

# 小型・薄型の電子機器向け熱輸送技術 —樹脂製ヒートパイプ—

## Polymer Heat Pipe: Heat-transfer Technology for Small and Thin Electronics

● 尾形 晋      ● 助川英次

### あらまし

情報空間と人とのインターフェースとして、スマートフォンをはじめとするモバイル端末やウェアラブル端末は、人々の生活に欠かせないものとなっている。これらの機器では、薄く、軽く、柔らかく、かつ熱を効率良く運ぶ放熱技術が有効である。薄さ、軽さは機器の携帯性を維持し、柔らかさは着け心地の良さを実現する。また、効率の良い熱輸送は、機器表面をなるべく低い温度に保ちつつ、放熱性を高められる。これらの機器には通信用のアンテナが搭載されることが多いが、放熱部品が通信用の電磁波と干渉しなければ、機器の実装の自由度が高まる。筆者らは薄く、軽く、柔らかく、かつ電磁波を透過させる熱輸送技術を開発している。これは、厚さが0.5 mm以下の薄い樹脂製のヒートパイプであり、内部に注入した冷媒の気液相変化により熱を運ぶことで、樹脂でありながら同じ厚さの銅板と同等の伝熱性を発揮する。

本稿では、樹脂製ヒートパイプの開発に関して、まずプロトタイプ of 作製と動作確認を紹介した後、流路構造の変更による性能向上への取り組みについて紹介する。

### Abstract

Mobile and wearable devices are important interfaces between humans and cyberspace. Thin, light, flexible, and highly efficient heat-transfer technologies are required to manage the heat generated in these devices. The thinness and lightness of the heat-transfer technologies keep the devices portable, and their flexibility makes a wearable device easier to wear. The efficiency of that technologies makes it possible to easily dissipate heat while keeping the devices' surface temperature as low as possible. In addition, if the technologies have electromagnetic wave transparency, there is a large degree of freedom with regards to the packaging of these devices because they can dissipate heat without affecting the layout of the antenna for wireless communication. We have been developing a polymer heat pipe that is thin, light, flexible, and electromagnetically transparent. The pipe is less than 0.5 mm thick and uses the liquid-vapor phase change of the coolant inside it to achieve a thermal conductance similar to that of copper plates having the same thickness. In this paper, we describe the development of this polymer heat pipe.

## まえがき

スマートフォンなどのモバイル端末やウェアラブル端末などの小型・薄型の電子機器は、情報空間とのインターフェースとして人々の生活に欠かせないものとなっている。このような機器の放熱方式としては、機器の筐体表面と外気との温度差で生じる自然対流を利用した自然空冷が一般的である。自然空冷では、放熱面積が大きく、また放熱面と大気との温度差が大きいほど放熱しやすくなる。しかし、これらの機器では、放熱面となる筐体自体のサイズが小さく、また、筐体表面はユーザーの肌に直接触れるため、大気との温度差を十分に確保できず、効率的に放熱することが難しい。

このような状況においては、CPUなどの発熱体からの熱をなるべく小さい温度差で、放熱面となる筐体表面全体に運び広げる、高効率な熱輸送技術が有効と考えられる。機器の携帯性を維持する上では、薄型で軽量であることが求められ、ウェアラブル端末では着け心地の観点からフレキシブルであることが望ましい。更に、これらの機器は無線通信を行うためのアンテナを内蔵しているが、放熱部品が通信用の電磁波を阻害しないものであれば、アンテナの位置にかかわらずに配置できるため、機器の設計や実装の自由度が高まる。

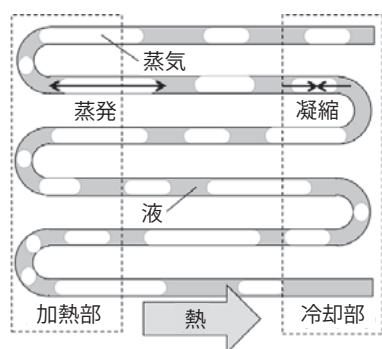
熱を効率良く運ぶ構造として、内部に封入した冷媒の気液相変化により熱を運ぶヒートパイプが広く使用されている。一般的に、ヒートパイプを構成する材料には金属が用いられるが、これに樹脂を適用できれば、軽量性やフレキシビリティ、

電磁波透過性などの特性を備えた熱輸送技術が実現できる。筆者らは、小型・薄型の電子機器向けの熱輸送技術として、薄く、軽く、フレキシブルで、電磁波透過性のある樹脂製のヒートパイプを開発している。

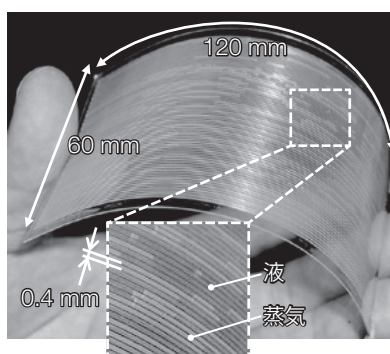
本稿では、この樹脂製ヒートパイプの開発について、プロトタイプの実作と動作確認、および熱輸送能力の向上への取り組みを紹介する。

## プロトタイプの作製と動作

樹脂製ヒートパイプの熱を運ぶ仕組みとして、自励振動ヒートパイプ<sup>(1), (2)</sup>を用いた。このヒートパイプは図-1 (a) に示すように、加熱部と冷却部とを往復しながら蛇行するつづら折り状の細い流路に、その容積の半分程度の量の冷媒を封入するという極めて単純な構造であり、薄型化しやすい利点を持つ。冷媒の表面張力の作用により、流路が冷媒の液滴で塞がれており、同図に示すように蒸気と液が分散して分布する。加熱部から熱が入力されると、冷媒が蒸発し、蒸気の体積が大きくなる。これに伴い、近傍の液や蒸気が押しやり、冷却部へ移動する。一方、冷却部近傍に位置する蒸気は凝縮してその体積を小さくしつつ、ターン部を経て隣接する流路に移動し、加熱部へ還流する。流路には蒸気と液がランダムに分散しているため、それぞれの流路間で、加熱部や冷却部に蒸気や液が入り込むタイミングが変わる。異なるタイミングで蒸気の膨張や収縮が生じることで、隣接流路間での冷媒の移動が連鎖し、やがて加熱部と冷却部との間を行ったり来たりする振動状の冷媒



(a) 自励振動ヒートパイプの構造



(b) 樹脂製ヒートパイプのプロトタイプ

図-1 樹脂製ヒートパイプにおける熱輸送の仕組み

流動が生じる。その際、加熱部において蒸発に伴って気化熱として取り込まれた熱が冷却部で凝縮に伴って放熱される潜熱による熱輸送と、冷媒の温度変化による顕熱による熱輸送により、加熱部から冷却部に熱が運ばれる。

小型・薄型の電子機器向けの熱輸送技術としては、ヒートパイプの厚さはなるべく薄い方が望ましい。一方でヒートパイプを薄くすると、冷媒を流す流路の高さも低くなり、流れる際の流動抵抗が増えて冷媒が動きにくくなる。上述のように、冷媒の動きにより熱輸送能力が左右されるため、冷媒の動きやすさと薄さとを両立できるよう、ヒートパイプの流路サイズや厚さを決める必要がある。更に、自励振動ヒートパイプの熱輸送性能には、流路のサイズのほかに、本数、長さ、間隔、および使用する冷媒の種類や封入率など、多くのパラメーターが影響する<sup>(3)</sup>。そこで、まずプロトタイプを作製し、自励振動ヒートパイプに特徴的な振動状の冷媒流動の発生可能性、およびそれによる継続的な熱輸送の実現可能性を検証した。

作製した樹脂製ヒートパイプのプロトタイプを図-1 (b) に示す<sup>(4)</sup>。プロトタイプの外形サイズは、横幅が60 mm、長さが120 mm、厚さが0.34 mmであり、図のように手で曲げられる柔軟性を持つ。材料には透明なポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムと紫外線硬化樹脂を用いている。

PETフィルムを基材とし、その上に紫外線硬化樹脂で流路となる溝パターンを形成し、更にその上方からPETフィルムを貼り付けることでヒートパイプ構造を作製した。流路は、幅が0.4 mm、深さが0.25 mmの矩形状であり、0.8 mm間隔で68本が並んでいる。冷媒には、ハイドロフルオロエーテル (フッ素系冷媒) を用い、流路の総容積の半分程度の量となるようにこれを封入した。

プロトタイプの伝熱性能は、図-2に示すように水平状態で測定した。ヒートパイプの加熱部と冷却部には、銅製の伝熱ブロックを接触させており、加熱側の伝熱ブロックには熱源となるセラミックヒータを、冷却部の伝熱ブロックには水冷ヒートシンクを接続している。セラミックヒータから伝熱ブロックを通じて樹脂製ヒートパイプに伝えられる熱量を入力熱量 $Q_{in}$ 、樹脂製ヒートパイプから冷却側の伝熱ブロックに伝えられる熱量を通過熱量 $Q_{out}$ とする。ここで、 $Q_{out}$ は樹脂製ヒートパイプが実際に輸送した熱量であることに注意されたい。

ヒートパイプの伝熱性能の指標には、熱抵抗 $R$ を用いた。これは、加熱部の温度 $T_h$ と冷却部の温度 $T_c$ との温度差を、樹脂製ヒートパイプが輸送した熱量 $Q_{out}$ で除した値であり、この値が小さいほど小さい温度差で熱を運べること、すなわち熱を伝える能力が高いことを示す。また、加熱部と冷却部との中間部分を高速カメラで撮影し、性能測定

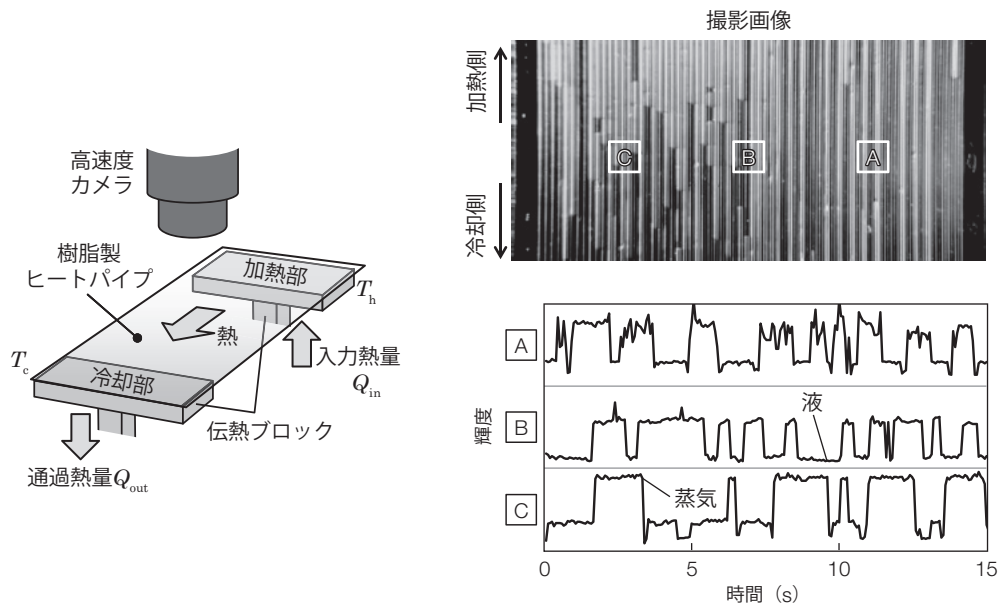


図-2 樹脂製ヒートパイプの性能測定と冷媒流動の観察

中の冷媒の動きを観察した。撮影画像では輝度の違いにより明るい部分が蒸気、暗い部分が液と区別できるため、輝度の時間変化を追うことで観測領域を通過する蒸気と液の動きを観察できる。観察領域は、撮影画像の四角枠で囲まれた3か所 (A, B, C) に設けた。

観察領域のA, B, Cの輝度変化を見ると、いずれの観測領域においても小刻みな輝度の変化が継続している。これにより、蒸気と液の移動が頻繁に生じ、かつ継続している様子が分かる。これは、本流路構造において、自励振動ヒートパイプに特徴的な振動状の冷媒流動が発生していることを示している。ここで、それぞれの観測点を蒸気と液が通過する時間スケールは、数秒のオーダーであることに注意されたい。

階段状の熱入力 $Q_{in}$ に対する温度 $T_h$ ,  $T_c$ と、樹脂製ヒートパイプにより輸送された熱量 $Q_{out}$ の変化を図-3 (a) に示す。ここで横軸は動作時間、左側の縦軸と黒色のグラフが温度、右側の縦軸と灰色のグラフが熱量を表しており、破線が加熱側の温度と熱量、実線が冷却側の温度と熱量を表す。

熱入力 $Q_{in}$ に対し、 $Q_{out}$ と温度 $T_h$ と $T_c$ が追従して変化し、やがてそれぞれの値が一定となる定常状態に到達していることが分かる。ここで、定常状態が続いている時間に着目すると、それぞれの熱量に対し30分程度安定していることが分かる。図-2に示した蒸気と液の移動に伴う輝度変化の時間スケールが秒のオーダーであることと比べると、 $Q_{out}$ の変化で示される熱輸送が冷媒の一時的な移動によるものではなく、流動の継続によりなされて

いることが分かる。

プロトタイプ熱抵抗を図-3 (b) に示す。横軸が熱量、縦軸が熱抵抗を示しており、グラフ中の一点鎖線は同サイズの銅板の熱抵抗を表す。熱量の増大に伴い、熱抵抗が小さくなる、すなわち伝熱性能が向上することが分かる。これは、入熱量の増大により冷媒の蒸発量が増え、冷媒流動が活発化するためである。輸送熱量 $Q_{out}$ が4 Wのときに熱抵抗が銅板の熱抵抗とほぼ同等の値に到達する。ここで、樹脂製ヒートパイプを構成する材料は熱伝導性の低い樹脂であり、銅板の熱伝導率(400 W/m/K程度)<sup>(5)</sup>と比べると、その値は1/2,000以下である。これはヒートパイプ構造を形成することで、構成材料の物性に比べて2,000倍を超える伝熱性の向上を果たしたことを示している。

ここまでの検証で、厚さ0.34 mmと極めて薄く形成された自励振動ヒートパイプ構造において、入熱に伴う振動状の冷媒流動の発生と、その継続による定常的な熱輸送が可能であること、更にヒートパイプ構造による熱輸送を活用することで、樹脂でありながら金属並みの高い伝熱性が実現できることを確認した。その一方で、図-3 (b) の高熱入力時には熱抵抗の上昇、すなわち伝熱性の低下が見られた。これは、高熱入力時に、加熱部で発生する蒸気の圧力が隣り合う流路間でバランスすることで冷媒流動が鈍くなり、加熱部への冷媒供給が途絶えがちになるドライアウトが部分的に発生したためである。

次章では、流路構造の変更によってドライアウトを抑制する取り組みについて紹介する。

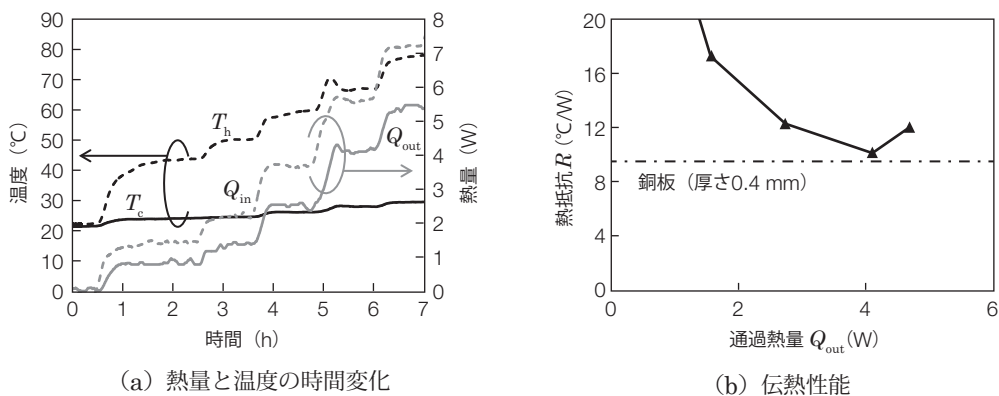


図-3 プロトタイプの定常動作と伝熱性能

流路構造と伝熱性能

自励振動ヒートパイプ内の冷媒の流動状態は、流路構造に依存することが知られている。流路の両端を連結したループ型において、流路の途中で逆流を防ぐ逆止弁を設けると、冷媒が流路全体を巡る循環流が発生し、熱輸送性能が向上する<sup>(2)</sup>。この循環流のように、冷媒が流れる方向を一定にできれば、加熱部における蒸気の圧力バランスを回避して冷媒を継続的に加熱部に供給でき、ドライアウトを回避できると予想される。しかし、厚さが0.5 mm以下の極めて薄いヒートパイプ内で機能する逆止弁の製造は難しく、また逆止弁のような可動部品を内蔵することは製品の信頼性・耐久性を低下させる要因となり得る。

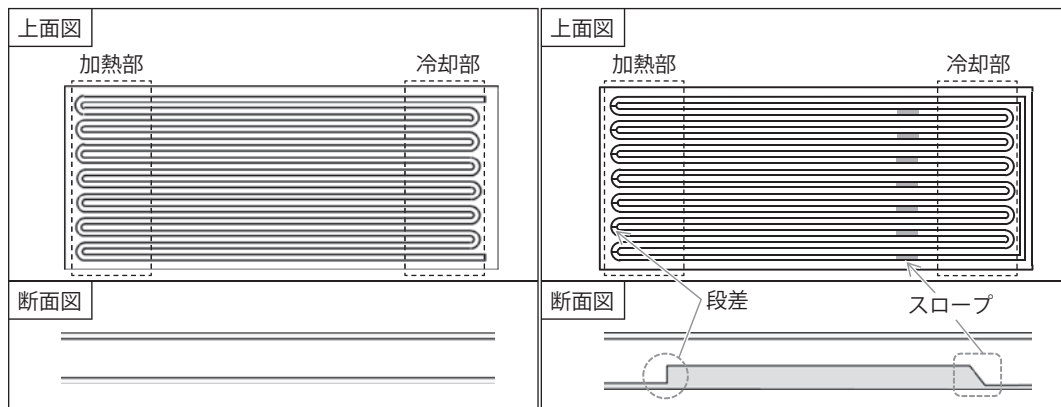
一方、隣り合う流路の幅を交互に変えることで毛細管力の差を生み出し、流動性を改善する構造が報告されている<sup>(6)</sup>。これは逆止弁を用いずに、流路形状のみの変更で冷媒の流動性を改善できることを示している。そこで本章では、薄型ヒートパイプの製造性を考慮して、逆止弁を設けない簡便な構造で冷媒の流動性を改善し、高熱入力時のドライアウトを抑制する試み<sup>(7)</sup>について紹介する。

プロトタイプで用いた従来の流路構造を図-4 (a) に、新たな流路構造を同図 (b) にそれぞれの流路形状の上面図と流路軸方向の断面図とを併せて示す。プロトタイプの流路はその両端がつながっていない非ループ型構造であり、新しい流路は両端がつながったループ型構造である。また、流路

軸方向の断面形状は、従来構造が平坦であるのに対し、新構造では、段差とスローブ構造を設けた。流路の幅と深さ、および本数はいずれの構造でもプロトタイプのそれと同様に、それぞれ0.4 mm, 0.25 mm, 68本であり、新構造の流路内に設けた段差の高さは0.075 mmとした。ヒートパイプの性能評価と内部の冷媒の動きの観察には、前章と同様の指標と手法を用いた。

従来構造と新構造の伝熱性能を図-5 (a) に示す。縦軸は熱抵抗、横軸は熱量であり、一点鎖線は厚さ0.4 mmの銅板の熱抵抗を表している。どちらの流路構造においても、 $Q_{out}$ の増大に伴って熱抵抗が低下し、4 W近傍で銅板の熱抵抗と同等になることが分かる。プロトタイプで用いた従来構造では、4 Wを超えると熱抵抗が上昇するが、これは前章で述べた流路間の圧力バランスによる部分的なドライアウトによるものである。一方、新構造では4 Wを超えた後の高発熱領域においても熱抵抗が下がり続け、8.4 Wでも熱抵抗の上昇、すなわちドライアウトが見られなかった。なお、 $Q_{out}$ が8.4 Wの際の樹脂製ヒートパイプの伝熱性は、厚さ0.4 mmの銅板の1.4倍に相当する。

新構造内部での冷媒の流動状態を図-5 (b) に示す。従来構造では、図-2に示すように冷媒の移動(輝度値の変化)がそれぞれの観察領域でランダムに発生し、同一観察領域内での周期性や、それぞれの領域間での連動が見えにくい。これに対し、新構造では従来構造と同様のランダムに生じる小刻みな輝度変化に加え、それぞれの観察領域で周期



(a) 従来構造

(b) 新構造

図-4 樹脂製ヒートパイプの流路構造

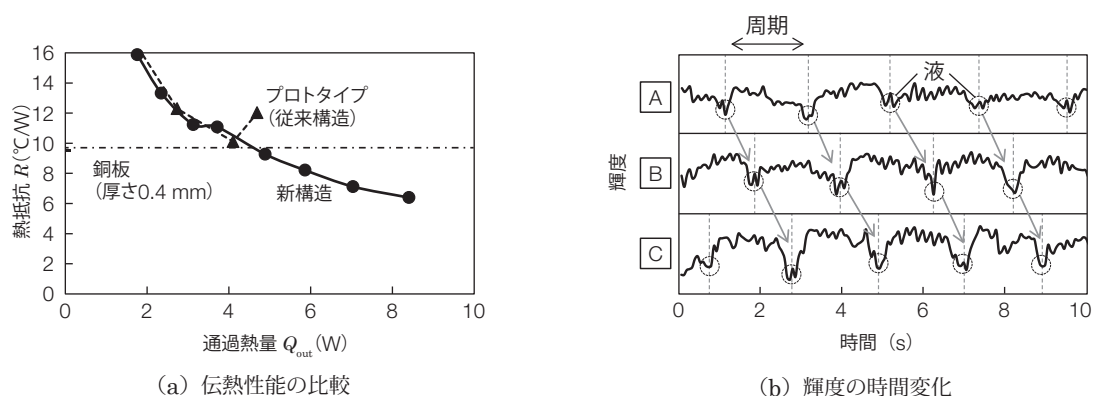


図-5 新流路構造の伝熱性能と冷媒の流動状態

的な液通過が見られ、また左側から中央部、そして右側へ液が移動する様子が分かる。これは新構造において、ランダムな冷媒振動に加えて、一定方向の流れが生じたことを示している。更に、熱抵抗の比較と冷媒の流動状態の違いから、冷媒の移動に方向性が生じることで、高熱入力時の加熱部への作動流体の供給不足が緩和され、高熱入力時のドライアウトが回避できていることが分かる。

ここで、段差とスロープ構造を設けることにより冷媒の流れに方向性が生じた理由としては、同構造により、蒸気の成長しやすさや冷媒の流れやすさがそれぞれの向きで異なること、更に、その構造が周期的に繰り返されることで、一方向の流れが強化されることが考えられる。今後、流れに方向性を付与する原理の詳細検討と、それに基づく流路設計により、更なる熱輸送性能の向上に取り組んでいきたい。

### む す び

本稿では、筆者らが開発を進めている樹脂製ヒートパイプに関して、プロトタイプの実験と動作確認、および流路構造の変更による熱輸送能力の改善について紹介した。本技術は、PETフィルムとUV硬化樹脂を用いて、厚さが0.5 mm以下の極めて薄い自励振動ヒートパイプを作製することにより、軽量性やフレキシビリティ、電磁波透過性など、金属製ヒートパイプにはない特長と、金属並みの高い伝熱性を併せ持つ。今後はこれらの特長を活かし、モバイル・ウェアラブル機器などの小型・薄型の電子機器の熱輸送技術として展開していきたい。

### 参考文献

- (1) H. Akachi. U.S.Patent 4921041 (1990).
- (2) H. Akachi. U.S.Patent 5219020 (1993).
- (3) 長崎孝夫：自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関するレビュー. 伝熱, Vol.44, No.186, p.13-17 (2005).
- (4) S. Ogata et al. : Performance Evaluation of Ultrathin Polymer Pulsating Heat Pipes. ITTherm2014, Orlando, FL USA (2014).
- (5) 伝熱工学資料 改訂第5版, 日本機械学会.
- (6) 北島 仁ほか：不等断面ループ型ヒートパイプの研究. 第39回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p.147-148 (2002).
- (7) 尾形 晋ほか：日本機械学会熱工学コンファレンス 2014 講演論文集. B114 (2014).

### 著者紹介



**尾形 晋** (おがた すすむ)

ものづくり技術研究所  
 プロダクトエンジニアリングプロジェクト  
 電子機器の冷却技術の研究に従事。



**助川英次** (すけがわ えいじ)

ものづくり技術研究所  
 プロダクトエンジニアリングプロジェクト  
 電子機器の冷却技術の研究に従事。