電子機器における熱対策

—放熱材料の現状と将来—

折橋正樹* 木村景一**

1. はじめに

超 LSI の高集積化, 高速化にともない, 超 LSI を用いた小型電子機器における内部発熱の問題はより深刻になり, 温度上昇による超 LSI チップ自体の誤動作の問題などが発生するようになってきた⁽¹⁾.

これらの電子機器は, 超 LSI チップ, それらを実装した回路基板, 表示素子におけるバックライト, バッテリ等が発熱源となり, 機器内部および筐体を含む機器全体の温度上昇をもたらす. また, 常時ポケットなどに入れて使用するウェアラブル機器においては, 人間の皮膚との接触が長時間に及ぶため, 機器筐体の表面温度が体温よりも高いと低温やけどが発生すると危惧されている. さらに, 超 LSI の高集積化, 高速化による発熱密度(単位面積あたりもしくは単位体積あたりの発熱量)は増大する傾向にあり, これらを用いる小型電子機器の温度管理, すなわち放熱技術はより重要となり始めている.

例えば, ノートパソコンの場合, 筐体は A4 サイズ, B5 サイズ, さらにより小型化が進んでいるが, 同時に CPU (Central Processing Unit) のクロック周波数やハードディスクドライブの回転数は増加し, その結果, 発熱量が増大している. その一方で, 冷却ファンの騒音を耳障りにならない程度まで低下して欲しいという要望があり⁽²⁾, より効率的な冷却方法の試みとして, ノートパソコンから冷却ファンを取り除き, 代わりに水冷により CPU などの冷却を行う装置が内蔵されている例もある⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. また, 発熱密度の観点から見ると, ソニーのデジタルカメラにおいては, 図 1 に示すよう

図1 デジタルカメラの消費電力, 体積と発熱密度の傾向.

に新型モデルの発売により, CCD (Charge-Coupled Device) の画素数向上や動画撮影機能を充実させながらも消費電力を低減させているが, 本体体積も時間の経過と共に小さくなる傾向にある. その結果, 単位体積あたりの発熱密度 P_d はほぼ一定であるにもかかわらず, 小体積化により放熱面積は小さくなり, この傾向は, 今後も続くと思われる. これらの小型電子機器の温度上昇を抑制するには消費電力を小さくすることが根本的な解決策であるが, 機器の小型化と多機能化の要求が強くなり, 結果的に機器の発熱密度が増大し, 各部の温度が上昇する傾向にある. これらの小型電子機器に対する熱対策に関する詳細な説明は他書に譲るとして⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 本文で

* ソニーイーエムシーエス株式会社マイクロデバイスセンター実装ソリューション部(〒108-6201 東京都港南2-15-3)

** ソニーイーエムシーエス株式会社マイクロデバイスセンター実装ソリューション部統括課長

Thermal Management for Electric Appliances —Heat Dissipative Materials/Now and Future—; Masaki Orihashi, Keiichi Kimura (Micro Packaging Solution Department, Micro Device Center, Sony EMCS Corporation, Tokyo)

Keywords: thermal conductive materials, heat conductor, heat spreader, thermal resistance, thermal interface material, phase change material, graphite sheet, thermoelectric materials, radiation

2002年12月24日受理

は放熱材料やそれを用いた放熱デバイスおよび最近の研究開発動向について紹介する。

2. 小型電子機器における放熱の考え方

小型電子機器における放熱には、さまざまな方法が考えられるが、基本的には、(1)熱伝導、(2)対流、(3)熱放射により行われる。ICからの熱の移動を例にとると図2のようなになる。ICチップにおいて発生した熱はまず、ICパッケージ内に熱伝導により広がる。次いで、一部は熱伝導によりリードフレームを通じてプリント基板へ伝播され、また一部は熱放射により周囲に放散される。熱伝導によりプリント基板へ伝播した熱もやがて熱伝達、熱放射により周囲に放射され、最終的にはすべての発生した熱は空气中へ放出される。図3は発熱部から大気への放散に至る熱の移動経路およびそれに用いられる材料、デバイスを示したものであり⁽⁵⁾⁽⁶⁾、図4はヒートコンダクタおよびヒートスプレッダの概略図である。ICチップ等で発生した熱は、直接大気中へ放散するか、熱を移動させるヒートコンダクタもしくは熱を分散させるヒートスプレッダへ伝達される。その時、発熱体から効率よく熱をピックアップし伝達するためグリス、放熱スペーサ、フェーズチェンジ材などを用いて、境界面の密着性を改善させることが必要になる。ヒートコンダクタやヒートスプレッダ

図2 ICからの熱の伝わり方。

図3 放熱材料、デバイスの分類(文献(5),(6)等をもとに作成)。

図4 熱の伝わり方。
(a)ヒートコンダクタ、(b)ヒートスプレッダ。

から大気中へは、自然対流、または冷却ファンによる強制対流による熱伝達、もしくは赤外線形で放射される熱放射（輻射）によって熱が移動する。

3. 放熱材料およびデバイス

(1) ヒートコンダクタおよびヒートスプレッダ

(a) 放熱用充填材

発熱体と熱移動させる材料もしくはデバイスの間に空気層が存在すると、空気熱伝導率が $0.024 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (273 Kにおいて)⁽⁷⁾と小さいために熱が伝わりにくくなる。そのため、発熱体からヒートスプレッダやヒートコンダクタに効率よく熱を伝達するために、これらの境界面に形成される隙間を埋める材料を挿入することがある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この用途のための材料を本文では放熱用充填材と呼ぶことにする。一般に、この放熱用充填材の熱伝導率は後述する金属やセラミックスなどに比べるとかなり小さいが、空気層を無くすためにグリスや放熱スペーサ、フェーズチェンジ材と呼ばれるものが使用される。

放熱スペーサはシリコンゴムやアクリル系のゴムなどにアルミナ(Al_2O_3)などのセラミックスや金属粒子が含有されたシートである。放熱スペーサの厚さが $0.2 \sim 4.0 \text{ mm}$ 程度のものが市販されているが、比較的軟質であるため表面の凹凸に追従することが可能であり、貼付も容易なため基本的な熱伝達の改善法として使用される。

シートなどの材料の熱輸送能力を示す指標として、熱伝導率ではなく熱抵抗 R_T が用いられる。熱抵抗 R_T は 1 W の熱エネルギーが移動する最小温度差を示す値であり、 $[\text{°C/W}]$ の単位で、式(1)により表される。

$$R_T = (T_a - T_b) / Q_c \quad (1)$$

$$= d_i / S_i \kappa_i \quad (1)'$$

ここで、 T_a 、 T_b はそれぞれ放熱用充填材の対向する二面の温度、 Q_c は発熱体の発熱量、 d_i は放熱用充填材の厚さ、 S_i は放熱用充填材の面積、 κ_i は放熱用充填材の見かけの熱伝導率である。

発熱体、放熱用充填材、ヒートシンクを図5に示す。この2点a-b間の熱抵抗を小さくするためには、式(1)'からもわかるように、放熱用充填材は

図5 放熱スペーサと熱抵抗.

- ① 柔らかく、密着性がよい
- ② 熱伝導率が高い
- ③ 放熱用充填材の厚さが薄い

の条件を満たすことが必要である。熱抵抗は発熱体と放熱用充填材の実効接触面積に大きく依存するため、放熱用充填材が軟質の場合、発熱体などの表面の凹凸に容易に追従し、発熱体と熱伝達物質間の実効接触面積を増大させることが出来る。さらに、放熱用充填材の熱伝導率を高くするためにフィラーとして高熱伝導性のセラミックスなどの材料を用いるか、フィラーの含有量を増加させることが不可欠である。フィラー材としては、放熱スペーサに絶縁性が必要であり、コストの点からも考えて、一般的にアルミナ(Al_2O_3)が用いられている。それ以上の熱伝導性を持たせるため、窒化ホウ素(BN)⁽¹⁰⁾や窒化アルミニウム(AlN)などのセラミックスおよび絶縁処理した金属フィラーが用いられることもある。一般に、フィラーの含有量が増加すると、放熱スペーサは硬くなって発熱部品との密着性が低下するため、実際は柔軟性と高い熱伝導率を満足するようにフィラー含有量を設計する。

市販の放熱スペーサの熱伝導率は $1\text{ Wm}^{-1}\text{ K}^{-1}$ から $10\text{ Wm}^{-1}\text{ K}^{-1}$ を越えるものまで存在するが、実際は熱伝導率の測定は熱をすべて測定試料に伝達することが難しいため、正確な値を出すことが困難であり、また測定手法や測定条件(シートにかかる荷重等)によってシートの厚さや発熱体との接触面積が変わるため熱伝導率の測定値が変化する。そういった意味で放熱スペーサ等、放熱用充填材の性能を知るには熱伝導率のみでなく密着性なども同時に考慮している熱抵抗を比較した方がよい。しかし熱抵抗も放熱用充填材にかかる荷重などの測定条件に大きく影響するため、各社の放熱用充填材の性能を比較する上では、今後、評価基準を統一していく必要がある。

一方、グリースは熱伝導率が $1\text{ Wm}^{-1}\text{ K}^{-1}$ 前後と小さいにもかかわらず、薄く塗付して用いるため、熱抵抗を小さくすることができる。しかし、均一に薄く塗付することは難しく、高温では流れ出たり、かつ長期の使用では材質が劣化したりする欠点があるため、電子機器ではあまり使用されない。

この欠点を克服するため、ノートパソコンのCPUのように発熱量の大きなデバイスとヒートシンクやヒートスプレッダなどの放熱デバイスとの隙間を埋めるために、フェーズチェンジ材⁽⁸⁾⁽⁹⁾と呼ばれる材料が市販されている。フェーズチェンジ材は高分子と高熱伝導性セラミックスフィラーで構成され室温で薄いシート状であるが発熱体が $323\sim 333\text{ K}$ 程度になると高分子が軟化し隙間を埋め、温度が下がるとふたた

び固化するためにシートのような扱いやすさとグリースのような低熱抵抗をもつ。また、フェーズチェンジ材は温度上昇時にもグリースのように流れ出ることが無く、さらに発熱体から剥離する場合にも加熱、軟化させて剥離することが出来る利便性がある。

(b) ヒートパイプ

代表的な熱コンダクタとして用いられるデバイスとして、ヒートパイプが挙げられる。ヒートパイプとは細い金属パイプの中に少量の液体が封入され、高温側で内部の液体が気化することにより熱を奪い、低温側で液化し放熱することにより熱を輸送するデバイスである。このデバイスの詳細は他書に譲る⁽¹¹⁾が、ヒートパイプは鉛直方向に対して設置する角度により熱輸送特性が変化し、また発熱体から放熱部まで熱伝達させる上で、自由に曲げることや密集した基板間の隙間を這わせることができないなどの制約がある。

(c) グラファイトシート

発熱体から伝えられた熱を離れた位置に移動させ分散させる熱コンダクタやヒートスプレッダーとして用いられる素材の一つとして、グラファイトシートがある。グラファイトシートは黒鉛が層状に重なり、熱伝導率 κ や電気伝導率に異方性を持ち、自由に曲げることが出来、軽量なシートである。市販のグラファイトシートは密度が約 $1\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 、シートの厚さ方向の熱伝導率は $5\sim 10\text{ Wm}^{-1}\text{ K}^{-1}$ 、面に平行な方向の熱伝導率が $200\sim 800\text{ Wm}^{-1}\text{ K}^{-1}$ 程度までである⁽¹²⁾。

一般的には、グラファイトシートは発泡させた膨張黒鉛粉末を圧延することにより連続作製される⁽¹³⁾。

また、より高い熱伝導率を確保するために、ポリイミドなどの高分子シートを焼成して、面内に炭素層を整列させる方法もある⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかし、この方法ではシートを一枚一枚焼成しなければならず、製造コストが高くなるため、一般には前者の方法を用いて作製する。

グラファイトシートは軽量でフレキシブルであるという利点があるが、折り曲げに弱く導電性があることから小片が剥離した場合にはショートする危険性がある。折れにくくかつフレキシブルであり、絶縁性を持たせることが電子機器に採用される上での課題となる。

(d) 高熱伝導性セラミックス

窒化アルミニウム(AlN)や窒化珪素(Si_3N_4)は構造材料として用いられてきたが⁽¹⁶⁾、熱伝導率が高いため、近年では放熱材料として脚光を浴びるようになった。 Al_2O_3 や Si_3N_4 、 AlN は高絶縁性と高熱伝導性を持つため、電源系などの発熱密度が高い回路基板に用いられる。図6は高熱伝導性セラミックスを用いた基板を示している。これらのセラミックス基板はDBC(Direct Bonding Copper)やめっきにより銅やアルミニウム配線および電極が形成される。ここで、DBCとはチタンやジルコニウムなどの活性金属の酸化物を利用して、銅板とセラミックス板を強固に接合し、エッチングによって電極パターンを形成する方法である。 AlN の物性値として、誘電率は $8.8(1\text{ MHz})$ ⁽¹⁷⁾で、熱伝導率は $160\sim 200$

$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度である。熱伝導率は結晶粒径のみならず構成する材料の純度や結晶粒界に存在するイットリア (Y_2O_3) やカルシア (CaO) などの焼結助材⁽¹⁸⁾や含有される酸素量⁽¹⁹⁾にも依存する。実用材の熱伝導率の最高値は $220\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ にもおよび⁽²⁰⁾、レーザーダイオード (LD) の冷却などの用途に検討されている。 Si_3N_4 の誘電率は $7.8 (1\text{ MHz})$ ⁽¹⁷⁾ で、熱伝導率は $\sim 90\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と AlN の値よりも低い。 Si_3N_4 の破壊靱性値は $5.9\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であり⁽¹⁷⁾、 AlN の値 $2.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の 2.7 倍と優れているために熱衝撃に対して強い利点がある。さらに近年、焼結助剤を Al_2O_3 から酸化マグネシウム (MgO) などに変えるなどの工夫によって熱伝導率を $120\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ まで改善した Si_3N_4 も開発されている⁽¹⁷⁾。これらの素材は金属に比べコストが高いため、これまではおもに業務用機器に用いられていたが⁽²¹⁾、高熱伝導性および高絶縁性材料であるために、コストが下がれば、コンシューマ商品でも使用されるものと考えられる。

(e) 金属

グラファイトシートやセラミックスなどの新素材だけでなく、アルミニウムや銅などもヒートコンダクタ、ヒートスプレッドとして用いられている。純銅や純アルミニウムの 273 K における熱伝導率はそれぞれ 403 および $236\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ にも達する⁽²²⁾。例えば、ソニーでは効率よく CPU を冷却するために、ヒートスプレッド、ヒートパイプ、フィンおよび冷却ファンが一体化された冷却システムをノートパソコンに導入している⁽¹⁾。冷却ブロックはアルミダイキャストで成形し、そのブロックには高熱伝導率の純アルミニウムに近い組成が用いられている。図 7 に示す VAIO-GR シリーズのようなハイスペックモデルでは、さらに CPU からの熱を効率よく放熱するために、ヒートスプレッドには高純度銅 (99.96%) を使用している。これらのように従来からある素材も工夫することにより放熱部材として使用可能である。

(f) ペルチェ素子⁽²³⁾

図 8 のように p 型半導体と n 型半導体を金属電極 c および h で結合して、n 型半導体側にプラスの電圧を加えると電流が流れ、電極 c 側で吸熱、電極 h 側で発熱する。この現象をペルチェ (Peltier) 効果と呼び⁽²³⁾、この原理を用いた素

図 6 銅回路セラミックス基板(写真提供：榊東芝)。

子はペルチェ素子として主に局部冷却に用いられ、強制的な熱の移動を実現する。なお、半導体材料として、一般的にビスマス-テルル (Bi-Te) 系化合物半導体が用いられ、基板材料には高熱伝導性と電気絶縁性が必要であるため、前述の Al_2O_3 もしくは AlN が用いられる。この素子の利点としては、電子や正孔が熱を運ぶため、熱を短時間で移動させることや、温度センサによるフィードバック回路を構成し、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の範囲で細かな温度制御を行うことが可能であることがあげられる。しかし、その一方で、冷却対象部品の消費電力よりも大きな電力を素子に投入する必要があることや製造コストが高いという短所がある。また、素子の冷却効率を上げるために、素子の放熱側に冷却ファンやフィン等の放熱デバイスを用い冷却しなければならない。そのため、業務用として、例えば温度制御が不可欠な通信用 LD パッケージなどに使用されているが⁽²⁴⁾、コンシューマ商品向けとしては、デスクトップパソコンの CPU の冷却用など⁽²⁵⁾一部を除きこれまで導入されてこなかった。

ペルチェ素子は、図 8 に示すように単純な構造のため、素子の性能を上げるには材料の熱電特性を向上させることが不可欠である。材料の熱電特性を表す指標として、性能指数 Z (単位: K^{-1}) が用いられ、式 (2) で表される。

$$Z = \alpha^2 / \rho \kappa \quad (2)$$

図 7 ノートパソコンおよび放熱システム。

図 8 ペルチェ素子の概略図。

α はゼーベック(Seebeck)係数(1 Kの温度差に対する起電力, 単位: V K⁻¹), ρ は電気抵抗率(単位: Ω m), κ は熱伝導率(単位: Wm⁻¹ K⁻¹)である. この性能指数 Z の値が大きいほど, 材料のペルチェ素子としての冷却性能が高い. 図9にBi-Te系材料のp型材とn型材の性能指数の平均値と開発年代の関係を示す⁽²⁶⁾. これより徐々にであるが材料の熱電性能が向上していることがわかる.

近年ではペルチェ素子を構成する材料に関する研究発表は少なくなったが⁽²⁷⁾, 各社は素子の冷却性能向上および小型化を進め, 最近では図10にあるような小型の素子が開発されている⁽²⁸⁾.

一方, ペルチェ素子を用いた冷却システムとしての研究発表も国内では多くはない⁽²⁷⁾⁽²⁹⁾. ペルチェ素子を冷却システムとして使用している各社がノウハウとして蓄えているのみであると考えられる. 今後, 材料のみならずアプリケーションや冷却システムとしての研究報告の拡大が望まれる.

(2) 熱放射材料

大気中に熱を放散するには対流と熱放射があり, 最近では, 熱放射を利用した放熱材料が注目を集めている. 材料から大気への放射伝熱量 Q_r (単位: W)は式(3)で表される⁽³⁰⁾.

$$Q_r = 4\sigma\epsilon_1 S_1 T_m^3 (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$T_m = (T_1 + T_2)/2 \quad (4)$$

ここで, S_1 は発熱体の表面積, T_1 は発熱体の表面の温度

(単位: K), T_2 は環境温度, ϵ_1 は発熱体の放射率, σ はステファン-ボルツマン(Stefan-Boltzmann)定数であり, その値は $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [Wm⁻² K⁻⁴]である. よって放射による伝熱量 Q_r は, 発熱部と大気との温度差と表面積および放射率に依存する. 表1に代表的な材料の放射率の値を示す⁽³¹⁾. 一般的に金属光沢を持つ材料は放射率が低く, 大気中に熱を放射しにくい傾向がある.

また, 図11に環境温度 $T_2 = 300$ Kにおいて放射率 ϵ_1 を変化させた場合の発熱体からの単位面積あたりの放射伝熱量 Q_r' と発熱体の表面温度 T_1 の関係を示す. 図より, 環境温度との温度差の小さい範囲では熱放射による伝熱は極めて小さいが, 温度が上昇するほど, また放射率が高いほど熱放射の影響は大きくなる.

熱放射現象を利用した例として, 大気中に効率的に熱放射することを目的として, 表面を放射率を高める塗料で処理した銅板が市販されている⁽³²⁾(図12). この銅板の放射率は0.86であり, 銅板上に亜鉛めっき, 下地処理, その上に放熱性皮膜が乗った積層構造⁽³³⁾となっている. また, この高熱放射銅板の利点としては, 下地や皮膜などにクロムを含まず, 加工に際して皮膜が剥れにくく, シールド材として使用する場合は, 導電性があるためアースを取ることが可能である.

この素材は既にCD-Rドライブ筐体⁽³⁴⁾等にも使用されており, またPDP(Plasma Display Panel)や液晶ディスプレイ

図9 ペルチェ素子のp-nの性能指数の平均値 Z_{pn} と開発年度の関係⁽²⁶⁾.

図10 小型ペルチェ素子 (写真提供: セイコーインスツルメンツ株).

表1 各種物質の放射率⁽³¹⁾.

物質	表面状態	放射率(範囲)
アルミニウム	研磨面	0.04~0.06
	アルマイト処理面	0.7~0.9
銅	研磨面	0.02~0.04
	研磨面	0.06
アルミナ		0.6~0.7
プリント配線板		0.8
塗装	黒, 白ペイント	0.87~0.95

図11 発熱体の表面温度と単位面積あたりの放射伝熱量との関係.

図12 高熱放射性鋼板(写真提供：㈱神戸製鋼所)。

のバックパネル等に検討されている。また同じ機能を持つ鋼板が数社から発表されている⁽³⁵⁾。アルミニウムは鋼板より熱伝導率が高く、かつ軽量であることから放射率の高いアルミニウム板が望まれていた。最近、熱放熱性に優れたアルミニウム板が開発され、発表された⁽³⁶⁾。

また、筐体や発熱体に塗布するだけで、その放射率を向上させる塗料も開発されている⁽¹⁾。一般的に、セラミックス材の放射率は高いが、この塗料には数種類のセラミックス粒子が含有され、それにより放射率を高めることが出来る。

この塗料の特徴として、①鋼、アルミニウム、銅などに塗布が可能、②スクリーン印刷が可能、③塗布後の曲げ加工も可能、であることがあげられる。

4. 今後の展望

放熱を考慮する上で、放熱デバイスの改良のみならず、今後ますますそれを構成する材料が重要視されていくであろうと考えられる。例えば、筐体材料のコスト低下や軽量化のため、金属材からの置き換えとして、熱伝導率を高めた樹脂材料が開発された⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。この材料にはセラミックスのフィラーと金属が含有されているため、材料の密度は $2.5 \sim 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ でアルミニウムと同程度であり、また、成型に用いられる金型の寿命はプラスチック材用に比べて短いものと考えられる。そのため、フィラー材も軽量で熱伝導率が高い炭素繊維などに置き換わることも考えられる。また、各方面で注目を浴びているカーボンナノチューブは熱伝導率が高いことが期待され⁽³⁹⁾、将来、筐体材料や放熱スペーサなどにも応用されるものと考えられる。上記のような例に限らず、熱伝導率が高い材料を複合化した新規放熱材料や、その材料を用いた放熱デバイスが開発されていくものと考えられる。

本文中でも述べたが、放熱デバイスは用途ごとに多岐にわたり、ここで取り上げなかった材料やデバイスと組み合わせで使用されることは言うまでもない。そのため、放熱デバイスのうち材料の物性が大きく影響するいくつかの例について

紹介した。

文頭でも述べたように、最近放熱に関する解説や書物が増えている。本稿で紹介しきれなかった部分や不十分である点はこれらの解説等を参照されたい。

文 献

- (1) 白倉資大：日経エレクトロニクス，4月22日号，(2002)，pp. 61-70.
- (2) 大槻智洋，田之倉保雄：日経エレクトロニクス，7月1日号，(2002)，pp. 65-78.
- (3) 近藤義広，中川 毅：日経エレクトロニクス，7月15日号，(2002)，pp. 136-138.
- (4) 加藤小也香：日経ビジネス，11月11日号，(2002)，pp. 66-68.
- (5) 国峰尚樹：エレクトロニクスのための熱設計完全入門，日刊工業新聞社，(1997).
- (6) 小木曾 健：電子回路の熱設計，工業調査会，(1989).
- (7) 国立天文台編：理科年表，丸善，(2002)，pp. 404.
- (8) 栗田治夫，丹沢智弥：機能材料，**19**(1999)，54-61.
- (9) 電子機器部品用放熱材料の高熱伝導化および熱伝導性の測定・評価技術，技術情報協会，(2003).
- (10) 例えば特許第3285705号.
- (11) 伊藤謹司，国峰尚樹：トラブルを避けるための電子機器の熱対策設計，日刊工業新聞社，(1992)，pp. 116-124.
- (12) 田尾本 昭：機能材料，**19**(1999)，27-33.
- (13) 例えば特公昭44-023966.
- (14) M. Murakami and S. Yoshimura: Synthetic Metals, **18**(1987)，509-514.
- (15) M. Inagaki, S. Harada, T. Sato, T. Nakajima, Y. Horino and K. Morita: Carbon, **27**(1989)，253-257.
- (16) 日本金属学会編：金属便覧改訂6版，(2000)，pp. 92-94.
- (17) 祖父江昌久，今村寿之，手島博之，濱吉繁幸：日立金属技報，**17**(2001)，77-80.
- (18) 水谷惟恭，篠崎和夫：セラミックス，**26**(1991)，738-743.
- (19) 上野文雄，柘植章彦：セラミックス，**26**(1991)，744-748.
- (20) 日刊工業新聞，7月25日号，(2002)，9面.
- (21) 斎藤涼夫，江原 実：東芝レビュー，**57**(2002)，2-7.
- (22) 国立天文台編：理科年表，丸善，(2002)，pp. 403.
- (23) 上村欣一，西田勲夫：熱電半導体とその応用，日刊工業新聞社，(1988).
- (24) 木林靖忠：まてりあ，**38**(1999)，750-754.
- (25) 梶川武信など編：熱電変換システム技術総覧，リアライズ社，(1995)，pp. 61-65.
- (26) 坂田 亮編：熱電変換工学—基礎と応用—，リアライズ社，(2001)，pp. 166-176.
- (27) 熱電変換シンポジウム2002論文集，熱電変換研究会，(2002).
- (28) 山下勝己：EDN Japan，**9**(2002)，19-20.
- (29) 木谷文一：電子技術，**43**(2001)，30-33.
- (30) 国峰尚樹：エレクトロニクスのための熱設計完全入門，日刊工業新聞社，(1997)，pp. 36-40.
- (31) 伊藤謹司，国峰尚樹：トラブルを避けるための電子機器の熱対策設計，日刊工業新聞社，(1992)，pp. 35.
- (32) 白倉資大：日経エレクトロニクス，1月28日号，(2002)，pp. 28-29.
- (33) 富岡恒憲：D&M，**569**(2002)，22.
- (34) 浅野純也：ASCII，**26**(2002)，108-112.
- (35) 白倉資大：日経エレクトロニクス，8月12日号，(2002)，pp. 54.
- (36) 日本経済新聞，11月24日号，(2002)，7面.
- (37) 白倉資大：日経エレクトロニクス，10月7日号，(2002)，pp. 26-27.
- (38) 上利泰幸，紙谷畑恒雄：日経エレクトロニクス，12月16日号，(2002)，pp. 127-136.
- (39) 齋藤弥八：まてりあ，**41**(2002)，813.