

超薄型シート状ヒートパイプ「ペラフレックス®」

Ultrathin Sheet-Shaped Heat Pipe “pera-flex®”

佐々木泰海* Yasumi Sasaki 小林隆雄* Takao Kobayashi 杉村政信* Masanobu Sugimura 大野良次* Ohno Ryouji 川畑賢也* Kenya Kawabata
 稲垣義勝* Yoshikatsu Inagaki 片山敬大* Takahiro Katayama 素谷順二* Junji Sotani 諏訪康彦*² Yasuhiko Suwa

概要 当社はヒートパイプ技術を応用し、超薄型シート状ヒートパイプ「ペラフレックス」の開発に成功した。ペラフレックスは、薄い金属箔を接合して形成したコンテナ内に、毛細管力を発生させるためのウィック、及び耐圧のためのインナシェルを内蔵した構造になっていて、少量の水とともに封入して空気を排出し、密閉封止したものである。ペラフレックスは、従来のヒートパイプの持つ高い熱輸送効率に加えて、超薄型、軽量、曲げ加工が容易、平面的な形状の自由度が大きい、トップヒート動作が可能など、従来のヒートパイプには無い特長を数多く有している。これらの特長を生かすことによって、従来では困難とされてきたモバイル電子機器への適用が広がる。

1. はじめに

近年、ノートパソコンをはじめとし、デジタルカメラ、PDA、携帯電話などのモバイル電子機器の発展は著しく、目を見張るものがある。モバイル電子機器は、更なる高機能化と同時に機器のスリム化も要求されているが、その反面で高発熱、高密度実装による熱問題が顕在化している。既存の放熱対策としては、マイクロヒートパイプやグラファイトシートなどが実用化されているが、これらは形状や実装形態の制約などからモバイル電子機器への適用は難しくなっている。

そこで当社では、ヒートパイプ技術を応用して、極めて狭い空間において熱を高効率に輸送、拡散することのできる超薄型シート状ヒートパイプ「ペラフレックス」の研究に着手し、開発に成功した(写真1)。以下にペラフレックスの特長を説明する。

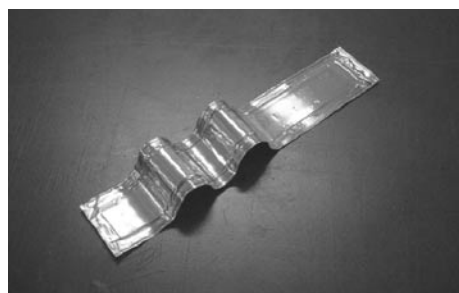


写真1 ペラフレックスの外観
Appearance of pera-flex.

2. ペラフレックスの構造

ペラフレックスは図1のように、薄い金属箔で形成した封筒状コンテナの中に、毛細管力を発生させるためのウィック及び耐圧のためのインナシェル、それに少量の水を封入し、空気をすべて排出して密閉することで形成される。内圧はその温度における作動液の飽和蒸気圧と等しくなるため、常温では大気圧より低く、ウィックおよびインナシェルは大気圧で押し付けられて固定される。これにより良好な毛管力が得られ、更にウィックの隙間に空間が確保されて蒸気流路が形成される。

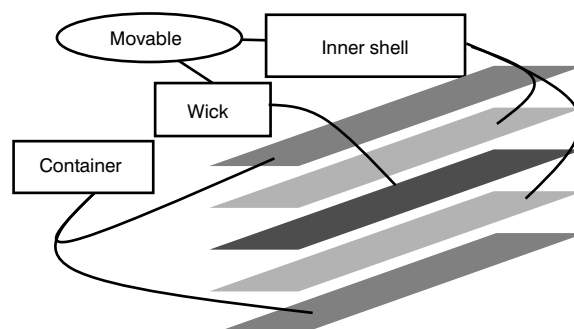


図1 ペラフレックスの構造
Construction of pera-flex.

ペラフレックスに熱を加えると、図2のように、加熱部における飽和蒸気圧が高まり、作動液が蒸発する。この時、入力された熱は作動液の蒸発潜熱として吸収されるため、受熱部の温度上昇は極めて小さく抑えられる。蒸発した作動液の蒸気は、ウィック間に設けられた蒸気流路の隅々まで拡散する。そしてその蒸気は、相対的に温度の低い部位において凝縮して潜熱を

* 電装・エレクトロニクスカンパニー
エレクトロニクス・コンポーネント事業部 サーマル・電子部品部
*² 生産技術部 生産技術開発センター

放出する。凝縮した作動液は、ウィックに吸収されて、重力や毛細管力によって受熱部に還流する。ペラフレックスの内部では、このように相変化を利用した作動液の循環が起こり、極めて小さい温度差で熱輸送が可能となる。

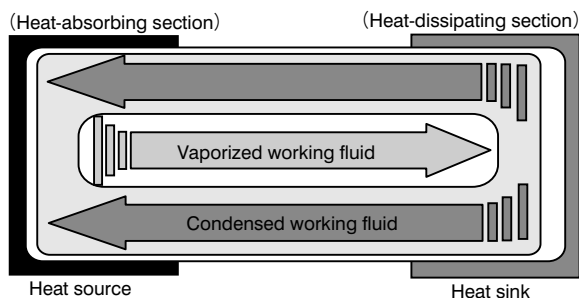


図2 ペラフレックス内部における作動液の循環
Circulation of working fluid in pera-flex.

ペラフレックスは、ウィック及びインナシェルがコンテナ内で可動であり、図3のように屈曲時にひずみを吸収して、座屈による空間の閉塞が起こらない仕組みになっている。このフレキシビリティにより、きょう体と熱源との高さの寸法公差を解消でき、組み立て加工が容易になるというメリットもある。

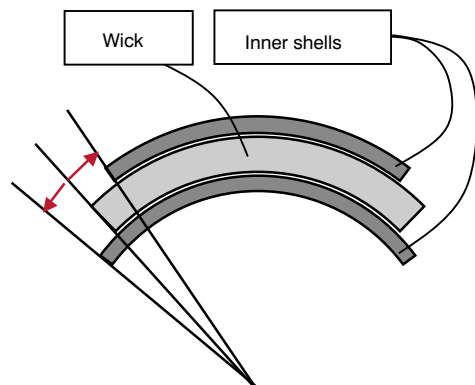


図3 屈曲時におけるペラフレックス内部のウィックとインナシェルのずれ
Slip of the inner shell in pera-flex.

また、写真2に示すように平面形状の自由度が高く、従来のマイクロヒートパイプでは難しかった曲げや欠けのある異形平面における熱輸送にも対応できる。

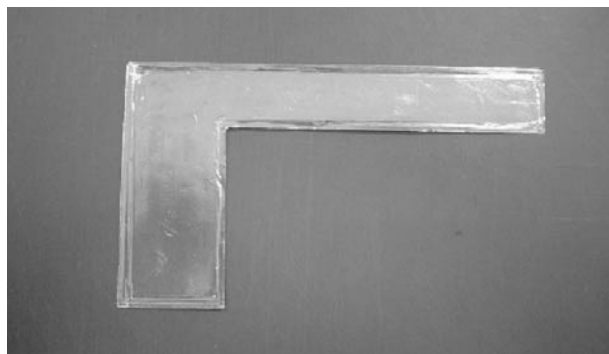


写真2 異形のペラフレックス
“pera-flex” in asymmetrical shape.

更に、独自のウィック形状及び表面処理により毛細管力が強化されたため、従来のマイクロヒートパイプでは作動が困難とされていた熱源が上部に位置するトップヒートモードにおいて

も作動が可能になった。また、構成部材の材質には熱伝導率の高い銅を、作動液には潜熱の大きい水を使用しているため、良好な熱性能、安価、安全、低環境負荷など多くのメリットを有している。

3. ペラフレックスの性能

3.1 等温性能

図4に熱性能測定装置の一例を示す。

供試ペラフレックスの一端をセラミックヒータによって加熱し、加熱部及び断熱部の周囲は断熱材で断熱した。外部に露出した放熱部をIRカメラで撮影するとともに、8本のK型シース熱電対(0.25 mm φ)によって温度を測定した。

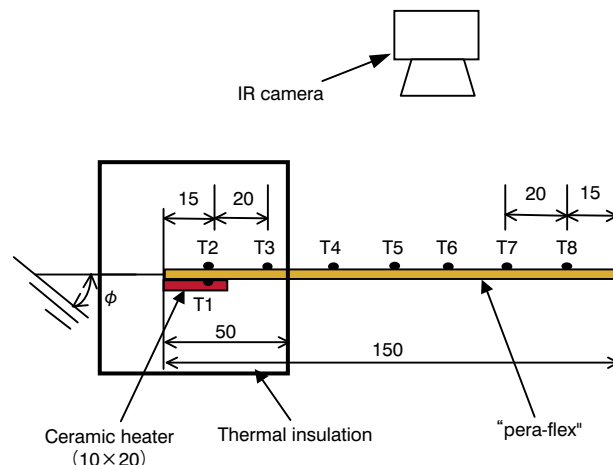


図4 熱性能測定装置
Apparatus for experiment (I).

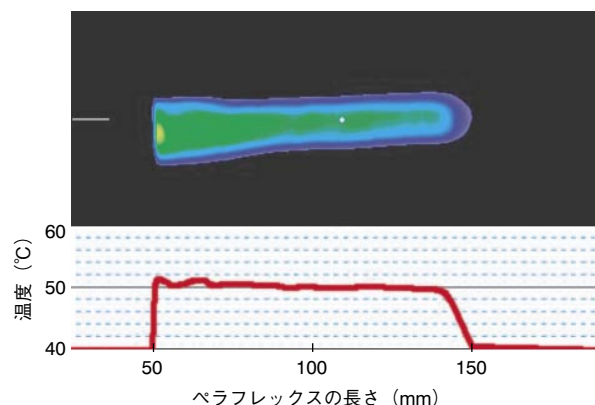


図5 熱性能測定結果($\phi = 0^\circ$)
An example of temperature profile.

実験は、セラミックヒータにステップ状に入力を印加し、本供試ペラフレックス冷却部にファンで直接風を流し、断熱部T3の蒸気温度を50℃一定になるように温調して実施した。そして、定常状態を確認し、データを取得し、ドライアウトになるまで継続した。

図5、図6に代表的な温度分布を示す。

図5は幅20×長さ150×厚さ0.7 mmのペラフレックスを、水平状態で幅10×長さ20 mmのセラミックヒータに4.0 W印加し、風量をコントロールして蒸気温度が50℃で定常状態になった時の様子を、IRカメラで撮影したものである。先端近傍まで良好な等温性が得られることが分かる。

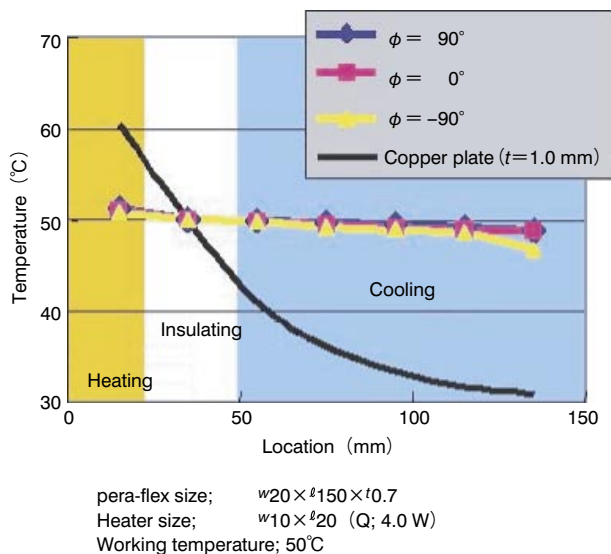


図6 姿勢角度をつけた場合の温度分布測定結果
Temperature profile.

図6に上記条件での温度分布の角度依存性を示す(ボトムヒートモード($\phi = +90^\circ$), 水平($\phi = 0^\circ$), トップヒートモード($\phi = -90^\circ$)).

すべての姿勢において断熱部から先端までの温度差

$$\Delta T = T_3 - T_8 \quad (1)$$

を約1°C以内、熱抵抗値

$$R = \{T_1 - (T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8) / 5\} / Q \quad (2)$$

を1.0°C/W以下に抑えることができた。

比較に用いた厚さ1.0 mmの銅板では、 ΔT は20°C、熱抵抗値は7°C/W以上に達し、ペラフレックスの優位性が確認できた。なお、厚さ1.0 mmの銅板では室温30°C以下で強制空冷しなければ $T_3 = 50^\circ\text{C}$ に制御することはできなかったのに対し、厚さ0.7 mmの本供試ペラフレックスでは室温30°C以上の自然空冷でも $T_3 = 50^\circ\text{C}$ とすることが可能であった。このようにペラフレックスは銅板と比較して、熱輸送効率が極めて高く、熱の移動・拡散に有効であることが分かる。

3.2. 最大熱輸送量

本供試ペラフレックスへの入力熱量が4.0 Wを超える場合、温調のためにフィンが必要になる。図7にフィンを用いた熱性能測定装置の一例を示す。加熱部、断熱部は3.1項と同様であるが、放熱部にはフィンを設置し、フィンを除く全体を断熱材で断熱した。フィンは熱輸送量に影響を与えないように分割した。温度測定は8本のK型シース熱電対(0.2 mm ϕ)によって行った。

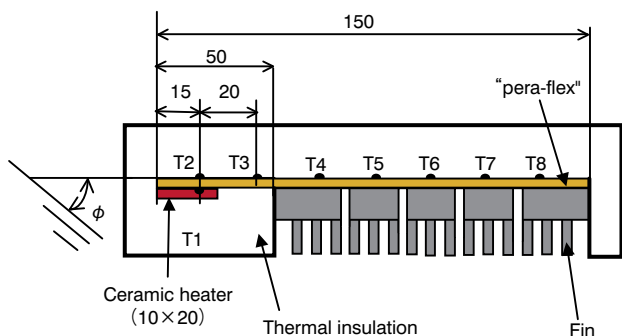


図7 熱性能測定装置
Apparatus for experiment (II)

図8に本供試ペラフレックスの入力熱量と熱抵抗の関係を示す。ペラフレックスも通常のヒートパイプ同様に、運べる熱輸送量には限界があり、熱量がある値を超えると、ドライアウトが起こり、熱抵抗を低く保つことができなくなる。本供試ペラフレックスでは、ボトムヒートモード($\phi = 90^\circ$)で15 W、水平($\phi = 0^\circ$)で10 W、トップヒートモード($\phi = -90^\circ$)で6 Wまでが熱抵抗を低く維持できる限界値といえる。この限界値が最大熱輸送量 $Q_{\max}$ である。

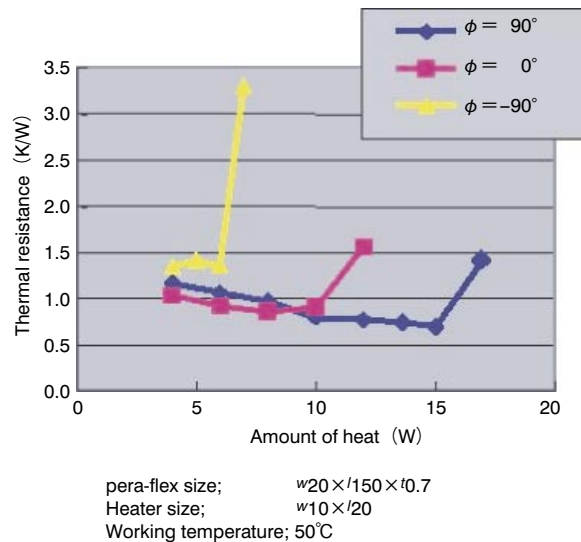


図8 姿勢角度による熱抵抗の変化
Thermal resistance.

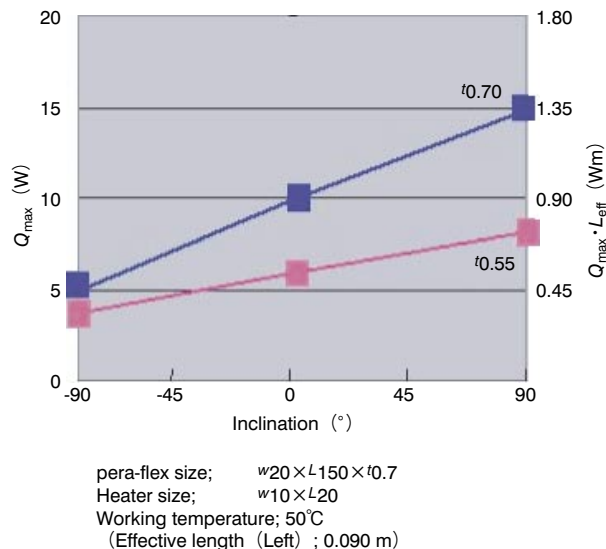


図9 最大熱輸送量の姿勢角度依存性
Relationship between inclination angle and maximum heat transfer rate.

図9に2種類の厚さの供試ペラフレックスについて、それぞれ最大熱輸送量の姿勢角度依存性を示す。ペラフレックスの厚さは、0.55 mmが最小になる。厚さが0.5 mm前後の領域では、厚さと最大熱輸送量の関係が線形ではなく、これ以下の厚さでは、主に蒸気流の圧損が急激に増大し、ヒートパイプの良好な熱輸送能力を得ることは難しくなる。逆にこの近傍の厚さでは、厚さを0.55 mmから0.7 mmに増すことによって、2倍近くの最大熱輸送量を得ることができる。

最大熱輸送量と姿勢角度の関係は、熱源の位置が下がるほど

最大熱輸送量は大きくなる。これは、熱源が下部に位置するボトムヒートモードにおいては作動液の還流に対して重力がプラスに作用するので、最大熱輸送量は比較的大きな値になるが、熱源が上部に位置するトップヒートモードでは重力がマイナスに作用するので、最大熱輸送量は比較的小さくなるためである。

3.3 熱流束依存性

図10に、別の測定系を示す。本測定系は、実際に想定される実装形態の一つを模したもので、供試ペラフレックスは、幅25×長さ105×厚さ0.7 mm、中間部に2.5 mmの段差がある。加熱部には幅20×長さ10 mmのセラミックヒータ3つを並列に設けて、それぞれ独立した熱入力が可能となっている（加熱部長さ：10, 20, 30 mm）。

放熱部は、3.2.項と同様に、熱輸送量に影響を与えないように分割した長さ50 mmのフィンを設置し、フィンを除く全体を断熱材で断熱した。温度測定は7本のK型シース熱電対（0.2 mm φ）によって行った。

作動姿勢はボトムヒートモードとした。

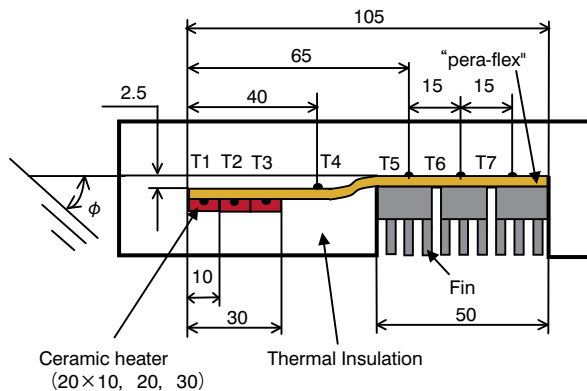


図10 熱性能測定装置
Apparatus for experiment (Ⅲ).

図11は、3種類のヒータサイズで熱を入力した際の、それぞれの熱抵抗の値を比較したものである。ここで熱抵抗は以下のように表す。

$$R_{hc} = \{T_1 - (T_5 + T_6 + T_7) / 3\} / Q \quad (L_h = 10 \text{ mm}) \quad (3)$$

$$R_{hc} = \{(T_1 + T_2) / 2 - (T_5 + T_6 + T_7) / 3\} / Q \quad (L_h = 20 \text{ mm}) \quad (4)$$

$$R_{hc} = \{(T_1 + T_2 + T_3) / 3 - (T_5 + T_6 + T_7) / 3\} / Q \quad (L_h = 30 \text{ mm}) \quad (5)$$

ヒータ面積が小さくなるに伴い熱抵抗の値は大きくなり、また最大熱輸送量の値は小さくなる傾向が認められた。よって、高発熱密度への適用には注意が必要になる。例えば、本実験系の場合、入力16 W前後で熱抵抗を0.5 K/W以下に抑えたい場合には、ヒータサイズは20×20 mm以上とする必要がある。

3.4 ペラフレックスの信頼性

ペラフレックスの内容積は通常のヒートパイプと比較して極めて小さいだけでなく、内部の表面積に対する容積の比率も極めて小さいため、長期信頼性を確保するためには従来よりも慎重を期す必要がある。ヒートパイプの劣化の原因を、以下に挙げる。

- 1) ピンホールからのスローリーク
- 2) ヒートパイプ製造時の不純物の混入による腐食、及び非凝

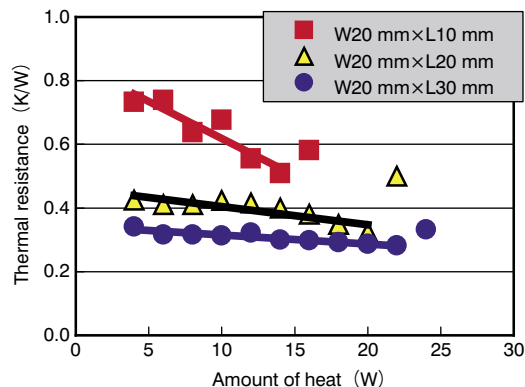


図11 熱抵抗のヒータサイズの影響
Effect of heater size.

縮性ガスの発生

1) に関しては、「ボンピング」即ち高压容器の中に長時間放置することでリークの加速試験を行い、リークの有無を確認する。

2) に関しては、「ライフテスト」即ち連続作動試験によって確認する。経時変化は製造工程に深く関係する。部材構成や製造工程が変わらなければ、ライフテストの結果も変わらないと推察する。

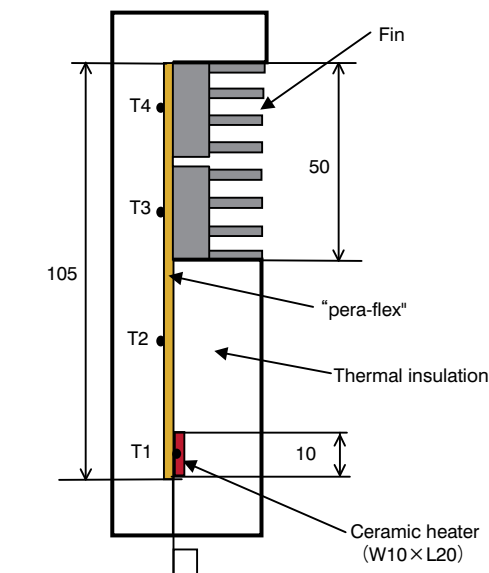


図12 ライフテストの装置
Apparatus for life test.

図12にペラフレックスのライフテスト装置を示す。供試ペラフレックスは、幅25×長さ105×厚さ0.7 mmである。加熱部は幅10×長さ10 mmのセラミックヒータを設置し、冷却部は長さ50 mmのフィンを設置した。温度測定は4本のK型シース熱電対（0.2 mm φ）によって行った。

作動姿勢はボトムヒートモードとした。ヒータに8 W一定の入力を印加し蒸気温度60℃の定常状態を確認した後、データロガーによって経時変化を追った。

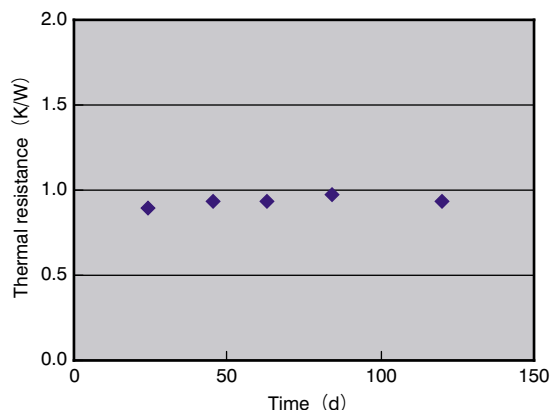


図13 ライフテスト結果の例
Result of a life test.

図13にペラフレックスのライフテスト結果の一部を示す。ここで、熱抵抗は以下のように定義する。

$$R_{hc} = \{T_1 - (T_3 + T_4) / 2\} / Q \quad (6)$$

150日間の連続作動では熱抵抗の変化は認められなかった。

4. ペラフレックスの用途

ペラフレックスは以下のような特長を有している。

- 通常のヒートパイプと同等の熱伝導性能
- トップヒートモードでの使用も可能
- 超薄型(最小厚さ:0.55 mm)
- 平面的な形状の自由度が高い
- 曲げ加工が容易
- 軽量

これらの特長により、ノートPCをはじめ、PDA、デジタルカメラ、更には携帯電話などのモバイル電子機器で実用化の検討が進んでいる。また、A4サイズの平面型ペラフレックスを用いて、熱を平面的に輸送、拡散させる検討も進んでおり、サーバへの適用も検討されている。

ここで図14に携帯電話への実装例を示す。近年の携帯電話は、インターネットアクセスや動画撮影、表示なども可能になり、ますます高機能化が進んでいるが、発熱量の観点からすると非常に厳しい状況になってきており、数年後には超小型のファンを搭載しなくては熱くて持てなくなるという可能性も指摘されている。ここにペラフレックスを適用することによって、ヒートスポットで発生する熱を極めて狭い空間を経由してきょう体全体に拡散させきょう体全体から熱を逃がすことによって、ファンレスでも部分的な著しい温度上昇を抑えることができる。

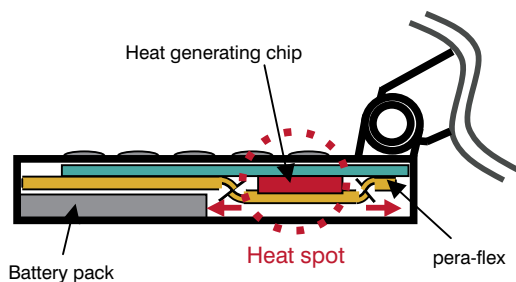


図14 携帯電話への実装例
Application example for cellular phone.

ペラフレックスは上記のような小型の電子機器だけでなく、比較的大型の機器への適用も可能である。A4サイズのペラフレックスについて前述したが、これを応用してノートPCのキーボード下や、ディスプレイのバックパネルなどにも適用すると有効な放熱手段になる。このように、ペラフレックスは多様な用途に適用できる。

5. おわりに

超薄型シート状ヒートパイプ「ペラフレックス」の熱性能、信頼性等の評価を実施した結果、実用化の見通しを得た。ペラフレックスは、超薄型、フレキシブル、形状・姿勢の自由度の高さ、軽量などといった特長を有し、熱を高効率に移動・拡散することができるので、今後モバイル電子機器の熱問題の有力なソリューションになると推察する。

[NOMENCLATURE]

L_h : Length of the heater

R_{hc} : Thermal resistance from the heat-absorbing section to the heat-dissipating section

ΔT : Temperature difference between the thermally insulated section and the end of the heat-dissipating section

Q : Amount of input heat

Q_{max} : Maximum heat transfer rate

ϕ : Inclination

参考文献

- 1) 賛川潤, 木村裕一: マイクロヒートパイプと放熱技術入門, 日刊工業新聞, (1999)
- 2) S.W.Chi 著, 大島耕一, 松下正, 村上正秀 共訳: ヒートパイプの理論と応用, ジャテック出版, (1978)
- 3) Namba, K., et al.: "Heat-pipes for electronic devices cooling and evaluations of their thermal performance," Proceeding of the 6th Itherm, Seattle, USA, (1998), 456.
- 4) Namba, K., et al.: "A new type micro heat-pipe," Furukawa Review, No17, (1998), 11.