足昇平, 米谷玲皇, 柏木誠, 塩見淳一郎, Kauppinen Esko(Aalto Univ.), 丸山茂夫(東大)

D132 カーボンナノチューブ壁面の濡れ性に与える表面曲率の影響

\*山田寛(九大), 高田保之, Sefiane Khellil(エディンバラ大)

D133 FT-ICR 質量分析装置を用いた Cu クラスターの化学反応解析

\*水谷健(東大), 佐藤仁紀, 箕輪紘弥, 井ノ上泰輝, 千足昇平, 丸山茂夫

D134 金属単層カーボンナノチューブ選択除去と電界放出による一方向燃焼

\*大塚慶吾(東大), 井ノ上泰輝, 千足昇平, 丸山茂夫(東大, 産総研)

## &lt;E室&gt;

## E12 10:30 - 11:50 物質移動

E121 電気的中性条件に基づく電気透析の数学モデル

\*田渡賢史(静岡大), 天海十漸, 佐野吉彦, 中山頭

E122 サブミクロン粒子の捕集クリーニング機構に関する実験的研究

## &lt;D室&gt;

## D11 9:00 - 10:20 マイクロ伝熱 1

D111 親水性ドメインが固液界面ナノバブルに及ぼす効果

\*西山貴史(九大), 岩永歩, 高橋厚史, 高田保之



- 姫野修廣(信州大), 伊藤史晃(信州大院), \*譜久山恒士
- E123 光触媒コーティングされた電極を用いた誘電体バリア放電によるオゾン生成の特性  
\*石丸和博(岐阜高専), 撫養裕一郎
- E124 水-エタノール溶液滴の混合割合がマイクロ粒子堆積に与える影響  
山口裕吾(東大), \*大澤崇行, 長谷川洋介
- E13 13:10 - 14:50 OS 非線形熱流体现象と伝熱 1
- E131 高プラントル数スカラーを含む成層乱流のスペクトル解析  
\*沖野真也(京大), 花崎秀史
- E132 非一様安定密度成層乱流の構造  
\*飯田雄章(名工大), 大坂翼, 加藤大
- E133 多孔質チャネル乱流における非相似的な熱運動量輸送  
\*河原源太(阪大), 長谷川久晃, ウルマン マルクス(KIT), 加藤健司(阪市大)
- E134 平行平板間クエット流れにおける最適熱輸送  
\*本木慎吾(阪大), 清水雅樹, 河原源太
- E135 (100)及び(111)面における拡張 Si の壁の間の Ar 液の粘性の分子動力学の研究  
木谷涼太(富山大), \*ゾロツキヒナ タチアナ
- G113 ポーラス体を応用した衝突噴流熱伝達に対する伝熱面熱抵抗の影響  
結城和久(山口東理大), \*結城光平, 川本誠, 鈴木康一
- G114 爆発圧着技術を応用した均一多数穴ポーラス銅管の熱伝達性能  
結城和久(山口東理大), \*佐藤 義晃, 鈴木康一, 富村寿夫(熊本大), 外本和幸
- G12 10:30 - 11:30 多孔体内の伝熱 2
- G121 非等方多孔体ダクト乱流の多孔体界面および内部流動の PIV 計測  
\*岡部凌平(阪府大), 種子尾彰, 松尾知哉, 金田昌之, 須賀一彦
- G122 構造に異方性を持つ層状多孔体の界面乱流特性に関する PIV 計測  
\*許雄大(阪府大), 中村清太郎, 金田昌之, 須賀一彦
- G123 小型酸素濃縮器用ゼオライト充てん層内の温度・濃度分布の解析  
\*小川邦康(慶大)
- G13 13:10 - 14:30 多孔体内の伝熱 3
- G131 ナノ流体の粒子機械分散と熱分散に関する一考察  
\*張文浩(静岡大創造科学大学院), 桑原不二朗(静岡大), 佐野吉彦, モベディ モフタダ, 中山頭
- G132 高空隙率多孔質構造の強制対流伝熱の数値解析  
\*平澤茂樹(神戸大), 川南剛, 白井克明
- G133 多孔体内の共役熱流動 LES と乱流・分散熱流束項のモデリング  
\*近末竜(阪府大), 桑田祐丞, 須賀一彦
- G134 ガス交換膜による微細藻の培養促進に関する基礎研究  
\*スズキ タケシ(静岡大院), 佐野吉彦(静岡大), 中山頭
- <F 室>
- F11 9:20 - 10:20 関西企業からの製品開発・技術開発の紹介 1
- より高効率で省エネ性の高い製品機器を開発して顧客のニーズにこたえたい. 無駄のない生産プロセスを構築して生産活動で発生する環境負荷を低減したい. これを実現するために企業で取り組む技術開発の内容には, 高効率な冷凍空調, 給湯機器の開発や, 熱流体解析を用いた構成要素の最適化など, 伝熱現象に密接に関連するものが数多くあります. そこで, 今回のシンポジウムでは開催地の大阪にちなんで, 関西に活動拠点をもち企業から, 現場で取り組まれている最近の製品開発や技術開発の事例を紹介いただきます.  
参加予定: 大阪ガス, 川崎重工, 神戸製鋼, ダイキン, パナソニック, Hitz 日立造船, 三菱電機
- F12 10:30 - 11:50 関西企業からの製品開発・技術開発の紹介 2
- 同上
- <G 室>
- G11 9:40 - 10:20 多孔体内の伝熱 1
- G111 中空糸膜吸収器における水蒸気吸収特性に関する研究  
\*Hong Sung Joo(東大), 党超鋌, 飛原英治
- G112 銅粒子充填層内における衝突噴流による熱伝達特性  
\*高井貴生(山口東理大), 引頭佳紀, 結城和久, 鈴木康一, 相良明男(核融合研)
- H11 9:20 - 10:20 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 1
- H111 高温用 PCM マイクロカプセルの蓄熱性能  
\*能村貴宏(北大), 半崎大揮, 盛楠, 秋山友宏
- H112 糖アルコールの熱拡散率測定および蓄熱性能の数値解析  
\*ザメンゴ マッシミリアーノ(東工大), 船田知広, 森川淳子
- H113 吸着材粒子と水の直接熱交換による水蒸気発生の促進と粒子耐久性向上の検討  
\*中曾浩一(九大), 小林俊介, 深井潤
- H12 10:30 - 11:50 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 2
- H121 Preparation and characterization of consolidated composite adsorbents for cooling application  
\*Pal Animesh(Kyushu Univ.), El-Sharkawy Ibrahim, Miyazaki Takahiko, Saha Bidyut, Koyama Shigeru

- H122 成形活性炭のアルコール蒸気吸着特性  
\*山脇直裕(金沢大), 篠原貴江, 汲田幹夫, 東秀憲, 瀬戸章文, 大谷吉生
- H123 容量法による活性炭-フロン系冷媒吸着測定の数値解析  
\*中本大志朗(九大), 横山幸之介, 宮崎隆彦, SAHA Bidyut, 小山繁
- H124 ALPO 系ゼオライトを塗布した直交流熱交換器型吸着器の熱・水蒸気移動特性  
\*窪田光宏(名大), 花岡範子, 松田仁樹, 児玉昭雄(金沢大)
- H13 13:10 - 14:50 OS 外部空間の環境設計のための熱環境解析
- H131 粒状保水性材料の乾燥挙動の実験的評価  
\*木下進一(阪府大), 吉田篤正, 辻本大介
- H132 給水機能付きの保水性ブロック舗装の暑熱環境改善効果  
\*青木政樹(大成ロテック), 平川一成, 上堂菌研太, 加納孝志
- H133 実測及び数値解析による木製外装を施した建物の大気熱負荷抑制効果の評価  
\*荘保伸一(越井木材工業), 吉田篤正(阪府大), 木下進一
- H134 建物壁面への高反射率技術の導入可能性に関する研究  
\*竹林 英樹(神戸大)
- H135 人体要素を考慮した屋外温熱環境解析  
\*島崎康弘(岡山県大), 吉田篤正(阪府大)
- <I 室>  
I11 9:00 - 10:20 OS 燃焼研究の最前線 1
- I111 二酸化炭素を含む微速流中における 1-ブタノールの液滴燃焼速度に関する研究  
\*明賀俊樹(阪府大), 片岡秀文, 瀬川大資, 中谷辰爾(東大), 津江光洋
- I112 液体推進剤の衝突微粒化特性と火炎構造  
\*佐藤大介(阪大), 谷洋海(JAXA), 林潤(阪大), 大門優(JAXA), 笹木正裕(IHI エアロスペース), 松浦芳樹, 赤松史光(阪大)
- I113 同軸噴流バーナ上に形成される微粉炭火炎中のすす生成特性  
\*林潤(阪大), 橋本望(北大), 中塚記章(阪大), 泰中一樹(電中研), 梅本賢, 渡邊裕章(九大), 赤松史光(阪大), 牧野尚夫(電中研)
- I114 CO2 回収型高効率石炭ガス化複合発電システムのガスタービン燃焼器を対象とした詳細反応数値解析  
\*山下晃弘(北大), 橋本望, 長谷川武治(電中研), 藤田修(北大)
- I12 10:30 - 12:10 OS 燃焼研究の最前線 2
- I121 木質バイオマスガス化ガスの部分燃焼改質に関する研究  
\*中塚記章(阪大), 白志仁, 劉東昇, 林潤, 赤松史光
- I122 層流対向流場に形成される n-decane 噴霧火炎中のすす生成特性に噴霧特性が与える影響  
\*林潤(阪大), 渡邊裕章(九大), 黒瀬良一(京大), 赤松史光(阪大)
- I123 Sooting Limit of n-heptane/n-butanol Mixture in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile  
\*Mohd Hanafi Mohd Hafidzal(Tohoku Univ.), Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Kaoru Maruta
- I124 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた定常低温酸化反応の分離とその特性に関する研究  
\*巽遼太(東北大), 中村寿, 長谷川進, 手塚卓也, 丸田薫(東北大, 極東連邦大)
- I125 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた合成ガスの昇圧時着火特性に及ぼす組成の影響  
\*田中智大(東北大), 手塚卓也, 長谷川進, 中村寿, 丸田薫(東北大, 極東連邦大), 阿部一幾(三菱日立パワーシステムズ)
- I13 13:00 - 17:20 日本伝熱学会特定推進研究特別セッション「エネルギー・環境戦略と特定推進研究による伝熱研究の展開」  
総合司会：加藤 之貴(東工大)
- I131 選択波長赤外線を用いた新規熱処理プロセス  
\*近藤良夫(日本ガイシ)
- I132 熱輻射制御と白熱電球の復活  
\*高原淳一(阪大)
- I133 表面バーナを用いた TPV 発電の原理検証  
\*若林努(大阪ガス)
- I134 熱ふく射の波長特性・方向・熱量の制御  
\*伊藤晃太(豊田中研)
- I135 鉄鋼業における水冷技術  
\*芹澤良洋(新日鉄住金)
- I136 高温鋼板のスプレー沸騰冷却特性に及ぼす表面酸化膜の影響  
\*永井二郎(福井大)
- I137 可視化実験と数値計算による鋼板上冷却水の熱流動解析  
\*藤本仁(京大)
- I138 ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望  
\*塩見淳一郎(東大)
- I139 半導体パッケージにおけるナノ熱伝導の意義  
\*松本圭司(IBM 基礎研)
- I1310 有機-無機ハイブリッド材料によりシート型熱電変換モジュールの開発  
\*加藤邦久(リンテック)
- I1311 デバイス革新に向けたナノスケール熱制御技術／フォノンエンジニアリング  
\*馬場 寿夫(JST・CRDS)
- 総合討論
- <J 室>  
J11 9:00 - 10:20 沸騰 1
- J111 二液混合流体における沸騰熱伝達  
\*篠崎健(三菱電機), 浅井勇吾, 牛房裕之, 一法師茂俊, 伊藤大介(京大), 齊藤泰司

- J112 2-プロパノール水溶液のプール沸騰高熱流束域における伝熱面近傍の局所濃度の推定  
\*坂下弘人(北大)
- J113 析出物を伴う懸濁液プール核沸騰熱伝達に関する研究  
上澤伸一郎(JAEA), \*小泉安郎, 柴田光彦, 吉田啓之
- J114 超親水性マイクロ・ナノ階層構造表面によるプール沸騰限界熱流束促進  
\*田中孝典(九工大), 江上誠(九工大院), 矢吹智英, 宮崎康次(九工大)
- J12 10:30 - 11:50 沸騰 2
- J121 気泡微細化沸騰における流れ場の可視化計測  
\*伊藤大介(京大), 刀塚淳, 齊藤泰司
- J122 低圧下における系圧力及び伝熱面形状が沸騰熱伝達に及ぼす影響  
\*齋藤拓也(日大), 松島均
- J123 光学 2 波長同時計測による気泡の合体過程における気泡間液膜の破断時厚さ計測  
\*諸隈崇幸(横国大), 大原崇史, 松本裕昭, 宇高 義郎(天津大)
- J124 レーザ干渉法を用いた熱流束計測における光の偏向の影響  
\*出島一仁(京大院), 細谷亮介(明治大院), 中別府修(明治大)

<K 室>

- K11 9:00 - 10:20 計測技術 1
- K111 乾湿計の原理による沸点温度以上での湿度測定法  
\*吉岡秀矩(阪市大), 伊與田浩志, 三浦孝平, 湯谷智, 辻岡哲夫, 阿部恒(産総研)
- K112 電子顕微鏡コマ落とし可視化を用いた多孔質フィルタ内部におけるディーゼル微粒子侵入深さの流速依存性に関する研究  
\*讃井涼子(東工大), 花村克悟
- K113 光ファイバレーザ吸収分光法による燃料電池狭小流路内のガス濃度測定に関する基礎研究  
\*西田耕介(京工織大), 前田雄也, 梅川豊文(プラムテック), 川崎昌博(名大)
- K114 レーザー誘起誘電泳動を用いた小型拡散センサーの開発  
\*山本健太郎(慶大), 深田一路 (慶大院), 田口良広(慶大), 長坂雄次
- K12 10:30 - 11:50 計測技術 2
- K121 体動下で測定可能な小型血流量測定装置の開発  
\*橋本将明(慶大), 鎌田慎, 田口良広
- K122 ドップラー位相シフトホログラフィによる微粒子の三次元速度計測  
\*金田一哲平(宇都宮大院), 二宮尚
- K123 エバネッセント波を用いたレーザードップラー計測システムの開発  
\*梶祥一朗(神戸大), 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹
- K124 エバネッセントベッセルビーム発生素子開発のための基礎研究

- \*渡邊翔太郎(東工大), 金ビョンギ, ドアン ホン・ドク, 伏信一慶
- K13 13:10 - 14:30 計測技術 3
- K131 燐光粒子を用いた空気の温度速度同時計測  
\*藤森千晴(産総研), 染矢聡, 宗像鉄雄
- K132 矩形キャビティにおける内部発熱を伴う自然対流の流動解析  
田島淳(東工大), \*川口達也, 佐藤勲, 齊藤卓志
- K133 熱物質輸送の可視化計測に向けた大視野位相シフト干渉計の構築  
\*庄司衛太(東北大), 小宮敦樹, 岡島淳之介, 守谷修一, 塚田隆夫, 円山重直
- K134 高時間・空間分解能温度分布センサーの開発  
\*滝口広樹(電中研), 古谷正裕, 新井崇洋

第 2 日 5 月 2 5 日 (水)

<A 室>

- A21 9:00 - 10:20 強制対流 1
- A211 Concurrent LES を用いたリブ付設衝突噴流場の瞬時構造解析  
和久本剛(関西大), \*小田豊
- A212 複合時間スケール型温度場 2 方程式モデルによる乱流熱伝達場の予測  
\*服部博文(名工大), 筒井研二(名工大院), 保浦知也(名工大), 田川正人
- A213 流れの急加速・急減速時における円管内乱流熱伝達の非定常特性  
\*椎原尚輝(防衛大), 中村元, 山田俊輔
- A214 傾斜ピンフィン流路のMRIによる三次元流動場の測定  
武石賢一郎(徳島文理大), \*櫛田 直人
- A22 10:30 - 12:10 強制対流 2
- A221 曲がり乱流中の多重スケール構造と熱輸送に関する研究  
\*松原幸治(新潟大), 吉田竜也
- A222 安定方向回転が作用するクエット乱流の乱流遷移域に発生する間欠構造の熱流動特性  
\*福留功二(立命館大), 大上芳文
- A223 A223: 非等方性を有する多孔体チャンネル乱流のLES  
\*桑田祐丞(阪府大), 須賀一彦
- A224 大規模直接数値シミュレーションを用いた MHD 乱流熱伝達機構の解明とモデリング  
\*山本義暢(山梨大), 大沢直樹, 功刀資彰(京大)
- A225 界面活性剤溶液流れにおける運動量とスカラー輸送に係る壁近傍準秩序構造の特性  
\*松本拓也(東理大院), 原峻平, 塚原隆裕(東理大), 川口靖夫

## A23 13:10 - 14:10 強制対流 3

- A231 強成層の流体中を鉛直移動する球まわりの流れ場  
\*和氣悠将(京大), 秋山真作, 野口真之介, 沖野真也, 花崎秀史
- A232 超臨界水ガス化の昇温速度の生成物分布への影響  
\*Changkiendee Poomkawaee(広島大), 井上修平, 井上陽仁(復建調査設計), 川井良文(中電プラント), 谷川博昭(中国電力), 野口琢史(東洋高压), 松村幸彦(広島大)
- A233 蛇行流路内における低レイノルズ数粘弾性流体流れの乱れと伝熱特性  
中山開(京大), \*巽和也, 中部主敬

## &lt;B 室&gt;

## B21 9:00 - 10:20 OS 水素・燃料電池・二次電池 4

- B211 触媒インク乾燥プロセスの固液挙動解析  
\*鈴木崇弘(阪大院), 津島将司
- B212 燃料電池触媒インクにおける局所拡散係数の MRI 計測  
\*亀谷雄樹(東工大), 入口紀男, 植村豪, 笹部崇, 平井秀一郎
- B213 分子動力学法を用いた高分子電解質膜内におけるプロトン輸送および水クラスター構造特性の解析  
\*馬淵拓哉(東北大), 徳増崇
- B214 鉄(II)イオン混入高分子電解質膜のプロトン輸送特性の評価  
\*川井喜与人(東北大院), 馬淵拓哉, 徳増崇(東北大)

## B22 10:30 - 12:10 OS 水素・燃料電池・二次電池 5

- B221 過冷却を伴う PEFC 氷点下起動時のアイオノマー内水輸送と氷形成挙動  
\*若竹修志(北大院), 鈴木研悟(北大), 田部豊, 近久武美
- B222 通常より高温発電時の PEFC 単セル内温度分布解析  
\*西村颯(三重大院), 長田康太郎, 角田拓朗(三重大), 吉村雅人, 廣田真史(三重大院)
- B223 GDL 中の液水分布が触媒層表面温度に与える影響  
橋村蒼太(横国大), 高谷洗司, 渡邊健太郎, \*荒木拓人(横国大, JST さきがけ)
- B224 真空中における固体高分子形燃料電池の温度評価  
\*岩尾光(九大), 狩俣貴大, 中島祐典, 伊藤衡平
- B225 固体高分子形燃料電池内 GDL 面上の酸素濃度分布の計測と流路形状による影響  
\*服部秀平(東大), 伊藤博(産総研), 染矢聡, 宗像鉄雄

## B23 13:10 - 14:50 OS 水素・燃料電池・二次電池 6

- B231 計量形態学による SOFC 内 AFL のキャラクターゼーションと電子・イオン有効伝導度の評価  
\*島本幸昌(早稲田大), 村山雄紀, 中垣隆雄
- B232 Ni-YSZ 多孔質を用いたメタン水蒸気改質反応に及ぼす微構造の影響  
\*河村悠輔(京大), 杉原真一(デンソー), 岩井裕(京大), 岸本将史, 齋藤元浩, 吉田英生

- B233 小型円筒 SOEC における水蒸気電解中の温度分布測定  
\*渡邊憲太郎(横国大), 前田厚史, 水澤竜也, 荒木拓人, 森昌史(電中研)
- B234 ダイレクトカーボン燃料電池における固体炭素の電気化学的酸化反応  
\*渡部弘達(東工大), 梅原大輔(東工大)
- B235 ダイレクトカーボン燃料電池のアノード周囲の現象観察と発電性能  
\*梅原大輔(東工大), 渡部弘達, 花村克悟

## &lt;C 室&gt;

## C21 9:00 - 10:20 電子機器の冷却 3

- C211 OpenFOAM を利用した電子機器液冷システムのシミュレーション  
\*広瀬良平(富山県大), 中川慎二, 島山友行
- C212 電子機器内部の扁平曲がり流路における空気の流れと伝熱特性の評価  
\*小林恒太(岩手大), 畑陽介(ブラザー工業), 福江高志(岩手大), 廣瀬宏一, 石川博幸(ブラザー工業)
- C213 ポーラス金属フィンの沸騰熱伝達率特性  
\*近藤義広(日立), 越田博之(日立化成)
- C214 Long Life Coolant の沸騰熱伝達性能  
結城和久(山口東理大), \*馬天宇, 鈴木康一

## C22 10:30 - 11:50 電子機器の冷却 4

- C221 簡易解析モデルを用いた放熱シートの性能評価  
\*山口義幸(兵衛大院), 俵充史
- C222 フォトサーマル赤外検知法による Thermal Interface Material の局所的な熱伝導率測定に関する研究  
\*老川ひろみ(慶大), 岡田遼成(慶大院), 田口良広(慶大), 長坂雄次
- C223 重ね合わせ法による電子機器プリント基板の温度分布計算方法の開発  
\*北城栄(NEC エンジニアリング)
- C224 データ同化を利用したペルチェ素子の温度特性係数推定法  
\*佐藤航(日立研開), 磯島宣之(日立ハイテク)

## C23 13:10 - 14:30 電子機器の冷却 5

- C231 フリップチップ実装構造内バンプ接続部の劣化評価手法の開発  
\*佐藤大地(慶大), 山本裕(慶大院), 田口良広(慶大), 長坂雄次
- C232 実測データに基づく TJ 算出可能な過渡熱解析モデリング開発  
\*篠田卓也(デンソー)
- C233 パワーSi MOSFET 内ホットスポット温度予測のための CFD 解析  
\*木伏理沙子(山口東京理科大), 島山友行(富山県大), 中川慎二, 石塚勝
- C234 透明導電薄膜の近赤外線ナノ秒パルスレーザスクライビング  
\*金ビョング(東工大), 飯田亮一, ドアン ホン・ドク, 伏信一慶

## &lt;D 室&gt;

- D21 9:00 - 10:20 マイクロ伝熱 4
- D211 イオン液体中における金属錯体レドックス種の熱起電力計測  
大路航平(東工大), \*福井一輝(東工大院), 氷室佑樹, 新見一樹(日本化薬), 森田陵太郎, 清柳典子, 村上陽一(東工大院)
- D212 高効率排熱回収のためのフレキシブル薄膜熱発電モジュールの開発  
\*萩野春俊(フジクラ), 望月正孝, 齋藤祐士, 益子耕一, 川原洋司
- D213 有機修飾ナノ粒子を含むナノ流体の分散・凝集挙動ならびにレオロジー特性の数値シミュレーション  
\*薄根真(東北大院), 久保正樹, 塚田隆夫, 杉岡健一(富山県大), 小池修(プロダクト・イノベーション協会), 藤田昌大(城西大), 阿尻雅文(東北大WPI)
- D214 マイクロスケールの構造をもつ固体中のエネルギー輸送のモデリング  
向井竣介(京大), 白石大貴, \*松本充弘
- D22 10:30 - 12:10 分子動力学 1
- D221 固体表面の電氣的極性が水の濡れ性や固液界面に与える影響に関する分子動力学解析  
\*SURBLYS Donatas (阪大), LEROY Frédéric (ダルムシュタット工科大), 山口康隆(阪大)
- D222 凹凸のある固体壁面上におけるナノ液滴に関する分子動力学法解析  
\*古田悠真(阪大), 山口康隆, スルプリス ドナタス, 香川勝(大日本印刷), 中島但, 藤村秀夫
- D223 ナノ細孔内部の水の吸着・移動現象の分子シミュレーション  
\*長津頌(東大), 山下恭平, 大宮司啓文
- D224 ナノスリット細孔内の氷/水相平衡条件のレプリカ交換分子動力学シミュレーション  
\*山光隆一(慶大), 野村昂太郎, 泰岡顕治
- D225 アルカン・アルコール液体の熱伝導率と分子スケール熱伝搬特性の関係  
\*松原裕樹(東北大), 菊川豪太, 別所毅(トヨタ自動車), 山下征士, 小原拓(東北大)
- D23 13:10 - 14:50 分子動力学 2
- D231 スリット状ナノ構造が凝縮時の界面熱抵抗に及ぼす影響  
諏訪孝典(阪大), \*芝原正彦
- D232 ナノメートルスケールの壁面微細構造が凝縮核生成に及ぼす影響に関する分子動力学的研究  
\*宇野元気(阪大), 芝原正彦, 植木祥高
- D233 固体壁面近傍の水分子に凝固現象が与える影響に関する分子動力学解析  
\*藤原邦夫(SCREEN ホールディングス), 佐々木翔平(阪大), 芝原正彦
- D234 キラル液晶の分子形状が相挙動に及ぼす影響の検討  
\*野澤拓磨(慶大), Paul Brumby, 泰岡顕治
- D235 MD 計算による擬 2 次元流体の相変化シミュレーション  
\*粟生貴志(京大), 松本充弘

## &lt;E 室&gt;

- E21 9:00 - 10:20 ふく射
- E211 アルミニウムドーブ亜鉛酸化物放射体による近接場領域のふく射輸送に関する研究  
\*磯部和真(東工大), 平島大輔(データフォーシーズ), 花村克悟(東工大)
- E212 グラフェンメタサーフェスによる熱ふく射制御  
\*矢田恭平(新潟大院), 吉本大樹, 櫻井篤(新潟大)
- E213 インクジェット印刷における色相の濃淡依存性に関する研究  
石川雄基(芝浦工大), \*江目宏樹, 河野貴裕, 山田純
- E214 波長制御放射技術の乾燥炉への適用  
\*戸谷剛(北大), 近藤良夫(日本ガイシ), 櫻井篤(新潟大)
- E22 10:30 - 12:10 OS 非線形熱流体現象と伝熱 2
- E221 粒子との接触を伴う液体自由表面近傍流体挙動の直接数値解析  
\*井上幹允(東理大), 宮崎祐輔, 塚原隆裕, 母立衆, 金子敏宏, 上野一郎
- E222 温度差マランゴニ効果による二次元定常流中に付与した単一粒子挙動に関する実験的研究  
\*石村美紗(東理大), ROMANÒ Francesco, KUHLMANN Hendrik (ウィーン工科大), 金子敏宏(東理大), 上野一郎
- E223 Full-zone 液柱内浮力-マランゴニ共存対流場の線形安定性  
\*茂木孝介(東理大院), 工藤正樹(産技高専), 金子敏宏(東理大), 上野一郎
- E224 気液界面の熱移動が高プラントル数液柱マランゴニ対流の Hydrothermal Wave 不安定性に与える影響  
\*矢野大志(横国大), 西野耕一, 鴨谷康弘(Case Western Reserve Univ.), 上野一郎(東理大), 松本聡(JAXA)
- E225 定常表面張力対流の安定限界  
\*今石宣之(九大), Ermakov Michael (RAS), 石万元(重慶大)
- E23 13:10 - 14:50 OS 非線形熱流体現象と伝熱 3
- E231 温度勾配方向に液膜厚さが変化する場合のハイドロサーマルウェーブの挙動について  
\*工藤正樹(都立産業技術高専), 宮脇弘樹
- E232 サーマキャピラリー効果を利用した界面活性剤溶液薄膜の安定化機構の検討  
\*橋口佳実(阪市大), 脇本辰郎, 加藤健司
- E233 回転磁場により駆動される液体金属流れの数値解析  
\*田川俊夫(首都大), 林圭祐
- E234 パルス燃焼の非線形ダイナミックスの基礎的解明  
\*高木一至(東理大), 後藤田浩
- E235 同軸インジェクタを偏心配置した円筒燃焼器内で発生する燃焼振動の非線形ダイナミックス  
\*粕谷遥希(東理大), 後藤田浩, 吉田征二(JAXA), 立花繁



## &lt;F 室&gt;

F22 10:30 - 12:10 大阪近郊の地元企業による技術紹介 1

「ものづくりのまち大阪」といわれるように、大阪には長い歴史の中で培われた独自の技術を持つ企業が数多くあります。その技術力を生かして省エネ性向上、環境負荷低減に大きく貢献する優れた環境技術や商品の開発も盛んに行われています。今回の技術展示では、省エネ・効率化につながる環境技術を提案されている地元大阪のベンチャー企業を中心にそれぞれがもつ強み技術を出展いただきます。本シンポジウムは多数の大学・企業の研究者が集まる機会ですので、出展企業との交流を通じて、さらに技術を高めるヒントやビジネス拡大に繋げる機会としてご利用ください。

F23 13:10 - 14:50 大阪近郊の地元企業による技術紹介 2

同上

## &lt;G 室&gt;

G21 9:00 - 10:20 OS 伝熱工学が作る医工学と医療機器の新展開 1

G211 レーザー治療に向けた皮膚のふく射物性計測  
\*伊藤勇輝(芝浦工大), 河野貴裕, 江目宏樹, 山田純

G212 保護熱源式サーミスタプローブを用いたヒト皮膚の高精度・非侵襲有効熱伝導率測定  
\*岡部孝裕(東北大), 岡島淳之介, 藤村卓, 小宮敦樹, 相場節也, 円山重直

G213 加熱に伴う生体軟組織の形態変化に関する基礎的研究  
\*田名部真梨子(弘前大院), 麓耕二(弘前大), 稲村隆夫

G214 一定温度加熱による血液かん流率変化の生体内伝熱へ影響  
\*岡島淳之介(東北大), 岡部孝裕, 円山重直

G22 10:30 - 12:10 OS 伝熱工学が作る医工学と医療機器の新展開 2

G221 グラフェンナノ細孔を介した輸送の過程で DNA スクレオチドの IR スペクトルの分子動力学の評価

\*水口洗毅(富山大), ゴロツキヒナ タチアナ

G222 乾燥過程における皮膚内水分の測定  
\*白樫了(東大), 古川敏光(芝浦工大), 山田純

G223 凍結手術における凍結領域の予測; 血流の影響を考慮したみかけの熱伝導率利用の試み  
\*シュラブ ムハマド(九大), 王海東, 福永鷹信, 藏田耕作, 高松洋

G224 振動カテーテルを用いてカテーテルアブレーション中の接触力による影響

\*于凱鴻(東北大), 山下哲以(ジェ・エム・エス), 新行内成晃(コバル電子), 松本万夫(埼玉医科大), 太田信(東北大)

G225 不可逆的電気穿孔による生体擬似組織の電気的特性の変化  
\*藏田耕作(九大), 中村小春, 福永鷹信, 王海東, 高松洋

G23 13:10 - 14:10 融解・凝固 1

G231 矩形断面流路におけるマイクロカプセルスラリーの複合対流熱伝達  
堀部明彦(岡山大), 春木直人, HYUNG SUP Im, \*前田進太郎

G232 相変化エマルジョンの熱伝達特性  
\*森本崇志(青山学院大院), 熊野寛之(青山学院大), 富樫憲一

G233 金属繊維材混合パラフィン系潜熱蓄熱材の蓄放熱挙動に対する金属繊維径の効果  
\*春木直人(岡山大), 堀部明彦

## &lt;H 室&gt;

H21 9:00 - 10:20 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 3

H211 塩化カルシウム/水系化学蓄熱の蓄放熱動作の安定性  
\*小林敬幸(名大), 江崎丈裕, 安田道貴

H212 塩化カルシウム/水系を用いたケミカルヒートポンプの開発  
寺内孝幸(東工大), 井口寛, 藤岡恵子(ファンクショナル・フルイッド), \*加藤之貴(東工大)

H213 塩化カルシウム/硬殻シリカカプセルコンポジットの熱物質移動特性  
\*鈴木洋(神戸大院), 藤岡恵子(ファンクショナルフルイッド), 日出間るり(神戸大), 菰田悦之(神戸大院)

H214 CaO-Ca(OH)<sub>2</sub> 系化学蓄熱の長期繰返しに伴う蓄放熱動作の耐久性  
\*桑田和輝(名大), 伊藤洋元, 小林敬幸

H22 10:30 - 11:50 OS 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 4

H221 Two phase loop spray impingement cooling system  
\*PHAN Thanh-Long, SINGH Randeep, SAITO Yuji, MOCHIZUKI Masataka (Fujikura Ltd.)

H222 サブクール沸騰熱伝達を利用したマイクロスリットチャンネル冷却に関する研究  
鹿野一郎(山形大), \*岡本直樹, 矢野政孝

H223 高伝熱・低圧力損失のための随伴解析を用いた 3次元伝熱面の形状最適化  
\*亀谷幸憲(東大), 長谷川洋介

H224 塗布構造吸収器における吸収性能に及ぼす濡れ性の影響  
\*江端佑介(アイシン精機), 坪内修, 染矢聡(産総研)

H23 13:10 - 14:30 バイオ伝熱

H231 高温ストレス条件における付着培養細胞の損傷・死滅に関わる形態変化挙動とその反応速度論的モデル  
\*石黒博(九工大), 植村真, 長崎高平, 長尾大輔

- H232 磁性粒子を含有する水系ゲルの誘導加熱時の温度分布測定  
藤岡良太(首都大), \*角田直人, 近藤克哉(鳥取大), 有本英伸(産総研), 山田幸生(電通大)
- H233 医療検体の高品位乾燥保存を目的としたトレハロースの吸湿特性  
\*高野清(東大), 白樫了
- H234 マイクロ波を用いたタンパク質製剤の乾燥保存に関する研究  
\*安部亮佑(九工大院), 多田昇平, 谷川洋文(九工大), 鶴田隆治
- \*福永鷹信(九大), 西村和洋(九大院), 王海東(九大), 藏田耕作, 高松洋
- 1233 100K 以下における E ガラス単繊維の熱伝導率計測  
奥澤健人(東工大), \*井上剛良
- 1234 核融合炉ダイバータ材料の照射時熱物性評価  
\*秋吉優史(阪府大)
- 1235 フッ化物溶融塩 FLiNaK の熱伝導率測定  
\*植木祥高(阪大), 藤田尚之, 八木重郎(核融合研), 芝原正彦(阪大), 相良明男(核融合研)
- <I 室>
- I21 9:00 - 10:20 OS 燃焼研究の最前線 3
- I211 水素添加超希薄プロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する研究  
\*中原真也(愛媛大), 兵頭光(愛媛大院), 岡山康平, 阿部文明(愛媛大)
- I212 スワールバーナに安定化されたアンモニア/空気乱流予混合火炎の排出ガス特性に関する数値解析的研究  
\*SOMARATHNE K.D.Kunkuma (Tohoku Univ.), HATAKEYAMA Soutaro, HAYAKAWA Akihiro, KOBAYASHI Hideaki
- I213 密閉容器内乱流燃焼の OH-CH<sub>2</sub>O PLIF 同時計測  
\*前田つぐみ(東工大院), 吉田真悟, 中吉嗣, 源勇氣, 志村祐康, 店橋護
- I214 定容容器内の水素・空気乱流予混合火炎のフラクタル特性  
\*山田理恵(東工大院), 平岡克大, Yenerdag Basmil, 中吉嗣, 源勇氣, 志村祐康, 店橋護
- I22 10:30 - 12:10 OS 燃焼研究の最前線 4
- I221 固有不安定性に起因するセル状予混合火炎の不安定挙動  
\*門脇敏(長岡技科大), 鷲尾泰佑, トエ トエ アウン, 山崎渉, 勝身俊之, 小林秀昭(東北大)
- I222 管状火炎を用いた可燃限界測定法の研究  
\*橋本一輝(筑波大), 西岡牧人
- I223 Novel methodology for measuring laminar burning velocity at elevated temperature using micro flow reactor with a controlled temperature profile  
\*LYU Jiayan (Tohoku Univ.), TEZUKA Takuya, NAKAMURA Hisashi, MARUTA Kaoru (Tohoku Univ., Far Eastern Federal Univ.)
- I224 当量比依存性を考慮したプロパンの簡易化学反応機構  
\*佐々木優太(東北大), 大西正悟, 中村寿, 丸田薫(東北大, 極東連邦大)
- I225 Triple flame の火炎構造に関する数値解析  
\*林直樹(名大院), 堰勇人, 山下博史(名産研)
- I23 13:10 - 14:50 熱物性
- I231 ロックインサーモグラフィ式周期加熱法による炭素系複合材料の面内熱拡散率異方性計測  
\*辻輝(名大), 長野方星, 関根誠(ベテル), 栗野孝昭
- I232 マイクロビームセンサを用いた非金属薄膜の面方向熱伝導率測定  
\*地下大輔(東京海洋大), 佐川賢太郎, 井上順広
- <J 室>
- J21 9:00 - 10:20 沸騰 3
- J211 Study on the Collapse Point of Vapor Film in the Transient Film Boiling around a Finite-Length Vertical Cylinders with Various Geometry  
\*Pa Pa Myo Win(長崎大), 桃木悟, 九村真生, 樋口拓弥
- J212 二次元温度場計測を通じた高温加熱面の膜沸騰崩壊温度および沸騰熱伝達特性  
大竹浩靖(工学院大), \*上野仁裕(工学院大院), 長谷川浩司(工学院大)
- J213 低熱伝導率を持つ樹脂の膜厚が与える配管予冷時間への影響  
\*武田大輔(静岡大), 吹場活佳, 荒木田一登, 小林弘明(JAXA)
- J214 スクラビング時の蒸気凝縮効果と液位変動  
\*金井大造(電中研), 古谷正裕, 新井崇洋, 西義久
- J22 10:30 - 12:10 沸騰 4
- J221 スプレー沸騰冷却時の固液接触可視化と表面温度計測による濡れ開始条件検討  
\*永井二郎(福井大), 大部晴佳
- J222 局所加熱による液滴の内部対流と蒸発速度への影響  
\*喜多由拓(九大院), ASKOUNIS Alexandros(九大), 河野正道, 高田保之, KIM Jungho (メリーランド大), SEFIANE Khellil (エディンバラ大)
- J223 高温面上への液滴衝突時の非定常遷移沸騰過程  
\*光武雄一(佐賀大), 椿耕太郎, 福島慎平
- J224 平板型ヒートパイプにおける異なる濡れ性条件下での沸騰特性  
小笠原克(名大), 柳澤翔太, 伊藤高啓, \*辻 義之, 山下征士(トヨタ自動車), 渡橋学笑, 別所毅
- J225 擬二次元沸騰現象を支配する因子の解析  
\*小川慶太(京大), 安本悠一, 松本充弘
- J23 13:10 - 14:30 沸騰 5
- J231 強制対流サブクール沸騰の可視化とボイド率解析  
\*大川富雄(電通大), 海保和宏, 宮野直樹, 榎木光治
- J232 強制対流沸騰熱伝達に及ぼす人工キャビティの影響に関する研究  
\*魏霖(神戸大), 浅野等
- J233 水平正方形流路内での R32 の蒸発熱伝達に関する実験  
\*地下大輔(東京海洋大), 佐川賢太郎, 井上順広

J234 コーティングされたアルミプレートを用いた熱交換器におけるアンモニア沸騰熱伝達特性  
\*有馬博史(佐賀大), 稲富諒, 小山幸平

<K 室>

K21 9:00 - 10:20 OS ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 1

K211 フォトクロミック金属酸化物ナノ粒子の特性  
\*松井聡紀(広島大), 井上修平, 松村幸彦, 高田啓二(関西大), 内野喜一郎(九大), 梶山博司(徳島文理大)

K212 イオン液体の分子構造と粘度が溶質発光分子の回転ダイナミクスに与える影響  
栗原大樹(東工大院), 氷室佑樹, \*村上陽一

K213 金属有機化学物分解法による太陽光吸収膜の生成  
\*鄭卓亜(九工大), 伊東明莉, 矢吹智英, トランシャン ローラン, 櫻井篤(新潟大), 清水陽一(九工大), 宮崎康次

K214 近接場光を用いた自己組織化単分子膜の熱的パターンニングによるバイオリソグラフィ  
\*長島岳紘(慶大), 神出真緒(慶大院), 長南友太(慶大), 須藤亮, 田口良広

K22 10:30 - 12:10 OS ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 2

K221 HPT 加工にて作製したバルクナノシリコンの熱・電気伝導特性  
\*河野正道(九大), 川脇秀一, 三浦飛鳥(東大), SIVASANKARAN Harish(九大), 生駒嘉史, 高田保之, 塩見淳一郎(東大), 堀田善治(九大)

K222 ナノポーラス構造シリコンの熱輸送特性  
\*柏木誠(東大), 須藤祐太, 堀琢磨, 志賀拓磨, 塩見淳一郎

K223 極小エピタキシャル Ge ナノドット含有 Si ナノ構造における熱伝導制御  
山坂司祐人(阪大), 渡辺健太郎, 坂根駿也, \*中村芳明

K224 シリコン二次元フォノンニック結晶における熱伝導率の低減  
\*柳澤亮人(東大), Maire Jeremie, 野村政宏

K225 2 $\omega$  法による熱伝導率測定の汎用性向上  
\*奥畑亮(阪大院), 渡辺健太郎, 池内賢朗 (アドバンス理工), 石田明広(静岡大学), 中村芳明(阪大院)

K23 13:00 - 15:00 OS ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 3

K231 Thermal conductivity of suspended graphene monolayer measured with a T-type sensor  
\*王海東(九大), 福永鷹信, 藏田耕作, 高松洋

K232 【招待講演】単一ナノ材料の基板上伝熱計測技術の考察  
\*児玉高志(東大), Goodson Kenneth (スタンフォード大)

K233 高性能熱電変換材料の探索に向けた格子熱伝導のモデリング

\*志賀拓磨(東大院), 明戸大介, ライ フウ, 塩見淳一郎

K234 カーボンナノチューブの熱電特性に及ぼす局所変形と欠陥の影響

\*大西正人(東大), 志賀拓磨, 塩見淳一郎

K235 単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレーネルンスト効果

\*小鍋哲(東理大), 山本貴博

第3日 5月26日(木)

<B 室>

B31 9:00 - 10:20 OS 水素・燃料電池・二次電池 7

B311 バイオ電池酵素固定化電極における反応界面形成と基質供給に関する検討  
\*西田耕介(京工織大), 中村拓也, 坂本一希, 藤田健介(阪大)

B312 電界紡糸炭素多孔質材料のレドックスフロー電池電極への適用

\*山本耕平(阪大), 増田祥平(東工大), 鈴木崇弘(阪大), 松本英俊(東工大), 津島将司(阪大)

B313 導電性多孔体を用いた半固体フロー電池の構築と充放電特性

\*古田洋平(阪大), 鈴木崇弘, 津島将司

B314 レドックスフロー電池における活物質輸送と電流密度分布が性能に及ぼす影響解析

\*内山真理(北大院), 嶋田遼(北大), 鈴木研悟, 田部豊, 近久武美

B32 10:30 - 12:10 OS 水素・燃料電池・二次電池 8

B321 液冷を適用したリチウムイオン電池モジュールの冷却性能評価

\*和田怜(東芝), 首藤正志, 黒川健也, 小池昇

B322 電気自動車用リチウム電池パックにおける熱管理特性の実験解明

高明(天津大), 王世学, \*陳志豪

B323 電気自動車用リチウム電池パックの温度制御に関するシミュレーション

張寧(天津大), \*張静静, 王世学, 宇高義郎

B324 リチウム空気電池性能特性に及ぼす酸素濃度・析出物の影響

\*植村豪(東工大院), 古山知諒, 鳥飼孝介, 笹部崇, 今西誠之(三重大), 平井秀一郎(東工大院)

B325 X 線 CT 計測によるリチウム空気電池デンドライト生成の基礎的研究

\*田村俊介(東工大), 植村豪(東工大院), 笹部崇, 今西誠之(三重大), 平井秀一郎(東工大院)

<C 室>

C31 9:20 - 10:20 空調・熱機器 1

C311 階層構造型磁気ヒートポンプの材料構成の最適化に関する検討

\*川南剛(神戸大), 曾田剛, 山下敬一朗(大電), 大西孝之, 副島慧, 和田裕文(九大), 平野繁樹(道総研),

- 岡村哲至(東工大), 裏相哲(サンデン AT), 平野直樹(中電)
- C312 多分岐管における気液二相冷媒流の分配に関する研究  
\*中尾祐基(三重大), 野本秀隆(デンソー), 江川彰(三重大), 廣田真史
- C313 植物工場における栽培環境が収穫量におよぼす影響  
\*森内浩史(精研), 上田保司, 吉田篤正(阪府大), 木下進一
- C32 10:30 - 11:50 空調・熱機器 2
- C321 着霜環境下におけるスプリッタープレート付き冷却円管の伝熱特性 に対する諸因子の影響  
\*吉村祐亮(静岡大院), 吹場活佳, 佐藤颯大, 名尾恭介(静岡大)
- C322 ディスク&ドーナツ型多管式熱交換器の管外流動特性に関する研究  
\*水野昌幸(IHI), 藤原浩介
- C323 表面微細凹凸の着霜に及ぼす影響  
\*矢嶋健史(東京電力), 大久保英敏(玉川大), 永田彬, 関光雄(NATOMICS)
- C324 空調用フィンレスフラットチューブ熱交換器のチューブ配列が着霜下の伝熱性能に及ぼす影響  
\*大西元(金沢大), 島本貴裕(金沢大院), 多田幸生(金沢大)

## &lt;D室&gt;

- D31 9:20 - 10:20 自然エネルギー1
- D311 数値シミュレーションによる井戸内設置地中熱交換器の熱抽出・放熱特性  
\*山口正敏(日本地下水開発), 沼澤喜一, 堀野義人, 稲毛重之
- D312 地中熱の空調利用に適したサイクルに関する実験  
\*塩谷光基(佐賀大), 椿耕太郎, 今浪翔太, 光武雄一
- D313 相変化物質を含有する作動流体によるサイクル出力向上に関する研究  
森田慎一(米子高専), \*谷村幸太(スリーエステクノ), 水庸隆(米子高専), 山田貴延(北見工大), 堀部明彦(岡山大), 春木 直人
- D32 10:30 - 11:30 自然エネルギー2
- D321 直接膨張方式地中熱ヒートポンプの性能評価  
\*石黒修平(山梨大), 田中大輔(山梨大院), 船谷俊平(山梨大), 一宮浩市, 武田哲明
- D322 地下水熱採熱ポテンシャルを目指した井戸内ゾンデ  
\*横山孝男(山形大), 村中康秀(静岡県), 田岸宏孝(アサノ大成), 久保達生, 王欣(マキテック)
- D323 鋼管杭を利用した地中熱ヒートポンプの熱交換性能  
\*武田哲明(山梨大), 船谷俊平, 石黒修平, 渡邊弘美(藤島建設)

## &lt;E室&gt;

- E31 9:20 - 10:20 自然対流 1
- E311 回転二重円筒内非定常自然対流場の数値解析  
\*加藤秀明(静岡大院), 桑原不二朗
- E312 堅型円筒容器内における  $Al_2O_3$ -水ナノフルードの自然対流  
\*赤松正人(山形大), 亀山拓人, 蓬田裕己, 岩本光生(大分大), 尾添紘之(元九大)
- E313 大規模垂直平板の加熱開始に伴う自然対流境界層の時空間発展  
\*服部康男(電中研), 中尾圭佑, 須藤仁, 江口譲, 坂本晶子(電力計算センター), 石原修二
- E32 10:30 - 11:50 自然対流 2
- E321 水平あるいは垂直方向に等間隔配置された複数熱源まわりの自然対流の伝熱特性について  
\*北村健三(豊橋技科大), 光石暁彦, 木村文義(兵庫県大)
- E322 平行な対向壁を有する水平上向き加熱円板まわりの自然対流の流動と伝熱  
\*木村文義(兵庫県大), 松尾峻志, 北村健三(豊橋技科大)
- E323 等熱流束で加熱された垂直平板上乱流自然対流の熱輸送機構に関する研究  
\*稲垣照美(茨城大学), 李艶栄, 原田混士
- E324 パルス発光 LED を用いた光誘起蛍光法による、加熱密閉空間内の熱流体温度分布の計測  
\*長島周平(神戸大), 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹

## &lt;F室&gt;

- F31 9:20 - 10:20 熱音響 1
- F311 熱音響システムにおける熱漏れの影響に関する検討  
\*和田貴裕(滋賀県大), 坂本眞一, 折野裕一郎, 上野草
- F312 フレネルレンズを用いた太陽熱駆動ループ管型熱音響冷却システムの基礎検討  
\*江川航平(滋賀県大), 坂本眞一, 折野裕一郎, 和田貴裕
- F313 マルチメッシュ型スタックを用いた熱音響エンジンの高性能化  
\*多田幸生(金沢大), 梶博貴(金沢大院), 大西元(金沢大), 経田僚昭(富山高専)
- F32 10:30 - 12:10 熱音響 2
- F321 熱音響デバイスの熱的条件に関する数値解析  
\*小清水孝夫(北九州高専), 坂本眞一(滋賀県大)
- F322 複雑ネットワーク理論を用いた希薄吹き消えのオンライン検知と回避  
\*船津基以(東理大), 賀来健太郎, 辻本綾佑(立命館大院), 衣川輝, 後藤田浩(東理大)
- F323 ガスタービンモデル燃焼器内で発生する燃焼振動の挙動  
\*賀来健太郎(東理大), 中垣佳剛(立命館大院), 船津基以(東理大), 後藤田浩

## &lt;G室&gt;

G31 9:00 - 10:20 融解・凝固 2

G311 直接接触潜熱蓄熱槽における凝固高さ抑制の検討  
\*NAING Than Tun(岡山大), 堀部明彦, 春木直人, 高瀬佳孝

G312 金属箔ベルト製氷システムから得られる板状氷の結晶方向  
\*東野雄介(金沢大), 寺岡喜和, 松本悠佑

G313 分岐流路におけるアイスラリーの流動・分配特性  
\*牧野裕樹(青山学院大院), 谷口朋宏, 熊野寛之(青山学院大)

G314 矩形通気屋根による自立型ソーラー融雪  
横山孝男(山形大), \*大塚光, 鹿野一郎, 高橋隆一(アイジー工業), 国分利秀

G32 10:30 - 12:10 融解・凝固 3

G321 合成高分子を作用させた疎水性固体表面の検討  
\*稲田孝明(産総研), 小山寿恵, 中島秀介(金沢大), 瀬戸章文

G322 TBAB 水溶液の過冷却解消に及ぼす電極材質の影響  
\*後藤陽紀(青山学院大院), 関根章司(青山学院大), 外山泰弘(デンソー), 川北美香, 熊野寛之(青山学院大)

G323 水酸基数と冷却面温度が氷の付着力に及ぼす影響の検討  
\*山中聖一(中央大院), 松本浩二(中央大), 椿大輔(川崎重工), 南谷和行(中央大院), 久保田寛之

G324 連成伝熱を伴う固液相変化問題における形状最適設計に関する研究  
\*木下英典(東大), 森本賢一, 鈴木雄二

G325 非常常細線法によるセミクラスレートハイドレートの熱伝導率  
\*藤浦京介(慶大院), 大村亮(慶大), 田口良広, 長坂雄次

## &lt;H室&gt;

H31 9:00 - 10:20 OS 化学プロセスにおける熱工学 1

H311 流動方向制御という観点からの薄膜内 Marangoni 対流の数値解析  
\*ニキルアドカール(阪大), 山本卓也, 岡野泰則

H312 インクジェット成膜における温度差および溶質濃度差マランゴニ対流の寄与  
\*石塚博孝(九大), 谷川拓馬, 深井潤

H313 多孔質粒子充填層を用いた液体メタノールからの水素のパッシブ生成  
\*奥山邦人(横国大), 一美華乃子(横国大院), 田中美香子(横国大)

H314 微小重力環境下における InGaSb 凝固に関する数値解析  
\*岡野泰則(阪大), ジンシン, 山本卓也, 高木洋平, 早川泰弘(静岡大), 稲富裕光(JAXA)

H32 10:30 - 11:50 OS 化学プロセスにおける熱工学 2

H321 同軸ダブルノズルによる潜熱保有物質を内包した硬殻シリカカプセルの作成  
\*田丸正人, 鈴木洋(神戸大院), 日出間り(神戸大), 菰田悦之(神戸大院)

H322 高分子ナノコンポジット薄膜内の有機修飾ナノ粒子の空間構造に及ぼす thermal annealing の影響  
\*劉洋(東北大), 加藤巧, 村井優太, 久保正樹, 塚田隆夫, 高見誠一, 阿尻雅文

H323 バイオマス主成分の熱分解中における化学反応熱が伝熱に及ぼす影響に関する研究  
\*田之上健一郎(山口大), 濱岡佑紀, 西村龍夫, 上村芳三(ペトロナス工科大), 谷口美希(中外炉工業), 笹内謙一

H324 鶏舎用断熱材の伝熱特性に関する研究  
\*板谷義紀(岐阜大), 伊藤大輝(岐阜大院), 小林信介(岐阜大), 椿井康司(ハイテム)

## &lt;I室&gt;

I31 9:00 - 10:20 OS 燃焼研究の最前線 5

I311 内燃機関の吸気管における非定常熱伝達現象の実験的研究  
\*一柳満久(上智大), 鈴木隆

I312 高感度のワイヤレス温度センサを用いた燃焼場の壁温計測  
\*李敏赫(東大), 森本賢一, 鈴木雄二

I313 渦流燃焼器による小型発電システムの開発 (第 2 報)  
\*埜本優樹(広島大), 下栗大右, 松本亮介(関西大)

I314 太さの異なる電線被覆上を燃え広がる火炎の消炎限界に対する空気流の向きの影響  
\*永地大志(北大), 三井郁矢, 木澤光希, Citerne Jean-Marie(Université Pierre-et-Marie Curie), Dutilleul Hugo, Jomaas Grunde(Technical University of Denmark), Legros Guillaume(Université Pierre-et-Marie Curie), 藤田修(北大)

I32 10:30 - 11:50 OS 燃焼研究の最前線 6

I321 プラズマ分子線散乱法による水素ラジカル吸着の計測  
\*齋木悠(名工大), 杵淵郁也(東大), 范勇, 鈴木雄二

I322 Investigation of wall chemical effect on DME/air weak flame by HCHO-PLIF  
\*万遂(東大院), 范勇(東大), 丸田薫(東北大), 鈴木雄二(東大)

I323 温度分布制御型マイクロフローリアクタによる光学計測を用いたメタンの燃焼特性に関する研究  
\*恩田貴浩(東北大), 清水貴茂, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫(東北大, 極東連邦大)

I324 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた超希薄メタン予混合火炎に及ぼす希釈ガスの影響に関する研究  
\*小林友哉(東北大), 中村寿, 手塚卓也, 丸田薫



<J 室>

- J31 9:00 - 10:20 混相流 1
- J311 微粒子流れの熱流動解析のための DEM-LBM ハイブリッドモデルの開発  
\*山口朝彦(長崎大), 岩永大輔, 筒井燦, 桃木悟
- J312 熱拡散を伴う二相噴流の直接シミュレーション  
\*吉田竜也(新潟大), 野崎貴之, 松原幸治
- J313 凝固点降下によるメタンハイドレート貯留層模擬試料の浸透率制御に関する研究  
\*山田光(東北大院), GUILLAUME Lacaille, CHEN Lin(東北大), 江目宏樹(芝浦工大), 庄司衛太(東北大), 岡島淳之介, 小宮敦樹, 圓山重直
- J314 Numerical Simulation of Core-Scale Methane Hydrate Dissociation Flow and Heat Transfer in Porous Media  
\*CHEN Lin(東北大), 山田光, GUILLAUME Lacaille, 神田雄貴, 庄司衛太, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 圓山重直
- J32 10:30 - 11:50 混相流 2
- J321 超音波照射下における MB と周囲液の速度同時測定  
垣内裕貴(福井大), \*高橋剛, 阿部一帆, 駕田康弘, 太田淳一
- J322 二相流サイクロンノズルに発生する気柱の振動に関する研究  
\*中尾聡志(豊橋技科大), 横山佳之, 川村洋介, 中川勝文(豊橋技科大)
- J323 エジェクタ内部における駆動流の境界と衝撃波の諸特性に関する実験的研究  
\*陳作舟(東大院), 党超鋸, 飛原英治
- J324 ノズル内に発生する二相流衝撃波による圧力変動に関する研究  
\*西嶋春幸(豊橋技科大), 定村和佳(豊橋技科大), 川村洋介(豊橋技科大), 中川勝文(豊橋技科大)

<K 室>

- K31 9:00 - 10:20 OS ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 4
- K311 DPD 法を用いた凍結を伴うマイクロ正方キャピティ内流れに及ぼす壁面温度境界条件の影響に関する研究  
\*山田格(名工大), JOHANSSON Erik(ルンド大), 玉野真司(名工大), SUNDEN Bengt(ルンド大), 森西洋平(名工大)
- K312 水-メタノール混合系の固液間速度すべりと運動量輸送に関する分子動力学解析  
中岡聡(阪大), \*山口康隆
- K313 固液界面熱流動のナノ・レーザ計測と分子動力学の相互補完解析に向けて  
\*栗山怜子(慶大), 木下正治, 立石哲郎, 佐藤洋平
- K314 固液界面熱流動のナノ・レーザ計測と分子動力学の相互補完解析に向けて  
\*山本憲(慶大), 土居勇人, 湯原大輔, 泰岡頭治, 佐藤洋平, 菱田公一

- K32 10:30 - 12:10 OS ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 5
- K321 フルオロカーボン系 SAM と各種溶媒の界面熱輸送と界面親和性に関する分子論的研究  
\*菊川豪太(東北大), 根本充(東北大院), 別所毅(トヨタ自動車), 山下征士, 小原拓(東北大)
- K322 規則性シリンダー型ナノ細孔における水の移動現象  
\*坂本数貴(東大), 黄峻浩, 片岡祥(産総研), 遠藤明, 大宮司啓文(東大)
- K323 メソポーラスシリカ薄膜内部のイオン移動現象を用いた逆電気透析発電  
\*黄峻浩(東大), 遠藤明(産総研), 大宮司啓文(東大)
- K324 吸着剤に含まれる水の比熱に関する研究  
小島大輝(CKD), \*平澤良男(富山大), 小泉芳貴(富山大)
- K325 液体水素中の気泡核生成に及ぼす量子性の影響  
片山千春(九大), 永島浩樹(琉球大), 徳増崇(東北大), 渡邊聡(九大), \*津田伸一

## 優秀プレゼンテーション賞（第53回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会  
委員長 桃木 悟

第53回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で学生・若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。企業・大学・研究機関等の多数の皆様にご参加いただきたく、お願いいたします。

開催日：平成28年5月24日（火） シンポジウム第1日  
発表形式：発表者1名あたりアピールスライドの提出とポスタープレゼンテーションを行っていただく予定です。各プレゼンテーションは、以下の内容を予定しています。

○アピールスライド（AS）

- ・第53回伝熱シンポジウムでは、アピールスライドをシンポジウムホームページや初日の休憩時間に各会場で上映する予定です。A4横サイズ1ページのアピールスライドをPDF形式で事前提出していただきます。スライドが映しだされる時間は1発表あたり約10秒です。発表内容を細かくスライドにまとめるのではなく、内容がすぐに伝わるようなスライドをご準備ください。

○ポスタープレゼンテーション（PP）15:00～17:00

- ・講演番号により、前半および後半の発表時間帯を設定します。詳細な時間スケジュールは後日連絡します。
- ・ポスターを貼るパネルのサイズは、縦2100mm×横900mmで、縦長に設置されます。A0サイズのポスター（1189mm×841mm）が最適サイズです。また、貼り付けには画鋏ではなく粘着テープを用います。

対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成28年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。

応募資格：発表時（＝審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生会員）、または入会申込中であること（事前の入会を強く推奨）。注：本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募できません。

審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。

表彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰します。

<最新情報はシンポジウムのホームページに公開します>

**日本伝熱学会主催 第4回 国際伝熱フォーラム**  
**International Forum on Heat Transfer (IFHT2016)**

**趣 旨**

日本伝熱学会は、世界最大かつ最もアクティブな伝熱の研究者・技術者集団として、世界中の研究者が集い、新しい伝熱研究のトレンドを生み出す国際伝熱フォーラムを開催します。2004年に京都でフォーラムがスタートし、2008年には東京、前回、2012年には長崎で第3回のフォーラムが開催され、毎回150件を超える発表で盛り上がりを見せています。第4回は、2016年に仙台でフォーラムを開催します。伝熱分野の最先端を走る研究者によるキーノート講演も企画しています。一般セッションでは伝熱の広い分野から発表を募集します。多くの方々のご発表及びご参加をお願い致します。

**開催日時** 2016年11月2日(水)～4日(金)  
**参加費** (事前申込み9月30日締切) 一般: 50,000円, 学生 20,000円  
(当日申込み) 一般: 60,000円, 学生 30,000円

**会 場** 仙台国際センター  
〒980-0856 仙台市青葉区青葉山無番地 (<http://www.aobayama.jp/>)

**キーノート講演**

Yoshinori Itaya	Gifu University, Japan
Arun Majumdar	Stanford University, USA
Young-Hoon Song	Korea Institute of Machinery & Materials, Korea
W. Q. Tao	Xian Jiao Tong University, China
Shohji Tsushima	Osaka University, Japan
Evelyn N. Wang	MIT, USA

**フォーラム構成**

- ・ キーノート講演
- ・ ポスターセッション (150件を予定: ショットガン形式の口頭発表+ポスター)
- ・ The Nukiya Memorial Award 受賞者による記念講演

**スケジュール**

2016年4月29日 Short abstract (発表申し込み) 提出締切  
5月31日 発表申し込みの受理通知  
7月29日 Full manuscript (Copyrightは著者が保持) 提出締切 (A4, 2～6ページ)  
8月25日 Full manuscript 受理通知  
9月15日 Final manuscript 提出締切  
9月30日 事前参加申込締切

**Web ページ** 最新情報は、<http://ifht2016.org> でご確認ください。

**問い合わせ先** 組織委員会委員長 小原 拓  
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1  
東北大学 流体科学研究所  
Tel&FAX: 022-217-5277 E-mail: [ifht2016@microheat.ifs.tohoku.ac.jp](mailto:ifht2016@microheat.ifs.tohoku.ac.jp)

実行委員会委員長 麓 耕二  
〒036-8561 弘前市文京町 3  
弘前大学 大学院理工学研究科 知能機械工学専攻  
Tel&FAX: 0172-39-3676 E-mail: [kfumoto@hirosaki-u.ac.jp](mailto:kfumoto@hirosaki-u.ac.jp)



## 編集出版部会からのお知らせ ー各種行事・広告などの掲載についてー



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対象	対応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌と HP に掲載，ML でも配信	申込者は、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML 担当）、広報委員会委員長（HP 担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1 件当たり 4 分の 1 ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載してリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP 担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP 担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載（バナー広告のみ，有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HP バナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては <a href="http://www.htsj.or.jp/banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/banner.pdf</a> をご参照下さい。

### 【連絡先】

- ・総務部会長：小野直樹（芝浦工業大学）：[naokiono@sic.shibaura-it.ac.jp](mailto:naokiono@sic.shibaura-it.ac.jp)
- ・編集出版部会長：廣田真史（三重大学）：[hiroya@mach.mie-u.ac.jp](mailto:hiroya@mach.mie-u.ac.jp)
- ・広報委員会委員長：田口良広（慶應義塾大学）：[tag@sd.keio.ac.jp](mailto:tag@sd.keio.ac.jp)
- ・総務担当副会長補佐協議員：笹部 崇（東京工業大学）：[sasabe.t.ab@m.titech.ac.jp](mailto:sasabe.t.ab@m.titech.ac.jp)
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子：[office@htsj.or.jp](mailto:office@htsj.or.jp)

### 【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルをお願いします。
- ・HP はメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・ML では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

事務局からの連絡

54 期入会 (2015.11.12~2016.2.29) 正 3 名、学生 3 名

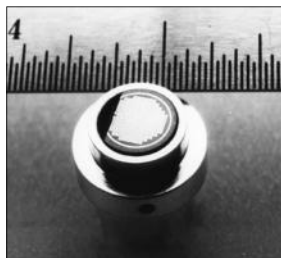
資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
正	佐藤 航	(株)日立製作所 研究開発グループ	学生	糸賀 裕哉	茨城大学工学部 機械工学科
正	吉田 敦史	リコー電子デバイス株式会社	学生	飯島 友	茨城大学工学部 機械工学科
正	矢野 大志	国立大学法人 横浜国立大学	学生	大塚 光	山形大学大学院 理工学研究科



# 熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 ( $W/cm^2$ ) に比例した直流電圧を出力します。  
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。  
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、  
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

## 熱流束 マイクロセンサー



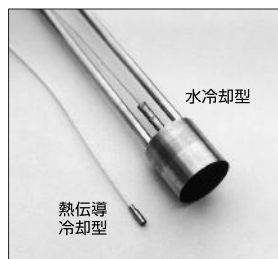
### 特徴

- 最高速の応答 (約 6 $\mu$ 秒)
- 850 $^{\circ}$ Cまで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

### 使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

## サーモゲージ

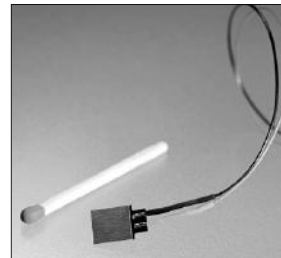


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

## gSKIN<sup>®</sup> 熱流束センサー



「gSKIN<sup>®</sup>」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72 $m^2$ の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

### 使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

## 熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL

[www.senstech.jp](http://www.senstech.jp)

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F  
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

E-mail

[info@senstech.jp](mailto:info@senstech.jp)



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

### CAPTEC 社(フランス)

CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。  
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

#### 熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm  
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)  
温度範囲: -200～200°C  
応答速度: 約 200ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

#### 輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm  
厚み: 0.25mm  
温度範囲: -200～250°C  
応答速度: 約 50ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
波長領域: 赤外/可視+赤外

### MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

#### 熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft<sup>2</sup>sec(フルスケール)  
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)  
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)  
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)  
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下\*  
再現性: ±0.5%  
較正精度: ±2%  
オプション: 輻射窓・視野角指定等

\*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

#### 超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】  
表面温度及び表面熱流束計測  
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等  
【最小プローブ径】  
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】  
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C  
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C  
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C  
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C  
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

### ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

#### 高温用熱流板



最高温度: 980°C  
応答速度: 0.1s  
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

#### 水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C  
応答速度: 0.1s  
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm<sup>2</sup>

#### 当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

#### 有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B  
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522  
URL: <http://www.techno-office.com>

## 編集出版部会ノート

### *Note from the JHTSJ Editorial Board*

本号では、本学会元会長であった故長野靖尚先生、故笠木伸英先生を追悼し、先生方が先進的な研究をされた強制対流伝熱に焦点を当てて特集を組み、特にご活躍された乱流伝熱分野の記事を多く掲載させていただきました。近年では、伝熱シンポジウムでも乱流伝熱セッションが消え、乱流伝熱研究の発表の場が、対流やその他のセッションとなっていることは、乱流伝熱を研究している者にとっては寂しい限りですが、伝熱機器の小型化や技術革新によって、様々な流域における伝熱も脚光を浴びてきたためだと思っています。そのため、本特集では、追悼特集とはしてはありますが、最近の研究や技術開発の動向も鑑み、乱流伝熱特集とはせずに「強制対流伝熱の昨今」として特集させていただきました。特集には歴史的な記事もありますので、古さと新しさが同居した強制対流伝熱研究と技術に関してご興味を持っていただければ幸いです。最後に、長野靖尚先生、笠木伸英先生のご冥福を心からお祈りするとともに、先生方の伝熱研究に対するご意思が後世に伝わればと思います。また、本特集の執筆を快く引き受けていただきました先生方に厚くお礼申し上げます。

服部 博文 (名古屋工業大学)

*Hattori, Hirofumi (Nagoya Institute of Technology)*

*e-mail: hattori@nitech.ac.jp*

副会長 功刀 資彰 (編集出版担当, 京都大学)

部会長 廣田 真史 (三重大学)

委員

(理事) 桑原 不二郎 (静岡大学), 野村 信福 (愛媛大学), 山田 雅彦 (北海道大学)

(協議員) 須賀 一彦 (大阪府立大学), 鈴木 雄二 (東京大学), 多田 幸生 (金沢大学),  
土屋 敏章 (富士電機(株)), 中村 元 (防衛大学校), 中山 浩 (中部電力(株)),  
西村 顕 (三重大学), 服部 博文 (名古屋工業大学)

TSE チーフエディター 花村克悟 (東京工業大学)

編集幹事 伏信一慶 (東京工業大学)

編集出版部会 連絡先: 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

廣田 真史

Phone & Fax: 059-231-9385 / E-mail: [hirota@mach.mie-u.ac.jp](mailto:hirota@mach.mie-u.ac.jp)