

赤外線ヒータ使用時の熱交換における放射成分と対流成分の分離の試み

岡田 和徳¹⁾, 佐古井 智紀¹⁾
¹⁾ 信州大学

Estimation of radiative and convective heat exchanges in thermal environment with infrared heating

Kazunori OKADA¹⁾, Tomonori SAKOI¹⁾
¹⁾ Shinshu University

Abstract: The components of radiation from the infrared heater are within infrared range. However, the spectrophotometric characteristics of the infrared heater and those of the surrounding walls are different because of the difference in their temperature range. In this study, we developed two heated cylinders; one was painted in mat black and the other was in silver, and attempted to identify the convective and radiative heat exchanges from the measured heat losses of these cylinders in the thermal environment with infrared radiation source. However, we can not determine the radiative and convective heat exchanges adequately. This is attributed to the difference between the emissivity of the silver cylinder within a moderate temperature range and its absorptivity for the radiation from the infrared heater. Our clothing has various colors. While the emissivity of the clothing in a moderate temperature range is close to unity, the absorptivity of clothing to the radiation from an infrared heater may differ considerably among clothing.

Key words: Infrared radiation, Radiative heat exchange, Convective heat exchange, Emissivity, Absorptivity.

要旨: カーボンヒータからの熱放射は赤外線領域であるが、その温度は周囲壁体の温度に比べて高く、カーボンヒータの熱放射の分光特性は常温付近の周囲壁体からのそれと異なる。本研究では、黒と銀の発熱円筒を作成し、カーボンヒータ使用時の各発熱円筒からの放熱を放射成分と対流成分に分離することを試みた。その結果、銀の発熱円筒のカーボンヒータに対する吸収率は、放射率と大きく異なることがわかった。通常着用する衣服は放射率がほぼ一定であるが、カーボンヒータに対する衣服の吸収率はそれぞれ異なることが示唆された。高温の放射熱源を含む環境下での衣服を通じての熱移動を評価するにあたって、衣服の常温環境に対する放射率に加え、近赤外線領域での吸収率も考慮すべきことが示唆された。

キーワード: 赤外線、放射熱交換、対流熱交換、放射率、吸収率

1. はじめに

発熱体から環境への放熱を放射成分と対流成分に分離するにあたり、黒と銀といった表面の放射率の違いを利用できる(ISO、1985)。他方、日射を扱う際には、周囲壁体からの熱放射と分光特性が異なるため、常温域とは異なる放射率を用いるべきことも知られている(相原、1994)。人に熱を与える手段の一つにカーボンヒータがある。カーボンヒータの熱放射は赤外線領域であるが、その温度は周囲壁体の温度に比べて高く、カーボンヒータの熱放射の分光特性は周囲壁体からのそれと異なる。本研究では、黒と銀の発熱円筒を作成し、カーボンヒータ使用時の発熱円筒からの放熱を放射成分と対流成分に分離することを試みる。

2. 方法

2.1 放射熱交換並びに対流熱交換の決定理論

それぞれ黒と銀に塗られた同形状、同一温度の発熱円筒を同じ温熱環境内に設置したときの、両発熱円筒の放熱量の差は次式で表される。

$$Q_B - Q_S = R_B - R_S \\ = \sigma(\varepsilon_B - \varepsilon_S)[(T_S + 273.15)^4 - (T_W + 273.15)^4] \quad (1)$$

ここで、 Q_B : 黒の発熱円筒の放熱量 [W/m²], Q_S : 銀の発熱円筒の放熱量 [W/m²], R_B : 黒の発熱円筒の放射熱交換量 [W/m²], R_S : 銀の発熱円筒の放射熱交換量 [W/m²], ε_B : 黒の発熱円筒の放射率 [N/D], ε_S : 銀の発熱円筒の放射率 [N/D], T_S : 発熱円筒の表面温度 [°C], T_W : 周囲壁温の温度 [°C]

式(1)を変形すると式(2)が得られる。

$$(Q_B - Q_S)/(\varepsilon_B - \varepsilon_S) = \sigma[(T_S + 273.15)^4 - (T_W + 273.15)^4] \quad (2)$$

式(2)における右辺は、放射率が1の完全黒体の放射熱交換の式である。黒と銀の発熱円筒はそれぞれ放射率を持ち、それらの放射熱交換量は式(2)にそれぞれの放射率 ε_B 、 ε_S をかけることで求まり、式(3)、(4)で表される。

$$R_B = \varepsilon_B (Q_B - Q_S) / (\varepsilon_B - \varepsilon_S) \quad (3)$$

$$R_S = \varepsilon_S (Q_S - Q_B) / (\varepsilon_S - \varepsilon_B) \quad (4)$$

発熱円筒の対流熱交換量は以下の式(5)で求まる。

$$C = (Q_S \varepsilon_B - Q_B \varepsilon_S) / (\varepsilon_B - \varepsilon_S) \quad (5)$$

ここで、 C : 黒と銀の発熱円筒の対流熱交換量 [W/m^2]

式(3)～(5)を用いることで、ある温熱環境下に設置した発熱円筒の放熱における対流成分と放射成分を分離できる。

2.2 発熱円筒

実験を行うために作成した両発熱円筒を図1に示す。

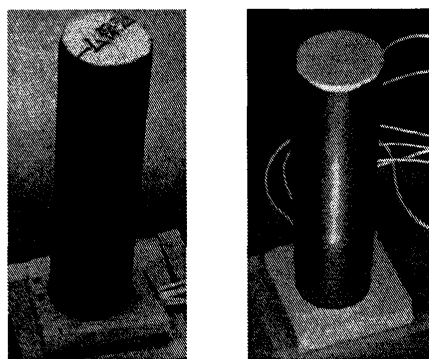


図1 黒と銀の発熱円筒

円筒の外形は87 mm、高さ350 mmである。発熱円筒の外表面近くには、発熱用のニクロム線と表面温度計測用のアルメル線が、それぞれ発熱円筒の側面全体を均一に覆うように配置されている。ニクロム線とアルメル線は電氣的に絶縁されており、ニクロム線がアルメル線の内側に配されている。上部50 mm、中部250 mm、下部50 mmの3部位に分かれ、それぞれ独立して発熱・温度制御できる。発熱円筒上部と下部の上下面を通じての放熱を考慮し、以後の解析では円筒中部のデータのみを対象とする。

2.3 銀の発熱円筒の放射率の決定

常温環境下での銀の発熱円筒の放射率を決定するために、人工気候室にて黒と銀の発熱円筒の放熱量 Q_B 、 Q_S を計測した。人工気候室内の温度は26℃に設定し、発熱円筒は人工気候室の中央に設置した。発熱円筒の表面温度は33℃一定とした。黒と銀の発熱円筒同士の干渉を防ぐため、計測は一つずつ行った。人工気候室内の温度の均一性を確かめるために、サーミスタを人

工気候室の周囲壁面に設置した。計測された Q_B と Q_S より、銀の発熱円筒の常温環境における放射率 ε_S を式(6)より決定した。

$$\varepsilon_S = \varepsilon_B - (Q_B - Q_S) / \sigma [(T_s + 273.15)^4 - (T_w + 273.15)^4] \quad (6)$$

黒の発熱円筒に放射率 ε_B を ISO(1985)による黒のグローブ温度計に関する記述を参考に0.95と置くと、 ε_S は0.82となった。

2.4 カーボンヒータ使用条件下の実験

カーボンヒータ使用下において、対流成分と放射成分を分離する実験を行った。図2に示すように黒と銀の発熱円筒をそれぞれ人工気候室の中央に設置、カーボンヒータを人工気候室の角隅、発熱円筒から1.5 mの位置に設置した。カーボンヒータは、高さ59 cm、横34 cm、深さ9 cmであり、消費電力は900 Wである。人工気候室の温度設定は15℃とした。気温は、熱放射による影響を防ぐため、小型ファンで通風したアルミホイル内に設置したサーミスタを用いて計測した。壁温はサーミスタを貼り付け計測した。風速は熱線風速計により発熱円筒付近の値を計測した。計測された環境条件を表1にまとめる。カーボンヒータ、および発熱円筒の発熱のため、設定温度と比べて高温となっている。発熱円筒の表面温度を25℃、または30℃、33℃で維持し、それぞれ定常になった後に放熱量 Q_B 、 Q_S を計測した。

表1 人工気候室内で計測された環境要素

気温 [°C]	周囲壁温 [°C]	風速 [m/s]
16.5	18.3	0.2

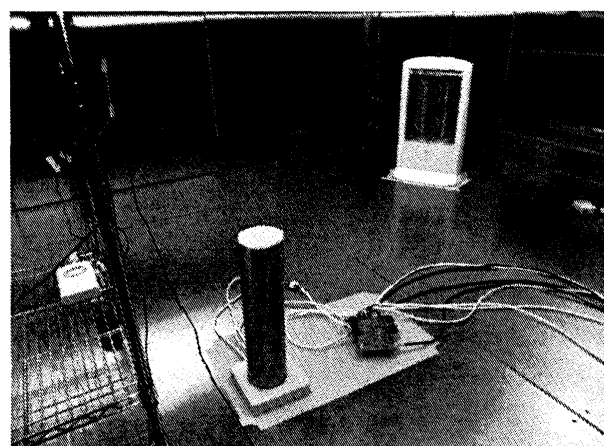


図2 カーボンヒータ使用条件下の実験風景

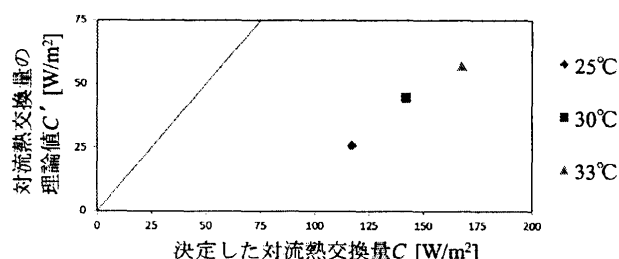
3. 結果

計測された Q_B 、 Q_S 、および式(3)、(4)、(5)により決定された発熱円筒の放射熱交換量 R_B 、 R_S と対流熱交換量 C を表2に示す。

表2 放熱量および放射熱交換量、対流熱交換量

	放熱量 [W/m ²]	放射熱交換 量 [W/m ²]	対流熱交換 量 [W/m ²]
黒(25℃)	18.4	-98.7	117.1
銀(25℃)	31.9	-85.2	117.1
黒(30℃)	69.6	-72.3	141.8
銀(30℃)	79.5	-62.4	141.8
黒(33℃)	98.9	-59.8	167.7
銀(33℃)	107.1	-51.6	167.7

表2に示した対流熱交換量が妥当であるか、理論式から検証した。Incroperaら(2002)に従い強制対流における円筒の対流熱伝達率を求め、日本機械学会(1986)に従い自然対流における対流熱伝達率を求めた。各温度における空気の熱物性値として Microelectronics Heat Transfer Laboratory (1997)を参照した。算出した対流熱伝達率のうち値の大きい方を採用した。対流熱伝達率は表面温度が25℃のときに3.3 W/(m²・℃)、30℃のときに3.3 W/(m²・℃)、33℃のときに3.5 W/(m²・℃)となった。計測値と式(5)により決定した対流熱交換量 C を、無次元式と温度差から求めた対流熱交換量の理論値 C' と比較して図3に示す。 C は C' の値の3~4倍の値となったことから、計測値と式(5)からは妥当な対流熱交換量が推定できなかったと言える。

図3 決定した C と理論値の C' の比較

4. 考察

計測値と式(5)から決定された対流熱交換が不適切な値となった理由として、カーボンヒータの温度が常温環境の壁温と比べて遥かに高く、カーボンヒータに対する銀の発熱円筒の吸収率が常温環境下での放射率と異なったことが考えられる。以下では、熱収支に基づきカーボンヒータに対する銀の発熱円筒の吸収率 α_S を推定する。黒と銀の発熱円筒の熱収支は(7)、(8)式で表される。

$$A_B = -Q_B + C + R_{BB} \quad (7)$$

$$A_S = -Q_S + C + R_{BS} \quad (8)$$

ここで、 A_B : 黒の発熱円筒のカーボンヒータからの受熱量 [W/m²], A_S : 銀の発熱円筒のカーボンヒータ

からの受熱量 [W/m²], R_{BB} : 黒の発熱円筒と周囲壁体間の放射熱交換量 [W/m²], R_{BS} : 銀の発熱円筒と周囲壁体間の放射熱交換量 [W/m²]

カーボンヒータに対する黒の発熱円筒の放射率 α_B を知ることができれば、 α_S は式(9)により求まる。

$$\alpha_S = \alpha_B (A_S / A_B) \quad (9)$$

ここで、 α_S : カーボンヒータに対する銀の発熱円筒の吸収率 [N/D], α_B : カーボンヒータに対する黒の発熱円筒の吸収率 [N/D],

発熱円筒の表面からカーボンヒータに向けた形態係数を微小とみなして無視し、式(7)、(8)の R_{BB} と R_{BS} を以下の式(10)、(11)により算出した。

$$R_{BB} = \sigma \epsilon_B [(T_s + 273.15)^4 - (T_w + 273.15)^4] \quad (10)$$

$$R_{BS} = \sigma \epsilon_S [(T_s + 273.15)^4 - (T_w + 273.15)^4] \quad (11)$$

R_{BB} 、 R_{BS} 、 Q_B 、 Q_S 、図3における C' を式(7)、(8)に代入し、 A_S 、 A_B を決定した。 α_B として 0.95 を、また、得られた A_S 、 A_B を式(9)に代入し、表3に示す α_S を得た。

表3 カーボンヒータに対する銀の発熱円筒の吸収率

T_s [°C]	25	30	33
α_S [N.D.]	0.54	0.50	0.51

式(9)より求めた α_S の値は、常温環境における銀の発熱円筒の放射率 ϵ_S の値 0.82 と大きく異なる。カーボンヒータのような高温の放射熱源を含む環境下での熱交換を評価する際には、常温環境下での放射率に加え、高温の放射熱源に対する吸収率も考慮しなければならないと言える。

この研究では銀と黒の発熱円筒のみを扱ったが、衣服については、その色はより多様である。高温の放射熱源を含む環境下での衣服を通じての熱移動を評価する上で、高温の放射熱源に対する吸収率を考慮すべきとなろう。生地のカarbonヒータに対する吸収率は、発熱円筒を用い以下のように評価できる。

生地を黒の発熱円筒に覆い、カーボンヒータによる放射熱源を与えた場合、生地の熱収支は式(12)となる。

$$A_{cl} = -Q_{cl} + C_{cl} + R_{cl} \quad (12)$$

ここで、 A_{cl} : 生地のカarbonヒータから受熱量 [W/m²], Q_{cl} : 生地の放熱量 [W/m²], C_{cl} : 生地表面の対流熱交換量 [W/m²], R_{cl} : 生地と周囲壁体間の放射熱交換量 [W/m²]

定常状態に至った後の発熱円筒における生地の放熱量 Q_{cl} は、発熱円筒の放熱量 Q_B に衣服面積率 f_{cl} を用いて(13)式で与えられる。

$$Q_{cl} = Q_B / f_{cl} \quad (13)$$

ここで、 f_{cl} : 着衣面積比率 [N.D.]

また、衣服の保温性に関する式(西、1981)を変形する

ことで、生地を着衣外表面温度 T_{cl} は式(14)となる。

$$T_{cl} = T_s - Q_B \cdot I_{cl} \quad (14)$$

ここで、 T_{cl} : 着衣外表面温度 [°C], I_{cl} : 基礎着衣熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$]

全着衣熱抵抗 I_t 、裸体時の熱抵抗 I_a はそれぞれ、気温が既知で放射熱源のない環境において、生地で被覆した発熱円筒、被覆していない発熱円筒を一定温度に維持することで、式(15)、(16)により決定される。

$$I_t = (T_s - T_a)/Q_B \quad (15)$$

$$I_a = (T_s - T_a)/Q_B \quad (16)$$

ここで、 I_t : 全着衣熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$], I_a : 裸体時の熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$], T_a : 気温[°C]

式(14)の I_{cl} は、 I_t 、 I_a 、および着衣面積比率 f_{cl} より式(17)で求められる(渡邊、2000)。

$$I_{cl} = I_t - I_a/f_{cl} \quad (17)$$

カーボンヒータによる放射熱源を与えた場合の式(12)に関して、周囲壁温の計測と式(14)の T_{cl} より生地と周囲壁体間の放射熱交換量 R_{cl} を、また、ヌッセルト数に関する無次元式と計測気温、 T_{cl} から生地表面の対流熱交換量 C_{cl} を決定できる。従って、生地のカーボンヒータから受熱量 A_{cl} は一意的に定まる。同様に、被覆していない黒の発熱円筒にカーボンヒータの放射熱源を与えたときの式(7)については、 T_{cl} に換わって円筒表面温度 T_s を用いることで黒の発熱円筒のカーボンヒータからの受熱量 A_B を決定できる。結果、カーボンヒータに対する生地の吸収率 ϵ_{cl} は式(18)により求められる。

$$\epsilon_{cl} = \alpha_B (A_{cl}/A_B) \quad (18)$$

ここで、 ϵ_{cl} : カーボンヒータに対する生地の吸収率 [N.D.]

以上、発熱円筒を用い生地近赤外線放射に対する吸収率を決定する見通しを示した。

5. まとめ

対流熱交換量から放射熱交換量を分離するため、黒と銀に塗られた発熱円筒を作成した。常温環境における銀の発熱円筒の放射率は 0.82 となった。この放射率を用い、放射熱源を含む環境下での発熱円筒の放射熱交換、対流熱交換を評価したが、適切な値を得ることができなかった。銀の発熱円筒の常温環境下での放射率と赤外線ヒータに対する吸収率の値が大きく異なることが原因である。二つの発熱円筒の熱収支式から、銀の発熱円筒のカーボンヒータに対する吸収率は 0.5 前後と推定された。

我々は様々な色の服を着用する。常温環境下ではこれらの放射率に大きな差がない。しかし、本研究の結果は、カーボンヒータなどの放射熱源に対する生地それぞれの吸収率が異なることを示唆するものであった。この結果を受け、放射熱源に対する生地の吸収率を評

価するための見通しを付記した。放射熱源を含む温熱環境下における生地を通じての熱移動の推定には、常温環境における生地の放射率に加え、放射熱源に対する生地の吸収率の考慮も不可欠であろう。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究(A)、課題番号 22686055)によりました。信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点の飯塚浩二郎助教、同・鈴木智助教から、実験システムの作成にあたり、貴重な助言をいただきました。心より感謝いたします。信州大学の石井僚太氏、富永直斗氏、小山創氏には、回路作成にあたり御助力をいただきました。深く御礼申し上げます。

6. 文献

- ISO. 1985. *ISO-7726, Thermal Environments – Instruments and Methods for Measuring Physical Quantities.*
- 相原利雄. 1994. 伝熱工学、裳華房、pp.185-192
- 日本機械学会. 1986. 伝熱工学試料(改訂第4版)、丸善、pp.68-71
- Incropera F.P., David P.D. 2002. *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons., pp.408-410
- Microelectronics heat transfer laboratory. 1997. *Fluid properties calculator*, <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/online-tools/airprop/airprop.html>, accessed on 26th June 2012.
- 西安信. 1981. 人体と環境との熱交換、温熱生理学(中山昭雄編)、理工学舎、pp.35
- 渡邊慎一. 2000. 気流および着衣のゆとりがクロ値に及ぼす影響、日本建築学会東海支部研究報告集 (38)、pp.541-544

<連絡先>

連絡先氏名 岡田 和徳

住所 長野県上田市常田 3-15-1

所属 信州大学大学院理工学系研究科

E-mail アドレス 12fm207h@shinshu-u.ac.jp