

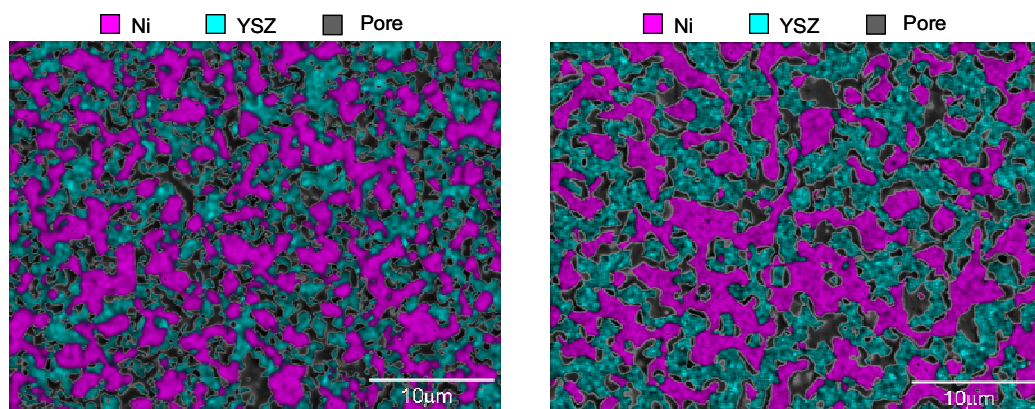
伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

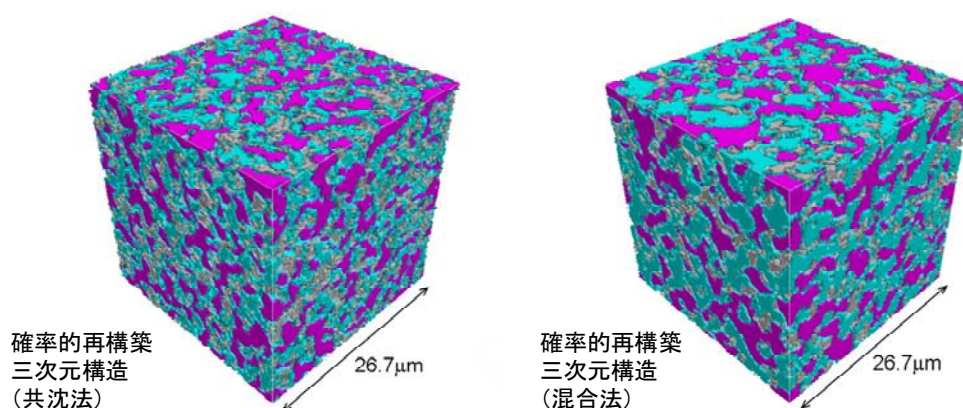
ISSN 1344-8692 Vol. 48, No. 202
2009. 1

HSTJ

◆特集：マイクロ・ナノの計測技術◆



SEM-EDX画像（共沈法粒子から作成された燃料極） SEM-EDX画像（混合法粒子から作成された燃料極）



固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料極微細構造

Anode Microstructure of Solid Oxide Fuel Cell

鹿園直毅（東京大学） Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo)
shika@feslab.t.u-tokyo.ac.jp

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料極は、イオン導電性を有する電解質（YSZ）と電子導電性を有する金属（Ni）が混合された多孔質体です。電解質/金属/空隙の三相が交わり電気化学反応が活発に行われる三相界面の量や、各相の連結性（導電性）によってその性能が大きく影響されます。また長期の高温運転では、粒子の焼結や体積変化によって性能が劣化するので、性能とともに耐久性の高い構造の提案が望まれています。本画像は燃料極の SEM-EDX 像と、その 2 次元画像をもとに確率的に再構築した 3 次元構造です。左が共沈法による原料粉体を用いて作成した燃料極、右が NiO と YSZ を機械的に混合した粒子から作成された燃料極です。このような 3 次元微細構造でのガス、イオン、電子の輸送と電気化学反応とを連立することで、電極過電圧を数値予測することができます。過電圧予測シミュレーションによって SOFC 電極設計の高度化が実現できるものと期待されます。

本画像作成には、元東京大学大学院学生の山口悠氏、鈴江祥典氏、坂本雄祐氏、現東京大学大学院学生の高木紀和氏に協力頂きました。また、セル製作には、AGC セイメケミカル株式会社、株式会社環境セラミックスリサーチに協力頂きました。記して謝意を表します。

伝 熱

目 次

〈特集：マイクロ・ナノの計測技術〉

ナノメートル，ナノグラム，ナノワットの熱計測	中別府 修（明治大学）	1
MEMS 伝熱面を用いた沸騰機構の解明	丹下 学（産業技術総合研究所）	8
光 MEMS を用いたマイクロ熱物性センサー	田口良広，長坂雄次（慶應義塾大学）	14
ナノ材料の熱物性計測	高橋厚史（九州大学），藤井丕夫（産総研）	20

〈プロジェクトQ〉

「ポンプレス水冷システムの開発」	一法師茂俊（三菱電機株式会社）	26
---------------------------	-----------------	----

〈会議報告〉

「キッズ・エネルギー・シンポジウム 2008」の報告	中部主敬（実行委員会委員長，京都大学）	31
-------------------------------------	---------------------	----

〈巻頭グラビア：heat-page〉

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料極微細構造	鹿園直毅（東京大学）	表紙裏
-----------------------------------	------------	-----

〈行事カレンダー〉 37

〈お知らせ〉

名簿発行に代わる情報検索システムの導入について（会告）	38
第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文募集	40
事務局からの連絡	45
編集出版部会ノート	50

CONTENTS

< **Special Issue** >

Nano-meter, nano-gram, nano-watto in thermal measurement
Osamu NAKABEPPU (Meiji University) 1

Boiling on MEMS heat transfer surfaces
Manabu TANGE (AIST) 8

Micro Thermophysical Properties Sensor using Optical MEMS
Yoshihiro TAGUCHI, Yuji NAGASAKA (Keio University) 14

Measuring Thermal Property of Nano Materials
Koji TAKAHASHI (Kyushu University), Motoo FUJII (AIST) 20

< **Project Q** >

Development of a Pump-less Water Cooling System
Shigetoshi IPPOUSHI (Mitsubishi Electric co. Ltd.) 26

< **Report** >

Report on 'Kids Energy Symposium, 2008'
Kazuyoshi NAKABE (Chair of the Kids Energy Symp. Committee, Kyoto University) 31

< **Opening-page Gravure: heat-page** >

Anode Microstructure of Solid Oxide Fuel Cell
Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo) Opening Page

< **Calendar** > 37

< **Announcements** > 38

ナノメートル、ナノグラム、ナノワットの熱計測

Nano-meter, nano-gram, nano-watto in thermal measurement

中別府 修 (明治大学)

Osamu NAKABEPPU (Meiji University)

e-mail: onakabep@isc.meiji.ac.jp

1. はじめに

本稿では、特集「マイクロ・ナノの計測技術」に際し、著者が進めているナノテクノロジーを用いた温度・熱、物性計測技術を紹介する。タイトルは、走査型熱顕微鏡開発で目指しているナノメートル空間分解能を持つ温度・熱伝導率計測、チップカロリメトリ (ナノカロリメトリ) が対象とするナノグラム試料の熱分析、高感度サーモパイルを用いたバイオカロリメトリにおける生体試料のナノワットレベル代謝熱計測を意図している。

紹介する温度・熱計測技術は、半導体微細加工技術で作られる薄膜熱電対、薄膜測温抵抗体、カンチレバーやメンブレン構造に基いている。いわゆるマイクロマシン技術や MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を適用し、高性能化したセンシング技術の可能性を紹介する。

2. ナノ空間分解能温度・熱物性計測

2.1 SThM

SThM (走査型熱顕微鏡, Scanning Thermal Microscope) は、図 1 のように、AFM (原子間力顕微鏡, Atomic Force Microscope) のカンチレバー (片持ち梁) プローブに温度や熱の計測機能を付加し、このプローブで試料表面を走査し、ナノスケールでの形状と温度や熱物性画像計測を行う顕微鏡である。

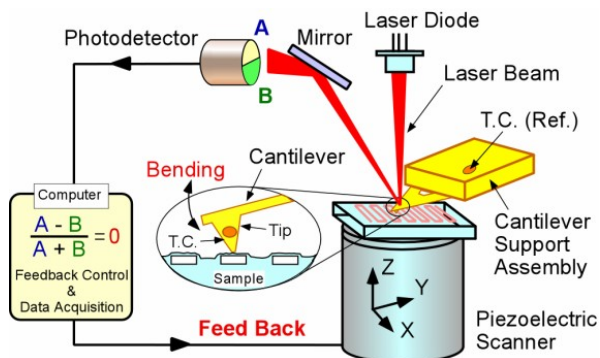


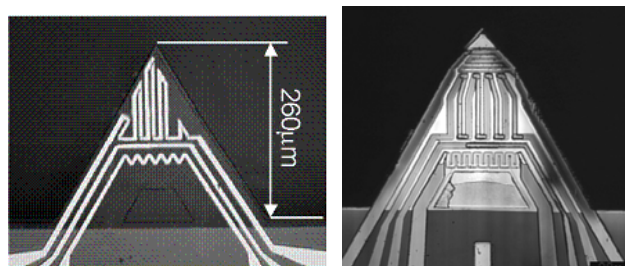
Fig. 1 Basic concept of SThM based on AFM

筆者らは 1990 年代から赤外線温度計測の限界を超え、ナノスケールの温度計測が可能な走査型熱顕微鏡の開発研究を行っているが、微細加工技術を導入して、微小で高感度、高集積化が可能なプローブ開発が可能となり、ナノスケールで正確に温度や熱伝導率を計測する技術開発が可能となってきた[1,2].

2.2 能動温度計測法

カンチレバー先端部に単純に温度センサを設置して試料の温度を計測する受動計測法では、計測される温度は、試料からナノスケールの接触部を介して伝わる熱流量を反映したものとなる。このため、接触状態や試料の熱伝導率で計測温度は大きく変化し、1 ミクロン程度の熱電対接点を先端部に形成しても、接触部よりも有意に低い割合の温度しか計測することはできない。

受動温度計測法の欠点を補うため、筆者らは能動温度計測法を開発した。能動法では、接触したプローブに流れる熱流を検出し、これに比例した発熱をプローブに与え、プローブ温度を常に接触部温度に一致させる熱フィードバック制御を行い、プローブ温度を計測するものである。プローブと試料が同じ温度にあれば、熱流はゼロとなり、有限な熱抵抗で両者がつながっている限り、正しい温度が計測されることになる。



(a) active thermometry. (b) thermal conductivity meas.

Fig. 2 SThM cantilever probes

能動温度計測を実施には、カンチレバー上に熱流計測用のサーモパイル、温度計測用の熱電対、プローブ加熱用のヒータを集積する必要があり、図 2a に示すように、マイクロファブリケーション技術で実現された。また、プローブが接触部を介して試料の温度情報を得るには、周囲の空気は邪魔になるため、計測には概ね 0.1Pa 以下の真空環境が必要である。

図 3 には能動法による温度画像計測の例を示す。幅 5 ミクロンの金属ストリップがジュール発熱している様子が形状と同時に計測されている。周囲は、大気を通しての試料・プローブ間伝熱を無くすため 4 mPa 程度の真空環境としてある。試料のベース温度は 29°C、計測された温度は、金属ストリップの抵抗変化から求めた値 (46°C) と良く一致している。

能動温度計測では、試料とプローブの接触スケールは約 30nm と評価され、真空環境中での温度計測の空間分解能も同程度と判断できる。また、プローブの熱応答性は 50Hz 程度であり、定常的な温度場計測には十分な速度を持つ。さらに、樹脂や無機物から金属のように広い熱伝導率の材料に対応し温度計測精度 ±1K 程度で実温度が計測できるため、本手法はナノスケールの温度計測に非常に有効な手段である。

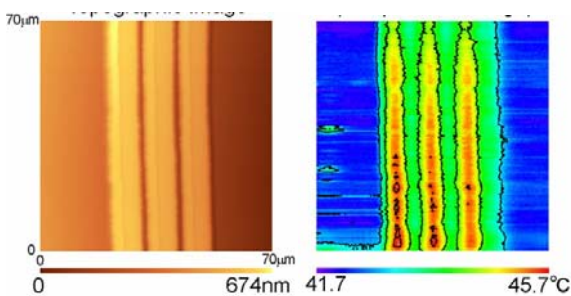


Fig. 3 Topography and thermography of heated Cr strips.

2.3 熱伝導率計測

物性計測に関しては、SThM で正確な局所熱伝導率を計測する方法を研究している。温度に能動法という解決策があったのに比べ、熱伝導率を正確に測るのは難しい作業である。我々は、試料とプローブの接触部温度と熱コンダクタンスを正しく計測することで試料の局所熱伝導率計測が可能

な手法に目処をつけている。

計測法の模式図を図 4 に示すが、この方法では、温度 T_s の試料に温度 T_p の暖めたプローブを接触させ、プローブから試料へ流れる熱流 Q_{ps} を計測する。接触熱コンダクタンス $H_c = Q_{ps} / (T_p - T_s)$ は、プローブの特性、試料の熱伝導率情報のほか、接触条件を含むため、定性的な熱伝導性となり、ここから試料の局所熱伝導率を決定することは出来ない。そこで、接触界面の温度 T_c を計測し、接触半径 r_c が特定された状態で試料側の熱抵抗 R_s から接触部近傍の局所熱伝導率 λ_s を導出する。これを実行するため、試料表面に金薄膜を蒸着し、プローブ側の異種金属薄膜とで構成する接触型の熱電対で接触温度を計測することとした。ただし、10nm 程度の金薄膜の厚さは接触径とコンパラなオーダーであり、金薄膜の熱抵抗は無視できない。そこで、半無限試料に金薄膜がコートされた場合の熱伝導解析から、近似的に、次式で参照試料(s1)に対して未知試料(s2)の熱伝導率が導出されることを得ている[3]。

$$\frac{\lambda_{s2}}{\lambda_{s1}} = \frac{R_{s1}}{R_{s2}} \exp\left\{2\pi\lambda_{film}\delta_{film}(R_{s1} - R_{s2})\right\} \quad (1)$$

上式は、特定の接触半径 r_c にて、熱伝導率 λ_{s1} を持つ参照試料での計測結果と比べ、未知試料の熱伝導率 λ_{s2} を同じ接触半径での計測結果と比較して導出するものである。また、試料側熱抵抗 R_s の絶対値が必要であり、これは、熱流と温度計測に高い精度を要求している。加えて、蒸着された金薄膜の厚さ δ_{film} と熱伝導率 λ_{film} のデータが必要であり、総合的に精度を高めていく必要がある。

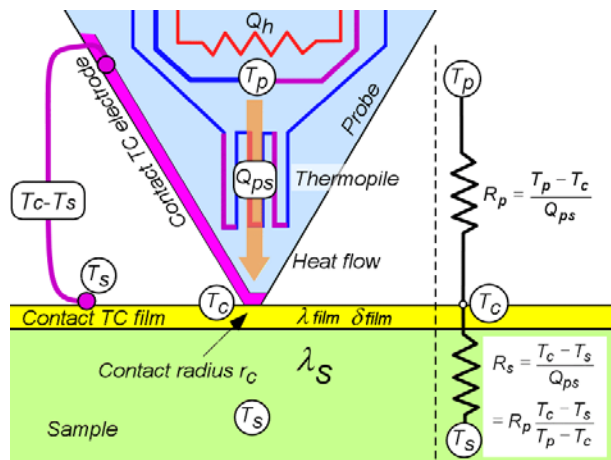


Fig. 4 Thermal conductivity measurement method

これまで図 2b に示す熱伝導率計測用プローブを開発し、上記手法の検証を進めている。プローブには、図 2a の温度プローブにある機能に加え、先端部に接触熱電対用の電極を設置し、サーモパイルの前方に校正用の白金ヒータを設置している。このプローブでは、サーモパイルや熱電対の校正がプローブ内ででき、先端部の金属薄膜は接触熱電対としての機能に加え、接触熱抵抗を低減する作用があり、能動温度計測を実施した場合の精度向上も期待されるものとなっている。

残念ながら、現時点では、本プローブで局所熱伝導率が正しく計測されることはまだ確かめられていない。長さ 260 ミクロンのプローブ内に、このように多数のデバイスを集積し、高感度に正確な計測をすることで、サブミクロン空間分解能での局所熱伝導率計測が行えるものと期待している。

3. ナノグラム試料の熱分析

3.1 熱分析

熱分析とは、物質の温度を調節されたプログラムに従って変化させながら、その物質のある物理的性質を温度または時間の関数として測定する一連の技法の総称である[4]。伝熱が熱輸送を扱うのに対して、熱分析は比熱の計測から物質の挙動を調べる手法である。図 5 に示す DTA (Differential Thermal Analysis, 示差熱分析) では、ヒートシンクからの熱伝達で試料セルと参照セルを定速温度変化させ、両者の温度差から比熱や相転移熱等を調べている。定量的に熱量の出入りを調べる工夫が施された DSC (Differential Scanning Calorimetry, 示差走査熱量計) も広く用いられている。

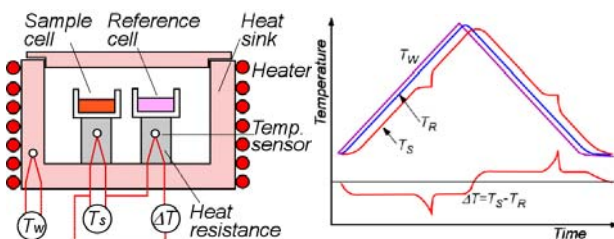


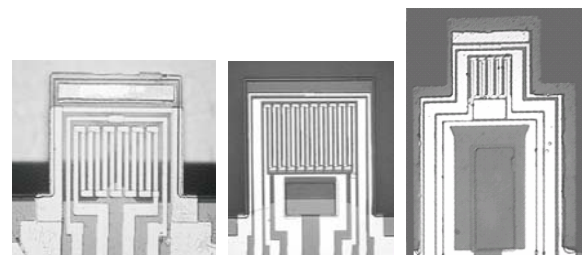
Fig. 5 DTA (Differential Thermal Analysis)

3.2 カンチレバー型カロリメータ

著者らは前述の SThM のプローブ製作ノウハウやその性能から、カンチレバー状の熱分析用カロリメータ (熱量計) を製作し、熱分析への MEMS

技術の応用により、熱分析の世界を拡張させる研究を進めてきた[5]。図 6 に、3 種類のカンチレバー型カロリメータを示す。DTA タイプは、SiO₂ カンチレバー上に先端近くから昇温用ヒータ、熱電対、熱流計測用サーモパイルを持ち、長さ 230μm、厚さ約 3μm である。DTA では、先端部に試料を載せ、ヒータの発熱量が時間に比例して増減するようにプログラムし、熱電対で温度変化を計測する。試料がない空の状態でもリファレンスデータを取得し、試料を載せてから同じ速度で温度走査し、サンプルデータを取得し、PC 上で両者の差を取り、試料の挙動を調べる。

DSC タイプは、先端から温度計測用熱電対、補償用ヒータ、熱流計測用サーモパイル、温度走査用ヒータを備えている。DSC モードでは、根元近くのヒータで温度変化を行い、試料への熱の出入りをサーモパイル信号で検出し、フィードバック回路を通して先端部で補償加熱を行う。結果として相変化による潜熱の吸発熱があっても、試料温度はほぼ一定の速度で上昇・降下し、温度と補償加熱量の関係が、物質の吸発熱 (比熱) 情報になる。同じ機能を持ち、温度走査用ヒータまでの距離を長く取った Long DSC タイプは長さ 460μm、試料付近の温度分布を均一化する改良型である。



(a) DTA type (b) DSC type (c) Long DSC type

Fig. 6 Cantilever type nanocalorimeters.

Table 1 Specifications of the DTA cantilever.

Thermal time constant	τ [msec]	5.5
Heat capacity of cantilever	C_p [μ J/K]	1.0
Thermal conductance to ambient	G [μ W/K]	190
Thermoelectric power	S_T [μ V/K]	29
Sensitivity	$S_P = S_T / G$ [V/W]	0.15
Noise in T.C. signal	V_{noise} [μ V]	5
Allowable temperature limit	T_{limit} [$^{\circ}$ C]	>400
Max. heating and cooling rate	ϕ_{max} [K/sec]	14,000
Heat capacity resolution	ΔC_{min} [nJ/K]	0.22
Enthalpy resolution	ΔH_{min} [nJ]	180
Power resolution	ΔP_{min} [μ W]	33

DTA 型カロリメータを用いた熱分析システムの基本性能を Table 1 に示す. プローブの時定数や熱コンダクタンスはプローブが空の状態でのヒータ交流発熱に対する周波数応答及び昇降温特性から, 電圧ノイズと等価な温度計測分解能から熱容量分解能 ΔC_{min} , 熱量分解能 ΔH_{min} を, 時定数と耐熱温度から最大昇・降温速度 ϕ_{max} を得ている. 注目すべきは, 従来の熱分析装置に比べ, 応答速度, 熱量分解能が格段に高いことである.

3.3 ナノグラム試料の熱分析

図 6 には DSC 型カロリメータ (図 6b) を用い, 見かけ質量 20ng のインジウムの DTA を行った結果である. 温度走査速度 ϕ を 43K/s から 7700K/s まで変えて, 加熱過程と冷却過程に分けて示している. 縦軸の DTA 信号は見やすいようにオフセットされている.

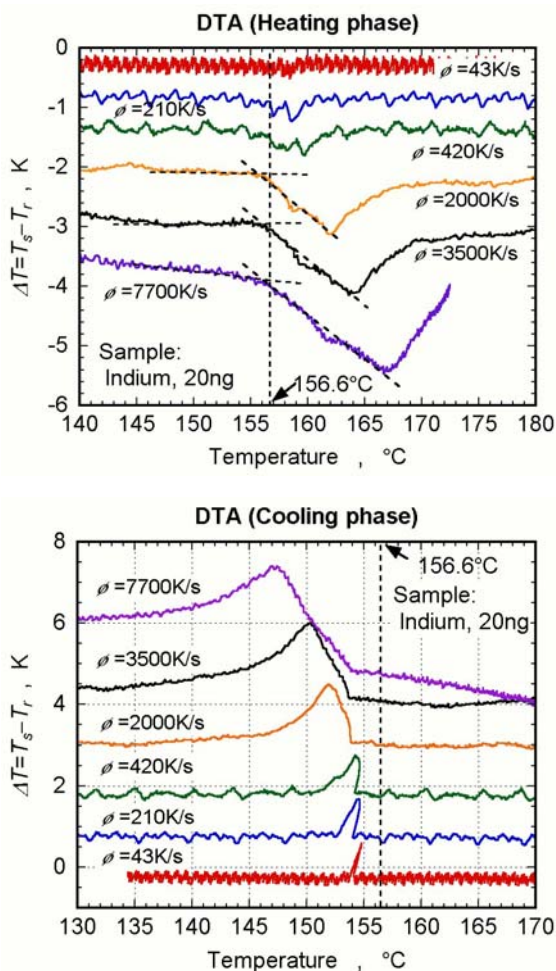


Fig. 7 DTA of Indium of 20 ng with different scan rate.

加熱時には下向きの融解ピークが現れるが, ピークは走査速度 $\phi > 2000\text{K/s}$ で明確に観察され, 立ち上がり温度は共通である. 高速な温度走査により, ナノグラムオーダーの試料の相転移熱が明確に検出できることが示されている. 一方, 冷却時には, 2K 程度の過冷却を示した後に凝固ピークが現れ, $\phi = 43\text{K/s}$ の低速走査時にも観察される. 過冷却解除につづく凝固が温度走査と独立に進行する非平衡状態の緩和現象であり, 低速でも観察されると考えられる. また, $\phi < 2000\text{K/s}$ では, ピークが右側に傾いており凝固潜熱の放出速度が冷却速度を超えて温度が上昇しているのに対し, $\phi > 2000\text{K/s}$ では, 潜熱放出速度より冷却速度が優ることが分かる. この例のような高速温度走査により相変化のカイネティクスに関連する情報が得られる可能性が示されている.

3.4 共振質量計測

熱分析では, 比熱情報から物質の振る舞いを調べるが, 試料の質量を正しく把握することは基本的な要件である. しかし, マイクログラム以下の質量を測定するには特別な天秤が必要であり, 我々のナノ熱分析では, 顕微鏡観察による見かけの質量を用いていた. 現在, カンチレバーの力学的共振を利用しナノグラム試料の質量計測と熱分析を実施する研究を始めているので, その内容を次に紹介する.

図 8 はカンチレバーの振動をレーザー変位計で検出し, その信号を増幅し, 位相を調整してピエゾ振動子を使ってカンチレバーを加振するシステムである. マイクに入力された音声スピーカーを通り, 再びマイクに入力されハウリングが起こるように, このシステムでは適切な位相調整を行うことで, 常に共振状態を維持でき, 共振周波数は FFT やカウンターで計測される.

カンチレバーを有効質量 M^* , ばね定数 k のばねとし, その先端に質量 m の試料を載せた場合, 単純には共振周波数 f は次式で与えられる.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M^* + m}} \quad (2)$$

Long DSC タイプのカンチレバー上に, 100ng オーダーの既知密度の球形微粒子を複数個載せ, 図 9 に示す質量, 共振周波数の校正曲線を作成した. カンチレバーの力学的特性や実際の質量を確定で

きないため、カンチレバーの有効質量を設計値から算出したケースと計測データが-0.5乗に従うように有効質量を補正したケースを示している。また、振動のFFT信号からは、共振の鋭さ ($\Delta f/f$) が1/1000程度と見積もられ、質量はカンチレバー有効質量の1/1000レベルの分解能、即ちナノグラムレベルで計測できることが分かった。

球形微粒子を取り除き、微量のインジウムを同じカンチレバーに載せ、共振周波数を測定すると6.78kHzとなり、2ケースの較正曲線からは1.2~1.5 μ gという質量測定結果が得られた。さらにこのインジウムに対してDTAを実施し、融解・凝固熱を計測すると、質量に換算してそれぞれ0.7 μ g, 1.0 μ gという結果が得られた。力学的な共振と相転移熱からコンシステントな結果が得られ、マイクロ~ナノグラム試料に対して質量、熱分析が行えることが示されたことになる[6]。

ナノグラムの質量計測と熱分析ができるカンチレバー型カロリメータでは、温度変化に伴う試料質量変化を測定し、物質の脱離や分解を調べるTG(熱重量測定, Thermogravimetry)をナノ化することもできる。図10は、揮発性のあるメンソールをカンチレバーに蒸着し、その後昇華してゆく様子をモニターしたものである。メンソールを入れたるつぼを暖め、大気中でカンチレバーにメンソール蒸気を当てて蒸着すると、約40ngのメンソールがプローブに付着し、蒸着を停止すると90秒程度で蒸着したメンソールが大気中へ昇華していく過程がカンチレバーの共振周波数の変化として測られている。共振周波数は計測時間3秒で計測され、この条件ではFFTのピークの鋭さから、質量計測の分解能は約1ngと算定されている[7]。今後、ナノグラム試料に対する高速な相転移挙動の研究や微量な質量変化の計測など、本技術の応用を進めていこうと考えている。

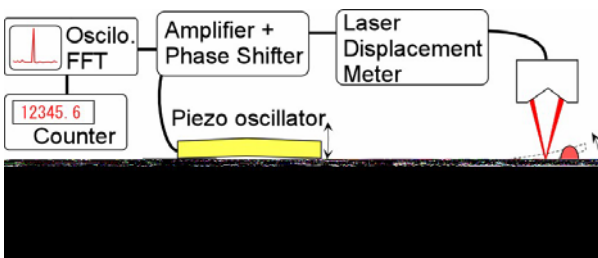


Fig. 8 Auto resonance detection system of a cantilever type calorimeter.

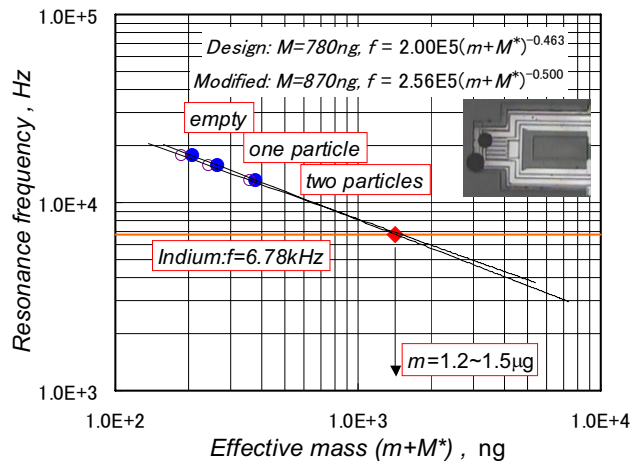


Fig. 9 Calibration curve of mass to resonance frequency for a long DSC type nanocalorimeter. Mass of tiny indium sample was measured to 1.2~1.5 μ g.

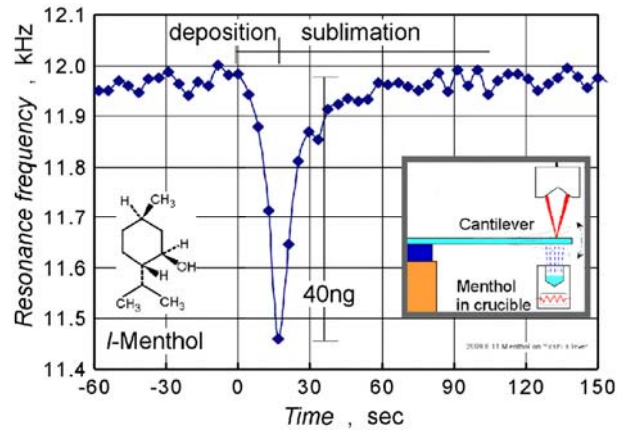


Fig. 10 Mass monitoring in deposition and sublimation process of *l*-Menthol under atmosphere with resonance of the long DSC type calorimeter .

4. ナノワットバイオカロリメトリ

4.1 バイオカロリメトリ

生体の活動に伴う熱の出入りや生体由来物質の熱分析をバイオカロリメトリと呼ぶ。運動時の発熱や発汗を思い出すと分かるが、成人は常時約100Wの発熱(代謝熱の放出)を行っており、活動度に応じて代謝が増減する。バイオカロリメトリには古い歴史があり、生体の活性や細胞の増殖特性、薬効等を調べる代謝熱の分析が行われており、また、植物種子の発芽に伴う発熱や昆虫が変態するときの発熱などが調べられている。生体細胞に関しては、例えば人の赤血球は正常個体で15 \pm 5pW/Cell, 甲状腺機能亢進個体では131 \pm 4pW/Cell, 上皮脂肪細胞で10pW/Cell, 胃線がん

細胞は $40\sim 49\text{pW/Cell}$ ，酵母菌は $20\pm 3\text{pW/Cell}$ ，大腸菌は $0.067\pm 0.01\text{pW/cell}$ など，各細胞の代謝量が調べられている[8]。がん細胞など病気の細胞は代謝が過剰に多く，正常細胞よりも高い活動性を示すことは興味深い。将来，病気のメカニズムに熱の観点から貢献ができるのではと期待される。現在，バイオカロリメトリで利用されている熱量計は，ペルチェ素子を熱流センサに用いたもので， 100nW レベルの分解能を持ち，例えば 100 個レベルのヒトデの卵が一斉に卵割を生じる場合の発熱ピークが観察されている。[9]

4.2 MEMS サーモパイルを用いた熱量計

我々は，MEMS 技術で高感度な熱量センサを作れば，細胞や生体の代謝熱を高感度かつ高速にモニタし，生体活動をより詳細に調べる，薬効やアレルギーなどを生体の通常生命活動状態で調べられると，医学，薬学，生物学への貢献を考え，研究を進めている[10]。

図 11 は，カバーガラスを基板としてニッケル，クロム薄膜で作成されたサーモパイルセンサである。中央部に拡大写真を合成しているが，左右に計 350 個の熱電対を直列に形成し，中央部には較正用ヒータを配置している。このサーモパイルは周囲をアルミブロックのヒートシンクに接着し，中央部に試料を置き，試料の発熱による中央部と周辺部との僅かな温度差を検出して熱量を計測する。感度は，約 $2.2\mu\text{V}/\mu\text{W}$ と実測されている。

生体試料の微量な発熱を調べるには，高感度なセンサに加え，外界の温度変動の影響を十分に抑えた熱的に安静な状態が必要である。我々は，センサを設置したアルミブロックを 3 重のアルミケースに格納し，ペルチェ素子と温度調整器を用いた恒温槽を製作して，熱ノイズの抑制を図っている。また，ナノボルトレベルの信号を安定に計測

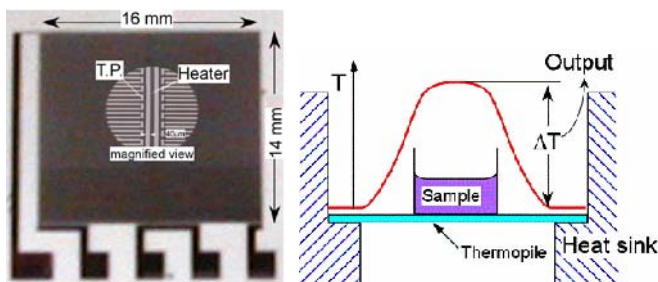


Fig. 11 Thermopile sensor and measurement principle

するため，カットオフ周波数 1Hz のローパスフィルタを備えたゲイン 40dB のアンプを恒温層内に設置し，電気系の温度ドリフトを低減する工夫を取っている。現状では，熱ノイズレベルは 400nW 程度であり，ノイズ低減の工夫が望まれている。

4.3 酵母菌の増殖過程

図 12 はパン酵母の増殖過程を発熱量で捕らえたものである。少数の酵母菌を含んだ $3\text{wt}\%$ スクロース水溶液（砂糖水） 0.1ml とかびや酵母菌用の培養液（M-Green Yeast and Mold Broth） 0.05ml を試料セルに入れ， 30°C で静置した場合の増殖サーモグラムである。実験開始後 1 時間程度から対数軸上で直線的に発熱量が上昇しているケースと開始後約 8 時間後から増殖が確認されるケースを示している。両ケースとも，発熱量の増加割合が同程度であり，1 個の菌が分裂して 2 個になるのにかかる世代時間は約 80 分と見積もられる。好適環境での酵母菌の世代時間は一般に $80\sim 120$ 分と言われており，増殖が確認されてから 10 時間程度は順調に酵母菌が増殖する対数増殖期にあることが分かる。また，発熱量がピークを迎えた後は，環境悪化や栄養分の不足で活動が低下していく死滅期の過程が見られる。

両ケースでは，初期に試料セル内に入れられた酵母菌数の違いが立ち上り時間の差につながっていると考えられる。対数増殖特性が実験開始時から変わっていないと仮定すると，早い立ち上りを示したケースでは約 10,000 個，遅いケースでは 300 個程度の酵母菌が試料セル内にあったことになる。また，本バイオカロリメータでは，ノイズレベルが 400nW 程度あり，酵母菌の 10,000 から 1,000,000 個レベルの代謝熱を計測していること

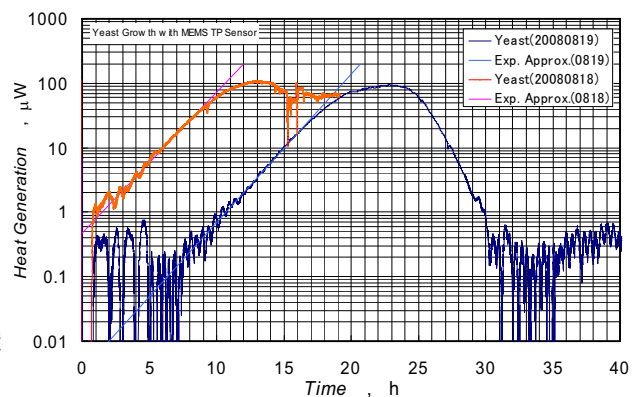


Fig. 12 Growth thermogram of Yeast.

になる。現在、センサの差動化によりノイズレベルを低減し、より少数の細胞の代謝挙動をモニタすることを検討している。

4.3 ラディッシュの発芽過程

図 13 はラディッシュ (二十日大根) の発芽過程を 6 日間に渡り計測した結果である。乾燥重量 10mg の種一粒を 30mg の水と共に試料セルに密封し、約 20°C の条件で発芽させた。計測を終了した時点で発芽した種の重さは 33mg あり、後日計測した乾燥重量は約 11mg であった。実験開始直後と 4 日 20h 辺りのパルスはノイズであり、3 日から 4 日にかけて 12h 頃に低いピークのある変動は 1 日の温度変化を反映した発芽とは関係ない信号である。発芽に伴う発熱挙動に関しては不勉強であり、十分な解説はできないが、結果からは、計測開始から約 2 日を経過してから徐々に発熱が増え、4 日目に約 70 μ W 程度のピーク発熱を示し、約 5 日間で目立った発熱現象が終息している。窮屈なセル内では、毛根の生えた根が伸び、子葉が種のからを脱ぐことが出来ない状態 (図中の写真) で発芽が確認された。複数回の実験では、実験開始後すぐに発熱が始まる場合や、この結果のように数日を経て発芽が始まる場合など、経過時間に大きな差が見られたが、ピーク発熱量は、同程度の重さの種子で、70~100 μ W 程度の発熱が確認されている[11]。ゆっくりとした植物の活動も、微量な熱量の正確な計測により、定量化した観察ができることが分かり、熱の分野もバイオアプリケーションへの貢献が期待できると感じている。

5. おわりに

本稿では、半導体微細加工技術で製作されたマイクロセンサを利用したナノメートルスケール温度・熱伝導率計測、ナノグラム試料の質量・熱分

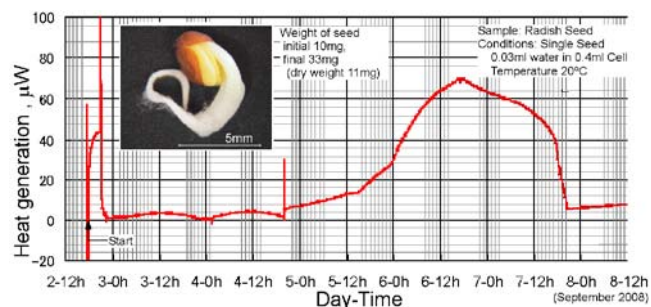


Fig. 13 Germination thermogram of Radish

析、生体試料のナノ～マイクロワットの発熱をモニタする技術を紹介した。MEMS やナノテクを使うと、従来技術の到達範囲を易々と超え、新しい世界が見えてくる。熱力学が教える通り、あらゆる活動には熱が現れ、これを上手に捉え利用することで、伝熱を専門とする我々は様々な分野へ貢献することが可能であると思う。21 世紀に我々が手に入れたナノテクノロジーをこれからも積極的に利用した研究を展開していきたいと考えている。

謝 辞

本稿で紹介した著書らの MEMS デバイス、センサーは、東京工業大学メカノマイクロプロセス室で作成したものである。ここに記し関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 中別府修, 熱測定, Vol.28, No.1 (2001) p.18-28
- [2] 重川秀実ら, 実戦ナノテクノロジー-走査プローブ顕微鏡と局所分光, 裳華房, (2005), pp.344-351
- [3] 中別府修, 磨田謙一, SThM による局所熱伝導率計測に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 72 巻 722 号, pp.2524-2531
- [4] 日本化学会編 第 5 版実験化学講座 6 温度・熱, 圧力, 丸善 (2005) pp.41-88
- [5] 中別府修, 超微量熱分析“ナノカロリメトリ”の技術動向, 熱物性, Vol.20, No.3 (2006) pp.138-144
- [6] Osamu NAKABEPPU, Nanocalorimetry with micro-cantilever probe, IFHT2008, (2008), CD
- [7] 中別府修, MEMS を用いた微小熱分析技術の開発, 日本機械学会年次大会講演論文集 Vol.8, pp.79-80, (2008),
- [8] 日本化学会編 第 5 版実験化学講座 6 温度・熱, 圧力, 丸善, p.322 (2005)
- [9] 長野八久, 白井浩子, ヒトデ幼生初期発生の熱測定, 第 43 回熱測定討論会講演要旨集 (2007) pp.204-205
- [10] 中別府修, 坂寄純一, MEMS センサによる少数細胞の代謝熱モニタリング, Thermal Science & Engineering, Vol.14, No.4, (2006) pp.115-120
- [11] 山本昌弘, 中別府修, MEMS サーモパイルセンサによるバイオカロリメトリ, 第 44 回熱測定討論会講演要旨集, (2008) p.130

MEMS 伝熱面を用いた沸騰機構の解明

Boiling on MEMS heat transfer surfaces

丹下 学 (産業技術総合研究所)

Manabu TANGE (AIST)

e-mail: m.tange@aist.go.jp

1. はじめに

MEMS 技術の発展によって、沸騰伝熱面に微細な構造体を形成したり、微細なセンサを加工したりすることができるようになってきている。これにより、沸騰熱伝達の促進を目的とした表面加工[1]の究極形として、伝熱面となるシリコンウェハ表面に多数のキャビティ[2]や微細な突起[3]を配置して熱伝達を計測する研究がなされている。一方、MEMS 技術を利用することで実際の沸騰伝熱面では不可能な沸騰現象を実現し、沸騰現象の基礎過程に迫り、熱伝達機構を解明しようとする研究もある。

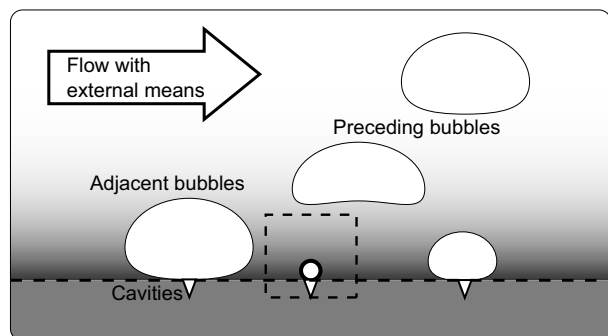


Fig. 1: A conceptual sketch of an actual boiling heat transfer surface.

図1に示す概念図のように、沸騰気泡は一般に、伝熱面上に形成された過熱液層の中、伝熱面に存在する微細な傷（キャビティ）にトラップされた蒸気塊を核として発生する。現実の沸騰伝熱面には多数のキャビティが存在するとともに、定常的な加熱が行われるため、至る所から沸騰気泡が発生している。また、強制流動沸騰では気泡の成長・離脱による流れに強制対流の流れが加わる。つまり、ある一つの沸騰気泡に注目しても、その気泡は他の気泡によって乱された流れ場、温度場の中で成長しているため、実験条件を正確に設定したことにはならない。また、一つ前の気泡が離脱し

てからどれくらいで次の気泡が発生するのか、ということはキャビティの性質（大きさ、形状、濡れ性など）に大きく依存する[4]。

近年、沸騰現象の数値計算が数多く行われているが、相変化を含む気液界面の取り扱いが難しく、その多くは単純な温度場における単一気泡の成長に関するものである[5]（例外としてDhir[6]は最近、実際面に近い複数気泡核の計算を行っている）。いわば、通常の沸騰伝熱面では、数値計算においての初期条件（気泡発生時の流れ場、温度場）と境界条件（表面性状、発泡のタイミング）がコントロールできていないことになる。

本稿では、MEMS 技術を用いた人工沸騰伝熱面における単一沸騰気泡の生成に的を絞って、既存の研究を紹介したのち、筆者らが開発した MEMS 伝熱面について解説する。次に、MEMS 伝熱面を用いた実験結果の一つとして、高サブクール沸騰における気泡の変形について、研究背景とともに実験結果を示す。最後に MEMS 伝熱面を用いた沸騰研究の魅力と、今後の課題について述べる。

2. MEMS 伝熱面を用いた単一沸騰気泡の生成

他に外乱のない状況で一つの沸騰気泡をつくるためにはどうすればよいだろうか。過去の研究では、この問題に対し大きく分けて2つのアプローチがとられている：

1. 平滑な伝熱面を用意し、人工的なキャビティを一つだけ設ける：Shoji and Takagi[7]は、平滑な銅表面に直径 50 μm から 100 μm のキャビティを加工し、孤立した発泡核を実現している。

2. 気泡が一つ成長するだけの狭い領域を局所的に加熱する伝熱面を作る：Li and Peterson[8]はマイクロヒータを用いて平滑な伝熱面に単一気泡を作り、いつ核生成が行われるかという、核生成理論の検証を行っている。この研究はインクジェットプリンタを産業的背景としている。マイクロヒー

タを用いた沸騰開始温度と核生成の研究としては、Iidaら[9]による白金薄膜をヒータとする伝熱面での沸騰実験などを挙げることができる。

これらの実験は孤立した気泡核や単一気泡の生成を実現しているが、1は人工キャビティから発生する先行気泡の影響が避けられず、2は研究が核生成自身を対象としているため、沸騰気泡の発生は伝熱面性状に依存し、制御することはできていない。

3. 核生成の制御が可能な MEMS 伝熱面

Nakabeppu and Wakasugi[10]は単一沸騰気泡の生成において、後述する発泡トリガによって核生成の制御を実現した。また、気泡核の周りに微細な熱電対を加工し、壁面温度の計測を行っている。沸騰伝熱面温度分布の計測には他にも、電気抵抗の温度依存性を利用した研究（依存性の線形性がよい Pt を利用するもの[11]、抵抗変化の大きい半導体を使うもの[12]などがある）や放射温度計を用いた研究[13]、感温液晶[14]を用いた研究などを挙げることができる。筆者らは、Nakabeppu and Wakasugi[10]の MEMS 伝熱面を改良し、新たな MEMS 伝熱面を開発した。以下ではその概要と実験結果の一例について述べる。詳細については、文献[15]を参照されたい。

3.1 MEMS 伝熱面

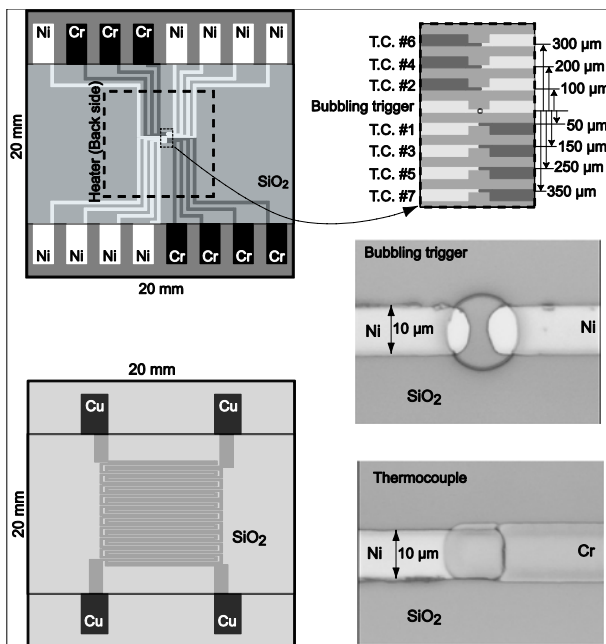


Fig. 2: MEMS heat transfer surface.

図 2 に MEMS 伝熱面の概要を示す。MEMS 伝熱面は厚さ 0.5 mm、20 mm 角のシリコンウェハで、金属薄膜のスパッタリングとリフトオフプロセスで微細な回路が実装されており、3つの機能を持つ：

1. 薄膜ヒータ（裏面、図 2 左下）

伝熱面の裏には蛇行する銅薄膜ヒータ（8 mm 角）があり、過渡的な通電加熱によって伝熱面上に過熱液層を作ることができる。ヒータの大きさは気泡の大きさに比べ十分大きく、面方向に均様な加熱を行っているものとみなすことができる。

2. 発泡トリガ（おもて面、図 2 左上及び右中の顕微鏡写真）

伝熱面の中心には向かい合う2つのNi電極があり先端だけが水中に露出している（その他の部分は SiO₂ 膜で水と電氣的に絶縁されている）。電極に電流を流すことで水の電気分解を起し、微細な水素気泡を発生させる。この水素気泡の気液界面を核として沸騰気泡が生成される。薄膜ヒータで作った過熱液層の壁面温度とは独立に発泡のタイミングをコントロールできるのが特徴である。しかし、加熱しすぎると発泡トリガなしに核生成が起こり、伝熱面全体に沸騰気泡が生成される。

3. 微細熱電対（おもて面、図 2 左上及び右下の顕微鏡写真）

発泡トリガから 50 μm 間隔で7つの熱電対が実装されている。すなわち、Ni 薄膜回路と Cr 薄膜回路が重なった部分（10 μm 四方）が熱電対として機能している。

この伝熱面は通常沸騰気泡の発生源となるキャビティを持たず、任意のタイミングで生成される水素気泡から沸騰気泡が成長する。つまり、気泡核と核生成という複雑な問題を避けることで、一つの伝熱面で様々な性質を持つ気泡核を模擬することができる。

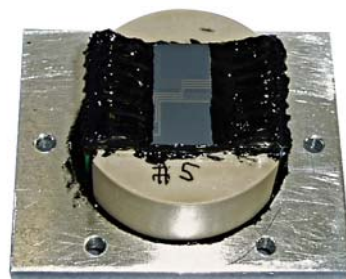


Fig. 3: Test section with MEMS heat transfer surface.

MEMS 伝熱面は配線後、図3に示すような耐熱樹脂 (PEEK) 製のテストセクションにマウントされ、電気配線を行った後、温度一定の静止流体中に浸漬される。以下の実験における系の圧力は大気圧、試験流体は脱気を行った超純水である。

3.2 実験結果の一例

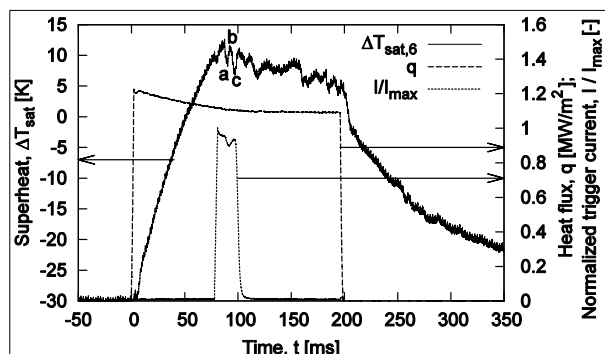


Fig. 4: Temperature signal of a single bubble generation test; $\Delta T_{\text{sub}} = 30$ K.

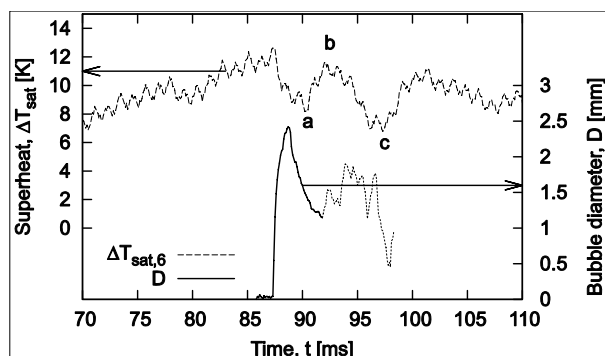


Fig. 5: Bubble growth and temperature signal.

単一沸騰気泡生成実験における結果の典型例を図4に示す。時刻 $t=0$ で薄膜ヒータによる加熱が始まると、伝熱面温度が上昇し過熱液層が形成されていることが分かる。次に設定したタイミングで発泡トリガに電流を流し、水素気泡を発生させ、それを核として沸騰気泡が成長する。沸騰気泡の成長によって伝熱面から熱が奪われ、伝熱面温度が急降下していることが分かる。沸騰気泡の挙動は高速カメラによって撮影され、画像解析によって気泡径の時間発展を計算することができる。発泡直後の温度シグナルと比べたものが図5である。発泡直後、気泡径は急増し気泡底部の液膜が蒸発することで伝熱面温度が下がる。次に温度が上がる(図5の a-b)のは乾き面ができ、局所的な熱輸送が低下したためであると考えられる。乾き面

の存在は、発泡トリガが蒸気に覆われ電極間の抵抗値が増大し、電流値が減少していることから推察される。

核生成理論[16]に従い、この沸騰気泡がシリコンウェハ上の円筒形キャビティから発泡したとすると、発泡時の壁面過熱度 12 K、に対応するキャビティは、半径 $2.7 \mu\text{m}$ となる。同様に発泡のタイミングや過熱液層の作り方を変えれば様々な気泡核を模擬することができる。

4. 高サブクール沸騰における単一沸騰気泡の成長と崩壊

4.1 気泡微細化沸騰

筆者らは、電子素子冷却のデバイス開発を背景として、微細流路内での高サブクール度高熱流束条件における沸騰現象を研究している[17]。高サブクール度高熱流束条件では、気泡微細化沸騰 (Microbubble Emission Boiling, MEB) と呼ばれる特異な沸騰現象が起こることが知られている。この現象はその名の通り伝熱面から雲霞のごとく微細な気泡が射出されるという特徴をもつ。

Zvirin ら[18]によって、熱した金属球をサブクール液に沈めた際に、遷移沸騰領域において蒸気膜から微細気泡が射出されることが確認された。Inada ら[19]はプール沸騰系において MEB を観測し、それが、通常不安定な遷移沸騰領域の伝熱面温度と限界熱流束を超える熱流束で安定に存在することを示した。Kumagai ら[20]は、流動沸騰系において、MEB の発生時に伝熱面付近で激しい圧力変動があることに注目し、気泡挙動との関連を示した。Suzuki ら[21]は、流動沸騰系における流速やサブクール度をパラメータとして、MEB の発生条件を詳細に指定した。これらの研究の多くは熱容量の大きい伝熱ブロックを伝熱面としている。伝熱面の温度変動はその熱容量に大きく依存するため、小型化が要求される実際の冷却デバイスへの応用を考慮すると、熱容量の小さい系で実験を行い、MEB が実現できるかどうか調べる必要がある。実際、熱容量の小さな加熱金属細線を伝熱面とする実験[22]では、高サブクール沸騰において微細気泡の射出と限界熱流束の上昇は確認されるものの、熱容量の大きい伝熱面のような核沸騰と MEB との明確な境目が現れない。

4.2 気泡挙動の熱流束・加熱時間依存性

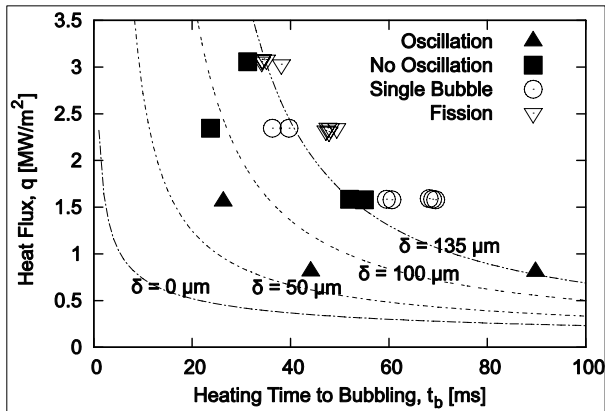


Fig. 6: Bubbling pattern map; $\Delta T_{sub} = 50$ K.

3.1 節で示した MEMS 伝熱面を用い、高サブクール高熱流束条件における単一沸騰気泡の成長と変形、及び微細気泡の射出について、その発生条件を明らかにすることを目的として実験を行った。発泡トリガで沸騰気泡の発泡をコントロールする本実験では、通常の伝熱面では制御できない発泡までの加熱時間を実験のパラメタとすることができる。図 6 には、縦軸に熱流束、横軸に発泡までの加熱時間を取り、サブクール度 50 K での気泡挙動を以下の 4 つのパターンに分け、発生条件をマップにしている：

Oscillation：熱流束が低く加熱時間が短い場合、過熱液層の形成に合わせ気泡が体積振動しながらも成長する。これは Kuzma-Kichta ら[23]が報告している低サブクール沸騰における気泡振動と同様の機構によるものと考えられる。

No Oscillation：熱流束が高く加熱時間が短い場合、伝熱面温度の高さから初期成長速度は大きくなるが、過熱液層厚さが薄く、すぐサブクール液に触れることで気泡が消滅してしまう。

Single Bubble：さらに加熱時間が長くなると過熱液層が厚くなるため気泡が大きく成長し、Oscillation パターンのような体積振動に加え、気泡が扁平になったり縦長になったりという形状振動が起こる。形状振動の回数は条件によるが、あるとき縦長になった気泡の先端がちぎれ、一つの微細な気泡が射出される。(図 7 にはサブクール度 30 K で観察されたボウリングのピンのような気泡とそこからの単一微細気泡の射出を示す)。

Fission：高熱流束、長加熱時間(熱流束 2 MW/m^2 以上、過熱液層厚さ $135 \mu\text{m}$ 以上)では Single Bubble パターンよりも激しい変形が起こる。図 8 に示すように、成長時は球形を保ち大きく成長するが、収縮の過程で気泡の中程がくびれ、大きな蒸気塊をサブクール液中へ射出する。それが凝縮し複数の微細気泡に分裂する。図 9 のように同様の現象は加熱細線上の高サブクール沸騰[24]でも確認されており、加熱細線上の微細気泡生成メカニズムは、この Fission パターンと同様のものであると考えられる。

伝熱ブロック系における MEB では合体気泡から微細気泡が射出されており、単一気泡の本実験から多くのことを言うことはできないが、微細気泡の射出メカニズムに関しては、共通する部分があるものと考えられる。

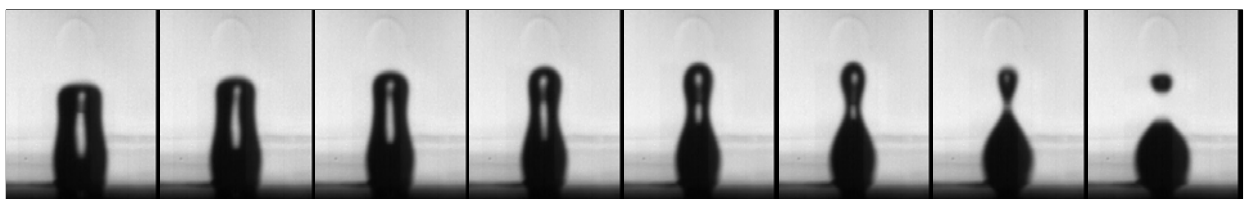


Fig. 7: Successive snapshots of single bubble pattern; $q = 1.0 \text{ MW/m}^2$, and $\Delta T_{sub} = 30$ K, $t_b = 75$ ms.

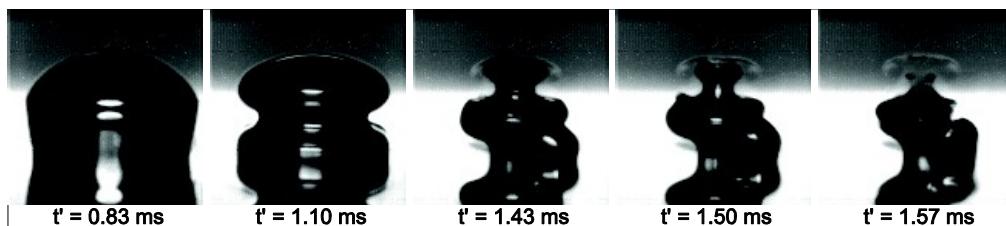


Fig. 8: Successive snapshots of bubble fission on a MEMS heat transfer surface; t' denotes interval from the nucleation; $q = \text{MW/m}^2$, $\Delta T_{sub} = 50$ K, $t_b = 47.2$ ms.

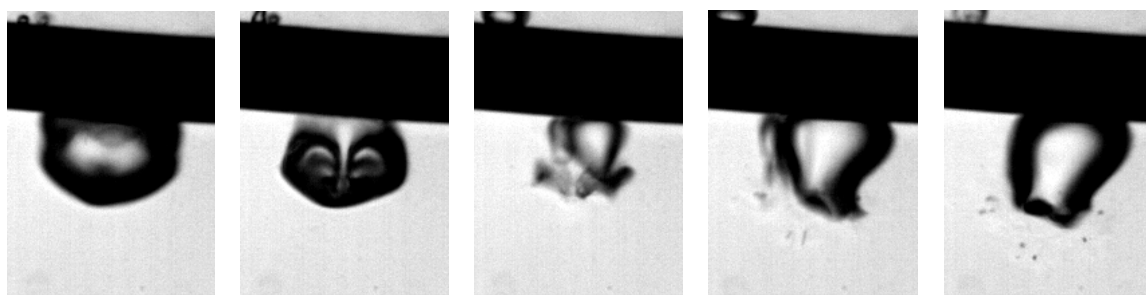


Fig. 9: Successive snapshots of bubble fission on a heated wire at 50 μ s intervals; $q = 2 \text{ MW/m}^2$, and $\Delta T_{\text{sub}} = 40 \text{ K}$.

5. おわりに

MEMS 伝熱面上における単一沸騰気泡生成の研究を紹介するとともに、筆者らが開発した、薄膜ヒータと発泡トリガによって過渡加熱と発泡制御を可能とする MEMS 伝熱面について述べた。また、気泡微細化沸騰に関連して、高サブクール度高熱流束条件における気泡の変形と微細気泡の射出についての実験結果を示した。微細気泡の射出条件を熱流束と加熱時間という極めて基礎的なパラメータで示すことができた。

筆者にとって MEMS 伝熱面の魅力とは、今まで測れなかったもの（微細熱電対による壁面温度分布）が測れるということだけでなく、制御できなかったもの（核生成、沸騰気泡の発泡タイミング）が制御できることにもあると感じている。

本稿は「MEMS 伝熱面を用いた沸騰機構の解明」と題してはいるものの、現時点では MEMS 伝熱面を開発し、その有用性を示すに留まっているので、気泡底部の液膜構造と沸騰熱伝達機構の関係を解析することが今後の課題である。また、MEMS 伝熱面を使って理想的な実験条件を作り基礎的な研究に可能性を与えることができる一方で、実際面で起こっていることとのギャップは広がってしまうことにも注意しなければならない。実際の応用に対し、得られた結果から何がいえるか、何ができるかということ意識しなくてはならないと考えている。例えば、ある冷却デバイスに対して最適の性質を持つ気泡核を提案できたとして、それをつくれるのだろうか？という疑問に対して、答えを与えるには未だ多くの問題が残っている。

謝辞

本稿で紹介した研究は、平成 16 年度採択（財）東電記念科学技術研究所研究助成「マイクロチャ

ネルによる高性能熱交換デバイスの開発」および科学研究費補助金（特別研究員奨励費、課題番号 11038）の助成のもと行われた。研究にあたっては、東京大学高木周准教授、東京大学竹村文男教授（産業技術総合研究所）、神奈川大学庄司正弘教授のご助力を得、さまざまな議論をさせていただいた。MEMS 伝熱面の作成にあたっては、明治大学の中別府修教授、東京工業大学の若杉秀明氏、産業技術総合研究所の松本壮平氏、地方独立行政法人東京都立産業技術研究センターの石東真典氏、加沢エリト氏、植松卓彦氏、楊振氏にご協力いただいた。また、高速カメラによる撮影に関して、産業技術総合研究所の宗像鉄雄氏にご協力いただいた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Webb, R. L., Principles of enhanced heat transfer, John Wiley & Sons, Inc., (1994).
- [2] A. Koşar and Yoav Peles, Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities, Int. J. Heat Mass Transfer, 48, (2005), pp. 4867-4886.
- [3] Honda, H., Takamatsu, H., and Wei, J.J., Enhanced boiling of FC-72 on silicon chips with micro-pin-fins and submicron-scale roughness, ASME Journal of Heat Transfer, 124, (2002), pp. 383-390.
- [4] Han, C., and Grith, P., "The mechanism of heat transfer in nucleate boiling — Part I", Int. J. of Heat Mass Transfer, 8, (1965), pp. 887-904.
- [5] Son, G., Dhir, V. K., and Ramanujapu, N., Dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, ASME Journal of Heat Transfer, 121, (1999), pp. 623-631.
- [6] Dhir, V. K., Mechanistic prediction of nucleate

- boiling heat transfer - achievable or hopeless task?, ASME Journal of Heat Transfer, 128, (2006), pp. 1-12.
- [7] Shoji, M. and Takagi, Y., "Bubbling features from a single artificial cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, 44, (2001), pp. 2763–2776.
- [8] Li, J., and Peterson, G. P., "Microscale heterogeneous boiling on smooth surfaces — from bubble nucleation to bubble dynamics", Int. J. Heat Mass Transfer, 48, (2005), pp. 4316–4332.
- [9] Iida, Y., Okuyama, K., and Sakurai, K., Boiling nucleation on a very small film heater subjected to extremely rapid heating, Int. J. Heat Mass Transfer, 37, (1994), pp. 2771–2780.
- [10] Nakabeppu, O., and Wakasugi, H., "Approach to heat transfer mechanism beneath single boiling bubble with MEMS sensor", In Proc. of 13th International Heat Transfer Conference, (2006), BOI-43 (CD-ROM).
- [11] Moghaddam, S., Kiger, K. T., Henriette, J. M., and Ohadi, M., "Fabrication and testing of a novel microelectromechanical device for the study of boiling bubble dynamics", In Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress, (2003), pp. 107–114.
- [12] Cooper, M. G. and Lloyd, A. J. P. "Miniature thin film thermometers with rapid response", J. of Scientific Instruments, 42, (1965), pp. 791–793.
- [13] Zhang, L., and Shoji, M., Nucleation site interaction in pool boiling on the artificial surface, Int. J. of Heat Mass Transfer, 46, (2003), pp. 513–522.
- [14] Kenning, D. B. R., and Yan, Y., "Pool boiling heat transfer on a thin plate: features revealed by liquid crystal thermography", Int. J. Heat Mass Transfer, 15, (1996), pp. 3117–3137.
- [15] Tange, M., Takagi, S., Takemura, F., and Shoji, M., Bubble growth and fission on MEMS heat transfer surfaces under subcooled boiling conditions, Trans. of JSME B, (submitted).
- [16] Carey, V. P., Liquid-vapor phase-change phenomena, Taylor & Francis, (1992).
- [17] Tange, M., Yuasa, M., Takagi, S., and Shoji, M., "Microbubble Emission Boiling in a Microchannel and Minichannel", Thermal Science and Engineering, 12-6, (2004), pp. 23–29.
- [18] Zvirin, Y., Hewitt, G. F., and Kenning, D. B. R., Experimental study of drag and heat transfer during boiling on free falling spheres, Heat and Technology, 7-3-4, (1989), pp. 13-23.
- [19] Inada, S., Miyasaka, Y., Sakumoto, S., and Chandratilleke, G. R., "Liquid-solid contact state in subcooled pool transition boiling system", ASME Journal of Heat Transfer, 108, (1986), pp. 219–221.
- [20] Kumagai, S., Uhara, T., Nakata, T., and Izumi, M., Liquid-solid contact in microbubble emission boiling through void signals, Trans. of JSME B, 67, (2001), pp. 2304–2310.
- [21] Suzuki K., Torikai, K., Satoh, H., Ishimaru, J., and Tanaka, Y., "Boiling heat transfer of subcooled water in a horizontal rectangular channel (observation of MEB and MEB generation)", Trans. of JSME B, 65, (1999), pp. 3097–3104.
- [22] Shoji, M. and Yoshihara, M., Observation of microbubble emission boiling, J. visualization society of Japan, 11, (1991), pp. 143-148.
- [23] Kuzma-Kichta, Y., Ustinov, A. K., Ustinov, A. A., and Kholpanov, L., Investigation of interface oscillations during boiling, In proc. of the third international conference on transport phenomena in multiphase systems, (2002), pp. 45-52.
- [24] Shoji, M., Tange, M., Watanabe, M., Kamoshida, J., Sasaki, K., "Subcooled pool boiling on a heated wire with microbubble emission", In Proc. of EECI International Conference on Boiling Heat Transfer, (2006), paper no. 30 (CD-ROM).

光 MEMS を用いたマイクロ熱物性センサー Micro Thermophysical Properties Sensor using Optical MEMS

田口 良広 (慶應義塾大学), 長坂 雄次 (慶應義塾大学)
Yoshihiro TAGUCHI (Keio University), Yuji NAGASAKA (Keio University)
e-mail: tag@sd.keio.ac.jp

1. はじめに

本研究室では、これまでに時空間分解能が非常に高い光学的温度・熱物性計測技術を開発してきた。例えば、高熱伝導性薄膜の熱物性異方性を高速かつマイクロメートルオーダーの空間分解能で計測可能な動的格子加熱法により、グラファイトシート等の面内および厚み方向の温度伝導率異方性を明らかにしてきた[1]。また一方で、近接場蛍光を用いたナノスケール温度・熱物性計測技術により、100 nm の空間分解能で局所的な温度変化の検知に成功している[2]。現在は、非常に高い空間分解能で広範囲の物性情報をセンシングする（必要技術：超小型化、アレイ化や高速スキャンニング）、あるいは非常に高い時間分解能で長時間にわたってモニタリングする（必要技術：外部擾乱抑制による系の安定化）ことでプロダクションプロセスの最適化や新しい材料創成を標榜し、これまでに開発してきた光学的温度・熱物性計測技術と光 MEMS (Microelectromechanical Systems) 技術を融合させた全く新しいセンサーの開発を行っている（図 1 にマイクロ熱物性センサーによる超時空間

分解広域熱物性センシングの概念図を示した）。光 MEMS 技術は、ディスプレイ分野[3, 4]や情報通信分野[5]での開発が目覚しく、現在では内視鏡などへの応用がようやく始まったばかりである[6-8]。例えば McCormick らはマイクロミラーを搭載した内視鏡を開発し、声帯の 3 次元断層像を in vivo で観察することに成功している[7]。一方で、Ra らは 2 軸共焦点蛍光内視鏡を開発し、高空間分解能と広視野による食道癌の早期発見技術を確立した[8]。しかしながら、これら光 MEMS デバイスでは、得られる情報は依然としてデジタル的（有るか無いか）なものであり、物性計測が可能な光 MEMS デバイスは皆無である。これは、計測技術の考案から光・熱・電気・機械・材料設計までを一貫して行わなければならない、非常に複雑であることに起因する。

空間分解能あるいは測定対象という意味の「ナノ・マイクロの計測技術」については本誌他稿や著者らのこれまでの論文[2]を参考にさせていただき、本稿では光 MEMS 技術と光学的熱物性計測技術を革新的に融合させたマイクロサイズの光学的熱物性センサーについて紹介する。本センサーにより、高い空間分解能（マイクロメートルオーダー。著者らが他プロジェクトで開発している近接場光学熱顕微鏡のような光の回折限界を超える超解像像は得られないものの）で微量サンプル（～マイクロリットルオーダー）の熱物性値をリアルタイム（数百ナノ秒～マイクロ秒オーダー）でセンシングすることが可能となり、時々刻々と変化する熱物性値をモニタリングしながらプロセスをコントロールする、すなわち我々が提案する「サーマルシステムデザイン」が実現する。次章では新規に開発した「マイクロ粘性センサー：MOVS (Micro Optical Viscosity Sensor)」と「マイクロ拡散センサー：MODS (Micro Optical Diffusion Sensor)」について解説する。

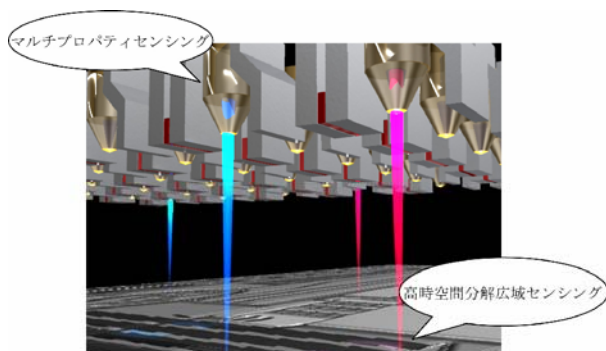


図 1 光学的マイクロ熱物性センサーによる超時空間分解広域熱物性センシング概念図

2. マイクロ粘性センサー

近年、有機薄膜などの成膜乾燥過程における粘性率の時系列変化やムラをリアルタイムにモニタリングしプロセスフィードバックによる新しい機能性膜の開発や薄膜品質の向上が期待されている[9]. インプロセスでの粘性率センシングに求められる性能として、

- ①非接触測定であること
- ②時空間分解能が高いこと
- ③2次元分布計測（アレイ化）が可能であること
- ④振動や蒸発の影響を受けにくいこと

が挙げられる. 著者らはこれらの要求を満たすマイクロ粘性センサー（Micro Optical Viscosity Sensor: MOVS）を開発してきた[10, 11].

図2にMOVS外観を示した. MOVSは非常に小さく（12.6 mm×6 mm×0.8 mm）、従来の光学的粘性計測法と比較して検出部の要素の一辺の大きさが1/1000以下である. 測定原理を図3に示した.

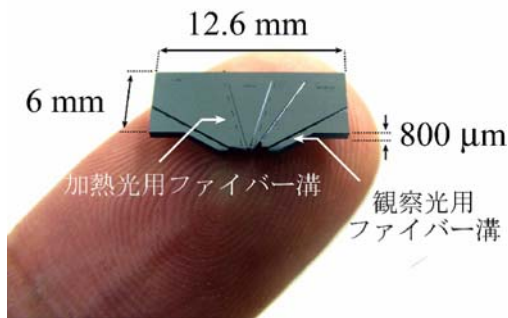


図2 マイクロ粘性センサー外観

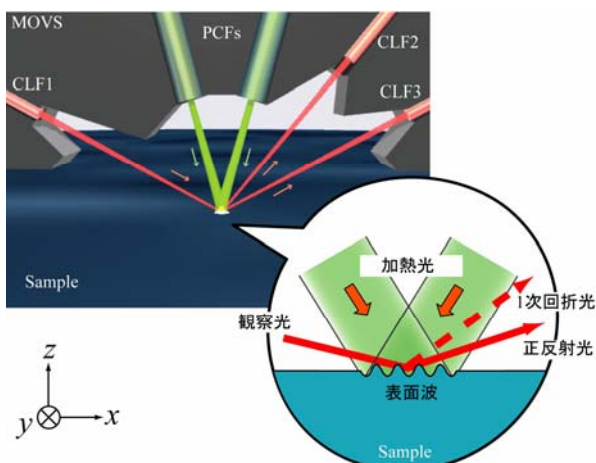


図3 マイクロ粘性センサー原理図

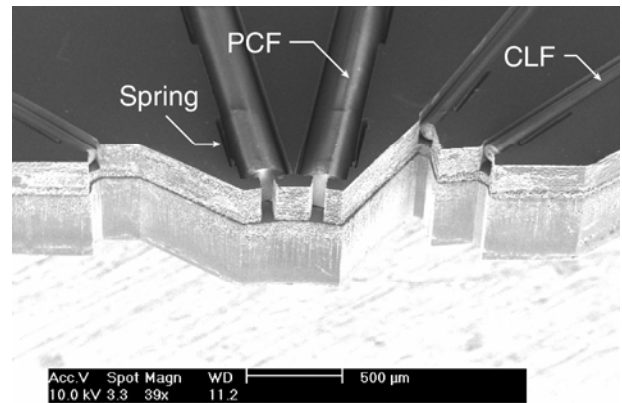


図4 マイクロ粘性センサーの走査型電子顕微鏡像. 直径が異なる2種類のファイバー（PCFとCLF）が溝にばね機構によって保持されている. アライメント精度は±0.5 μm程度.

液体試料表面は、フォトニッククリスタルファイバー（PCF）内を伝送されたパルスレーザーの2光束干渉によって瞬間的に加熱され、非常に微細（振幅ナノメートルオーダー、波長マイクロメートルオーダー）な表面波が誘起される. この表面波の減衰振動特性を解析することによって、非接触で試料の粘性率と表面張力を測定することができる. 表面波の挙動を観察するために、コリメートレンズファイバー（CLF）によって伝送された観察光を表面波上に照射し、一次回折光を検出している. 本チップで計測するレーザー誘起表面波の減衰時定数は数百ナノ秒オーダーであり、非常に高速な減衰挙動を観察することで高速な粘性率測定が可能である. アライメント精度が0.5 μm程度でチップパターンをSOI（Silicon-on-Insulator）ウエハに転写可能なフォトリソグラフィ技術と、高アスペクト比でSiを深掘り可能なドライエッチング技術を用いて作製したMOVSの走査型電子顕微鏡像を図4に示した. 加熱用のPCFと観察（兼制御）用のCLFが設計通りにパッケージされていることが分かる. 加熱光の干渉縞間隔（2本のPCFの交差角度に相当）を4 μmで設計した場合、作製したデバイスにおける加熱光の干渉縞間隔は3.96 μmと測定され、非常にアライメント精度が高いことが分かる.

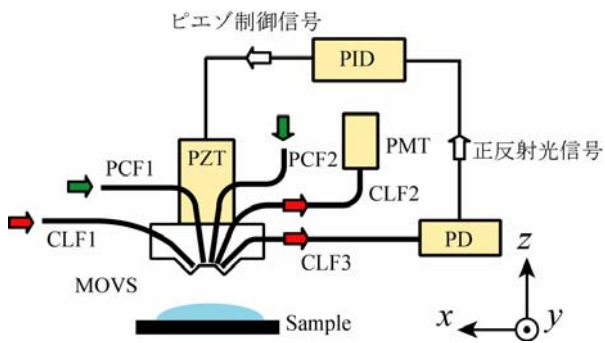


図5 液面 - センサー間距離制御機構

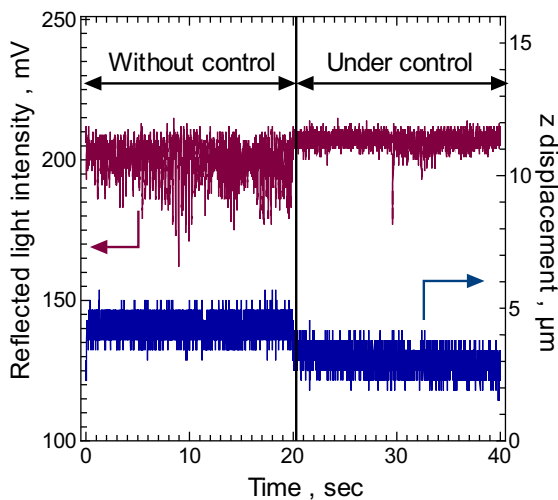


図6 制御機構を用いた液面追従の様子

製造工程の中で粘性率をモニタリングするためには、機器からの振動などの外部擾乱や試料の蒸発による液面低下の影響を抑える必要がある。特に MOVS の焦点深度は $10\ \mu\text{m}$ 程度 (FWHM) であり、光学計測全般にも言えることではあるが液面変化の影響を受けやすい。そこで、MOVS に試料液面 - センサー間距離を一定に保つ機構を集積した。CLF1 によって液面に照射された観察光の正反射光は CLF3 によって集光される。正反射光強度が常に一定になるようにセンサーに接続した piezoelectric 素子を駆動することで、液面 - センサー間距離を一定に保っている。制御機構を図5に示す。CLF3 で集光された正反射光はフォトディテクター (PD, カットオフ周波数 $200\ \text{kHz}$) で検知される。PID 制御器はセットポイントとの偏差から PID 制御出力を piezoelectric 素子に印加し、MOVS の位置を変化させる。piezoelectric 素子ならびに piezoelectric ドライバの周波数応答性は $500\ \text{Hz}$ 程度であり、外部擾乱

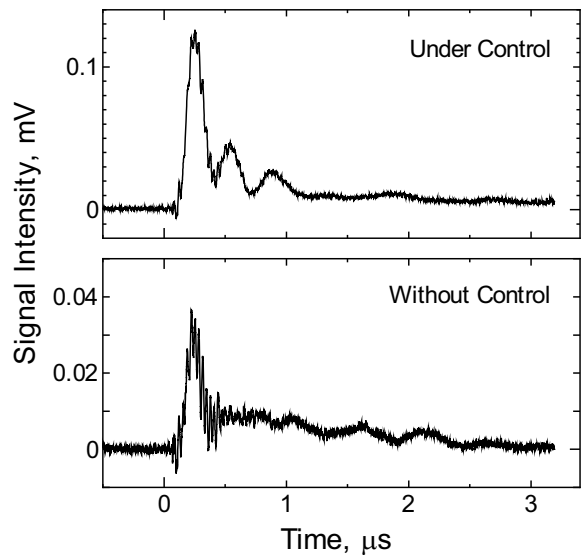


図7 液面 - センサー間距離制御を用いた表面波振動減衰挙動の観察。

や有機溶媒の蒸発に十分追従する性能である。図6に液面 - センサー間距離制御の実験結果を示した。試料は純水を用いた。試料液面に対して観察光および正反射光のなす角度は 60° である。piezoelectric 素子による制御を行わない場合、外部擾乱により正反射光のばらつきが非常に大きいことが分かる。一方、液面 - センサー間距離制御を行うと、集光される正反射光強度のばらつきは飛躍的に低減し、点像分布関数 (PSF) 解析による光量と液面変化の関係を考慮すると、 $\pm 0.7\ \mu\text{m}$ 以内に液面 - センサー間距離が一定になっていることが分かった (解析手法については省略)。制御下の piezoelectric 素子の動きに注目すると、時間経過とともに右下がりになっていることがグラフから分かる。これは試料の蒸発により液面低下に MOVS が追従していることを意味する。

提案した MOVS の妥当性を検証するために、最大 $7\ \text{Hz}$ 、振幅 $13\ \mu\text{m}$ の振動を試料 (純水、加熱光の吸収を促進するために顔料を $0.01\ \text{wt}\%$ 添加) に加振した場合の表面波挙動を観察した (図7)。2分間にわたり繰り返し計測を行い、256回波形を平均化処理した場合、距離制御を行うことにより S/N 比が4倍程度向上した。これは、液面 - センサー間距離制御により計測の再現性が向上したためである。以上より MOVS がインプロセス計測に適用可能であることが確認された。

3. マイクロ拡散センサー

μ TAS (Total Analytical Systems) はマイクロミキサー、マイクロリアクターならびにマイクロソーターをワンチップに集積した化学合成チップとしてコンビナトリアルケミストリーなどに期待を集めている。著者らは蛋白質などの分子構造変化に起因した拡散係数変化をモニタリングするためのオンチップセンサーの開発を目指している[12]。本センサーを分析要素として μ TAS に集積することで、「いつでも・どこでも・だれでも」高度なオンサイト医療を受けることが可能となり、「安心・安全」な生活環境の実現へと貢献する。

著者らが開発したマイクロ拡散センサー (Micro Optical Diffusion Sensor: MODS) では、格子状の濃度分布を形成し、その濃度拡散の時定数を計測することで試料の相互拡散係数を測定する。濃度分布を形成するために我々は光誘電泳動を用いた (図 8)。光導電膜に入射した励起光によって、照射された領域の電気抵抗率が低下する。チャンネル

間に交流電圧を印加することによって非一様な電場が形成され電界強度に沿って誘電泳動力が形成される。チャンネル内の粒子は泳動力を受け、光を照射した領域に集まり濃度分布を形成する。本方法を用いることによって自由な濃度分布を形成することが可能であり、試料の拡散係数に応じた測定条件 (干渉縞間隔) を設定することができる。干渉縞間隔を狭くすることで拡散の時定数が短くなるため、短時間での測定ができるという特徴を有している。

図 9 に MODS の測定原理を示した。チャンネル内の試料は ITO 透明電極によって挟まれている。光導電膜としてアモルファスシリコン (a-Si:H) を用いた。チャンネル下方からレーザー干渉によって光導電膜を励起するとチャンネル内には誘電泳動力が誘起され、格子状の濃度分布が形成される。格子状濃度分布に観察光を入射すると濃度分布に対応した 1 次回折光が得られる。1 次回折光の減衰時定数から拡散係数を測定することができる。

透明電極

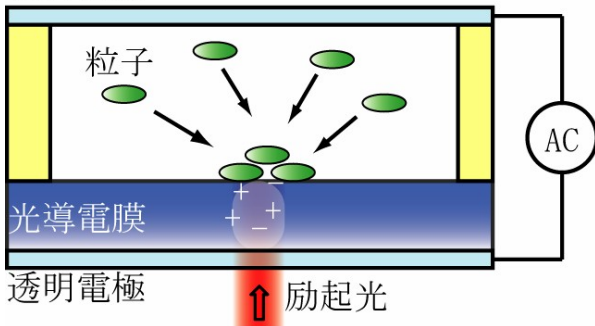


図 8 光誘電泳動原理図



図 10 マイクロ拡散センサー

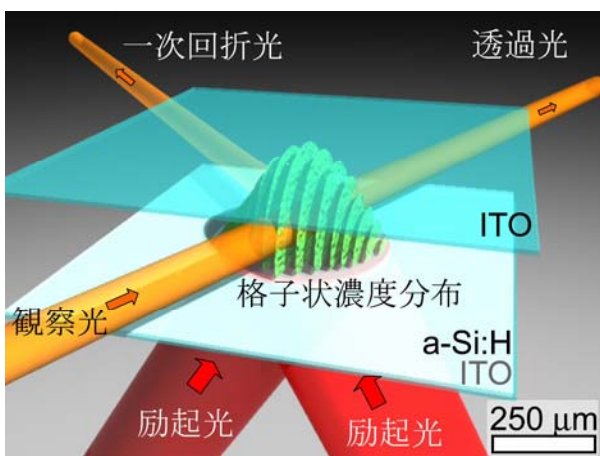


図 9 マイクロ拡散センサー測定原理

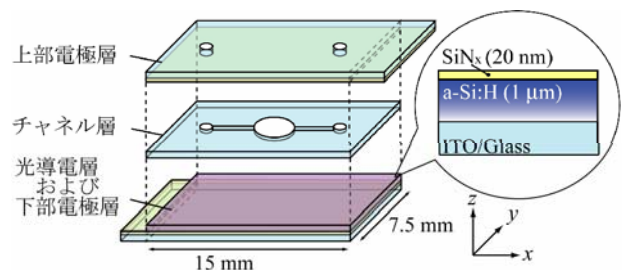


図 11 光誘電泳動セル

MODSはITO電極と光導電膜によって構成されるチャンネル(MODS上部構造)と、レーザー干渉を光導電膜上で形成するためのMEMSミラー(MODS下部構造)によって構成される(図10)。著者らはこれまでに上部構造の濃度分布形成原理の妥当性について検討を行ってきた。図11に示される光誘電泳動セル(MODS上部構造に相当)を作製し、まず光導電率の測定を行った。光導電膜上に図12のような金属電極をフォトリソグラフィ技術によって作製し、電極間にレーザーを照射した。照射する光強度が増加するに従って光導電膜の導電率が上昇していることが示され(図13)、光誘電泳動を誘起するために必要不可欠な光導電効果を確認することができた。次に光誘電泳動セルを用いた1 μm 径ポリスチレンビーズの捕集実験を行った。ここでは、実験の簡単のために2光束レーザー干渉を行わず、光誘電泳動セルに垂直にレーザーを入射し、シアリング干渉による同心円状の干渉縞によって光導電膜を励起した(図14)。照射したレーザーのビーム品質が悪いために歪んだガウス分布になっているが、シアリング干渉によって同心円状の干渉縞が形成されていることが分かる。ITO透明電極に10 Vp-p、50 kHzの交流電圧を印加すると励起光の干渉縞に沿ってポリスチレンビーズが捕集された(図15)。本デバイスを用いることによって任意の形状の濃度分布をチャンネル内に形成することができることが確認された。

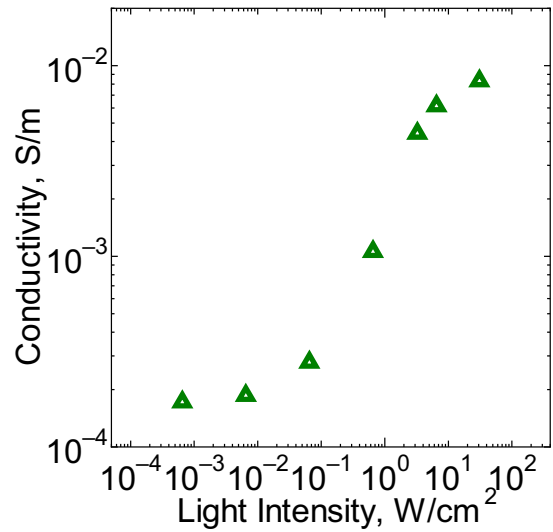


図13 光導電率測定結果

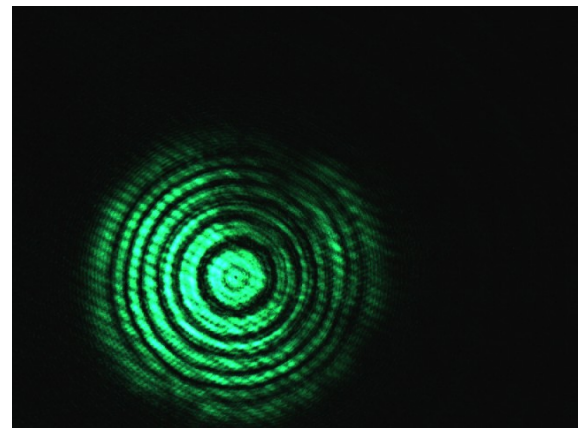


図14 励起光のシアリング干渉

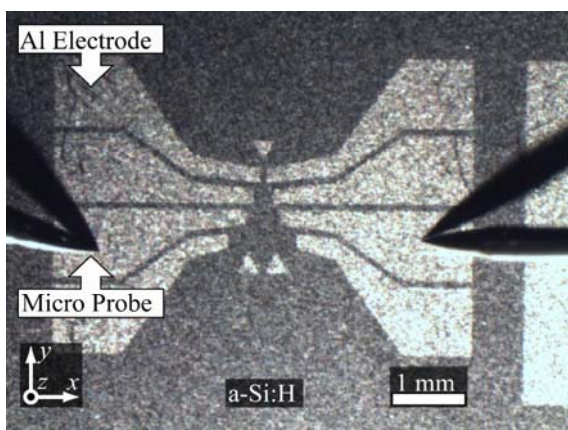


図12 光導電率測定用電極。測定対象の導電率に応じて電極間距離を変更可能。

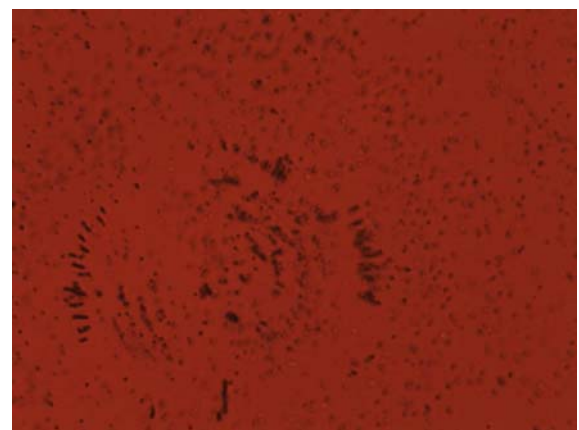


図15 光誘電泳動によるポリスチレンビーズの捕集。励起光強度分布に沿って捕集されている。

4. まとめ

光学的熱物性計測技術の持つ特徴（非接触，高時空間分解能）と光 MEMS 技術の持つ特徴（マイクロ化，多機能高集積化，アレイ化）を融合した新しい光学的マイクロ熱物性センサーについて解説した．振動などの外部擾乱や試料の蒸発による測定不確かさを飛躍的に低減可能なマイクロ粘性センサーの開発に成功した．今後は，インプロセス計測の実現に向けて更なる再現性の向上を図る予定である．また，蛋白質などの拡散係数をオンチップで計測可能なマイクロ拡散センサーの原理の妥当性を検証した．今後は，各測定コンポーネントを光 MEMS 技術によってマイクロチップに集積化する予定である．これらマイクロ熱物性センサーは工業分野，医療分野，材料分野など様々な分野におけるマイクロシステムデザインの実現を可能にすると考えられる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，本塾修士 2 年生蛭子井明君，長町隆介君，学部 4 年生阿部広君，猪谷恒一君にはデバイス作製および実験において多大な協力と献身的な努力があった．マイクロ熱物性センサーの作製にあたり，文部科学省「ナノテクノロジー・ネットワーク」プロジェクトの支援を受け，東京大学超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点ならびに産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設において実施された．本研究の経費の一部は，科学技術振興機構地域イノベーション創出総合支援事業「シーズ発掘試験」および日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（S）（No. 19106004）によるものである．ここに記し，謝意を表す．

参考文献

- [1] Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., Thermal Diffusivity Measurement of High-Conductivity Materials by Dynamic Grating Radiometry, *Int. J. Thermophys.*, **22** (2001) 289.
- [2] Jigami, T., Kobayashi, M., Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., Development of nanoscale temperature measurement technique using near-field fluorescence, *Int. J. Thermophys.*, **28** (2007) 968.
- [3] Solgaard, O., Sandejas, F.S.A. and Bloom, D.M., Deformable grating optical modulator, *Opt. Lett.*, **17** (1992) 688.
- [4] Hornbeck, L.J., Current Status of the Digital Micromirror Device (DMD) for Projection Television Applications, *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.*, (1993) 381.
- [5] Bishop, D.J. et al, The Lucent LambdaRouter: MEMS Technology of the Future Here Today, *IEEE Communications Magazine*, **40** (2002) 75.
- [6] Chong, C., Isamoto, K. and Toshiyoshi, H., Optically Modulated MEMS Scanning Endoscope, *IEEE Photo. Tech. Lett.*, **18** (2006) 133.
- [7] McCormick, D.T. et al, A Three Dimensional Real-time MEMS based Optical Biopsy System for In-vivo Clinical Imaging, *Proc. 14th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Lyon, (2007) 203.
- [8] Ra, H., Piyawattanametha, W., Taguchi, Y., Lee, D., Mandella, M.J., Solgaard, O., Two-dimensional MEMS scanner for dual-axes confocal microscopy, *J. Microelectromech. Syst.*, **16** (2007) 969.
- [9] Tjong, S.C., Structure, morphology, mechanical and thermal characteristics of the in situ composites based on liquid crystalline polymers and thermoplastics, *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **41** (2003) 60.
- [10] Taguchi, Y., Ebisui, A. and Nagasaka, Y., Miniaturized optical viscosity sensor based on a laser-induced capillary wave, *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, **10** (2008) 044008.
- [11] Nagamachi, R., Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., Development of Miniaturized Optical Viscometer with Focus Control System for in-situ Measurement, *Proc. 18th Europ. Conf. Thermophys. Prop.*, Pau (2008).
- [12] Ebisui, A., Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., Feasibility Study of Micro Optical Diffusion Sensor based on Opto-dielectrophoretic Manipulation, *Proc. 18th Europ. Conf. Thermophys. Prop.*, Pau (2008).

ナノ材料の熱物性計測

Measuring Thermal Property of Nano Materials

高橋 厚史 (九州大学), 藤井 丕夫 (産総研)

Koji TAKAHASHI (Kyushu University), Motoo FUJII (AIST)

e-mail: takahashi@aero.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ナノ材料とは、代表寸法が1ミクロンを大きく下回る微粒子・細線・薄膜などを指すが、狭義では、そのナノオーダーの寸法ゆえにバルク材料とは著しく異なった性質を示す材料のことである。この後者の意味では、バルク材料であってもナノヘテロ界面によって特異な性質を示すものはナノ材料の範疇に入る。いずれにしても、ナノテクの主役はこのようなナノ材料の開発であるわけだが、新規に合成された各種ナノ材料の物性を把握することは欠かせない作業である。本稿ではワイヤー状のナノ材料1本に関して熱伝導率を精密に計測する技術について我々の研究を中心に紹介することとする。

まず、電気・磁気・光・熱・機械強度といった種々の物理的性質の中でも、熱は電気と比べて絶縁方法が乏しくICのような小型化の手法が成熟してもいないので、小さな試料、特にナノ微粒子やナノワイヤの熱物性を個別に測定する実験は非常に難しい。ナノ材料の中でも薄膜については手作業でもアプローチ可能な広さがあることが多いので、3 ω 法 [1]やサーモリフレクタンス法[2]によって定量的な測定が一般化しつつある。これは電子デバイスにおける熱制御要求が薄膜の熱測定研究を後押しした結果とも言える。ただし、カーボンナノチューブをはじめとしたナノ微粒子・ナノワイヤも、薄膜同様に電子デバイスへの応用研究が進められ、フィラーとして複合材料や冷媒の伝熱性能を高める役割も強く期待され始めている。よって、各種ナノ材料の熱物性を把握することは、これら応用製品の開発を正しい方向へ導くために重要であるし、新しい熱物性工学という意味で研究者を強く魅了するものでもある。

2. カーボンナノチューブ

ナノテクの代表的な存在であるカーボンナノチ

ューブに関してダイヤモンドを大きく越える熱伝導率を持つという予測[3]が社会に少なからぬ衝撃を与えたのは記憶に新しい。その論文はカイラル指数(10,10)の単層チューブに対して分子動力学シミュレーションを行い、室温で6600W/mKという結果を示していたが、その後の同種の解析ではそれよりも低い値が数多く報告されている。詳細については他稿[4,5]を参照していただくとして、実験がシミュレーションに比べて遅れたのがこの混乱の原因の一つであるのは間違いない。

カーボンナノチューブの熱伝導率に関する初期の実験はマット状に成型した単層ナノチューブを定常比較法によって調べたもの[6,7]である。ただし、その異方性を考慮して分散液に強磁場をかけて配向成型された試料であっても室温の熱伝導率は200W/mKを少し超えた程度であった。物性を正確に調べるためには試料の純度を高めるといのが常套手段であり、ナノチューブの向きを揃えて計測するという方向性は正しい。しかしながら、長さが一本一本異なるためにどうしてもチューブ-チューブ間の強い熱抵抗が一部介在することになり、平均値として低めの熱伝導率が出ることは避けられない。つまり、ナノ材料に関しては既存の計測法に合うように試料のバルク化を工夫する手法には限界があると結論できる。

これとは逆に、計測法すなわちセンサーのほうをナノ材料に合うよう工夫して、バルクでない1本の熱伝導率について信頼性の高い計測を可能としたのが、UCバークレーのMajumdarのグループ[8]と我々を含む九州大学のグループ[9]である。両者は後述するように全く異なる手法を取っている。なお、試料への周期的通電加熱を利用した3 ω 法[10]も試みられてはいるが、信頼性に関して議論の余地がある。現在までに、カーボンナノチューブに関しては室温で単層では3000W/mKを超える熱伝導率[11,12]が、多層でも細い試料であれ

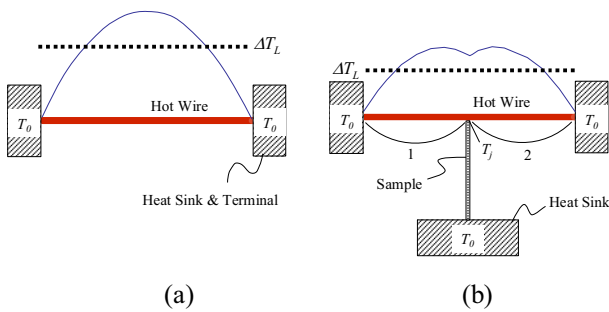


図 1 ワイヤー試料の付加による熱線の温度分布の変化のようす

ば 2000W/mK 以上の値が計測されており、欠陥がなければダイヤモンドを越える熱輸送能力を有しているのは間違いないものと思われる。

3. T 字一体型ナノセンサー

3.1 測定原理

本章では著者らが開発したナノ材料用の熱伝導率計測システムの詳細を説明する。これは短線加熱法を応用して極細カーボンファイバーの熱伝導率を計測する研究[13]に端を発している。原理を図 1 に示すが、両端がヒートシンク兼ターミナルと直結した熱線に電気を流すとジュール発熱により温度分布は二次曲線を示す。この熱線の中央部にヒートシンクと結ばれた試料を付け加えるとそれが熱の逃げ道となって、温度分布は図 1(b)中に示されたような凹んだ曲線になり、温度上昇の平均値 ΔT_L が変化する。その変化の大きさは試料の熱コンダクタンスに依存する。よって温度に依存する熱線の電気抵抗の変化を計測することで試料の熱コンダクタンスが得られることになる。

具体的な熱伝導率の導出を以下に示す。試料となるナノ材料との接点の左右で熱線を 1, 2 と区別し、添字を付けて表すこととする。熱線の 1 の部分の一次元熱伝導方程式は、熱線の熱伝導率を λ 、単位時間単位体積あたりの発熱量を q_v とすると次式で表される。

$$\lambda \frac{d^2 T_1(x_1)}{dx_1^2} + q_v = 0 \quad (1)$$

なお、電流 I 、電圧 V 、熱線としてホットフィルムを用いるとして、その長さを l 、幅を w 、厚さを d とすると、 $q_v = IV/(lwd)$ となる。2 の部分につい

ても同様で、試料の部分については添字 f を付けることとして熱伝導率を λ_f とすれば、

$$\lambda_f \frac{d^2 T_f(x_f)}{dx_f^2} = 0 \quad (2)$$

と表される。これらの熱伝導方程式をヒートシンクの温度 T_0 、ホットフィルムとナノ材料の接点の温度を T_j として解くと、

$$T_1(x_1) = -\frac{q_v}{2\lambda} x_1^2 + \frac{q_v l_1^2 + 2\lambda(T_j - T_0)}{2\lambda l_1} x_1 + T_0 \quad (3)$$

となり、他の部分についても同様に温度分布が得られる。ここでは、接触熱抵抗は無視している。これらの式からホットフィルムについて、

$$\Delta T_L = \frac{1}{l} \int_0^l [T(x) - T_0] dx \quad (4)$$

で定義する体積平均温度変化を計算すると、

$$\Delta T_L = \frac{(l_1^3 + l_2^3) q_v}{12\lambda l} + \frac{T_j - T_0}{2} \quad (5)$$

が得られる。この体積平均温度変化とホットフィルムの電気抵抗値の変化の関係は、 ΔR を抵抗値変化、 β を抵抗温度係数、 R_0 を基準(0°C)での抵抗値とすれば、 $\Delta T_L = \Delta R / (\beta R_0)$ となる。次に熱の流れについて考えると、ナノ材料を通過する熱流束を q_f 、ホットフィルムの断面積を A_h 、試料の断面積を A_f とすると、ホットフィルムとナノ材料の接点では

$$q_f A_f = -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x_1} A_h = \lambda \frac{\partial T_2}{\partial x_2} A_h \quad (6)$$

という関係があるので、式(3)で表される温度分布 T_1 および温度分布 T_2 よりナノ材料中の熱流束は

$$q_f = \frac{\lambda A_h}{A_f} \left[\frac{q_v l}{2\lambda} - \frac{(T_j - T_0) l}{l_1 l_2} \right] \quad (7)$$

となる。一方、ナノ材料の温度勾配を考慮すると、熱流束は

$$q_f = \lambda_f \frac{T_j - T_0}{l_f} \quad (8)$$

とも表すことができ、式(7)、(8)よりナノ材料の熱伝導率は

$$\lambda_f = \frac{\lambda A_h l_f}{A_f} \left[\frac{q_v l - (T_j - T_0) l}{2\lambda \frac{l_1 l_2}{l_1 l_2}} \right] \quad (9)$$

と計算できる。式(5)を用いると、

$$\lambda_f = \frac{l_f l^4 \lambda A_h - 12 l_f l^2 \lambda^2 A_h \Delta T_L / q_v}{12 l_1 l_2 A_f l \lambda \Delta T_L / q_v - l_1^4 l_2 A_f - l_1^4 A_f} \quad (10)$$

という関係式が得られ、実験データ $\Delta T_L / q_v$ よりナノ材料の熱伝導率が求められる。

3.2 製作方法

本センサーの製作方法を図2に示す。まず、SiO₂層を有するSi基板上に電子線レジストをスピコーティングし、次に電子線描画装置を用いてセンサーのパターンを基板上に直接描画し現像する。

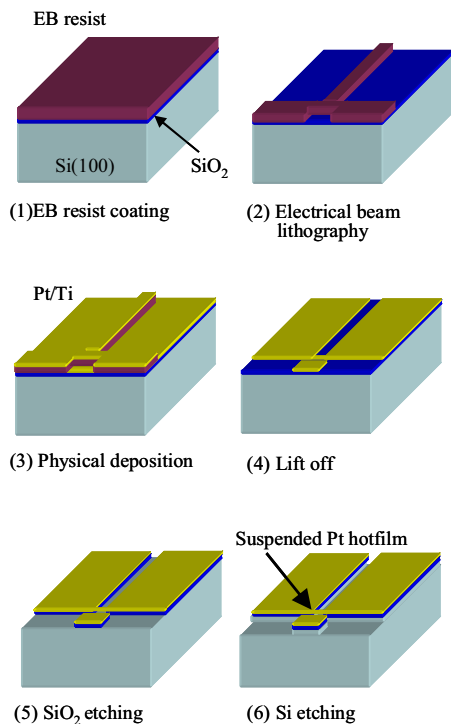


図2 ナノセンサーの製作プロセス

この上にTiおよびPtを蒸着し、リフトオフ法によりセンサーのパターンを形成する。ここでTiの膜厚は5nm程度でありPtとSiO₂との間の接着力強化のために用いている。Ptホットフィルムとなる部分を基板から浮かすために、BHF溶液を用いてSiO₂層を等方的にエッチングする。なお、この際Tiは除去される。さらに、Ptホットフィルムと基板との間の距離を増すためにKOH溶液あるいはCF₄プラズマを用いてSi基板を数ミクロンの深さだけエッチングする。この工程によって、左右のターミナルの間にPtホットフィルムが懸架され、島状のヒートシンク部分と数ミクロン離れて向かい合った形状のデバイスが完成する。なお、図示は省略しているがPt膜は擬似的に四端子法となるように形状を与え、リード部の電圧誤差は十分小さいことを確認している。

ところで、カーボンナノチューブ等のナノ材料を図1のようにセンサーに設置するのは熟練を要するプロセスである。このプロセスは文献[14]の手法に準じて実行される。つまり、ある基板の端部にナノ材料を誘電泳動によって整列させ、SEM内に設置されたナノマニピュレーターで拾い上げる。具体的には、プローブには電界研磨したWワイヤーを用い、EBID（電子線誘起堆積）法によって試料をプローブに接着する。プローブに装着された試料は高解像度TEMで観察され、その後SEM内のマニピュレーターによって計測用センサーに装着される。このEBIDはSEM内に残存した有機分子ガスを前駆体としており、それが二次電子によって分解されアモルファスカーボンとなって堆積することを利用している。この堆積物が

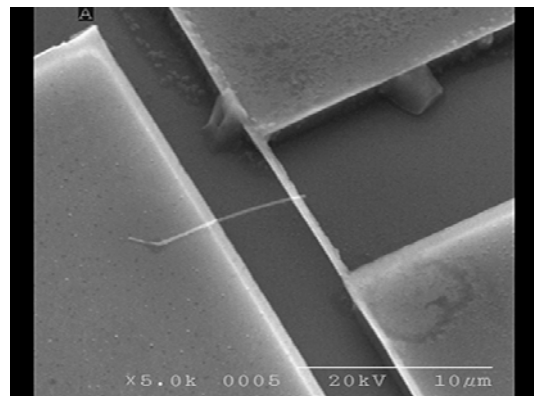


図3 SiCナノワイヤが設置されたT字一体型ナノセンサーのSEM写真

一種の接着剤として働くことでナノ材料の接合が実現されている。ただし、Wプローブへは仮止めの、センサーへは十分な接合となるよう電子線を照射する必要がある。図3には接合後の様子を示したが、十分な接合とは接触抵抗がナノ材料の熱抵抗に比べて無視できる程度ということになる。カーボンの代わりに FIB(収束イオンビーム)法によって W や Pt などの金属を堆積させると接触抵抗が低減される可能性が高くなるが、どんな場合でも熱計測と接合作業を繰り返し行って経験則を得ることが望ましい。

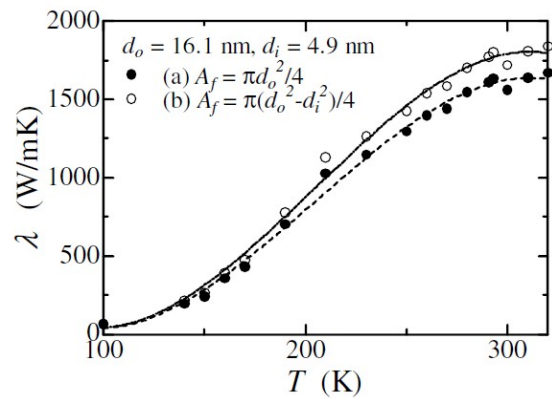
3.3 計測結果と将来展望

計測は 10^{-3} Pa 以上の真空度のクライオスタット内で行われる。ナノ材料の設置の前後にそれぞれ Pt 膜と試料の熱伝導率を計測する。例として、多層カーボンナノチューブの熱伝導率の温度依存性と直径依存性が図4のように得られている[9]。図4(a)で熱伝導率は温度に対して単調に増加しておりウムクラップ散乱の効果が 300K 以下では現れていない。図4(b)で直径が大きいほど熱伝導率が下がるのは、多層チューブの層間は弱いファンデルワールス力しか働いていないため、最外層以外の層がほとんど伝熱に寄与していないからである。また、結晶性の良い SiC ナノワイヤの計測[15]も同様の手法で行っており、バルクの SiC 結晶では 50K 程度で見られる熱伝導率のピークがナノワイヤでは 340K 程度まで高温側にシフトしており、表面散乱の増加によるフォノンの平均自由行程の減少が反映された結果となっている。

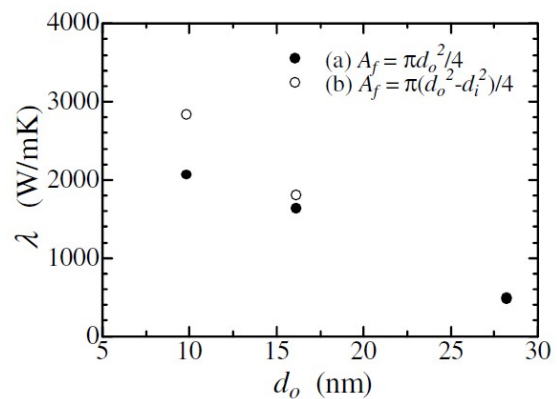
この計測法は熱伝導率のために開発されたものであるが、電気伝導率とゼーベック係数を同時に計測するための改造も容易である。また、白金薄膜の代わりにウォーラストンワイヤを用いる方法[16]も紹介されている。さらに、材料の熱輸送の異方性を検知するために2個の熱線を用いたセンサーも開発済みである。この計測法の特徴でもある構造の単純さは大きな利点であり、例えば AFM の針の先端に構築するなど、多くの応用・発展が期待される。

4. UC バークレーの MEMS センサー

ナノ材料1本の熱伝導率計測に最も早く成功したのは Majumdar のグループである。その背景に



(a) 温度依存性



(b) 直径依存性

図4 多層カーボンナノチューブの熱伝導率、ただし d_o はチューブの外径、 d_i は内径

は UC バークレーのマイクロ加工センターの存在と走査型熱顕微鏡の研究実績があった。つまり何をどこまで小さく作れるかという加工技術と微小なセンサーで熱を測る計測技術が融合することではじめてこのような先導的研究、すなわち、直径 100nm 以下で長さ数ミクロンといった「とてつもなく」小さい対象物の熱物性が計測可能となったといえる。彼らの MEMS 技術に基づく計測システム[8]を以下に概説しておく。

MEMS では犠牲層あるいはバルクエッチングによって薄膜を基板から浮いた状態にすることが頻繁に行われる。カンチレバーや圧力センサーの膜もこの方法で作られ、その場合の薄膜は強度に優れ残留応力も小さくできる絶縁体として窒化シリコンがよく用いられる。Majumdar らが開発したセンサーもこの方式である。すなわち、シリコンウエハ上に堆積させた厚さ 0.5 μ m の窒化シリコン

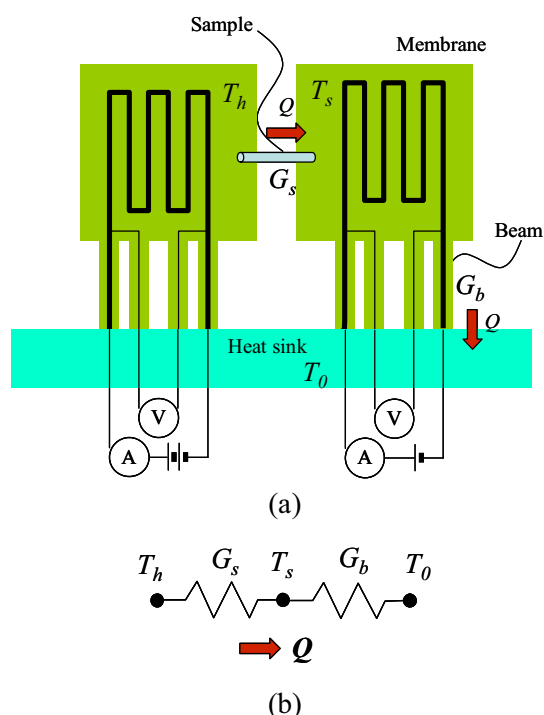


図5 UC パークレーのMEMS センサーの原理

膜を、その上に白金薄膜の抵抗部および配線部を構築した後で、 $14\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ 程度の方形膜2個と $2\ \mu\text{m} \times 420\ \mu\text{m}$ という長い梁数本以外の部分をエッチングする。この残った窒化シリコン膜をマスクとしてシリコン基板を等方的にエッチングすることで、ヒーター兼センサーとなる方形膜2個が基板から浮いた状態になる。方形膜はリードを兼ねる上記の長い梁数本によって支えられており、十分に断熱された計測システムが準備完了となる。

計測原理を図5に示す。測定対象のカーボンナノチューブ等のナノ材料は、この方形膜2個の間に懸架される。どちらか一方の方形膜内の白金抵抗に通電加熱することで膜間に温度差を付ければこの試料のみを通る熱輸送が発生する。ここで、このセンサーの重要な条件として方形膜内の温度が一定であるという仮定がある。これは梁の熱抵抗が方形膜内の抵抗に比べてはるかに大きいことから実現される。実際に数値計算してみると確かに加熱している膜で3パーセント程度の温度分布しか生じない。加熱しない側の膜ではもう少し大きな分布が生じるなど、これらは計測誤差になりうるので注意が必要である。この誤差は無視できるとして、試料の両端の温度は左右の方形膜内に設置された白金の抵抗部の温度として図のように

計測可能になる。図5(b)には各部の温度と熱抵抗と熱流束の様子を示しているが、

$$Q = G_b(T_s - T_0) = G_s(T_h - T_s) \quad (11)$$

という関係が成立することから、試料の熱コンダクタンス G_s が得られる。

なお、より詳細には梁内のリード部分での発熱も考慮して G_b は決定され、また、試料の電気伝導率も同時に測定出来るように配線が施されている[17]。この計測システムによって、最近では、大きく曲げてもカーボンナノチューブの熱伝導率はほとんど変化しないことが確認[18]されたり、窒化ボロンナノチューブの一端に付加的質量を堆積させることで熱の整流作用の存在を発見[19]したり、シリコンナノワイヤの表面を荒くすることでフォノンの散乱を増大させ熱電変換の性能を向上[20]させたりする研究が行われている。どの研究も単なるサイズ効果ではない斬新な結果を得ており、ナノ材料の熱物性の興味深い点や応用性を実験で明らかにしたインパクトは非常に大きい。

5. まとめ

ナノ材料の個別の熱物性を正確に計測するためには試料に合わせたセンサーが必要で、カーボンナノチューブなどのワイヤー状の試料用に開発された計測システムを紹介した。MEMSの窒化シリコン膜を用いたUCパークレーの方式はデバイスの製作が困難であるものの計測は容易である。一方で、著者らの方式はセンサー部の感度が高い代償として静電気耐性が劣る。しかし構造がシンプルであることから製作が比較的容易で発展的な応用も見込まれる。計測原理としては、前者が方形膜内の温度の一様性を追求しているのに対して、後者がセンサーの温度の分布を利用しているという対照的なアプローチを取っている点は面白い。これらは共に試料を通電加熱することもなく定常法で熱のみの伝導を調べられることから信頼性が高いといえる。今後さらに洗練させていくためには、接触熱抵抗の影響を排除する実験手法の確立が望まれる。例えば、同じ試料を使って長さを変えてコンダクタンスを測れば接触抵抗が同定できる。このような技術面の向上と平行して、より多くの研究者がナノセンサーを気軽に利用できるように体制の構築も重要である。

謝辞

T 字一体型ナノセンサーに関する研究は、張興先生 (清華大学), 生田竜也氏 (九州大学), 吾郷浩樹先生 (九州大学), 清水哲夫博士 (産総研) をはじめ多くの方々の参画と協力で行われたものである。また、科学研究費補助金の援助および九州大学コラボレーションの機器によって本研究の一部は実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Cahill, D.G., Thermal Conductivity measurement from 30-750K: The 3w method, *Rev. Sci. Inst.*, **61-2** (1999) 802.
- [2] Kading, O.W. et al, Thermal conduction in metallized silicon-dioxide layers on silicon, *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1629.
- [3] Berber, S. et al., Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes, *Phys. Rev. Lett.*, **84-20** (2000) 4613.
- [4] 丸山茂夫, 単層カーボンナノチューブの熱伝導, *熱物性*, **19-3** (2005) 185.
- [5] Lukes, J.R. and Zhong, H., Thermal conductivity of individual single-wall carbon nanotubes, *ASME J. Heat Transfer*, **129** (2007) 705.
- [6] Hone, J. et al., Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes, *Phys. Rev. B*, **59** (1999) 2514.
- [7] Hone, J. et al., Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films, *App. Phys. Lett.*, **77-5** (2000) 666.
- [8] Kim, P. et al., Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes, *Phys. Rev. Lett.*, **87-21** (2001) 215502.
- [9] Fujii, M. et al., Measuring the Thermal Conductivity of a Single Carbon Nanotubes, *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005) 065502.
- [10] Choi, T.Y. et al., Measurement of the Thermal Conductivity of Individual Carbon Nanotubes by the Four-Point Three- ω Method, *Nano Lett.*, **6-8** (2006) 1589.
- [11] Yu, C. et al., Thermal Conductance and Thermopower of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube, *Nano Lett.*, **5-9** (2005) 1842.
- [12] Pop, E. et al., Thermal Conductance of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube above Room Temperature, *Nano Lett.*, **6-1** (2006) 96.
- [13] Zhang, X., et al., Measurements of thermal conductivity and electrical conductivity of a single carbon fiber, *Int. J. Thermophysics*, **21-4** (2000) 965.
- [14] Nishijima, H. et al., Carbon nanotube tips for scanning probe microscopy: Preparation by a controlled process and observation of deoxyribonucleic acid, *App. Phys. Lett.*, **74-26** (1999) 4061.
- [15] Takahashi, K., et al, Thermal conductivity of SiC nanowire formed by combustion synthesis, *High Temperatures-High Pressures*, **37-2** (2008) 119.
- [16] Dames, C., et al., A hot-wire probe for thermal measurements of nanowires and nanotubes inside a transmission electron microscope, *Rev. Sci. Inst.*, **78** (2007) 104903.
- [17] Shi, L., et al., Measuring Thermal and Thermoelectric Properties of One-Dimensional Nanostructures Using a Microfabricated Devices, *ASME J. Heat Transfer*, **125** (2003) 881.
- [18] Chang, C.W., et al., Nanotube Phonon Waveguide *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 045901.
- [19] Chang, C.W., et al., Solid-State Thermal Rectifier, *Science* **314** (2006) 1121.
- [20] Hochbaum, A.I., et al., Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires, *Nature*, **451** (2008) 163.

「ポンプレス水冷システムの開発」

Development of a Pump-less Water Cooling System

一法師 茂俊 (三菱電機 (株))

Shigetoshi IPPOUSHI (Mitsubishi Electric co. Ltd.)

e-mail: Ipposhi.Shigetoshi@aj.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

近年、電子機器の微細化・高機能化、電力機器のインバーター化・小型化の急速な進展に伴って、機器内部の発熱密度が急増しており、冷却が機器の限界性能や寿命を左右するようになってきている。一般に、発熱量が増大するにしたがって、冷却形式は自然空冷から強制空冷式へ、さらに冷却能力の高い水冷式へと変わるが、水冷式には冷却液を循環させるポンプが必要で、重量と消費電力が増大するだけでなく、液漏れやポンプ停止時の信頼性を確保するために装置が大型になりがちでコストが高く、定期的なメンテナンスも必要となる。それゆえ、信頼性が重視される通信・情報設備、エネルギー供給設備、鉄道・交通インフラなどの重要施設(ライフライン)からは、メンテナンス不要で信頼性の高い大容量・高効率冷却システムが求められている。

2. 温暖化の連鎖

一方、地球規模での気候変化が現実には生じ始めており、地球温暖化対策が必要とされている。対策の主流は、省エネ機器の開発およびリサイクルの促進であるが、本報では放熱体系の構造変革による温暖化対策について検討する。

図1に、現状の放熱体系の概略を示す。例えば、「IT施設」に関してみると、IT機器の高速化・大容量化に伴い室内で発生する発熱量は急速に増大しており、機器の信頼性確保のために機器冷却能力が増大している。この冷却能力の増大は、エネルギー使用量の増加および室外への排熱量の増大を導く。

これまで、地球という巨大なヒートシンクは「無限」であると錯覚されていたが、人口密集および急激な機器発熱量の増大により、地球上に点在するヒートスポットを発生させ、また平均気温の上昇を引き起こしている。それゆえ、上記した排熱量の増大は外気温度の上昇をもたらす、さらに外気温度と室

内温度の差に左右される空調機器効率の低下を引き起こし、更なる冷却能力の増大を生じさせる。

これらのことは、人口密集地において顕著であり、また「IT施設」に特化したものではなく、「民生」、「産業」、「運輸」など全ての人類活動に係わる排熱が外気を媒体としてリンクし始めており(温暖化の連鎖)、ヒートアイランド現象、地球温暖化など大規模な気候変動を引き起こしている。

人類の活動を抑制することは困難であり、今後も人口は増加し続け、また世界の生活水準も向上し続けると考えられ、上記気候変動は加速すると思われる。そこで、この「温暖化の悪い連鎖」を抑制する手段の一つとして、放熱体系の構造転換が必要であると考えている。

従来の放熱体系は、図2上段に示すように、電子機器から室内へファンによる空冷またはポンプによる水冷により放熱され、さらに室内を快適な環境にするために空調機器などにより室外へ放熱する体系が多い。この場合、図示する通り、電子機器の発熱量に加えて、放熱機器の消費電力分だけ多い熱量を室外へ排出しなければならない。この従来の放熱体系から最もシンプルな直接放熱体系(図2下段)に構造転換することができれば、約40%の省エネおよびCO₂排出量の削減が達成可能と考えられる。また、地域全体の排熱密度低減により、上記した「温暖化の悪い連鎖」が抑制され、更なる改善効果が期待できる。

これらのことは、至極当たり前のことであるが、直接放熱体系を実現できる大容量/長尺型の熱デバイスは見当たらない。

3. 典型的なヒートパイプ

この直接放熱体系に適する放熱デバイスとして、ヒートパイプがある。典型的なヒートパイプを図2(a)に示す。密閉容器の中に適量の作動流体を封止したもので、受熱部に設けられた電子機器からの

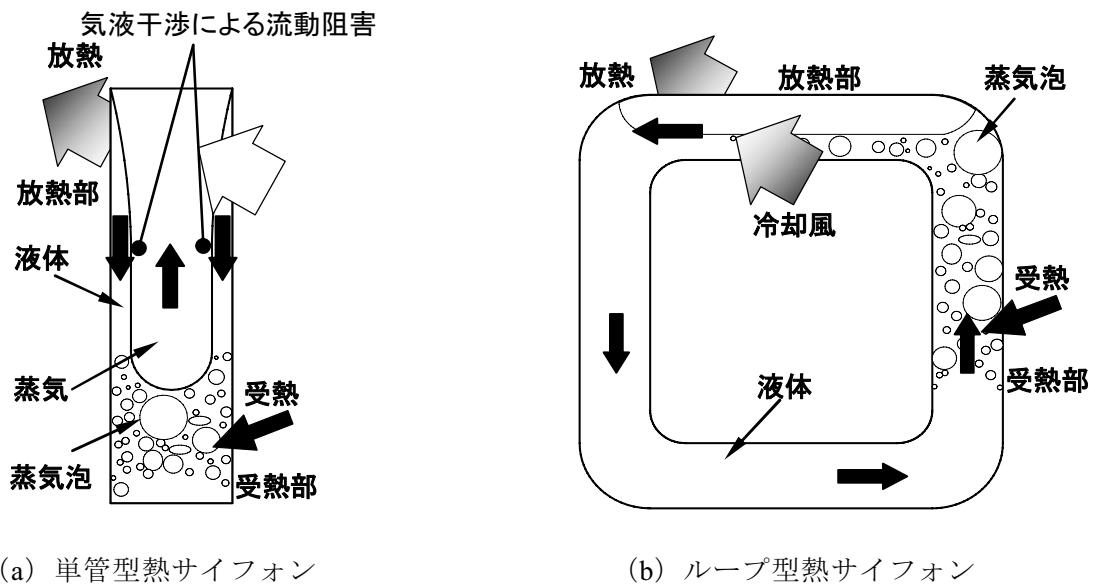


図2 典型的なヒートパイプ

発熱により、受熱部内の液体が沸騰または蒸発（液体が潜熱を吸収して蒸気へ相変化する）し、受熱部内蒸気圧力が上昇する。一方、放熱部は、通常外壁にフィンが設けられ通風冷却されており、放熱部内の蒸気が凝縮（蒸気が保有する潜熱を放出して液体へ相変化する）し、放熱部の壁および放熱フィンを介して通風される空気へ排熱する。その際、放熱部内蒸気圧力が低下する。したがって、放熱部内より受熱部内の蒸気圧力が高くなり、受熱部で発生した蒸気は放熱部へ移動し、その蒸気の流れにより熱が輸送される。さらに、放熱部内で凝縮して生成された液体は、重力、毛細管力および遠心力などの自然の力により放熱部から受熱部へ還流され、これら蒸気および液体の連続的な循環および相変化を利用して、外部動力不要で高効率な放熱を実現している。

図2 (a) は、単管型熱サイフォンという最も典型的なヒートパイプであるが、図より分かるように、同一通路内に蒸気の流れと液体の流れが対向して発生するため、気液界面に大きなせん断力が発生する。このせん断力は、管径が小さく、熱輸送量（蒸気および液体移動量）が大きくなるほど大きくなり、放熱部から受熱部への液体の還流を阻害するようになる。それゆえ、小容量の発熱機器に対して適用されている。

比較的大容量の発熱機器に対しては、図2 (b) に示すループ型熱サイフォンが使用される。流路

が、液体専用通路と蒸気または二相流専用通路に分離されたループ状の配管からなるヒートパイプで、上記した気液界面に生じるせん断力が無く、比較的大容量の熱を輸送することができる。

4. ポンプレス水冷システムの概略

上記した熱サイフォンは、重力利用のヒートパイプであることから、原理上、受熱部より上方に放熱部を設けなければ動作することができない。一方、より一般にヒートパイプと呼ばれる毛細管力型ヒートパイプは、密閉容器内面に毛細管力を発生するウィックと呼ばれる多孔質物質（溝、金網、繊維、焼結金属など）が設けられており、重力に逆らって放熱部の液体を受熱部に還流させることが可能であるが、実用上高々数十 cm 程度であり、一般的に外部動力不要な放熱デバイスは放熱器設置位置が制限され、高さが大きくなったり、受熱部と放熱器のレイアウトが制限を受けたりするという問題がある。また、比較的大容量の発熱機器に対応可能なループ型ヒートパイプでも、液体と蒸気泡が混合状態で流れるため放熱器内の流動抵抗が大きく、細管を多数配置して空冷部放熱面積を増加させるなどの放熱器の高性能化・コンパクト化が難しい。それゆえ、従来のヒートパイプは適用範囲が限られており、上記したファンによる空冷やポンプによる水冷が電子機器冷却の主流となっている。

そこで、これらの課題を解決するために上部から下方へ熱輸送する放熱デバイス(トップヒートモードヒートパイプ)の開発が試みられている。その一例を以下に列挙する。

- (a) 細密ウィックを蒸発部のみに設けたキャピラリーポンプループレートパイプ[1]またはループレートパイプ[2].
- (b) 逆支弁を多用したスイッチング式ヒートパイプ[3].
- (c) 液体汲み揚げ用ヒータを取付けた加熱リフティング式ヒートパイプ[4]
- (d) 半透膜を使用して浸透圧を利用した浸透式ヒートパイプ[5-6]

これらは一部実用化が試みられているが、動作/長期信頼性、長距離熱輸送、大容量・高効率熱輸送、外部動力不要、制御不要など、従来ヒートパイプの利点を損なわずに目的を達成できるものは無い。

そこで、ポンプ水冷システムとループレートパイプの利点のみを融合し、冷却動力不要で上部から下方へ長距離熱輸送可能な冷却システムとしてポンプレス水冷システムの開発を試みた。

1章で述べたようにポンプ水冷システムは多くの問題を抱えているが、大容量・高効率放熱、フレキシブルなレイアウトなど多くの利点を有する。一方、ループレートパイプは、上記したレイアウトの制限があるものの、構造がシンプルで長寿命、高信頼性、メンテナンスフリー、外部動力不要などの多くの利点を有している。本開発では、図2(b)に示すループレートパイプ内の高温液体の循環流に着目し、下方へ輸送される高温液体から放熱することができればトップヒートモードヒートパイプを実現できると考えた。また、高温液体の循環は気液の密度差に起因するが、この循環を安定させ

るためには発生した蒸気を安定して液化することが必要であり(ループレートパイプの放熱器)、そこでループレートパイプ途中の流路を熱的に接触させ熱交換させることにより、高温液体の安定した循環を実現できると考えた[7].

ポンプレス水冷システムの概略を図3に示す。その動作原理は、電子機器の動作に伴う電氣的損失がエネルギー形態を換え熱になり、その熱は蒸発器内部の液体へ伝わり、液体を昇温させる。液体温度が任意の温度に達すると、蒸発器内で沸騰が開始し、それにより生じた蒸気泡の浮力により、周囲液体を伴い二相流体として上昇し始める。熱交換器内部では、流入する二相流体の蒸気を凝縮し、放熱器へ高温の液体のみを送出し、放熱器を通流する際冷やされた低温液体が、熱交換器で蒸気を凝縮させつつ予熱され、高温の液体として蒸発器に戻り、自然の力のみを使用した連続的な液体循環を発生させ、冷却することができる。なお、放熱器内部の流れが液体単相流であるため流動抵抗が小さく、放熱器の高性能化・コンパクト化が容易であり、放熱器を蒸発器の上方に設置しなければならない制約もない。

このように、ポンプレス冷却システムは蒸気泡の浮力を駆動力として冷却液を循環させるため(気泡ポンプ効果)、ポンプのような機械的可動部がなく、メンテナンス不要で信頼性の高い冷却システムを構築することができる。

本構成に関しては試作機により、起動・動作安定性など各種実際に考えられる動作モードにおいて評価を実施し、正常な動作を確認した[8].

このように、動作/長期安定性、コスト、容積、重量、熱輸送量、熱輸送距離など実用に供

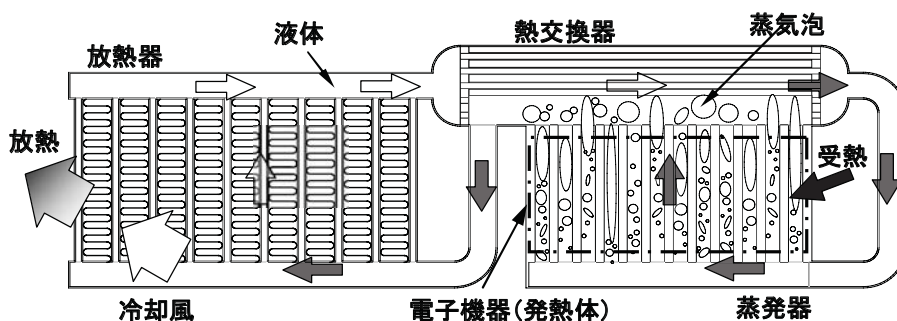


図3 ポンプレス水冷システムの概略

する世界初の自然の力のみを利用して上部から下方へ長距離熱輸送することができるトップヒートモードヒートパイプを開発することができた。

5. ポンプレス水冷システムの特長

ポンプレス水冷システムは、冷却に必要な電力が不要な冷却器であり、さらに以下の特長を有する。

- ① 世界初、自然の力のみを利用して上方から下方へ長距離熱輸送することができる実用レベルの冷却器である。
- ② ポンプを動かすモーター、モーター用電源、電源/制御用の配線、メンテナンス空間が不要であるため、小型・軽量であり、また単一部品としての取扱いが可能でかつ自律的に動作/停止する。
- ③ 機械的な可動部がないため、信頼性が高く、長寿命で定期的メンテナンスが不要である。
- ④ 放熱器の位置を選ばず、自由なレイアウトが可能である。
- ⑤ 消耗部品が無いため、省資源化に則し、通常見忘れがちな消耗品の製造/輸送/交換に伴うエネルギーさえも不要な環境に則した冷却器である。
- ⑥ 自然冷媒として水を使用しており、また内部圧力を減圧することにより 100℃以下（たとえば 40℃）でも動作する。さらに、不凍液の使用により、周囲温度が水の凝固点（0℃）以下での使用も可能である。

6. おわりに

本報では、冷却機器に対して望まれる、メンテナンス不要で信頼性の高い大容量・高効率冷却可能な熱デバイスとして、また地球温暖化対策に貢献する直接放熱体系に適するキーデバイスとして、ポンプ

レス水冷システムの開発を行い、正常な動作を確認した。今後、現在開発中の電鉄用電力変換器への適用を試み、さらに、サーバールーム、工場など大型の空調設備を伴う応用例に対して適応を検討し、「地球温暖化対策（省エネ、CO₂削減、省資源化）」に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- [1] Stenger, F. J., “Experimental Feasibility Study of Water-Filled Capillary-Pumped Heat-Transfer Loops”, NASA TM X-1310, (1966), 1.
- [2] Maidanik, Yu. F., Pastukhov, V. G., Fershtater, Yu. G., Smirnov-Vasiliev, K. G., Chernishev, V. F. and Dvirniy, V. V., “Development, Analytical and Experimental Investigation of Loop Heat Pipes”, Proc. 7th Int. Heat Pipe Conf., 2 (1988), 539.
- [3] Kawabata, K., Hashimoto, N. and Kamiya, Y., “Anti-Gravity Heat Pipe”, Proc. 5th Int. Heat Pipe Symp., Melbourne, (1997), 168
- [4] Chisholm, D., “The Anti-Gravity Thermosyphon”, Proc. I. Chem. E. Symp, Glasgow, Ser. No. 38 (1974), F3.
- [5] Baer, S. C., “Heat Pipe Condensate Return”, U. S. Patent No. 3561525, (1971).
- [6] 一法師茂俊・井村英昭, “浸透ヒートパイプの熱輸送に関する研究(第1報, 初期濃度の熱輸送限界に及ぼす影響)”, 日本機械学会論文集, 64-617, B (1998), 254.
- [7] 一法師茂俊, “ポンプレス水冷システムの開発”, 配管技術, Vol.50, No.9(2008), P70.
- [8] 山崎尚徳・東矢和義・一法師茂俊・白木直樹・水口芳樹, “ポンプレス水冷主変換装置”, 第45回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 論文番号 514(2008).

「キッズ・エネルギー・シンポジウム2008」の報告

Report on 'Kids Energy Symposium, 2008'

中部 主敬 (実行委員会委員長, 京都大学)

Kazuyoshi NAKABE

(Chair of the Kids Energy Symp. Committee, Kyoto University)

e-mail: nakabe@me.kyoto-u.ac.jp

1. 当日の様相

前夜来の雨に気を揉みながら迎えた「キッズ・エネルギー・シンポジウム2008」当日の9月13日(土), 昼前に空はすっきりと晴れ上がり, 正午過ぎには事前参加申し込みの皆さんが三々五々, 受け付け場所の京都大学総合博物館入口に集って来られた。傘を持ち合わせの方もかなりおられ, 天候に依らずお越し下さったことに感謝した。受付では色分けした名札とともにテキスト(図1参照), アンケート用紙, 鉛筆, 布製の袋を手渡した。保護者同伴を必須の条件とした事前申し込みの総数は53組110人, 1組を除く欠席の方々からは怪我, 法事などを理由に事前の連絡があり, 49組100人の参加となった。その内訳は4年生が半数近くを占め, 男女比はおおよそ7:3であった。なお, 当日の飛び込み参加は傷害保険の手続きや参加者掌握の公平性に鑑み, 受け付けなかった。

キッズ・エネルギー・シンポジウムはこれまで10年に亘って文部科学省から科学研究費補助金(研究成果公開促進費)「研究成果公開発表B」の支援を受け, 毎年1回, 本学会のいずれかの支部で開催され続けている。今年度は関西支部の京滋地区メンバーが実行委員会の中心となってシンポジウムを企画, テーマを「身近なエネルギーについて考えよう!」に定め, 表1に示すプログラムに沿って実施した。

シンポジウムの前半部は, 共催いただいた京都大学総合博物館での「自然」と「ひとの知」に関する見学である。会場移動と休憩を挟んだの後半部は, 借り上げた京都大学工学部物理系校舎内教室での「エネルギー」と「熱」に関する話, 実験, 実演, 実習である。本文著者のエネルギー変換に関する全般的な話の後, 牧野俊郎教授の入魂の実験では液体窒素を使って, 熱移動を伴う流体の「ちぢむ」, 「ふくらむ」, 「超ちぢむ」, 「超ふくらむ」現象が風船や空き缶の変形となって可視化され,



図1 テキストの表紙.

児童たちの強い関心を集めた。実験用試料の一部は住友軽金属工業株式会社に提供いただいた。

実演では関西電力株式会社ならびに大阪ガス株式会社の方々が, 省エネルギー対策の説明とともに手回し発電機やソーラーパネルなどを使って, 発電の原理を児童たちに体験させる一方, 天然ガス資源の採掘から輸送ルート, 都市ガスとしての供給網の説明とともに液体窒素を使って, 極低温下での物質の振る舞いを前述の実験とは別の角度から熱く紹介いただいた。質問に対してきらきら輝く瞳で積極的に挙手し, 進んで実演に参加する児童たちの振る舞いに何か新鮮なものを感じた。

実習では龍谷大学, 滋賀県立大学, 同志社大学, 京都大学の先生方の, 監視役を兼ねての渾身の指導の下, 銅パイプやバルサ材, 工具類などを手渡

表1 プログラムの概要.

時間帯	次 第
12:30~13:00	京都大学総合博物館での受け付け, 組分け
13:00~13:05	始めの挨拶 中部主敬 (京都大学), 大野照文 (京都大学) 今日の予定の説明 中部主敬 (京都大学)
13:05~13:55	京都大学総合博物館の見学
13:55~14:10	工学部物理系校舎への移動
14:10~14:20	エネルギーとは? 中部主敬 (京都大学)
14:20~14:40	熱についての実験・体験 牧野俊郎 (京都大学)
14:40~14:45	休憩, 各教室への移動
14:45~16:55	エネルギーについての実験, 実演, 実習 千田衛 (同志社大学) ・「エネルギー」と「電気」 下田秀幸, 古川誠 (関西電力株) ・天然ガスと LNG の冷熱エネルギーを学ぼう! 中田洋太郎, 宮本礼子 (大阪ガス株) ・ポンポン船を自作して動かそう! 塩見洋一 (龍谷大学) 南川久人 (滋賀県立大学) 稲岡恭二 (同志社大学) 齋藤元浩, 巽和也, 若林英信 (京都大学)
16:55~17:15	終わりの挨拶 中部主敬 (京都大学) 修了式

された児童一人ひとりが、ポンポン船を一から自作した。出来上がった船を教室に用意した3つの簡易プールに持ち寄る児童たちの、船を進水させ、蠟燭に点火、船は動き続けるかどうか、というワクワク感、さらには保護者の方々からの熱い視線を肌にした。

会場間の移動および教室間の移動は集団登校の要領で、受け付け時に赤・黄・青、3つの色分けした組毎にスムーズに行うことができた。最後に、一堂に会しての修了式を行い、児童一人ひとりに修了書ならびにお土産としてのラジオメーター（ふく射計）を授与した。また、本シンポジウムに関するアンケートの回収も行った。幸いに、京都大学での次回開催日時についての問い合わせまであり、児童のみならず保護者の方々からも好評を博しつつ、終了予定時刻を若干超過したもの

の、事故等も無く、傷害保険を使わずして無事、散会となった。シンポジウムの様子は本文末尾の図2~図10のスナップ写真に示すとおりである。

2. 準備の状況

当日の配布資料として、テキストを作成し、印刷、製本した。また、本シンポジウムの宣伝用に、チラシ1,000部を印刷した。当初、そのチラシの配布は京都府および京都市の教育委員会に対する行事案内の強い連絡網を持つ総合博物館に任せ切りであった。総合博物館のホームページ (<http://www.museum.kyoto-u.ac.jp/indexj.html>) にもチラシを掲載していただいた。しかし、小学校が夏休みに入る前頃までは、見込みよりもはるかに少ない応募数であり、前年度同様、参加者を募ることに苦勞する破目に陥った。そのため、チラシ1,000部を追加印刷して、チラシとポスターを携えて図書館、青少年科学センター、京都大学周辺の小学校、学内のレストランに出向き、営業活動を行った。また、京都新聞、地域のメルマガ（京都知的クラスター KYO-NANO 会や関西文化学術研究都市推進機構 けいはんな 等）にも案内を掲載するとともに、実行委員の先生方にも可能な限り宣伝を行っていただいた結果、見込んでいた前述の参加人数となった。本シンポジウムに関する情報源は、当日の児童へのアンケートによると、保護者(59%)、インターネット(13%)、先生(10%)、新聞(10%)、ポスター(6%)、友人(2%)であった。一方、事後に行った保護者へのアンケートによると、インターネット(43%)、新聞(39%)、その他(18%)であることが分かった。このことからインターネット、新聞の宣伝用メディアとしての重要性が認識できる。

当日の所要時間の見積もりとして、とくにポンポン船に充てる時間に注目し、実行委員会メンバーで事前に、実際に船を自作してみたところ、普通にやっけてはとて船を進水させるところまで辿り着けないことが判明した。そのため、担当の先生方が精力的に進め方の大幅変更と周到な事前準備をして下さった。

2箇所の会場がかなり離れている上、3箇所の教室を移動させる必要から作製した児童組分け用の色付き名札、引率用の色付き旗、会場案内用指示板は当日、極めて有効に機能した。

表2 アンケートの質問と回答 (その1).

番号	質問の内容
1	何年生ですか?性別は?いずれかに○印をつけて下さい. 小学 4, 5, 6 年生 または それ以外 () 男, 女 4年生(48%) / 5年生(24%) / 6年生(15%) / その他(13%) 男 (72%) / 女 (28%)
2	このキッズ・エネルギー・シンポジウム 2008 を何で知りましたか?合うものに○印をつけて下さい. ・ 小学校の先生から聞いた. ・ お父さんやお母さんから聞いた. ・ お友だちに誘われた. ・ 図書館等の施設でポスターまたはチラシを見た. ・ インターネットで見た. ・ その他 () 保護者(59%) / インターネット(13%) / 先生(10%) / 新聞(10%) / ポスター(6%) / 友人(2%)
3	内容として, おもしろいと思ったのはどんなお話でしたか?また, それはなぜ? 天然ガスをひやし, えき体にして運ぶことがふしぎでおもしろかった / ガス. 実験と合わせて説明してくれたから / 天然ガスのお話. 液体ちっ素が-196度で冷たくて気持ちよかったから / 液体窒素の実験 / 大きくなったり小さくなるから / ボールが凍るところ / ボールが割れた / ガスのお話 / ちぢんだりかるくなったりする / 風が小さくなる話 / 熱の実験で風船が小さくなったところ. 予想外の結果だったから / 電気の話が少しおもしろかった / 電気の実験 / 関西電力手まわし発電が面白かった / 電力会社さんの欠点と利点というところ / コイルを使った発電のしかた. 理由は知らないことだったから / ポンポン船 / 工作が好き / 水を出すところ / 転倒するところ / すべて / 博物館の説明 / LNG のこと. クイズがおもしろかった / 空気の温まったり冷たくなったりすること.
4	内容として, むずかしいと思ったのはどのお話でしたか?また, それはなぜ? とくになかった / ほぼ全部; エネルギーは, 6 つに分かれへんしんできること. むずかしい言ばがでてきた / 電気は町中(の)どこで使われているのかすぐには思いつかなかった / ぽんぽん船の実験で, てんぷくなど 1mm のくるいでしちゃうから / エネルギーの話. 核の話がでてきたから

表2 アンケートの質問と回答 (その2).

番号	質問の内容
	/ 電気をつくるしくみ / 電気 / 電気の発電. いろいろと発電の仕方がおぼえ(ら)れない / ポンポン船でいろいろな部品をくみたてるのがむずかしかった / ポンポン船作りはむずかしいと思った. うまくつくれなかった / 博物館. いろいろ覚えるのがむずかしかった.
5	内容として, 小学校で習ったことが出てきましたか?それはどんなことですか? でてきました. 太陽電池や, 電気を発電する物 / かんきょうの事. 二さん化炭素が地球をおおって温だん化したり, さん性雨がふったりする / 物をひやすと小さくなること. てつたまが小さくなってわの中をとおること / 空気と物を冷すと体積が小さくなり温めると大きくなること / 出てきた. たまが円の中をとおるか?の話 / 出てきた. 発電 / ぜんぶです / 出てきた / 鉄は温めると, たいせきがふえ, 冷すとちぢむこと / 博物館で見た古ふん, はにわ / とくになし / でてきていない / いいえ / ない / なし / なかった / 出てきませんでした / ありませんでした / 出てきた. 熱は金属が伝わりやすいということ / きんぞくの玉がひやすとちぢむこと / あつくなるとぼうちょうする / はい. 空気がふくらむ・ちぢむこと / 気体があたためられると体積が大きくなること / ガスについて / えきたいちっそ. ちっそは-200℃をこえる. つめたいえきたい / 太陽電池のことを習った / きりをつくったこと / 電気の風力のこと / 水蒸気で船が動くこと / 出てきた. 考古展示の説明. ちっ素の話.
6	ほかにどんなことが知りたかったですか? エネルギーがどう伝わるか / 新エネルギーについて / 工場などでやっていることなど, みんなが知らないヒミツなどが知りたい! / もっとでかいポンポン船をつくりたかったな. なぜ, えきたいちっそは冷たいか / 液体ちっ素はどうやって作るのか / ほかの発電方法 / ポンポン船の動くしくみ / ありません / 宇宙について / ポンポン船のざいりょうがほしい / 物と体積の重さ, えきたいちっそよりつめたいもの / ウランはどんな物質か? など / せいでんきはどのようにできるか / いろんなふしぎなことが知りたかった / 縄文時代のことをくわしくしりたかった!!

表2 アンケートの質問と回答 (その3).

番号	質問の内容
	／ちょうどでどうでどんなことがおこるのか しりたい／化石／ありません／特に無し／分 りやすかったので特にありません／知りたい ことは、全部しることができたので、あと実験 を見るのではなく自分でしてみたい／空気が つめたくなるとなんというのか／電気の風力 のこと／太陽光発電のしくみ／光エネルギー、 力学的エネルギーについて／もう少し難しい 内容のこと.
7	このようなシンポジウムが、またあれば、 参加したいですか？ (はい/いいえ)
	はい(100%)／いいえ(0%)

3. 事後の整理と反省点

シンポジウム終了時に回収したアンケートの質問と回答は表2に示すとおりである。なお、表中には児童の書いた文をそのまま載せていることをご了承願いたい。

メール応募の保護者の方々には事後に、本シンポジウムに関する情報源の問い合わせとともに、忌憚のない意見や感想をメール回答願った。その回答として、シンポジウムでの具体的な内容がチラシに記載されていなかったため応募の際にどうするか迷った、省エネやエコの時代に工具類の貸し借りをせずに児童一人ひとりに新品を与えたのはもったいない、お土産まではもらいすぎではないか、数ヶ月に一度ぐらいの頻度でこのような催しがあってほしい、などといった意見が書かれてあり、反省する点も多かった。中には、児童のためのシンポジウムであることを忘れて保護者の方ご自身が参加する講義と勘違いされたのか、説明をもっと詳しくしてほしい、といった意見もあった。その反面、回答の多くには、予想以上に楽しく、貴重な良い体験ができたといった感謝の言葉が数多く書かれており、実行委員会として安堵した。

その他の反省点として、文部科学省研究振興局に対する実績報告は、本学会への年度末報告などを終えてから後でなく、当該のシンポジウム実施日から30日以内にすべきであることを事後かなり経ってから気付かされ、急遽対処することとなった。また、チラシ持参による宣伝活動において、教育委員会の協賛あるいは共催を得ておく方が良

かったのではないかとと思われる場合があった。

このシンポジウムに参加していただいたことが、「エネルギー」や「熱」のおもしろさ、不思議さ、省エネルギー・新エネルギー技術、環境問題に直接的に関与する動機付けとなって、次世代の人材育成に繋がれば、実行委員会としてこの上ない喜びである。講師として、事前の準備から当日の本番、後片付けまで手弁当でやって下さった各大学の先生方、企業の方々、総合博物館スタッフの方々、さらには京都大学アルバイト学生さんたちにこの場をお借りして、改めて心よりお礼申し上げます。事後のデータ整理では牧野教授室の加藤俊恵秘書にも大変お世話になりました。また、前年度実施の様々な資料ご提供、ご助言を下さった名古屋大学の山下博史教授、三重大学の廣田真史教授にも感謝申し上げます。



図2 総合博物館での集合の様子。



図3 組別の会場移動の様子 (その1)。



図4 組別の会場移動 図5 可視化実験を食い入る様子(その2). るように見つめる児童ら.



図6 後半部開始の教室の様子.



図7 児童らとともに発電操作中の関西電力株の方々.



図8 コスチュームに身を包んで熱演中の大阪ガス株の方々.



図9-1 ポンポン船の作り方を伝授, ちょっと難しいところは素早くアシスト.



図9-2 ポンポン船, 発進! (上の2枚).



図10 修了式の様子.

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
2009年						
6月	2日(火) ～ 4日(木)	第46回日本伝熱シンポジウム (開催場所：国立京都国際会館)	2009.1.26	2009.3.16	Email: info@nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp http://nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp/index.html	10月号 1月号

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
2009年						
1月	23(金)	講習会「商品化が期待されるスターリングエンジンの開発動向」 (開催場所：早稲田大学大久保キャンパス)	2009.1.13		(社)日本機械学会 〒160-0016 新宿区信濃町 35 信濃町煉瓦館 5階 Web: http://www.jsme.or.jp/kousyu2.htm	
1月	29日(木) 30日(金)	15th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (開催地：横浜市)	2008.9.4	2008.10.20	(社)溶接学会 Mate 2009 事務局 〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町1-11 TEL 03-3253-0488 FAX 03-3253-3059 Email: s_kogure@tt.rim.or.jp Web: http://wwwsoc.nii.ac.jp/jws/research/micro/mate/Mate2009.html	
3月	4(水) ～5(木)	自動車空調技術総合レビュー2009 ーさらなる快適環境をめざす車両空調技術とその将来予測ー (開催地：東京都渋谷区)			自動車空調技術総合レビュー2009 事務局 〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 5-1 YCSSF (株)相鉄エージェンシー コンベンション課内 TEL 045-450-1831 FAX 045-441-8444 Email: jsae2009-mac@soag.co.jp	
3月	12(木)	レクチャーシリーズ「CTによる混相流の計測」 (開催場所：大阪市立大学梅田サテライト)	2009.2.28		武居昌弘 (事務担当 春名) 日本大学理工学部機械工学科 TEL & FAX: 03-3259-0749 Email: haruna@mech.cst.nihon-u.ac.jp	
5月	12(火) ～14(木)	第14回計算工学講演会 (開催場所：東京大学生産技術研究所)	2009.1.30	2009.4.3	計算工学講演会事務局 〒101-8449 東京都千代田区神田錦町 3-24 住友商事神保町ビル (株)ICS コンベンションデザイン気付 TEL 03-3219-3541 FAX 03-3292-1811 Email: jsces@ics-inc.co.jp	
8月	2(日) ～5(水)	7th Annual International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC2009) (開催地：Denver, CO, USA)	2008.12.7	2009.5.19	丸山 直樹 〒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 TEL & FAX: 059-231-9386 Email: naoki@mach.mie-u.ac.jp Web: http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=230&lumeetingid=1894&viewcon=overview	
8月	7(金) ～9(日)	日本混相流学会年会講演会 2009 第28回混相流シンポジウム (開催場所：熊本大学)	2009.3.30	2009.6.5	河原頭磨呂 熊本大学大学院自然科学研究科先端機械システム講座 日本混相流学会年会講演会 2009 実行委員会事務局 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1 TEL/FAX 096-342-3753 Email: akimaro@mech.kumamoto-u.ac.jp Web: http://www.mech.kumamoto-u.ac.jp/jsmf2009/index.php	
9月 10月	27日(日) ～ 2日(金)	第13回原子炉熱流動国際会議 (NURETH13) (開催地：金沢市)	2008.10.31	2009.1.31	NURETH-13 現地組織委員会委員長 村瀬道雄 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 TEL: 0770-37-9110 Email: murase@inss.co.jp Web: http://www.nureth13.org/	
11月	16日(月) ～ 19日(木)	The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-7) (開催地：Kaohsiung, Taiwan, ROC)	2008.10.31	2009.4.15	Dr. Tai, C.H., National Pingtung Univ. of Science and Technology (Taiwan, ROC) Email: chtai@mail.npust.edu.tw Web: http://www.tuat.ac.jp/%7Eptf/	
11月	16(月) ～ 20(金)	International Conference on Power Engineering-09, Kobe (ICOPE-09) (開催地：神戸市)	2008.12.31	2009.3.31	Ryosuke Matsumoto Kansai University Email: matumoto@kansai-u.ac.jp	

名簿発行に代わる情報検索システムの導入について

総務部会長 原村嘉彦

本学会では3年おきに名簿を発行してきました。2009年度は名簿発行の年に当たります。前回の名簿は、ご承知のとおり、情報量の少ないものになっています。勤務先の電話、FAX、電子メールのいずれかまで記載していただいた会員は半数に及ばず、勤務先の住所さえ記載していただけなかった会員が6割近くおりました。名簿としての体裁をなさなくなってきました。総務部会では、もはや名簿発行は、個人情報流出の弊害の方が大きく、費用対効果の観点からもやめるべきであるという結論に至りました。しかし、定款に目的として明記された会員相互の交流を図る上で、会員名簿に相当する会員の連絡先を調べる手段は継続的に提供すべきであり、従来の名簿に加え、新たな機能を加えた会員情報を検索して提供するシステムを構築して会員の皆様方にご利用いただくことにいたしました。以下に、会員情報検索システムの概要、その日程、情報提供のお願いについて述べます。

1. 会員情報検索システムの概要

システムの機能と利用の流れを図1に示します。特徴は以下のとおりです。

1. (1) 氏名からの検索、(2) 条件による検索の機能を持つ。
2. 画面で見ることのできる情報は最小限（氏名と勤務先名称）とし、連絡先等の情報は、登録されたメールアドレスに送ることで、情報流通が会員内に閉じるようにしている。
3. 情報による検索機能では、(a) 地域、(b) 大学・企業等の別、(c) 登録された専門分野、(d) 伝熱シンポ等本会主催講演会の論文（題目のみ。論文に記載されたキーワードは、入力作業量が過大となるので、当面は利用できるようにはしない。）・学会誌等の記事・論文（当面は過去5年分。順次増やし最終的に10年分とする。）、による検索ができる。

2. 会員情報検索システム提供までの日程

- 4月～6月：当検索システムで提供いただく、勤務先部署・住所・電話番号・FAX番号・電子メールアドレス、専門分野の確認・修正と公開項目の確認
- 6月～7月：伝熱シンポ等の論文題目の入力（論文集CD-ROMからのデータ変換、総務部会で行います。）
- 10月：システム稼働（その後4ヶ月程度ごとに、勤務先等変更などデータを更新。）

3. 会員情報検索システムに関するお願い

総務部会では、本学会のプライバシーポリシーと名簿発行等の関連について、以下のように考えております。名簿やそれに類する個人情報を他の会員に提供する行為は、定款に示された目的には沿ってはいないものの、プライバシーポリシーの第1項、個人情報の収集に規定された、「目的を明示」して「提供者の意志に基づく」という原則に照らして、改めて上記の用途で提供いただくこととします。したがって、公開する項目を個別に確認をとりながら進めてまいります。この作業は、本年4月からお願いする予定でいます。このシステムが有効に機能しますように、勤務先部署・住所・電話番号・FAX番号については、極力ご提供いただきますよう、ご協力の程よろしくお願いいたします。

検索システムの原案は上記のとおりですが、実際の構築作業（外注）は6月から開始いたします。ご要望がありましたら、4月末までに原村（haramy01@kanagawa-u.ac.jp）までご連絡いただきたく存じます。予算の許す限り対応いたします。

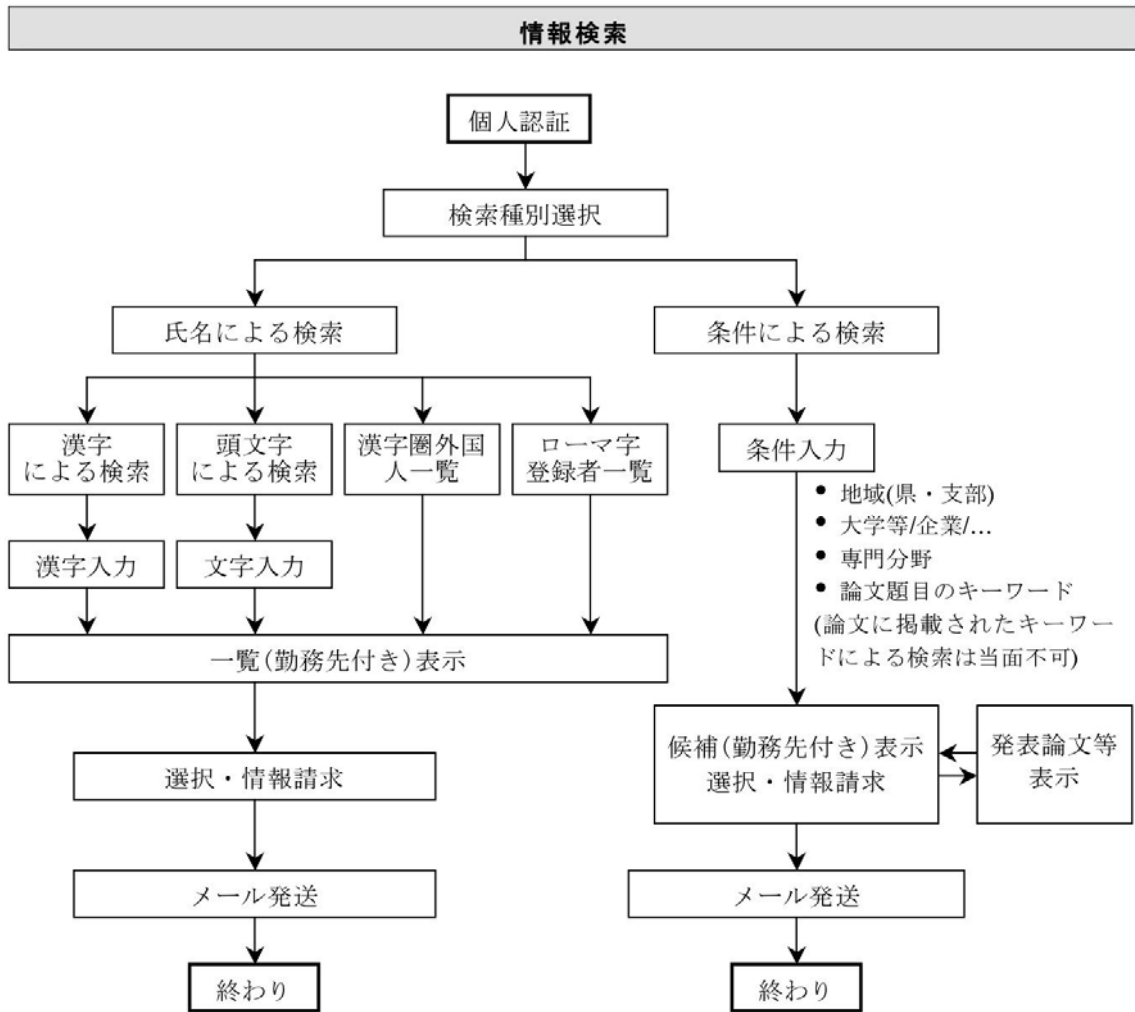


図1 会員情報検索システムの流れ

第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文募集

第 46 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 牧野俊郎
事務局長 中部主敬

開催日：平成 21 年 6 月 2 日（火）～ 6 月 4 日（木）

会場：国立京都国際会館 (<http://www.icckyoto.or.jp/>)

行き方 JR 京都駅から地下鉄烏丸（からすま）線で 20 分，国際会館駅下車，徒歩 5 分.

<http://www.icckyoto.or.jp/jp/access/access.html>

所在地 〒606-0001 京都市左京区宝ヶ池（Phone: 075-705-1234 / Fax: 075-705-1100）

講演申込期間：平成 21 年 1 月 7 日（水）～ 1 月 19 日（月）

講演論文原稿提出期間：平成 21 年 2 月 24 日（火）～ 3 月 16 日（月）

事前参加申込期間：平成 21 年 2 月 24 日（火）～ 4 月 13 日（月）

ホームページ URL：<http://nhsts2009.me.kyoto-u.ac.jp/>

【シンポジウムの形式】

- ・ 講演形式として，
 - 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・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設けます。
- ・ 1 講演あたりの講演時間は，一般セッションについては 15 分（発表 10 分，個別討論 5 分）とし，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下さい。
- ・ 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について」をご参照下さい。

【参加費等】

- ・ シンポジウム参加費
 - 一般（事前申込：12,000 円，当日申込：14,000 円）
 - 学生（事前申込：5,000 円，当日申込：6,000 円）
- ・ 講演論文集
 - 日本伝熱学会会員：無料（電子版は，事前に J-STAGE 上で公開します。参加者には当日に冊子体・CD-ROM を配布します。不参加者のうちの希望者には，CD-ROM を事後に配布します。）
 - 非会員：8,000 円（冊子体）。会場受付にて日本伝熱学会への入会を申し込まれる場合には，無料とします。

【懇親会】

- ・ 開催日：平成 21 年 6 月 3 日（水）

- ・ 会 場： 国立京都国際会館（宴会場「さくら」）
- ・ 懇親会費：
一般（事前申込：8,000 円，当日申込：10,000 円．配偶者無料）
学生（事前申込：4,000 円，当日申込：5,000 円）

【交通と宿泊】

- ・ 交通と宿泊については，本シンポジウムのホームページをご参照下さい。
- ・ 京都は世界からの旅行者が常時，多数，訪れる国際文化都市です．そのため，ホテルの予約は容易ではありません．お早めに手配されることを強くお勧めします．シンポジウム実行委員会でも 250 室程度の部屋を確保しております．本シンポジウムのホームページをお訪ね下さい。

講演申込方法・講演論文集・執筆要綱

【講演申込方法】

- ・ 原則としてホームページからの申込に限ります．シンポジウムのホームページから必要なデータを入力して下さい．ホームページからの申込ができない場合には，実行委員会にお問い合わせ下さい。
- ・ 一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれかで発表するかを選択して下さい．優秀プレゼンテーション賞セッションに申込の場合には，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。
- ・ 講演申込時に，講演論文のアブストラクト（日本語で 200～250 字）を入力して下さい．講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・ 講演申込は，講演者 1 名につき 1 題目に限ります。
- ・ 講演申込は，J-STAGE 上で受け付けます。
- ・ 講演の採否およびセッションへの振分けについては，実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集】

- ・ 講演論文集として，オフセット印刷版（白黒）と電子版を作製します．講演論文集（電子版）はホームページにリンクしてある J-STAGE において公開します．会員には学会誌 2009 年 4 月号においてパスワード情報を通知し，電子版を J-STAGE 上で閲覧できるようにする予定です．パスワードによる閲覧は，会員が当該講演論文をのちに原著論文として学術論文誌等に投稿することを考慮し，本講演論文集が限られた範囲に配布されたことを明示するためのものです。
- ・ 講演論文集（電子版）の CD-ROM も作製し，参加者に配布します．不参加の会員にも，希望があれば配布しますので，開催後に実行委員会にお申し込み下さい。
- ・ オフセット印刷版の講演論文の長さは，1 題目あたり A4 サイズで 2 ページとします．講演論文の作成様式は，2 段組×片側 26 字×60 行とします。
- ・ 電子版には，オフセット印刷版と同じものか，または 8 ページ以内のフルペーパーを掲載することができます．様式はオフセット印刷版と同じですが，カラーの使用が可能です．ファイル容量は最大で 2 MB までとし，アニメーションは含まないものとします。
- ・ 原稿はシンポジウムのホームページから提出して下さい．講演論文投稿 J-STAGE にアクセスし，必要事項を記入した後に，原稿をアップロードして下さい。
- ・ 電子版に掲載された講演論文は，本学会の論文誌“Thermal Science and Engineering（以下，TSE と略す）”にそのまま投稿することができます．ただし，掲載の可否は通常の査読プロセスを経て決まります。
- ・ TSE への投稿を希望する場合には，ホームページから原稿を提出する際に，論文投稿画面中のチェックボックスを ON にして下さい．その際，TSE の投稿規程をご一読願います．査読は，電子版に掲載さ

れた論文をもとに TSE 編集委員会において担当エディターを定め、通常の手続きに従って行います。オフセット印刷版と同じ 2 ページでも TSE 投稿原稿として受け付けますが、8 ページ以内でより詳細に執筆いただくほうが、その後の査読が円滑に進みます。掲載可になった後には、TSE の論文形式に沿った原稿を提出していただきます。この場合の TSE 論文の受理日は、シンポジウム実行委員会での原稿受付日になります。

- ・ 講演論文原稿は、講演論文を電子化するために、原則として PDF ファイルで提出するものとします。PDF ファイルで提出できない場合には、変換作業料（1 件につき 3,000 円）を申し受けて、実行委員会が PDF 化を代行します。
- ・ 提出締切期日までに未提出の講演論文は、講演論文集（冊子体・CD-ROM）および J-STAGE に掲載されません。J-STAGE の締切は厳格ですので、十分にご注意下さい。

【執筆要綱】

○ 講演論文原稿の書き方

- ・ 講演論文は以下に従って作成して下さい。また、書式の詳細ならびにテンプレート用の電子ファイルは、シンポジウムのホームページをご参照下さい。

表題部分の書式：

原稿は、下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、段組をせず幅 150mm に収まるようにレイアウトして下さい。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別して下さい。

論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いて下さい。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。

150mm

第 46 回日本伝熱シンポジウム原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

Guide for the manuscripts（英文表題: Times New Roman 12pt）

The case of MS-Word（英文副題: Times New Roman 12pt）

（1 行あける）

伝正 *伝熱 太郎（京理大）（会員資格 著者名 [講演者には*印]（所属略称）：明朝体 12pt）

（1 行あける）

Taro DENNETSU（英文著者名：Times New Roman 10pt）

Dept. of Mech. Eng., Kyoto Univ. of Science, Kyotanabe, Kyoto 610-0321

（1 行あける）

（文頭に半角スペース 5 つを挿入する）English abstract（英文アブストラクト: Times New Roman 10pt, 100 語程度）

（1 行あける）

Key Words : Heat Transfer（英文キーワード：Times New Roman 9pt, 3~5 個程度）

（1 行あける）

表題部分の書式

本文の書式：

第 1 ページで、本文は 9 ポイント明朝体の 2 段組（片側 1 行 26 文字程度）で作成して下さい。第 2 ページ以下では、先頭から 2 段組とし、片側 60 行を目安として作成して下さい。

図表：

図表中の記号およびキャプションは英語で書いて下さい。なお、電子版原稿はカラー表示が可能ですが、オフセット印刷版原稿は白黒で印刷されます。

参考文献：

参考文献は、本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめ

て列記して下さい。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号 (発行年), 先頭ページ番号.

例: (1) 伝熱・他2名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

PDF ファイルへの変換:

PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」よう設定して下さい。変換後の PDF 原稿は、提出 (アップロード) 前に、必ず、印刷したものを確認して下さい。

【講演論文の公開日】

- ・ 講演論文は、会員を対象に、シンポジウム開催日の1週間程前から J-STAGE 上で公開します。
- ・ したがって、特許に関わる公知日は、シンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

【参加費等の振込み方法】

- ・ ステップ 1: まずシンポジウムのホームページから、事前参加登録を行って下さい。折り返し、事前参加登録 ID 番号 (4桁の数, 例: 1234) と金額が記載された電子メールをお送りします。
- ・ ステップ 2: つぎに、下記の銀行口座に、電子メールに指定の金額を振込んで下さい。その際、必ず、氏名の前に事前参加登録 ID 番号を付けて下さい。

振込先: みずほ銀行 (銀行コードは 0001)

出町 (でまち) 支店 (店番号は 587)

普通預金口座

口座番号 1112829

口座名 第46回日本伝熱シンポジウム実行委員会

(ATM 機によっては途中までしか表示されないかも知れませんが大丈夫です。)

ATM 機での振込人の指定例: 「1234 テ”ンネットタロウ」

注意 1: 銀行振込みをもって「事前登録完了」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。振込みが4月14日以降になった場合は、当日登録扱いとし、シンポジウム受付にて差額をお払いいただきます。

注意 2: 経理処理の都合上、複数の登録者の分をまとめて振込むことはご遠慮下さい。お手数ですが、必ず1件ずつ「ID 番号と氏名」を指定してお振込み下さい。

注意 3: 今回のシンポジウムでは銀行口座のみを開設していますので、従来、学会誌に挟み込んでいた「郵便振替用紙」はありません。

【ご注意】

- ・ 講演申込の取消および講演論文原稿の差替は、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- ・ 論文題目と著者名が、講演申込時と講演論文原稿提出時で相違しないようにご注意ください。
- ・ 口頭発表用として実行委員会が準備する機器は、原則として、液晶プロジェクターのみとします。パーソナルコンピューターは各自ご持参下さい。
- ・ 参加費、懇親会費等は参加取消の場合にもお返ししません。
- ・ その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会に E-mail または Fax でお問い合わせ下さい。

【お問い合わせ先】

第46回日本伝熱シンポジウム実行委員会

京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻内

E-mail: info@nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp

Fax: 075-753-5209

優秀プレゼンテーション賞（第46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 堀部明彦

第46回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生・若手研究者を対象に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。

- 日 時：平成21年6月2日（火） シンポジウム第1日
- 講演形式：発表者1名あたり3分程度のショートプレゼンテーション（SP）と80分程度のポスタープレゼンテーション（PP）を行う形式をとる予定です。発表方法の詳細については現在検討中です。決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載します。
- 対象：企業・大学・研究所等の技術者・研究者で、平成21年3月31日現在で28歳以下の者、または、講演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：講演時（＝審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）、または、入会申込中であること。
- 応募件数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応募方法：第46回日本伝熱シンポジウム講演申込時に、本号掲載の【講演申込方法】に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”および“研究分野の分類記号”を入力して下さい。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 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、授賞者を決定します。
- 表彰：表彰はシンポジウム第2日の日本伝熱学会総会で行います。

<詳細は、日本伝熱学会・日本伝熱シンポジウム実行委員会・学生会委員会内で検討中です>
<最新情報はシンポジウムのホームページに公開します>



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
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リンク形成（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務部会長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部会長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、公募内容を総務部会長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部会長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）・総務担当副会長補佐評議員（ML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 http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：原村 嘉彦（神奈川大学）：haramy01@kanagawa-u.ac.jp
- ・編集出版部会長：近久武美（北海道大学）：takemi@eng.hokudai.ac.jp
- ・広報委員会委員長：佐藤洋平（慶應義塾大学）：yohei@sd.keio.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：小川邦康（慶應義塾大学）：ogawa@mech.keio.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：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。

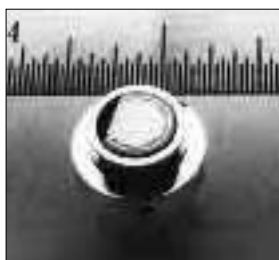
47期新入会員（2008.9.26～2009.1.7） 正 3名・学生 2名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	工藤 真心	矢崎部品株式会社	学	石神 徹	神戸大学
正	北川 石英	京都工芸繊維大学	正	樋口 真司	JFE技研株式会社
学	松田 和也	電気通信大学			

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。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、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 6μ 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バース実験
- タービンブレード熱風洞試験
- 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

ガードン型円形フォイルセンサー



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

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

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

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

〒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

URL

www.senstech.jp

E-mail

senstech@td6.so-net.ne.jp

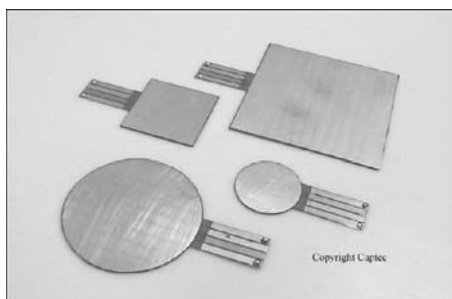
テクノオフィスは、独自の高度技術を持つ海外メーカーの

熱流計／熱流束センサーをご紹介します。

CAPTEC 社 (フランス)

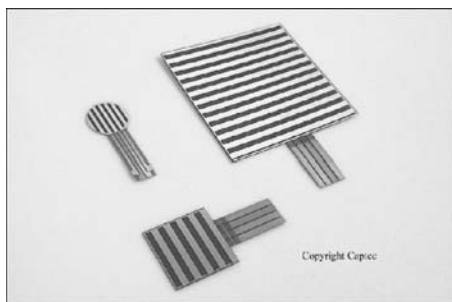
CAPTEC 社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5~300×300 [mm] (厚み: 0.4 [mm])
 熱抵抗値: 0.00015 [°C/(W/m²)]
 熱伝導率: 2.7 [W/mK]
 温度範囲: -200~200 [°C]
 応答速度: 約 200 [ms]
 柔軟性: フレキシブルー直径 30 [mm] に彎曲
 リジッドー平面用
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C], 防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5~50×50 [mm]
 厚み: 0.25 [mm]
 温度範囲: -200~250 [°C]
 応答速度: 約 50 [ms]
 柔軟性: 直径 30 [mm] に彎曲
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C]
 波長領域: 広帯域(可視+赤外)／標準(赤外)

【アプリケーション】

◇伝熱一般 ◇温熱環境 ◇サーマルマネキン ◇食品／調理ー焼成オーブン ◇コンクリート・地中埋設

○当社では、CAPTEC 製品に最適なデータロガーも取扱っております。お気軽にお問い合わせ下さい。

有限会社 テクノオフィス (CAPTEC 社日本総代理店)

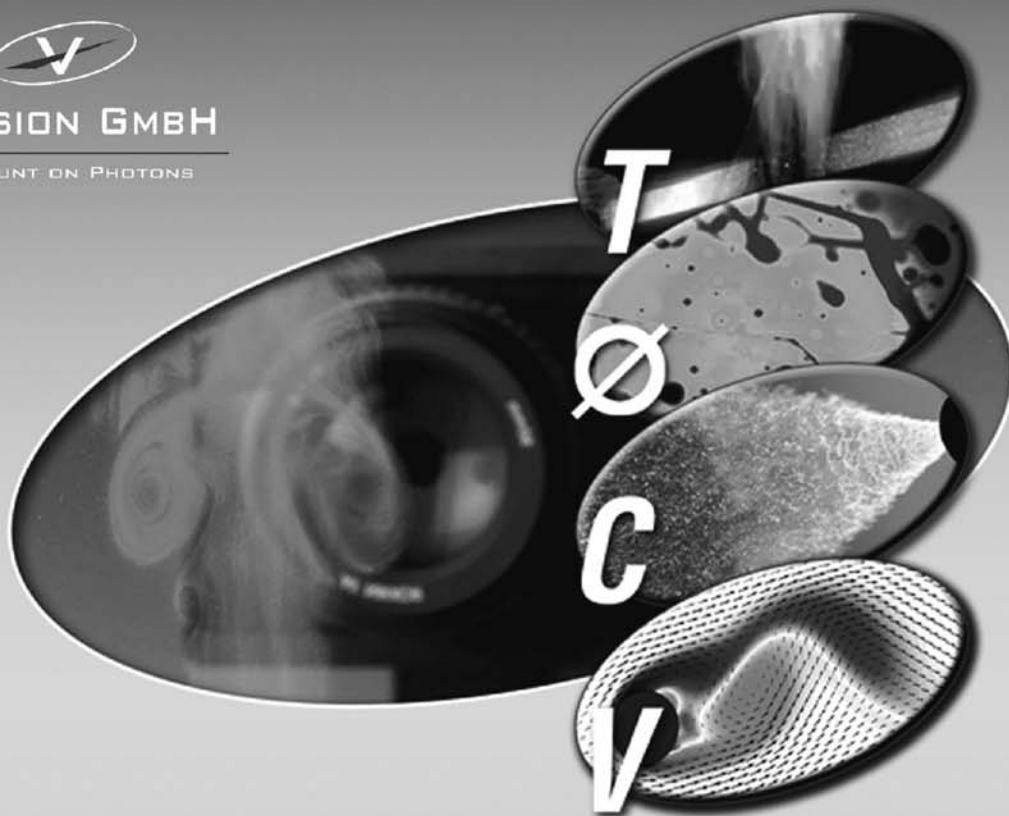
URL: <http://www.techno-office.com/>

本社: 〒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

LaVision社レーザーイメージング製品の 日本総代理店になりました

PIV、LIF、Raman、Rayleigh、LII、等の技術を組み合わせた複合計測システムを構築し、種々のアプリケーションでのソリューションを提供します。



Laser Imaging Solution

アプリケーション	Laser Imaging Techniques						計測システム
	Mie	LIF	PIV	Raman	Rayleigh	LII	
流れ 流体力学	流れ構造 パターンション	流れの可視化 ミキシング	流れ場	組成 温度	気体濃度 気体温度		FlowMaster FluidMaster
噴霧	液滴 パターンション	液体(燃料)質量 液体/蒸気	流れ場	液体/蒸気 温度			SprayMaster SizingMaster
	プレーナー液滴サイズ計測		質量流束				
燃焼 エンジン	粒子 液滴	ラジカル、燃料 化学プロセス	流れ場	ガス組成 温度	気体濃度 気体温度	すす	FlameMaster EngineMaster
プラズマ	粒子 生成	種 反応画像	流れ場				PlasmaMaster
材料試験 表面変形	高度画像相関						StrainMaster
	2次元&3次元の変形、歪み場、応力						
上記全ての アプリケーション	(超)高速イメージング						High-Speed Master System
	過渡現象、時-空間相関の時系列過程						

本広告の製品仕様は改善のため予告無く変更する場合があります



KANOMAX

日本カノマックス株式会社
流体計測ディヴィジョン

お問い合わせは、カスタマーサービス窓口へ

Email fluids@kanomax.co.jp

TEL. (03)6825-9090 FAX. (03)5371-7680

URL <http://www.kanomax.co.jp/fgroup.html>

編集出版部会ノート Note from the Editorial Board

アメリカのサブプライムローン問題に端を発した世界的経済危機が、数ヶ月で世の中の状況を一変し、今後の先行きが不透明な時代となりました。最高益を上げていたトヨタ自動車が、半年で大幅な赤字決算見通しとなり、日本各地で多くの派遣労働者が失業し始めております。また、大学においてもアメリカ的な教育・研究システムが多数導入され、その一つの結果として職につけない博士学生を、大量に社会に送り出してしまいました。アメリカ的競争原理に基づく価値観が、必ずしも信頼に足るものではないことが露呈し始めているように思います。これからは従来の物質偏重型産業構造から脱却し、自然と調和した生産・消費活動によって経済が成立する社会にしなければ、繁栄を持続できないように思います。エネルギーはまさにその中心であり、新しい雇用を生み出す産業の先導分野になり得るでしょう。伝熱学会員の頑張りどころだと思います。くしくも、今夜、オバマ大統領の就任演説が予定されております。新しい価値観による時代が始まることを期待しております。

さて、本会誌は予算の許す範囲内で、カラーページを多く取り入れております。会員の皆様におかれましては、研究の随想や苦労話、あるいは研究成果の主要部分をまとめた物など、論文集では書けないような記事を「特別寄稿」としてご執筆頂き、ご自身の記録としてもご利用頂ければ誠に幸いです。特に、定年退職前後の会員にはこうした記事をご執筆頂ければ、会員も大喜びです。ご自身による投稿は勿論、身近に該当する方がおられましたら、小職宛、ご連絡頂ければ誠にありがたいと思います。会員間の気軽な意見交換の場として、Heart Transfer といった欄も用意しておりますので、お気軽に種々のご意見や記事投稿を頂ければ幸いです。

では、今後ともよろしくお願いいたします。

近久武美 (北海道大学)
Takemi Chikahisa (Hokkaido University)
e-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

副会長 瀧本 昭 (金沢大)

部会長 近久武美 (北海道大学)

委員

(理事) 姫野修廣 (信州大学)

橋本律男 (広島大学)

千田 衛 (同志社大)

藤岡恵子 ((株) ファンクショナル・フルイット)

(評議員) 大黒崇弘 (日立国際電気)

角口勝彦 (産業総合研究所)

鹿園直毅 (東京大学)

中別府 修 (明治大学)

吉田篤正 (大阪府立大学)

長谷川達也 (名古屋大学)

花村克悟 (東工大)

一法師茂俊 (三菱電機)

福谷和久 (神戸製鋼)

久角喜徳 (大阪ガス)

TSE チーフエディター 門出政則 (佐賀大学)

編集幹事 石田賢治 (佐賀大学)

編集出版事務局:

北海道大学大学院工学研究科エネルギー環境システム専攻 近久武美

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

Tel: 011-706-6785 Fax: 011-706-7889, takemi@eng.hokudai.ac.jp