遠赤外線放射体の作製と各種加熱形態による人体の保温性の比較

非会員 田口春男 (TDK 株式会社)

非会員 水戸部一孝 (秋田大学)

正会員 吉村

昇 (秋田大学)

**Fabrication of Far Infrared Rays Radiation Body
and Consideration of the Heat Retention on Human
in Comparison with Other Properties**

Non member Haruo Taguchi (TDK),

Non member Kazutaka Mitobe (Akita University) and

Member Noboru Yoshimura (Akita University)

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the effect of Far Infrared Rays radiation body. Natural Zeolite was reported as having excellent characteristics for manufacturing FIR radiation body. So we manufactured FIR radiation body using the following procedure: we used the burned powder of natural zeolite and a heat resistant binding agent to produce FIR paint; and then we applied the FIR paint to an aluminum plate. The FIR radiation body did not shed from the aluminum plate, and it had a high emission rate of greater than 80% at a wavelength of 5 to 25 micrometers. In addition, to investigate the difference of heat retention of the human body, we compared the temperature distribution of a FIR radiation heater, a thermal conduction heater, and a convection heater when applied to a human hand.

KEYWORDS : Far Infrared Rays radiation, human body, heat retention, natural zeolite

1. はじめに

遠赤外線は赤外線的一种である。遠赤外線による加熱は空気などによる途中媒体によるエネルギー損失が少なく、有機物などを効果的に加熱できるため、フォード社が自動車塗装の乾燥に用いて以来、暖房機器、温熱療法の医療機器等、種々用途に利用されている¹⁾。一方、黒体に近い分光放射率を有する材料として天然ゼオライトを原料としたセラミクスが報告されている²⁾。また、天然ゼオライトを原料としたセラミクスを遠赤外線放射体として用いると TiO_2 や Al_2O_3 セラミクスに比べ寒天の加熱効率が良いとの報告がある³⁾。これは天然ゼオライトを原料としたセラミクスの分光放射率が、水の吸収波長域(主に $3\text{ }\mu\text{m}$ および $6\text{ }\mu\text{m}$)で高く、効率よく加熱できるからであるとされている¹⁾。ところが、セラミクスは成形に大きな圧力が必要であり、焼成時の収縮や変形のため広い面積のものが作製しにくい。さらに、加熱時に温度の不均一により割れやすく、使用しにくいといった欠点がある。

本研究では医療への応用を視野に置き、面積の広い高分光放射率遠赤外線放射体を安価で簡便に作製する方法の構築を目的とした。また、人体に対する遠赤外線加熱の効果については十分には調べられていない。そこで熱伝達形態の違いによる保温性の相違を明らかにするために、遠赤外線放射加熱後の人体の温度変化を調べ、熱伝導加熱、熱対流加熱との比較検討を試みた。

2. 遠赤外線放射体の作製とその放射特性**2.1 分光放射率測定方法**

本研究では光学的零位法を原理とする赤外分光光度計(島津製作所 IR-435型)を基本とした装置で、遠赤外線放射体の分光放射率を測定した。その測定系を図1に示す。本装置は標準光源として温度コントローラーを備えた黒体炉(Shimaden 製, SR-22)を用いている。放射体を設置、加熱する試料ホルダには放射体表面の放射面積を一定にする役割を持つ直径10mmの窓が設けてある。ホルダの加熱ヒータに印加する電圧はスライダックによって調節し、発生熱量をコントロールした。放射体の表面温度は、熱電対(CA)とマルチメータ(アドバンテスト製, TR2114)で測定した。試料表面からの放射は4枚のミラーによって分光光度計分光器部に導かれ、ここで同じように導かれた黒体炉の放射と比較した。分光光度計出力部には黒体炉の放射強度を100%としたときの試料表面の放射強度が表示される。本装置の分光光度計は熱電計の検出器を用いているために、その性能を生かすには入射光のエネルギーをある程度大きくする必要がある。本研究では装置の応答性などを考慮して黒体炉内部と試料表面の温度を400℃に設定して測定を行った。以下、この装置を遠赤外線測定装置と称する。なお、本装置では $4000\text{cm}^{-1} \sim 400\text{cm}^{-1}$ ($2.5\text{ }\mu\text{m} \sim 25\text{ }\mu\text{m}$)の領域で測定が可能である。

図1 分光放射率測定装置
Fig. 1 Spectral emissivity measuring system.

2.2 遠赤外線放射材料および遠赤外線放射体作製方法

ゼオライトはSiの相当量をAlで置換しているアルミノ珪酸塩の1種である⁴⁾。ゼオライトは空洞構造をもち吸着性およびイオン交換性があるため土壌改良剤、吸着剤、水質の浄化材などの用途として利用されている。現在では天然鉱物として40種以上、合成ゼオライトとして150種以上が知られている。天然ゼオライトは日本のみならず、世界各国に賦存しているが、地層のわずかな物理的、化学的条件の違いによって結晶構造と化学組成の異なるゼオライト種が産出する⁵⁾。また、天然物であるため宿命的に夾雑物を含んでいる。本研究ではクリノプチロライトを主として、 α -クオーツ、長石、 α -クリストバライトを不純物として含む秋田県二ツ井町の天然ゼオライト（サンゼオライト製、製品名3S、平均粒径 $6\mu\text{m}$ ）を原料粉末として使用した。組成は、 SiO_2 69.4重量%、 Al_2O_3 11重量%、 Fe_2O_3 0.9重量%、 CaO 1.3重量%、 MgO 0.6重量%、 Na_2O 3重量%、 K_2O 3.2%である⁶⁾。以下これをゼオライト粉末と称する。なお、クリノプチロライトは化学式が $\text{Ca}(\text{Na}, \text{K})_4 \cdot \text{Al}_6 \cdot \text{Si}_{30} \cdot \text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ で与えられる。

一方、パーライトは流紋岩質のガラス質火山岩であり真珠岩とも言われている。産地として秋田県、福島県、長野県などが知られている⁷⁾。本研究では秋田県森吉町産出のパーライト（東興パーライト（株）製の粉末を原料とした。なお、平均粒径は $6\mu\text{m}$ 、組成は、 SiO_2 75.3重量%、 Al_2O_3 13.4重量%、 Fe_2O_3 1.1重量%、 K_2O 4.9重量%、他であった。以下、これをパーライト粉末と称する。

遠赤外線放射体の作製方法は以下の通りである。ゼオライト粉末の 1100°C 熱処理品と耐熱性バインダー（Ceramabond571：Aremco products, inc）を混合することでペースト状にする。これを $30 \times 30\text{mm}$ のアルミニウム板に塗布し24h室温乾燥させる。なお、アルミニウム板の厚さは1mmで、接着後の強度が得られるように40番の紙やすりで塗布面に凹凸をつけた。その後、真空引きすることで揮発性成分を充分取り除いた後、 130°C 3h熱処理で固化、接着させる。こうしてできた遠赤外線放射体を前述の遠赤外線測定装置により分光放射率を測定した。また、パーライト粉末もゼオライト粉末と同様の方法で遠赤外線放射体を作り分光放射率を測定した。

2.3 遠赤外線分光放射特性

図2に遠赤外線放射体の分光放射率を示す。横軸は波数および波長、縦軸は分光放射率を示す。グラフの点線は、ゼオライト粉末を原材料とした放射体の分光放射率である。破線は、パーライトを原材料とした放射体の分光放射率である。さらに実線は両者を混合した放射体の分光放射率である。ゼオライト粉末、 1100°C 熱処理品の分光放射率は $8 \sim 10\mu\text{m}$ でSi-O結合の振動に関連す

図2 遠赤外線放射体分光放射率
Fig. 2 Far infrared rays radiation body spectral emissivity.

る落ち込みがあるが、その他の $5 \sim 25\mu\text{m}$ の波長域において0.8以上と高放射率である。しかし、欠点として人体の構成要素である水の吸収波長域を含む、短波長側の $2.5 \sim 5\mu\text{m}$ では0.8以下と低めであり改善の余地があった。また、その波長域は遠赤外線加熱に適する $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ の温度において分光放射発散度のピークがあるため加熱効率の上で重要となる。パーライト粉末は、ゼオライト粉末に比べ $5 \sim 25\mu\text{m}$ での分光放射率が劣るものの、 $2.5\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ の波長域において約0.8と高い分光放射率を有する。ただしパーライト粉末単体では放射体作製時に、ゼオライト粉末では見られない発泡を生じ、表面が粗く脆いという欠点があった。

本研究では2つの鉱物を混合することで、それぞれの欠点を克服することを試みた。結果、ゼオライト粉末とパーライト粉末2：1の混合物と耐熱性バインダーを10：7の重量比で混合することにより、全般に高放射率で、発泡を抑えた強固な放射体を作製することが可能となった。なお、それぞれの条件で評価用放射体は5枚作製したが、分光放射率にばらつきは見られなかった。また、アルミニウム板上に形成された遠赤外線放射体の厚みは $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ であり下地アルミニウムの赤外線放射の透過による影響はないと考えられる。

以上のように安価な天然鉱物であるゼオライトとパーライトを原料としており、また、粉末を金属板に塗布、接着する方法のため、セラミクスよりも簡便に、面積の広い高放射率遠赤外線放射体を得ることができる。これを $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ の大きさに作り以下での加熱実験用遠赤外線放射体とした。

3. 生体加熱実験装置および実験方法

遠赤外線放射、熱伝導、熱対流の各熱伝達形態による人体の保温性への影響を調べるため、図3に示す加熱実験装置を構成した。なお、被加熱部位として手掌を選んだのは、普段から露出しているため室温と平衡状態にあり測定が容易で、末梢のため毛細血管が豊富で保温効果の差異が現れやすいことが期待できたからである。遠赤外線放射による加熱実験では前出の遠赤外線放射体を平型板状ヒータ（定格300W）と密着させ遠赤外線ヒータを構成した。なお、遠赤外線放射体の表面温度は約 400°C にコントロールし、放射面積を一定とするために直径40mmの窓を設けた水冷遮蔽板を通して遠赤外線放射を行った。また、遠赤外線放射体と手掌部の距離は、遠赤外線放射のみの加熱とみなせるように80mm離している。熱伝導による加熱実験では鉄製容器に 40°C に維持した湯を入れ、

図3 実験装置
Fig. 3 Experimental system.

手が濡れないように水面にビニールシートを敷き、手掌部全体がビニールシートに触れるように接触させた。熱対流による加熱実験では熱源として1200Wのヘアドライヤを用いた。なお、ニクロム線からの赤外放射を遮るために吹き出し口にT字型の筒型ホルダを取り付け、温風のみが手掌にあたるようにした。実験は室温19℃の部屋で行った。被験者は30分以上同じ環境の部屋で待機しており充分順応している。加熱はどの熱伝達形態でも手掌部の温度が約40℃に達し安定する6分間行い、各伝達形態で40℃±1℃になるように加熱条件を調節している。手掌は肘を机などに固定して加熱源からの距離や接触が一定になるように工夫している。加熱時は3分おきに、加熱停止後は2分おきにサーマルカメラ(日本アビオニクス製 TVS-620)を用いて手掌の温度を計測した。なお、被験者は20代の男性5名であり、測定回数は1人1回である。

4. 実験結果

図4に、代表例として被験者の一人の各熱伝達形態における加熱停止直後と停止6分後での手掌部のサーマルカメラ画像を示す。遠赤外線放射の場合、加熱停止直後では放射窓の形の影響を受け部分的な加熱状態となっている。しかし、加熱停止6分後の画像では他の熱伝達形態に比べ、手掌全体で温度が高く保温性に優れることがわかる。一方、熱対流による加熱では、加熱停止直後は温度が高いが加熱停止6分後には指先の温度が低下している

図4 加熱時および加熱停止後の手掌温度分布
Fig. 4 Distribution of temperature in human hand.

図5 指と手掌の温度変化
Fig. 5 Temperature change of human hand.

のが見て取れ、保温性に劣ることがわかる。

さらに、サーマルカメラ画像のデータを定量的に表すため、被験者の手掌部および指先部の温度を次のように算出した。指先部温度は各指腹中央部5点の平均値から求めた。また、手掌部温度は、(AVIONICS 製) TVR 温度分布処理ソフトウェアを用いて、遠赤外線放射加熱時では加熱中心である直径40mmの範囲における平均温度を算出した。他の熱伝達形態での手掌部平均温度も同様に、同位置の同面積における平均温度を算出している。図5に、手掌部と指先部の温度の経時変化を示す。横軸は、加熱開始からの経過時間、縦軸は温度を示す。白抜き印は手掌部の温度、塗りつぶした印は指先部の温度を示す。また、実線で丸印は遠赤外線放射加熱、破線で三角印は熱伝導加熱、点線で四角印は熱対流加熱を表す。各熱伝達形態で手掌部の温度は、指腹部よりも高い。また、遠赤外線放射加熱の温度上昇は他の加熱よりも緩やかであり、遠赤外線放射加熱停止後の指先の温度低下は緩やかである。加熱停止後6分において、遠赤外線放射加熱の手掌および指先の温度が上昇している点については現在のところ不明である。なお、他の4人でも同様傾向の、サーマルカメラ画像と手掌部および指先部の温度の経時変化データが得られている。

また、保温性を定量化するために次式の保温指標値 R を定義する。

$$R = (T_b - T_0) / (T_a - T_0) \quad \text{.....(1)}$$

ここで R : 保温指標値 T_0 : 加熱前温度 T_a : 加熱後温度 T_b : 加熱停止6分後の温度を示す。5人の被験者による保温指標値を図6に示す。横軸が各熱伝達形態、縦軸が保温指標値である。白丸が、手掌部の保温指標値、黒丸が指先部の保温指標値を示す。手掌部においては遠赤外線放射加熱の保温指標値は他の熱伝達形態に比べ高く、保温性に優れることが分かる。一方、指先については図5より、加熱停止直後の指先温度が低い影響もあり保温指標値が高く表れたと考えている。さらに、遠赤外線放射加熱の指先で100以上の保温指標値を示すデータがあるが、手掌の温度分布には個人差があることが報告されており⁸⁾、今回の実験結果からも被験者ごとの個人差が表れている。この被験者の初期指先温度

図6 手掌および指先の保温性指標値
Fig. 6 Heat retention index of human hand.

が低かったため、相対的に保温指標値が高く表れたと考えている。

5. 検討

遠赤外線は電磁波（光）としての性質を持ち、皮膚の赤外領域における反射率は低い⁹⁾。そのため熱伝導や熱対流のように皮膚表面に直接熱エネルギーが伝達されるのではなく皮膚内部で熱エネルギーに変換される¹⁰⁾。よって皮膚内部において生ずる熱エネルギーが皮膚により保温されている可能性がある。また、透過吸収の過程で皮膚内部器官の活性化作用を及ぼすことも考えられる。皮膚には温度受容器が存在し、それは表面より数百 μm のところに存在すると想定されている¹¹⁾。温度受容器で検知された情報は脊髄、延髄、中脳、視床下部に伝達され体温調節反応として血管調節反応が行われる¹²⁾。つまり、手掌に照射され透過した遠赤外線が皮膚の温度受容器を介して体温調節機能を活性化させ、血管拡張反応が生じていると考えられる。血管の拡張は血流量を増大させるため保温効果につながる。遠赤外線を照射していない指先の保温性も良好だったのは、手掌部に大きなカーブを描いて延びている掌動脈から枝別れた指動脈¹³⁾が手掌部の血管拡張の影響を受けた事を示す。

6. まとめ

本報告では天然鉱物粉末の混合により安価で簡便に、面積の広い高分光放射率遠赤外放射体の作製を試み、その遠赤外線放射体により遠赤外線放射の人体の保温性についての有用性について検討した。以下に本論文で得られた成果を要約する。

(1) ゼオライト、パーライトの2種の天然鉱物粉末を耐熱バインダーとともに混合し金属板に塗布し、接着することで、広面積の高分光放射率を有する遠赤外線放射体を安価に簡便に作製する方法を構築した。

(2) 遠赤外線放射、熱伝導、熱対流の各熱伝達形態による加熱後の人体の手掌および指先の温度変化を比較したところ、遠赤外線放射の保温性が高いことが明らかになった。

現在、120mm×120mmの大面积を有する遠赤外線放射体を作製し、放射体サイズを変えた場合の保温性の検討を進めている。さらに、血流量の変化と発汗および保温性の関係を調査中である。

今後の課題としては次の2点があげられる。

- (1) 他の放射体（セラミクスや市販放射体）との保温性の比較。
- (2) 各熱伝達形態での手掌への投入エネルギーを一定とした時の保温性の比較。

本研究を進めるにあたり多大な貢献をした研究室卒業生石川誠君に謝意を表す。また、本研究の一部は、文部科学研究費（地域連携11792019）により行った。

参考文献

- (1) 赤外線技術研究会：赤外線工学，オーム社，pp.232-237 (1991)。
- (2) 吉村昇，松本丞二，佐々木芳弘，田口春男：天然ゼオライトの遠赤外放射特性，照学誌，75-10，pp.577-581 (1991)。
- (3) 吉村昇，松本丞二，佐々木芳弘，田口春男：天然ゼオライトの遠赤外放射特性とその加熱効果，秋田大学鉱山学部資源地学研究施設報告，56，pp.181-185 (1991)。
- (4) 地学団体研究会地学事典編集委員会：地学事典，平凡社，p.46 (1992)。
- (5) 富永博夫：ゼオライトの科学と応用，講談社，pp.1-39 (1991)。
- (6) 進藤隆志，猿田直子，中田竜，山崎達也，北林茂明，小沢泉太郎：窒素およびメタンをプローブとする天然ゼオライトの吸着特性，素材物性学会誌，14，1/2，pp.6-11 (2001)。
- (7) 世界大百科事典，平凡社，23，p.46 (1998)。
- (8) Hideyuki KOKUBO, Junko TANIGUCHI, Masahiko HIRASAWA and Mikio YAMAMOTO: Basic Thermal Distribution for the Hand of Ordinary Persons, J. Intl. Soc. LifeInfo. Sci, 16-2, pp.247-251 (1998)。
- (9) Th. J. J. A, Manders: The "infraphil" an Apparatus for Infr-red Therapy, Philips Technical Review, 8, 6, pp.177-182 (1946)。
- (10) 松井松長：遠赤外放射利用の問題点と将来展望，照学誌，74-12，pp.5-8 (1990)。
- (11) 大山正，今井省吾，和氣典二：新編 感覚・知覚ハンドブック，誠信書房，p.1197 (1994)。
- (12) 山田幸生，棚澤一郎，谷下一夫，横山真太郎：からだ熱と流れの科学，オーム社，p.46 (1998)。
- (13) 藤田恒太郎：人体解剖学，南江堂，p.295 (2000)。

(受付日2001年7月23日／採録日2002年4月12日)

田口 春男（非会員）

TDK 株式会社

1956年生。秋田大学鉱山学部電気工学科卒業，1978年 TDK 株式会社入社，以来，主にセラミックの材料開発に従事。