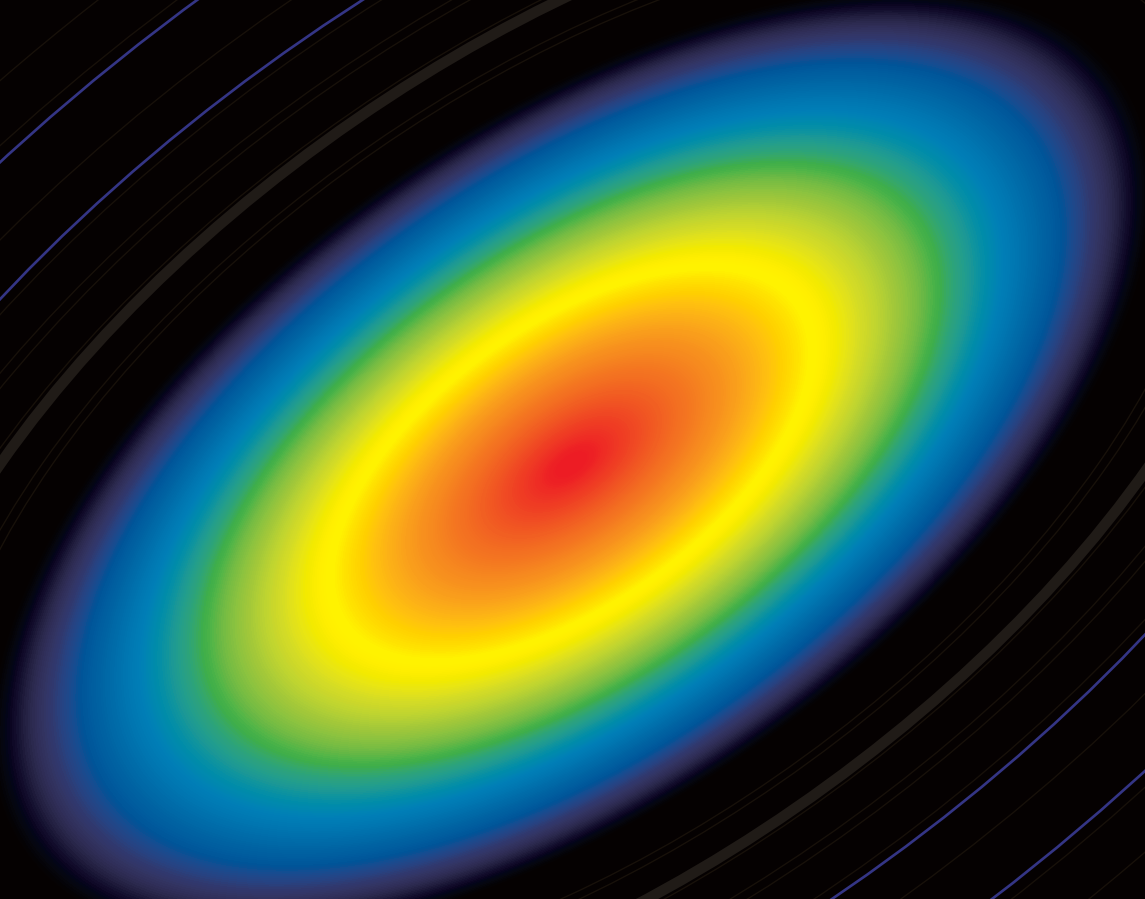


伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 48, No. 205
2009. 10



HTSJ

◆特集：計りにくいけれど必要な熱物性値◆



写真 1



写真 2

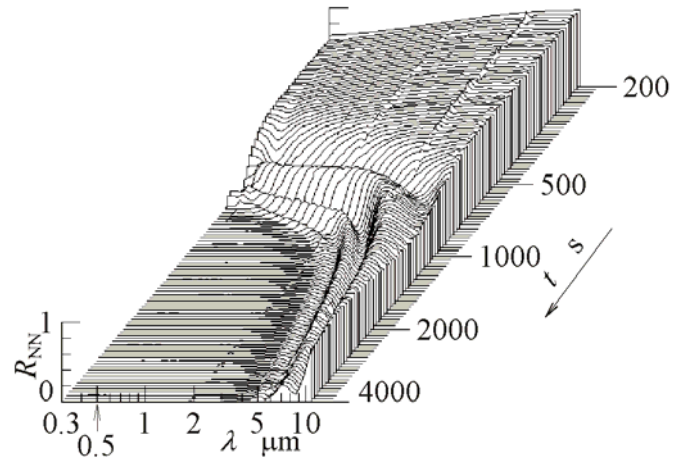


図 1

熱ふく射物性研究のための分光実験装置

An Experimental Setup for Thermal Radiation Spectroscopy

牧野俊郎 (京都大学) *Toshiro MAKINO (Kyoto University)*
e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

私は、学生の頃から実験装置を作るのが好きであった。学内の工場に出向いては旋盤やフライス盤を使い、いい加減な図面をもとに装置を作っていた。やがて、機械系工学教室では、技官の方を除けばいっばんの機械の使い手になっていた。4半世紀まえに、表面の熱ふく射物性研究のための分光器がほしくなった。自然界や生産プロセスの実環境下でその表面状態を時々刻々にも変化させつつある表面のふく射現象を、近紫外～赤外の波長域で、数秒のサイクルタイムで測定できる装置を作りたいと思った。作った第1号機の写真が写真1である。毎日、工場に通い、またはんだづけを繰り返して、8ビットコンピューターの機械語を書いた。光学系は合板の上に並べた。この装置は、当時、歴史的にも国際的にも新しいものであった。しかし、やがて制御回路のはんだの不良のために動かなくなった。今世紀になって、写真2の改良機を、こんどは半ば外注して作った。図1¹⁾は、その改良機を用いて測定した、高温大気酸化過程にあるニッケル表面の垂直入射鏡面反射方向反射率スペクトルの時間推移を示すものである。このような図は、いま、幸いにして珍しくないが、当時は私や私の共同研究者も驚き、自慢したくて学会に臨んだものである。研究者を引退する日に何か1枚の図を残すとして、選ぶのはこの図かもしれない。

¹⁾ Wakabayashi, H. and Makino, T.: *Measurement Science and Technology*, vol.12, no.12, pp.2113-2120, Dec.2001.

伝 熱

目 次

〈特集:計りにくいけれど必要な熱物性値〉

伝熱研究の未踏領域：物性ならざる物性に関する研究中山 恒 (ThermTech International)	1
室温の測定・暑い/寒い・ふく射伝熱.....牧野俊郎 (京都大学)	14
断熱材の熱伝導率測定.....大村高弘 (ニチアス㈱)	20
並列接続をもつ多層平板系の有効熱伝導率評価法について.....富村寿夫 (熊本大学)	26

〈エデュケーションQ〉

マックス・プランク (1858~1947) の功績.....花村克悟 (東京工業大学)	32
---	----

〈プロジェクトQ〉

ミストサウナ入浴の7つの効用 ~皮膚表面の凝縮現象に起因する効用の連鎖~竹森利和 (大阪ガス㈱)	38
---	----

〈国際活動・会議報告〉

第7回アジア・太平洋燃焼会議報告.....門脇 敏 (長岡技術科学大学)	44
第20回輸送現象に関する国際シンポジウム.....一宮浩市 (山梨大学)	46
「キッズ・エネルギー・シンポジウム 2009」報告.....桃木 悟 (長崎大学)	48

〈巻頭グラビア:heat-page〉

熱ふく射物性研究のための分光実験装置.....牧野俊郎 (京都大学)	表紙裏
--	-----

〈行事カレンダー〉.....	53
----------------	----

〈お知らせ〉

平成21年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞の募集のお知らせ.....	55
第47回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集.....	59
優秀プレゼンテーション賞 (第47回日本伝熱シンポジウム) について.....	62
事務局からの連絡.....	63
編集部会ノート.....	67

Vol. 48, No. 205, October 2009

CONTENTS

<Special Issue>

An Unexplored Area in Heat Transfer Research: The Study on Pseudo Thermal Properties Wataru NAKAYAMA (ThermTech International).....	1
Measurement of Room Temperature, Hot and Cold, and Radiative Heat Transfer Toshiro MAKINO (Kyoto University).....	14
Measurement of thermal conductivity for thermal insulation Takahiro OHMURA (NICHIAS Corp.)	20
How to Evaluate Effective Thermal Conductivity of Composite Plane Wall System with Parallel Connection Toshio TOMIMURA (Kumamoto University).....	26

<Education Q>

A meritorious deed of Max Planck (1858 – 1947) Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology).....	32
---	----

<Project Q>

The Seven Benefits of Mist Sauna Bathing that Originate from Condensation at the Skin Surface Toshikazu TAKEMORI (Osaka Gas Co., Ltd.).....	38
--	----

<Report on International Conference>

Report on the 7th Asia-Pacific Conference on Combustion Satoshi KADOWAKI (Nagaoka University of Technology)	44
The 20 th International Symposium on Transport Phenomena - 2009 Koichi ICHIMIYA (University of Yamanashi).....	46
Report on Kids Energy Symposium 2009 Satoru MOMOKI (Nagasaki University).....	48

<Opening-page Gravure:heat-page>

An Experimental Setup for Thermal Radiation Spectroscopy Toshiro MAKINO (Kyoto University).....	Opening Page
--	--------------

<Calendar>	53
------------------	----

<Announcements>	55
-----------------------	----

伝熱研究の未踏領域：物性ならざる物性に関する研究

An Unexplored Area in Heat Transfer Research: The Study on Pseudo Thermal Properties

中山 恒 (ThermTech International)

Wataru NAKAYAMA (ThermTech International)

e-mail: watnakayama@aol.com

1. はじめに

図1のイラストの説明から始めたいと思う。これは今日の伝熱研究界の有りようを筆者なりに捉えたものである。いまホットな研究領域は言うまでもなくナノテクに関するものである。これまで科学技術のブレークスルーの多くは分子、原子レベルでの現象機構の解明から生まれたもので、当然の流れであると肯ける。より微細な世界へと人知を広げる努力は国の科学技術政策の柱の一つにもなっており、また「ナノテク」のキーワードを伴うトピックスはマスコミに取り上げられる頻度が高い。更なるブレークスルーを求めて研究資金と人材が注ぎ込まれており、伝熱研究でも大きなうねりとして感じられる。我が国では小竹進先生が種を蒔かれた分子動力学が若い世代の研究者に引き継がれ、微小世界を対象にした研究は盛り上がりを見せている。この研究領域をマイクロ伝熱研究と呼ぶことにしよう。マイクロ伝熱研究の集會に最近出席した米国の研究者が、日本の若い人たちの盛り上がりぶりに文字通り目を丸くして感嘆していた。ともかく若い世代が熱気溢れる研究を展開してくれるのは心強いことで、多くのブレークスルーが生まれるよう願って已まない。

一方、私たちの視聴覚や触覚が及ぶスケールの世界、即ちマクロスケールの世界でも伝熱研究のニーズは多い。とくに地球環境保全と新エネルギー開発を目的とした伝熱研究には期待が高まっている。この領域の研究をマクロ伝熱研究と呼ぶことにしよう。マクロ伝熱研究は企業製品の設計生産にも関係が深いことから、産学協同研究に適したテーマも豊富である。但し、マクロ伝熱研究の対象とニーズは多様であり、また伝熱現象以外の因子、例えばコストや社会情勢などが研究の内容に関連してくる。このため伝熱研究界全体としてはベクトルが拡散しているように見え、ひと頃の伝熱研究会を知っている人たちには物足りなく思



図1 伝熱研究界の漫画

える。もっともこれは時代の推移を考えればやむを得ないことである。第二次大戦後から1970年代に入るまでは産業インフラの整備が国家的事業であり、伝熱研究もその一端を担っていた。伝熱現象の解明は、失敗が許されない大規模プラントの設計にとって至上命題であった。物理現象を深く追求する研究は大学の研究教育ミッションとも合致していた。このような環境で育った学生がやがて学界と産業界で活躍し、我が国技術の基礎を作った。と同時に、この時代に培われた価値観も受け継がれて今日に至っている。産業界で働いた経験がある人ならば誰しも、技術の発展には物理現象の解明以外の要因も深く絡んでいることは熟知しているのであるが、価値体系のなかでは「物理現象の解明」が独占的な座を占めている。このことは文部科学省の科学研究費配分、あるいは企業における未来志向型研究開発プログラムを見ると明らかである。価値体系から外れる要因はひとくくりに「泥臭い」と形容され、その内容には科学的メスが入れられていない。

さて、これまで述べてきたなかでの「マイクロ」と「マクロ」とは、長さのスケールの上での話である。長さのスケール以外にも時間のスケール、

温度のスケールなどがあるが、これらのスケールは長さのスケールにより規定されると考えてもよい。従って、長さのスケールを代表スケールとして話を進めよう。マイクロとマクロの中間のスケールは「メゾスケール」とも呼ばれ、メゾスケールの世界には始末に困る問題がいっぱい詰まっている。ここではナノテク研究で見られるような格好よさはなく、またマクロ伝熱研究に見られる一種の分かり易さもない。メゾスケール世界での作業からは普遍性のある知見が得にくい。言い換えると、メゾスケール世界の研究課題に取り組むと論文を書くのが難しくなる。本稿の目的は、熱物性に関連する主題を対象に、この辺りの事情を説明することにある。

2. 複合材の等価熱伝導率

話の順序として物性値の基本概念を記しておく。本稿で対象に考えるのは複合材である。材料のなかで複合材でないものを見つけるのは難しい。さて、物性値とは材料のマイクロ組織により規定されるもので、巨視的（マクロ）寸法に依存しない。例えば分散粒子を含む材料の場合（図2）、材料の物性値は材料サンプルの寸法 L に依存しない。これには、粒子の代表寸法がサンプル寸法に比べて著しく小さければ良からうことが先ず考えられる。

$$l \ll L \quad (1)$$

材料のマイクロ組織と物性値との関連は古くからの研究課題で膨大な文献がある。以下、熱伝導率に限って話を進めることにする。図2で分散相と連続相はそれぞれ異なる物質であるから、異なる熱伝導率を有している。ここで考えるのは、サンプルの等価熱伝導率である。[1]に挙げた参考文献には等価熱伝導率に関する最近までの研究が纏められており、我が国伝熱界のパイオニアの一人である国井大蔵先生の研究も引用されている。等価熱伝導率とマイクロ組織パラメータを関連付ける研究は19世紀後半から延々として続けられてきたが、全ての問題が解決されてはいない。研究の成熟度には分散相と連続相の熱伝導率比が大いに影響している。文献[1]に記されている概要は次のようである。

- $k_1 / k_2 = 1 \sim 10$: 19世紀後半の Rayleigh

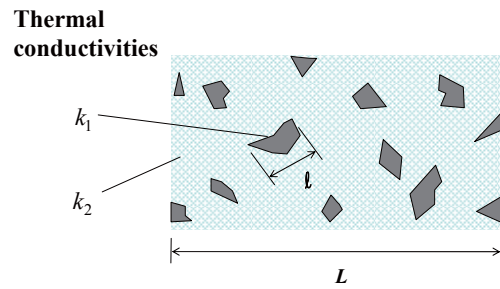


図2 複合材

および Maxwell らの研究から始まり、最もよく研究されているパラメータ領域である。

- $k_1 / k_2 = 10 \sim 1000$: 理論予測値と実験データとはある程度の精度で一致する。予測式の精度は熱伝導率比が $100 \sim 1000$ では低くなり、 1000 に近づくほど劣化する。
- $k_1 / k_2 > 1000$: 分散相の形状と寸法が等価熱伝導率の値に大きな影響を及ぼす。従って、汎用性を備えた熱伝導率予測式を導くことは難しい。

さて条件(1)が成り立ち、しかも分散相の分布が統計的に見てサンプル内の場所に依らないとき、分散相に関する情報の表し方には次のものがある[2]。図3では説明のためにサンプル断面、即ち2次元面を用いる。

- 1点相関：探査プローブの先端を任意に落としたとき、先端が分散相にあれば‘1’と記録し、連続相にあれば‘0’と記録する。これを多数回繰り返し、‘1’の和を試行回数で除す。これは先端が‘1’に落ちる確率を表すが、分散相の面積率でもある。3次元サンプルでは体積率となる。
- 2点相関：長さ r の探査針を断面上に任意に落としたとき、両端が分散相にあれば（図3、下の図のA）‘1’を記録する。BおよびCの場合、エントリーは‘0’である。これを多数回繰り返し、‘1’の和を試行回数で除す。これは2点相関で、 r を変えて実験を繰り返すと、2点相関の確率と r/l の間の関係は図3に示す曲線になる。（ここで l は分散相の代表寸法で、これも統計的平均値である。）

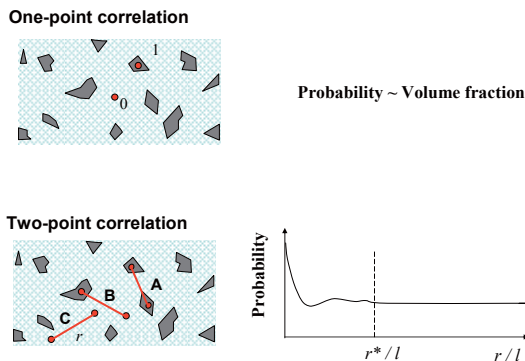


図3 複合材のマイクロ組織に関する統計量

$r/l \gg 1$ では2点相関確率はある定まった値になる。

- n 点相関：上記と同様の実験で n 個の頂点を有する探査片を用いると n 点相関が求まる。しかし、 $n > 2$ の場合の n 点相関の有用性は低く、分散相分布の特性を表現するにはせいぜい2点相関で十分であろうと考えられる。

図3の2点相関確率分布曲線において、確率の値がほぼ一定になる r の臨界値を r^* と記すことにする。 r^* を用いると、‘物性’を測定するためのサンプル寸法が満たすべき条件は次のようになる。

$$r^* < L \quad (2)$$

式(1)は物性値を定義できるための十分条件であり、式(2)は必要十分条件である。ところで L はサンプル寸法としてきたが、数値解析をする際の要素寸法と考えてもよい。数値解析における要素寸法に関して式(2)が成り立つとき、複合材は等価物性を備えた均質材料として扱うことが出来る。

ところが式(1)および(2)が成り立たなくても等価物性を定義できる場合がある。よく知られた平行要素から成る積層材の場合である。図4(a)では積層界面が熱流方向と平行しており、等価熱伝導率は‘算術平均’ (arithmetic mean) により表される。

$$k_{eq} = k_C \cdot \gamma_C + k_D \cdot (1 - \gamma_C) \quad (3)$$

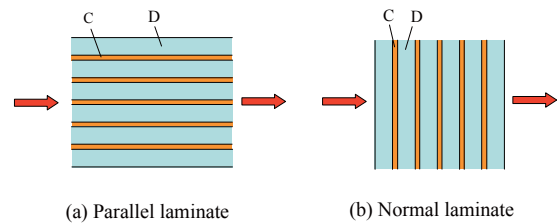


図4 積層構造体

ここで k_C と k_D はそれぞれ材料 C と D の熱伝導率、 γ_C は材料 C の体積率である。図4(b)では積層界面が熱流方向に垂直で、等価熱伝導率は‘調和平均’ (harmonic mean) により表される。

$$k_{eq} = 1 / \{ \gamma_C / k_C + (1 - \gamma_C) / k_D \} \quad (4)$$

これら積層材では積層要素の寸法に関し式(1)が成り立たなくてもよい。また、積層要素の配置に関して統計処理を施す必要もないから、2点相関、即ち式(2)に注意を払う必要がない。実際、図4では積層要素の配列を等間隔にしてあるが、任意に配列してもよく、例えば材料要素 C と D をまとめ2層構造にしてしまってもよい。但し、こうした論には境界条件の与え方に関し暗黙の了解事項がある。例えば図4(a)の場合、左右の面がそれぞれ一樣な温度に保たれている場合は、要素 C と D の内部の温度分布は等しく線形で、要素間の界面では温度差がなく、従って要素間に熱の交換は無い。式(3)の等価熱伝導率は境界温度が一樣である場合にのみ厳密な伝熱量を与える。例えば片面に一樣熱流束を与え、対面の温度を一樣にゼロにすると、要素間に温度差が生じ、従って熱交換が行われ、要素 C と D の寸法が温度分布に影響を及ぼすようになる。とりわけ積層体の厚さ L が影響を持つようになるので、厳密な意味での等価物性を求めることが出来なくなる。図4(b)の場合では、一面の境界温度が勾配を有し、対面が一樣であると、要素内での熱拡散は2次元過程となり、やはり要素とサンプルの寸法が伝熱量に影響を及ぼすようになる。

このように、平行要素から成る積層材の場合、等価熱伝導率を厳密に定義できるのは、一樣温度を境界条件とした場合のみである。境界温度が一樣でない場合、式(3)あるいは(4)に基づく伝熱量予

測の精度は、境界温度の一樣分布からの偏差に依存する。偏差の程度を境界面において顕著な温度変化が見られる長さのスケール (L_B) により表すと、 $L_B \gg l$ の場合に予測精度は高い。ここで l は要素 C と D の厚さのうち大きいほうの値である。これは一般にもあてはまることである。ある複合材の塊に一樣でない境界温度を与えた場合を考えてみよう。塊の内部に行くほど熱拡散が進む。内部に体積要素を想定すると、体積要素の境界面での温度分布は塊の境界面での温度分布より一樣化が進んでいる。塊を体積要素に分割して熱伝導解析を行う場合、内部の体積要素ほど等価熱伝導率の概念がより厳密に成り立っていると言える。

これまでに述べてきたことに更に注釈を加えて纏めると次のようになる。

- 複合材内部に2点相関の臨界距離 r^* と等しい半径を有する円 (2次元) あるいは球 (3次元) を想定する。複合材内部の熱伝導に大きな影響を及ぼすのはこのような臨界円 (球) 内部における熱拡散過程である。臨界円 (球) 内部の熱拡散には分散相の形状と配列が影響を及ぼす。分散相が単純形状 (円柱 (2次元) あるいは球 (3次元)) でしかも規則的に配列されているモデルを対象にすると解析しやすい。実際、過去の多くの理論研究は単純形状、規則配列を対象にしたものである。このようなモデルに基づく熱伝導予測値は、熱伝導率比が 1 に近いほど実験データに近づく。
- システム (前述の複合材の塊) 境界からどれほど内部に入るとシステム境界条件の影響が拡散し、等価熱伝導率の概念が厳密に成り立つようになるかを考えてみる。熱拡散の深さのオーダーを知るために、直径 d_1 の円柱 (熱伝導率 k_1) が母材 (熱伝導率 k_2) に埋め込まれている状況を対象にしよう。円柱の周囲の母材は直径 d_2 を有しているものとする。円柱の端面から流入した熱が周囲に拡散するまでの距離 (l_{th}) は、フィン公式を用い次のように導ける。

$$\frac{l_{th}}{d_1} = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \cdot \left(\frac{k_1}{k_2}\right)} \quad (5)$$

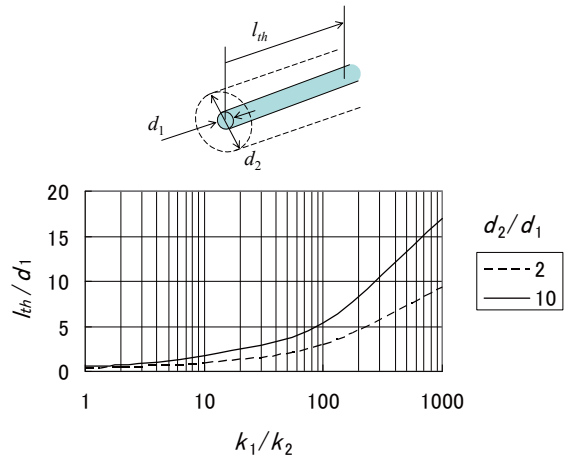


図5 円柱モデルにおける熱浸透距離

図5に寸法比 (熱拡散距離/円柱直径) と熱伝導率比との関係を示す。システム境界条件の影響は熱伝導率比が 100 を超える辺りから内部に浸透する度合いが急激に増すようになる。

3. 高密度集積回路が呈する問題

エレクトロニクス技術の発展は社会の隅々に影響を及ぼし歴史の転換さえもたらしている。更なる技術の発展は怒涛のごとく進められている感があるが、一方では物理的限界の壁も視野に大きく立ちだかるようになった。物理的壁の一つは集積回路の冷却に関するもので、集積回路表面からの対流あるいは相変化熱伝達の研究が盛んに行われている。しかし、問題は表面熱伝達に留まらず、集積回路チップをはじめ各種部品内部の熱伝導に関する問題もきわめて重要になっている。熱伝導過程は熱伝導経路の形状寸法、構成材の熱伝導率、境界条件により規定される。しかし、電子デバイスは微細な構成要素が複雑に入り組んだ構造体であり、全ての幾何形状を忠実に考慮に入れた熱伝導解析の試みは非現実的である。実際の複合構造体を等価モデルにより置き換える必要がある。等価モデルにどのような物性を付与すればよいかは課題となるが、回路集積技術の進展は従来の‘物性’の概念では扱えない状況を作り出している。多くの例から二つを取り上げ図6に示す。

図6(a)は接触伝熱面に充填するTIM(Thermal Interface Material)を示すものである。接触熱抵抗を

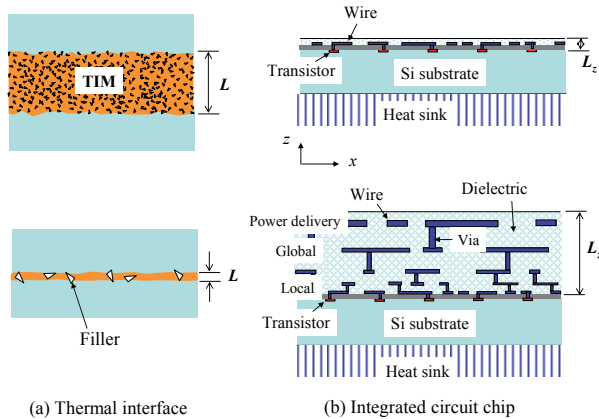


図 6 微小要素の形状と寸法が無視できなくなる事例

軽減するために TIM の熱伝導率を高める材料開発が盛んに行われている。TIM は高熱伝導率を有する粒子ないしフィラメント(Filler)を母材に分散させた複合材である。隙間距離 L が Filler 寸法に比べて十分に大きい場合、等価熱伝導率は Filler の体積比率、Filler 材と母材の熱伝導率に関連付けることができる。しかし、実装密度の向上と、接触熱抵抗の更なる低減の追求は接触面隙間(L)の縮小を齎し、 L と Filler 寸法を同程度に近づける。こうなると、等価熱伝導率本来の概念を適用出来なくなる。但し多くの場合、接触面全体を通しての熱抵抗が関心の的であり、Filler 粒子のスケールにおける温度分布と言った詳細を知る必要がない。従って、接触熱抵抗を実験的に求めれば用は足りる。

図 6(b)は集積回路チップ上のトランジスタと配線を示したものである。概念図であるから実際の構造寸法を表すものではない。チップの上面にトランジスタと配線が集積され、下面はヒートシンクに接している。多くの場合、集積回路の発熱はチップ基底 (Si substrate) を経由して回路面の対面から放熱されるので、ヒートシンクは一般の放熱経路を象徴したものである。一般に、回路集積度の指標としてチップ上のトランジスタの総数が用いられる。有名な「ムーアの法則」によれば「トランジスタの数は 18 ヶ月毎に 2 倍になる」。ムーア則は集積回路製造技術を進めるうえでの研究開発目標になっている。しかし実際にはトランジスタ数の上昇とともにトランジスタを連結する配線

の量が急速に増え、配線の設計と製造が呈する技術課題のほうが、トランジスタ微細化の課題を凌ぐほどになっている。図 6(b)の下段の図に示すように、チップ上には多層の配線が張り巡らされ、チップの温度分布に大きな影響を及ぼすようになってきた。配線層の部分を複合構造体と見なし、その厚さを L_z としよう。図では L_z が配線層の増加とともに増しているかに描かれているが、これは説明のために、実際の L_z の増加は顕著なものではない。この場合、技術の進歩は L_z に含まれる微細構造の複雑さを増していると言うことが出来る。そして、図 6(a)の場合と根本的に異なるのは、温度分布を高い解像度で知る必要が生じていることである。この事情を次に説明する。

多層配線は層別に機能が与えられている。上層の配線は電力を配分するためのもので、図 6(b)下段の図に示すように、比較的大きな断面寸法を有している。また、上面に近い配線ほど長い距離の信号伝送を担うグローバル信号線である。トランジスタ面に近い層の配線は近距離伝送用のローカル信号線である。異なる層の配線を連結する垂直要素は Via と呼ばれている。配線は誘電体 (Dielectric) に埋め込まれており、配線上の信号伝送速度は誘電体の誘電率が低いほど大きい。このため低誘電率誘電層の開発が進められている。しかし、誘電率を低めるほど誘電材の熱伝導率も低下する。一方、トランジスタ数の増加とクロック周波数の増大は配線上の電流量を増大させる。このため配線のジュール自己発熱が加速される。自己発熱の増大と誘電材の熱伝導率の低下は配線の温度を上昇させ、配線の温度上昇は配線材の電気抵抗の上昇をもたらす。このように回路集積度の向上とともに配線の温度が上昇する相乗効果が働く。配線の温度上昇はエレクトロミグレーションを加速し、やがては断線を招く。多層配線の温度予測は集積回路技術を発展させるのに不可避の課題である[3]。温度予測では多数の配線のうち温度が最も高くなる場所を特定し、最高温度が許容値を超えないように対処する必要がある。即ち、配線層の温度分布を高い詳細度で予測する必要がある。しかし、配線層詳細を忠実にフォローする解析には膨大な計算機リソースが必要で、実際上は不可能に近い。

そこで、配線個々の温度を知る要求は一先ず脇

に置き、配線層の構造詳細を均（なら）してしまい、等価物性を設定して熱伝導解析することを考えてみる。即ち、配線層を一つの均質化されたモデル材料とみなし、チップ本体のシリコン（Si substrate）をこれに接する材料として、2層積層モデルを考える。記述の便宜のために、層厚さの方向に z 軸、チップ面に x 軸と y 軸をとることにする。また、配線層を異方性材料とみなし、寸法記号に添え字 z , $x-y$ を付ける。こうした場合、配線層では前節に述べた通常の見方から等価熱伝導率が考えられない。配線断面の代表寸法 (L_2) と配線層の厚さ (L_1) は条件(1)を満たさない。また、配線は一般に屈曲しながら $x-y$ 面内で伸長しており、とくにグローバル配線を含む上層の配線に関しては臨界相関距離 $r^*_{x,y}$ がチップの辺長と同程度になる。従って、チップ面を辺長が $L_{x,y}$ である体積要素に分割しようとするとき、式(2)の条件を満たす体積要素はチップと同程度の大きさになってしまう。これでは詳細な温度分布を知ることが出来ない。

しかし、図 6(b)の上段の図のように配線層数が小さい場合には、たとえ幾何形状の相関距離が長くても $x-y$ 面内の熱拡散距離 (l_{th}) が短い。従って体積要素の $x-y$ 面内の寸法 ($L_{x,y}$) を l_{th} 程度にとれば、ある程度の近似度が得られる。ところが配線層数が増えると l_{th} が増す。この事情を図 7 のモデルを用いて説明する。図 7 では l_{th} の長さを有する配線と、これと直交する一段下の配線を示してある。配線の断面は $w_c \times t_c$ で、配線下面からチップ基底 (Si substrate) の上面までは配線層誘電体で隔てられており、離間距離を t_1 とする。チップ基底の厚さは t_2 で、配線からの熱流は誘電体層内で幅 w_D に広がりヒートシンクへ向かう。配線、誘電層、基底の熱伝導率をそれぞれ k_c , k_1 , k_2 とすると、熱拡散距離はフィン公式を参照し次式のように書ける。

$$l_{th} = \sqrt{k_c t_c \frac{t_1/k_1 + t_2/k_2}{1 + \alpha(t_c/w_c)}} \quad (6)$$

ここで α は配線断面からの熱の広がりに関する係数で、0.88 が与えられている[4]。一段下の配線の設置ピッチを $2w_c$ とし、 l_{th} の長さの配線が横切る下段配線の数 N を計算すると表 1 のようになる。

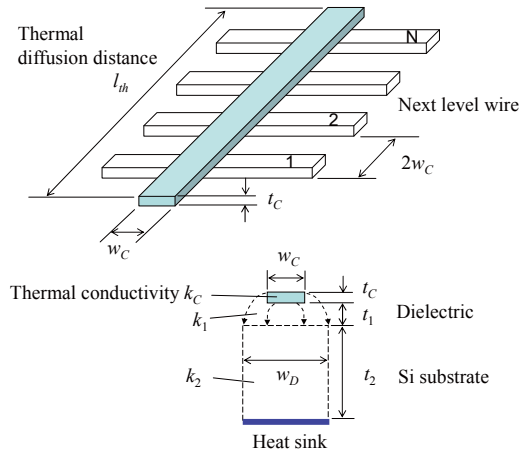


図 7 配線層における熱拡散距離を求めるためのモデル

表 1 熱拡散の相対距離

w_c [nm]	t_c [nm]	t_1 [nm]	k_1 [W/m K]	N
180 nm technology, 2 layers				
525	1155	3675	1	26
50 nm technology, 9 layers				
138	413	1822	0.07	78

$t_2 = 0.2 \text{ mm}$, $k_c = 380 \text{ W/m K}$, $k_1 = 150 \text{ W/m K}$

寸法諸元と誘電層熱伝導率値は文献[3]を参照した。テクノロジーはトランジスタレベルの代表寸法で表され、表 1 によれば代表寸法が約 1/3 にスケールダウンされると熱拡散の相対距離は 3 倍に伸びる。下段配線はこれと直交する上段配線を通して相互に熱連結されている。即ち、 N は熱連結される配線の数であり、熱相関の距離を表すものでもある。このように、回路集積度の向上は $x-y$ 面内での熱相関距離を伸ばす効果をもたらす。等価熱伝導率の基本概念は $x-y$ 面内の熱拡散に対しても適用し難くなる。

配線層のような全体が薄く平たい ($x-y$ 面への投影寸法 \gg 厚さ) 複合構造は電子デバイスとシステム内部の至るところに見られる。チップから視野を広げると、パッケージ基板、ビルドアップ基板、プリント基板は全て上記の構造特徴を有している。更に、システム全体がこの特徴を有する構造体であることは、各種の磁気記録カード、ノートパソコン、ブレードサーバーなどを思い起こすと分かる。さて、これら製品の設計解析に基本的な難しさがあるものの、とにかく製品は出来て

いるわけで、設計現場ではどのように対処しているかを次節に概説する。

4. 複合構造体の熱伝導解析—既存の方法

先にも述べたように限られた計算機リソースのもとでは、複合構造体を均質体積要素モデルあるいは集中定数モデルの集合で置き換え、モデルシステムを対象に数値解析コードを適用する方法しかない。注目する部分の温度分布詳細を知りたいときはズームング法（図 8(a)）を用いる。ズームング法における注目体積要素（Focused element）のみを、モデルではなく実際の構造詳細を再現したものにすれば計算機リソースを節約出来る。しかし、こうして求める注目体積要素の温度分布解の精度は、周辺のモデルの設定法に影響を受ける。正確を期そうとすれば、解析対象を予め注目体積要素と等しいレベルの微小要素に分割し、微小要素のモデルを作成したうえでこれらをまとめて次のレベルのモデル要素とし、という具合にモデル作成を進める（Modeling 過程）。こうすると、下の階層の大きな体積要素には上位階層の要素の情報が取り込まれる。このようなモデル体系を整えたうえでズームング解析を行う。概念的にはこうなるが、モデル化過程ではどのような境界条件のもとに体積要素の伝熱特性を決めたらよいかとの疑問が残る。

今日、幾つかの解析法が既に使われ、あるいは公開論文に提案されている。これら解析法の違いは均質化あるいは集中定数化の方法に見られる。プリント基板と集積回路の熱伝導解析に関する文献に関しては[5, 6, 7]を参照されたい。既存のモデル化方法の概略をまとめると次のようになる。

- 配線金属の体積率を式(3)に代入し、算術平均の等価熱伝導率を備えた均質モデルとする。プリント基板の熱伝導解析に多用されており、プリント基板の製造工程で、配線金属である銅をエッチングで除去することから、体積率は銅残存率とも呼ばれている。算術平均は図 9 に示すように、実際の体積要素内部の金属要素を集めて熱流と平行に置いたモデルの熱伝導率で、等価熱伝導率の上限を与えるものである。等価熱伝導率の下限は、金属要素をまとめて熱流に垂直に置いたもので調和平均、式(4)、により与えられ

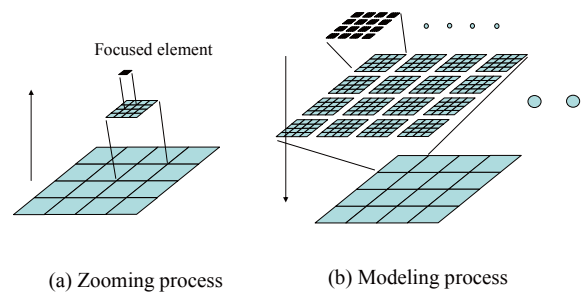


図 8 ズームング法とこのためのモデル化過程

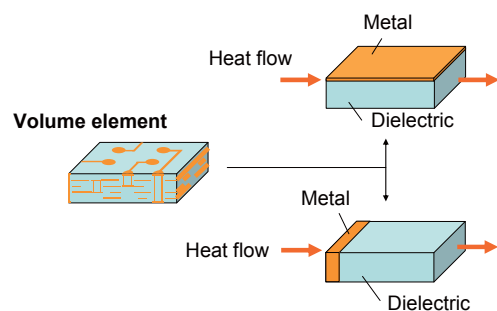


図 9 1点相関に基づくモデル

る。一般に金属と誘電体の熱伝導率比は 1000 近くであるから、上限値と下限値との間隔は大きく、どちらも実際の体積要素の等価熱伝導率を推定する指標にはなり難い。

- 配線パターンを読み込んだ上でモデル化過程を自動的に行い、等価熱抵抗網を作成する [8, 9]。この方向のコード開発は設計現場の望むところでもある。しかし、境界条件の影響が体積要素内部に深く入り込む、あるいは体積要素を通り越して他の体積要素に及ぶ場合、等価熱抵抗が境界条件依存になる。従って、モデル化過程で各要素の等価熱抵抗を決める際、予め妥当と思われる境界条件を想定しなければならない。
- 実際にありそうな全ての境界条件を想定し、各境界条件に対して詳細数値解を求め、等価熱抵抗値の集合を求めておく。そのような解集合の平均熱抵抗を求め、モデル体積要素に付与する。モデル要素から成るシステムを解析する際、システムにはある境界条件が設定されるが、広い範囲のシステム境界条件に対

応し、ほどほどの近似度を有する解が得られよう。この概念の実行には膨大な計算機リソースが必要である。大量販売される汎用パッケージにはリソースを費やしても償えるので、パッケージの伝熱特性を表すのに用いられている。境界条件独立 (boundary-condition-independent) のコンパクトモデルと呼ばれ、商用熱解析コードのライブラリーに組み込まれている[10]。

上記の概説に出てきた‘均質化された体積要素モデル’と‘集中定数化された要素モデル’の関係は次のように捉えることが出来る。前者は数値解析コードを適用する際、更に細かい要素に分割される。差分法による解析の場合がもっとも分かりやすい。細分化された要素同士のエネルギーバランスを考える際、細分要素中央に節点を想定し、節点同士を熱抵抗で結ぶ。熱抵抗は熱伝導率、節点間距離、細分要素の断面積から決まる。このとき、‘均質化された体積要素モデル’内部で想定する(等価)熱伝導率は一様であるが、異なる体積要素モデルの境界では、それぞれの(等価)熱伝導率の然るべき平均をとり、細分要素間の熱抵抗とする。結局、熱抵抗網解析における‘集中定数化された要素モデル’は、‘均質化された体積要素モデル’を細分することなく一つの節点で置き換えたものに過ぎない。従って、集中定数系モデルも均質化モデルの形態の一つであり、以下、‘均質化モデル’なる用語のみを用い話を進める。

5. モデル化コード構築のシナリオ

これまで述べてきたように、外形形状が薄く平たい複合構造体に関する熱伝導解析で、構造体内部の温度分布を詳細に知りたい場合、等価熱伝導率の概念を適用するのは基本的に難しい。等価熱伝導率は本来外形寸法と境界条件に影響されないものだからである。それでも等価熱伝導率を使わざるをえない事情がある。設計や研究開発現場に普及している数値解析コードは、連続体内部のエネルギーおよび運動量の拡散と輸送を記述する方程式に基づいている。必要な入力データには‘物性値’が含まれ、均質化モデル要素の等価物性値に関しては一般にコードユーザーが推定しなければならない。本稿の表題に記した‘物性ならざる

物性(擬似物性)’はこのことを意味している。

‘物性値’と言うとき、一般に実験により求める値であると暗に了解されていると言えよう。実験に頼らず、マイクロ組織を対象にした解析により物性値を推定することも勿論試みられている。例えば、分子動力学シミュレーションから熱伝導率を導く試みには多くの研究者が取り組んでいる。物性値はマクロスケールの世界に属するから、こうした試みにはミクロスケールとマクロスケールの世界を繋ぐ手法が含まれる。ミクロとマクロのスケールギャップは大きく、本稿の冒頭に述べたメゾスケールの世界を通してミクロ世界の情報をマクロ世界に反映させなければならない。考えてみると物理現象は殆ど全てマルチスケールの過程を含んでいる。異なるスケール間の橋渡しをどうするかと言う問題は科学研究が共通して抱えている問題である。近年の計算機の進歩はマルチスケール解析への取り組みに新しい流れを作り出している。例えば、数値解析を異なるスケールレベルの要素に対して繰り返し適用する手法が試みられている[11]。しかし、ここで考えられているのはミクロ要素の配置が周期的であるか、あるいは自己相似性がある場合についてである。‘擬似物性’を推定する方法に関する手がかりを、既存のマルチスケール解析法研究のなかに見出すのは難しい。

そこで、何らかの打開策を講じようとの努力を進めている。日本機械学会の研究分科会 RC239「高密度エレクトロニクス実装における信頼性設計と熱制御に関する研究分科会」のなかで、ミニ研究プロジェクトを作り、有志メンバーの協力を得て進めており、その仕事を紹介しよう。詳細は報告[6]に譲るが、以下には新しいモデル化手法の概念を解説する。このプロジェクトでは目下のところプリント配線基板を対象にしているので、メタルは銅、誘電材は樹脂である。勿論、手法は先に述べた集積回路の多重配線層にも適用しうるものである。

体積要素を通る熱流に大きな影響を及ぼす要因を図10に示す。それぞれの要因について少し詳しい説明を試みると次のようになる。

● Internal (long range) router

体積要素の境界面を連結する銅配線である。銅が連結する境界面間の熱伝導を支配する。また、連続銅は一般に体積要素外部にも伸びているので、

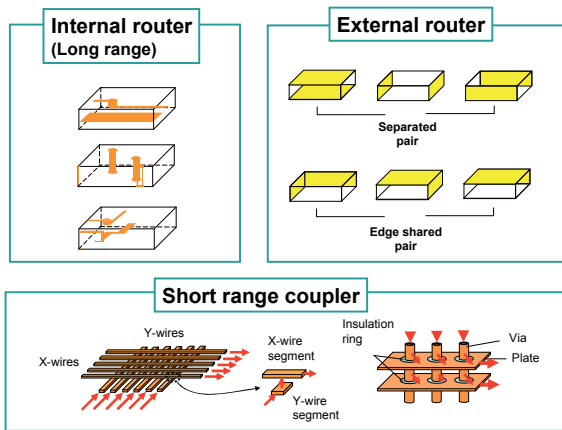


図 10 配線層体積要素を通る熱流に影響する要因

長いレンジの影響を他の要素に及ぼす。連続銅の情報を表すのに、指標付き体積率(indexed volume fraction) $\gamma_{XY-YZ-ZX}$ を導入する。ここでインデックスは、体積要素に座標 (x, y, z) を設定し、銅が接する XY, YZ, ZX 面の個数を表す。 $\gamma_{XY-YZ-ZX}$ は特定のインデックスに属する銅配線の体積和を要素体積で除した値である。例えば図 10 の当該ボックス内の中段の図は上下面を連結するビアの列で、 γ_{2-0-0} がビアの体積和に関する情報である。Internal router の伝熱経路は樹脂を経由する伝熱経路に比べ極めて低い熱抵抗経路である。Internal router を経由する熱流には指標付き体積率が支配的な要因で、熱流量と $\gamma_{XY-YZ-ZX}$ の相関を定式化するのは比較的容易である。指標の総数は全部で 27 あり、例を連結のイラストと共に図 11 に示す。インデックスの和が 2 以上であれば、境界面の何れかの対が直接連結されている。そのような指標の数は 23 である。

● Short range coupler

低熱伝導材である誘電材を介して Internal router 同士が熱結合する形態が多く見られる。図 10 の下段には、直交する配線列の間の熱結合、ビア列と銅板の間の絶縁リング (insulation ring) を介しての熱結合を示してある。これらの例が示唆するように、誘電材を介しての熱結合は、結合箇所が多数ある場合に熱流に大きな影響を及ぼす。Short range coupling 結合部の幾何形状を表すには一般に数個の寸法パラメータを必要とし、古典解析による定式化は難しい。従って、結合部分を対象に数値解析を行い、数値実験データの蓄積から結合

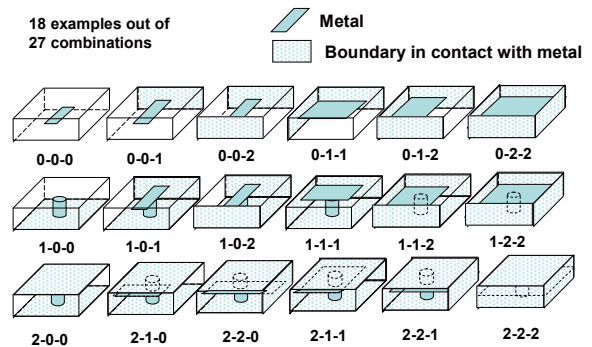


図 11 連続メタルによる体積要素境界面連結を示すインデックス

Heat Flow Vectors through Volume Element

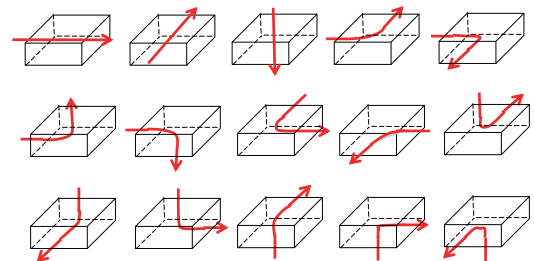


図 12 体積要素を通る熱流の主方向

部の熱抵抗と寸法諸元の間関係を求めておく必要がある。Short range coupling の問題に関しては集積回路研究者側からの研究もなされているが[12]、配線の複雑さに対応する手法に関しては未だ手付かずの感がある。

● External router

言うまでも無く、注目する体積要素の周囲の状況も体積要素を通る熱流に影響する。周囲状況は、体積要素境界面に想定する境界条件に反映される。一般に、線形システムであれば境界条件を次のように分解できよう。境界面の対を選び、選んだ面のみを熱流が流れ、他の面は断熱とする。選んだ面を‘活性化面’と呼ぶことにする。図 12 に‘活性化面’の対を、体積要素を通過する熱流ベクトルにより示した。‘活性化面’の対は勿論 Internal router が連結する境界面とは独立のものである。あらゆる‘活性化面’の対に対応して体積要素内部の温度解(要素解)を求めておけば、任意の境界条件が与えられたときの解は要素解に然るべき

重みを付けて重ね合わせれば求まる．実際には要素解を簡便な指標で表現する必要がある．本研究では次のようにしている．先ず，幾つかのサンプル体積要素を対象に数値解析を行う．各々の活性化面の対に対応する数値解を求め，数値解から熱抵抗を求めておく．別途，同一寸法の均質体積要素を想定し，同一活性化面対のもとでの熱伝導形状係数 (shape factor) を古典解析から求める．数値解から求めた熱抵抗に古典解析から求めた形状係数を乗じ，その逆数をとればそれが‘等価熱伝導率’になる．こうして求めた‘等価熱伝導率’の値は数値解析の対象である特定のサンプルに対応するもので，いわばピンポイント値である．そこで，こうしたピンポイント値を軸にして，ある程度広い範囲の配線レイアウトをカバーする等価熱伝導率推定式を導く．その手順は細かい技術的なことになるので省略するが，要は Internal router の指標 (XY-YZ-ZX) と External router (活性化面対) のアドレスが与えられたとき，指標付き体積率 $\gamma_{XY-YZ-ZX}$ を代入すると等価熱伝導率が求められるようにしておく．そのようなデータバンクを構築する作業を進めている．

サンプル体積要素を対象に行った数値解析解の例を示す．サンプル体積要素は図 13 に示すように $1.8 \times 1.8 \times 0.3 \text{ mm}^3$ の外形寸法を有し，内部に 36 個のビア列と 4 層の直交配線を内蔵している．活性化面対が W 面と N 面であるときの等温線分布を図 14 に示す．図 14 (a) は X 配線層を横切る断面での温度分布，(b) は Y 配線層を横切る断面での温度分布である．X 配線は高温面である W 面に連結しており，体積要素への熱流入のルートになっている．一方，Y 配線は低温面である N 面に連結しており，体積要素からの熱流出のルートになっている．夫々の配線層における熱流は Internal router である配線の方向に指向される．と同時に，X 配線層と Y 配線層の間の Short range coupling により，熱流の主方向は 90 度転向している．図 14 には指標付き体積率 $\gamma_{XY-YZ-ZX}$ の値も示した．当該 External router に重要なインデックスは 0-2-0 と 0-0-2 である．データバンクのなかで，当該体積要素の等価熱伝導率値は γ_{0-2-0} と γ_{0-0-2} に関連付けられている．

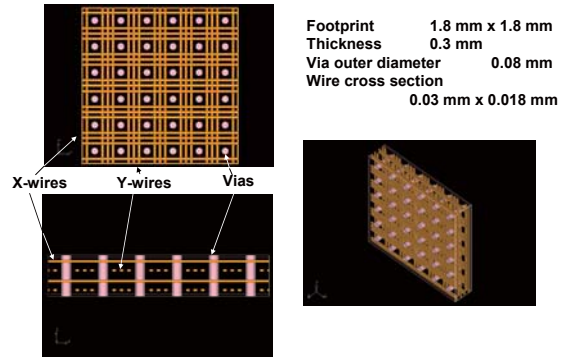


図 13 高密度配線基板の体積要素モデル

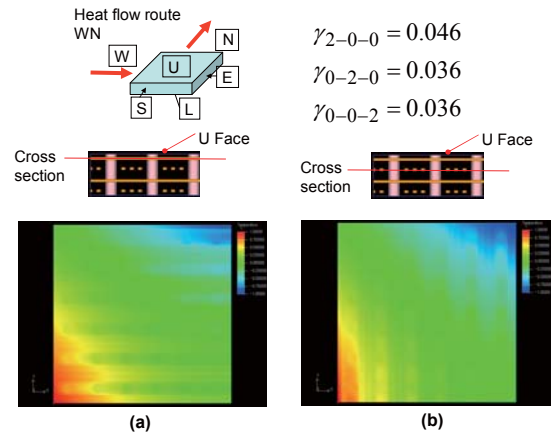


図 14 体積要素モデルの断面における等温線分布

図 15 に解析システムの全体スキームを示す．図の下から上に向かう流れに沿って説明する．実際の配線層 (Actual system) を体積要素に分割する．配線層に与えられた境界条件 (System boundary condition)，および回路レイアウト，あるいはチップ上のフロアプランを参照し，熱流のパターンを予測する．ここでは各体積要素を通過する熱流の定性的な方向を知るのが目的であり，定性計算 (Qualitative computing) でよい．予測した熱流に対応する等価熱伝導率値を，データバンクから得る．熱流の通過面が複数にわたる場合は重みを付けた平均値とする．各体積要素は求めた等価熱伝導率を有する均質化モデル要素に変換される (Element-wise homogenization)．均質化モデルの集合であるモデルシステムを対象に，差分法 (FDM) あるいは有限要素法 (FEM) コードを適用し温度分布を見出す．得られた解が示す熱流分

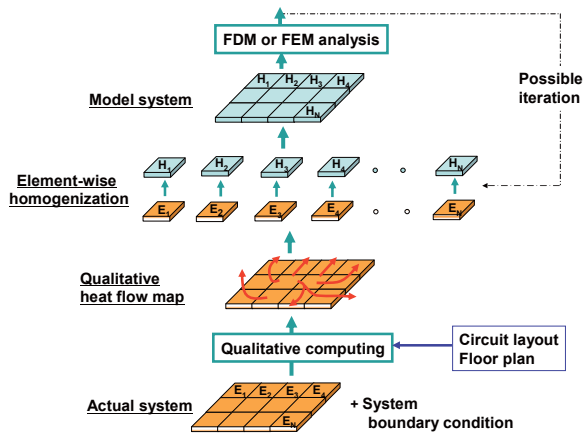


図 15 解析システム

布が定性計算の段階で予測した分布と著しく異なるときは要素均質化のステップに戻り再試行する。

こうした構想の実現には大きな課題が幾つかあり、それらを以下にあげておく。

● 定性計算 (Qualitative computing)

定性計算は数値解析に関する最近のテーマ[13]であるが、図 15 の定性計算に直接用いることが出来る計算コードは未だ無い。また、‘擬似物性’を用いる解析自体が、あるべき真の解を囲いこむ上下限範囲を定める計算であり、定性計算の一種と言える。この種の定性計算法を系統立てて遂行する必要があるが、この課題に関する研究は途上にある。

● 特徴抽出法

回路図から熱伝導計算に影響する形状の特徴を抽出し、より単純な等価形状に置き換える手順を自動化できれば便利である。電気回路図は実際の回路の抽象表現で、高度の抽象が許される背景には、配線材料と誘電材の間の電気伝導度の違いがある。即ち金属と絶縁材の電気伝導度の比はおおよそ 10^{20} であり、回路図では絶縁材を無視できる。配線金属の実際の幾何形状に関しても断面寸法と長さから電気抵抗を求めておけば、回路解析では幾何形状を考慮する必要が無い。これに比べ金属と絶縁材の熱伝導率の比はたかだか 10^3 であり、電気回路に譬えれば‘漏れる回路’である。‘漏れ’は幾何形状に大きく依存するので、熱抵抗回路網を作ったとしても近似に過ぎず、近似度がどれほどかを推定するのは難しい。実は電気回路網でも信号伝送の周波数が高くなると配線相互の誘導力

カップリングが強まり、幾何形状を考慮した回路解析が求められるようになる。電気回路解析の商用コードには特徴抽出アルゴリズムを組み込んだものが見られる[14]。

● 体積要素分割法

一般に、複合材対象の熱伝導数値解析では適正な体積要素寸法を選ばなければならない。文献に見られる体積要素選定法[15]は、境界での時空間変動が内部で十分に拡散するように、即ち等価物性の定義があてはまる程度の大きさに体積要素寸法を選ぶものである。これは、解析対象のシステムから体積要素を任意に抽出したとき、サンプル内部のマイクロ組織が統計的に見てどのサンプルでも同じになることをも意味している。‘擬似物性’を扱う解析でも、体積要素を過度に小さくとるとマイクロ (メタル) 要素の幾何形状の影響が強くなり、異なるマイクロ幾何形状を包含する解を見出すのが難しくなる。然るに、体積要素寸法を大きくしていくと、一般の複合材とは異なり、マイクロ組織が統計的に集約されることにはならない。先に述べた Long range router のパターンは、体積要素を大きくするほど統計的処理を施しても多様化する。このような対象ではある程度の普遍性を備えた解析をするのが極めて難しく思えるが、集積回路 (図 16) の場合には救いがある。集積回路に含まれる要素演算回路 (Gate) の数 (N_G) と入出力端子の数 ($N_{I/O}$) とは Rent の法則で関連付けられる。

$$N_{I/O} = K \cdot N_G^p \quad (7)$$

ここで K は比例定数、 p は集積回路の機能に依存する値をとる。Rent の法則は当初 IBM の E. F. Rent が実際の集積回路データを分析して見出したものであるが、理論解釈もできる。Gate 群を D -次元体積を構成する節点として捉えると、体積表面に位置する節点群、即ち入出力端子群は $(D-1)$ 次元の空間に属し、従って $p = 1 - 1/D$ の関係が成り立つ。メモリー回路のように Gate が線上 (1 次元) に並べられているものでは $D = 1$, $p = 0$, 従って $N_{I/O}$ は N_G に関係しない。回路が複雑になるほど D の値は大きくなり、 p は 1 に近づく。 p に対応する回路ブロック内の配線の平均長さを計算することも

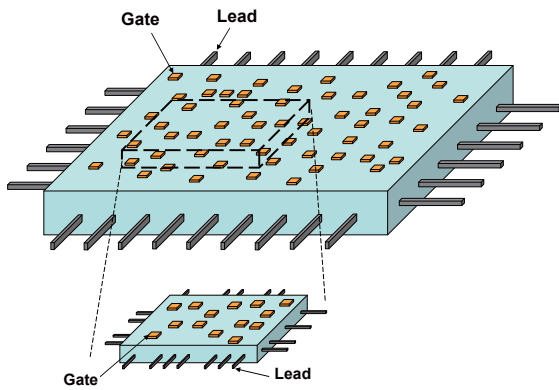


図 16 集積回路ブロック

出来る。Gate も配線も発熱源であるから、回路ブロックからの発熱量は回路ブロック寸法と関連付けられる。さらに、発熱量は電力消費量でもあるので、電力を供給する配線（図 16 には含めていない）の寸法も決まる。

さて、入出力端子および電力供給端子を、体積要素と要素周辺を連結する Long range router として捉えると、体積要素寸法選定に関する指針が得られる。即ちある機能を果たす回路ブロックを体積要素に分割する際、体積要素を通過する Long range router の長さや数は、体積要素内の発熱量と関連付けられる。Long range router の長さや数はまた、他の要素との熱交換にも関連するから、結局、体積要素をどのような寸法にとっても、定まった機能の回路ブロック内であれば、体積要素の熱特性に自己相似性が見られることになる。自己相似性を利用すると、ある特定の体積要素を対象にして得た解にある程度の普遍性を持たせることが可能になる。Rent の法則は集積回路のみならずパッケージ、プリント基板のレベルでも成り立つので、以上に述べた概念を適用できよう。式 (7) の D あるいは p は一般に整数ではないから、問題はフラクタル次元空間の熱伝導問題になる。例えば‘2.3 次元空間の熱伝導問題’に取り組むことになる。

6. おわりに

本稿では伝熱研究界の現況に関する筆者なりの見解からはじめ、メゾスケール世界での厄介な問題への取り組みを紹介した。ここでは伝熱現象の深層に迫り新しい現象の発見につながる種はない。

解析の便宜を図る工夫に関するもので、現象解明を重視する価値体系のもとでは取り上げ難いテーマであろう。ここでは電子回路に関連する問題を紹介したが、同種の問題はバイオ関連の研究ニーズにも見られる。こうした問題に取り組むとき、伝熱の既成知識を他の領域のニーズに役立てるための手法が研究課題になる。これには、他の領域にある程度入り込んでニーズの詳細を知らなければならない。境界領域研究の推進は長年叫ばれてきているが、科学技術研究の主流になり得ていない。しかし機は熟している。伝熱研究に関しては先達 Max Jacob の言葉 ‘Heat Transfer is but a means to better serve relevant engineering applications, both old and new.’ が思い起こされる。伝熱研究の主な役割は各種の技術を推進するための縁の下の支えである。支える役では世間の注目を浴びる機会が極度に少ないが、代わりに‘伝熱’を通して多様な世界を知り、科学技術の進歩に関する眺望を拓く立場に立てる。冒頭に述べたように、伝熱研究界の当初の目覚ましい発展は大規模技術開発を支える役から発したものである。今日、この関連の伝熱研究は成熟期に達した。代わって、多様な異分野知識と‘伝熱’の基礎知識を組み合わせる複合化が大きなニーズとして登場している。伝熱研究界の一角に、多様化と複合化の流れに沿う新しい潮流が作れればと願っている。

謝辞

本研究は（社）日本機械学会 RC239 研究分科会活動の一環として進められている。本報告に引用した数値解析作業は下記のメンバー（敬称略）が行った。謝辞を呈する。（株）コーセル 小泉雄大、富山県立大学 福江高志、石塚 勝、（株）シーデーアダプコ・ジャパン 中嶋達也、新光電気（株）小池 博子、松木隆一。

参考文献

- [1] Aichelmayer, H. T. and F. A. Kulacki, F. A., The Effective Thermal Conductivity of Saturated Porous Media, *Advances in Heat Transfer*, **39** (2006) 377.
- [2] Torquato, S., *Random Heterogeneous Materials*, Springer (2001).

- [3] Banerjee, K. and Mehrota, A., Global [Interconnect] Warming, IEEE Circuits and Devices, September 2001, 16.
- [4] Schafft, H. M., Thermal Analysis of Electromigration Test Structures, IEEE Trans. Electron Devices, **ED34-3**(1987)664.
- [5] Nakayama, W., Heat Conduction in Printed Circuit Boards: A Mesoscale Modeling Approach, ASME Journal of Electronic Packaging, **130** (2008) 041106.
- [6] Nakayama, W., Koizumi, K., Fukue, T., Ishizuka, M., Nakajima, T., Koike, H., and Matsuki, R., Thermal Characterization of High-Density Interconnects In the Form of Equivalent Thermal Conductivity, Proc. ASME InterPACK '09, Paper IPACK2009-89086.
- [7] 中山 恒, 配線基板の高密度化と熱：実装技術の将来を拓く新しい熱解析コード体系の開発, エレクトロニクス実装学会, システム実装 CAE 研究会予稿, 2009 年 6 月 4 日.
- [8] Lush, A. M., 2004, "Modeling Heat Conduction in Printed Circuit Boards Using Finite Element Analysis", Electronics Cooling, http://www.electronics-cooling.com/html/2004_may_a3.html.
- [9] Boyalakuntla, D. S. and Murthy, J. Y., COBRA-Based Compact Models for Simulation of Electronic Chip Packages, Proc. ASME InterPACK01, Paper IPACK2001-15534.
- [10] Lasance, C. J. M., Ten years of Boundary-Condition-1 Independent Compact Thermal Modeling of Electronic Parts: A Review, Heat Transfer Engineering, **29-2** (2008)149.
- [11] E. W. and Engquist, B., Finite Multi-Scale Modeling and Computation, Notices of the AMS, **50-9** (2003) 1062.
- [12] Labun, A. and Jagjitkumar, K., Rapid Detailed Temperature Estimation for Highly Coupled IC Interconnect, IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, **27-10**(2008)1840.
- [13] Chaitin-Chatelin, F. and Traviesas-Cassan, E., Qualitative Computing, Chapter 5, Accuracy and Reliability in Scientific Computing, ed. Einarsson, B., SIAM 2005, 77.
- [14] Heimlich, M., Circuit Extraction Techniques Provide Faster Interconnect Modeling and Analysis, High Frequency Electronics (June 2007)42.
- [15] Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V., and Jeulin, D., Determination of the Size of the Representative Volume Element for Random Composites: Statistical and Numerical Approach, International Journal of Solids and Structures, **40**(2003)3647.

室温の測定・暑い/寒い・ふく射伝熱

Measurement of Room Temperature, Hot and Cold, and Radiative Heat Transfer

牧野 俊郎 (京都大学)

Toshiro MAKINO (Kyoto University)

e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

伝熱学の実験研究では、温度の測定はいちばんの基礎になる。しかし、なかなかむずかしいものである。最先端の薄膜技術などというあたりでも、その性能を左右する基板の温度の測定は、実にいい加減である。基板の近くのどこかに被覆された熱電対を置いて、その指示を基板温度などと称していることが多い。それでは、室温の身近な生活空間の温度なら正しく測れているかという、実はそうでもない。熱電対を壁にビニールテープで貼り付けて壁の温度を測ったつもりになっている、ふく射温度計の指示をそのまま信じて有効数字 2 桁の値を示してはばからない、そんな例が少なくない。

次に、ふく射伝熱である。伝熱の研究者なら、高温では、あるいは低温でも真空の環境ではふく射伝熱が優勢であるのは知っている。しかし、室温の環境においてもふく射伝熱がかなり効くことはあまり気づかれていない。平板に沿う流れによる熱伝達を詳細に調べる風洞実験の研究論文に、その平板をとり囲む壁の材質や温度が記述されることはないようである。しかし、それでよいのであろうか。

筆者は、なん年か前から、冬に浴室に入るときに寒いのが気になり始めた。歳をとったのであろうか。本稿では、このことについて少し説明し、適切な室温の測定法・ふく射伝熱のすごさについて、センスをもっていただこうと思う。

2. 冬の浴室を温かく

都会のマンションでは、浴室は建物の北側の外気に接する部分に配置されることが多い。冬の日、浴室の空気の温度は浴槽の蓋を 10min も開放しておけばある程度上昇するが、熱容量の大きい壁の温度は容易には上がらない。そこでは、体表面から空気への対流伝熱よりも体表面から壁へのふく射伝熱がはるかに優勢であり、それゆえ冬の浴室は寒い。そもそも寒いというのは人間の感覚である。体表

面からエネルギーがそれまで以上に奪われて皮膚が冷えていくときにそう感じる。ふだん、とくに冬には厚く衣服を着ているが、浴室に入るときには、その衣服という壁をとり去って裸になり、冷えた浴室の壁に体表面を曝す。猛烈なふく射エネルギー流束が壁に向かう。そして、寒い。

以上は現象の分析であるが、われわれは工学者である。どげんかせんといかん。については、壁の前に熱容量の小さい壁/カーテンを設け、そのカーテンが空気で温められてふく射流束が抑えられるのを期待することにした。この目的のためのカーテンとしてもち出したのが、“ぷちぷち”である[1]。

“ぷちぷち”は、梱包用緩衝材のエアクッションであり、たとえば直径 10mm、高さ 5mm の円柱状の空洞をピッチ 11mm で千鳥格子状に並べたもの(写真 1)であり、ホームセンターなどで幅 900mm や 1200mm のロールとして市販されているものである。いらいらするときには、その空洞を ぷちっ ぷちっ と潰して、こころの平静を得る。いろんな用途に使える。横文字で書くときには、“petit-petit”と書くことにしている。フランス語で かわいい などという意味の語である。ちなみに、“プチプチ”の呼び名は商標登録されてしまっているが、“ぷちぷち”はだいたいぶであるようである。

この“ぷちぷち”を浴室の壁の前に壁から少し離して垂らす。図 1 に示すようにである。貼っては効果が減じる。写真 2 は、“ぷちぷち”を垂らしたわが家の浴室のようすを示す。垂らしてみると、わが家の浴室はあまり寒くなくなった。家族の評判も悪くない。そこで、友人たちにはこれを勧めることにして、熱の学会でもお勧めしてきた。皆さんは納得して聴いて下さっているようではあるが、うちでもやってみたという話は聞かない。

これには、筆者にも反省すべき点があった。“ぷちぷち”が効くと言いながら、どの程度効くかという定量的なあたりについては何も言えない状態に

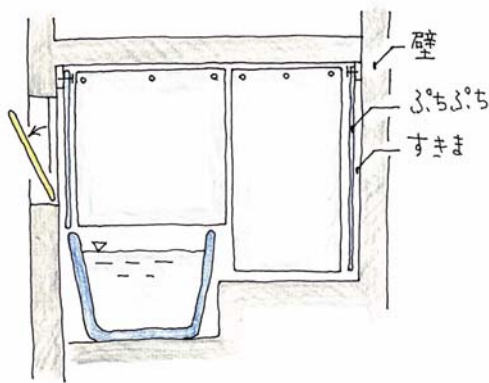


Figure 1 Bathroom with petit-petit sheets



Photo 1 petit-petit sheet



Photo 2 Bathroom with petit-petit sheets

あったからである。そこで、この冬には実験を試みることにした。もちろん、それは事例研究であり、事例の対象はわが家の浴室において他にはない。かくして、冬の浴室で体表面から失われるエネルギー流束を実験的に評価するにあたって、浴室の空気と壁の温度をいかにして測定するかを、改めて考えることになった。

3. 室温の空気と壁の温度の測定法

温度は平衡系の状態量であり、その測定はむずかしい。測定に精度よりは正確度を要する場合、室温の気体や表面の温度の測定もむずかしい。そのむずかしさは、温度計は温度計の温度を測る、ということに由来する[2].

3.1 気体の温度の測定法

測定したい空気の温度は、浴室や壁向こうの空気の（時間/空間）平均温度である。その測定では、細い熱電対よりは、水銀の標準温度計やアルコール

温度計を用いて、温度計の水銀やアルコールが周囲の空気と熱平衡になるのを待つのがよい。については、これで温度が正確に測定されるためには、温度計が周囲の壁によって冷やされることがあってはならない。周囲に冷えた壁があると、人間のみならず温度計も寒い。それゆえ、温度計の温度測定部に熱容量が小さく放射率も小さい壁/カーテンを設けて、その壁が空気の温度と同じ温度になり、温度計から冷えた浴室の壁に向かうふく射エネルギー流束が抑えられるようにすべきである。そのような熱容量の小さい壁としては、台所用の（公称）厚さ $11\mu\text{m}$ のアルミニウム箔を用いるのがよい。これを温度計の温度測定部にスカート状にとり付けて縫針で多数の小孔を穿孔する（写真 3）。このスカートは、温度測定部と周囲の壁との間のふく射伝熱を最小化し、温度測定部が周囲の空気と同じ温度になるように機能する。

そのあたりの空気は湿り空気であり、とくに浴室で浴槽の蓋を開けたままの状態では、その湿り空気は相対湿度が 100%に近い状態にある。温度計は、なるべく浴室温より高い温度の部屋に置いていたものを測定の前に浴室に持ち込むようにし、結露、凝縮の影響を受けないように配慮するのがよい。

3.2 表面の温度の測定法

固体表面の温度を測定するには、ふく射温度計を用いるのが簡便でよいという記述がどこかの教科書にあったが、お勧めできない。ふく射温度計は表面の温度を測るのではなく、表面から温度計にやって来るふく射を測るのである。測定されるふく射には温度測定の対象とする表面で放射されたふく射のみならず、他の表面で放射されてその表面で反射されて、その後にくく射温度計にやって来るふく射もしっかりと含まれている。たとえ温度測定の対象とする表面で放射されたふく射だけがふく射温度計にやって来たとしても、その表面の放射率が正確に指定されないと、その表面の温度が解るわけがない。すなわち、ふく射温度計を用いるのは、簡便でもやめておくのがよい。いえいえ、ふく射温度計以上に簡便で安価な方法がある。次を読んでほしい。

固体表面の温度の測定には、写真 4 に示す手づくりの表面温度測定プローブを用いるのがよい。そのプローブは、直径 28mm 、長さ 30mm の程度のコルク栓に直径 $100\mu\text{m}$ の K 熱電対を渡し、熱電対の表面に厚さ $11\mu\text{m}$ のアルミニウム箔（§ 3.1）を



Photo 3 Mercury/ alcohol thermometers with radiation shields



Photo 4 Probe for measuring surface temperature

貼ったものである。アルミニウム箔は、表面と熱電対の間の熱抵抗を緩和する。熱電対とアルミニウム箔の熱容量は小さく、コルクの熱伝導性は低いので、プローブと表面の間の熱平衡は容易に達成される。このプローブを表面に軽く押し付けて約 3s 後に表面の温度を測定する。“ぷちぷち”などの柔軟性のある表面の温度は発泡スチロール板を“ぷちぷち”などの裏面に置いて測定するのがよい。熱電対の零接点は(氷シャーベット+水)に浸して実現するのがよい。氷シャーベットは、家庭用の手回しのかき氷製造機で作る。これには、力と根気が要る。

ところで、このコルク栓の温度測定プローブを教わったのは、30 年くらい前に東北大学の 大谷茂盛 先生が京都大学の化学工学教室でお話されたときのことであった。先生のそのときのお話の主題については、申し訳ないが、全く憶えていない。しかし、このプローブのことはいまも鮮明に憶えている。大谷先生の後継の三浦隆利教授にお尋ねして、この測定法を紹介する文献[3]を教えていただいた。

3.3 熱流束の評価

浴室における体表面から空気への対流伝熱の熱流束は、空気の(時間/空間)平均温度と体表面の温度と(自然対流)熱伝達率によって評価される。体表面の温度は、生活環境科学の分野で快適と感じる温度とされてきた 33°C であるとする[+]。空気の平均温度は、空気の流れがほとんどない実験空間に、注目する垂直平板の表面が周囲の壁と同じ温度になるように調整された条件/ふく射伝熱の影響が無視できる条件を実現して、§ 3.1 に示した方法で測定した。表面の温度は、§ 3.2 に示した方法で測定した。表面の熱伝達率 h は $h=4.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と評価された。

3.4 ふく射流束の評価

いっぽう、体表面から浴室の壁に向かうふく射流

束を評価するには、浴室を構成する多数の壁と体表面の温度と放射率を地道に測定し、伝熱学の教科書[4]にある、要素表面の温度と放射率と形態係数を用いるふく射エネルギー交換の方法で、ふく射流束を計算するのがよい。世にはふく射流束計というものがあって便利そうであるが、よろしくない。その測定器が測定するのは射度(radiosity)[4]であって、いま評価したい正味の流束(net flux)ではないからである。

浴室の壁の温度は、§ 3.2 に示した方法で測定した。教科書のふく射エネルギー交換の方法における放射率は、本来は分光半球放射率であるべきであるが、室温の表面どうしのふく射エネルギー交換については、全半球放射率で代用しても、そう悪い近似にはならない。そこで全半球放射率を知りたいが、そのあたりの室温の表面の 1 つずつについて全半球放射率のデータはないし、まともな測定器もない。まともな測定器がない理由は簡単で、ふく射エネルギー交換の方法に現れる放射率が半球放射率であることが、実は伝熱学の研究者にもよく理解されていないからである。ならば作ろう。全半球放射率測定器を開発した[5]。開発した測定器は、ペルチェ素子で裏面から冷却したふく射流束計を室温の試料表面に近接させて、そこでのふく射エネルギー交換量を測定する方式のもので、ふく射流束計の表面の全半球放射率も考慮するものである。浴室の壁や体表面の全半球放射率は、この測定器で測定した。

4. 浴室での実験

4.1 浴室の概要

実験は、京都市内の集合住宅の 3 階の 1 室の北側に面する浴室で行った。浴室は $w1150 \times d1670 \times h2100 \text{ mm}$ の広さのものである(図 2)。北側の壁に $w520 \times h640 \text{ mm}$ の窓⑩がある。窓のある北壁⑪と東壁⑤、⑥の裏面は外気に面している。窓⑩は、おもに換気のために、常に上部の高さ 280mm の部分を半開きにしている(cf. 図 1)。浴室の壁には“ぷちぷち”を壁から 15mm 程度離して垂らす。“ぷちぷち”は、浴室の入口の扉⑧を除き、浴室の側壁を窓⑩を含めて覆う。

4.2 実験の日の天気

実験は、2009 年 2 月 18 日の夜 21:13~23:46 に行った。翌日の新聞によれば、その日は「最高気温 9.9°C (平年 9.6°C)、最低気温 -0.1°C (平年 1.5°C)、晴」であった[6]。実感では、しかし、この冬は平年に比べて暖かかった。

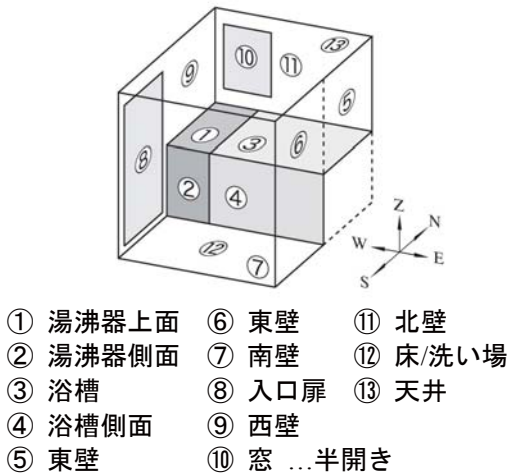


Figure 2 Sketch of bathroom

4.3 実験の手順

実験の日には、まず、冬にはいつも垂らしている“ぷちぷち”を 19:50 にいったん巻き上げ、その約 140min 後から、壁と空気の温度を測定した。ついで、“ぷちぷち”を垂らし、“ぷちぷち”の表面の温度を測定した。その後、浴槽の蓋を外して湯張りを始め、その約 40min 後に、“ぷちぷち”の裏になった壁を含む壁と空気の温度を測定した。また、“ぷちぷち”の表面の温度を測定した。

5. 冬の浴室の熱・ふく射環境

5.1 実験の結果

実験の結果を図 3 に示す[2]。図 3 は、浴室の壁を

展開図的に表示するものであり、湯張り前後の浴室の壁の温度を記号 → の前後に℃の単位で表す。→ の行を 2 段に示す壁(側壁⑤~⑪)については、上段が“ぷちぷち”の設置がない場合、下段が“ぷちぷち”の設置がある場合を表す。図中の ϵ は各要素表面の全半球放射率の測定結果である。これらの値は新しく求めたものである。とくに人体の表面(皮膚)の値 $\epsilon=0.97$ は貴重である。

5.2 壁と空気の温度分布とその変化

外気温は 5.0→5.0℃であったが、壁裏が外気に面する壁⑪, ⑤, ⑥の温度は、夜が更けると、浴槽に湯張りし浴室の気温が 12.6→18.7℃と上昇しても、むしろ低下した。いっぽう、“ぷちぷち”の表面の温度の変化は小さかった。すなわち、湯張り前には浴室の気温より高く、湯張り後には浴室の気温の程度になった。

5.3 ふく射伝熱の計算

図 3 の実験結果に基づいて、人体から浴室の壁へのふく射伝熱量を計算した。灰色・完全拡散流束近似が成立し、形態係数と全半球放射率を用いる方法 (§ 3.4) が有効であるとした。ただし、わが家の浴室の構造(図 2)を厳密に計算に反映させる意味はほとんどないので、ふく射伝熱の計算は図 4 に示すようなもっとも簡単な 2 体間ふく射エネルギー交換のモデルをもってすることにした。すなわち、浴室の壁を温度 T_1 と全半球放射率 ϵ_1 が一様なくばみのない閉曲面 1 であるとし、裸の人体を温度 T_2

09.02.18. 22:13/22:48 → 23:27/23:46		ceiling ⑬ (塗装面) $\epsilon = 0.84$ 13.7→14.3		トイレ 10.5→10.6 ⑨ (タイル)裏 13.8→10.2			
外気 5.0→5.0 ⑥ (タイル)裏 8.1→5.2				洗面所 18.0→ ⑧ (塗装面)裏 18.9→16.2			
E		S		W		N	
⑤ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 9.9→8.9 16.9→16.2	⑥ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 10.4→9.2 16.9→16.6	⑦ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 13.4→11.5 17.4→18.1		⑧ (塗装面) $\epsilon = 0.84$ 15.4→16.0 15.4→16.0	⑨ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 12.6→11.1 18.1→18.2	⑩ (ガラス) $\epsilon = 0.86$ 10.9→12.7 19.1→18.7	⑪ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 10.1→9.2 19.1→18.4
(浴槽)		petit-petit $\epsilon = 0.48$		door		(浴槽) ② (SUS) $\epsilon = 0.31$ 19.7→24.5 ④ (plastic) $\epsilon = 0.79$ 12.5→24.3	
		floor ⑫ (タイル) $\epsilon = 0.97$ 12.1→10.0		浴室 12.6→18.7			
		③ (plastic/湯) $\epsilon = 0.79/0.96$ 13.1→43.2 ① (SUS) $\epsilon = 0.31$ 14.5→27.3		(人体 $\epsilon = 0.97$)			

Figure 3 Distribution and change of temperatures of walls and air in and around bathroom

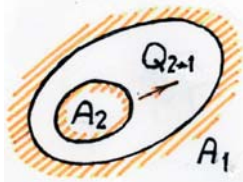


Figure 4 Simplest model for radiation energy exchange among surfaces

と全半球放射率 ϵ_2 が一樣な凸面だけで構成される壁面2であるとして、人体2から浴室の壁1へのふく射伝熱量 Q_{2-1} [単位: W]を、もっとも簡単な計算式[4],

$$Q_{2-1} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)A_2 / \left\{ \frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \frac{A_1}{A_2} \right\} \quad (1)$$

で計算した。ただし、式(1)中の全半球放射率や温度を評価するためには、次の加重平均の式を用いた。

$$A_1 = \sum_i A_i \quad A_2 = \sum_j A_j \quad (2)$$

$$\epsilon_1 A_1 = \sum_i \epsilon_i A_i \quad \epsilon_2 A_2 = \sum_j \epsilon_j A_j \quad (3)$$

$$\epsilon_1 \sigma T_1^4 A_1 = \sum_i \epsilon_i \sigma T_i^4 A_i \quad \epsilon_2 \sigma T_2^4 A_2 = \sum_j \epsilon_j \sigma T_j^4 A_j \quad (4)$$

ここで、下つき添字*i, j*は、それぞれ浴室の壁1と人体2を構成する要素表面を表す。浴室の壁の総面積 A_1 は14.7m²である。人体の表面の温度 T_2 は33℃、体表面積 A_2 は1.20m²であると仮定した。人体の全半球放射率 ϵ_2 には測定値0.97を用いた。

5.3 計算の結果のまとめ

計算の結果を表1にとりまとめる。壁1の温度は式(4)で計算される T_1 である。湯張り後でも“ぷちぷち”の設置がない場合には、人体から壁へのふく射伝熱量は1kWのオーダーにもなる。これはすごい。対流伝熱量はわずかに70Wの程度であり、ふく射伝熱量は圧倒的に大きい。男子学生は1日に2500kcalのエネルギーを摂取するといわれているが、これを24hで平均すると120Wになる。その10倍に近いエネルギーが浴室で一挙に放出されると、これは若い学生でも寒いはずである。ご老体には、寒いでは済まない。いっぽう、“ぷちぷち”を設置すると、そのふく射伝熱量/人体からのエネルギー損失を40%程度も軽減することができる。

“ぷちぷち”を浴室に垂らしてみる価値は十分にある。さあ、やってみよう。ところで、式(1)で放射率 ϵ_1 を小さくすれば、ふく射伝熱量 Q_{2-1} は小さく

Table 1 Radiation energy loss from a human body

“ぷちぷち”の設置がない場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
13℃	← 33℃	→ 12.6℃	14℃	← 33℃	→ 18.7℃
1.17 kW		0.10 kW	1.12 kW		0.07 kW
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)	(ふく射伝熱)		(対流伝熱)
“ぷちぷち”の設置がある場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
16℃	← 33℃	→ 12.6℃	18℃	← 33℃	→ 18.7℃
0.76 kW		0.10 kW	0.67 kW		0.07 kW
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)	(ふく射伝熱)		(対流伝熱)

なるので、垂らすのは“ぷちぷち”より ϵ_1 の小さいアルミニウム箔のほうがよさそうである。しかし、あまりお勧めできない。気持ちよくお風呂に入ること重要であるからである。

6. デスクヒーターと冬の駐車場

これまでには、「浴室を温かく」というテーマを挙げて、われわれのふだんの生活環境においてもふく射伝熱は重要であり、また、それに対処するためにささいな工夫が可能であることを述べた。まだ紙面に余裕があるので、冬を温かく暮らすためのふく射伝熱の工夫について、もう少し述べる。

6.1 冷え症の強〜い味方

冬の日椅子に座って仕事をしていると、冷え症でなくても、脚が冷える。しかし、こんども空気を温める必要はない。注目すべきは壁の温度である。



Figure 5 Desk heater, keeping her head cool and legs warm

断熱材の熱伝導率測定

Measurement of thermal conductivity for thermal insulation

大村 高弘 (ニチアス株)

Takahiro OHMURA (NICHIAS Corp.)

e-mail: oomura-t@nichias.co.jp

1. はじめに

地球温暖化対策が急務となった現在、断熱材の発達にはめざましいものがあり、真空断熱材を始め、ナノ複合粒子を使ったものなど、断熱性能は高まる一方である。それに伴い、最も重要な性能指標の一つである熱伝導率を測定する技術もクローズアップされてきた。この技術は、決して新しい技術というわけではないが、断熱材の性能が急速に向上していることもあって、測定精度に対する関心が高まっている。

例えば真空断熱材では、熱伝導率を $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下にすることで非常に薄い断熱層を実現することができ、冷蔵庫や給湯器、窓ガラス、配管断熱等に使用されている。ただし、 $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下の熱伝導率を正確に測定できるのかという問題がある。標準物質として世界的に使用されているグラスウールの熱伝導率が $0.03\sim 0.04/(\text{m}\cdot\text{K})$ であるため、低熱伝導率領域の精度の確認ができないのが実情である。さらには、金属箔や有機フィルムによる真空パックを必要とするため、真空パック材を介しての伝熱も考慮しなければならず、熱伝導率としてどのように測定すべきかが重要な課題になっている。

ここでは、断熱材の熱伝導率測定の現状、主な測定原理とその問題点、推定方法、試験体に依存する測定上の注意点等について述べたい。

2. 断熱材の熱伝導率測定の現状

米国の国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) が世界的に行った熱伝導率のラウンドロビン試験では、同じ測定原理 (保護熱板法) を用いたにも関わらず、室温から約 500°C の温度範囲にて非常に大きなばらつきのあることが報告されている[1]。図1と2はその結果であり、それぞれアルミナ-シリカ系繊維質断熱材およびケイ酸カルシウム保温材を試験体として実施された絶対温度 T に対する熱伝導率 λ を

示している。図中の○や△等の記号は、各試験機関により測定された結果を表しており、測定温度 T に対して最小自乗法を使って得られた近似式を基準にしたばらつきを示している。ここで、 λ_{obs} は測定値、 λ_{calc} は近似式を使って得られた計算値である。アルミナ-シリカ系繊維質断熱材では±15%ほどのばらつきが示されており、ケイ酸カルシウム保温材では-20~+15%の範囲に至っている

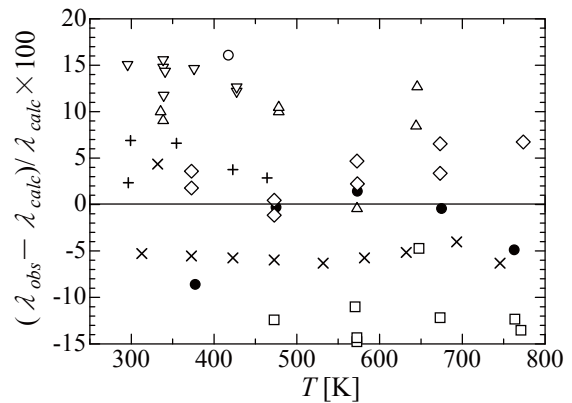


Fig. 1 Deviations of apparent thermal conductivity round-robin test results from value calculated with the corrected equation for fibrous alumina-silica [1].

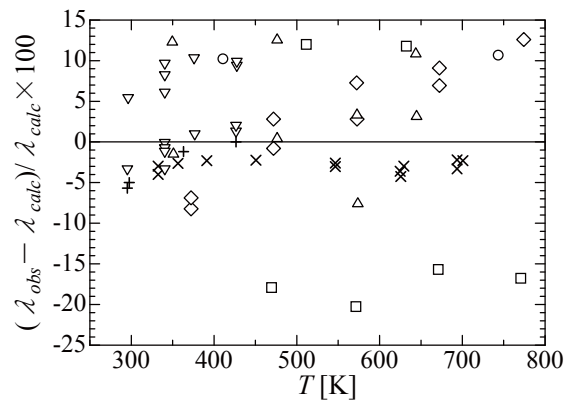


Fig. 2 Deviations of apparent thermal conductivity round-robin test results from value calculated with the corrected equation for calcium silicate [1].

ことが分かる。

このような大きなばらつきが生じる原因の一つとして、標準物質が確立されていないことが挙げられる。すなわち、広い温度範囲において測定の標準となる物質がほとんど無いという問題である。世界的には NIST が提供するガラスウール、日本では (財) 建材試験センターが提供しているガラスウールが存在しているだけである。しかし、これらは室温付近でのみ使用可能な物質であり、高温域では標準物質がないのが実状である。そのため、絶対法である保護熱板法が標準的な測定方法とされてはいるが、この測定にも当然ながら装置の違いによる差が生じ、それを校正あるいは補正することができない状況となっている[2]。

3. 測定方法と問題点

熱伝導率の測定方法は様々であるが、大別すると定常法と非定常法に分けられる。断熱材の熱伝導率測定には主に定常法が好んで用いられ、保護熱板法 (Guarded Hot Plate method, GHP 法)、熱流計法 (Heat Flow Meter method)、平板比較法等が代表的である。特に GHP 法は絶対法ともよばれ、標準的な測定方法として位置付けられている。また、非定常熱線法は、通常非定常法のように熱拡散率を測定するのではなく熱伝導率を直接測定できるため、比較的頻繁に使用されている。さらに最近では、非定常法の一つである周期加熱法が、-170 ~ 1500℃の温度範囲で断熱材の熱伝導率測定に有効であることが示されている[3, 4]。

ここでは、ISO や JIS, ASTM で規格化されている GHP 法と熱流計法について述べることにする。

3.1 保護熱板法 (GHP)

保護熱板法[5] (Guarded Hot Plate method ; GHP 法) による測定は、試験体が厚さ d の平板で、厚さ方向に一次元定常熱流を実現させ、その時の熱流量 Q [W]、熱流面積 S [m²]、試験体の両表面間の温度差 $\Delta\theta$ [°C] から、熱伝導率 λ [W/(m·K)] を次式より求める方法である。

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{\Delta\theta \cdot S} \quad (1)$$

図 3 に示すように、発熱部分は主熱板と保護熱板からなり、保護熱板は、熱的絶縁を目的としたギャップを挟んで、主熱板を取り囲む構造になっている。両熱板の温度が常に等しくなるように保護熱板の温度を制御することで、熱が試験体の側

面方向に流れないようにしている。図 3 (a) に測定部の立体図を示す。

また、試験体 1 枚方式と 2 枚方式があり、1 枚方式では試験体を 1 枚用意し、主熱板を中心にして試験体を設置する側の反対側に熱が流れないように、逆流防止用断熱材と逆流防止用熱板を設けている。図 3 (b) にその模式図を示す。図中の矢印は熱流方向を示す。逆流防止用熱板の温度を主熱板と同温度になるよう制御することで、主熱板で発生した全ての熱が、試験体を通過して冷却熱板に吸収される。一方、図 3 (c) に示すように、2 枚方式では同質同厚の試験体を 2 枚用意し、それらで主熱板を挟むように設置する。熱は主熱板で発生し、2 分されてそれぞれの試験体を通過して冷却熱板に吸収される。

NIST のラウンドロビン結果に示すように、GHP 法には測定装置 (測定機関) によって大きな差が生じるという問題がある。その主な原因の一つとして考えられるのが、装置の複雑な構造である。例えば、GHP 法では試験体に一次元方向に熱を流すために保護熱板を用いている。この保護熱板の主熱板に対する大きさや相対位置、保護熱板内の温度分布、主熱板との熱的絶縁性の度合い等が、

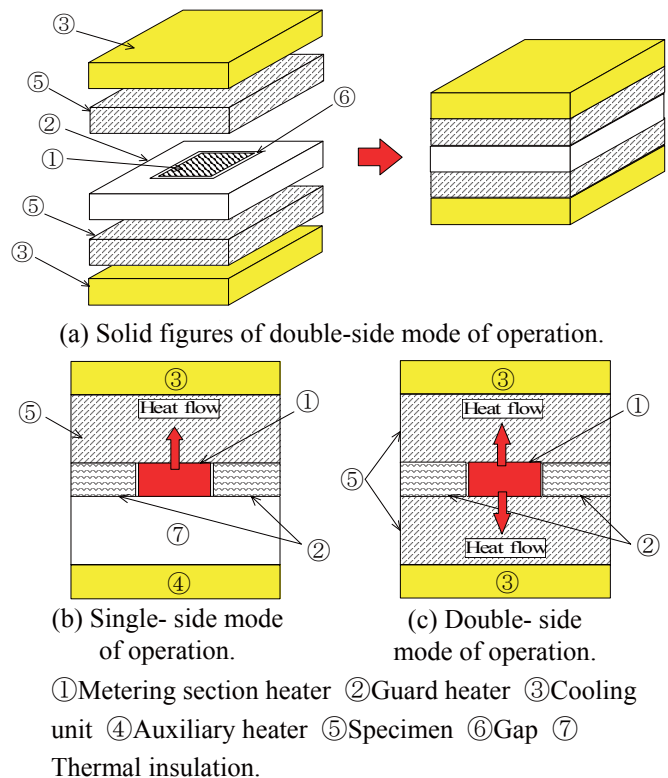


Fig. 3 Schematic diagrams of Guarded Hot Plate method. [2]

主熱板で発生する熱量に少なからず影響を及ぼし、そのため装置の違いによる差が生じてしまうと考えられる。一般には、温度センサー（熱電対）の数を増やして温度分布測定精度を上げたり、主熱板と保護熱板との熱的絶縁性を高めるために両者の隙間の大きさや熱絶縁材の種類を検討したりする。さらに、主熱板と保護熱板の相対位置を決めるとともに、両者を固定する役割を果たしている支柱についても、その径を小さくする、あるいは数を減らす等の対策を施している。しかしながら、これらのような対策は構造をより複雑にする傾向を持つ。例えば、温度センサーを増やすことで、むしろ周囲との熱流路を新たに作ることで、結果的に熱損失や熱流入を増大させる可能性があり、また、支柱についても、存在することで熱橋を作っていることになる。そのため、主熱板に与える影響をどこまで小さくできるかは、設計者に依存するところが大きく、それが装置間の差の一つになっていると考えられる[2]。特に、真空断熱材では、試験体を通過する熱量が極めて小さくなるため、それに伴って主熱板で発生する熱量も非常に小さくなる。それ故、主熱板と保護熱板との熱交換をいかに小さくするかが、従来の断熱材の場合に比べて非常に重要になってくる。

一方、断熱材の中には繊維質あるいはケイ酸カルシウム系のボードなど、熱伝導率が $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の材料も多く、建築材料や工業材料として広く使われている。ところが、熱伝導率測定装置の精度を確認できる範囲は標準物質であるグラスウールのレベル ($0.03\sim 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) であり、 $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の熱伝導率を正確に測定できているかどうかは、確認の仕様が不明な状況である。ここで $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を区切りとしたのは、筆者のこれまでの測定経験からである。このような問題に対し、大村らは、異なる測定方法で得られた結果を比較し、その断熱材の熱伝導率をより正確に決定することを検討している。これまでに、繊維質断熱材やレンガ、ケイ酸カルシウム保温材等を対象にして $0.03\sim 0.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の範囲で GHP 法、非定常熱線法、周期加熱法を使って測定比較したところ、それらの熱伝導率が $\pm 10\%$ の範囲で一致し、測定方法に依存しないことを確認した[2]。したがって、ある材料の熱伝導率を決定するために、異なる測定方法による結果比較が有効であることが示された。ただし、この方法により標準物質が存在しない領域での精度確認が可能とはなったが、

同一環境（同一装置で異なる測定方法）で測定比較しているため、設計の異なる装置での比較ではない。したがって、上記3種類の測定方法であれば、どのような装置であっても結果が一致するというのではなく、今後、設計の異なる装置による差異を検証していかなければならない段階である。

また、実際の建築あるいは工業用途として使用される材料の中には、箔状のものや厚さ数ミリのペーパーから厚さ十ミリ以下の板状のもの、曲率を持つものなど様々であり、全ての材料について測定比較が可能なのではない。そのため、これらの材料については、測定精度を把握できていないのが実情であり、低熱伝導率の測定とは違った意味で、まだまだ難しい測定領域となっている。

3.2 熱流計法

熱流計法[6]は、熱流計により試験体を通過する熱流量を測定して熱伝導率を求める方法であり、熱流計として標準板を用いた比較法も含まれる。

まず、熱流計と試験体を重ね、加熱板と冷却熱板で所定の平均温度と温度差 $\Delta\theta$ を与え定常状態とする。次に、試験体を通過する熱流量 Q を熱流計で測定し、式(1)を使って熱伝導率を求める。一般的に、熱流計は熱抵抗の安定している薄い板状の材料を基板にして、その両面間にサーモパイルを配したもので、両面間に温度差があるときにサーモパイルに生じる熱起電力から換算して熱流を測定する計器である。ここで、熱流計は標準物質を使って校正されるのが一般的である。

また、比較法の場合は、熱流計の代わりに試験体と同形状で熱伝導率が既知の標準板を重ねて所定の平均温度と温度差を与え定常状態とし、試験体を通過する熱流量を標準板によって求める。

このように、熱流計法は原理的に非常に分かりやすく、装置としても簡便で使いやすいため、研究機関のみならず多くの企業で開発品の性能チェックや製品管理などに利用されているようである。ただし、問題点が、標準物質による熱流計の校正にある。熱流計を校正するため標準物質を使用するが、その標準物質の熱伝導率を決定するのに、一般的には GHP 法を使用している。したがって、熱流計法は GHP 法の子供のような関係にあり、GHP 法で生じた誤差をそのまま引き継ぐことになる。また、標準物質の熱伝導率に近い材料を測定する場合は問題ないが、断熱材には多くの種類があり、中には標準物質の熱伝導率の5倍以上か

け離れたものを対象とすることもある。このような場合の測定結果は、あくまでも参考値であることを認識しなければならない。

4. 熱伝導率の推定

測定とは別に、熱伝導率を推定するケースがしばしばある。特に、新しい断熱材を試作した場合など、その熱伝導率の測定結果の妥当性を確認する一つの手段として、既知の推定式による結果との比較を行うことがある。試作品の内部構造がどのようなものであるのか、例えば、不連続な泡状の空隙を持つ構造なのか、空隙が連続的に連なっているのかなどを推定し、それぞれに適した推定式を選択して測定結果との比較を試みる。その結果次第で、断熱材の大凡の構造を特定できると共に、測定方法の妥当性の確認にもなる。

ただし、推定式の多くが非常に使いにくいという一面を持っている。例えば、多くの式は空隙率を使用しているが、空隙率を知るためには、少々厳密な言い方になるが、構成している材料全ての真密度を必要とする。ところが、断熱材を構成している材料は、主原料である繊維や粉体以外にも、無機あるいは有機系のバインダーなど多数の材料が含まれているため、全ての真密度を知るとは大きな手間となる。また、個々の材料そのものの熱伝導率を式中で使わなければならない場合もあり、使用しているほとんどの材料について、個々にその熱伝導率を測定することはまず不可能で、適当な値を代用することになってしまう。あるいは、これら多種類の材料の全てを混合した一つの固体としての熱伝導率を要求される場合もあるが、

実測はまず無理である。また、ふく射の減衰係数、固体の曲りくねりの度合いや繊維のねじれ、不連続性の因子などを要求されることもあるが[7]、これらの値をどのように決定するかは、使用する個人に大きく依存してしまうことになる。

そこで大村らは、一般的に使用されている断熱材は繊維や粒子などの混合であり、容易に分類できるものではないこと、また、空隙率よりはかさ密度の方が工業的には便利に使えるという考えに立ち、工業的に簡便に使える推定式として次式を提案している[8]。

$$\lambda = A\rho + \frac{B}{\rho}T^3 + (C \cdot T + D)\lambda_f \quad (2)$$

ここで、 λ は熱伝導率[W/(m·K)]、 ρ はかさ密度[kg/m³]、 T は絶対温度[K]であり、係数 A, B, C, D は実験結果から決定され、添え字の f は流体を意味している。この推定式は、断熱材内の熱伝導率が固体、ふく射、流体にそれぞれ寄与する熱伝導率の和であることを仮定している。右辺の第1項から3項の順に、固体、ふく射、流体に寄与する熱伝導率を表しているが、流体は繊維や粒子同士の接触部分の熱抵抗にも影響を及ぼすため、係数 C と D を使って調整している。例えば、流体を空気とした場合、ロックウール断熱材では $A=3.1 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^2 / (\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $B=1.6 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{kg} / (\text{m}^4 \cdot \text{K}^4)$ 、 $C=0 \text{ K}^{-1}$ 、 $D=1$ であり、

$$\lambda = 3.1 \times 10^{-5} \rho + \frac{1.6 \times 10^{-8}}{\rho} T^3 + \lambda_f \quad (3)$$

を得ている[9]。測定結果との比較を図4に示す。

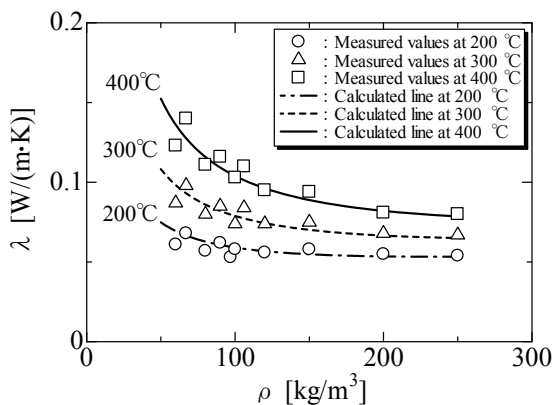


Fig. 4 Comparison of estimated result with measured result of Rock wool. [9]

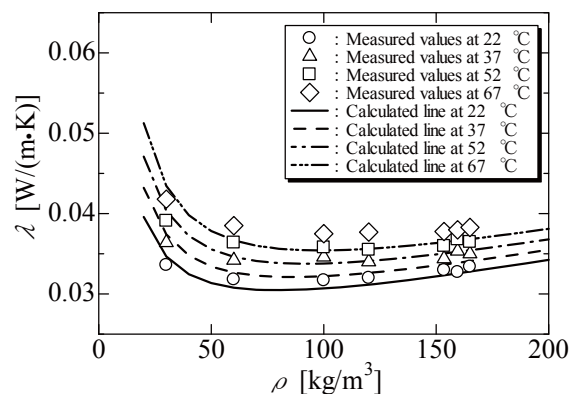


Fig. 5 Comparison of estimated result with measured result of Glass wool. [10]

さらに室温付近における温度範囲の狭い領域では、次式が有効であることを示している[10]

$$\lambda = A\rho + \frac{B}{\rho}T^3 + E + \lambda_f \quad (4)$$

例えば、グラスウールでは

$$\lambda = 5.2 \times 10^{-5} \rho + \frac{1.3 \times 10^{-8}}{\rho} T^3 - 4.0 \times 10^{-3} + \lambda_f \quad (5)$$

であり、測定結果との比較を図5に示す。

式(2), (4)は各物質に対する固有の式ではなく、構造体としての式であるため、同じ種類の材料を使った断熱材だとしても、繊維径や粒子径、バインダー等が違う場合や、配合比率が異なる場合など、それぞれの場合に応じて式中の係数が変わる。そのため、この係数を比較することでその断熱材における固体、ふく射、流体の熱伝導率に与える影響を比較することが可能である。ただし、先にも述べたように、熱伝導率が固体、ふく射、流体にそれぞれ寄与する熱伝導率の和であることを仮定しているため、例えば、閉気孔で構成されるような断熱材には適用できない。

このように、推定方法も十分確立されているとは言えないのが現状であり、使用する断熱材の構造に併せて、適切な推定式を探す必要がある。

5. 試験体

断熱材に使用される材料は様々であり、特に近年、低熱伝導率化のために、多くの種類の材料が断熱材として使用されるようになってきた。真空断熱材のように、真空パックの容器までを含めて断熱材とすれば、かつての断熱材のイメージである綿を成型したものとは大きく異なっている。また、ナノ粒子を使った断熱材にしても、今まで使用していなかった材料を使用している。これら初めての材料を使用する場合に問題になるのが、温度変化に伴う吸発熱反応である。例えば、有機分を僅かでも含んでいれば、大凡、300°C以下で吸発熱反応や相変化が生じる。そのため、反応中に熱伝導率を測定すると、大きな誤差を含んでしまう。あるいはパルプのような燃焼する物質を含んでいる場合も、測定はほとんど不可能となる。そのため、測定前に、熱分析装置などを使用して熱的反応を十分チェックしなくてはならない。

また、試験体が熱流に対して等方性であるか否

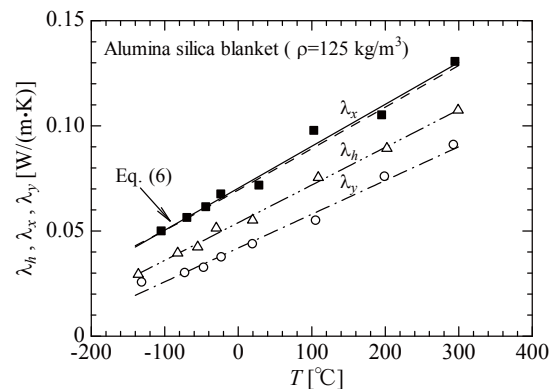


Fig. 6 Thermal conductivities λ_h , λ_x , and λ_y of alumina silica blanket with a bulk density $\rho = 125 \text{ kg/m}^3$. [11]

かも重要である。特に繊維質断熱材などでは、内部に含まれる繊維により熱的に配向が生じ、厚さ方向と面内方向で熱伝導率が大きく違っている。そのため、測定方法によっては結果に大きな差が生じる。例えば、繊維が任意に配向している面内に熱線を設置した非定常熱線法により得られた熱伝導率 λ_h と、試験体の厚さ方向および面内方向のそれぞれの熱伝導率 λ_y と λ_x には大きな差があり、これら3者には次式の関係がある[11]。

$$\lambda_h^2 = \lambda_x \lambda_y \quad (6)$$

一例として、図6にアルミナーシリカ系断熱材の周期加熱法により得られた厚さ方向と面内方向の熱伝導率、および非定常熱線法により得られた熱伝導率を比較した結果を示す。ここで、○と■は周期加熱法により得られた試験体の厚さ方向および面内方向のそれぞれの熱伝導率 λ_y と λ_x 、△は非定常熱線法により得られた熱伝導率 λ_h である。

このように、測定の際には試験体の内部構造を考慮して測定方法を選択する必要がある。

6. おわりに

近年、断熱材は、その性能を向上させるためにより複雑化されるようになってきた。それ故、熱伝導率を測定する際は、どのような構成の断熱材なのか、吸発熱反応などによる影響を無視できる範囲であるのかなど、測定者が単に測定するだけでなく、試験体の中身をよく理解して熱伝導率を決定する時代になってきたと言える。すなわち、ある原理に基づいたある装置による測定結果を示すだけでは、社会的に十分な責任を果たしている

とは言えない状況になってきている。各種断熱材の JIS や ISO を眺めても、その熱伝導率を測定する方法として保護熱板法や熱流計法、非定常熱線法などが引用されているが、その材料に適した測定条件を記しているものは非常に少ない。

今後、多くの公的機関や大学、民間企業等との協力のもとで、標準物質を確立し、試験体に適した測定方法、測定条件が整備され、広い熱伝導率範囲で測定精度が向上されることを期待する。

参考文献

- [1] J. G. Hust and D. R. Smith, *National Bureau of Standards Department of Commerce*, (1988), NBSR 88-3087.
 - [2] 大村高弘, 熱物性, 21, No. 2, 2007, pp. 86-96.
 - [3] Ohmura, T., *Proceedings of the 7th ASME-JSME Thermal Engineering Conference and the ASME Simmer Heat Transfer Conference (7th AJTEC-SHTC07 Symposium)*, 2007, Paper No. HT2007-32746.
 - [4] Ohmura, T., Tsuboi, M., Onodera, M. and Tomimura, T., *24th ICAS Congress*, 2004, ICAS 2004-8.9.R (paper No. 249).
 - [5] JIS A 1412-1
 - [6] JIS A 1412-2
 - [7] 新編熱物性ハンドブック (日本熱物性学会編) (養賢堂) pp.195-197 (2008)
 - [8] 大村高弘, 坪井幹憲, 富村寿夫, 第 42 回 日本伝熱シンポジウム, I312, pp. 741-742, (2005)
 - [9] 大村高弘, 坪井幹憲, 小野寺正剛, 富村寿夫, 九州大学機能物質科学研究所報告 第 16 卷 PP.13-17 (2002)
 - [10] 大村高弘, 富村寿夫, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, 410, pp. 103-104, (2005)
 - [11] Ohmura, T., Tsuboi, M. and Tomimura, T., *Int. J. Thermophysics*, 2002, 3, No. 3, pp. 843-853.
-

並列接続をもつ多層平板系の有効熱伝導率評価法について

How to Evaluate Effective Thermal Conductivity of Composite Plane Wall System with Parallel Connection

富村 寿夫 (熊本大学)

Toshio TOMIMURA (Kumamoto University)

e-mail: tomi@mech.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

複合材料の熱物性値に関しては、これまで数多くの研究が行われており、熱伝導率などに関する様々な測定値や整理式が提出されている[1-3]。例えば、最も簡単な例を挙げると、熱伝導率が異なる平板を密着させた多層平板系の1次元熱伝導問題では、各平板における熱抵抗が熱流に対して直列あるいは並列に接続されていると考えることにより、総括熱抵抗すなわち有効熱伝導率を簡単に求めることができる。また、このような多層平板系が直列と並列の熱抵抗で構成されている場合も、電気回路に基づくアナロジーにより有効熱伝導率を簡単に評価することができるとされている。

しかし、並列に配列された物体間の熱抵抗が大きく異なる場合は、上記の方法では必ずしも正しい総括熱抵抗が評価できるとは限らず、また演習問題のでありながら、明確な指針も示されていないようである。すなわち、個々の熱伝導率は既知であっても、それらが組み合わされた複合材料の有効熱伝導率の推定となると、窮する場合もある。

ここでは、最近、軽量かつ高遮音性に加え断熱性にも優れた建築用の床材として普及しつつあるボイドスラブの有効熱伝導率の評価を具体例として検討した結果について報告する。

2. 多層平板系の熱抵抗

まず、以下に、直列と並列の熱抵抗で構成された多層平板系の総括熱抵抗あるいは全熱抵抗などをキーワードとして、テキストやハンドブックなどに記述されている内容を、そのまま列挙してみることとする。なお、図番号は筆者が変更した。

[例 1] JSME テキストシリーズ, 伝熱工学, 日本機械学会 (2005).

つぎに、図 1 に示すように並列の熱抵抗を含む場合を考える。抵抗 R_2 は物体 a と物体 b の並列結合として電気抵抗と同様に考えれば、次式で表さ

れる。

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} = \frac{1}{\frac{L_2}{k_a(A/2)}} + \frac{1}{\frac{L_2}{k_b(A/2)}}$$

これより、

$$R_2 = \frac{L_2}{(k_a + k_b)(A/2)}$$

となる。したがって、この場合の総括熱抵抗 R_t は次式で表される。

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{2L_2}{(k_a + k_b)A} + \frac{L_3}{k_3 A}$$

[例 2] 伝熱工学資料 改訂第 5 版, 日本機械学会 (2009).

図 2 のような複合体は、本来であれば、2次元温度場を計算しなければならないが、熱流に平行した複合物質の熱伝導率差にあまり差がないとき、等価回路に近似して1次元で概算できる。

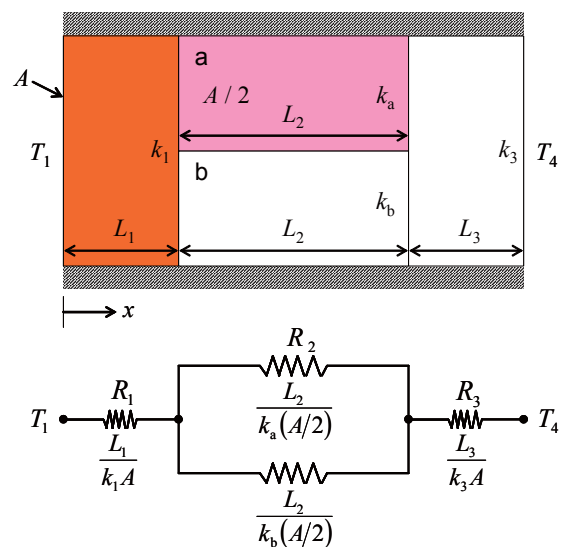


図 1 並列部が存在する多層平板の熱伝導

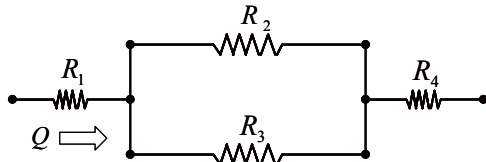
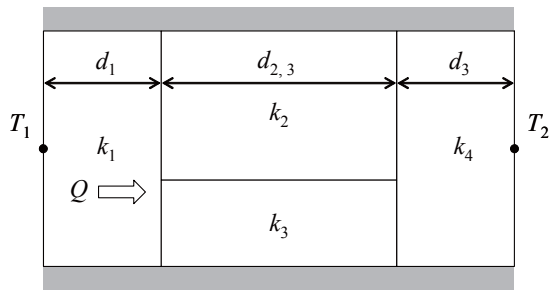


図2 並列部が存在する多層平板の定常熱伝導および多層平板の熱抵抗

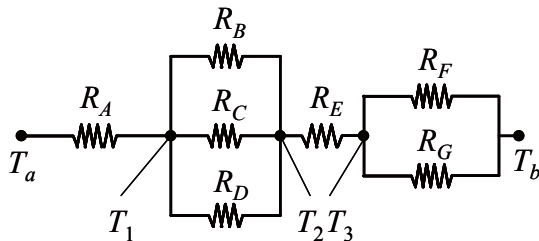
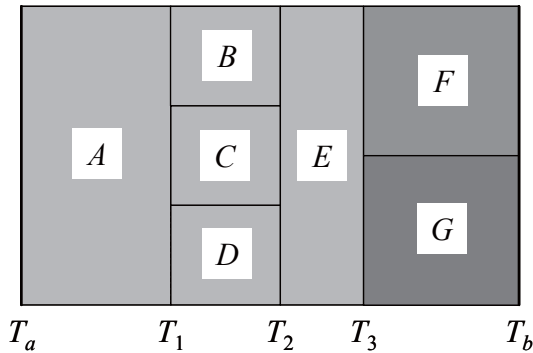


図3 並列多層平板とその熱抵抗

熱通過量

$$Q = \frac{(T_2 - T_1)}{R}$$

ただし、 $R = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} + R_4$

$$R_1 = \frac{d_1}{k_1 A}, \quad R_2 = \frac{d_{2,3}}{k_2 A_2}, \quad R_3 = \frac{d_{2,3}}{k_3 A_3}, \quad R_4 = \frac{d_4}{k_4 A}$$

$A_2 + A_3 = A$ である。

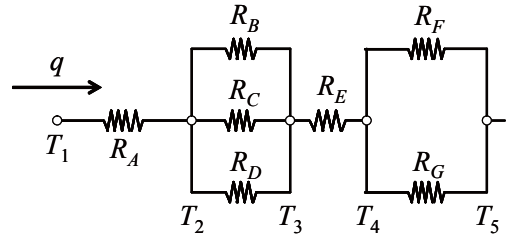
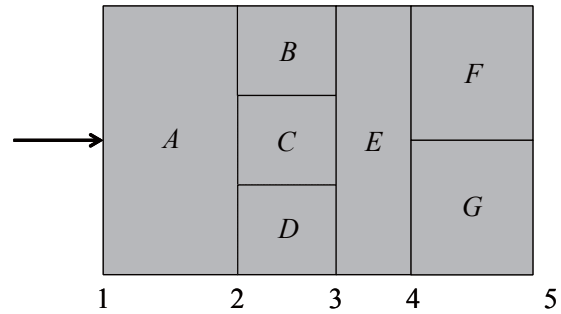


図4 Series and parallel one-dimensional heat transfer through a composite wall and electrical analog

(筆者注：[例3] 伝熱ハンドブック—ソフト付き—, 日本機械学会 (1993). にも全く同様な記述がなされている)

[例4] 庄司正弘, 伝熱工学, 東京大学出版会 (1955).

なお、図3の上図に示すように並列的な構造をもつ多層平板の場合の等価回路は図3の下図のように示される。ただしこの場合、1次元熱伝導として扱えるのはB, C, Dの材質、F, Gの材質の熱伝導率が互いにあまり大きく異なる場合に限られる。

[例5] Holman, J. P., Heat Transfer, Ninth Edition, McGraw-Hill Higher Education (2002).

The electrical analogy may be used to solve more complex problems involving both series and parallel thermal resistances. A typical problem and its analogous electric circuit are shown in Figure 4. The one-dimensional heat-flow equation for this type of problem may be written

$$q = \frac{\Delta T_{\text{overall}}}{\sum R_{\text{th}}}$$

where the R_{th} are the thermal resistances of the various materials. The units for the thermal resistance are °C/W or °F·h/Btu.

It is well to mention that in some system like that

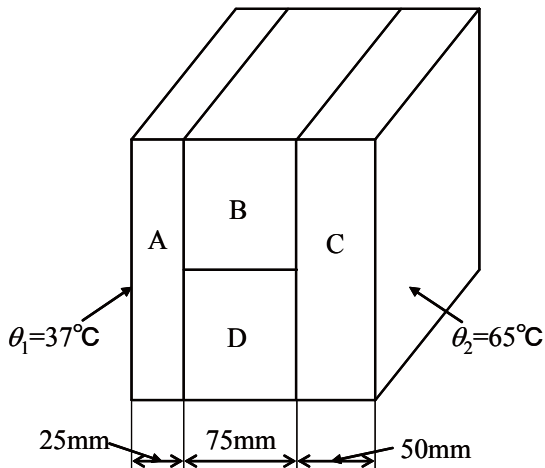


図5 演習問題

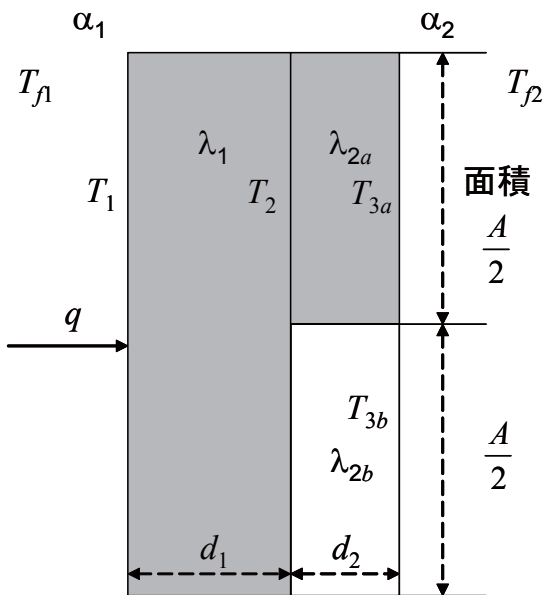


図6 複数の板が複合した場合の熱抵抗

in Figure 4 two-dimensional heat flow may result if the thermal conductivities of materials B, C, and D differ by an appreciable amount. In these cases other techniques must be employed to effect a solution.

[例6] 西川兼康・藤田恭伸 共著, 伝熱学, 理工学社 (1982).

図5のような複合壁を通して単位時間に伝わる熱量を求めよ。ただし、一次元熱流を仮定し、各部の熱伝導率はそれぞれ

- $\lambda_A = 150 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- $\lambda_B = 30 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- $\lambda_C = 50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- $\lambda_D = 80 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$

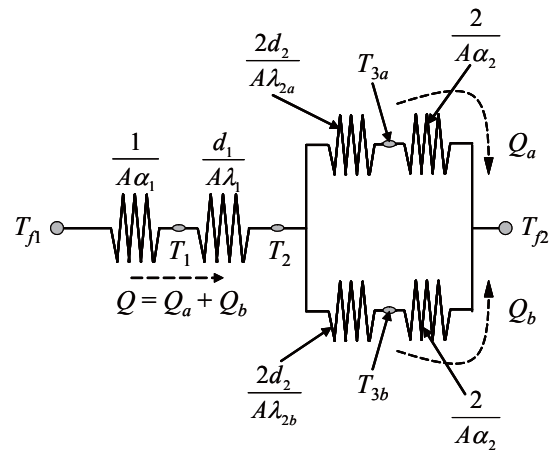


図7 等価電気回路

であり、B部とD部は同じ大きさである。

[例7] 竹中信幸・小澤 守・梅川尚嗣・浅野 等・松本亮介 共著, 熱移動論入門, コロナ社 (2008).

【例題6.1】以上の考え方を、図6に示すような、1枚の板(熱伝導率 λ_1 [W/(m·K)])と、それに積層する等しい面積の2枚の異なった熱伝導率の板(それぞれ λ_{2a} , λ_{2b} [W/(m·K)])に適用して、全熱抵抗を求めてみよう。ただし図6'(著者注: 図省略)の場合と同じく、積層板の両側の流体温度を T_{f1} , T_{f2} [K], 熱伝達率を α_1 , α_2 [W/(m²·K)], 板の厚さを d_1 , d_2 [m]とし、熱移動は板の厚さ方向(矢印の方向)のみの1次元場を考える。したがって、それぞれの板内部で板面に平行方向の熱移動および2種類の板の端面での熱移動を考えない。

【解答】電気回路とのアナロジーに基づく熱抵抗の合成は図6のような並列回路であっても成立し(ただし、図6の場合には並列回路になっている部位での温度差がそれほどなく、横方向に熱移動が生じないことが条件になる), キルヒホッフの法則に従って全熱抵抗を求めることができる。図6と等価な電気回路は図7のように表され、全熱抵抗は次式となる。

$$R = \left(\frac{1}{A\alpha_1} \right) + \left(\frac{d_1}{A\lambda_1} \right) + \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{2d_2}{A\lambda_{2a}} + \frac{2}{A\alpha_2} \right)} + \frac{1}{\left(\frac{2d_2}{A\lambda_{2b}} + \frac{2}{A\alpha_2} \right)}}$$

以上、7つの例を挙げてみたが、[例1]では、熱流の条件に関して、何ら注釈が加えられていない。

なお、本例のモデルは次の[例 2]および[例 3]と同じモデルになっている。[例 2]と[例 3]では、「熱流に平行した複合物質の熱伝導率差にあまり差がないとき」と記述されているが、定量的な表示はなされていない。また[例 4]でも、「B, C, D の材質, F, G の材質の熱伝導率が互いにあまり大きく異なる場合に限られる」と書かれており、同様に定量的な表示にはなっていない。なお、本例のモデルは次の[例 5]と同じであるが、[例 5]でも事情は同じであり、「two-dimensional heat flow may result if the thermal conductivities of materials B, C, and D differ by an appreciable amount」とのみ記述されている。[例 6]の演習問題においては、与えられた条件から、B 部と D 部の熱抵抗比は $R_B/R_D = 8/3$ となる。しかし、何ら理由が述べられないまま、この部分で熱が並列に流れるとした場合の解が示されている。最後の[例 7]では、「熱移動は板の厚さ方向 (矢印の方向) のみの 1 次元場を考える」



図 8 ボイドスラブの構造例

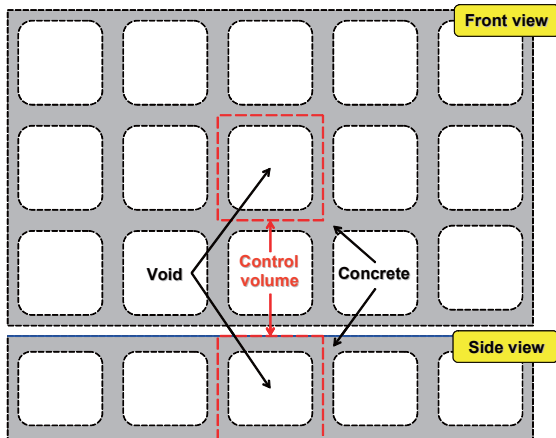


図 9 ボイドスラブの概要

あるいは「ただし、図 6 の場合には並列回路になっている部位での温度差がそればとなく、横方向に熱移動が生じないことが条件になる」と、熱の流れが最初から規定された問題となっている。

直列と並列の熱抵抗で構成された多層平板系の総括熱抵抗あるいは全熱抵抗などの評価に際してヒントになりそうな例を、筆者の手にある書籍類の中から可能な限り拾い出してみたものの、上述のような情報しか得られず、このことは、個々の事例において、暗に、「自身で妥当な推算を行いなさい」と言われていることに等しいようである。

そこで、以下では、ボイドスラブの有効熱伝導率評価について検討した結果を述べることにする。

3. ボイドスラブの有効熱伝導率の推算

建築用の床材として普及しつつあるボイドスラブは、軽量かつ高遮音性に加え断熱性にも優れた特徴を有している。しかし、室内の熱環境の合理的な設計に必要となる有効熱伝導率に関しては、濱本ら[4, 5]の実測結果を除き、これまで報告されていないようである。

3.1 物理モデルと有効熱伝導率の導出

図 8 にボイドスラブの例[6]を示す。白い立方体形状のブロックがビーズ法ポリスチレンフォーム製ボイドであり、それらの空隙にコンクリートが打設されボイドスラブが完成する。

図 9 は、図 8 の写真に対応する、ボイドスラブの概要図である。なお、煩雑さを避けるために、スラブ内の鉄筋は省略した。図からわかるように、ボイドの配列には周期性があり、ここでは赤い破線で示した部分を解析対象とする。この結果、周囲の 4 つの側面は断熱と見做すことができる。

図 10 に、解析対象であるボイドスラブ要素を示す。ここで、各記号の意味は下記の通りである。

コンクリートに関して

- w : 幅 [m]
- w_c : 幅方向のコンクリート厚さ [m]
- l : 長さ ($= 2l_c + l_v$) [m]
- l_c : 長さ方向のコンクリート厚さ [m]
- t_s : 高さ ($= t_{cl} + t_v + t_{cu}$) [m]
- t_{cl} : 高さ方向の下部厚さ [m]
- t_{cu} : 高さ方向の上部厚さ [m]
- λ_c : 熱伝導率 [W/(m·K)]

ボイドに関して

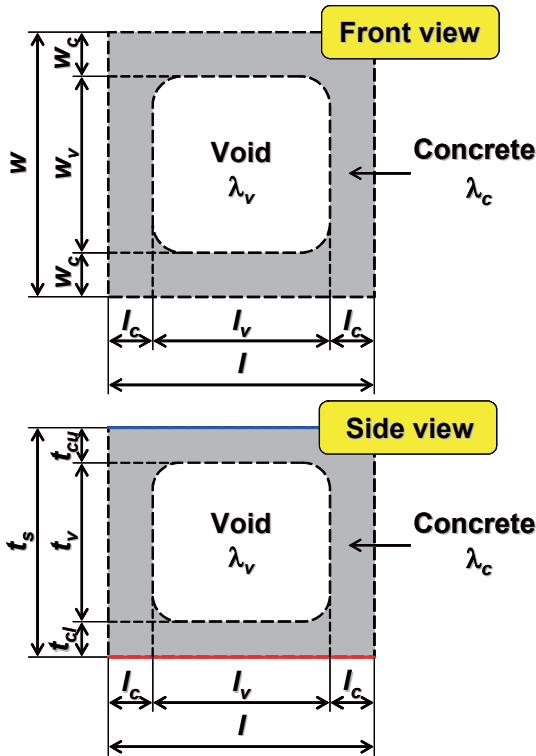


図 10 ボイドスラブ要素

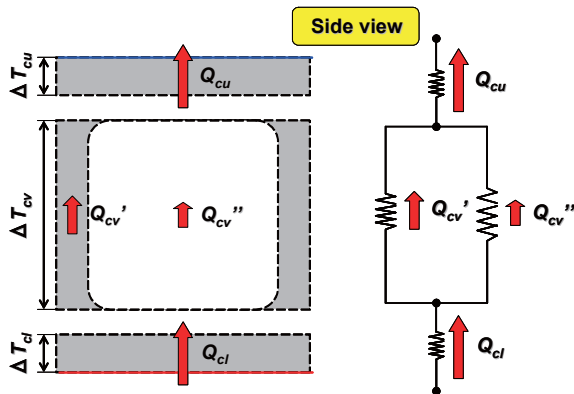


図 11 1次元多層平板モデル 1-D Model (1)

- w_v : 幅 [m]
- l_v : 長さ [m]
- t_v : 高さ [m]
- λ_v : 熱伝導率 [W/(m·K)]

図 11 に、ボイドスラブ要素を下面から加熱し上面を冷却した場合について、熱流に対して垂直な面で要素を分割した、1次元多層平板モデル 1-D Model (1) を示す。ここで、各記号の意味は下記の通りである。

- ΔT_{cl} : コンクリート下部での温度低下量 [°C]
- ΔT_{cv} : コンクリートとボイドの並列部での

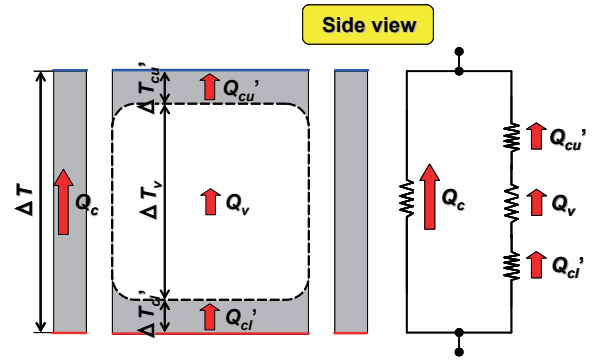


図 12 1次元多層平板モデル 1-D Model (2)

温度低下量 [°C]

ΔT_{cu} : コンクリート上部での温度低下量 [°C]

Q_{cl} : コンクリート下部を流れる熱量 [W]

Q_{cv}' : コンクリートとスラブの並列部のうちのコンクリート部を流れる熱量 [W]

Q_{cv}'' : コンクリートとスラブの並列部のうちのスラブ部を流れる熱量 [W]

Q_{cu} : コンクリート上部を流れる熱量 [W]

図から、このモデルの場合の有効熱伝導率 $\lambda_{eff,1}$ として次式が与えられる。

$$\lambda_{eff,1} = \lambda_c \frac{t_{cl} + t_v + t_{cu}}{t_{cl} + \left(\frac{w_v l_v}{1 - \frac{w_v l_v}{wl}} \right) + \frac{w_v l_v \cdot \lambda_v}{wl \lambda_c} + t_{cu}} \quad (1)$$

なお、中央のコンクリートとスラブの並列部におけるコンクリート部の熱抵抗を R_{cv}' [°C/W]、スラブ部の熱抵抗を R_{cv}'' [°C/W]とすると、これらの熱抵抗は次式で与えられる。

$$R_{cv}' = \frac{t_v}{\lambda_c (wl - w_v l_v)} \quad (2)$$

$$R_{cv}'' = \frac{t_v}{\lambda_v w_v l_v} \quad (3)$$

次に、ボイド部と比較して、熱抵抗が小さいコンクリート部により多くの熱が流れると考え、ボイドスラブ要素を熱流に平行に分割した1次元多層平板モデル 1-D Model (2) を図 12 に示す。ここで、各記号の意味は下記の通りである。

- ΔT : 周囲のコンクリート部での温度低下量 [°C]

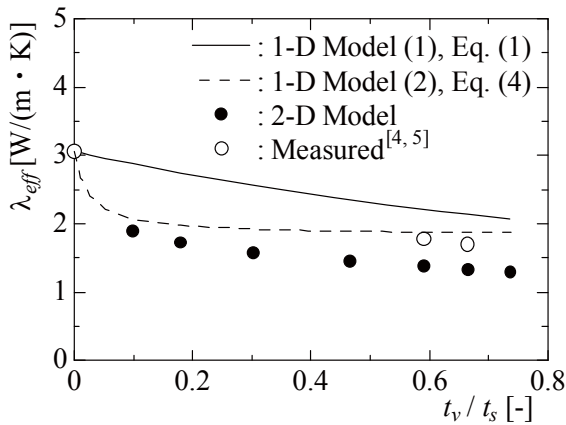


図 13 有効熱伝導率 λ_{eff} とコンクリート高さに対するボイド高さの比 t_s/t_v の関係

$\Delta T_{cl}'$: 中央のコンクリート下部での温度低下量 [°C]

ΔT_v : ボイド部での温度低下量 [°C]

$\Delta T_{cu}'$: 中央のコンクリート上部での温度低下量 [°C]

Q_c : 周囲のコンクリート部を流れる熱量 [W]

Q_{cl}' : 中央のコンクリート下部を流れる熱量 [W]

Q_v : ボイド部を流れる熱量 [W]

Q_{cu}' : 中央のコンクリート上部を流れる熱量 [W]

図から、このモデルの場合の有効熱伝導率 $\lambda_{eff,2}$ として次式が与えられる。

$$\lambda_{eff,2} = \lambda_c \left(1 - \frac{w_v l_v}{w l} \right) + \lambda_c \frac{w_v l_v}{w l} \cdot \frac{t_{cl} + t_v + t_{cu}}{t_{cl} + \frac{\lambda_c}{\lambda_v} t_v + t_{cu}} \quad (4)$$

さらに、ここでは、上記の 1 次元平板モデルのいずれが妥当であるかを評価するための補助的なモデルとして、図 10 の下図 (Side view) に関して、奥行きが無限大の 2 次元モデル 2-D Model を考え、熱回路網法により数値解析を行った。

3.2 解析結果とモデルの妥当性の検討

図 13 に、1 次元多層平板モデル 1-D Model (1) と 1-D Model (2) に基づく解析結果を、それぞれ、実線と破線で示した。また、2 次元モデル 2-D Model に基づく解析結果を記号●で示し、濱本ら[4, 5]の

測定結果を○で示した。ここで、縦軸が有効熱伝導率 λ_{eff} であり、横軸はコンクリートの高さ $t_s (= t_{cl} + t_v + t_{cu})$ に対するボイド高さ t_v の比である。また、コンクリートの熱伝導率 λ_c として濱本ら[4, 5]の測定結果 3.06 W/(m·K) を用い、ボイドの熱伝導率を 300 K におけるフォームポリスチレンの $\lambda_v = 0.071$ W/(m·K) [1] とし、その他の幾何寸法は $w = 0.3$ m, $w_c = 0.055$ m, $l = 0.3$ m, $l_c = 0.055$ m, $t_{cl} = 0.051$ m, $t_{cu} = 0.041$ m, $w_v = 0.19$ m, $l_v = 0.19$ m, $t_v = 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.133, 0.183, 0.258$ m とした。

図から明らかなように、コンクリートとボイドの熱伝導率比が $\lambda_c/\lambda_v = 3.06/0.071 \cong 43$ あるいは熱抵抗比が $R_{cv}'/R_{cv}'' \cong 0.016$ と大きく異なる熱抵抗が並列に含まれている場合には、1 次元多層平板モデル 1-D Model (2) のほうが妥当な結果を与え、ボイドスラブの有効熱伝導率の推算式として、式(4)が有効であることがわかる。

4. おわりに

ここでは、並列接続をもつ多層平板系の具体例としてボイドスラブを取りあげ、その有効熱伝導率の評価法について検討した。

並列に配列された物体間の熱伝導率あるいは熱抵抗比が大きく異なる系は、上記の例のほか、電子機器の積層基板や固体間の接触界面など、さまざまである。

今後、このような系に見られる並列接続を典型的なパターンに分類し、熱抵抗比をパラメータとした一般化を進めていく必要があり、現在、その手法について検討中である。

参考文献

- [1] 伝熱工学資料 改訂第 5 版, 日本機械学会 (2009).
- [2] 新編 熱物性ハンドブック [日本熱物性学会編], 養賢堂 (2008).
- [3] 熱伝導率・熱拡散率の制御と測定評価方法, サイエンス&テクノロジー(株) (2009).
- [4] 濱本ら, 第 44 回 日本伝熱シンポジウム講演集, I (2007) 256.
- [5] Y. Hamamoto et al., Proc. of the Asian Thermo-physical Properties Conf., (2007) Paper No. 013.
- [6] (株)ダイサン、ホームページ <http://daisun-web.com/>.

マックス・プランク(1858~1947)の功績

A meritorious deed of Max Planck (1858 - 1947)

花村 克悟 (東京工業大学)

Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: hanamura@mech.titech.ac.jp



マックス・プランク (1858~1947)

1. はじめに

19世紀末に鉄鋼業が盛んとなったドイツでは、鉱石から鉄を取り出すにあたり、コークスを燃料として、蒸気機関で送風する熱風高炉製鉄法が発明されました。このとき、鉄が溶けるような、当時としては高い温度を測定する温度計が無く、その色と温度の関係が詳しく研究されました。これがよく知られたプランクの法則につながり、さらには量子力学の幕開けとなりました。

当時、ウィーンの放射法則(図1)は、振動数 ν が高い可視光領域にはよく合うが、振動数が低い赤外域では合わない、一方、レイリー・ジーンズの放射法則(図2)は赤外域ではよく合うが振動数が高くなると破綻する。そこにプランクが登場し、エネルギーの最小単位を考え、その整数倍のエネルギー値のみ取りうる画期的な理論を発表しました。などといった劇画風の記述が多くみられます。しかしながら、実際にはそうではなく地味で着実、かつ厳密な学風のプランクにとって、取りうる整数倍のエネルギー値、といった考え方を受け入れるには躊躇したと伝えられています。こ

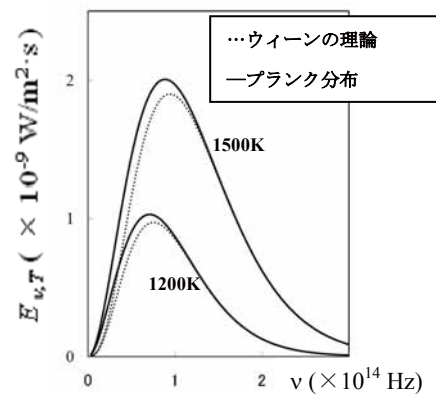


図1 ウィーンの放射法則

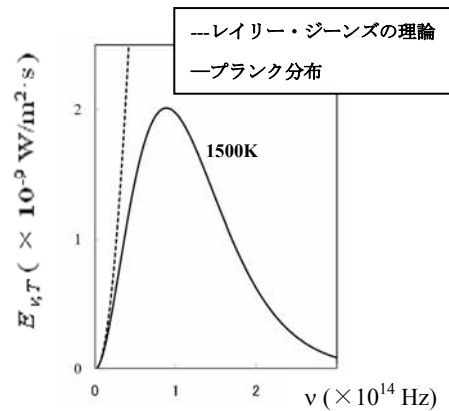


図2 レイリー・ジーンズの放射法

ここでは、そのプランクの法則の導出を顧みながら、その考え方に触れてみたい。

2. プランクの法則

2.1 内挿式の発表

1897年から1900年の3年間に考え抜いたプランクは、その10月に、熱放射の分布式が以下のように表わされるならば、全周波数領域において実験値ときわめてよく合うことを発表しました。それは飛び入り講演であったようです[1]。

$$E_{\nu,T} = \frac{av^3}{\exp(bv/T)-1} \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は定数です。この式の中で振動数 ν が大きい $\exp(bv/T) \gg 1$ 場合には分母の 1 を無視することで、ウィーン放射法則となります。一方、振動数が低い $\exp(bv/T) \ll 1$ 場合には $\exp(bv/T) = 1 + bv/T + \dots$ と展開すると、レイリー・ジーンズの放射法則となります。これが内挿公式と呼ばれている理由です。この導出過程は、一般的にはエネルギーの最小単位を $\epsilon = h\nu$ として理論が展開されています。しかしながら、最初からそういった考えが直観的に浮かんだわけではなく、試行錯誤の結果だったようです。また、内挿公式と後に名付けられたものの、レイリー・ジーンズの放射法則とはほぼ同時に発表されており、プランク自身、それらの論文を参考にすることなく、独自に導き出したとみられています。

2.2 プランク分布と色温度⁽²⁾

多くの教科書にあるように、絶対温度 T の黒体から、波長 λ と $\lambda+d\lambda$ の微小波長帯で放射される単色放射能 $E_{b,\lambda}$ は次式のように表現されます。

$$E_{b,\lambda} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} d\lambda \quad (2)$$

ここで、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 c_0 は真空中での光速です。式(2)で表される単色放射能と波長との関係、すなわちプランク分布を各絶対温度 T について図3に示します。いずれの温度の黒体においても単色放射能は波長が長くなるにつれ、連続的に一旦増大し、その後減少します。一方、波長を固定すると単色放射能は温度が高くなるにつれ単調に増加します。また、温度が高くなるとともに、波長の短いふく射（電磁波）が多く放射されることもわかります。

一般に物体を加熱した場合、530℃（≒800K）程度まではほとんど可視光を放射しないので暗闇の中でも赤熱を見ることができないが、その温度を超えてくると、図3からもわかるように、まず可視領域の波長の長い光を発するようになるため、図4に示されるように物体は暗赤色を帯びてきます。その後、温度の上昇とともに波長の短い可視光を発するようになる（図3）ため、図4のよう

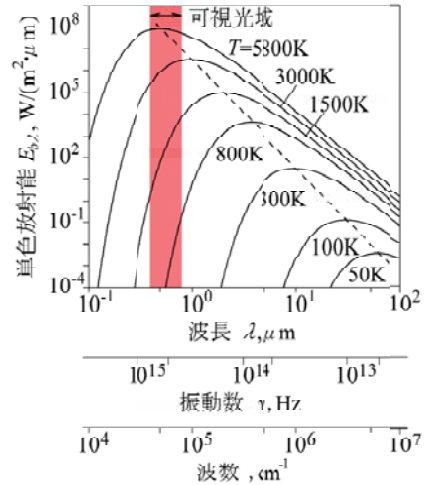


図3 プランク分布[2](単色放射能)

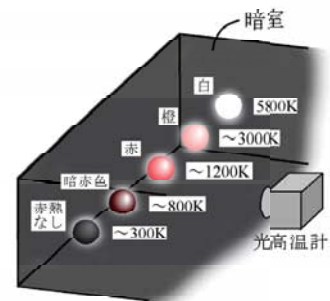


図4 暗室内での赤熱状態[2]

に漸次、赤色、橙色、黄色と変化し、高温になるにしたがい全ての可視領域の光が混じり合い、白みを帯びてきます。このように加熱された物体の色で温度を把握することができ、この原理を応用した光高温計も昔から使われています。むしろ、この研究がふく射の放射法則や量子力学につながっているのです。

2.3 プランクの法則の導出[2]

ここでは、エネルギーの最小単位が $h\nu$ で表せることがわかっている現代的な説明を試みましょう。

(a)ふく射におけるエネルギーの最小単位

振動数 ν の光は、分子や原子あるいは電子が高いエネルギー状態 E_i から低いエネルギー状態 E_j に移るとき、 $E_i - E_j = h\nu$ として放射されます。ここで h はプランク定数です。この $h\nu$ について考えます。ふく射を放射する分子や原子（振動子もしくは電気双極子、プランクは共鳴子としている）が持つエネルギー ϵ やそのエネルギーを持っている時間 τ を測定しようとする、その測定値には不

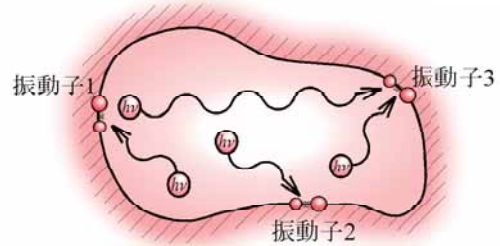
確定量 $\Delta\varepsilon$ と $\Delta\tau$ がともない、その積はプランク定数 h より小さくなりません。すなわち、 $\Delta\varepsilon\Delta\tau \geq h$ の関係があり、これをハイゼンベルグの不確定性原理といいます。この振動子の持つエネルギーを観測するための時間は少なくとも1波長分、すなわち $1/\nu$ (秒) を要します。よって、少なくとも $\Delta\tau \approx 1/\nu$ でなければなりません。したがって、 $\Delta\varepsilon \geq h\nu$ です。つまり、エネルギーを交換(吸収、および放射)する際のエネルギーの最小単位は $h\nu$ と記述できます。

(b)振動子のエネルギー吸収とエネルギー準位

次に基底状態にある分子や原子(振動子)に $h\nu$ のエネルギーを持つふく射があたかも粒子のように入射し、吸収されると、その分子の持つエネルギー(エネルギー準位)が $h\nu$ だけ大きくなります。したがって、図5に示すように、入射するエネルギーは $h\nu$ より小さくならないので、分子や原子(振動子)のエネルギー準位は連続的ではなくこのエネルギー準位は $h\nu$ の整数倍の離散的な値をとります。

(c)振動数 ν の振動子が持つ平均エネルギー

このような振動子(分子もしくは原子)が絶対温度 T の空洞内の壁面に無数に存在します。仮に図6に示すように3つの振動子で構成され、振動数 ν の最小エネルギー $h\nu$ が4個とします。各々の振動子のエネルギー準位は、基底状態もしくは $3h\nu$ や $2h\nu$ とランダムに変化します。4つの $h\nu$ 粒子が3つの振動子に分配される組み合わせは、表1に示すように、15通りです。ここで、1つの振動子が4つの $h\nu$ 粒子を持つ確率は15分の1、3つ持つ確率は15分の2などとなります。無数の振動子と $h\nu$ 粒子について考えると、1つの振動子が $h\nu$ のエネルギーを m 個持つ確率は $\exp(-m \cdot h\nu/kT)$ に



ふく射を放射・吸収する振動子が3つ、エネルギー $h\nu$ が4つの場合、4つの $h\nu$ 粒子をキャッチボールして熱平衡を保っている。

図6 空洞内の振動子間での $h\nu$ の吸収と放射[2]

表1 4つの最小エネルギー $h\nu$ が3つの振動子に分配される組合せ[2]

振動子	1	2	3
振動子	●●●●	●●●●	●●●●
15通りの分配組み合わせ	●●●●		
		●●●●	
			●●●●
	●●●●	●●	
	●●●●		●●
	●●	●●●●	
		●●●●	●●
	●●		●●●●
		●●	●●●●
	●●●●	●●●●	
	●●●●		●●●●
	●●●●	●●	●●
	●●	●●●●	●●
	●●	●●	●●●●

比例します。このように、1つの振動子のみが多くのエネルギーを持つことは起こりにくいことを表しています。したがって、熱平衡状態においてこれら一つ一つの振動子が平均的に持ちうるエネルギー $\bar{\varepsilon}$ はエネルギー準位が離散的であることから、それらの和として以下のように求められます。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{m=0}^{\infty} m \cdot h\nu \cdot e^{(-m \cdot h\nu/kT)}}{\sum_{m=0}^{\infty} e^{(-m \cdot h\nu/kT)}} \tag{3}$$

ここで、 $x = \exp(-h\nu/kT)$ とおくと、 $1+x+x^2+\dots=1/(1-x)$ 、 $1+2x+3x^2+\dots=1/(1-x)^2$ であるから、 $\bar{\varepsilon}$ は以下のようにになります。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT)-1} \tag{4}$$

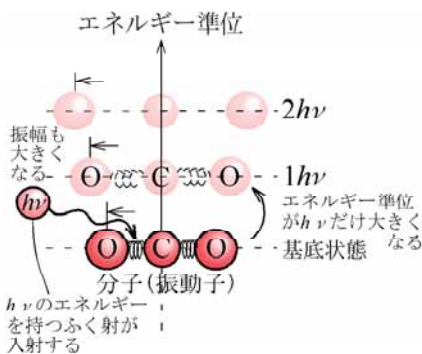


図5 $h\nu$ の吸収とエネルギー準位[2]

(d)平均エネルギー $\bar{\epsilon}$ を有する振動子の数密度

図7に示すように、1つの振動子から放射されたエネルギーが、もう1つの振動子に吸収されるためには、双方の振動子が、ふく射を波としたときの定在波の節であることが必要です。その条件は、任意形状の空洞の代表長さを L (空間体積を L^3) とすると、 $n = 2L/\lambda$ (n は整数) です。この条件を満たす振動子の数 $\Delta N(\nu)$ は、 n の x, y, z 成分を n_x, n_y, n_z とすると、 $n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$ を満たす (n_x, n_y, n_z) の組み合わせの数として求められます。この数は n の数値が大きいと仮定すると、ちょうど図8に示す n_x, n_y, n_z を座標とする内外半径が n と $n + dn$ の球殻の体積に等しい。ここで、 n_x, n_y, n_z が正の整数であることからその全球殻体積の1/8であり、また、電磁波には電界 E が y 軸と平行、および x 軸と平行な2種類が考えられることから、微小な球殻に含まれる振動子の総数 $\Delta N(\nu)$ は以下のように表されます。

$$\Delta N(\nu) = 2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 4\pi n^2 dn = \pi \left(\frac{2L\nu}{c} \right)^2 d \left(\frac{2L\nu}{c} \right) = \frac{8\pi L^3}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (5)$$

ここで、 $\lambda = c/\nu$ を用いています。また、その数密度 $n_o(\nu)d\nu$ は空間体積 L^3 で割ることにより以下のように表されます。

$$n_o(\nu)d\nu = \frac{\Delta N(\nu)}{L^3} = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (6)$$

(e)プランクの法則

振動数が ν と $\nu + d\nu$ の間にある定在波の数密度 $n_o(\nu)d\nu$ とその両端にある振動子1個が持つ平均エネルギー $\bar{\epsilon}$ との積が、絶対温度 T の平衡状態にある空洞内部において振動数 ν と $\nu + d\nu$ の間で放射される単色放射能となり、これが式(2)のプランクの法則です。なお、 $d\lambda = -(c_o/\nu^2)d\nu$ および $E_{\nu, \lambda} d\lambda = n_o(\nu)d\nu \cdot \bar{\epsilon}$ を利用しています。

3. プランクの考察と生涯

3.1 内挿式の考え方

キルヒホッフの法則は、1859~1860年にかけて発表されているが、その内容や重要性については十分把握されていないまま、ドイツの盛んな鉄鋼業を背景に、光高温計からふく射の放射法則に引き継がれることとなります。そして、1879年にはステファンが放射エネルギー量が絶対温度の4乗に比例するらしいことを発見しています。後にボルツマンが当時の電磁気学と熱力学を使って1884年に説明し、ステファン・ボルツマンの法則

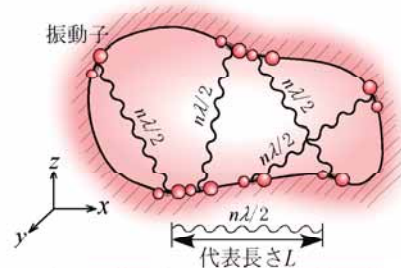


図7 振動子間の定在波の条件[2]

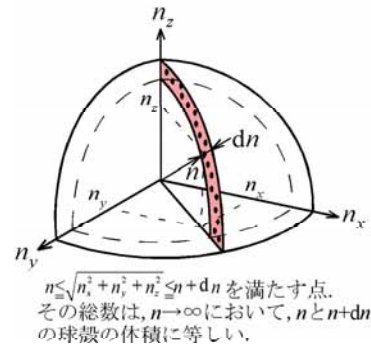


図8 定在波を満たす振動子の数[2]

として知られるようになりました。しかしながら、その後の他の研究者による追試がうまくいかず、しばらくの間、信頼されることはなかったようです。現在では、式(2)を波長全域にわたって積分することで導かれる、として説明されていますが、歴史的には順序は逆です。

マックス・プランクは1858年、キールに生まれました。少年時代、母親の影響から音楽、特にピアノ演奏に関しては特異な才能を示していましたが、音楽家を目指すことは無く、17歳でミュンヘン大学に進学しました。また、当時有名な法律家の父に影響され、物理と法律のどちらに進むか迷ったとの話もありますが、よくわかりません。専攻分野は数学であったが、次第に熱力学に傾倒していったようです。しかし当時の指導教官は、「物理には、もう大した問題は残っていない。電子と空洞放射ぐらいが残っているが、これも間もなく解決するだろう。あとは重箱のすみをつつくような仕事しかない。」と、いい放ったと伝えられています。プランクが熱力学分野に進むことに反対しました。皮肉な巡り合わせに思えます。このため、ベルリン大学に転校し、この分野の大家であるヘルムホルツやキルヒホッフに師事し、1879年学位を取得しました。その後、ミュンヘン大学講師(1880年)、キール大学教授(1885年)、ベルリン

大学教授(1892年)などを歴任しました。そして、1890年代後半にふく射の放射に関する問題に独自に取り組んだと考えられます。

プランクの考え方は、2.3節の $h\nu$ を直接導入したものではありません。当初は、むしろエネルギー値は連続的に取りえると考えていました。そして、“共鳴子”なるものを考え、全エネルギー E_i がこの N 個の共鳴子に分配されると考えました。しかし、取りうるエネルギー値が連続的であればその全エネルギーを N 個の共鳴子で分配する組合せ方は無限通りとなります。この無限通りの問題を回避するために便宜上、有限個の P 個の微小なエネルギーの粒に分けられると考えました。そして、計算後、 P を無限大に近づけることを考えたわけです。もうお気づきのようにこの P 個の微小なエネルギーの粒こそがのち後の $h\nu$ に他なりません。

さて、その組合せは2.3節(c)で解説しました。具体的には下記のような組合せとなります。

$$W = \frac{(P+N-1)!}{P!(N-1)!} \quad (7)$$

この組合せからエントロピー $S = k \ln(W)$ が求められます。

$$S = k \ln \left(\frac{(P+N-1)!}{P!(N-1)!} \right) \quad (8)$$

また、この組合せについては、 P も N も十分大きいと考え、さらに Stirling の公式により、第1次近似として以下のように書き換えられます。

$$S = k \ln \left(\frac{(P+N)^{N+P}}{P^P N^N} \right) \quad (9)$$

$$= k \{ (N+P) \ln(P+N) - P \ln P - N \ln N \} \quad (10)$$

$$= kN \left\{ \left(1 + \frac{P}{N}\right) \ln N \left(1 + \frac{P}{N}\right) - \frac{P}{N} \ln N \frac{P}{N} - \ln N \right\} \quad (11)$$

ここで、微小なエネルギーの粒を $\varepsilon = E_i/P$ とおいて、さらに、2.3節(c)で導入した平均エネルギー $\bar{\varepsilon} = E_i/N$ を用いると、

$$\frac{P}{N} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon} \quad (12)$$

となります。式(11)を変形すると、

$$= kN \left\{ \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) - \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \ln \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \right\} \quad (13)$$

となります。これを以下の熱力学の関係式

$$\left(\frac{\partial S}{\partial E_i} \right)_V = \left(\frac{\partial S}{N \partial \bar{\varepsilon}} \right)_V = \frac{1}{T} \quad (14)$$

に代入すると、

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{N \partial \bar{\varepsilon}} \right)_V = \frac{\partial}{\partial \bar{\varepsilon}} \left[k \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) - \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \ln \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon}\right) \right] \quad (15)$$

$$\therefore \frac{1}{T} = \frac{k}{\varepsilon} \ln \left(\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}} + 1 \right) \quad (16)$$

となる。したがって、共鳴子1個の平均エネルギーは、式(4)と同様な、以下の式に到達します。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\exp(\varepsilon/kT) - 1} \quad (17)$$

ここで、微小な粒のエネルギー ε は、無限通りの問題を回避するために導入されたものです。そこで、これをゼロに近づけるとどうなるでしょう。分母は $1 + \varepsilon/kT + \dots$ と展開できるので、結局レイリー・ジーンズの放射法則の式となります。この放射法則は、上記2.3節(d)で説明したような、密閉空間での定在波の数密度(6)式にエネルギー kT を掛けたものであり、エネルギー等分配則に基づいています。プランクとはまったく異なる考え方です。しかも、1900年に発表され、1905年に完成したものであり、この論文を見たうえでプランクが発表したわけではありません。したがって、プランクはこれをゼロに近づける意味がなく、これで正解であると判断しています。一方、ウィーンの放射法則の導出は難解であり、「空洞放射の源は加熱された気体分子であり、そのスペクトル分布は速度分布に依存している」といった飛躍した(現在では受け入れられていない)理論であるため、ほとんど掲載されていません。才気煥発なウィーンは、その当時のヒントと上記の独自の理論により、振動数と指数関数を巧みに使って、可視光域においてうまく合うように提案された(1896年)ものと考えられています。これらの式に比べれば、プランクの放射法則は、地味で堅実な学風のプランクならではの業績に思われ、前述した「プランクの内挿公式」ではありえず、「プランクの放射法則」として受け入れられるべきものでしょう。

3.2 量子論の父

さて、プランクは、しかしながら、この正解とした式の中で微小エネルギー ε の扱いに困惑して

いました。ウィーンの残した理論から ϵ は振動数と比例関係にあることとなります。その係数がすなわちプランク定数 h ですが、周波数 ν に共鳴する共鳴子が $h\nu$ の単位でしかエネルギーの受け取りをしない、といったことを、電気双極子まわりの電磁気学を厳密に学んできたプランクには受け入れがたい内容であったと思われまます。ですから、当時、この理論は、発表後も怪しげな理論としてしばらく受け入れられなかったようです。

この結果は、後にアインシュタインやボーアなどによって量子力学の基礎となります。この業績からプランクは、“量子論の父”として知られており、ノーベル物理学賞（1918年）の受賞対象となりました。さらに、1930年には、カイザー・ヴェルヘルム研究所の所長に就任しました。

しかし、第二次世界大戦中には、1943年、ベル

リン空襲によって家を失い、妻と共にエルベ河畔のローゲッツに疎開し、さらに、1944年には次男のエルヴィンが処刑され、自身も「国賊の父」とされるなど散々であったようです。

第二次世界大戦後、彼を記念してカイザー・ヴェルヘルム研究所は「マックス・プランク研究所」と改名されました。ご存じのように、マックス・プランク研究所は、現在も物理学研究の中心地として、様々な研究成果を挙げています。

参考文献

- [1] 熱輻射と量子 物理学古典論文叢書 物理学史研究刊行会編 東海大学出版会 (1976).
- [2] JSME テキストシリーズ 伝熱工学, 日本機械学会編, 丸善 (2005).

ミストサウナ入浴の7つの効用 ～皮膚表面の凝縮現象に起因する効用の連鎖～

*The Seven Benefits of Mist Sauna Bathing
that Originate from Condensation at the Skin Surface*

竹森 利和 (大阪ガス (株))

Toshikazu TAKEMORI (Osaka Gas Co., Ltd.)

e-mail: takemori@osakagas.co.jp

1. はじめに

家庭の浴室に手軽に設置できる健康志向の入浴機器として、ミストサウナ機能付き浴室暖房乾燥機（商品名「ミストカワック」）を2004年4月に発売した。商品の発売前から効用研究に着手し、発売時には「温まり・発汗効果」と「肌水分量の上昇」をプレスリリースした。以降、「鼻詰まりの緩和」「手足の冷え緩和」「目尻のしわ・目立つ毛穴の減少」などを含めて合計7つの効用を検証し、学会等で発表してきた。

本稿では、それらの7つの効用について紹介するとともに、それらの発現メカニズムについて伝熱工学的な解析をもとに考察する。

2. ミストサウナ

2.1 構造とミストの生成方式

図1に、ミストサウナ機能付き浴室暖房乾燥機の構造とミストの生成方式を示す。大別すると3方式あり、1) 高温水（約65℃）をノズルから噴霧する方式（ノズル噴霧式）、2) 高温水（約80℃）がチューブ内を流れる熱交換器の外表面に温水拡散パイプにより温水（約60℃）を滴下しファンで送風。気化を促進することで、高湿度の温風を生成する方式（気化式）、3) ノズル噴霧された温水が水破砕面に当たり、飛散した小粒径のミストを

温風で送り出す方式（水破砕式）である。

2.2 室温制御の目安とミストの粒径

いずれの方式においても、室温を上げるためには暖房機能が必要。サウナとして機能させるには、室温40℃、湿度80～100%が制御の目安である。

ミストの粒径は方式によって異なるが、概ね以下の通り。

<方式>	<ミスト粒径>
ノズル噴霧式	80～200 μm
気化式	数 μm
水破砕式	1 μm 以下

3. ミストサウナ入浴の7つの効用

3.1 目的

顧客にとっての価値すなわち効用は購買動機に直結する。ターゲット層の絞りこみと科学的な検証方法により、訴求力の強い効用開発を目指してきた。表1に、これまでに検証した7つの効用とターゲット層を示す。「女性」に始まり、「アレルギー鼻炎の人」や「肥満気味の男性、高齢者」などにターゲット層を広げてきた。

3.2 方法

対象となる効用によって計測項目の違い等はあるが、概ね以下の方法がとられた。

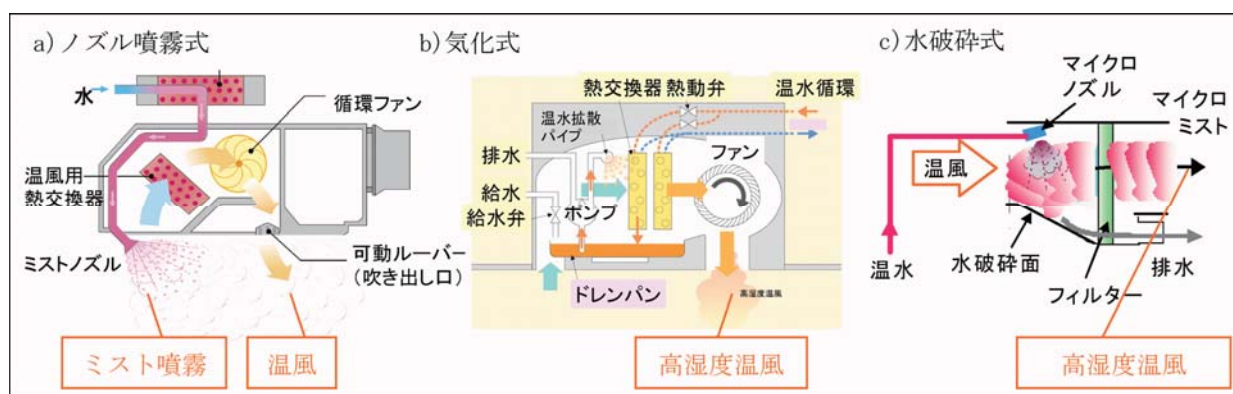


図1 ミストサウナ機能付き浴室暖房乾燥機の構造とミストの生成方式

表1 ミストサウナ入浴の7つの効用

効用	ターゲット顧客	分類
①温まり・発汗効果	女性・サウナ嫌いの人	健康
②肌水分量の増加		美肌
③手足の冷えの緩和	冷えを感じる女性	QOL改善
④鼻詰りの緩和	アレルギー性鼻炎の人	QOL改善
⑤しわ・目立つ毛穴の減少	女性(しわ:中老年、目立つ毛穴:若年)	美肌
⑥体重・腹囲の減少(メタボ予防)	肥満気味の人	健康
⑦暑熱馴化(熱中症対策)	中年男性・高齢者	安全

＜被験者群の構成＞

- ・ 通常入浴群 (8~10名) とミストサウナ群 (8~10名) の2つの被験者群を構成

＜入浴条件＞

- ・ 通常入浴: 湯温 40℃, 入浴時間 10分
- ・ ミストサウナ入浴: 室温 40℃, 湿度 80~100%, 入浴時間 10分

＜入浴実施と計測の場所＞

- ・ 1 回入浴の場合は, 当社の環境試験室 (室温 24℃, 湿度 50%に設定) において入浴し, 入浴中および前後で生理・心理計測を実施
- ・ 連浴の場合は, 自宅で入浴を実施. 連浴の前後に, 当社の環境試験室 (上述と同じ) に於いて, 生理・心理計測を実施 (⑦の暑熱馴化の場合のみ, 運動負荷実験を実施)

＜留意事項＞

- ・ 環境試験室での計測時は, 実験前日や当日の被験者の身体条件の統制 (睡眠, 食事, 午前中の活動制約) を実施

- ・ 自宅での連浴期間中は, 食事量や運動量を変えず, 激しい運動や海外旅行を控えること等に留意

3.3 結果

(1) 温まり・発汗効果

冬季に, 体が十分温まり適度な発汗を生じることが, サウナとしての必須機能. その効果は, 通常の入浴 (湯温 40℃, 入浴時間 10分) より強く, 安全上の理由で, 高温のドライサウナ (室温 80℃以上) より弱いことを想定した.

図2に, 温まり・発汗効果を示す. 同図 (左) に, 体温上昇 (舌下温) と発汗量 (厳密には, 体重減少量) を示す. ミストサウナ入浴時の体温上昇は通常入浴時の2倍以上あり, 発汗量もほぼ同様な傾向を示す. 同図 (右) の皮膚温分布 (サーモグラム) から, ミストサウナ入浴時では入浴後 20分経過後も, 手足の皮膚温が高いことがわかる.

これらの結果から, ミストサウナ入浴は通常入浴の約2倍 (体温上昇と発汗量から) の「温まり・発汗効果」があることがわかる.

(2) 肌水分量の増加

図3に, 肌水分量の増加率を示す. 肌水分量が高いと, 一般にカサカサ感などの肌感覚が改善され, 女性では「化粧ののりが良くなる」と言われ肌の美容・健康に重要な要件と考えられている. 図3に1回入浴時の肌水分量の増加率と1ヶ月連浴後の肌水分量の増加率^[1]を示す. 入浴後の肌水分量の増加率は, ミストサウナ入浴時は約40%であり, 通常入浴群の約10%と比べると, 格段に大きい. しかしながら, 入浴後の一時的な肌水分量の増加が美肌効果をもたらすかは不明. そこで1ヶ月連浴の前後で調査した. その結果, ミストサウナ連浴により, 平常時 (ミストサウナ入浴中

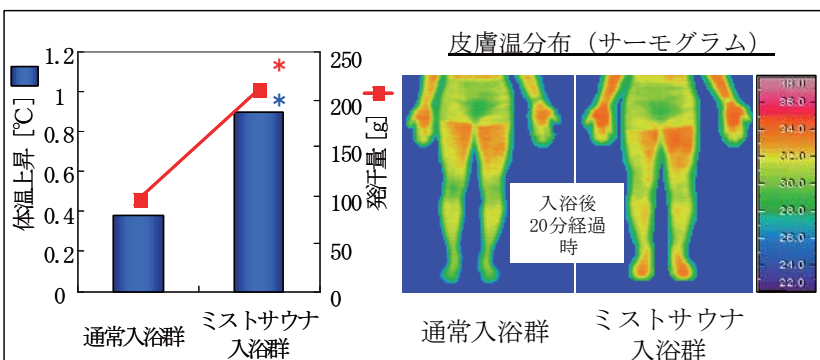


図2 発汗・温まり効果

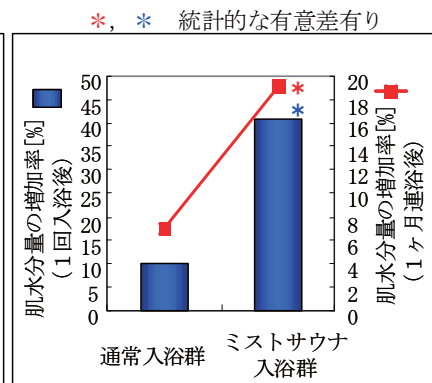


図3 肌水分量

および入浴後を除く時間帯)にも、肌水分量は約20%増加することがわかった。角質層の剥がれが減少し肌からの水分蒸散量が減少することが確認されており、このことが平常時の肌水分が増加した要因と考えられる。

(3) 鼻詰りの緩和^[2]

近年、花粉症などのアレルギー性鼻炎に悩む人の数は増加傾向にある。鼻詰まり症状の緩和は、日常生活の質や作業の生産性を向上させ、また就寝前は入眠を助ける。

図4に、入浴後30分経過時の鼻詰まり感覚の改善量と鼻腔の容積の増加量を示す。ミストサウナ入浴では、入浴直後から約40分経過後まで、通常入浴より、鼻詰まり感が改善された。そのことは鼻腔の容積増加によって裏付けられている。

メカニズムとして以下が考えられる。1) ミストが鼻内を加温・湿潤し、鼻粘膜の血流を改善した、2) ミストが鼻粘膜のホコリなど鼻づまりの原因となるものを洗浄した、3) 温熱効果により、自律神経系がより正常な状態に改善された。

(4) 手足の冷え緩和^[3]

冬は屋外の寒さで、夏は乗り物やビル・部屋の冷房で、体が冷える。手足の冷えで悩む女性は少なくない。

図5(左)に、手の温冷感と皮膚温の変化を示す。ミストサウナ入浴群では、皮膚温は約1.8℃上昇し、温冷感は1段階(「非常に寒い」～「非常に暑い」までの7段階尺度)改善された。一方、通常入浴群では、皮膚温の上昇は小さく、温冷感は改善されなかった。

図5(右)に、個人データを示す。同図中の肌色部が「皮膚温が上昇し、温冷感が改善された領域」であり、この領域のデータは、通常入浴では10人中3人、ミストサウナ入浴群では10人中8人だった。

域(冷えが緩和)」であり、この領域のデータは、通常入浴では10人中3人、ミストサウナ入浴群では10人中8人だった。

ミストサウナ入浴群において、手(指)の血流量の増加が確認されている。阻害されていた手の皮膚血管の拡張が促され、皮膚血管の活動性(拡張・収縮のしやすさ)を高めた可能性が考えられる。

(5) しわ・目立つ毛穴の減少^[4]

女性の90%以上がお肌の悩みを持つと言われ、50代女性の約70%は「しわ」が、20代女性の約60%は「目立つ毛穴」が大きな悩みとのデータがある。

図6に、目尻の小じわ(総面積)と目立つ毛穴の減少率を示す。1ヶ月のミストサウナ連浴により、目尻の小じわの総面積が約30%減少し、さらに、入浴中にフェースエクササイズを行なうと、ミストサウナ入浴群では目立つ毛穴の数が約7%減少した。図6(下)に、目尻の小じわと目立つ毛穴の計測例を示す。

「しわ」「目立つ毛穴」の原因は乾燥・紫外線などによる角質層の剥がれと言われる。ミストサウナ入浴により肌水分が増加し、角質層が整えられたことがこれらの減少に繋がったと考えられる。

(6) 体重・体脂肪・腹囲の減少^[5]

日本人の約2,000万人がメタボリックシンドローム(内蔵脂肪型肥満)とその予備軍と言われる。その予防には運動と食事制限が効果的だが、補助手段としてのミストサウナ入浴の効果を調べた。

図7(上)に、3ヶ月の連浴後の体重および腹囲の減少量を示す。ミストサウナ入浴群では、平均で体重は1.50kg、腹囲は2.84cm減少した。

図7(下)に、体重減少の要因についての考察

* , * 統計的有意差有り

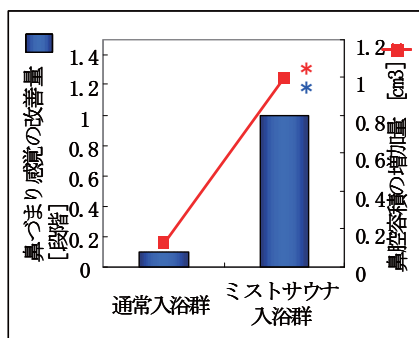


図4 鼻詰まりの緩和

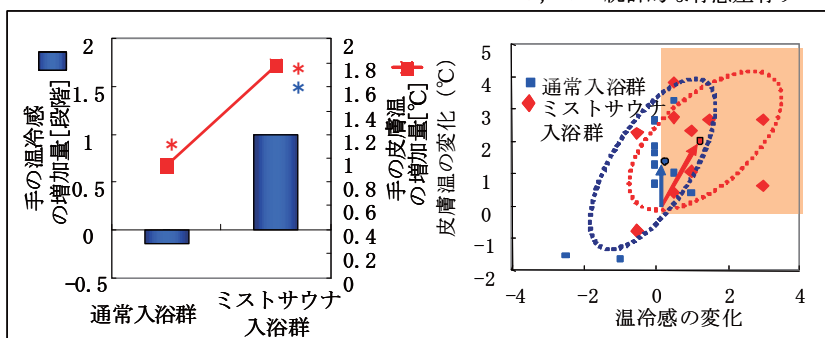


図5 手の温冷感と皮膚温の変化

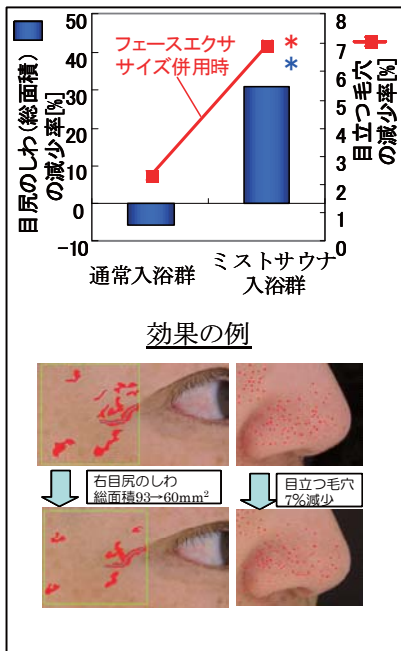


図6 目尻のしわ・目立つ毛穴の減少

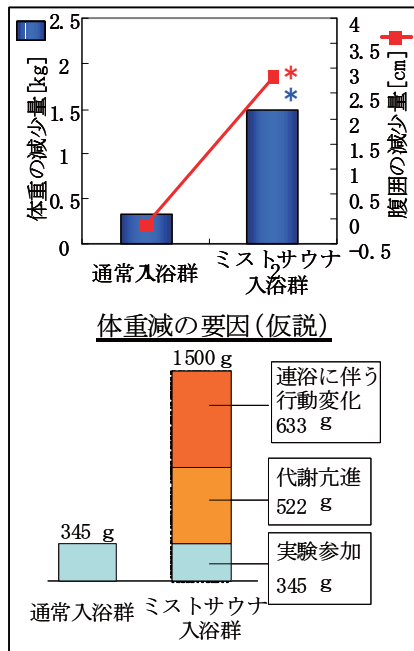


図7 体重・腹囲の減少

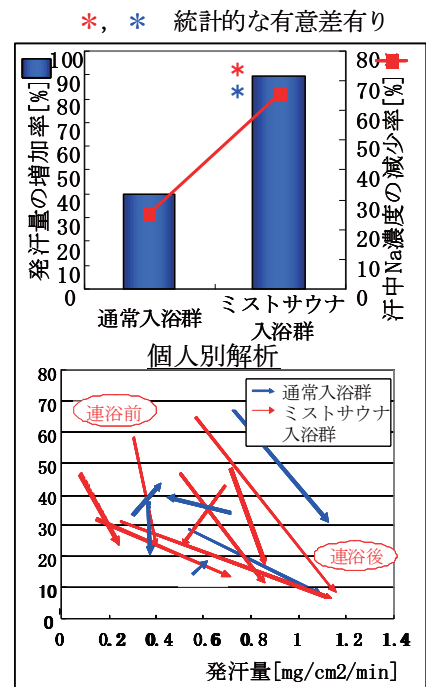


図8 暑熱馴化

を示す。代謝亢進に加えて、ミストサウナの連浴に伴う被験者の行動の変容等との複合的な要因があったと推測される。

(7) 暑熱馴化（熱中症予防）^[6]

地球温暖化やヒートアイランド現象、熱波の到来等により、熱中症による救急搬送者数は年々、増加傾向にある。

熱中症の予防対策の一つは「暑さに馴れる（暑熱馴化）」こと。暑熱馴化すると、発汗量がアップし汗の蒸発により体温上昇を抑制し、同時に、汗腺出口の導管による Na 再吸収機能が高くなり、汗中 Na 濃度の低下し Na の体外流出を抑制する。

図8（上）に、発汗量の増加率と汗中 Na 濃度の減少率を示す。3ヶ月間のミストサウナ連浴により、ミストサウナ入浴群では、発汗量は89.6%増加し、汗中 Na 濃度は65.7%減少した。図8（下）には、個人別に、連浴前後の発汗量と汗中 Na 濃度について調べた結果を示す。ミストサウナ入浴群では8人中7人が、連浴前の「発汗量が少なく汗中 Na 濃度が高い状態」から、連浴後には「発汗量が多く汗中 Na 濃度が低い状態」に移行することが確認された。

これらの結果から、ミストサウナ連浴により「暑熱馴化する」ことが示された。

4. 効用の発現メカニズム

4.1 温熱効果、保湿効果^[8]

ミストサウナ入浴（温度40℃、湿度100%）には、ドライサウナ入浴（温度70℃、湿度15%）に匹敵する「温熱効果」がある^[7]。何故、室温が低いのに大きい温熱効果があるのか？また何故、強い保湿効果があるのか？

そこで、これらの疑問に答えるために、当社が開発した人体熱モデル^[9]を用いて、ドライサウナ入浴時とミストサウナ入浴時の伝熱過程について調べた。

(1) 入浴時の伝熱過程

図9に、入浴1分後および10分後の人体の受熱成分（対流・輻射・蒸発/凝縮）と総受熱量を示す。

対流および輻射による受熱は室温と皮膚温の差に起因するため、ドライサウナ条件の輻射・対流による受熱量はミストサウナ条件より一桁大きく、10分経過後のそれらによる受熱量の減少割合も小さかった。湿度の低いドライサウナ条件では発汗が生じる前の入浴1分後では蒸発による放熱はなく、発汗量の増加に伴い蒸発による放熱が大きくなり、入浴10分後には約400Wもの放熱が生じた。一方、湿度100%のミスト条件では皮膚表面で凝縮が生じ、凝縮熱により人体が加温された。

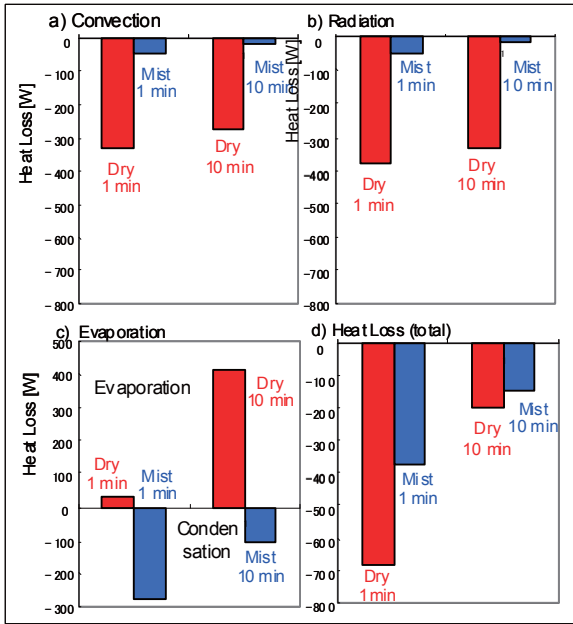


図9 輻射・対流・蒸発成分と総受熱量

総受熱量は入浴直後の1分後ではドライサウナ条件ではミストサウナ条件の1.81倍(688W/378W)だが、入浴10分後にはその差は1.41倍(200W/143W)に減少した。ドライサウナ条件では入浴3分後から発汗が生じ、蒸発潜熱による放熱が増加したためと考えられる。一方ミストサウナ条件でも同様に入浴3分後から発汗が生じたが、汗が蒸発しないため発汗が人体からの放熱に寄与しなかった(無効発汗)。

(2) 発現メカニズム

1) 温熱効果

ドライサウナ条件では、輻射・対流による受熱が大きいですが、発汗が始まると蒸発による放熱が増加し、過度の体温上昇を防ぐ。一方、ミストサウナ条件では、受熱量はドライサウナ条件の輻射と対流を加えた受熱量の半分以下であり小さいが、放熱経路がないという特徴がある。

したがって、ミストサウナ条件では、ドライサウナ条件と比較すると少量の受熱(凝縮熱)があるが、体内にすべて蓄積されるため、体温が上昇する。これがミストサウナ入浴で温まり・発汗効果が生じる理由と考えられる。

2) 肌水分量の増加

ミストサウナ条件下では皮膚表面に多量の凝縮水が発生し、皮膚を加温しながら加湿する。この凝縮による加温・加湿効果により、肌が膨潤し経皮の水分吸収率を上げ、肌水分の上昇をもたらしたと考えられる。

4.2 効用の連鎖(仮説)

図10に、効用の連鎖(仮説)を示す。元となる現象は、皮膚表面の凝縮等により生じる「温熱効果」「保湿効果」の2つである。

温まり効果は、1ヶ月連浴により、皮膚血管の活動性を改善し、皮膚温を上昇させ、手足の冷えを改善した。さらに、3ヶ月の連浴により、代謝亢進効果に被験者の行動変化による効果(飲水頻度の増加による食欲抑制等)が加わり、「体重・腹囲の減少」を、発汗機能を活性化することで「暑熱馴化」をもたらした。

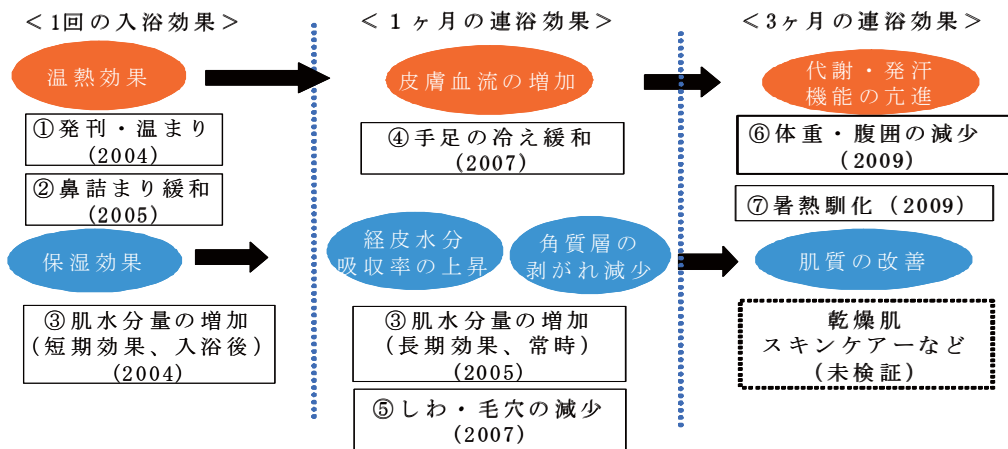


図10 効用の連鎖(仮説)

一方、保湿効果は、温熱効果との相乗効果により、経皮水分吸収率を上げ、角質層の剥がれを減らした。その結果、「平常時の肌水分量の増加」「目尻の小じわと目立つ毛穴の減少」をもたらした。さらに継続することで、乾燥肌やアトピー性皮膚炎の人のスキンケアに効果があるのではないかと考えている。

5. 終わりに

ミストサウナの様々な効用は、高湿度下での皮膚表面の凝縮現象により生じる「温熱効果」「保湿効果」に起因しており、ミストサウナ入浴の継続（「連浴」）により、美容・健康に関する様々な効用が連鎖的に表出したものと考えられる。

ミストサウナが普及し、その入浴法が日本人の入浴習慣として定着するには、数年～10年のオーダーの年月が必要と思われる。ハードの性能アップとともに、さらにターゲット層を広げ、訴求力の強い効用の検証が望まれる。今後も、ミストサウナを「美容や健康などに関する現代人の悩みを解決するツール」と位置づけ、効用研究に取り組みたい。

参考文献

- [1] MURAKAMI, M., The Efficacy of Daily Mist Bathing on Physiological Functions of Skin, Proceedings of The Third International Conference on Human-Environment System (ICHES'05), P-514
- [2] 保手浜勝ら, 鼻アレルギーに対するミストサウナの効果, 耳展 (2006), 49 巻補1号 37-40 頁.
- [3] 中原ら, ミストサウナの継続使用による手足の冷え緩和効果, 第 46 回日本生気象学会 (2007), P-4.
- [4] K,Nakahara, Effects of Mist Sauna Bathing and Face Exercise Combination on Skin Beauty, Proc. of Int. Biometeo.(2008), P-01.
- [5] 道広和美ら, ミストサウナ 3 ヶ月連浴の効用～体重・体脂肪率・腹囲の減少～, 第 30 回日本肥満学会抄録集, p.277
- [6] 竹森利和ら, ミストサウナの継続使用による暑熱馴化効果, 第 48 回日本生気象学会大会 (2009 年 10 月), 発表予定
- [7] 河原ゆう子ら, ドライサウナとミストサウナの生理的・心理的効果 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (2001 年 9 月), p827-828.
- [8] 竹森利和, ミストサウナ入浴時の伝熱過程と快適性, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2007(3), p297-298.
- [9] 竹森利和ら, 人体熱モデルの開発, 日本機械学会論文集, 61(1995), 584 B.

第7回アジア・太平洋燃焼会議報告

Report on the 7th Asia-Pacific Conference on Combustion

門脇 敏 (長岡技術科学大学)

Satoshi KADOWAKI (Nagaoka University of Technology)

e-mail: kadowaki@mech.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

第7回アジア・太平洋燃焼会議が、2009年5月24日(日)から27日(水)に亘り、台北(台湾)において開催された。今回が7回目となるこの会議は、1997年の大阪に始まり、その後、台南(台湾)、ソウル(韓国)、南京(中国)、アデレード(オーストラリア)、名古屋で開催されたものである。今回の会議では、これらの地域の燃焼研究者が一堂に会し、それぞれの研究成果を発表した。そして、活発な議論に花を咲かせた。

2. 会議の概要

今回の組織委員会のチェアマンは、国立台湾大学の馬小康(Hsiao-Kang Ma)教授であった。同国の燃焼学会理事長でもある馬教授を中心に、ローカルコミッティの方々が協力し、会議の運営に勤しんでいた。

会議は開会式の後、2件の基調講演(Plenary Lecture)と2件のエネルギー&燃焼に関する報告があった。その後、212件の一般講演、2件の基調講演、並びに5件の招待講演(Invited Lecture)があった。

開会式直後の基調講演は、ローレンスリヴァモア国立研究所(米国)のCharles K. Westbrook博士と、プリンストン大学のChung K. Law教授が行った。燃焼学会の国際組織(The Combustion Institute)の現会長でもあるWestbrook博士の講演は、高分子燃料に着目した詳細な化学動力学に関するもので、バイオマスなどの新燃料を利用する上での貴重な知見を含んでいた。また、燃焼のラージスケールシミュレーションの化学反応に関するLaw教授(燃焼学会元会長)の講演は、数値シミュレーションの実行における戦略を分かり易く解説したものであった。

エネルギー&燃焼に関する2件の報告の後、一般講演が開始された。講演件数が特に多かったセッションは、エンジン燃焼(Engine Combustion)40件、層流火炎(Laminar Flames)32件、乱流火

炎(Turbulent Flames)25件などであった。最近のエンジン技術の急速な発展に呼応して、エンジン燃焼の研究が盛んになっていることをうかがい知ることができる。これら以外で比較的講演件数が多かったセッションは、化学動力学(Chemical Kinetics)、超音速燃焼(Supersonic Combustion)、燃焼モデル(Combustion Modeling)、石炭燃焼(Coal Combustion)などであった。燃焼研究の傾向は、日本のそれと大きな差異はなかったが、全体としては基礎的な研究が多いとの印象を受けた。

会議三日目と四日目の朝には、シドニー大学のBrian S. Haynes教授(燃焼学会前会長)と東北大学の小林秀昭教授の基調講演が行われた。高圧燃焼に関する小林教授の講演は、高圧下における液滴燃焼や乱流燃焼の特性を明らかにしたものであり、多くの知見を有していた。今後の燃焼研究の方向性を示唆しており、多くの研究者が熱心に聞き入っていた。

一般講演に交じり、5件の招待講演が行われた。台湾のChao教授、韓国のKim教授、中国のQi教授とZhou教授、インドのPandey氏によるものであった。

以上、合計223件の講演があったが、その国別一覧を示したのが表1である。アジア・太平洋地域の国の現在の活力を示しているようで、興味深いものである。

表1 講演件数の国別一覧

アメリカ	4	台湾	38
イギリス	1	中国	37
イスラエル	1	ドイツ	1
イラン	3	日本	37
インド	51	香港	8
オーストラリア	7	ポーランド	1
カザフスタン	1	マレーシア	1
カナダ	1	ロシア	4
韓国	27	合計	223

会議の雰囲気を感じていただくために、会議における写真を掲載する。講演会場のロビー、レセプション会場、会議の旗を写したものである（写真 1～3）。なお、カメラを持参しなかった筆者が写真を掲載できるのは、東北大学助教の中村寿先生と大学院生の押部洋氏（丸田研究室）の協力によるものです。ここに記して御礼申し上げます。

3. 会議を終えて

最新の研究成果の発表や熱い議論がなされたことは、この会議の活性を物語っており、今後の更なる発展が期待される。しかし、ある一部の国の多くの研究者が講演をキャンセルし、会議の運営に大きな不都合が生じてしまった。講演の当日キャンセルは、どの会議でも問題となっているが、更なる対策が必要と思われる。

会議終了後、故宮博物院を訪ねた（写真 4：岡山大学助教の坪井和也先生の撮影）。沢山のお宝が詰まった博物館であった。



写真 3 会議の旗



写真 1 講演会場のロビー



写真 2 レセプション会場



写真 4 故宮博物院にて筆者

第 20 回輸送現象に関する国際シンポジウム

*The 20th International Symposium
on Transport Phenomena - 2009*

一宮 浩市 (山梨大学)

Koichi ICHIMIYA (University of Yamanashi)

1. まえがき

第 20 回輸送現象に関する国際シンポジウム (ISTP-20) は 2009 年 7 月 7 日から 10 日までカナダ, ブリテイッシュ・コロンビア州ビクトリアのホテル・デルタ・ビクトリア・オーションポイントリゾート・スパで開催された。開催前は世界的な新型インフルエンザの流行で心配されたが滞ることなく行われた。ビクトリアは 2002 年第 13 回にも実施されている。今回のシンポジウムには 23 ヶ国から 200 人以上が出席し、活発に情報交換が行われた。前回第 19 回はアイスランドのレイキャビックで開催され日本人も多かったようだが今回はヨーロッパでの会議が重なったためか幾分か少なく感じられた。それでも出席者の約 1 割強を占めていた。会議の最終日は天皇・皇后両陛下がビクトリアを訪問される日となった。

2. 開会式

魚の鮭のシンボルマークのもと ISTP-20 の組織委員長であるビクトリア大学の Ned Djilali 教授が歓迎の挨拶を行った後、熱流体工学太平洋センターから代表してミシガン大学の W.J.Yang 教授が

これまでの経緯を説明されつつ挨拶をされた。その様子が写真 1 に示されている。その会場での 1 スナップを写真 2 に示す。

3. 講演発表

各テーマ別に 5 室に分かれて発表が行われた。

発表された分野と件数を表 1 にまとめた。1 発表でも各分野にまたがっているものもあったが主催者側の判断で分類された。それによると基礎的な熱・質量伝達が最も多く、流体関係がそれに続く。最近のエネルギー・環境関係のトピックスである燃料電池関係が多いのが今回の特徴である。これは多孔性物質内の輸送現象にもまたがっている。サイズの的にはマイクロ・ナノ輸送が物性とも関連し多いのが最近の特徴である。さらに燃焼・化学反応と続く。件数は少ないものの、計測、可視化・画像技術は現象の確証を得る上で重要なテーマである。さらに応用的な分野が続いている。このように見ると現象の基礎分野と応用分野が色濃く分かれていた。全部で 168 件であった。

場所をビクトリア大学のクラブハウスの庭に変えてバンケットを行う前にポスターセッション



写真 1 開会式



写真 2 右より, Kim 教授(韓国), Nauri 教授(イラン), Yang 教授(米国), 石塚教授(富山県立大), 筆者

表1 講演分野と件数

分野	件数
熱・質量伝達	36
実験・計算流体力学	28
燃料電池	22
マイクロ・ナノ輸送	19
多相系輸送	12
多孔性物質	10
燃焼・反応流体	8
乱流不安定	8
バイオ熱流体	6
熱交換器	4
可視化・画像技術	3
環境・生産過程	3
電子機器冷却	3
エネルギー変換・化学過程	3
一般輸送現象	3

(41件)が実施された。分野で分けることなく自由に配置されパネルの前で自由にディスカッションが行われた。内訳を見ると熱・物質移動が9件、燃料電池8件、流体関係が合わせて12件、伝熱実験3件、燃焼3件、多孔性物質2件、材料、環境、冷凍、コジェネレーション各1件となっている。

全体として出席者の約9割が大学関係者で、その他メーカー、研究施設などから出席されており活発に質問、ロビー交歓が行われていた。部屋によっては円卓がありグループで議論が行われた。本シンポジウムは毎年開催されており、再会してコーヒー片手に進展状況を気軽に話し合っている風景もあちこちで見られた。これがこのシンポジウムの特徴のひとつでもある。

4. バンケット

ホテルからバスで移動して木々に囲まれたビク

トリア大学のクラブハウスで行われた。大学としてはそれほど大きくはないものの緑に囲まれマイナスイオンに満ちていた。バンケットはわからない間に始まりシンポジウム準備の功労者やサポートしている方々の表彰が行われた。地元学生には受けているようであった。バイキング方式で好きなものをもって食事が行われたがバンケットにしては狭い感じは否めないようであった。

5. ビクトリア

バンクーバーから飛行機あるいはフェリーで行き来できる観光の町である。シンポジウムの前半は曇りあるいは雨で肌寒い感じでしたが、後半は快晴で日差しも強く紫外線を強く感じた。町としては治安もよく日本人も多く住んでおられる様子でした。緯度が高く日中の時間が長いので夕食をしてから屋外に出られ活動される方が多いようです。会議終了後、ブッチャーガーデンやクルージング等に出かける方も多かったようです。

6. あとがき

大きな滞りもなく無事終了したことはビクトリア大学を中心とした地元の関係者の協力のおかげであった。第13回のときはダウンタウンにあるコンフェレンスセンターで行われ部屋がまとまっていたので移動はスムーズであった。今回はホテルであったので移動は少し混んでいたが、コーヒブレイクの内容は良かったように思われた。本シンポジウムは毎年行われているので次回に向けて準備をされておられる方もいることでしょう。

次回の第21回は台湾の高雄で開催されることになっている。そのためか今回台湾からの参加者も多くしきりに宣伝をしていた。日本からも近いのでアジア地域の参加者が多くなるのではないでしょう。次回での再会を期待しましょう。

「キッズ・エネルギー・シンポジウム 2009」報告

Report on Kids Energy Symposium 2009

桃木 悟 (長崎大学)

Satoru MOMOKI (Nagasaki University)

e-mail: momoki@nagasaki-u.ac.jp

1. はじめに

2009年度のキッズ・エネルギー・シンポジウムを8月22日(土)に長崎市科学館にて開催した。400名以上の親子が参加し、大盛況のうちにシンポジウムを終える事ができた。

昨年5月の伝熱シンポジウムの会場にて、当時の森九州支部担当理事と九州地区で二度目の開催になる2009年度のキッズ・エネルギー・シンポジウムについて検討を開始した。最初に、長崎大学教育学部や同大エネルギー研究会が中心となって開催している小学生向けの科学教育のイベントに主体的に参加を続けている長崎大学教育学部の藤本登、同工学部の山口朝彦の両准教授を中心として実施する事を決定した。異例ではあったが、シンポジウム実行委員長は藤本准教授とした。伝熱学会主催の行事である当シンポジウムに教育学部ならではの手法や感性を自由に取り込んでもらうためである。シンポジウムの大まかな方針を決め、それに沿って他の実行委員を選定した。九州地区で、発電システム、水素利用機器、エネルギーや温度に係る計測技術、冷凍システム等の分野での子ども向けの企画をまかせる事ができる人物として前述の長崎大学の2人に加え、佐賀大学の宮良明男、有馬博史、椿耕太郎、福岡大学の高雷、九州大学の濱本芳徳、伊藤衡平、北九州市立大の井上浩一の7人(敬称略)に委員就任をお願いし、それぞれ企画の提案と実施を担当してもらった。最終的に、森英夫前支部担当理事と私、今期の富村寿夫九州支部担当理事を加えて、キッズ・エネルギー・シンポジウム2009実行委員会を構成した。

2. 開催準備およびプログラム概要

今年度のシンポジウムは、「エネルギーって何だろう! ~ 疑問スッキリ、未来ばっちり! ~」をキャッチフレーズに、小学生とその保護者を対象とする事を決めた。これまでのキッズ・エネ

ルギー・シンポジウムでは、中学生までを対象にしている事が多かったようだが、部活等のために中学生はこの種のイベントには殆ど参加しない事や対象年齢をある程度絞ったほうがより有効な企画が実施しやすい事等を勘案して、小学生のみを対象とした。シンポジウムの運営形式は、より多くの人の参加を期すため、参加者数に制限を設けずに長崎市科学館を訪問した誰もが自由に参加できる形式とした。シンポジウムの広報活動として、会場である長崎市科学館が毎月発行している広報誌(市内の全児童・生徒に配布)一スターシップニュースに案内記事ととともに、A4サイズの広告チラシを作成して、教育委員会の協力の下、近郊の公立小学校(84校)の全児童(約2.7万人)にそれを配布した。なお、長崎では原爆の日の8月9日及びシンポジウム前日の8月21日が登校日であり、そこで配布してもらう事ができたのだが、これが非常に効果的だったようである。

表1にプログラムの概要を示す。シンポジウムのオープニングでは、参加者全員を一室に集めて実験実演を伴う講義「親子わくわくECOサイエンス」を実施した。太陽系→地球→人類の誕生→快適な生活→エネルギーの順に話が進み、蒸気機関の基本原理解にかけない気液の相変化によって生じる様々な現象を、水、空気、液体窒素、ヘリウム、一斗缶、風船を駆使して実演した。余談であるが、デュア瓶内の液体窒素により風船内の空気のおよそ半分が急速に凝縮してしまう現象を見て、そこで起きている伝熱現象について、一瞬、考えこんでしまった。液体窒素が大気圧である事、膨らんでいる風船内の窒素は大気圧よりも高圧である事を考えると、両者に温度差が確保されるのは自明なのだが、恥ずかしながら最初に見た時は不思議であった。

子どもたちの好奇心を刺激した後は、体験ブースでそれぞれ独立して実施される6種類の実験や

表1 プログラムの概要

10:00～10:45	親子わくわく ECO サイエンス (藤本登・長崎大)
10:50～15:30	体験ブース 1. 「水素って何だろう？」 (伊藤衡平・九大) 2. 「電気エネルギーに変える色々な方法」 (藤本登・長崎大, 有馬博史・佐賀大) 3. 「未来のエンジン！」 (井上浩一・北九大) 4. 「冷蔵庫って、なぜ冷えるの？」 (山口朝彦・長崎大) 5. 「熱と光の不思議な関係？」 (濱本芳徳・九大) 6. 「ものづくり体験コーナー」 (高雷・福岡大, 椿耕太郎・佐賀大)
11:00～15:30	疑問スッキリ, 未来ばっちり! (森英夫・九大, 富村寿夫・熊本大, 宮良明男・佐賀大, 桃木悟・長崎大)

実習に自由に参加してもらおうようにした。「電気エネルギーに変える色々な方法」では、模型のレーシングカーを動かすための電気を自転車型の人力発電機で発電させ、日頃使っている電気を作るのに必要なエネルギーを体感したり、実際に水を沸騰させて得られた水蒸気ので発電するところを見てもらった。「未来のエンジン」ではスターリングエンジンをお湯で駆動して、熱エネルギーから動力が得られる事を目の当たりにしてもらった。次世代のエネルギーキャリアとして期待される水素について説明する「水素って何だろう」では、ピンポン玉を用いた水素分子の説明に始まり、太陽電池、水の電気分解装置、燃料電池を搭載した模型自動車を電球の光で動かしてみせた。以上が、発電や動力を得るための装置をテーマにしたコーナーである。消費側に目を向けたテーマである「冷蔵庫はどうして冷えるの」では、自転車タイヤ加圧用ポンプを用いた自家製空気サイクル冷凍機を駆動して、(労力に対して僅かではあるが)空気の温度が低下する事を体験してもらった。また、「熱と光の不思議な関係」では、サーモグラフィを用いる事で体温が計測できる事を示し、クールビズ姿の学生とスーツネクタイ姿の学生ではどちらの体温が低いかを計測してみせた。また、参加した子どもの顔をサーモグラフィで撮影した写真や、

紙面上に氷水で絵を描かせたものを撮影してできた芸術作品(!?)を、カラープリンターで印刷し、おみやげに持ち帰ってもらった。理屈はわかっていても、それを実現するための装置を作れなければ意味が無い。「ものづくり体験コーナー」では、ペルチェ素子を用いた低温度差発電模型や紙製風力発電機等を実際に作ってもらった。

「将を射んと欲すれば先ず馬を射よ」という事で、体験ブースと並行して、保護者からの質問に答えるコーナー「疑問スッキリ, 未来ばっちり!」を企画した。このコーナーは、シンポジウムで実施している実験に関する疑問やエネルギー全般に関する疑問が保護者から寄せられれば、それにできる範囲で回答し、参加者の数が増えたところで、適宜、10～15分程度のエネルギーに関するミニ講義を実施しようという企画である。

3. シンポジウム当日の様子

当日会場の様子を末尾の図1～10に示す。シンポジウムは自由参加形式で実施したが、イベント保険の都合もあり、各参加者には受付にて氏名を記入してもらった。正確な参加者数は把握していないが、受付名簿には395名分が記入されていた。なお、500部作成したテキストが50部しか残らなかった事、会場内ではテキストを持っていない参加者の姿が数多く見受けられた事から、会場で対応した各講師の印象では、500名以上の参加があったように感じている。体験ブースはどのコーナーも大盛況で、担当の講師やアルバイトの学生は休む間もなく子どもたちと接していた。用意した企画はいずれも親子そろって楽しんでもらったようで、参加した子どもや父兄からは非常に好意的な印象を受けた。実行委員会では、シンポジウムは成功であったと自負している。

最初に想定した人数を大きく越えた参加者があったため、ものづくりコーナー等の材料を要する企画の一部は、終了予定時刻よりも1時間以上早く終了せざるを得なくなるほどであった。嬉しい悲鳴なのだが、企画終了を聞いた子どもたちの残念そうな顔を目のあたりにした講師からは、もう少し余裕を持って準備にあたるべきだったとの反省意見が挙がっている。今回新たに保護者向けに企画した「疑問すっきり! 未来ばっちり!」のコーナーは、片手で足りる程度の参加者しかなく、

残念ながら企画倒れとなってしまった。保護者用の休憩室を提供する意図も込めて体験ブースとは離れた場所を用意したのだが、これが失敗であった。体験ブースでは、様々な質問を受けており、そこの一角で実施すべきであった。

4. シンポジウムを終えて

教育学部の藤本准教授や教育学部からアルバイトとして参加した学生たちの子どもたちへの接し方や質問への応対は、スムーズで感心させられた。個人的な印象であるが、説明すべきポイントを絞って細かい部分は切り捨て、子どもたちに最後まで聞かせる事に重点を置いているように感じた。一方、他のメンバーは、全てを正確に伝えようとする傾向にあり、聞いている子どもたちが疲れてついていけない事が何度かあったようである。このシンポジウムの目的を考えたとき、今回のように、教育学部からも参加してもらった事は非常に効果的であったと思う。教育委員会の利用やキャッチフレーズの端々に表れるアイデア等、集客の面でもその効果は絶大であった。一方で、工学的な考え方に慣れていないせいか、「厳密性」や「数量」について殆ど注意を払っていないように感じられた。この部分については今後、改善すべき課題であろう。技術が時代とともに進化し、修得すべき知識や技能の量は増える一方であるため、工学教育の重要性はますます増加している。今回の藤本実行委員長のように、工学研究者としての素養を持ちながら教育学の分野でアクティブに活動する人が増えると、社会が持つ工学教育の能力は向上するはずである。伝熱学会や他の工学関連の学会から、教育学の分野へ人的な貢献を増やすとともに工学的な観点からの適切な要求を行っていく事が、今後ますます重要になるのではないかと、シンポジウムを終えて改めて感じた次第である。

現在、親子向けの科学実験イベントがブームであると聞いている。この手のイベントの多くは理科教育の観点で内容が構成されている事が多いが、本シンポジウムは伝熱学会が主催で実施するイベントであるため、エネルギーの本質やそれに関連する機器や技術について興味を持ってもらう事を目的としてテーマや内容を決定している。そのため、会場で準備・運営から片付けまでをお手伝い頂いた長崎市科学館のスタッフや、教育学部主催

の科学イベントに何度か参加した経験のある教育学部の学生たちからは、“いつもの実験”とは全く違った内容のものが実施されていて興味深かったとの声がかかれた。伝熱学会がこのようなイベントを実施する事には確固たる意義がある事をあらためて確認した。

今回のシンポジウムを通して、エネルギーに興味を持ってそれに関する分野に進む事を希望する子どもたちが僅かでも増えてくれる事を、実行委員一同、強く願っている。最後に、シンポジウムの運営にあたりアルバイトとして手伝っていただいた学生諸君、会場ではこちらの不備をことごとくフォローして頂いた長崎市科学館のスタッフに、また事前に冊子の原稿に小学4年生対応の文章化や漢字のルビ振りを手伝ってくださった教育学部関係者に感謝申しあげる。



図1. 親子わくわく ECO サイエンス
～ 地球について知ろう ～



図2. 親子わくわく ECO サイエンス
～ 実験開始直前 ～



図3. これが燃料電池だ！



図7. 人力冷凍機（ただし体育会系専用）



図4. 自分の力で電気をつくる！



図8. サーモグラフィで芸術だ！

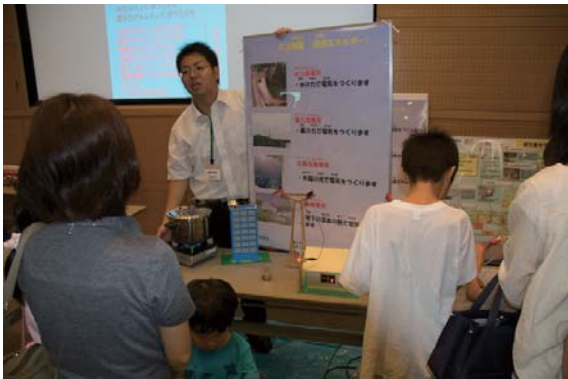


図5. 圧力釜から吹き出る蒸気で発電



図9. 紙製風力発電機を作ろう



図6. 未来のエンジンだよ



図10. 実行委員とアルバイト学生～お疲れさま

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
2010年					
5月	26(水) ～28(金)	第47回日本伝熱シンポジウム			

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					
9月	2(水) ～4(金)	日本流体力学会 2009 (開催場所：東洋大学白山キャンパス)	2009.5.17	2009.7.17	日本流体力学会年会 2009 実行委員会 e-mail: nenkai2009@nagare.or.jp
9月	17(木) ～18(金)	日本機械学会関西支部 第303回講習会「新エネルギーシステムのフロンティア技術を学ぶ」 ～燃料電池・太陽電池・2次電池の動向と最新技術 (開催地：大阪市)	2009.9.11		http://www.kansai.jsme.or.jp/
9月	26(土) ～27(日)	2009年度計算力学技術者(固体力学分野の有限要素法解析技術者)ならびに計算力学技術者(熱流体分野の解析技術者)に関する認定事業			
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 E-mail: murase@inss.co.jp Web: http://www.nureth13.org/
10月	7(水) ～9(金)	15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (開催地：Leuven, Belgium)	2009.4.30		http://cmp.imag.fr/conferences/thermic/thermic2009
10月	21(水) ～23(金)	2009年度日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所：中央大学駿河台記念館)			http://www.jsrae.or.jp/nenjitaikai/J/index.html
10月	28(水) ～30(金)	第30回日本熱物性シンポジウム (開催地：米沢市)	2009.6.30	2009.8.25	第30回日本熱物性シンポジウム実行委員会 (委員長 高橋一郎) 〒992-8510 米沢市城南 4-3-18 山形大学工学部 Tel: 0238-26-3236 e-mail: it@yz.yamagata-u.ac.jp
11月	4(水) ～6(金)	The 9th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2009) (開催地：仙台市)			
11月	5(木)	シンポジウム「機械工学の展望：21世紀の役割と貢献」 (開催地：東京都港区)			北村隆行 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学副学長・教授 大学院工学研究科機械理工学専攻 Tel: 075-753-5214 Fax: 075-753-5214 E-mail: kitamura@kues.kyoto-u.ac.jp
11月	6(金)	第12回スターリングサイクルシンポジウム (開催地：東京都大田区)	2009.6.12	2009.9.25	納富 信 (幹事) TEL&TAX: 0495-24-5938 e-mail: nohtomi@waseda.jp
11月	6(金)	ステップアップセミナー2009「わが国企業・技術者・学生のための戦略的技術経営Ⅳ ～技術立国日本のものづくり技術戦略～」 (開催地：大阪市)		2009.10.30	http://www.kansai.jsme.or.jp/
11月	7(土) ～8(日)	熱工学コンファレンス 2009 (開催場所：山口大学常盤キャンパス)	2009.7.14	2009.9.30	2009年熱工学コンファレンス実行委員会事務局 (委員長 加藤泰生) 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院理工学研究科機械理工学専攻 応用熱工学研究室 TEL: 0836-85-9107, FAX: 0836-85-9101 http://www.jsme.or.jp/conference/tedconf09/

行事カレンダー

11月	16(月) ～19(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) E-mail: chtai@mail.npust.edu.tw Web: http://www.tuat.ac.jp/%7Epcfte/	
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 E-mail: matumoto@kansai-u.ac.jp	
11月	28(土) ～29(日)	第33回人間-生活環境系シンポジウム (開催場所: 福岡女子大学)	2009.8.31	2009.10.16	大中忠勝 (福岡女子大学) FAX: 092-683-1924 E-mail: ohnaka@fwu.ac.jp http://www.jhes-jp.com/jp/	
12月	2(水) ～4(金)	第47回燃焼シンポジウム (開催地: 札幌市)	2009.7.17	2009.9.18	日本燃焼学会事務局 〒166-8532 東京都 杉並区 和田 3-30-22 大学生協学会支援センター 内 Tel: 03-5307-1172, Fax: 03-5307-1196 E-mail: office@combustionsociety.jp http://www.combustionsociety.jp/sympo47/	
12月	5(土)	日本混相流学会 レクチャーシリーズ 35 「マイクロ・ナノバブルの特性とその応用」 (開催場所: 関西大学工学部)	2009.11.20		レクチャーシリーズ運営委員会事務局 (田中敏嗣, 川口寿裕) Tel&Fax: 06-6879-7316 E-mail: lecture-ser@mech.eng.osaka-u.ac.jp http://www.jsmf.gr.jp/schedule.htm	
12月	16(水) ～18(金)	第23回数値流体力学シンポジウム (開催地: 仙台市)	2009.9.12	2009.10.19	シンポジウム実行委員会事務局 佐野 健太郎 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学大学院情報科学研究科 Fax: 022-795-4541 E-mail: cfd2009@caero.mech.tohoku.ac.jp http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd23/	
12月	17(木) ～18(金)	第18回微粒化シンポジウム (開催場所: 九州大学医学部)	2009.10.9	2009.11.13	http://www.ilass-japan.gr.jp	
2010年						
1月	21(木) ～22(金)	GTSJ ガスタービンセミナー(第38回) (開催地: 東京都港区)			http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/	
2月	2(火) ～3(水)	16th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (開催地: 横浜市)	2009.9.4	2009.11.24	(社)溶接学会 Mate 2010 事務局 〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町1-11 http://wwwsoc.nii.ac.jp/jws/research/micro/mate/Mate2010.html	
7月	25(日) ～28(水)	8th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC2010) (開催地: Nashville, Tennessee, USA)	2009.11.19	2010.7.8	http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=230&lu-meetingid=2348&viewcon=other1144&id=1144	

平成 21 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞の募集のお知らせ

http://www.htsj.or.jp/award/award_info_2009-j.html

日本伝熱学会は、学術賞、技術賞、および奨励賞を設けています。つきましては、下記の要領に従って本年度の募集を行いますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。

1. 対象となる業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近3年間の Thermal Science and Engineering 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究論文とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と一致する必要はありません。また、Thermal Science and Engineering 誌に掲載された論文は、日本伝熱シンポジウムにおける発表の有無にかかわらず、受賞の対象となります。
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術とします。
- (3) 奨励賞の対象は、原則として、最近3回の日本伝熱シンポジウムのいずれかにおいて優秀な論文を発表した若手研究者（発表時に30歳程度以下の者）とします。
- (4) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限ります。
- (5) 贈賞数は、学術賞2件程度、技術賞1件程度、奨励賞4件程度とします。

2. 選考方法

- (1) 各賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行います。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

3. 提出書類

(1) 所定用紙

「日本伝熱学会学術賞 申請書・推薦書」 <学術賞用 Word ファイル>

「日本伝熱学会技術賞 申請書・推薦書」 <技術賞用 Word ファイル>

「日本伝熱学会奨励賞 申請書・推薦書」 <奨励賞用 Word ファイル>

各賞に該当する申請書・推薦書 1通

用紙は上記ホームページからダウンロードしてご使用ください。学術賞、技術賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書が異なりますので、ご注意ください。

(2) 論文抜刷または技術内容参考資料 6部

(3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部 (学術賞・奨励賞のみ)

4. 提出期限： 平成 21 年 12 月 18 日 (金)

5. 提出先および問い合わせ先

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

電気通信大学 知能機械工学科 山田幸生 宛

E-mail : yamada@mce.uec.ac.jp, Tel : 042-443-5434, FAX : 042-484-3327

平成 21 年度 日本伝熱学会賞
学術賞 申請書・推薦書

注記：日本伝熱学会賞「学術賞」は以下のように規定されています。申請・推薦にあたってはご注意ください。

1. 学術賞は、原則として、最近 5 回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、Thermal Science and Engineering 誌、またはその他の国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱に関する研究を主体的に行った研究者とその共同研究者を対象とする。なお、受賞研究課題名は日本伝熱シンポジウムでの発表論文名と厳密に一致することを要しない。
2. 学術賞の受賞資格者は原則として本会会員に限る。

申請者・推薦者名 _____ 印
所属 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞候補者（※共同研究者欄は適宜増減してください。申請書・推薦書が 2 頁にわたってもかまいません）：

研究代表者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 学生会員 名誉会員
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 学生会員 名誉会員
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 学生会員 名誉会員
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞対象研究課題名：

関連研究の日本伝熱シンポジウム発表（※原則として最近の 5 回に限る。別刷またはそのコピー 6 部添付）：

論文題名 _____
著者名 _____
第 _____ 回日本伝熱シンポジウム講演論文集、第 _____ 巻、_____ - _____ 頁、_____ 年

受賞対象研究内容の発表業績（※別刷またはそのコピー 6 部添付）：

論文題名 _____
著者名 _____
掲載誌 _____
第 _____ 巻、第 _____ 号、_____ - _____ 頁、_____ 年

申請・推薦理由：

平成 21 年度 日本伝熱学会賞
技術賞 申請書・推薦書

注記：日本伝熱学会賞「技術賞」は以下のように規定されています。申請・推薦にあたってはご注意ください。

1. 技術賞の対象は、優秀な伝熱技術を開発した者とする。

申請者・推薦者名 _____ 印
所属 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞候補者（※共同研究者欄は適宜増減してください。申請書・推薦書が2頁にわたってもかまいません）：

研究代表者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

受賞対象技術名：

受賞対象技術の内容（※技術の内容を説明する資料6部添付）：

申請・推薦理由：

第 47 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 47 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 近久武美

幹事 田部 豊

開催日：平成 22 年 5 月 26 日 (水) ～ 5 月 28 日 (金)

会場：札幌コンベンションセンター (<http://www.sora-scc.jp/index.php>)

行き方 大通駅から地下鉄東西線で約 5 分，東札幌駅で下車，徒歩約 8 分

<http://www.sora-scc.jp/access.php>

所在地 〒003-0006 札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1-1, Tel. 011-817-1010

講演申込締切：平成 22 年 1 月 22 日 (金)

講演論文原稿提出締切：平成 22 年 3 月 19 日 (金)

事前参加申込締切：平成 22 年 4 月 16 日 (金)

ホームページ URL：<http://hermes-me.eng.hokudai.ac.jp/nhts2010/index.htm>

【シンポジウムの形式】

- ・講演発表形式として，
 - a) 通常の一般セッション (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定に従って下さい。
- ・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。

【研究発表申込方法】

- ・原則として Web による申込に限らせていただきます。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。Web による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お申込の場合には，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。
- ・発表申込時に，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。
- ・講演発表申込は，講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- ・講演の採否およびセッションへの振分けは，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 Web 上における J-STAGE から公開します。会員にはパスワードを配布して、電子版を Web 上で閲覧できるようにします。なお、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されることを考慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にするために、パスワードは、近い将来には公開しません。
- ・講演論文集（電子版）の CD-ROM も作製し、参加者に配布します。非参加の会員にも、希望があれば配布しますので、開催後に事務局にお申し込み下さい。
- ・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、前回と同様の 2 段組×片側 26 字×60 行とする予定です。
- ・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。
- ・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”にそのまま投稿することができます。詳細は会誌 1 月号の「お知らせ」に掲載します。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。
- ・執筆要綱は、会誌 1 月号の「お知らせ」および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- ・講演論文原稿は、講演論文を電子化するために、論文原稿を原則として PDF ファイルで提出していただきます。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。
- ・原稿提出締切までに提出されなかった講演論文は講演論文集（印刷版・CD-ROM）および J-STAGE に掲載されません。J-STAGE の締切は厳密ですので、十分なご注意をお願い致します。

【講演論文の公開日】

- ・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】

- ・シンポジウム参加費
 - 一般（事前申込：12,000 円、会場申込：14,000 円）
 - 学生（事前申込：5,000 円、会場申込：6,000 円）
- ・講演論文集
 - 日本伝熱学会会員：無料（電子版は J-STAGE 上で事前に公開します。参加者には当日に印刷版・CD-ROM を配布します。非参加者のうちの希望者には、CD-ROM を事後にお送りします。）
 - 非会員：8,000 円（印刷版）。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、無料になります。

【懇親会】

- ・開催日：平成 22 年 5 月 27 日（木）
- ・会 場：札幌コンベンションセンター（大ホール）
- ・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）

【交通と宿泊】

- ・交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照ください。

【ご注意】

- ・講演申込の取消および講演論文原稿の差替は、準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- ・論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- ・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下さい。
- ・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。
- ・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 47 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
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内
E-mail: nhts47@eng.hokudai.ac.jp
FAX: 011-706-7889

優秀プレゼンテーション賞（第47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 宮良明男

第47回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および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。日頃の研鑽の成果を披露する機会ですので、奮ってご応募下さい。

- 開催日：平成22年5月26日（水） シンポジウム第1日
- 発表形式：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と80分程度のポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定ですが、詳細については現在検討中です。決定しましたら、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・研究機関等の技術者・研究者で、平成22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・学生員）、または入会申込中であること。注：応募資格を満足していない場合は発表できません。また、過去に本賞を受賞された方は応募できません。
- 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47回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“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氏名”および“研究分野の分類番号”を入力してください。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、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〉



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担当副会長補佐評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評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評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評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。
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：花村克悟（東京工業大学）：hanamura@mech.titech.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ください。
- ・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

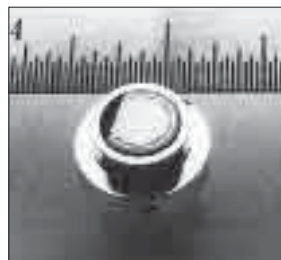
第 48 期新入会員 (2009.4.15~2009.7.27) 正 13 名・学生 38 名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
学	岸本 将史	京都大学大学院工学研究科	学	弓立 一哉	山口大学大学院
学	浅野 真臣	福井大学大学院工学研究科	学	岩間 聖司	山梨大学大学院
学	廣谷 潤	九州大学工学府	学	三宅 慶明	京都大学工学部
学	荒井 隼人	名古屋大学大学院工学研究科	学	齋藤 正堯	北海道大学大学院
学	松浦 寛之	名古屋大学大学院工学研究科	学	後藤 泰裕	茨城大学
正	八十 格	株式会社神戸製鋼所	学	ABEDIN M. ZOYNAL	名古屋工業大学
学	小宮 慎太郎	同志社大学	学	MOHAMMAD M.AKBARI	東京農工大学
正	小林 信雄	愛三工業株式会社	学	薦田 弦	関西大学大学院
学	白井 浩一	広島大学大学院工学研究科	学	柚木 啓太	九州大学大学院工学府
正	一柳 満久	東京大学大学院工学系研究科	学	石田 堯庸	同志社大学
学	網 健行	関西大学大学院工学研究科	学	巢山 頌文	同志社大学
学	鈴木 崇弘	東京工業大学大学院	学	安藤 隆治	九州工業大学
学	佐々木 一仕	山形大学大学院理工学研究科	学	宮越 智也	三重大学大学院
正	徳増 崇	東北大学	学	丸山 俊典	長岡技術科学大学
学	張 莉	東京大学大学院	正	長野 克則	北海道大学大学院
学	竹中 奨	大阪府立大学大学院	正	本澤 政明	東京理科大学理工学部
学	鈴木 智裕	宇都宮大学大学院工学研究科	正	橋本 光生	ソニー株式会社
学	瀬口 淳一	大阪大学大学院工学研究科	正	蔵田 耕作	九州大学大学院
学	馬場 宗明	九州大学大学院工学研究院	学	宇都宮 仁	豊田工業大学大学院
学	島崎 康弘	大阪府立大学大学院	学	古山 慶	豊田工業大学大学院
学	伊藤 恭平	広島大学大学院工学研究科	正	堀内 敬介	㈱日立製作所
学	森川 和己	慶應義塾大学大学院	正	深萱 正人	株式会社 SOHK I
学	戸嶋 隆夫	大阪大学大学院工学研究科	正	古井 秀治	ダイキン工業株式会社
学	平澤 顕	早稲田大学大学院	正	近藤 喜之	三菱重工業 (株)
学	東 孝祐	慶應義塾大学大学院	正	園田 広信	株式会社 安川電機
			学	佐藤 智光	首都大学東京

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



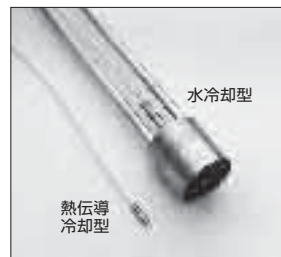
特徴

- 最高速の応答 (約 6 μ 秒)
- 850°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

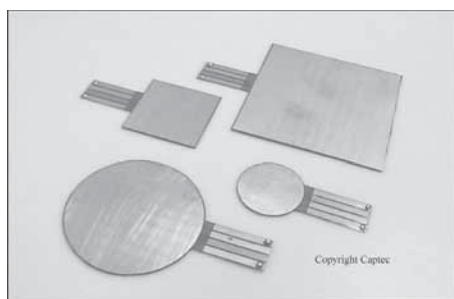
テクノオフィスは、独自の高度技術を持つ海外メーカーの

熱流計／熱流束センサーをご紹介します。

CAPTEC 社 (フランス)

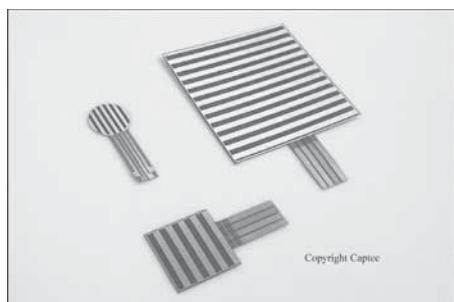
CAPTEC 社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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

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

本号は、測りにくいけれど必要な熱物性値と題して特集を組みました。必ずしも物性値の話ではなく、計りにくい温度についてもご執筆いただきました。その昔、鉄が溶けるほどの温度をどのように測るか、といった技術が、後の量子力学に発展していったことはご存知のとおりであり、本号においてもエデュケーションQで取り上げました。その時代背景により要求される温度域（鉄の融点から極低温）や精度（大規模反射望遠鏡などの、温度管理による熱膨張制御）、測定範囲（地球規模からナノスケール）などが異なります。追求すればするほど、その測定器も大掛かりとなり、小さな研究室では対応できなくなりつつあるように思われます。しかしながら、ドライバー1本による光軸調整によって金属表面反射率スペクトルのダイナミックな時間変化が捉えられ（本号表紙裏のグラビア参照）、そこから多くの有益な情報が得られるのみならず、往年の大御所らの考え方に一石を投じる結果も得られる場合もあります。かつてプランクは、当時の教授から「物理学には重箱のすみをつつくようなテーマしかなく、残された空洞放射も間もなく解決するだろう」と聞かされました。それにもめげずに考え抜いた結果が有名なプランクの法則として実を結びました。今回の特集からも、まだまだそうしたテーマが残されているようにも読み取れます。こうした議論が継続して続けられるような記事を今後とも掲載していきたいと思えます。

引き続きご支援賜りますようお願いいたします。

花村 克悟 (東京工業大学)

Katsunori Hanamura (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: hanamura@mech.titech.ac.jp

副会長 山田幸生 (電気通信大学)	部会長 花村克悟 (東京工業大学)
委員	
(理事) 石塚 勝 (富山県立大学)	藤岡恵子 ((株) ファンクショナル・フルイット)
板谷義紀 (名古屋大学)	橋本律男 (広島大学)
深川雅幸 (三菱重工)	
(評議員) 一法師茂俊 (三菱電機)	久角喜徳 (大阪ガス)
福谷和久 (神戸製鋼所)	白樫 了 (東京大学)
齊藤卓志 (東京工業大学)	宗像鉄雄 (NEDO)
大村高弘 (ニチアス)	田崎 豊 (日産自動車)
(オブザーバー)	
黒坂俊雄 (神鋼リサーチ)	富村寿夫 (熊本大学)
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：

東京工業大学炭素循環エネルギー研究センター 花村克悟

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-24

Tel&Fax: 03-5734-3705, hanamura@mech.titech.ac.jp