電子冷却

岡 本 晃[†], 今 泉 久 朗[†]

熱電素子を用いた電子冷却について、その原理の説明と材料の歩み、冷却デバイスの種類を紹介し、ついで電子冷却の最近の応用例を解説する。

1. ま え が き

電子冷却とは一般にペルチエ効果を利用した半導体のヒートポンプで、その現象は1834年、フランスのPeltierの発見に始まる。しかし、古い歴史の割にこの冷却デバイスはなじみが薄く、ペルチエ効果と熱力学的に可逆なゼーベック効果を用いた熱電対とは知名度に大きな差がある。実用的デバイスは1950年代中ごろになって初めて出現したためといわれるが、電子冷却の特徴を生かした用途が少なく、熱電素子のコスト、信頼性も技術者を満足させるほど成熟していなかったことが主因と思われる。

ペルチエ効果は、異種導体(または半導体)の接合部に電流が流れるとその接点で吸熱・発熱が起こる現象を指し、吸・発熱量は接点を流れる電流に比例する。吸・発熱量を q 、電流を I とすると、

$$q = \pi I \quad (1)$$

π はペルチエ係数

π の大きな物質を捜せば、より低温まで到達することができる。 π を求めるために吸熱・発熱量 q を精密に測定するのは困難なので、通常は温度差と電圧を計るだけで済む熱電能 α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)を測定する。

α と π は Kelvin 関係式から、

$$\pi = \alpha T \quad (2)$$

T は絶対温度

で求められる。したがって、吸・発熱量 q は、

$$q = \alpha T I \quad (3)$$

と表され、電流を流すほど冷えるまたは加熱できることになる。実際は導体のジュール熱のため、極大値が

図1 電子冷却素子説明図

存在する。図1の熱電素子の原理図で説明する。

熱電素子の内部抵抗を ρ 、熱伝導率を κ とすると、正味の吸熱量 q は、

$$q = \alpha T_c I - \frac{1}{2} \rho I^2 - \kappa (T_h - T_c) \quad (4)$$

第1項：ペルチエ吸熱

第2項：ジュール熱

第3項：熱伝導による高温側から低温側への熱の戻り

吸熱量が最大($q_{\max}$)になるには、電流 I が $I = \alpha T_c / \rho$ のときであって、

$$q_{\max} = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2\rho} - \kappa (T_h - T_c) \quad (5)$$

このとき吸熱部の熱の出入りを絶つと($q_{\max} = 0$)最も温度差が生まれ冷えることになる。この最大温度差を $\Delta T_{\max} (= T_h - T_c)$ とすると、

$$0 = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2\rho} - \kappa \Delta T_{\max} \quad (5')$$

$$\Delta T_{\max} = \frac{\alpha^2}{2\kappa\rho} T_c^2 = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (6)$$

[†] 株式会社小松製作所 電子技術研究所

“Thermoelectric Cooling” by Akira Okamoto and Hisaakira Imaizumi (Electrotechnical Laboratories, Komatsu Ltd., Hiratsuka)

図2 p型熱電材料の性能指数

ここに,

$$Z = \alpha^2 / \kappa \rho \quad (7)$$

Z は性能指数 (Figure of Merit) と呼ばれ、熱電の性能を見るためには重要な指標である。 Z を構成するパラメータ α , κ , ρ は物質固有の定数であるから、 Z の大きな物質を選べばよい。一般に α , ρ , κ は温度の関数であるので、使用温度範囲で Z が可能な限り大きくなるように物質を選ぶことが重要である。例えば、室温付近で Z が大きい物質は Bi_2Te_3 (テルル化ビスマス) とその同族体からなる混晶系である。

図2に Z の温度特性を示す。150 K 以下で Z は 1.5×10^{-3} 以下になり、 Bi_2Te_3 では ΔT がほとんどとれないことがわかる。

2. Bi_2Te_3 系熱電材料

現在、熱電素子の材料として最もポピュラーなのは、 Bi_2Te_3 系材料である。この章ではこの材料の性質について概説する。

2.1 結晶材

Bi_2Te_3 は室温付近で性能指数 Z が大きく、電子冷却用材料として有効であることを示したのは、英国 GE 社の H. J. Goldsmid で、1954 年 $\Delta T_{\text{max}} = 26^\circ\text{C}$ 、翌 1955 年には $\Delta T_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$ を得た。また、ソ連の A. F. Ioffe らは、 Bi_2Te_3 と同族系の Sb_2Te_3 や Bi_2Se_3 を加えた混晶合金でさらに性能を上げ、 $\Delta T_{\text{max}} = 72^\circ\text{C}$ が報告されている。

これらの記録は、ゾーンメルティング法 (図3) やブリッジマン法 (図4) で作られた単結晶もしくは結晶粒の非常に大きな多結晶体 (一方向性凝固材) で作られたもので、もっぱら電気抵抗を下げることに力を注がれた。しかしながら Bi_2Te_3 系の結晶は、へき開性 (cleavage) が著しく、これらの結晶から熱電素子を作るのは脆すぎて機械化による大量生産はむずかしい。また、熱伝導率を最も小さくするための混晶組成

図3 ゾーンメルティング炉とその温度プロフィール

図4 ブリッジマン炉とその温度プロフィール

は成分の偏析が著しく、1本のインゴット中で目的の組成はごく一部しかとれない。したがって、目的組成の部分を選別することになり、これも経済性に欠ける。そこで、市販の熱電素子では偏析があまり起きない程度の成分比におさえ、結晶性も人為的に悪くして脆さを克服している。それでもインゴットから所定の寸法に切り出すと 20% 以上もロスが出るといわれている。これがために熱電素子の普及のネックとなっていたといっても過言ではない。

なお混晶合金で性能指数が上がるのは、主に熱伝導率が小さくなるためである。この理由はくわしくは専門書に譲る¹⁾が、直感的説明としては以下のように考えるとよい。

図5に示すように、Bi 原子と Te 原子が規則正しく整列している結晶を考える。このなかで熱の伝播はそれぞれの原子の重さや結合力、原子間距離に応じた

図 5 結晶格子の乱れと熱伝導の模式図

種々の振動モードの重ね合わせで表せる。いま Bi 原子の一部を Sb 原子と置き換え、あるいは Te 原子の一部を Se 原子で置き換えることで、原子間距離や原子の重さの周期に局部的な乱れが生じる。そのために、今まで存在していた振動モードの一部が失われて、結果として熱の伝播が阻害されるわけである。

2.2 焼結材

単結晶 Bi_2Te_3 系材料の生産性の悪さを改善するために粉末焼結体の研究も古くからなされてきた。粉末焼結体のメリットは、焼結が緻密であれば、へき開がなく、単結晶よりも機械的強度が強い。したがって焼結体を加工しても寸法精度が高く、マシンハンドリングが容易で、熱電素子の自動組立で生産性を向上させようというねらいであった。また高性能化が期待できる混晶組成を溶解、急冷することにより、焼結体の性能を量産結晶(混晶にすると偏析が起こるので性能ベストの組成比とはかなり異なる)と同等、あるいはそれ以上になる期待があった。しかし、実際に粉末焼結体をつくると、焼結密度が上がらない、成形圧や焼結温度などで熱電特性が不安定、といった問題が出て、長い間実用化されなかった²⁾³⁾。近年のファインセラミックス技術の発達でこれらの問題点が探求され(例えば、粉末の粒径を揃えることが容易になり熱電特性が安定化する)、市販の結晶材に匹敵する焼結材が開発された⁴⁾⁵⁾。これにより昨年から粉末焼結熱電材によるマイクロペルチエクーラの量産、市販が開始されている。

3. 電子冷却素子 (Thermoelectric Cooler)

ここでいう電子冷却素子とは、熱電のクーラ、冷却デバイスのことで、熱電素子とはそのクーラを構成している熱電半導体の素子 (Thermoelement) をさす。冷却デバイスとしてどのようなものがあるか簡単に紹介する。

(a) 2枚の平らなセラミックス基板で熱電半導体

写真 1 電子冷却素子

写真 2 カスケードタイプ電子冷却素子

写真 3 大容量電子冷却素子

のチップをはさんだタイプ (セラミックスの冷却面や放熱面がメタライズされた品種もある) (写真 1)

- (b) 通常の電子冷却素子では得られない低温は、(a)のタイプをピラミッド状に重ねたカスケードタイプ。写真 2 はカスケードの最上段に従来の BiTe 系とは異なる材料を用いて -120°C 以下まで到達できるクーラである。
- (c) 放熱面や水冷板等に直接接合され、冷却面は接合電極が露出しているタイプ。薬液、血液など熱容量の大きなものを対象とした従来の応用機器に多く使われている。(写真 3)

4. 電子冷却の特徴と応用

電子冷却は、古くからフロンなどの冷媒の圧縮冷凍機と比較されてきた⁶⁾⁷⁾。このデバイスが開発された当初には、過酷な条件で使う大型で高価な軍用もしくは航空宇宙用機器の温度制御に使われた。家電の冷蔵

庫のような大量生産品用としては、従来の圧縮冷凍方式に効率と価格の点で太刀打ちできないことが明らかになると、ほとんどのメーカは撤退してしまった。それ以後、このデバイスは赤外線センサの冷却や、半導体製造プロセスで使う、薬液の温度を一定に保持するといった特殊用途に使われてきた。しかし、最近になって次にあげる3点の重要な発展が見られたので、熱電素子は今日の設計技術者がもっと入念に検討する価値のあるデバイスとなった。

- (1) 電子冷却素子の価格が劇的に低下した。吸熱能力が1W程度のマイクロクーラは5年前にはサンプル価格が数万円であったものが約1桁安価になった。
- (2) 現在では形状や大きさが豊富な冷却デバイスが入手できるので、以前よりはるかに広範な用途に使えるようになった。
- (3) デバイスの品質、信頼性が大幅に改善された。

次に電子冷却の特徴をあげると、

- (1) 数ミリ角のエリアが冷却できる。
- (2) 熱流密度が高い。

近年のULSIは高速高密度のため発熱量が高く空冷の限界を越え始めている。冷却を要するULSIが小規模のときは熱電素子が有利である。

(a) type 1

(b) type 2

図6 光通信用レーザーダイオードモジュール

- (3) 熱に対する応答が早い(時定数1秒余)。
 - (4) 室温近傍の高精度温度制御が可能($\pm 0.001^\circ$)
- C) 熱電素子に流す電流の向きを反転するだけで加熱・冷却が可能なため)。

半導体レーザーのチップキャリアは $2 \times 6 \text{ mm}$ 程度で、電流密度の高いデバイスである。しかも、レーザーダイオード(以下LD)は温度が変わると発振閾値(レーザー発光が始まる電流値)が増加し、損失が増える。また、発光波長がシフトして光通信では不都合な場合がある。特に今注目のコヒーレント光通信においては、波長シフトは温度換算で $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下と厳しく、熱電素子はまさにLDのためのデバイスである⁹⁾。

図6に光通信用LDモジュールを示す。タイプ1は従来の熱電素子で問題ないが、タイプ2では熱膨張や経年変化で熱電素子の厚みがわずかに変化しても光ファイバに光が入らなくなる。そのため熱電素子をバーニンイン(高温でエージング)して経年変化を減らす処置をとってユーザに提供されている。またLDチップを熱電素子に付ける場合、そのハンダは熱電素子に使われているハンダを溶かさない低融点ハンダの必要がある。従来の熱電素子のハンダは融点が 136°C であったので、LDを付けるハンダの選択に厳しい制約があった。最近、通常の鉛錫ハンダ(融点 183°C)を使った熱電素子が市販され注目されている。今後はさらにハンダの高融点化が進められるであろう。このように熱電素子および周辺技術の向上によって電子冷却素子の利用範囲が拡大してきた。

熱電素子のもうひとつの使い方は、デバイスをできるだけ低温に冷却することである。従来から赤外線センサやCCDイメージセンサなどは、デバイスの暗電流、熱雑音を減らすために熱電素子が使われてきた⁹⁾。

図7 HEMTの移動度の温度特性

最近では、より高速のデバイスの追求から、シリコンやGaAs FETよりも電子のスピードの早いHEMT (High Electron Mobility Transistor) を冷却して使うことが検討されている¹⁰⁾。図7はHEMTの移動度と温度の関係を示す。電子の移動度は100 K程度まで直線的に増加するため、大きさと電流等が許す範囲でカスケード型クーラで冷却するのが有効である。最近、HEMTを液体窒素で冷却する超高速CPUが試作されたが、最終的には窒素の補給の必要ない冷却器が望まれる。熱電素子も検討の対象となるが、到達温度が現在の材料では -120°C が限界のためHEMT側の高温動作に期待しつつ、より低温で性能指数 Z の大きな材料を探索競争されている。一頃新聞をにぎわせた高温超伝導体についても同様のことがいえる。

従来の熱電の応用は、ごく最近出版された文献雑誌に詳しい解説があるので、そちらを参照されたい⁷⁾¹¹⁾。

5. 今後の展望

これからは個々のLSIや電子デバイスを温度制御するために、マイクロクーラの需要が爆発的に伸びると思われる。例えば、NTTが2015年までに現在の加入者系電話線(各家庭への電話線)をすべて光ファイバ化する計画があるが、その中で使用されるLDの冷却・温度制御用に使われるものと期待される。また、より低温で、あるいはより高温で使用できる性能指数 Z の高い材料の研究に向かっていくものと思われる。

(1990年3月31日受付)

〔参考文献〕

- 1) 原島鮮：物性物理の基礎II，共立出版（1975）
- 2) W. R. Georgen, R. Sharpies and J. E. Thompson: "The Sintering of Bismuth-Telluride", Proc. Phys. Soc., **74**, 768 (1959)
- 3) H. Schreiner and F. W. Nornberg: "The Powder Metallurgy of n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ Thermoelectric Material", J. Mater. Sci., **3**, 103 (1963)
- 4) 海部宏昌, 田中義幸, 太田英二, 坂田亮, 山梨正孝, 西田勲夫: 日本金属学会講演概要集, 春期, p. 288 (1987)
- 5) H. Imaizumi, H. Kaibe, and I. Nisida: "Thermoelectric Properties of N-type $\text{Bi}_2(\text{Te, Se})_3$ by Hot-Pressing", Proc. 7th Int. Conf. Thermoelectric Energy Conversion, p. 141 (1988)
- 6) 菅義夫編：熱電半導体，槇書店（1966）
- 7) 上村欣一，西田勲夫著：“熱電半導体とその応用”，日刊工業新聞社（1988）
- 8) R. K. Wedal, G. Gal, G. A. Horine: "Thermal Analysis of Laser Diode Design", Am. Soc. Mech. Eng. Heat Transf. Div. (ASME HTD, Vol. 57 No. 57), pp. 239-243 (1986)
- 9) S. Walter Petric: "Generalized approach to cooling charge-coupled devices using thermoelectric coolers", Opt. Eng. **26**, 10, pp. 965-971 (1987)
- 10) 三村高志, 安部正幸, 紫富昭洋, 小林正明: "HEMT", 固体物理, **21**, 8, pp. 559-565 (1986)
- 11) 上村欣一: "熱電デバイスとその応用", 電子技術, **12**, pp. 10-16 (1985)

おかもと 晃 昭和45年，(株)小松製作所に入社。電気による土中埋設物の探査，電波による位置計測の研究に従事。現在，同社研究本部電子技術研究所所長。

いまい 久朗 昭和53年，関西学院大学理学部修士課程修了(物性物理)。同年，(株)日通工に入社。コンデンサの開発・研究に従事。55年，(株)小松製作所に入社。建設機械等の電子制御設計を経て，電子デバイスの研究に従事し，現在に至る。