

遠赤外線加熱とその効果

高嶋廣夫 (元 通産省 名古屋工業技術試験所)

1. はじめに

遠赤外線技術における私と韓国との交流は1988年、済州島で開催された日韓セラミックセミナーでの講演から始まった。その後、韓国工業試験院や慶尚大学校の招聘を受けて韓国遠赤外線産業界の発展に協力してきた。

遠赤外線の利用は多々あるが、今回の第15回日韓遠赤外線シンポジウムでの私の講演は、生活に密接な「遠赤外線加熱とその効果」と題して、調理への活用及び人体への適用と効果をテーマとする。

2. 熱とは

万物はエネルギーの塊である。宇宙の誕生さえ、極度に凝縮されたエネルギーの塊が、ビックバンによって散らばった結果であるとされる。

そのように考えると太陽も地球も総てエネルギーの塊と言えるが、宇宙の空間、つまり真空は何であろうか。それは、正のエネルギーと負のエネルギーが打ち消し合った「無」とであると言うのが常識だろう。でも、宇宙の成因を考える学問からは、その真空も、真空のエネルギーと言う物質であるとする説が先端物理学の話題となっている。それによれば、真空中で光が伝わるのも、電波が伝わるのも真空のエネルギーを介して行われると言う。

熱は人間が古代から生活に用いているが、その全容を究めるのは甚だ難しい。「熱とは、温度とは何だろうか？」と、はた、と壁に突き当たってしまう。

人間において視覚が感じるエネルギー区分を色と言う。その色は紫、緑、黄、橙、赤のように表現する。同じ電磁波である赤外線も近赤外線、中間赤外線、遠赤外線、超遠赤外線のように区分があるが、その表現には曖昧なところがある。そのような区分が何を意味するか、その挙動を筋立てして考えることが赤外線利用において大切である。

視覚におけるモノクロの「明るい、暗い」に対比する熱での表現は、温度が高

いとか低いとか言う。でも、それは、モノクロ表現であって、視覚でのカラーと同じように温度も、どの波長帯のエネルギーであるか、あたかも視覚のようにカラーで考えなければならない。何度 $^{\circ}\text{C}$ と言っても、どのようなカラーの赤外線であるか、そこを考えることが極めて大切である。

熱とは何だろうか

- 熱とは結合している原子間の運動に依存するエネルギーである。
- 物質を構成している原子間が運動すれば、そこから電磁波が放射される。
- 熱せられた物質が放射される電磁波には光と赤外線がある。
- 波長 $0.4\mu\text{m}$ から $0.7\mu\text{m}$ は光、 0.7μ 以上の電磁波を赤外線と言うが、熱と感ずる赤外線は $2\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ 辺りである。

図 2-1 熱とは何だろうか

2. 1. 物質と熱

熱は高温度であれ、低温度であれ、原子間あるいは分子間の運動に関わるエネルギーであるから、絶対零度でない限り、運動があり、熱が生じていることになる。温度が高くなることは漸次、運動が活発になったことであるから、物質を構成する原子間運動と熱は等価関係であることが分かる。物質が異なれば、その組織・構造、つまり原子や分子の配列が違うので、運動エネルギーの形態も1つとして同じ物は、あり得ない。物理学では、そこを物質の比熱あるいは熱容量の違いとして説明している。

物質の違いは熱の保有形態も異なるという原理から、それぞれの物質のエネルギー素性を見極めてみる。物質間に入出入りするエネルギー量が熱であり、温度は、その物質の保有するエネルギーが移動しない平衡状態時の量の目安であるから、二つの異なる物質で、同じ温度が測定されたとしても、おのおのが保有するエネルギー量は異なり、エネルギー保有量を同じにすれば温度が違うことになる。つまり、異なった物質には、それぞれの固有の比熱があることで、それが分かる。このように物質を構成する原子間、分子間の運動が熱であるから、異なる物質間の熱移動の様子を温度の高低だけで観察することはできず、物質の組成及び組織・構造に依存するエネルギープロファイルと言う因子に加えて考えれば、真のエネルギー移動の振る舞いが解明されるのである。

2.2. 熱の伝播

原子間を運動させる力を伝達するエネルギーが熱である。このように考えると熱を扱うのは物理学の範疇とされていて、化学の範疇である物質の組織構造と、その変化に深い関係にあることは、案外、等閑にされてきた。

赤外線は $0.76\mu\text{m}$ から $1000\mu\text{m}$ の間の電磁波と物理学では定義付けているが、理化学事典（日本：岩波書店）によれば、その波長が $0.76\mu\text{m}$ から $2.5\mu\text{m}$ までを近赤外線、それより $25\mu\text{m}$ までを中間赤外線、それ以遠を遠赤外線としている。その由来を、エネルギーを持った物質から放射されるエネルギーの形態として、それぞれ電子スペクトル、振動スペクトル、回転スペクトルと説明している。つまり物質を構成する原子間の遷移によるエネルギーが電子スペクトルであって、それが近赤外線と呼ばれる領域である。原子間の振動運動が中間赤外線、回転運動が遠赤外線と呼ばれている。でも、はっきりとした境界があるわけではない。紫から赤まである可視光線でも、例えば緑と黄、黄と橙などの境は、はっきりしていないのと同じである。

熱の伝播

授熱体の持つ運動を受熱体に伝えるには、放射、伝導、対流がある。

- 放射：授熱体の保有する熱エネルギーが電磁波として空間と飛び受熱体に伝える。
- 伝導：授熱体と受熱体が接して直接、受熱体に原子間運動を促す。
- 対流：授熱体の熱エネルギーが空気等の流体に伝導でエネルギーを託し授熱体に伝導で伝える。

図2-2 熱の伝播

熱の移動は周知のように伝導、対流、放射の3つの形態があるが、それらは、総て原子間や分子間に運動エネルギーを伝達させる作用であって、熱を授受する、それぞれの物質間の組織構造に深い関係がある。本講演では、そのことを重視したい。

3. 食品調理への利用

人類が最初に用いた熱利用は調理であった。でも有史前から現在までに大変な様変わりしてきた。その中で薪を燃やして作る熱は対流熱が主であって、その熱は周囲に飛散して損失が大きい。

肉や魚を焼くと言う調理には放射熱が効果的である。煮物には、先ず鍋に熱を伝え、水を介して食べ物に伝えられるが、放射、伝導、対流が複雑に絡みあって調理効果が生ずる。

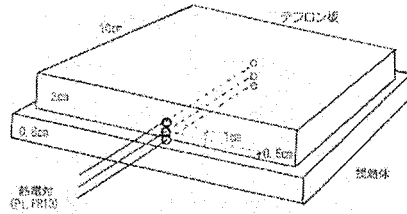
3. 1. ステーキを焼く

さて、日本で遠赤外線ブームが起こって、間もない頃、あるテレビ局で、ステーキを焼くのに金属のフライパンと陶磁器の鍋では、どちらが、美味しく焼けるか！と言う番組に出演したときであった。双方の鍋に手掌ほどの肉を置き、下からガス火で焼くのである。実際は金属フライパンの方が早く焼けた。でも、鍋に接触している側は真っ黒焦げであるのに、反対側は、まだ、血が残っているくらいであった。一方、陶器鍋の方の肉は、接触面が少し焦げたぐらいでも、上まで熱が、よく透っていて、血が残っているようなことはなかった。肉を美味しく焼くには温度調節が難しい。でも、それだけのことだろうか！と疑問に思ったのである。ひょっとしたら肉と2種の鍋との間には、熱の伝わり方、特にエネルギープロファイルの違いが影響しているのではないかと思った。つまり、授熱側のエネルギー特性が肉の熱伝導特性に関係すると考えたのである。

このように考えてくると、異種物質間で熱エネルギーが伝播するとき、双方の原子・分子の運動プロファイルの相性によって、熱伝達の様子が違ってくると考えられる。そんなことで、ステーキを焼く場合も、受熱体はビーフと一定であるが、授熱体のエネルギープロファイルの違いによってビーフに与える熱伝播の様子が変わると考えてみた。

そんなことを確かめたいと、私はシュミレーションをしてみた。肉で行うのは、データが取り難い。そこで、受熱体としてテフロンを肉の代わりに選んだ。その理由は繰り返して実験しても、テフロンは熱に安定で変質し難く、精度のよいデータを得るのに都合がよいと思ったからである。

熱伝導効果の実験方法



(授熱体に供給したエネルギーは各授熱体とも概ね10W、40Wである)

図3-1 授熱体の材質の違いがテフロン層にも与える影響を調べるための実験方法

図3-1 熱伝導効果の実験方法

授熱体の構造はニクロム線を内蔵したセラミックスの板である。授熱体として、授けるエネルギープロファイルを変えるためコージライトセラミックスそのもの（遠赤外授熱体）と、いろいろな遷移元素を加えた釉を施したセラミックス（高効率赤外線授熱体）、および銀ペーストを塗布した表面を持つセラミックス（低効率赤外線授熱体）の3種である。

伝導特性評価に用いた3種の授熱体とテフロンの吸熱特性

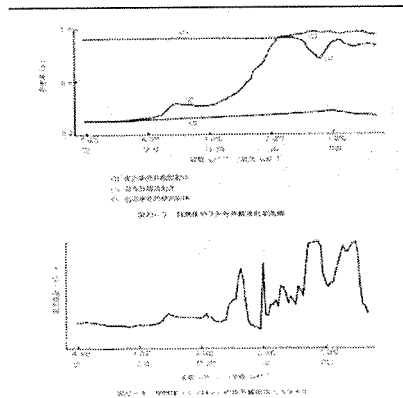


図3-2 伝導特性評価に用いた3種の授熱体とテフロンの吸収特性

それらの授熱体に一定のエネルギーを供給して温め、テフロンに接したとき、テフロン内部では熱伝導に違いが生ずるか否かを調べてみたのである。実験は図

3-1に示すような方法で行った。この場合、授熱体と受熱体が接する面は完全に密着していたとは言えず、厳密には、その間の隙間は放射としての熱伝播があることになる。したがって完全な熱伝導の実験かと言えば不安もある。

授熱体の授エネルギープロファイルは赤外線放射プロファイルで推定できる。つまり、物質のエネルギー吸収と放射は等価であるというキルヒホフの法則が、それを示している。したがって用いた3種の授熱体の授エネルギープロファイルを分光赤外線放射率曲線で、それに当てた。受熱体の受エネルギープロファイルも同じように考えて、テフロンの吸収エネルギープロファイルを図3-2に示しておく。このように授熱体および受熱体の内部特性は赤外線放射プロファイルで表しても矛盾は無いと考えてよい。

結果は如何であったか。それを図3-3

物質が異なるとテフロンの熱伝導が違う

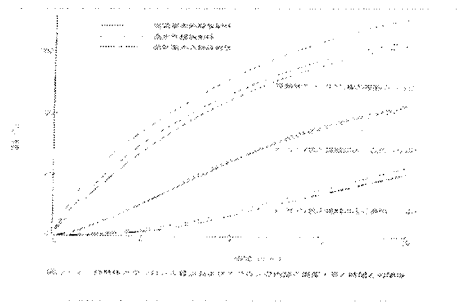


図3-3 授熱体の特性が異なるとテフロンの熱伝導の様子が違う

に示す。授熱エネルギーのプロファイルの異なる高効率赤外線授熱体、遠赤外授熱体、低効率赤外線授熱体に一定の電力を供給し、それらを受熱体のテフロンに接したとき、図3-1のa,b,c点での温度が時間と共に変化する様子を示してみた。

a点では抵抗率赤外線授熱体が最も温度が高く推移し、つづいて遠赤外授熱体、最も低く推移したのが高効率赤外線授熱体であった。接触面近傍のb点では遠赤外授熱体、高効率赤外線授熱体が、ほぼ、同じような温度上昇を示し、抵抗率授熱体は低く推移した。さらにc点では高効率赤外線授熱体と低効率赤外線授熱体は、

ほぼ同じ温度上昇を示すように推移したが、遠赤外授熱体のみ高い温度上昇を示したのである。そこに大きな意味がある。それは各授熱体の内部に保有されているエネルギー量は同じであっても、その分子運動等のプロファイルの違うことが、テフロン分子運動に影響を及ぼしたのである。

そんなことからステーキの焼け具合を検討することができないだろうか？ つまり金属フライパンは肉の接した面を高温にして黒焦げを作りやすいが、熱の通りはよくない。それに較べて陶器鍋は加熱が少々遅くても熱の通りがよいと、そんなことが焼き物料理の秘訣に繋がると考えるのである。

3-2 パンをトーストする

昔、パンのトーストには、雲母板を2枚重ねた間に、ニクロム線を張ったトースターがあったが、表面だけが黒焦げになることが多かった。現在の遠赤外線トースターは、表面と内部との温度差を少なくし、大変具合よくトーストができる。私はテフロンの伝導特性評価に使用した高効率赤外線放射体、遠赤外線放射体、低効率赤外線放射体を用いてトースト効果の実験を試みた。その様子を図3-4に示す。

パントースト実験の様子

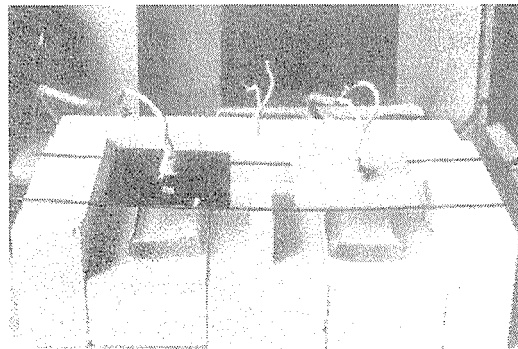


図3-4 パントースト実験の様子

各放射体の供給エネルギーは400W/hと一定にした。そのときの表面温度は高効率赤外線放射体が375℃、遠赤外線放射体は395℃、低効率赤外線放射体は495℃であった。そのときの放射特性を図3-5に示す。

パントースト時の各放射体の放射特性

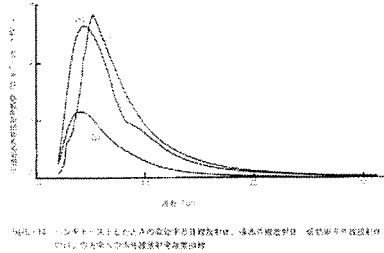


図3-5 パントースト時の各放射体の放射特性

各放射体に供給したエネルギーが放射エネルギーとなってパン方向に向かう量は高効率赤外線放射体で126W、遠赤外線放射体で125W、低効率赤外線放射体で52Wとなる。

パンの赤外線吸収スペクトルを図3-6に示しておく。

パンの赤外線吸収スペクトル

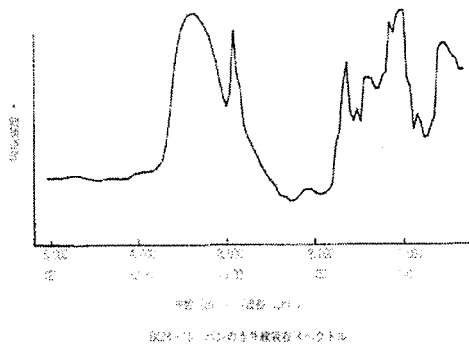


図3-6 パンの赤外線吸収スペクトル

さて、トーストの具合は如何であつたか、それを図3-6に示す。通電して3分後に高効率赤外線放射体は、程良い具合にトーストした。そのとき遠赤外線放射体では多少黄色く焦げ目がついた程度で、低効率放射体では、まだ、殆どトーストされていなかった。

各放射体とパンのトースト具合

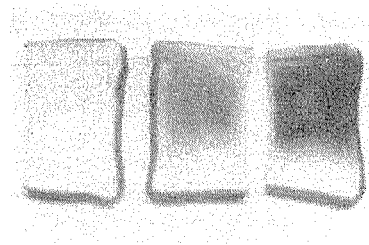
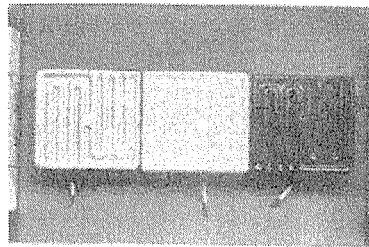


図3-7 パントースト具合

このような結果を解析してみよう。パンをトーストするに効率向上の条件は放射体の全放射量と放射プロファイルがパンの吸収プロファイルと相性がよければ、うまくトーストできる。

用いた3種の放射体は同一エネルギー供給したにもかかわらず、表面温度と放射プロファイル及び放射量が異なった。その様子を図3-5示す。図で高効率赤外線放射体は表面温度が375℃、遠赤外線放射体は395℃で、あまり変わらない。放射エネルギー量も126W、124Wと、これも、あまり変わらない。でも、図3-7のようにトースト具合は大きく違う。そんなことを検証する方法を説明するのが、本講演の主旨とすることである。

放射体の表面温度、放射エネルギー量が高効率赤外線放射体と遠赤外線放射体で、あまり変わらないのに高効率赤外線放射体の方が、焦げが多いのは、パンの脱水が多いことによると考えられる。

図3-8で、上段の高効率赤外線放射体では、放射特性カーブ内に具合良くパン吸収特性が納まる。しかし遠赤外線放射体では、パンが水分を蒸発させるために要求するエネルギー帯は放射特性カーブから、はみだしてしまう。したがって、パンに水分揮発のための十分なエネルギーを与えることができず効率が低い。そのことが、焦げ目の付きを悪くしている。

パンと各放射体との間の相性

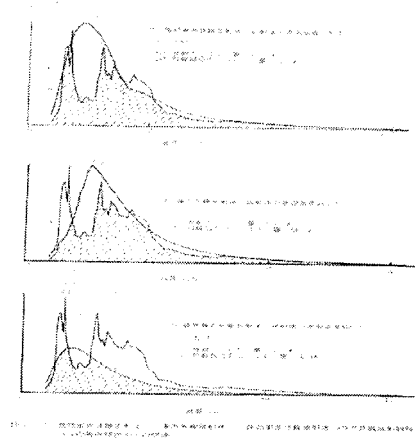
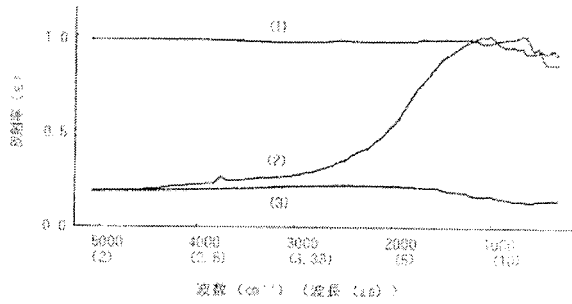


図3-8 各放射体とパントーストの相性

4. セラミクス材質の赤外線放射特性

どんな物体も加熱すれば、そこから赤外線が放射される。でも物質が違えば、一つとして同じ放射特性はあり得ない。セラミックスで、いろいろな放射特性を持つ遠赤外線放射体ができるが、その一例を図4-1の分光赤外線放射率曲線で示す。図で(1)は高効率赤外線放射体、(2)は遠赤外線放射体、(3)は低効率赤外線放射体である。

高效率、遠赤外線、低効率放射 体の放射率特性



- (1) 高效率赤外線放射体 (コーンライト (2MgO・SiO₂・CaO・MgSiO₃・Fe₂O₃・MnO₂・60%、Fe₂O₃・20%、CaO・10%)
 CaO 10%の炭粉物を30%添加したセラミック
 (2) 遠赤外線放射体 (チタニウムアルミニウムセラミック)
 (3) 低効率赤外線放射体 (アルミニウムの塗膜)

図4-1 高效率赤外線放射体、遠赤外線放射体、
低効率赤外線放射体の分光赤外線放射率曲線

それらを500℃、300℃、100℃と放射体の表面温度を変化させたとき半球面分光赤外線放射発散度は図4-2のようになる。

高效率、遠赤外、低効率放射体 の温度と特性変化

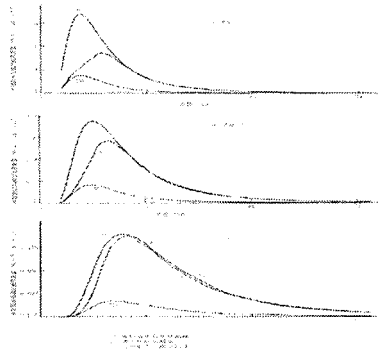


図4-2 3種放射体の温度と特性変化

このように全赤外線域で放射率の高い(1)のようなものは、高温でも低温でも全赤外線放射率は高い。逆に(3)のようなものは、どんな温度でも低い。し

かし(2)のような遠赤外線放射体は高温では全赤外線放射率が低いが、温度が低くなるにつれて(1)とあまり変わらなくなる。そのようなことが遠赤外線放射体の特徴と言える。

図4-3に、この3種の赤外線放射体の高温から低温に至る全赤外線放射率が変化の様子を示した。

高効率、遠赤外線、低効率放射体の温度と全放射率の変化

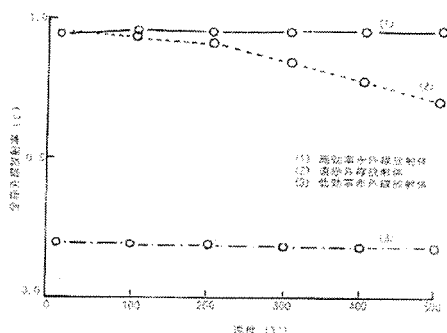


図4-3 3種の放射体の温度と全放射率の変化

物体と全赤外線放射率は、温度によって一定でなく変化する。生理・生体的な分野や医学分野で、皮膚の全赤外線放射率は1に近いと言われ、吸収率も同じとされる。

そのような説では白人、黄色人、黒人と人種の違いがあっても、赤外線に対する振る舞いは考慮する必要はないことになる。つまり、どんな人種でも図4-1の(3)に低効率赤外線放射体的皮膚の人はいない。強いて言えば(1)か(2)のような特性を持っているだろう。しかも人間の体温は36°C~37°Cであるから、図4-2から、その体温では全赤外線放射率は白人でも、黄色人でも黒人でも1に近いことになる。しかし、あり得ないことであるが、仮に身体の表面が500°Cであったら、どうだろうか。人種によって、放射率や吸収率に差が生ずることになる。

このように、物質と全赤外線放射率及び吸収率の関係を考える場合、物質と放射率の2次元的な考えに加えて温度の因子を加えた3次元的思考をすることが大切である。

5. 赤外線放射体からの上手な熱利用

私達の日常生活で放射、伝導、対流の熱伝播がある中で、上手に熱利用するには3つの伝播プロセスのよいところを使い分けることであるが、その中で放射熱利用は媒体に奪われるエネルギーが少なくて効率的である。

パネルヒーターで供給エネルギーは、どれだけ放射エネルギーに変換しているか。

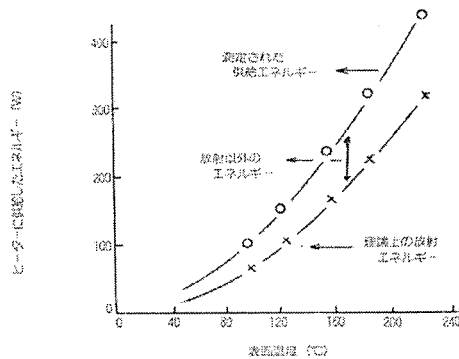


図5-1 放射体の表面温度と消費エネルギーとの関係

図5-1は高効率赤外線放射体で作った表面積1232平方cmのパネルヒーターを電力で温め、放射分と、それ以外の伝導分、対流分に奪われたエネルギーとの間の関係を示してみたものである。

横軸に放射体の表面温度、縦軸に積算エネルギー量として、各温度でプロットしていくとx印で示した線のようにになる。つまり放射体の持つエネルギーが全部赤外線放射となった場合の理論的エネルギー放射量を示した曲線である。しかし実際に放射体に供給した電力エネルギーは○印で示した線のような量であった。それは何を意味するのか、つまり放射以外の熱伝播である対流分と伝導分である。したがって○印の線は真の放射エネルギーに対流分と伝導分が加算されたエネルギー量である。図5-1の理論放射エネルギー量と供給電力量との比率から赤外線放射分と、その他の熱伝播エネルギー分との割合を求めてみると、表面温度が

100℃で放射分が64%、対流、伝導分が38%となる。150℃では放射分67%、その他の熱伝播分33%、200℃では放射分70%、その他の熱伝播分30%となった。つまり温度が高くなるにつれて若干放射分の比率が高くなる。

このようなことを考慮して高効率赤外線放射体と遠赤外線放射体では、一般に、どちらが赤外線放射体として有利か考えてみる。遠赤外線放射体は高効率赤外線放射体と同一供給エネルギー量を与えたときに同一エネルギーを放射させるには、表面温度を高くするか、表面積を広くしなければならなかった。そのどちらも対流分を増す条件になるので、汎用的な使用目的には高効率赤外線放射体の方が有利なことが多い。また、同一放射特性を持つ放射体であっても、対流分を、より少なくできる形状や設置方法を考えるとよい。つまり平板放射体であれば、放射面を上に向けるより縦にして少しでも上昇気流によって起こる対流分をすくなくすることである。

6. 日光浴の暖かさ

太陽光は地球上の生物に多くの恵みを与えてくれる。それは光と赤外線である。その太陽光の放射エネルギーのプロファイルを眺めてみよう。それを図6-1に示す。太陽光は地上に達するまでに大気による吸収があって、このような整然としたプロファイルではないが、おおよその特性を知るには充分である。図6-2は、その太陽光の放射エネルギーの分布割合を示したも

太陽エネルギーの波長分布

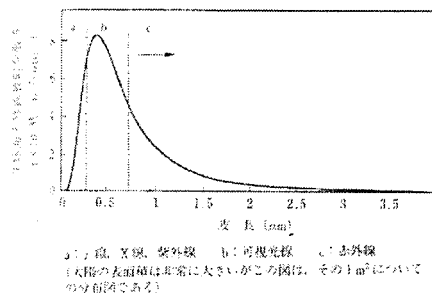


図1.1 太陽エネルギーの波長分布

図6-1 太陽光の放射プロファイル

太陽光のエネルギー放射分布割合

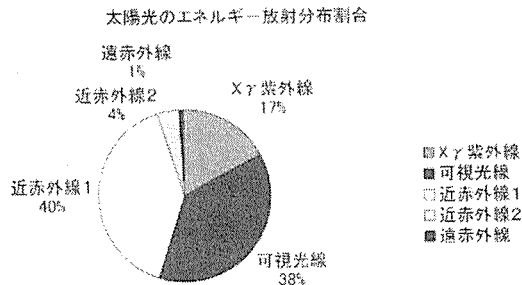


図6-2 太陽光の放射エネルギー分布割合

のである。その内、人体に害がある放射線が17%で、光が38%、あまり熱に大きな効果のない近赤外線が40%もあるが、熱に関係する近赤外線は4%に過ぎず、遠赤外線に至っては1%に過ぎない。

ガラス窓越しの日光浴は心地よいものである。では、どんなエネルギーが暖かさを与えてくれるだろうか！

ガラスは赤外線を透過しないとされる。

でも図6-3のように普通の窓ガラスでも波長3 μm 辺りまでは良く透す。それから漸次透過効率は降下するが、5 μm あたりまでの赤外線は透過すると考えてよい。このように考えてみると人体が暖かく感ずる赤外線波長帯は3 μm から5 μm あたりであることになる。

熔融石英、ガラス薄膜、ガラス板 の分光赤外線透過曲線

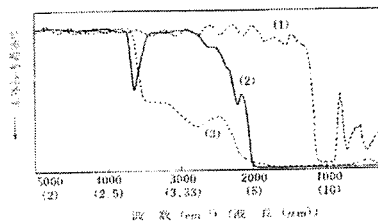


図6-3 熔融石英、ガラス薄膜、ガラス板の分光赤外線透過曲線

図6-3 窓ガラスはどんな赤外線を透過するだろうか

7. 燃烧している炭の放射エネルギー分布割合

日光浴と共に屋内で暖をとるに、昔は炭火が重宝なものであった。日本では堅い備長炭が、よい炭として用いられる。燃烧しているときの炭火を約800℃と仮定しよう。そのとき、どんなエネルギーが放射されているだろうか。図7-1に、それを示して

備長炭どんなエネルギーを放射しているだろうか。

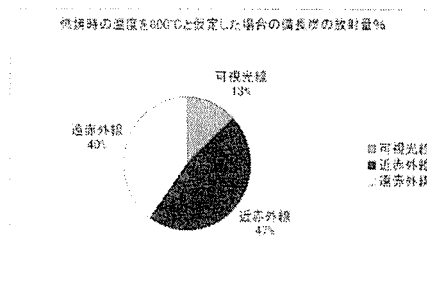


図7-1 燃烧している炭の放射エネルギー分布割合

みた。燃烧している炭は赤い色をしている。それは可視光線が放射されていることで、それは約13%である。光は熱にあまり関係のない波長域であるから暖かさには、あまり関係がないので、暖をとるには無駄なエネルギーと言える。近赤外線は暖かさに大きな影響がある波長域であって、特に体中水分に大きな影響を及ぼす。それは、約47%を占めている。遠赤外線域は約40%であって、それは皮膚・筋肉など体中組織に直接、影響を及ぼす重要なエネルギー帯である。

8. おわりに

現在、省エネルギーに関する対策がグローバルにクローズアップされている。それは枯渇する石油など地下資源の節約と炭酸ガスなどによる地球環境の汚染防止等である。その対策に遠赤外線による熱伝播を活用することは大変、意義のあることと注目されている。それと共に健康保守や生理・生体の管理に遠赤外線の活用は効力があり、そのために生活に関わる小さなエネルギーの挙動を明確にして有用活用の原理の確立を図らなければならない。韓国及び日本は協力して、それらを達成すれば、グローバルにエネルギーの有用活用に貢献できることと思う。