

## はじめに

本書は、近年の情報化・ネットワーク社会の進展に伴う情報通信デバイスを含む電子デバイスの小型化・高性能化、さらに今後のIoT(Internet of Things)技術の広がりと共に大きな問題となる各種デバイスの発熱・放熱問題解決の一助となりうるサーマルマネジメント技術についてまとめたものである。具体的には従来から実用化が進められ、近年さらなる進化を遂げている「ヒートパイプの基礎と開発動向」、「沸騰冷却系の基礎と開発動向」、「磁性流体を用いたデバイスの基礎と開発動向」および「電気流体力学(EHD)ポンプを用いたデバイス」についてまとめている。加えて昨今、新しい熱輸送現象として注目を集めている「表面フォノンポラリトンによる熱輸送現象」に基づく新たな試みについて紹介する。

本章では、サーマルマネジメントに関する概説と小型化・集密化する電子デバイスのサーマルマネジメントについて紹介する。

## 1. サーマルマネジメントについて

サーマルマネジメントとは、熱制御あるいは熱管理とも呼ばれ、広義では熱力学と伝熱工学に基づく各種テクノロジーによって対象システムの温度を制御する機能・機構を意味する。またサーマルマネジメントのためには、対象システムの温度または温度分布、あるいはその両方をコントロールするための熱伝導、対流や相変化を含む熱伝達およびふく射などのあらゆる手段とプロセスを複合的に活用する必要がある。ここでいう対象システムとは、一般的には電子デバイスを含む各種デバイスを意味するが、決して単純ではない。具体的には、サーマルマネジメントを必要とするシステムは、多くのコンポーネントと様々な材料で構成されており、さらに固体・液体・気体の組み合わせが想定されるだけでなく、時間的な変化(非定常状態)を含み、外部(周囲)の条件に大きく左右されることになる。

サーマルマネジメントに関わる分野は、情報通信、環境、エネルギー、健康医療、インフラなど、多岐にわたる。また昨今の社会情勢として環境負荷低減および産業競争力強化の両面からサーマルマネジメント技術の高度化に対する社会的要請は大きい。例えば、モビリティ分野におけるEV(Electric Vehicle)のためのバッテリーに対する熱制御技術、あるいはZEH(net Zero Energy House)・ZEB(net Zero Energy Building)に対応する住環境分野、高温排熱などに対応する未利用熱エネルギー分野など、異なる利用環境および温度帯に対応可能なサーマル

## 見 本

第1節 ヒートパイプの基礎と  
超薄型サーマルソリューションの開発動向

The Heat Pipes 望月 正孝

はじめに<sup>1,2)</sup>

ヒートパイプは閉じた管の一端を加熱して内部の液体を蒸発させ、他端で凝縮させることにより小さな温度差で多量の熱を輸送することが可能な伝熱素子である。凝縮した液体を再び蒸発部に戻すために、管の内壁に毛細管作用が良く働くような構造(これをWick(ウイック)という)を内張りしたものをを用いる熱伝達素子をG. M. Groverがヒートパイプと名付けて1964年に発表し、翌1965年にT. P. Cotterがその基礎理論を発表し広く一般にも紹介され、一般的になった。GroverはLos Alamos研究所で人工衛星用のヒートパイプの研究に傾注しており、その成果を基に製作された水-ステンレス鋼ヒートパイプを搭載した衛星が1967年に打ち上げられた。一方ヨーロッパでは原子力研究所を中心に高温用ヒートパイプが開発された。英国の原子力研究所、イタリアISPRAのJoint Nuclear Research Centerが中心となり、熱電子発電用のヒートパイプの研究が開始された。ヒートパイプの初期の研究は、時代の要請に応えるものであり人工衛星への適用を中心に進められた。ヒートパイプを初めて商品化したのもアメリカ(Q-Dot社)であるが(1966年)、これを契機としてヒートパイプは世界各国で熱交換器や電子機器の冷却等、地上用各種機器の冷却に用いられるようになった。1970年代になると、日本でも大島耕一先生と日本ヒートパイプ協会を中心にヒートパイプの研究が進み、1980年代には廃熱回収用熱交換器、パワートランジスタ等電力機器の冷却、太陽熱温水器、家庭用品、融雪凍結防止等に実用された。1990年以降は、パソコン(デスクトップPC、ノートブックPC、サーバ)のCPU冷却に採用されヒートパイプの需要が急増した。近年では、スマートフォンやタブレットPCの冷却用に、厚さ0.4 mmという超薄型ヒートパイプが応用され、超薄型ベーパーチャンバーに進化した。昨今では電気自動車用のバッテリー、モータ、インバータの冷却装置に応用されつつある。下記に主たるヒートパイプの代表的な歴史的事象を示す<sup>3)</sup>。

1964年	G. M. Grover, Heat Pipeを発明し命名
1965年	T. P. Cotter, Theory of heat pipesを発表
1966年	F. J. Stenger, CPL(Capillary Pumped Loop)を提案
1969年	V. H. Gray, Rotating Heat Pipeを提案
1970年	Y. Maydanik, LHP(Loop Heat Pipe)を発明
1975年	人工衛星に温度制御用ヒートパイプ採用と可変コンダクタンスヒートパイプ

### 第3節 高機能ループヒートパイプの開発動向

名古屋大学 長野 方星

#### はじめに

近年、電子機器の冷却技術としてループヒートパイプが注目されている。その理由は、無電力、潜熱輸送、抗重力性などの特徴に加え、その設計自由度の高さにある。設計次第で小型化、薄型化、高熱流束化、大容量化、長距離化が可能となる。本節ではループヒートパイプの概要ならびに開発動向について概説する。

#### 1. ループヒートパイプの概要

##### 1.1 ループヒートパイプの特徴

現在、幅広く電子機器の冷却に実用されている技術として、ヒートパイプや機械式の液冷ポンプループがある。ヒートパイプは密閉された容器内に作動液を封入し、作動流体の気液相変化時の潜熱を利用して熱輸送を行うデバイスである。流体の輸送に電力を要しないこと、潜熱利用により高効率であることが特徴である。しかし、蒸気と液が対向して流れるため、熱輸送量や輸送距離の制約が大きいという欠点がある。また、液冷ポンプループは、液体循環用のポンプと配管から構成される。ポンプの性能に応じた液輸送が可能であるが、電力を要すること、一般には液体の温度上昇を利用した顕熱による熱輸送であるため、熱効率が悪いこと、重量が大きいこと、ポンプの寿命がシステムの寿命となるなどの欠点がある。

一方ループヒートパイプは、従来のヒートパイプと液冷ポンプループの利点を兼備した特徴を有している。まずヒートパイプと同様に毛細管力を駆動源としているため、無電力である。次に、潜熱を利用しているため温度低下が少なく高効率である。また、構造は液冷ループと同様に一方向への循環であるため、飛散限界を受けず、熱輸送量と距離を大きくできるといった利点がある。

##### 1.2 ループヒートパイプの歴史

ループヒートパイプは1972年に旧ソビエトのGerasimovとMaydanikにより発明されたとされている<sup>1)</sup>。1980年代から宇宙分野で研究開発が進められており、これまでGorizont, Granatなどの衛星で軌道上実証されてきた。また、ループヒートパイプと同時期にアメリカではキャ

## 第5節 相変化型並列細管熱輸送デバイスの研究開発の動向

東京都立産業技術高等専門学校 齋藤 博史

### はじめに

マイクロプロセッサ，パワーデバイス，高出力レーザ，データセンター内サーバー群などの冷却に，高効率で高熱輸送能力を有する熱輸送デバイスが必要とされるものは数多く，その大きさや形状，熱輸送長さなどへの要求は多種多様である。中でも電子機器やパワーデバイスの冷却に用いられる高効率な熱輸送デバイスの一つである自励振動ヒートパイプは，細管内部の作動流体の沸騰・凝縮によって振動流を誘起させ，顕熱と潜熱での熱輸送を行う特徴を持つ。図1(a)に示す自励振動ヒートパイプの代表例である蛇行細管型自励振動ヒートパイプ<sup>1-6)</sup>は作動流体の沸騰・凝縮によって振動流を誘起し，高い熱輸送性能を発揮することが知られ，その薄型の構造を生かした製品が開発されている。同様にここで報告する相変化型並列細管熱輸送デバイスも，作動流体の沸騰・凝縮による相変化によって内部流動を誘起し熱輸送を行う。その構造は加熱部・冷却部ヘッダを細管でつなげた図1(b)に示す構造となっている。蛇行細管型自励振動ヒートパイプとの違いはヘッダ部を有し，作動流体のヘッダ内での内部流動の自由度を高めた点にある。これまでに並列細管熱輸送デバイスについて作動流体の種類や，デバイスの形状寸法を変化させ，熱輸送量と内部流動の関係について調査・研究を行ってきた。その中で同一スケールの蛇行細管型と並列細管型の性能比較を行い，鉛直設置時には蛇行細管型よりも高い熱輸送量を達成することを実験で明らかにした<sup>7)</sup>。しかし，並列細管熱輸送デバイスを含む自励振動ヒートパイプの熱輸送特性は，気液二相内部流動が複雑に変化するため，その予測は難しく未だ現象把握について未解明な部分が多く残されている。ここでは，これまでに行われてきた並列細管熱輸送デバイ

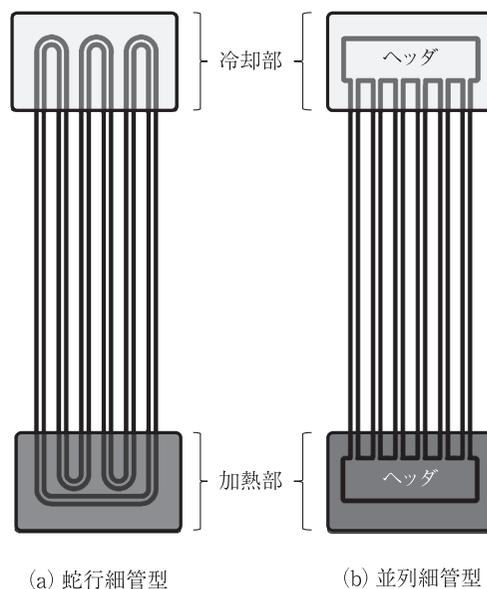


図1 蛇行細管型と並列細管型の細管接続方法の違い

# 見 本

## 第1節 沸騰冷却技術の基礎と開発動向

山陽小野田市立山口東京理科大学 海野 徳幸

### はじめに

持続可能な開発目標のもと、人類社会の更なる発展を目指した動きが加速している。特に、情報分野の進展は目覚ましい。情報サービスは更なる大容量化・高速化が進み続けていて、情報デバイスには小型化と長時間駆動が求められている。情報サービス提供のため、情報デバイス間で通信する際には電気信号が専ら使われているが、電気抵抗がある配線に電流を流せばそこには発熱が発生する。そのため、情報処理及び通信速度が高速になればなるほど、流れる情報量(=電流量)が増加し、それに伴って発電量も増大する。同時に、情報密度が高まることで高発熱密度化する。情報デバイス以外の電子機器も、小型化と高発熱密度化によって、熱による故障の問題がより顕著になってきている。そこで、サーマルマネジメントの重要性が一層高まっている。さらに、これまでに見たことのない新規の情報サービスや情報デバイスを今後開発・展開するにあたっては、これまでの概念にとらわれない新規のサーマルマネジメント手法が必要となるはずである。そこで本節では、従来の空冷・水冷技術を超える省エネルギー冷却手法として注目されている沸騰冷却技術についての開発動向を紹介する。

### 1. Society5.0時代における冷却技術の必要性

サイバー空間上に莫大な量の情報を統合処理し、現実世界にうまく融合することで更なる社会発展を目指す技術が強く求められる時代になった。わかりやすい例としては、スマートシティが挙げられる。例えば、都市全体におけるすべての自動運転電動タクシーのエネルギーコストを最小化することを考える。お昼時の人気店前の通りや工事地点などで起こる渋滞を避けた最適な迂回路を自動的に選択したり、刻一刻と変化する配車要求に対して各タクシーの最短巡回路を瞬時に導き出したりすること、などがイメージしやすいであろう。「都市全体」の自動運転車群を統括制御することで、それぞれの自動運転電動タクシーの孤立動作のみでは決して到達できないエネルギー使用量の究極の効率化が目指せる。またこの時、エネルギー使用量低減とともに提供サービスの利便性も向上する。このようなスマートシティによるトータルのエネルギー使用量削減の取り組みが世界的に広がり繋がっていけば、地球全体のCO<sub>2</sub>排出削減と人々の快適さが同時に達成できる。以上のような例が持続可能な開発ということになる。

## 第2節 電界印加による沸騰熱伝達の高機能化

山形大学 鹿野 一郎

### はじめに

プロジェクターは、従来の映画のような平面スクリーンに映し出す用途に加え、建物に映像を張り合わせるプロジェクションマッピングなどの新たなニーズが出てきている。投影される対象は建物だけではなく、水面、滝、広場、通路など様々な場所で使われ、躍動感のある立体的で動的な映像を楽しむことができる。現在、この光源に使われているのが高輝度レーザダイオードバンクであり、従来の水銀ランプよりも高効率、長寿命である。しかし、高効率とはいえ投影する対象が大きいだけに、発熱量もかなり高くなる。明るさは10,000～50,000 lm、消費電力は1～4 kWであり、家庭用プロジェクター(2,000～4,000 lm, 200～350 W)に比べて発熱量は10倍高くなる。現状の業務用レーザダイオードバンクの発熱密度は、筆者の計算では15～20 W/cm<sup>2</sup>程度である。日本機械学会が報告している技術ロードマップ<sup>1)</sup>にレーザダイオードバンクの発熱量推移を追加したものを図1に示す。加工用レーザ光源の発熱密度はすでに100 W/cm<sup>2</sup>を超えており、今後も右肩上がりでも上昇していくことが予測される。発熱密度が上昇する原因は、製品の高出力化、小型化が原因であり、業務用プロジェクターも今後さら

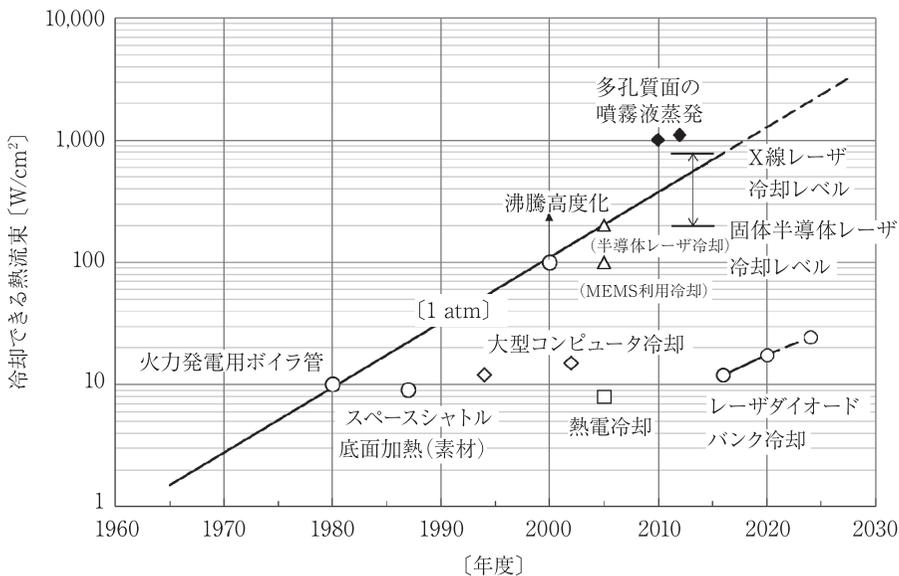


図1 高発熱体の冷却に関する技術ロードマップ(参考文献<sup>1)</sup>より加筆)

## 2. 磁性流体の製法

磁性流体は、強磁性材料である分散微粒子、ベース流体(溶媒)および界面活性剤によって構成されている。安定な磁性流体とは、ベース流体中の強磁性分散微粒子に沈降による固液分離が生じず、さらに微粒子同士が磁気力やファンデルワールス力(分子間力)により凝集せず、安定的に分散が保たれている状態をいう。まず分散微粒子の沈降を防ぐためには、粒子のブラウン運動を利用するため、必然的に粒子の直径は $10\text{ nm}(=10^{-8}\text{ m})$ 程度にする必要がある。また分子間力の凝集を防ぐためには、微粒子表面に界面活性剤を吸着させて合体や凝集を防ぐ必要がある。磁性流体中の強磁性微粒子としては、マグネタイトあるいはフェライトが使用されている。その微粒子の表面には、疎水基を液相側に配するように界面活性剤の吸着層が形成されている。実際の磁性流体の製法としては、粉碎法、共沈法がよく知られている。粉碎法は、微粒子の元となるマグネタイト材料、ベース流体となる有機溶媒および界面活性剤をボールミルによって長時間粉碎し、途中、遠心分離器などで粗大粒子を取り除く作業を行い、磁性流体を作製する方法である。また共沈法は、マグネタイトをオレイン酸イオンで表面被覆し、有機相中に分散させると安定なコロイド溶液が得られる手法である。この方法は粉碎法と比べて短時間に大量の磁性流体を製造できる利点がある。この他に真空蒸着法、プラズマCVD法および電着法などが検討されている。磁性流体の各種合成方法については、関連する参考文献<sup>5)</sup>を確認していただきたい。

## 3. 特性と各種物性値

### 3.1 磁性

磁性流体中の磁性粒子は、その直径が $10\text{ nm}$ 程度の場合、粒子内で磁気モーメントが熱振動のためにランダムな方向を向き、その磁界方向への整列が妨げられることで磁気ヒステリシスを示さない超常磁性としての磁気特性を示す。すなわち外部から加えた磁界に従って磁化されるようになる(超常磁性)。一方、粒子直径が比較的大きい場合、磁壁のない単磁区状態となり、粒子が永久磁石のように磁気を帯びている状態となる。これらの性質は、磁性流体の粘度の磁界依存性や磁化応答速度などにも関係する。磁性流体の磁化に関する詳細な解説は、各種専門書を参考にいただきたい<sup>6,7)</sup>。

### 3.2 レオロジー特性

流体物性は、粘度、密度、体膨張率、熱伝導率および表面張力など多岐にわたる。ここでは

# 見 本

## 第2節 電源フリーの磁性流体循環熱輸送デバイスの開発動向

(株) KRI 藤井 泰久

### はじめに

(株) KRIは1987年2月に大阪ガス(株)の100%出資の元に設立し、ラボとコンサルティング部門を併せもつ日本で唯一の民間の総合受託研究機関として30年以上にわたり研究ビジネスに携わってきた。京都本社には、材料、調査、電池の部門がラボを構えて、大阪支社では、分析・解析、燃料電池、バイオ及び化学プロセス部門がラボを構えている。

発足以来、基幹産業を牽引するトップメーカを中心に、ベンチャー企業含め延べ2,000社以上のクライアント様があり、日本以外にもヨーロッパ、アメリカ合衆国、東アジアなどの各国の企業様からも受託をしている。

### 1. 磁性流体駆動式冷却デバイス

#### 1.1 背景

近年の微細加工技術の進展により、マイクロエレクトロニクスやパワーデバイスなどの高性能化・高密度化・小型化が図られ、デバイスからの発熱は増加の一途にある。これまでは、熱対策としてヒートパイプなどが多く使用されていたが、除熱の問題は一段と深刻になってきており、新たな革新的な熱輸送・冷却技術の開発が待たれている。

弊社では、従来からマイクロポンプを用いた水冷の研究を行っていたが、期待された冷却性能が発揮できない上に、ポンプを作動させる消費電力の問題があった。

これらの問題の解決方法として、新規の磁性流体を用いた循環熱輸送デバイスの研究を進めている。

#### 1.2 磁性流体

磁性流体とは、流体でありながら、磁性を帯び、磁石に引き寄せられる性質を持った黒色・不透明の機能性流体の一つである。また、粒子径10 nm程度の強磁性微粒子に界面活性剤を附着させ、水や油の母液中に安定分散させたコロイド溶液である。この磁性流体の中でも、感温磁性流体は、常温域において流体温度の上昇に伴い磁化が著しく減少する性質(感温磁化特性)を有するため、磁性流体の動力的特性を磁場及び温度により制御することが可能である。

## はじめに

絶縁性の液体に高電界を印加すると電気力が作用して流動が起きる。ファンなどと異なり機械的な動きがなく、冷媒として利用されているフッ素系冷媒に適用できるため、ポンプをはじめとし電気流体力学(EHD)流動を利用した熱輸送デバイスが研究開発されている。本章ではEHDの基礎、EHDポンプ、気液二相流への応用について筆者の研究内容も含めて紹介する。

## 1. 序論

絶縁性の液体に高電界をかけると電気力が発生し流動が起きる。絶縁性の液体に働く電気力は以下の式で表される<sup>1,2)</sup>。

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} - \frac{1}{2} \mathbf{E}^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left\{ \mathbf{E}^2 \rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{f}$ は電気力ベクトル、 $q$ は電荷密度、 $\mathbf{E}$ は電界、 $\varepsilon$ は誘電率、 $\rho$ は密度である。第一項はクーロン力、第二項は誘電泳動力、第三項は電歪力である。クーロン力は液体中の電荷、つまりイオンに働き、後の二項は分極により発生する力である。

クーロン力を利用した液体ポンプ(イオンドラッグポンプ)は1960年に初めて開発<sup>3)</sup>され、現在は3つの動作原理の異なるポンプ、イオンドラッグポンプ、コンダクションポンプ、インダクションポンプが存在する。誘電泳動力に関しては、誘電率の空間勾配が必要なため高い温度勾配や気液界面の存在が必要であり、沸騰で発生する気泡などに作用させることができる。電歪力に関しては応用例がまだないと思われる。また空気でもコロナ放電や誘電体バリア放電(DBD)を利用した流れの生成、流体制御など類似の現象が存在し研究が多く行われているが、本章では液体を対象とする。

EHDによる流動は電極を設置するだけなので、構造がシンプル、軽量、機械的な可動部がない、騒音・振動がない、電氣的な流動制御が可能などの特徴があり、ポンプ、アクチュエータ、インクジェットプリンタ、熱輸送などへの応用研究が行われている。本章では特にポンプ、熱輸送に関して記す。

## はじめに

熱伝導は通常、格子振動によるエネルギー輸送もしくは電子の移動によるエネルギー輸送によって説明される。格子振動による輸送はフォノン輸送として、電子による輸送はエレクトロン輸送として扱えば、熱伝導を考慮することができ、金属の高い熱伝導率が導電度とローレンツ数によって結び付けられることや、微細構造の持つ特殊な熱伝導についても定量的に扱えるようになってきた<sup>1,2)</sup>。微細構造における熱伝導では、熱エネルギーを輸送するフォノンもしくはエレクトロンの輸送が散乱によって抑えられるため、見かけの熱伝導率として低下することがよく知られている。特に薄膜の熱伝導率は、薄膜表面における散乱が強くなり、膜厚が薄くなるほどフォノンやエレクトロンの輸送が抑えられ、見かけの熱伝導率が低下することも解析や実験で示されている。ところが、薄膜表面には表面フォノンポラリトンと呼ばれる電磁波が薄く存在しており、それらも熱を輸送することが示されるようになった<sup>3,4)</sup>。解析では、見かけ上表面の効果が大きくなる薄膜では、膜厚の減少によって熱伝導率が増加することが示されている<sup>5,6)</sup>。微細加工技術により超薄膜を生成し、膜厚の減少と共に増加する見かけの熱伝導率を測定した結果<sup>7)</sup>について概説する。

## 1. 表面フォノンポラリトン

物質の表面には図1に示すように薄く電磁波が閉じ込められており、フォノンとの相互作用から生まれるため、表面フォノンポラリトンと呼ばれている。物質内に電場が生じるが、光学フォノンと混成状態になっている量子をポラリトンと呼ぶ<sup>8)</sup>。物質と光の相互作用は誘電関数に含まれているため、物体内部の分極を考慮してマクスウェルの方程式を解けば、ポラリトンの波数 $k$ と角周波数 $\omega$ の関係(分散関係)が得られ次のように書ける。

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = \varepsilon \quad (1)$$

真空中の光速を $c$ 、対象となっている物質の誘電率を $\varepsilon$ としている。式(1)をよく見れば、右辺の誘電率の実部が負になる場合、ポラリトンは物質内に存在できないこともわかる。この場合、最初に述べた表面フォノンポラリトンと呼ばれる電磁波となる。この表面フォノンポラリトンの分散関係もマクスウェルの方程式を物質表面で連続とする条件下で解くと得られ(図2)、波数 $\beta$ 、周波数 $\omega$ とすると以下のような平面に平行に進む横波の分散関係が得られる。

# 見 本

(株) フォーマルハウト・テクノ・ソリューションズ 柏尾 南壮

## 1. 放熱の理由

人間を含む多くの生物は生命維持のため酸素を吸い、二酸化炭素を排出する。電子部品は機能を維持するため電力を消費し、熱を排出する。駆け足などで酸素の消費量が増えると二酸化炭素排出が増加するのと同様、電子部品が高速動作すると消費電力が増え、排熱も増大する。

2019年から第五世代通信規格(5G)サービスが始まり、スマートフォンおよび基地局は世界的な規模で5G対応が進んでいる。5Gの特徴の一つは大容量データ通信である。通信速度の理論値は毎秒10 Gビットで4Gの5倍となる。これは時間あたりで処理するデータの増加を意味し、電子部品は消費電力が増え、排出される熱も増大する。5G対応通信機器がクリアする必要がある課題の一つは熱問題という点で識者の考えは概ね一致している。

## 2. 放熱の激しい電子部品

電子機器の中で最も多くの電力を消費するのは、プロセッサであることが多い。5Gスマートフォンおよびミニ基地局も同様である。パソコンなどでCPUと呼ばれるこの部品は通信機器では「アプリケーションプロセッサ(以下「AP」)」と呼ばれる。スマートフォンで2K動画などを視聴する場合、APはフル稼働状態となり、大量の電力を消費し、大量の熱を放出する。

次に消費電力が大きい部品はDRAM(Dynamic Random Access Memory)と呼ばれるメモリ部品である。APと連動するため、APがフル稼働するとDRAMもフル稼働となり、大量の熱を放出する。多くの5Gスマートフォンおよびミニ基地局において、データ処理効率を上げ

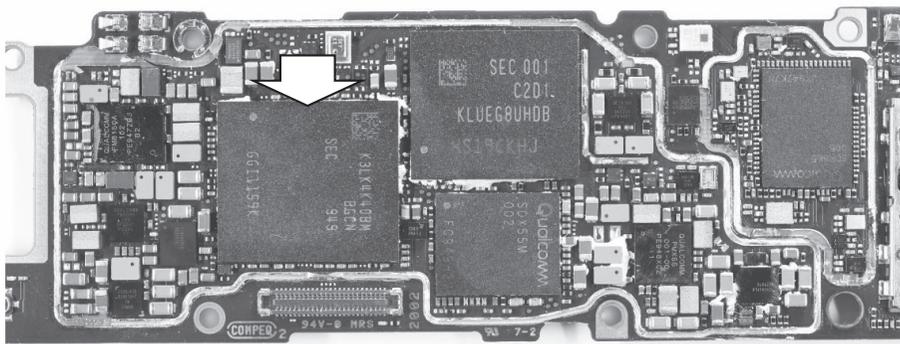


図1 中国Xiaomi(シャオミ)社Mi10 Pro 5Gスマートフォンに搭載されたAPとDRAMは二階建構造(矢印部)