

「伝熱における制約を打破する試み」

第二部 西尾 茂文 教授

ただいまご紹介いただきました生産技術研究所第2部の機械系におります西尾と申します。ご紹介がありましたように20年ほどこの研究所で生活、あるいは研究をさせていただきまして、今日はそのなかで感じたこと、あるいはやってきたことの一部分をご紹介するということにさせていただきますと思います。

最近、学会等で発表するのは学生さんが主体で、私、時間どおりに発表するという習慣を忘れてしまっておりますので、時間がどういう配分になるか大変不安ですけれども、できるだけ時間内でお話をまとめたいと思います。

初めに、少し大げさな話からさせていただければと思います (OHP 省略)。

今日は伝熱ということでお話しをすることになっておりますが、少し大きく見れば熱工学あるいは熱技術を扱っている研究室に所属しています。

今世紀の科学技術を考えてみると、たぶんモータیفフォースというのは、人間の物理的な能力の拡大とか、あるいは物理的な拘束からの解放という非常にわかりやすいモータیفフォースがあったのではないかと思います。そういうモータیفフォースを実現するために、例えば人間の機能を分割して、それを単能機に置き換えるという作業が今世紀ずっと続けられてきたのではないかと思います。その基本にあった考え方は、要素に分割して、その要素を逆に組み立てることによって全体が再構築できるということがあったのだと思います。それを私は、物的な科学技術と呼んでいますけれども、そういう物的な科学技術というのは我々の基本的な能力であるエネルギーであるとか移動力であるとか演算・記憶・視覚能力であるとか生命力であるとかいうものを非常に拡大してきた、あるいはそれらの拘束から一部分解放してきたということに多大な貢献があったのだと思います。

しかしながら、ご承知のように地球環境、食糧の問題に

突き当たっているということがありますし、政治文化的な問題としては、ボーダレスというのでしょうか、地球化の時代を迎えつつあることに代表される問題が起こっている。

それから、私は人工環境問題と呼んでおりますが、エネルギーあるいは情報を中心にして非常に巨大なネットワークに支えられた人工環境の中で我々が生きていくというシステムをつくり上げてきたことに対してたぶん若い人たちがそれになじむ、つまり個人の欲望あるいは目標と社会の目標をくっつけるのが非常に難しくなっているのではないかとということで、人工環境問題に突き当たっているというふうに把握しています。

次の世紀に、科学技術の面で問題になるのはおそらくエネルギー、物質、生命という3つの柱だと思うのですが、先ほど申しました物的な科学技術に抜けていた視点、つまり関係性というものをもう一度見直す必要が科学技術を中心としてあるのではないかと考えています。

私もあと、干支が一回変わりますと停年になりますけれども、そういう関係性の回復みたいなことに重点をおいた研究をこれから進めていきたい、あるいは準備したいと思っております。

関係性の回復ということで、事的な科学技術と呼んでいますけれども、我々がつくってきたものが引き起こしたことで、地球環境問題もその一例です。それから物自身が関係性をもって新しい現象を生み出すということが、最近例えば自己組織化なんかの例をとってみればわかりますように、あらわれている。つまり物として見るのではなくて、現象が起こすこと、あるいは現象の中で関係性によって出てくる事というのを重視すべきではないかということです。

私が関係しております熱に関しましては、熱的な非平衡場で起こることというのが非常に重要なことだろうと思っ

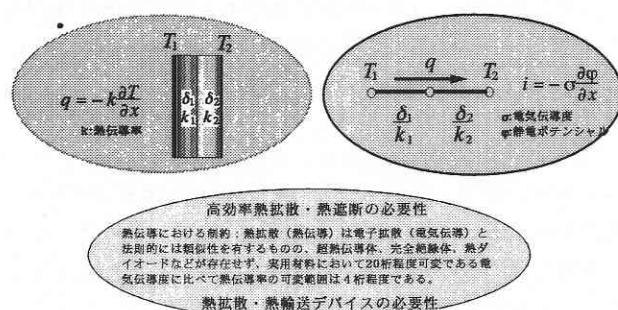
ています。先ほど例として挙げました自己組織化というのはまさにその典型であろうと思います。そういうことを意味するために専門分野として「熱事象学」ということを名乗らせていただいています。

今日は、事的な科学技術というのは、これから私自身の準備をして、残った時間で進めたいと思いますが、もう少し前の段階で、地球環境問題でブレークスルーが求められていることに対して、どういう考え方があり得るのか、あるいはどういう方向があり得るのかということをお話ししたいと思います。

そういうことを考えるうえで、一度原理へ戻って物を見直す必要があるのではないかと、原理へ戻って、標題にもありますように、制約条件というのはほんとに何だったのかということを見直して、そこをもう一度考えてみるということが重要だろうと思って今回のお話にさせていただいたということでございます。

熱的な非平衡場で起こることの典型は熱の流れでございます。熱の流れ、あるいは熱が流れること、あるいは熱が流れて起こること、そういうのを伝熱 (heat transfer) と呼びますが、非平衡場で起こることのなかで、伝熱というさらにテーマをしぼってお話をしたいと思います。

伝熱における制約 (熱伝導)



たぶん中学校の授業で出てくるのではないかと思いますけれども、熱を伝える3要素というのが出てきます。伝導と放射と対流というふうに教わると思います。ですけれども、熱を伝える原理というのは残念ながら2つしかない。3つではありません。伝導と放射しかあり得ない。対流は伝導を助けるものであって、熱を伝える原理ではありません。2大原理である熱伝導について考えてみようというのがこのスライドでございます。

例えば、ここに示しましたように厚さも材料も異なる2つの板がくっついている。その両端を T_1 , T_2 という温度にしたというときには当然高い方から低い方に熱が流れることになります。そういう熱伝導の現象を基本的に表現する式は極めてシンプルでして、 q と書いてあるのは単位面積、単位時間当たりに板を伝わる熱量——熱流束と呼びま

すが、それが温度の勾配にある定数を掛けたものによって表されるというものです。これを「フーリエの法則」と申しますが、その比例定数の k というのを熱伝導率というふうに呼びます。

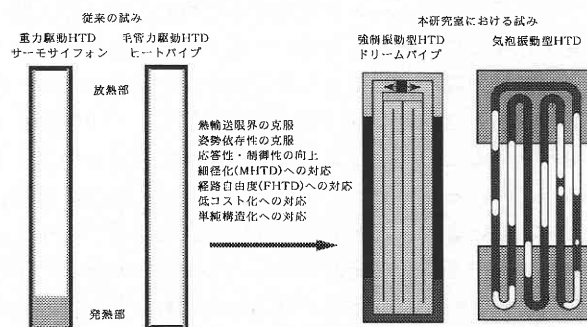
こちら側には、今度は「オームの法則」を書きましたけれども、 i というのが電流密度、 σ が電気伝導度、 ϕ が静電ポテンシャル、これは全く同じ関係でございます。つまり熱伝導と電気伝導はアナロジーが成り立つということになります。電気回路で熱伝導を置き換えてやれば、電圧を温度に置き換えてやって、電流密度を熱流束に置き換えて、抵抗を熱抵抗に置き換えてやれば考えられるということでございます。したがって電気伝導と熱伝導は非常に近い関係にあるわけですが、残念ながら熱伝導の方は非常に強い制約を受けているということがございます。

一例を挙げれば、超熱伝導体というのは残念ながらございません。それから、完全な絶縁体というのは熱にはございません。それから熱ダイオードというものもございません。例えば実用材料に限って考えますと、比例定数 k 、こちらでは σ ですが、 σ のほうは、理科年表などをごらんになればすぐ分かるように、実用材料でも20桁ぐらい変わります。しかし k の方は高だか3桁程度しか変えることができません。つまり熱の流れと電気の流れというのはアナロジーが成り立つのですが、実際に物を設計したり考えたりするうえでは熱の流れは非常に強い拘束条件を受けた現象であるということになると思います。したがってこういう制約条件を何とか打破したいということになるかと思えます。

一つの方法は、当然、超熱伝導体とか完全絶縁体を目指すことだと思いますが、それが非常に難しいとすれば、例えば実用材料で一番熱伝導率の高い銅に対して、銅の熱伝導率の10倍、100倍を実現できるようなデバイスはないかということになると思います。

熱拡散・熱輸送デバイス (熱伝導率に対する制約の打破)

銅の熱伝導率の100倍以上の見かけの熱伝導率を実現する熱拡散・熱輸送デバイス



そういう試みは、私がここで申し上げるのが初めてではなくて、当然世の中では行われておりまして、いわゆるヒートパイプというものがございます。左側に書いた2つの

ものが現在通常使われている、あるいは研究されているもので、黒い部分がパイプです。例えば図の左側のようなパイプがある。パイプの中に、ある封入率で液体を詰めたもので非常にシンプルなもの。下に発熱部があるとしますと、例えばコンピュータのチップがあって、そこから熱が入ってくることを考えますと、左端の場合には下部で沸騰が起こって蒸気が出て、蒸気が上の放熱部で凝縮をして、管の壁を伝って重力で戻ってくるというシステムです。

これをごらんになればわかりますように、非常にシンプルで賢いのですが、使える姿勢に非常に限定がある。つまり上にヒーターがあった場合にはもう使えないということになります。あるいは無重力では使えない。それを克服しようとしたのがこのヒートパイプということになりました。下部で蒸発が起こって、蒸気が上まで行って凝縮をして、今度は重力ではなくて、壁の内部にウイックと呼ばれる毛管力を実現する構造がございまして、その毛管力によって加熱部まで液体が戻ってくるというものでございます。これをごらんになればわかりますように、内部に構造を持っていますから、フレキシブルにするのが非常に難しいとか、あるいは小さくする、細くすることが非常に難しいとかいう弱点を背負っています。もちろん非常に賢いデバイスなんですが、そういう弱点を持っている。

図の中央に、2つの在来のものに対していくつか弱点を挙げました。熱輸送の限界がある。つまりここから熱が入って上で放熱する熱量にある限界がある。この2つともございます。これは非常に大きな問題です。それから姿勢の自由度が少ない。それから制御性が悪い。制御性というのは、例えばあるときは熱を伝えたくないけれども、あるときは熱を伝えたいということがあるとすれば、そういう意味での制御性が悪い。それから、先ほど申しましたように細くすることが難しい、フレキシブルにすることが難しい。さらに、当然こういうものはいろいろな場所で使われるわけですから、低コストにしなければいけないわけですが、これは中を最初真空にして、その真空度に非常に強く依存したり、あるいはウイックをつくらなければいけないということで、低コスト化がある程度難しいというような欠点がございます。

それに対して我々がやってきたのが右側の2つでございまして、両方とも流路を蛇行させて閉ループにしてあるものです。左側のものは上にディスプレイサーがございまして、緑色の部分に液体が入っているわけですが、ディスプレイサーを動かすことによって液体を往復振動させるというものでございます。

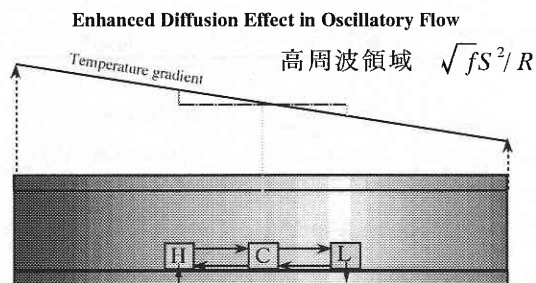
右側は蛇行したループの中に全体に液体を入れるのではなくて、あるパーセントだけ液体を詰めてやる。そうすると残りの部分は蒸気で満たされることになります。白い部分が蒸気ということになります。両方とも蛇行した閉ル

ープの中に液体を詰めて熱を輸送してやろうというものです。目標は先に述べた弱点の克服ということになります。

まず、左側の100%液体を満たすものからご説明をしたいと思います。まずは原理をご説明しましょう。非常に簡単な原理で動きます。

熱拡散・熱輸送デバイス (強制振動型HTD)

銅の熱伝導率の100倍以上の見かけの熱伝導率を実現する熱拡散・熱輸送デバイス



先ほどのパイプの1つのチャンネルを横倒しにして見たもので、赤い方が温度が高い、ブルーの方が温度が低いものです。これがパイプの壁だと思ってください。全体にある温度分布がついている。この中に液体があるわけですが、液体に往復振動、往復流動を起こさせるのがこのデバイスのポイントです。

往復流動を起こさせるときに、壁近くの小さな流体の要素を考えてみますと、中心的にはCという場所にある流体要素は、振動によってHへいったりLへいたりする。Cの流体のかたまりの温度は、このポイントに相当する温度が平均的な温度としてございます。

H側に移動したときには、高温の面に面しますから、流体は壁から熱をもらうということになります。L側に移動したときには、今度は低温の面に面しますから、壁に熱を与えることになります。こういう往復振動がなければ、先ほどのフーリエの法則、熱伝導の法則によって、管軸方向に熱が伝わるだけです。しかしながらそこに往復振動を起こさせますと、Hから熱が、振動によってLへ運ばれる、いわゆる壁を介してバケツリレーのような形で熱が運ばれるループがもう一本できることになる。

こういう運動によって、それでは熱がどれくらい運ばれるかということ、例えばHやL点でできる温度差は、振幅が大きければ大きいほど大きな温度差ができます。したがって振幅に比例するだろうということがわかります。

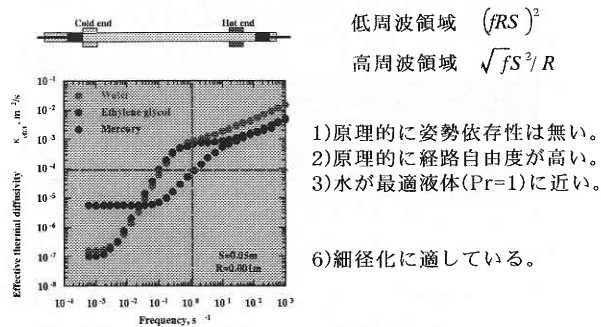
それから、熱の伝わる速さは、蛙飛び、あるいはバケツリレーの距離に依存しますから、そういう意味で振幅にもう一回依存するだろう。したがって、例えばストロークの振幅の二乗に比例する。これはいま定性的に申し上げましたが、解析をちゃんとやってみるとこういう答えが出てまいります。周波数に対してはルートに比例する。こ

れも今日はご説明しませんが、熱伝導を定性的に考えると、このことは説明できる。それからパイプの半径に逆比例するというようなことも、これもご説明しませんが、定性的に考えても出てきますし、解析をやっても出てきます。このような簡単な原理によって、先ほどの振動型の熱輸送管というのは機能するということになります。

では、どのくらいの性能を持っているのかということの一例をお見せしたいと思います。

熱拡散・熱輸送デバイス (強制振動型HTD)

銅の熱伝導率の100倍以上の見かけの熱伝導率を実現する熱拡散・熱輸送デバイス



我々、先ほど申し上げましたけれども、例えば銅の10倍、100倍の熱を運ばれるものが欲しいというのが最初のターゲットです。左下にありますものが解析結果でございまして、横軸に振動の周期をとってございます。縦軸に熱伝導率に相当するものをとっております。本当は熱拡散率というもので、熱伝導率を密度と比熱で割ってありますが、密度と比熱はいま関係ございませんで、熱伝導率だと思ってください。

ブルーで縦に引いてある線が1 Hzです。横に赤い線が引いてありますが、これは銅の熱伝導率に相当する値です。赤、ブルー、黒でプロットしてありますのは、中の振動液体が水、エチレングリコール、水銀の場合についてプロットいたしました。振動数が非常に低いときの値がそれぞれの流体が持っている熱伝導率ということになります。

例えば水、赤いプロットを見ていただきますと、水の熱伝導率はこれぐらいです。これは両対数のグラフで書いてあります。ここの値をもっています。振動数を少し上げていくと急速に見かけの熱伝導率が上がって、1 Hzのところでは銅の約10倍ぐらいの見掛けの熱伝導率を実現することができます。先ほど申し上げましたように、この熱輸送能力というのは振幅の二乗に比例しますので、振幅を2倍にすればさらに4倍に上がっていくということになります。

これは左上に示しましたように蛇行した形ではなくて一番シンプルな、1本のパイプの中に液体を含めて、ピストンで押してやって振動を起こさせるという典型的なものを書いたものですが、これをごらんになればおわかりになりますように、原理的に姿勢の依存性はない。つまりどうい

うふうにやっても影響はないだろう。中に何も構造を持ってませんから、例えばこれはビニールチューブでもいいということになってフレキシブルにできる。

それから、もう一度グラフを見ていただきますと、熱伝導率という観点では、水銀が一番、当然高いわけです。ところが振動によってどれくらいよけいに熱が伝わるかという観点では、水銀が一番悪い特性を持っています。それから、熱伝導率の一番低いものは、周波数が低い領域ではいいですが、また周波数が高くなると落ちてくる。つまり中間ぐらいの熱伝導率を持った液体が一番いいということで、最適な液体が存在する。しかもその最適な液体は、我々の身近にある水であるということがこのデバイスのいいところの一つだと思います。

それから、ここを低周波、ここを高周波領域と呼んでいきますけれども、それぞれの特性を右上に書きましたが、ごらんになればわかりますように、例えば見かけの熱伝導率を変えたいというときには周波数でもいいしストロークでもいいし、それを変えてやれば自在に熱の伝わり方を変えることができる。したがって熱制御性が高い。

それから、これも今日細かくお話しする時間がないのですが、今あるサーモサイフォンとかヒートパイプとかいうものは熱輸送に限界があると申し上げました。このパイプについてそういうものがあるかということは非常に気になるわけです。どういうところで起こりうるかということ、振動させている流れは、振幅が小さいあるいは周波数が小さければ層流の状態で振動流ですが、だんだん周波数を上げていくということを考えますと、いずれかは乱流に遷移するだろうと思われます。乱流の遷移が起こると、ひょっとしたら熱輸送に限界が生じるかもしれないということが気になります。

それを実際にやってみましたが、乱流状態になると、層流の予測値からさらに2倍ぐらいのかなりいい値が出てくる。つまり、我々はいまのところこのデバイスには熱輸送に限界がないだろうと考えています。それから細径化に適しているという利点もございます。

こういう利点を持っているわけですが、外から、とにかく加振するためのエネルギーを加えてやらなければいけないということが最大のネックでございます。

では、加振のエネルギーを考えたときに、どれくらい熱が運べるかということを示したのがこの図でございしますが、まず熱輸送係数というのを定義いたしました。加振エネルギー、パイプ1mあたりに要する加振エネルギー、それを分母にとりまして、分子に1mの長さでその両端に単位温度差がついたときに、そのデバイスが運べる熱量というのをとりました。これを熱輸送係数と呼びます。

こちら側(縦軸)に熱輸送係数と見かけの熱伝導率をプロットして、横軸に、先ほどと同じように周波数をプロッ

熱拡散・熱輸送デバイス (強制振動型HTD)

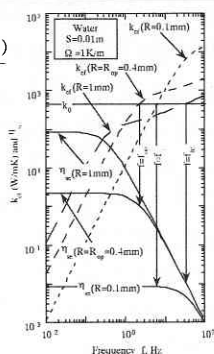
$$\text{熱輸送係数} = \frac{\text{熱輸送量}(L=1\text{m}, \Omega=1\text{K/m})}{\text{加振エネルギー}(L=1\text{m})}$$

加振エネルギーからみた特長

1) 目標の見かけの熱伝導率を実現するには、熱輸送係数が最大となる管径が存在する。

2) 最適管径で $\Omega = 20\text{K/m}$ とすると見かけの熱伝導率は銅の20倍、加振エネルギーは熱輸送量の4%程度である。

3) 通常の循環ループ方式に比べて輸送熱量は2倍以上大きくなる。



トしてございます。3種類の曲線が示されていますが、何が違うかというと、パイプの半径を0.1mm, 0.4mm, 1mmと変えてございます。こちら側の右さがりの曲線が熱輸送係数を書いたものです。

ある目標の熱伝導率 k_0 があるとしますと、これを実現したいとすると、交点は3つ、それぞれのパイプで1つずつありますから3つ出てまいります。そのときの熱輸送係数、これは高い方がいいわけですが、同じ動力でいっぱい熱が運べるわけですから、高い方がよくて、一番高いのはどこかということ、ちょうど真ん中の、0.4mmの半径を持ったパイプが一番いいということになります。すなわち最適なパイプの直径というのものはこれには存在するということがおわかりになると思います。

では、その最適なパイプを使ったときに熱輸送係数はどのくらいになるのかということを考えてみますと、例えば1mあたりに20ケルビン、20℃の温度差がついているというふうにすると、見かけの熱伝導率は、この条件では銅の20倍ぐらいの値が実現できる。そのときに運んだ熱量と加振エネルギーの比は、加振エネルギーは熱輸送量の4%程度です。これが大きい小さいかというのは、それぞれの用途に応じて決まる問題だと思います。必ずしもそれほど大きな値だとは私は思っておりません。例えば自動車のエンジンのように、すでに回転している部分が存在するようなものに関しては、それを駆動力にして熱輸送をすることができますから、わざわざ加振源を設ける必要がない場合もおそらくあるだろうと思います。

それから、こういうデバイスを使うときに、実際に高温部と低温部があったときに、それをループで結んで、普通の熱交換器みたいに流体を流せばいいのではないかというふうにお考えになると思います。そういう循環方式に比べて、同じポンプ動力で比較してみますと、熱輸送量はこのデバイスは2倍以上大きくなるということで、通常の循環式よりも優れている特長を持っていると思います。

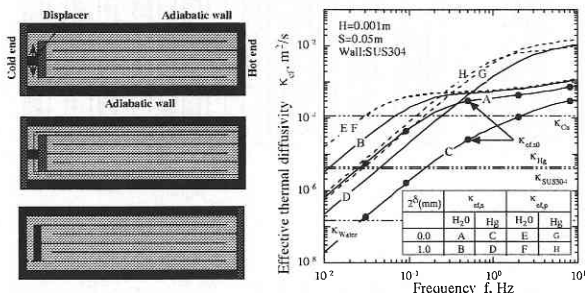
ただし、先ほどの4%という値が大きい小さいか、いろいろな応用の目的によって違うと思いますが、いずれに

しても加振エネルギーが必要だということですから、加振エネルギーを少なくする、あるいは同じ加振エネルギーでもっと熱を運べるように工夫すべきだということになると思います。

熱拡散・熱輸送デバイス (逆位相強制振動型HTD)

銅の熱伝導率の100倍以上の見かけの熱伝導率を実現する熱拡散・熱輸送デバイス

低周波領域での見かけの熱伝導率の増大



それで前に示しましたような、閉ループ式の振動型のデバイスを考えたということになります。ディスプレイサーがあって、閉ループを形成して振動流を起こさせるというものでございます。先ほど特性を示しましたのは、1本のパイプでそこに振動を起こさせるというものでしたが、これは異なる形になっています。みそは何かというと、流体がある方向に振動するときに、隣りの流路は逆に振動します。そうすると、ある断面で比べてみますと、逆方向に動きますから、非常に大きな温度差が実現できるということになります。

対向流式の熱交換器の発想に近いと思いますが、こういう形をとってやると、1本の管で熱輸送を測ったときに比べてどれくらいかというのを示したのがこれでございます。いろいろ条件がございますが、横軸に周波数、縦軸に見かけの熱伝導率をとっています。例えば1本の管で揺すって、それを束にした。つまり全部の管が同位相で振動しているという場合の特性が、例えば水を対象にしますと、Aというカーブです。それに対して同じ本数で閉ループをつくってやって、逆位相で振動させてやるということにしますと、E, Fというカーブになります。低周波領域で非常に熱特性がよくなっているのがごらんいただけると思います。

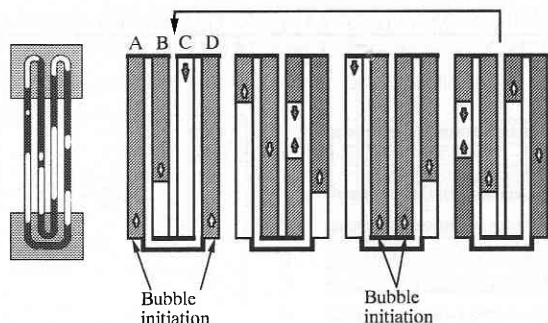
どれくらいよくなっているかというと、2桁弱、つまり同位相型に比べて逆位相型のものが100倍近く熱輸送量が大きいということになります。したがってこれを使えば、かなり先ほどの熱輸送係数を低減できるだろうと思います。

しかしながら、いずれにしてもとにかく加振エネルギーが必要だというのは最後に残ります。どれだけ小さくても加振機構と加振エネルギーは必要だ。それでは、それをさらになくすることはできないか。せつかく両端に温度差があ

るので、その温度差を駆動力にして自励振動のようなものを液柱にできないかという試みを行いました。

熱拡散・熱輸送デバイス (気泡振動型HTD)

銅の熱伝導率の100倍以上の見かけの熱伝導率を実現する熱拡散・熱輸送デバイス



これはその一例でございますが、最初の方で申し上げました2つ目のタイプ、つまり100%液体を封入しないで、あるパーセンテージだけ封入する。そうしますと、蒸気の部分と液体の部分が混在した状態が実現できる。これは約75%、あるいは70%ぐらいだったと思いますが、封入したときの観察例です。図の左側のように蛇行したループができて、その中に液体が入っている。

ある周期定常状態での状況を示したのですが、この状態で高温部、つまり熱が入ってくる部分で発泡が起こります。発泡によって蒸気相が形成されて、こういうふうに変長して、ここの液体は上に押し上げられて、矢印の方向に運動する。この状態になりますと、今度はここで発泡が起こって、この液柱は逆に矢印の側に運動するようになる。つまり緑の部分と赤い部分を比べていただきます、あるいはこの赤い部分とこの赤い部分を比べていただきますと、ある周期では液体がこちらに運動し、次の半周期では反対に運動する。つまり先ほどディスプレイサーで無理やり実現していた振動運動を、何も使わないで起こすことができるということになります。ちなみにこれは気泡ができるという相変化を利用しておりますので、この観察から振幅と周波数がわかるわけですが、それを先ほどの相変化を使わない形の解析結果に周波数と振幅を入れてやって、どれくらいの能力が出るか算定しまして、それと実際にこれが輸送する能力を比べてみると、潜熱の寄与によってさらに4倍ぐらいこちらの方がいいということが分かりました。

これはそういう振動機構を内在させたデバイスとしていいとみることもできますし、これ自身、ほかの封入率で動かせば、もっといい熱輸送の特性が出てくるのではないかなというふうにも考えられます。

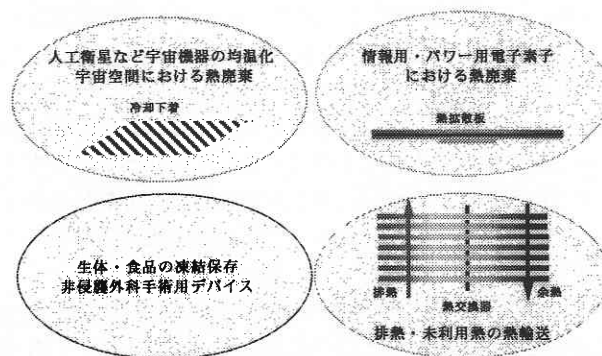
それをやってみたのが、時間が過ぎてますので、1枚飛ばして、特性だけをお話いたしますと、横軸に液体の封入率を20%から90%までとってございます (OHP 省略)。

縦軸に、このパイプが実現できる見かけの熱伝導率をとってあります。横に引いてあるのが銅の100倍に相当する熱伝導率です。当面我々はこの辺をターゲットにしている。低温側は30℃の水を流して一定にしています。高温側のほうは、45℃から80℃までの温水を流している。そうすると、ほとんどの封入率の領域、特に60%以下あるいは65%以下の領域で高温側の温度をふっていても100倍以上の見かけの熱伝導率を実現できるということがおわかりいただけると思います。つまり、実用的な材料に限ってみますと、銅が一番熱伝導率がよくて、熱輸送性あるいは熱拡散能力が高いわけですが、こういうデバイスを使うことによってそれを10倍、さらに100倍の能力を発揮できるような形に変えることができるということがおわかりいただけたのではないかと思います。

このデバイスに関する最後、つまり熱伝導に関する制約の最後として、サーモサイフォン、いわゆる重力に依存したもの、それから通常のいわゆるヒートパイプ、それから液体を振動させて相変化を使わないもの、それから最後に示しました相変化、気泡を使うもの、それぞれについて熱輸送の限界があるかどうか、制御性がいまいかかなどという表を作ってみました (OHP 省略)。

個々には説明する時間がございませんが、見ていただきたいことは、それぞれについて欠点はある、長所もある。ですからこれからの時代は、こういう熱輸送管を使って仕事をすると、一体どの項目が一番狙いなのかということを決めていただいて、それに一番適合した熱輸送デバイスを使い分けるといって時代になってきたのではないかと考えています。

熱拡散・熱輸送デバイス



こういう熱輸送デバイスを使うとどういふことができるのかということをもとめたのがこれですが、思いつくままに書いたわけですが、右上のように、例えばコンピュータのチップがあって、これが発熱している。そうすると、上に薄い板を乗せて、その中に先ほどの蛇行したループの熱輸送管を内蔵させるということにしますと、横方向に高い

熱伝導率可以实现できますから、熱拡散板、効率のいい放熱板ができる。それから排熱の利用、未利用熱の利用を考えてみますと、例えば右上のように、低温の排熱があって、それを入ってくる空気之余熱に使いたいというときには、当然熱交換器が必要になるわけですが、通常は、例えばヒートパイプをつけて熱交換器にするというものがございす。ですけれども、ヒートパイプですと、先ほど申し上げましたように、パイプを細くすることが非常に難しいですから、外側の空気に対する熱伝達能力が非常に低いということになります。そうすると、どうしてもフィンが必要になる。ところが細くできるようなデバイスを使えば、先ほど申し上げました振動型のもの、あるいは蛇行式のものを使いますと細くできますからフィンが不要になるということで、コンパクトな熱交換器ができる。

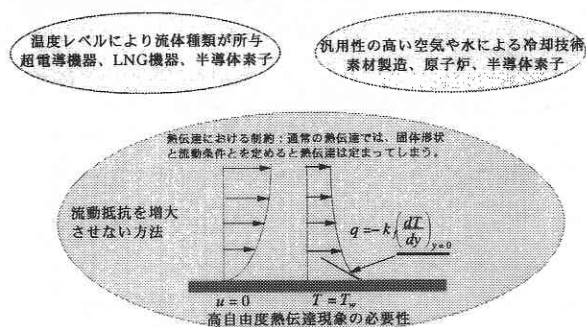
それから、左上のように宇宙関係でも利用できます。一例として冷却下着というのを書きましたが、宇宙飛行士が船外活動をするときに自分の発熱、大人人間は 100 W ぐらい通常の状態でも発熱しているわけですが、宇宙空間でもそれを放熱する外気はございせん。ですから放熱器で昇華させるわけ。水を昇華させて、昇華潜熱で真空中に捨てるような放熱器を持っている。ですけれども、そこまで発生した体の熱を運ばなければいけない。アメリカの宇宙飛行士などは、こういうパイプがいっぱいはった下着を来ています。これを熱輸送能力の高い、しかもフレキシブルで細い熱輸送デバイスに置き換えることができれば、非常に行動力とか、そういう面でメリットがございす。そういうものもできる。

あるいは生体の手術。我々お腹を切って手術するものもございすけれども、なるべく生体に対してダメージの少ない形で手術をしようということで、非侵襲外科手術というのが最近出てきてます。そういうときに、患部に対して、外からこういうもの（OHP 省略）を入れて、例えば先にはさみがついていて、それで手術をする。これはウチの大学の機械工学科で昨年度ロボット関係の先生が我々のデバイスを使ってくれた例ですが、ここにはさみがあって、ここで患部で手術をする。ここに 2 つの形状記憶合金がございまして、ここの温度を制御することによって真っ直ぐにしたり、曲げたりしようというものです。そのためには熱を早く拡散しなければいけないということで、ここに我々の熱輸送管が入っているということになります。こんな形は一例ですが、いろいろなことができるのではないかと考えております。

熱伝導に関してはもう一つ制約条件をお話ししようと思ったのですが、時間の関係で、対流に関して思っていることを一つだけ例として申し上げたいと思います。

伝熱に関する制約の 2 つ目として熱伝達、つまり対流によって熱移動を助けるというパターンを考えてみましょ

伝熱における制約（熱伝達）



う。これは講義なんかでよく見る例ですが、例えば高温の板があって、そこに空気が流れている。空気に熱を伝えるという場合を考えます。そうすると、先ほど対流というのは熱を伝える原理ではないと申し上げましたけれども、基本的に固体から、この板から空気に熱が伝わっているのはここでできる温度勾配によって、これはフーリエの法則と先ほど申し上げましたけれども、これによって熱が伝わっているだけです。熱伝導によって熱が伝わっている。ではこの勾配は何によって決まるかということ、空気の中にできる温度分布によって決まる。ではこの温度分布は何によって決まるかということと流速分布によって決まる。したがって数式的なことを申し上げれば、運動方程式を解いて流速分布を求めて、その運動方程式を解いた結果の速度分布をエネルギー方程式に入れて温度分布を解いて、最終的に壁での勾配を求めることによって熱の伝わり方がわかるということ。我々はやるわけです。そのときに境界条件として、壁では速度がゼロ、流体の温度は壁の温度に等しいですよということで解析をしたり数値計算をしたりすることになる。

このことを逆に考えてみますと、そういうことによって解けるということは、つまり自由度が非常に少ない。つまり、こういう境界条件が決まって方程式も決まっているわけですから、我々の操作量というのは、速度を変えとか、流体の種類を変えとか、形状を変えということにしかならない。それ以外自由度を付加することができないかということが出てくると思います。したがって、高自由度熱伝達現象の必要性が、そういう制約から出てくるのではないかと思います。

その一例として、こういう現象ご説明申し上げたいと思います。

これは何かと申しますと、2 mm の銅の板を、表面だけ出して、あとを全部断熱材でくるんで、90°C の温度から液体窒素の中にじゃぼっとつけるという簡単な実験です。それで、ある決められた温度まで冷えるのにどれくらい時間がかかるかを測ったものです。ただし、横軸にとってありますのは、銅の板の表面に付けた断熱材の厚さです。実

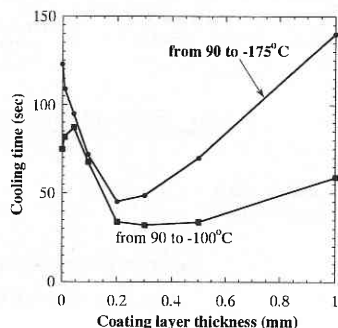
断熱層のパラドクス

表面断熱層の付加による自由度の増大

1)断熱層を表面に付加すると、断熱層厚さが薄い場合は、断熱層厚さが厚くなるとともに冷却時間の短縮される。

2)テフロン断熱層 液体窒素系では、断熱層厚さが0.2~0.3mm程度で冷却時間は最短となり、裸面の1/3程度となる。

3)冷却時間が裸面の場合より長くなるには、1mmオーダー以上の厚さを要する。



際に使ったのはテフロンという、銅の1000分の1ぐらいの熱伝導率を持った断熱材です。ここが1mmで、ここが0mm、つまり裸の面ということになる。例えば90℃から-175℃まで冷える時間を縦軸にとってみますと、断熱材をつけると、薄い間は冷却時間が短縮される。あるところで一番短くなって、それ以降は断熱材を厚くするほど冷却時間がかかる。これは通常の断熱効果です。つまりある厚さまでは、断熱材をつけると逆に冷却時間が短縮されるということになります。この現象は、先ほど書きましたような境界条件を定めて、エネルギー方程式等を解くということでは出てまいりません。つまり我々は、表面に断熱のコーティングをつけることによってもう一つ自由度を持ったということになる。この現象の冷却曲線をとってみますと、こういうカーブになります (OHP 省略)。

縦軸に銅の板の温度、横軸に時間をとってます。線の種類が違うのは、実線で書いてあるのが裸の銅の板、その他の線では、表面にそれぞれ8ミクロンから1mmまで厚さを変えてテフロンを付けてある。先ほど示しましたのは、この温度までどれくらいの時間で冷えるかということで、例えば裸の銅の板のときにはこういうふうに冷えてきますが、0.2mmぐらいのテフロン層をつけますと早く冷えるということです。

この現象の面白いことは、こういうふうに早く冷えるようになった状況では、表面にテフロンを0.2mmぐらい付けてあるわけです。0.2mmでも0.3mmでもいいのですが、それぐらいの銅の層をもう一回その上に付けてやる。つまり銅の板の上にテフロンの薄い層があって、その上に薄い銅の層を付けてやる。そうすると冷却時間は完全に裸の銅の場合に戻ります。つまり、冷却時間を決めているのは、ごく表面の薄い層の材料物性だけによって冷却時間がコントロールできる。つまりそういう自由度を我々は持ったということになります。

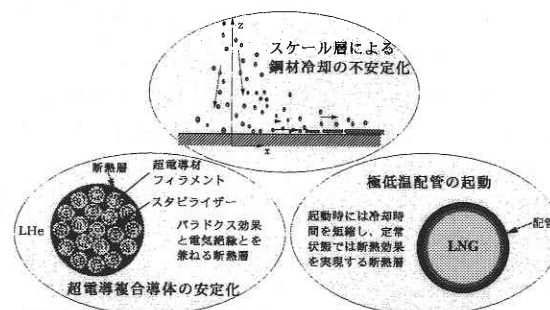
こういう現象を使うと、どういうことができるかということですが、これを学会で発表したとき、かなり昔になり

ますが、日本刀の焼き入れで使っているということを初めて知りました見学に行きました。日本刀の切れ味がいいのは、知らず知らずのうちにモリブデン鋼を使っていたことと、焼き入れの技術だと聞いています。刀工はふいごの中で日本刀を日の出の太陽の色になるまで焼いて、それを7℃から13℃の冷水に人を切るように入れるというのが焼き入れの秘伝だと聞いておりますが、実はこの作業をする前に、刀工は人を切る方のところに薄い断熱層をつけます。粘土が主体ですが、それから背中の方には比較的厚い粘土層をつけます。そういうものをここで焼いて、焼き入れをする。つまりこれは焼きが入ってほしいところにわざわざ断熱層をつけるというのは、先ほど申し上げました断熱層のパラドクス効果というのをおそらく経験的に知っていたのだと思います。

これは余談ですが、もう少し実用的にどういうところに関係があるか、おもいつくまま幾つか例を挙げたも

断熱層のパラドクス

表面断熱層の付加による自由度の増大



のです。

この中に製鉄会社の方がいらっしゃるかもしれませんが、鋼材の冷却をスプレーとかミストで行うときに、表面にはスケール層というのができます。スケール層というのは断熱層ですから、スケール層の出来方によって当然冷却具合が部分的に変わってきってしまうということは、断熱層のパラドクスからすれば当然のことです。逆に、スケール層をある適切な厚さでコントロールできれば冷却時間を短縮できることにもなると思います。

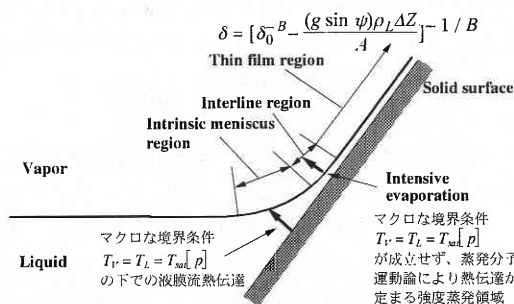
それから、我々のところでは超電導マグネットの冷却というのをやっておりまして、超電導マグネットは、例えば液体ヘリウムで冷やすようなものと、一回冷やしてしまえばもう発熱源はないかということ、マグネットの中に発熱源は山ほどございます。それによって導体の温度が上がって、超電導から常電導になってしまうという状態が起こります。それは当然避けるべきことですが、これは超電導の複合導体を書いたものです。黄色の小さいまるがそれぞれ超伝導のフィラメント、ブルーの部分が、通常は銅と

かアルミを使いますが、スタピライザーと呼ばれるもの。それをこういうふうに一体化したのも、大体直径が、典型的には1mmぐらいだと思いますが、そういうものです。この周りには液体ヘリウムが例えばある。そのときに、表面に電氣的な絶縁層を付けるということをやります。これを断熱層のパラドクスの観点から適切な厚さでコーティングしてやりますと、発熱に対して非常に安定な、つまり常電導に遷移しにくい導線をつくることができる。これは電氣的な絶縁層とパラドクス効果を同時に実現しようというものです。

もっと簡単には、例えばLNGの配管があるとして、そこにLNGを急に流し始める。当然LNGの温度まで冷えるまでに時間がかかります。そのパイプの中に、ある適切な厚さで断熱層をコーティングしてやる。そうすると、先ほどのパラドクス効果によって冷える時間は短縮される。短縮されてLNGの温度になってしまえば、今度はこの断熱層は、通常の断熱層として機能してくれるということになる。したがってこの場合には、早く冷やすという意味のパラドクス効果と断熱効果を両方実現するということになる

蒸発メニスカス

ミクロ的視点の導入による自由度の増大



と思います。

最後に、もう少しミクロ的な視点を入れて熱伝達の制約から逃れられないかということだけをお話したいと思います。

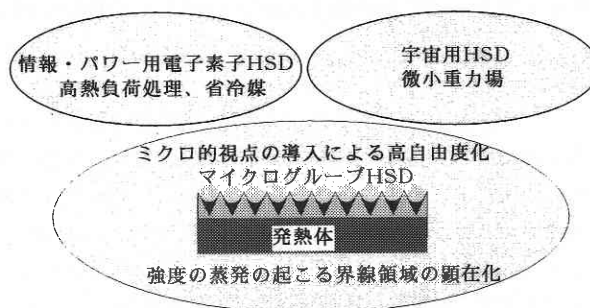
これはメニスカスの蒸発というものの絵を描いたものですが、例えば水があって、そこに加熱された固体があるということを考えていただきたい。そうしますと、こういうところでは当然、例えば熱伝導を考えますと、ここまで熱が運ばれて蒸発しなければいけないということで、熱伝導による抵抗を背負っている部分、それから、薄い液膜ができる部分はほとんど吸着層でして、これは固体からの原子間力、分子間力によって引っ張られていて、非常に蒸発しにくい。熱伝導の抵抗は小さいけれども、熱的に蒸発がほとんどできない。そうすると、この間のインターライン・リージョンというところで熱伝導の抵抗も小さいし、固体

側からの影響も小さいということで、非常に強い蒸発が起こるという領域がございます。液膜の厚い領域では、通常は、例えば水で大気圧を考えますと、界面では100度ですよという境界条件が満たされます。でも薄い領域では、これも詳細は申し上げませんが、100℃の境界条件というのは満たされません。先ほど対流の熱伝達で境界条件を決めれば、熱伝達は決まってしまうと申し上げましたが、こういうところをつくってやると、その境界条件を変えることができるということになります。

こういう現象を使ってやると、例えば、こういうヒートシンクができるだろうと思っています。情報とかパワー用の電子素子は非常に発熱密度が高くなっております。それに対してヒートシンクが必要になるわけですが、それに合わせて地球環境問題で省冷媒ということとか叫ばれるという

蒸発メニスカス (マイクログループHSD)

ミクロ的視点の導入による自由度の増大



状況になっております。

先ほどのメニスカスの非常に強い蒸発をなるべく、ここに例えばコンピュータのチップがあるとして、ここにヒートシンクがございまして、非常に高性能なヒートシンクとして使ってやる。こういう溝を切ってやって、典型的には10ミクロンぐらいを考えていますが、そこにこういうメニスカスをつくってやる。ここへの液体の供給は、毛管力で液体を吸わせてやる。そうしますと、単位面積当たりに、先ほど非常に強い蒸発が起こると申し上げましたインターライン・リージョンが非常に密に形成することができるということで、こういうものは高熱負荷処理ができるヒートシンクデバイス、あるいはこれは無重力でも働きますから、宇宙空間用のデバイスとして機能するのではないかと考えております。

時間になりましたので、今日のお話はこれで終わりたいと思いますが、伝熱ということに限って、しかも熱伝導と熱伝達的话题を1つずつぐらいお話をし、どういう拘束条件があって、それを打破するにはどういうふうな試みがあり得るかということをお話したつもりです。ありがとうございました。