

水の熱輸送メカニズムと電磁波の影響

静岡県立大学 薬学部

片山 誠二、小沢 一夫

During continuous irradiation far or near infrared (FIR,NIR) on water in cylindrical cell, time courses of temperature rise of water at both the irradiated and opposite ends of the cell were observed by using a thermometer with high precision of 1/1000 deg, taking into account radiation of heat from the sample water.

Under an experimental condition without radiation of heat from sample system, the transport process of thermal energy obtained from FIR, namely, the time course of temperature rise, was mostly in accord with that from NIR, while a little but certain difference was observed in the beginning of both irradiations. This suggested that non-equilibrium lattice vibration of water (equivalent to internal energy) was induced temporarily in the beginning of FIR or NIR irradiation, but it eventually approached to an equilibrium one, because of cross-relaxation between energy levels of various intramolecular motions. The difference appeared in the beginning of the irradiations could be taken as a characteristic of FIR.

1 緒言

近年、遠赤外線 (FIR) は近縁波長の電磁波に較べて極めて特異な性質を有するとして注目されている。照射により水や食品の味を良くすることから、様々な浄水器や家庭用調理器具が市販されている。さらに、血行をよくしたりガンの治療に用いられたりと、ヒトの健康と密接に関わりを持っている。又、酵素や生体分子などの活性に著しい影響を与えるとして分子レベルからの研究も活発となってきた。このようなFIRの様々な分野に於ける効果はいずれも究極的には、FIRが水の構造と物性に影響を及ぼすためと理解されている。しかし、これらの特異な効果が本当に存在するか否かは必ずしも明確とはなっていない。今これらの効果を学術的に検証することがこの領域の緊急の課題となっている。筆者らはこのような点に焦点を当てて研究を開始した。

このFIRの効果は加熱効果と常温効果の二面か



Mechanism of Thermal Transport of Bulk Water Absorbed Far or Near Infrared wave

Seiji Katayama and Kazuo Kozawa

School of Pharmaceutical Sciences, University of Shizuoka

ら研究されている。FIRを強く照射して用いた場合は加熱効果であり、この場合熱的效果が大きく作用するため、FIR固有の特異的效果が打ち消されて検証するのが難しいと考えられる。一方、微弱なFIR照射の場合は、熱的效果が小さいため、これを常温効果というが、波長由来の固有の効果の検出が期待される。FIR波長は水の振動・回転エネルギーとして吸収され、遷移エネルギーの高い状態に移る。即ち、分子内運動が高い状態に変化し温度が上がる。この時の温度上昇が吸収したFIR固有の波長を記憶し保存されているとするならば、これはFIRの一つの大きな特異的な性質になってもよいと考えられる。即ち、同じ温度であっても熱エネルギーの源である様々な分子内熱運動のモードの構成に違いがあってもよいと先験的に考えられる。もしこのような仮定に立つならば、FIRで得た熱エネルギーは他の波長の吸収によって得た熱エネルギーとは性質が異なってもよいことが予測される。したがって、この場合、熱の伝導や熱の放熱の仕方、並びに並進、振動、回転の各エネルギー間のエネルギー移動 (交差緩和) 等にその特徴が現われてもよいと思われる。そこで、本研究では、水の熱伝導に焦点をあてて実験を開始した。まず、セル中に水を満たしその一端に電磁波を照射し、吸収された熱エネルギー

が他端へと伝播する様子を調べた。両端での昇温曲線を作成し熱輸送のメカニズムを検証することによって、FIRの水に及ぼす特異な性質を議論することとした。さらに、熱輸送の過程に於いて熱エネルギーの放出の効果が昇温曲線に著しい影響を与えるため、セル周辺への放熱に関わる種々の実験条件の寄与についても検討を行った。

2 実験

実験は、全て室温 $23.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ にコントロールされた恒温室内にて実施した。恒温室内では可視光線その他の迷光の影響をなくすために、全ての照明を切って実施した。さらに電磁波等の影響を除くため、図1に示すようなアルミ版にて2部屋に仕切られた箱を作製し、その内部に水を満たしたパイレックス製の円筒形セルを設置した。セル内の水が恒温室内の温度と平衡になるまで放置し、平衡後セルの一端より垂直に遠赤外線又は近赤外線を照射した。照射直後からの照射端(A)、

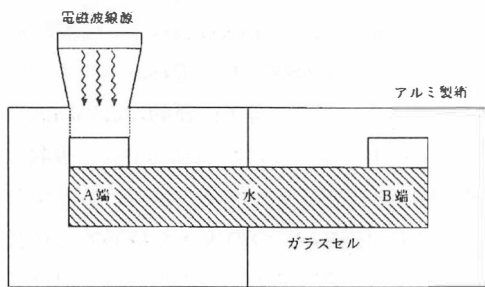
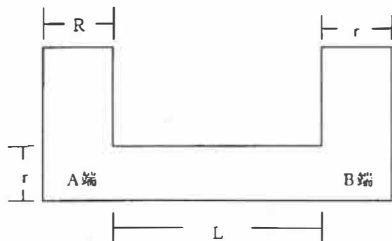


図1 電磁波照射システム



- セル1: $R=50$ $r=50$ $L=800$ (mm)
 セル2: $R=50$ $r=50$ $L=400$ (mm)
 セル3: $R=50$ $r=10$ $L=800$ (mm)

図2 ガラスセルの形状及びサイズ

他端(B)の温度変化を観測し昇温曲線を作製した。なお、セルは図2に示すように径、長さの異なる三種類セル1 (ϕ ;50 mm, l ;800 mm)、セル2 (ϕ ;50 mm, l ;400 mm)、セル3 (ϕ ;10 mm, l ;800 mm)を用いた。照射線源は、遠赤外線として日本軽金属(株)製遠赤外線ヒーター(セラコンボR)を、近赤外線(NIR)として松下寿電子工業(株)製赤外線ランプを用いた。なお、それぞれの波長領域は図3に示した。また温度測定には、 $1/1000^\circ\text{C}$ の精度にて温度測定が可能なテクノセブン(株)製精密温度測定装置を用いた。

実験は以下の実験条件に於いて実施した。

- ①熱伝導に及ぼすセルの形状(径及び長さ)の検討、
- ②熱伝導に及ぼす照射線源の波長依存性の検討、及び、
- ③熱伝導に及ぼすセルからの放熱の影響(セル周辺の環境)についての検討。

3 結果と考察

図4は径50 (mm)、長さ800 (mm)のセル1を用いて遠赤外線を照射した場合の照射端(A)及

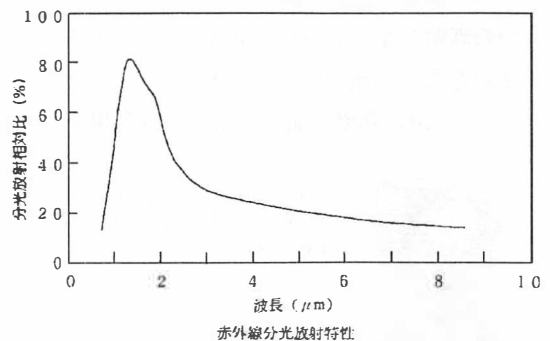
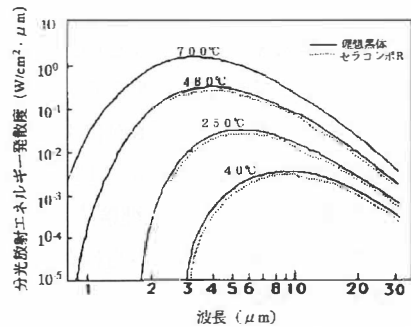


図3 遠赤外線源及び近赤外線ランプの放射波長特性

び他端(B)の昇温曲線の結果を示したものである。A端の温度は、FIR照射直後から上昇し、120分前後に変曲点を持ち、その後0.3に漸近するような昇温カーブを描いた。一方、他端Bの温度は、30分までは全く温度上昇はみられなかったが45分後から僅かな温度上昇が始まり、120分後からやはり0.2に漸近するような昇温カーブを描いた。この場合も120分前後に於いて小さな変曲点が見られた。A端の昇温曲線はFIRの直接的吸収によってもたらされたもの、B端の昇温曲線はA端からの熱エネルギーの輸送によってもたらされたものとみることができる。従って、A端とB端の温度差は、熱輸送に依存して決まると考えら

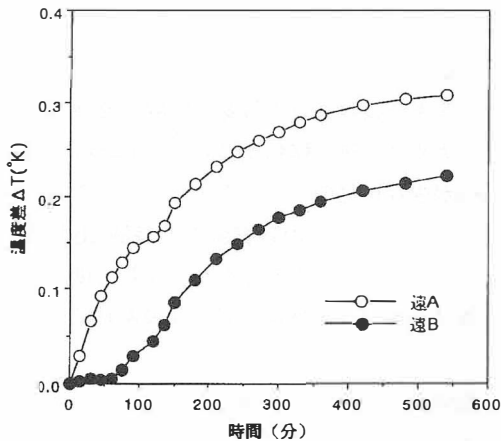


図4 セルを用いた場合の遠赤外線照射によるA端B端の昇温曲線

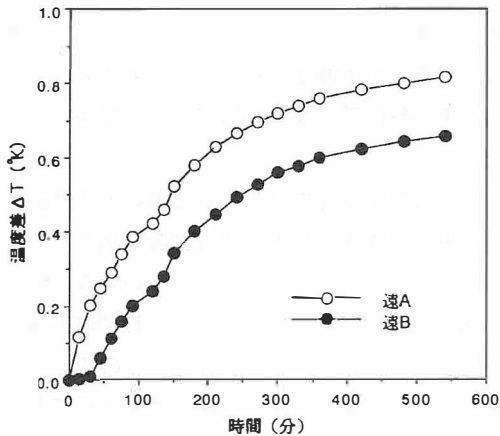


図5 セル2を用いた場合の遠赤外線によるA端B端の昇温曲線

れる。なお、熱輸送の経路(セルの竿の部分)に於ける放熱のためA端よりB端の方が低いレベルに現われ曲線の曲率が大きくなった。又、変曲点が現われた理由については、熱輸送の定常状態(熱勾配)に達するまでの時間に関連するものと推定されたが今のところ不明である。

図5は径50(mm)、長さ400(mm)のセル2を用いた場合のA,B端における昇温曲線の結果を示したものである。A端の温度上昇はやはり、120分前後に変曲点が現れ、セル1よりも高いレベルの温度上昇カーブを示した。B端の温度は15分までは温度上昇がみられなかったものの30分頃から僅かに昇温を始め、やはり120分前後に変曲点を持ち0.7に漸近するような昇温カーブを示した。又、A端とB端の昇温カーブの差は、僅か(<0.2°K)であり、この差は前のセル1の結果に於ける差よりも小さいものとなった。これらの結果は、セル長が短くなれば熱源からのエネルギー供給量が常に一定であるのに対してサンプル量が少なくなるため、相対的にA端の昇温カーブが高いレベルに移ったと解された。又、セル長が短くなればB端への熱エネルギーの到達量も多くなりA,B間の温度差が相対的に小さくなったと解された。

図6は径10(mm)、長さ800(mm)のセル3を

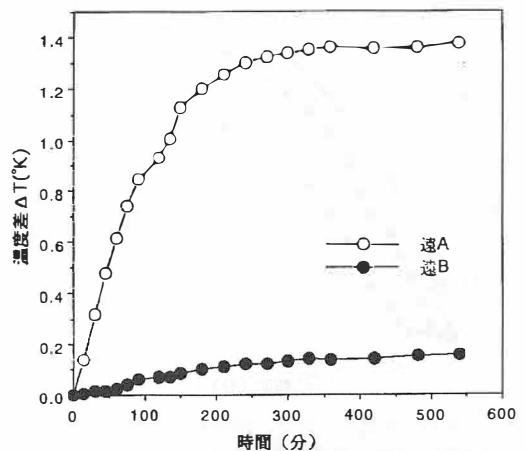


図6 セル3を用いた場合の遠赤外線によるA端B端の昇温曲線

用いた場合の昇温曲線の結果を示したものである。A端の温度上昇はセル1、セル2を用いた時の結果と比べて昇温曲線は極めて大きいレベルに現われた。これはサンプルの絶対量が少なくなったため、及び、竿部の径が細いため、後方への熱の移動量が少なくなり滞留効果が顕著になったためと考えられる。一方、B端は照射直後から極めて低いレベルの昇温がみられた。これは、速い水の熱伝導係数〔 $\kappa: 612 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (300 °K)〕から考えて照射直後から直ちにB端に熱量が到達していることを意味し、太い管(50mm)の場合はB点に到達した熱がさらに拡散してしまい、わずかな昇温カーブさえも検出できなくなってしまったと考えられる。又、A端の温度が高いレベルにあればB端との温度差が大きくなりB端の昇温曲線が初期の段階から応答したものと解される。一方、B端の昇温カーブが始終緩慢なレベルに保たれたことは、管が細いためトータルの到達する熱量が少ないこと、及び、管が細いため空気への放熱の量が無視出来ない程大きいことなどのためだと考えられた。

以上の結果は遠赤外帯域の線源を用いた場合の熱輸送であった。次に近赤外線帯域の線源を用いた場合の熱輸送について調べ、FIRの結果と併せ

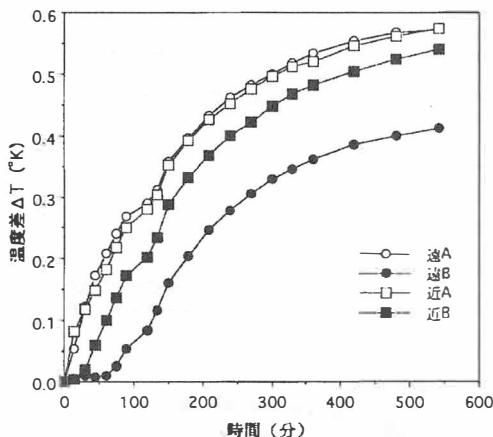


図7 セル1を用い、近赤外線照射後のA端、B端の昇温曲線。遠赤外線の結果と比較するために、遠赤外線のデータは近赤外線のA端の昇温曲線に規格化して表示した。

て比較検討した。なお、線源の波長特性は図3を参照。遠赤外線源(セラコンボR)は表面温度67 °Cで用いたため8 μm あたりにピークトップを持った波長域に於いて実験したことになる。一方、近赤外線ランプは1 μm あたりにピークトップを持った波長域に於いて実験したことになる。これら二種の線源を用いた熱伝導の実験結果は次のようになった。

図7はセル1(径50mm、長さ800mm)を用い、近赤外線を照射し、A端とB端の昇温曲線を作成したものである。その結果、近赤外線を吸収した昇温曲線は遠赤外線の結果とほぼ同じカーブプロファイルを示した。しかし、B端の昇温曲線は、遠赤外線による昇温曲線よりも相対的に高いレベルに現われ、AB間の温度差が小さいものとなった。この結果は、見かけ上遠赤外線を吸収した熱エネルギーよりも近赤外線を吸収した熱エネルギーの方が1)熱の移動が多い、2)経路での熱の放熱が少ない等のことが考えられた。なお、近赤外線及び遠赤外線の各線源の波長域、出力及び水への吸収効率等が異なるため、比較に供した昇温曲線はA端の近赤外線の昇温曲線を基準に規格化して作成した。

電磁波を吸収して変換された熱エネルギーは照射端(A端)から熱流の流れとして他端(B端)に順次伝播されていくが、この途中の過程に於いてセルから空気層へ熱が逃げる(放熱)。この放熱の効果はA端、B端の昇温曲線に著しく影響を与えることが予測される。そこでセル周辺への放熱効果が熱伝導に及ぼす影響について検証を行った。

図8はセル1を黒フェルトで覆い遠赤外線照射した場合のA端、B端の昇温曲線を調べたものである。フェルト巻のA端は巻かない場合に比べて大きな昇温曲線を示した。しかしB端の昇温曲線は顕著な差異がみられなかった。このことからフェルト巻の方がAB間の温度差が大きいことが明らかとなった。この結果、フェルトは遠赤外線の吸収をよくするように働くこと、及び、フェルト

は試料セルから熱伝導で熱を吸収し、空気層へ放熱する可能性が高いことなどが推測された。

図9はセル1を黒フェルトで覆い近赤外線照射した場合のA端、B端の昇温曲線を調べたものである。フェルト巻のA端の昇温曲線は巻かない場合のものと同レベルのものとなった。しかし、B端の昇温曲線は、フェルト巻の方が巻かない場合に比べて低いレベルに現われた。この結果、フェルト巻きの方が途中の竿部に於ける放熱

効果が大きいと判断された。しかし、近赤を吸収した熱エネルギーは遠赤吸収の場合に比べて、フェルトからの熱の放熱が小さいことが推測された。

図10は発泡スチロールにてセル1の竿部を覆って断熱し、A端、B端の昇温曲線に及ぼす放熱の効果のみたものである。遠赤外線、近赤外線いずれの線源による昇温曲線も、断熱しない場合及びフェルト巻の場合の結果に比べて、昇温カーブ

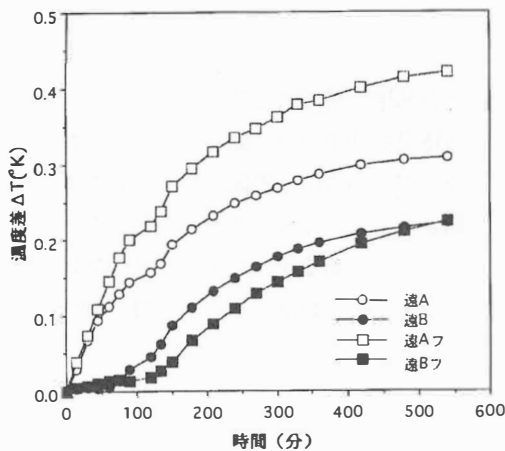


図8 黒いフェルト巻きのセル1を用い、遠赤外線照射した場合のA端、B端の昇温曲線を示したものである。比較のため黒フェルトを巻かない場合の結果と併せて表示した。

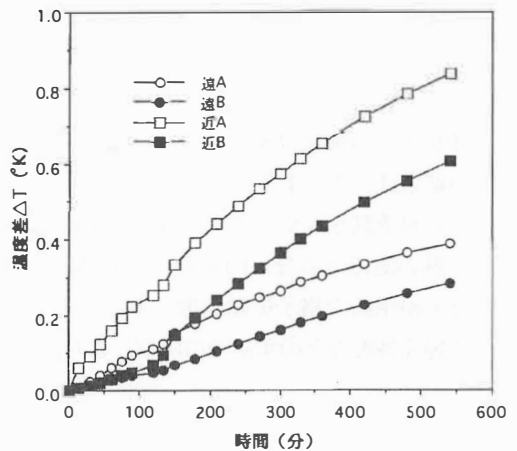


図10 発泡スチロールで覆われたセル1を用い、遠赤外線及び近赤外線照射後の昇温曲線。

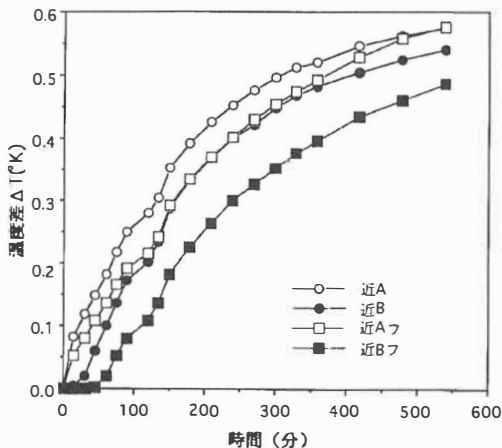


図9 黒いフェルト巻きのセル1を用い、近赤外線照射した場合のA端、B端の昇温曲線を示したものである。比較のため黒フェルトを巻かない場合の結果と併せて表示した。

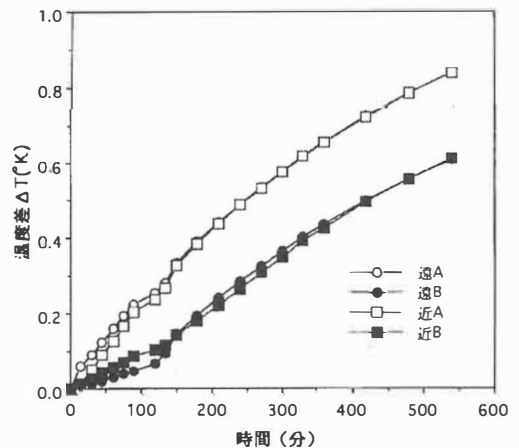


図11 発泡スチロールで覆われた場合の遠赤外線、近赤外線照射による昇温曲線の比較。両曲線は比較のため規格化して表示した。

の曲率は小さくなり直線に近いものとなった。このことは、途中経路に於ける放熱の効果が少なくなったと考えられる。

図 11 は近赤の A 端の昇温曲線を基準に規格化して描かれたものである。遠赤外線及び近赤外線の A 端、B 端の昇温カーブは初期段階を除き時間経過とともに次第に一致するようになった。このことは断熱状態では遠赤外線を吸収した熱エネルギーも近赤外線を吸収した熱エネルギーも最終的には同じ熱輸送状態に到達すると考えられた。しかし、変曲点までの初期過程に於いては遠赤と近赤との結果に顕著な差異が認められた。この差異は遠赤の方が近赤によって得た熱エネルギーより熱エネルギーの輸送効率が良いことを示唆した。以上の結果は、次のような分子内熱エネルギーのシステムが予測された。まず、ある熱平衡にある系は、熱の源である分子内運動(振動、回転、並進など)が平衡な格子振動状態にあると考える。そこで遠赤外線などの電磁波の吸収により偏った

分子内運動の遷移によって熱エネルギーを得た場合、一時的に非平衡な格子振動状態になる。この偏った分子内運動のエネルギーは、交差緩和し平衡な格子振動状態へと移行する。このように考えれば、電磁波照射初期の波長の違いによる昇温曲線の違いが理解される。又、時間の経過とともに、系は平衡な格子振動状態に移行するため、完全な断熱状態のもとでは初期の異なった励起の仕方には無関係に同じ様式の熱の輸送状態に到達すると理解される。

4 総括

以上の結果、現段階に於いては、必ずしも遠赤外線の特異な効果の決定的な検証がなされたとはいえないが、周辺の基礎固めがなされたものとして評価されよう。今後もこれらの結果をベースにさらに研究を進める予定であり、遠赤外線の特異な効果の決定的な検証がなされる日も近いと期待している。