マイクロに根ざす熱技術 —その特異性と発展性—

Microthermal Technology —Its Features and Potentiality—

長島 昭

Akira NAGASHIMA

- 1938年8月生まれ
- 兵庫県出身，慶応義塾大学工学部卒業。エネルギー媒体や新材料の熱物性研究を行う
- 正員，慶応義塾大学理工学部（〒223 横浜市港北区日吉3-14-1）

1. ミクロな視点の多様性

高度な集積回路やマイクロマシンなど，微細技術は科学技術者だけでなく，社会一般の話題となっている。しかし，その実現に熱が大きな役割を果たすことは案外知られていない。熱や温度に関わる現象には未知のことが多い。表に出ないゴッドファーザーのごとく，今後の発展を見えないところで左右する要因となっている。たとえば集積回路の演算密度を上げれば発熱量が増えて，どこまで冷却できるかでコンピュータの限界が決まる。その加工の精度には温度の制御がかかわる。マイクロマシンの動きは，まわりの流体（空気や生体液など）の熱的な物性に強く影響される。

あとで触れるように，マイクロ系の熱現象には，巨視系と違う特異性が予想される。大きな水道管を流れる流体は乱流になっているのが普通であっても，毛細血管内の血流は粘性の効果が支配的である。ましてや小さい気泡がひとつあるだけで，表面張力効果によって流れはブロックされてしまう。このように，巨視的な系では見えにくかった現象が，系がマイクロになったために顕在化する。律速現象（支配的な現象）が交替する。その交替がマイクロ化のどの段階で起こるか，これはこれからの興味深い問題である。また巨視系でよく使わ

れている伝熱計算式はいったいどこまでマイクロな系で成り立つのだろうか？

もともとあった現象が顕在化するだけでなく，マイクロ系特有の新しい熱現象もある。ふく射伝熱は熱線（電磁波）の波長によるから，マイクロな系になれば，要素の寸法が波長より大きい系から小さい系へと変わる境がある。また，系を構成する分子数が制限されるので，現象のばらつき，すなわちゆらぎが問題となることも予想される。大きな系であっても，マイクロな視点が必要な問題も多い。大きな機械部品の破壊も，微小なき裂から発展する。固体と固体を接触させた時の伝熱は，表面の目に見えない凹凸で大差が生じる。容器内の液体の凝固は，最初どこか少数の位置（核）からスタートする。その核生成の予知は，潜熱蓄熱や金属材料製造の大きな課題である。

マイクロな熱現象を考えるときには，大きな系では難しかったような問題を，考えなくてもよいという特徴もある。集積回路の冷却に，図1のような数十 μm 程度のみぞを作って冷却液を流す方式が試みられている。相対的に非常に大きくなる流動抵抗，すなわちポンプ動力は，まったく考慮に入っていない。すなわち，エネルギー効率的な考えは必要と考えられていない。また，マイクロな系

図1 IC冷却用の流路寸法例

では重力場の影響も無視されることが多い。

さらにもうひとつ、ミクロな熱問題の別の視点を考えてみよう。いま、容器内の気体の状態を分子の運動で表すときに、広大な宇宙に散在する星の力学運動を対比させてみる。両方の質点系の違いは何だろうか？ そのひとつは時間スケールである。分子系では短時間に多くの衝突が起こるが、宇宙で起こる現象は光年といった長い時間で考える。また、材料試験や化学実験で知られているように、温度を上げると、材料の変化の結果を得るに要する時間が短縮できる。つまり、非常に遅い現象のはずが、温度を上げることにより速くでき、視点を換えれば時間座標と温度座標は相互におきかえられることがわかる。図2に概念的に示すように、系の大きさ、時間スケール、そして温度レベルという三つの量を選んで三次元の軸で考えてみる。するとミクロな系で起こる現象は、多くの他の現象とのつながりで考えることができる。つまり、ミクロな現象は、他の現象とかけはなれた特異現象なのではなく、ある程度は他の現象の解法を応用できる範囲がある。そしてその三

次元の広がりの中のどこかに、ミクロやナノスケールほど小さくはなくても、巨視系の解析手法では扱えないような中間スケールの課題も重要な工学課題として散在しているのである。

2. ミクロ系に表れる特異性

第一に、古典的な流体力学や熱力学が仮定する連続体としての扱いが出来なくなって、扱う物質を非連続体と考える。固体壁面に沿って“流れる”気体では、壁面で速度や温度のとび(jump)が生じるのをミクロ系では無視できない。液体では、異種分子膜による表面張力変化、固体壁との接触液膜の挙動など、そして固体では結晶、すべり、き裂、あるいはまた二つの固体表面どうしの接触による伝熱など、系を微小に考えていくと何らかの形の非連続体の扱いが入ってくる〔この点の議論に関しては、最近の非局所性(nonlocality)の考え方が関係してくる部分があるがここでは触れない〕。

次に、系をどんどん小さくしていくと、物質の分子数が多いときに使えた平均値(たとえば平均速度)からのはずれ、すなわち統計的なゆらぎが無視できなくなる。これは電子やフォノンの移動についても同様なので、非常に細い金属線や極端に薄い金属膜では、電気伝導や熱伝導にゆらぎの影響が出ることが研究されている。先に述べた系の大きさ、時間、温度のかかわりを考えると、それほどミクロでない系でも、爆発的に極短時間に変化する場合や、非常に大きい温度こう配をもつ場合は、従来知られていない挙動が有り得る。そして系がミクロになると、変化時間は短くなりやすく、温度こう配は大きくなりやすい。

熱現象は蒸発や凝縮などの相変化があると劇的

図2 系サイズ、時間、温度の三次元空間で考えるいろいろな現象

図3 水の過冷却度と体積の関係の例

に変化する。これらマイクロ系も同じである。しかし、その生じ方にはいろいろな違いがある。図3に示すのは、液体を冷却していったときに、標準の凝固温度より何度下まで液体状態のままだったか、すなわち過冷却度の大きさである。系がマイクロになるほど、過冷却が生じやすい。このような核生成の問題は蒸気の凝縮などにもある。また、微小な液滴では、表面張力によって内部の圧力が外の圧力より非常に大きくなり、これに応じて相変化の温度も高くなる。つまり、周囲の圧力をもとに予想した温度では、液滴の内部からは気化が起こらない。

ふく射による熱の伝わり方も、系が微小になると違ったアプローチが必要になる。家の屋根のような大きな表面は、光や赤外線照射に対して表面反射あるいは吸収、散乱として近似できる。しかし、系が微小となると表面現象として扱うのは適切でない。これは波長と系のサイズとの相対的な関係、浸透深さなどが関係する。

工学的な問題としてのマイクロ系の扱いでは、律速現象の交替が最も興味深い。乱流や層流といった流動様相はレイノルズ数をパラメータにして考える。レイノルズ数は系の代表寸法に比例するので、液体の種類などが変わらなければ、マイクロ系の流れはほとんど層流になってしまう。伝熱計算式は乱流伝熱の式から層流伝熱の式へ、そして極端な場合、熱伝導だけが支配的になる。気泡など気液界面を含む系では、巨視系では運動量支配、あるいは重力場支配であるが、マイクロ系では表面張力支配に交替する。液面上に浮遊する固体物質でも、その固体が大きいと固液の密度差だけを考えればよいが、微小固体になると、表面張力による液面変形分による浮力差が支配的となって、その固体は容器壁（または液面の中央）へ徐々に移動することの理論的説明が最近報告されている。

熱や液体の現象には、一般に無次元表現が使われる。これは伝熱、流動といった複雑な現象を、工学的に計算する上で大変便利であるが、マイクロ系への適用に限界があることは上に挙げたことから予想される。この意味でさらに重要な現象は、系のマイクロ化によって、相変化や化学変化といった現象の伝播に違いが生じることである。例

えば容器中の水を過冷却状態に保っておいて、その一箇所に氷の小片を接触させると、非常に速い速度で凝固が伝播していく。しかし細い管内の過冷却水では、凝固伝播は大きな系とは異なる。これは当然、出来上がった固相の構造（氷の結晶の発達を示す模様など）も変えてしまう。また、容器内に気体燃料と酸化剤を入れて、一端で点火すると燃焼波が広がってゆく。この容器をどんどん薄くしていくと、つまり、微小なすきまをもつ平行平板間にとすると、燃焼伝播の予測計算は難しくなる。燃焼生成物の種類や組成にも影響する。

3. 工学的応用への可能性

さて、マイクロ系に特有な熱現象があるとして、工学的な応用にはどう関係するであろうか？現在まだ解明されていないことが多いので、興味深い課題の提案だけを挙げる。

3・1 ミクロな系の製造、加工に関する熱の課題

第一に何が起こっているかを知ること、

(a) 発生熱量の推定

(b) 温度分布とその変動の計算

が必要である。特定の位置への熱発生の集中（ホットスポット）は、ICなど熱に弱い材料では問題である。ジュール熱の場合、マイクロ系では平均化の原則が十分働かないから、材料内の局所的な電気抵抗の不均一がホットスポットを生みやすい。第二には除熱・冷却をどう行うかということ、

(c) 伝導、対流、ふく射の効果的組合せ

を考える必要がある。マイクロ系では一般に、冷却を効果的に行うことだけが必要とされ、エネルギー効率的配慮は要らない。その点では流体をどんどん流して冷やせばよい。その代わりに速い応答性が要求され、最終的にはエレメント内部から表面までの熱伝導（熱の拡散速度）で支配される。ということは熱伝導率の少しでも大きい材質の開発が決め手となることを意味している。第三には表面層の問題があり、

(d) 拡散深さの効果

を考える必要がある。固体材料の接合部での分子どうしの拡散の深さ、溶け合わない液体どうしの境界、気体に接する固体表面など、大きな系では

“界面”として扱うことができて、マイクロな系では有限な厚さをもつ“層”となる。

3・2 ミクロな系の熱的な制御 ミクロな系の熱的な制御の問題には二つの側面がある。ひとつは、ICなどの冷却技術のように、系の温度をいかにコントロールするかという技術、そしてもうひとつは、マイクロマシンなどの作動特性を、周囲流体の熱物性変化を利用して制御する技術である。

図1で示した例のような、複数流路をもつIC冷却部やマイクロ熱交換器を考えてみる。流路が微小になると流れは層流になり、粘性率が大きく効く。いま仮にどこか一部の流路にホットスポットが生じたとする。冷却用媒体として気体を流すとする、気体の粘性率は温度とともに上昇するので、温度の高い流路には流れにくくなり、温度不均一は増大する。一方、もしも液体を流すとする、液体の粘性率は温度の上昇に伴って指数関数的に低下するので、温度の高い流路ほどより多く流れるようになって、系全体の温度は均一化する。このような熱的な安定問題は今後の研究の余地が大きい。

マイクロマシンなどの制御には、表面張力や粘性率の溶液濃度依存性とか、固体表面条件に対する接触角の鋭敏性などをはじめ、広い意味の熱物性効果がかなり利用できるであろう。

医学や生体工学でも細胞をはじめ、マイクロな系の熱的制御は面白い可能性をもっている。

3・3 ミクロな系の熱物性 上で述べた拡散深さだけでなく、加工による熱硬化層や酸化膜、あるいは高分子材料表面に生じる配向された層なども同様で、系がミクロになると、このような層の体積が全体積に占める比率が大きい。場合によっては、そのような何らかの“表面”層だけで出来上がっているものもある。加工や酸化などの影響としては、加工硬化、分子配向による異方性、材料内での記憶がある。薄膜、細線や微粒子などは、このため、元のバルク材料にはない性質が生まれる。例えば、高分子材料で細い線材や薄膜などを作ると、熱伝導の異方性、すなわち、細線の長さ方向の熱伝導率の方が半径方向よりかなり大きい材料が作れる。当然のことながら表面層に関係の深い熱物性、例えば熱ふく射に関する性質

は大きく変えることが出来るので、マイクロな系ではその相対的な効果を高めることが出来る。

マイクロな系の熱物性を巧妙に利用した例としてはエアロジェルがある。これは SiO_2 が図4のような構造を形づくっているもので、数10 nmの基本サイズをもっている。空間の多い構造なので軽く、また鎖のフォノン伝導も低いので、固体部分の熱伝導は非常に小さい。空間のサイズは小さいから気体があるとしてもその対流伝熱は抑えられる。また気体の平均自由行程と同程度なので伝導も抑えられる。不透明にする添加物を加えるなどすれば、ふく射による伝熱も抑えられる。結果的に、ナノオーダの微細構造物の物性をうまく組合わせて0.01~0.02 W/m・Kの超断熱を実現している⁽¹⁾。

3・4 ミクロな系の熱現象 飯田らは、容器内の液体の沸騰（プール沸騰）の実験で、伝熱表面の大きさを小さくしていった、沸騰の様子を顕微鏡を使って観察した⁽²⁾。その結果、従来考えられていたよりはるかに多数の発泡点が観察されること、分子ゆらぎに起因する均質核生成と思われる過熱度が測定されることなど興味深い結果を得ている。このような結果は、熱現象の研究をマイクロな系の観察に広げることで、新しい観点の得ら

図4 エアロジェルの構造 (Fricke による)

れることを示唆するものである。応用面では、沸騰を伴うマイクロな系の伝熱制御に応用できるであろう。また極端に高い熱流束を得られる伝熱面の開発などへの発展も考えられる。

3・5 極限実験への応用 上で述べたことは、マイクロな技術における熱工学的なアプローチであるが、逆に、熱工学の問題へのマイクロ技術の応用について一言触れておく。

現在、新材料研究に関して、超高圧や極低温での実験が行われる。爆発や超高速加熱（冷却）の研究がなされる。また地球や環境の研究で深海や高空の測定が必要とされる。宇宙利用のため、微小重力場、超高真空場での実験が実施されている。これらのどれひとつをとっても、実験装置の微小化、あるいは少なくとも操作系の微小化、あるいはサンプルの微小化が実現できれば、その利点ははかり知れない。しかし、前に述べたように、マイクロな系での観測はふつうの大きな系へ読みかえできるとは限らない。そこで、少なくとも、どの位までのサイズならマイクロにしてよいか、どのマイクロ技術は使ってよいかを研究して、極限実験への応用も期待したい。

4. 結 言

この文ではマイクロという言葉微小なという意味で使っており、 μm という単位を示しているのではない。科学技術の世界は μm はむしろすでに巨視系で、ナノ (10^{-9}) からピコ (10^{-12})、フェムト (10^{-15}) の議論までである。しかし、小さいが故に貴いのではない。特に熱工学、熱科学的観点からは、極小系と我々が日常眼にする系との結び付け、中間の橋わたしに興味深い問題があり、また思いがけない新しい技術への可能性もあるように思われる。熱問題への分子論的アプローチも極めて興味深い発展を秘めているが、この特集の他の文で扱われるとのことなので、ここからは省略した。

文 献

- (1) Fricke, J., 第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 秋田, (1992), 313. および, Fricke, J., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **75**-8 (1992), 2027.
- (2) 飯田嘉宏・ほか3名, 第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 秋田, (1992), 153.

(原稿受付 1992年10月21日)