

- 平成12年度 -

「マイクロマシン技術への多分野萌芽技術の適用に関する研究」

(財)マイクロマシンセンターでは多様なマイクロシステムの構築に必要な理工学を始めとする技術シーズの探索によって基礎技術の強化を図るために学、官、産共同で平成4年度から種々の技術シーズを調査テーマとして取り上げてきました。平成12年度は5テーマについて調査研究を行ってきましたが、今回5テーマの報告要旨をここに掲載いたします。

ウェアラブルエネルギー源に関する調査研究

東北大学 未来科学技術協同センター 教授 江刺 正喜

「ウェアラブルエネルギー源」は、人間、動物、ロボットなどに装着できる小形のエネルギー源である。現在、ウェアラブルエネルギー源として1次・2次電池が広く用いられているが、本調査研究では、1次・2次電池にはない機能を実現しうる新しいウェアラブルエネルギー源の可能性を検討した。

化学燃料を利用するウェアラブルエネルギー源は、電池より1-2桁程度高いエネルギー密度を有する化学燃料から効率良く発電することによって、高エネルギー密度と高出力密度とを実現できる可能性を有し、しかも、充電を必要とする2次電池と異なり、燃料を補充するだけで連続使用できるという利点を有している。また、このようなエネルギー源は、繰り返し使用可能な小形発電機とリサイクルの容易な燃料カートリッジとの組み合わせであり、有害物質問題・廃棄物問題を抱えている1次・2次電池と比較して、循環型社会に対応する環境に優しいエネルギー源になりうる。現在、このようなエネルギー源として、マイクロ燃料電池やシリコン製のマイクロガス

タービン発電機などが研究されている。

また、自動発電・充電システムは、2次電池の充電や燃料の補充から使用者を解放するので、使用者の心理的または体力的負担を最小限にすることが要求される携帯形ヘルスケア端末などへの応用、あるいは、維持管理が事実上できない動物追跡装置や極地環境観測装置などへの応用に適している。このような自動発電・充電システムの基礎技術として、腕時計に用いられている自動発電システムや無線IDタグに用いられている非接触給電システムの技術が利用できる。

報告書では、エネルギー源のウェアラブル化・小形化の実例として、燃料電池、燃料改質器、機械式自動発電機、熱電発電機、非接触給電装置、電気2重層キャパシタ、薄膜電池、および、熱機関を取り上げ、1次・2次電池に代わるウェアラブルエネルギー源の現状、将来性、および、マイクロマシン技術との関係を明らかにした。

マイクロチャンネルの応用技術に関する調査研究

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 教授 井上 剛良

マイクロファブリケーション技術の進展と共に、CPUに代表される電子デバイスの高密度化・高性能化、半導体レーザーの高出力化がますます進展している。一方で、マイクロマシンやマイクロリアクターなどマイクロ機器の研究開発ならびにこれらを利用した応用研究が展開されつつある。これらに共通する問題の一つとして、微小領域からの高熱流束の除熱が苛酷されている。例えば、2006年頃のマイクロプロセッサの発熱密度は100 W/cm²程度と予想されている。また、高出力ダイオードレーザーの場合は100~500 W/cm²程度、次世代のX線源であるAPSでは2000 W/cm²にまで達するとされており、これらを正常に動作させるためには、デバイス温度を低く(100以下程度)押さえた条件下で、発生する大量の熱を除去することが要求される。「デバイス温度を低く押さえつつ高密度な発熱を取り除く」ことは熱的には非常に厳しい要求であり、宇宙往還機の大気圏再突入や原子炉隔壁の冷却などに代表される極限的熱環境で用いられる高い温度差の下で高熱流束の熱を除去する技術では十分には対応できないと言える。この除熱の厳しさを評価するパラメータとして、デバイスと周囲環境との最大温度差 T と発熱密度 q で定義される熱抵抗 $R = T/q$ を考えると、低熱抵抗な除熱技術の開

発が急務であると言い換えることができる。

この対策として、Tuckermanらはマイクロチャンネルを用いた電子デバイスの除熱を提案し、伝熱特性を明らかにするとともにその有効性を示した。この技術は電子デバイス等の冷却だけでなく、超小型高性能熱交換器などにも応用できると考えられ、関連する研究も活発に行われてきているが、未だ実用化には至っていないのが現状である。この原因としては、マイクロチャンネルの伝熱特性がまだ十分に整理されていないことに加えて、これを応用するための概念や技術が、熱工学以外の分野の技術者・研究者にわかりやすい形で体系づけられていないことがあげられる。

以上の背景から、本章では「マイクロチャンネルの応用技術に関する調査研究」と題し、マイクロチャンネルヒートシンクを設計するという観点からマイクロチャンネル冷却技術について調査を行い、以下のような報告を行った。

- (1) マイクロチャンネル冷却技術と従来の冷却技術との相違点として熱抵抗が小さいことを指摘し、マイクロチャンネルを用いることによって低熱抵抗が達成できる理由について示した。また、各冷却技術の適用範囲を温度と熱流束の点から整理し、マイクロチャンネル冷却

- 技術を用いるべき場合を明らかにした。
- (2) マイクロチャンネル伝熱について理論解析を行いその基本特性を示すとともに、マクロな系に対して求められた実験整理式が適用可能な範囲と微細流路を用いることによって顕在化する要因について述べた。
 - (3) 冷媒が相変化しない場合（単相）と相変化を伴う場合（気液二相）におけるマイクロチャンネルの伝熱特性、流動特性について記述し、相変化を伴う場合には圧力損失が急増することを指摘した。
 - (4) 作動流体として水または空気を用いた場合のマイクロチャンネル冷却の特徴を明らかにし、空気を用いた場合に顕在化してくる要因について指摘した。ついで、マイク

- ロチャンネルヒートシンクの最適熱設計を行う際の考え方について述べるとともに、最適化設計法例を示した。
- (5) マイクロチャンネルの伝熱特性量を評価するためには各物理量を正確に計測することが必要である。このような観点から、流量、流速、温度、圧力の各計測法についてまとめるとともにそれらの計測例を示した。
 - (6) マイクロチャンネルの高性能化という点から流動抵抗低減技術、伝熱促進技術は重要である。これまでに提案されている流動抵抗低減技術、伝熱促進技術について調査し、これらがマイクロチャンネルに適用可能か検討した。
 - (7) 最後に、種々のマイクロチャンネルの製作例、実用例を示した。

マイクロ流路における流体现象の解明と マイクロマシン技術への適用に関する調査研究

東京大学 生産技術研究所 助教授 藤井 輝夫

これまでに行ってきた関連の調査研究において、マイクロマシン技術の化学・生化学分析および合成を目的としたシステムへの応用が進んでいることが明らかになった。この分野は益々研究がさかんになっており、2000年5月にオランダのトゥエンテ大学で開催された4回目の μ TAS国際会議では、230件の投稿論文のうち134件が採択、発表され、22カ国から500名弱の参加者があった。 μ TAS以外のMEMSやTransducersあるいはHPCEといった会議においても、この分野の研究発表が急増しており、注目度は確実に高まっている。

今回の調査では、上記のような状況から再度、その重要性が認識されつつあるマイクロスケールでの流体现象およびマイクロ流体システムに焦点を絞って調査を行った。今年度は特に、微小空間における流体の挙動や化学反応の特徴、流れの測定および評価技術について重点的に調査を行い、また、これまでの調査に引き続いてマイクロ流体システムの構成要素となるマイクロ流体デバイスの開発事例とゲノム・プロテオーム解析への応用事例について取りまとめた。さらに欧州におけるこの分野の動向についての情報も報告書に含めている。

微小空間においては、表面積/体積比が増大するので、流体が受ける力も表面張力などの効果が相対的に大きくなる。またレイノルズ数が小さいため流れは層流となる。化学反応の観点から見ると、異なる液体同士が出会う界面が相対的に大きくなることや、分子拡散距離が短くてすむこと、さらには温度などの場の制御を一様に行うのが容易になることなどから、速やかかつ効率の良い反応を行うことが可能である。マイクロスケールの流れの測定および評価については、物体表面の流れ場の計測項目として最も一般的なものはせん断応力である。古くから薄膜ヒータを利用したせん断応力センサが提案されている。マイクロ流体デバイス上で電気泳動を行う場合などについては、電気浸透流を用いるが、この場合どのような流れのプロファイルになるのかが、分離性能などを評価する上で重要な計測項目となる。電気浸透流において流体の駆動力を決めるゼータ電位の影響を調べる実験例や、粒子イメージ速度計(PIV)を用いてマイクロチャンネル内の流

れを計測した例などが報告されている。また、マイクロミキサのミキシング性能を評価するために呈色反応を用いた例がある。マイクロ流体デバイスについては、数多くの研究が報告されているが、マイクロポンプ、マイクロバルブ、マイクロミキサについて新しい原理や構造に基づくものが登場している。マイクロバルブについては、PDMSを用いたニューマチック型のノーマリークローズドバルブや複数のバルブを一本の流路上に配置して蠕動ポンプとしても使用できるもの、DRIEにて加工した横型のバルブ構造などが報告されている。また新しいコンセプトとして、ハイドロゲルを用いたマイクロバルブが提案されている。マイクロポンプについては、ピエゾバイモフルアクチュエータを利用したダイアフラム型ポンプやCEW(Continuous Electrowetting)を用いたもの、気泡駆動型のポンプなどが報告されている。また、マイクロミキサについては、EHD(Electrohydrodynamic)による対流を利用した2液混合器や気泡駆動型ポンプによって能動的に2液の界面を乱す方式のものなどが提案されている。ゲノム・プロテオーム解析におけるマイクロ流体デバイスの応用事例としては、キャピラリ電気泳動のマイクロチップ化の例として、96本のマイクロチャンネルを放射状に配置して高速に処理を行うものが既に実現されており、市販を意識したものとして16本のマイクロチャンネルを4インチウエハ上に形成した例も登場している。プロテオーム解析において重要な手法である2次元ゲル電気泳動と質量分析計について、マイクロチップ化と統合化の研究が進められている。蛋白質の電気泳動による分離がマイクロチップ化されているが、これを質量分析計と接続してプロテオーム解析を自動化しようとするものである。本章の最後は欧州における研究状況として、ドイツのフライブルグ大学のIMTEKの紹介とそこでの研究システムの解説ならびにスイスにおけるマイクロシステムの企業化への流れなどについて述べる。我が国で培われたマイクロマシン技術を、より一層発展させ、かつ実世界において役立てるためには、スイスに代表されるような、研究から企業化、製品化に至るまでのシステムをいかにして戦略的に構築していくかが今後重要な課題になると考えられる。