

— 経常研究 —

無機材料の遠赤外線放射特性と応用製品に関する研究

研究開発科 山口典男・高松宏行
九州大学 栃原 裕

要 約

遠赤外線放射率が高い材料の開発および、遠赤外線が及ぼす生体への生理学的作用の解明を目的に、セメントと釉薬の遠赤外線放射特性の評価、および低温域で放射される遠赤外線の生理学的作用の評価を行なった。材料の遠赤外線放射特性の評価では、セメントは種類によらず、約93%という高い積分放射率を示し、波長依存性は確認されなかった。また、釉薬の評価では長石が析出し、光沢度の低い石灰釉において、放射率が高く、白色の釉薬として初めて90%以上の積分放射率を示した。さらに、この白色釉薬は、金属酸化物により着色しても著しい放射率の低下は認められなかった。一方、生体への生理学的評価では、遠赤外線放射量の少ない低温域での遠赤外線が生体に及ぼす作用は、全身ではなく照射部の局所的なものであることが明らかとなった。

キーワード：遠赤外線、積分放射率、波長依存性、釉薬、生理学的作用

1. はじめに

遠赤外線は、輻射により中間の空気層を温めることなく対象物を直接加熱するため、エネルギー効率に優れるといった特徴があり、塗膜の乾燥¹⁾ やスポット暖房として利用され発展してきた技術である。これまでに遠赤外線を利用した商品のブームが何度かあり、数多くの研究がなされてきた^{2~7)}。近年、岩盤浴を中心とした健康・癒しグッズなどの遠赤外線商品などが数多く見られるようになり、再びブームとなっている。このような中で、遠赤外線高放射材料の材質や放射メカニズム、また、生体に対する遠赤外線の生理学的作用などについて、不明な点が多く残されている。

筆者らは、これまでの基礎的実験でセメント材料が高い積分放射率を示すことを確認している。そこで、セメント硬化体を対象として、遠赤外線の放射率に影響する化学組成について検討した。さらに、得られた知見を基に釉薬への応用について検討した。また、放射材料が50℃の低温領域で、遠赤外線が生体に及ぼす生理学的作用について検討した。

2. 実験方法

2.1 セメント硬化体の遠赤外線放射率評価

セメントの種類が遠赤外線放射率に及ぼす影響を検

討するために、普通ポルトランドセメント(普通PC)、早強ポルトランドセメント(早強PC)、白色セメント、アルミナセメントの各硬化体を作製した。混練水はセメント粉末の50mass%とし、室温で1日養生した。硬化体は、一辺が約45mm、厚さが約4mmになるように、両面を#220のダイヤモンドパッドで平面研磨した。加工したサンプルをアセトンに約1日浸漬し、水和を停止し80℃で乾燥した後、遠赤外線放射率の測定に供した。

また、ケイ酸分(SiO₂)の影響を検討するために、普通PCにシリカ(SiO₂)を0~60mass%添加し硬化体を作製した。また、このときの混練水量は、粉末(セメント、シリカ)に対し50mass%とした。

遠赤外線放射率(以下、放射率)は、日本電子製JIR-E500(図1)を用い、ヒーター温度50℃、波長範囲3.33~25.42μmで測定した。サンプル温度は、サンプル表面にK型熱電対を取り付け測定した。測定はサンプルを加熱ステージに固定した後、熱的平衡を得るために1h以上経過してから測定を行なった。40.4℃および161.3℃の2つの黒体炉を測定し、2点温度標準検量法により遠赤外線放射率曲線(以下、放射率曲線)を得た。また、遠赤外線積分放射率(以下、積分放射率)は、波長範囲3.33~25.42μmにて算出した。



図1 遠赤外線放射率測定装置
(日本電子製、JIR-E500)

表1 石灰釉およびリン含有釉の調合組成
(ゼーゲル式)

	石灰釉						リン含有釉				下水汚泥
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
K ₂ O	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.04	0.04	0.10	0.10	0.04
Na ₂ O	0.30	0.30	0.30	0.10	0.05	0.05	0.08	0.08	0.10	0.10	0.08
CaO	0.60	0.60	0.60	0.80	0.90	0.90	0.56	0.88	0.80	0.48	0.56
MgO	-	-	-	-	-	-	0.32	0.00	0.00	0.32	0.32
Al ₂ O ₃	0.45	0.65	0.73	0.62	0.31	0.11	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0.28	0.44	0.40	0.24	0.39
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
SiO ₂	6.00	4.00	3.00	2.00	1.00	0.62	1.36	1.36	1.69	1.69	1.02

2.2 釉薬の調製および遠赤外線放射率評価

釉薬中のケイ酸成分量の影響を検討するために、ケイ酸成分の異なる石灰釉と、リン酸 (P₂O₅) を含むリン含有釉を調製した。調製した各釉薬の成分組成を表1に示す。石灰釉は、多以良長石、益田長石、朝鮮カオリン、石灰石、珪石を原料とした。また、リン含有釉は、下水スラグの組成を参考とし、石灰釉で使用した原料に、炭酸マグネシウムおよび骨灰を用いた。さらに、放射率が良好であった石灰釉Dの試料において、組成を変化させ、最適な組成についても検討した。調製した釉薬を約50mm角の素焼き陶板に施釉し、SK10で還元焼成した。裏面を研磨し平滑化したサンプルを遠赤外線放射率測定に使用した。遠赤外線放射率測定は、ヒーター温度100℃とし、その他の条件は、2.1と同じとした。

2.3 金属酸化物を添加した石灰釉の調製

着色するために添加する金属酸化物が放射率に及ぼす影響を検討するために、表2に示す金属酸化物を、石灰釉の乾粉に対して外割で1mass%および5mass%添加し乳鉢にて粉碎し調製した。調製した釉薬を約50mm角の素焼き陶板に施釉し、SK10により還元焼成した。裏面を研磨し平滑化したサンプルを遠赤外線放

表2 添加した金属酸化物

TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
MnO ₂	Fe ₂ O ₃	CoO
NiO	Cu ₂ O	Nb ₂ O ₅
Sb ₂ O ₃	SnO	WO ₃
Bi ₂ O ₃		

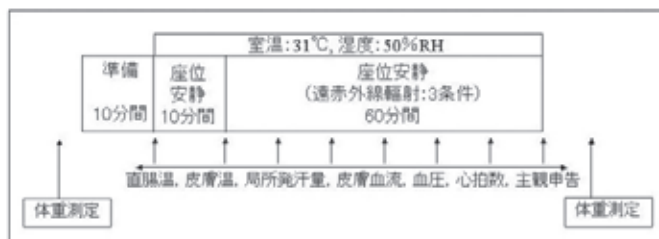


図2 遠赤外線が生体に及ぼす生理学的作用の評価手順

射率測定に使用した。遠赤外線放射率測定は、ヒーター温度100℃とし、その他の条件は、2.1と同じとした。

2.4 遠赤外線が及ぼす生体への生理学的作用の評価

遠赤外線ヒートパネルの使用が座位安静時における生理応答に及ぼす影響を検討するために、成人男性6名(年齢22±1yrs)を被験者とし、図2に示す実験を行った。具体的には実験室入室前に、体重測定、皮膚センサー等の貼付けを行った。室温を31℃、50%RHに制御した実験室に入室後10分間で局所発汗量測定用のプローブおよび皮膚血流量センサーを貼り付けた。入室10分後から測定を開始し、10分間座位安静にした後、ヒートパネル前に移動し、60分間座位安静にした。このとき、直腸温、皮膚温(12箇所)、全身発汗量(体重変化)、局所発汗量(3箇所)、皮膚血流量(3箇所)、血圧、心拍数を測定した。また、全身温冷感、局所温冷感、温熱的快適感、発汗感について主観申告を行なった。ヒートパネル条件は高放射、低放射、コントロールの3条件とし、各被験者が3条件を異なる実験日の同一時刻に行なった。全条件において被験者の背中からヒートパネルまでの距離を30cmとした(図3)。なお、ヒートパネル表面の材質がセメントからなるものを高放射条件として、その上にアルミニウムテープを貼り付けたものを低放射条件として使用した。コントロールは加熱していないセメントパネルとした。また、表3にヒート

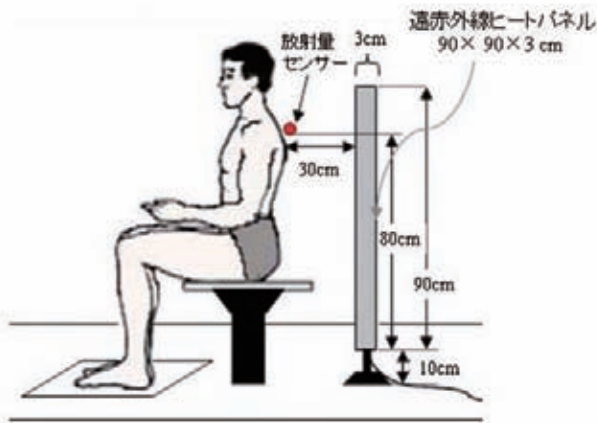


図3 生理学的作用の評価におけるヒートパネルと被験者の配置

表3 各照射条件におけるヒートパネルの表面温度と遠赤外線放射量

	表面温度 (°C)	放射量 [※] (W/m ²)
コントロール (セメント)	30.3	-
高放射材 (セメント)	50.4	66
低放射材 (アルミニウム箔)	50.3	6

※ 値は、ヒートパネル表面から30cmの距離での放射量

トパネルの表面温度およびヒートパネルから30cmの距離における放射量を示す。

3. 結果及び考察

3.1 各種セメントの遠赤外線放射特性

各種セメントの化学組成を蛍光X線分析のファンダメンタルパラメータ（FP）法により求めた結果を表4に示す。普通PCは一般的なセメントであり、早強PCは、普通PCとほぼ同じ化学組成であるが、構成鉱物割合が異なる。白色セメントは、セメント特有の灰色を呈する要因である酸化鉄(Fe₂O₃)が少なくなっている。アルミナセメントは、アルミナ(Al₂O₃)が他のセメントよりかなり多く、シリカ(SiO₂)、カルシウム(CaO)が少なくなっている。

各種セメント硬化体の放射率曲線を図4に示す。化学組成は上述のように異なるが、放射率曲線はどのセメントにおいても、同じような傾向を示し、波長による放射率の著しい増減（波長依存性）はほとんど示さないことが明らかとなった。また、積分放射率はセメントの種類によらず約93%であり、有意な差は見られな

表4 各種セメントの化学組成

(mass%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
普通ポルトランドセメント	19.7	5.1	3.2	0.3	1.4	66.3	0.2	0.4	2.7	0.4
早強ポルトランドセメント	19.5	4.4	0.2	3.0	0.9	66.9	0.2	0.4	3.8	0.4
アルミナセメント	5.6	50.2	1.2	0.1	0.5	39.2	0.0	0.2	0.2	2.5
白色セメント	21.1	4.6	0.2	0.0	1.0	60.6	0.1	0.1	3.9	0.2

※ 蛍光X線分析(FP法)による測定

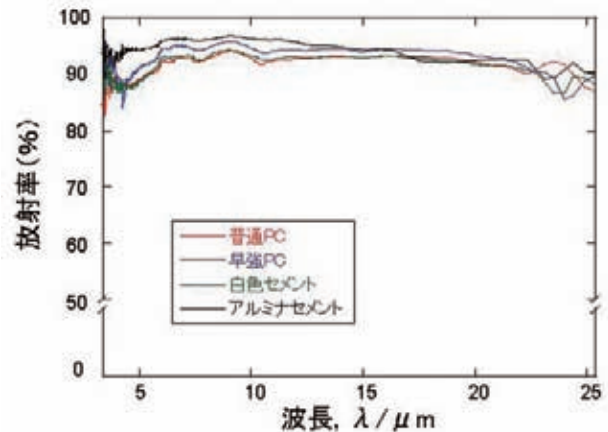


図4 各種セメント硬化体の遠赤外線放射率曲線

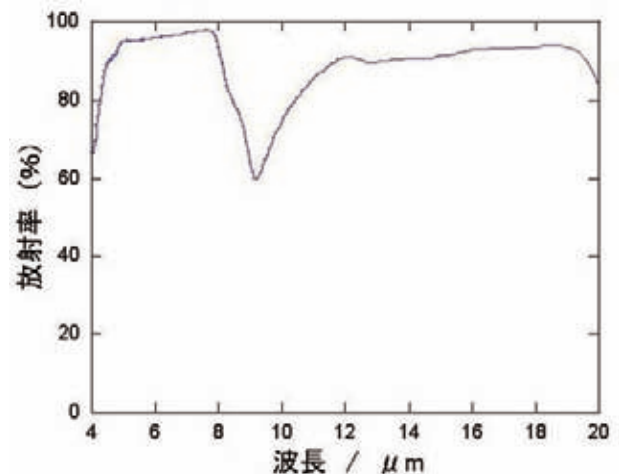


図5 一般的な石灰釉を施した磁器の遠赤外線放射率曲線

かった。このことより、セメント硬化体は遠赤外線の高放射素材であることが明らかとなった。

3.2 シリカを添加したセメント硬化体の遠赤外線放射特性

ケイ酸成分(SiO₂)を有する材料は、一般的に波長域約8~10μmにおいて、ケイ素と酸素間(Si-O)の結合に由来する放射率の低減領域が見られる。図5に放射率の低減が特徴的な石灰釉を施した磁器の放射率曲線を示す。波長が9μmでは、放射率が70%以下となっていることが分かる。しかしながら、図4からも分かるように、ケイ酸成分を含む各種セメント硬化体では、8~10μmにおける放射率の低下は見られない。そこで、

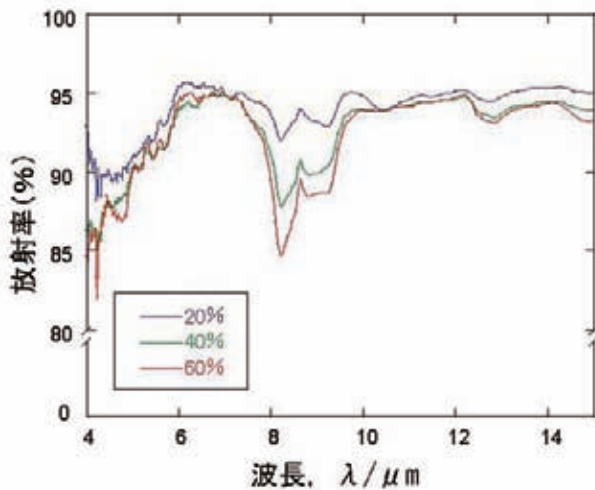


図6 石英を混合した普通ポルトランドセメント硬化体の遠赤外線放射率曲線

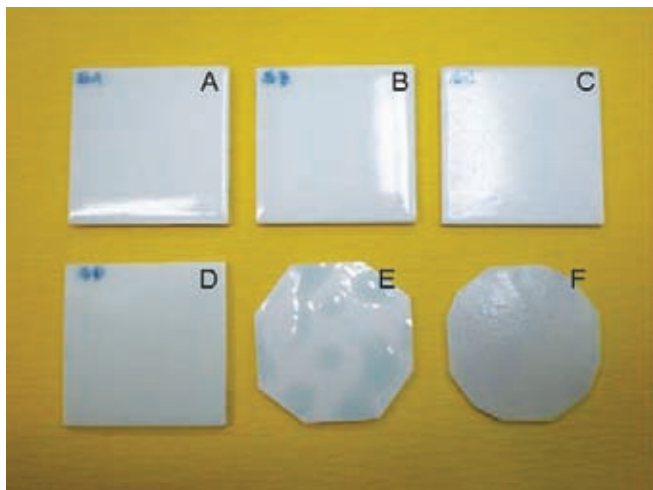


図7 ケイ酸量の異なる石灰釉を施したテストピース

普通ポルトランドセメントに、石英(SiO₂)を添加した硬化体の放射率を測定した。放射率曲線を図6に示す。添加量が増加するにつれて、Si-Oに由来する放射率の低下が確認された。

以上のことから、一般的な石灰釉ではケイ酸成分が約70mass%含まれており、放射率曲線に影響を及ぼすが、セメントのケイ酸成分は約20mass%であることから、放射特性への影響が少ないことが推察された。このことから、石灰釉においてもケイ酸成分を少なくすることで、放射率を改善することができるとともに、波長依存性の少ない材料を開発できる可能性が示唆された。

3.3 釉薬中のケイ酸が遠赤外線放射率に及ぼす影響

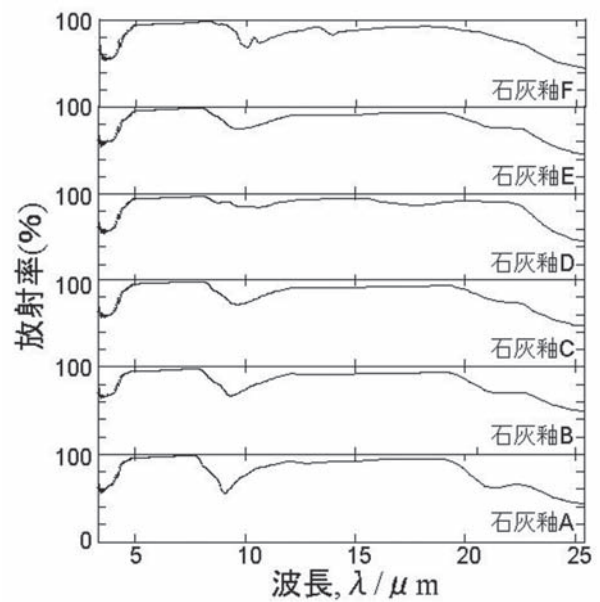


図8 ケイ酸量の異なる石灰釉の遠赤外線放射率曲線

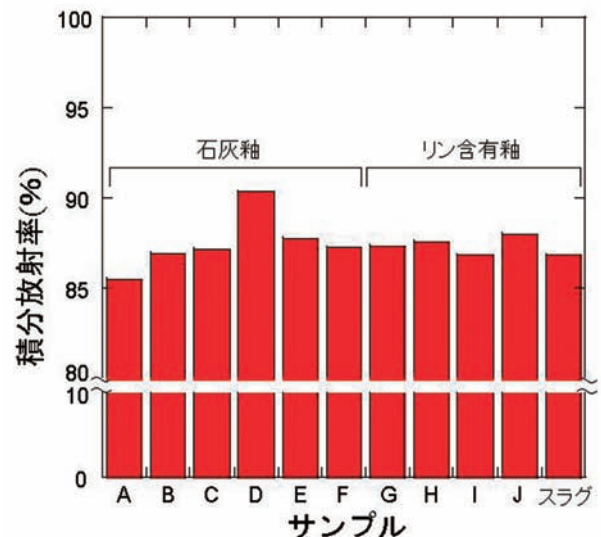


図9 石灰釉、リン含有釉の積分放射率

ケイ酸量の異なる石灰釉を施した概観を図7に、また、それらの放射率曲線を図8に示す。ケイ酸成分の多い釉薬は表面に光沢があり、ケイ酸成分が少なくなると光沢は少なくなった。また、石灰釉Fでは溶融が十分ではなく、表面が荒れた状態となっていた。放射率曲線より、ケイ酸成分の多い釉薬において8~10 μmの放射率の低下がはっきりと確認された。しかしながら、ケイ酸成分の少ない石灰釉Dでは、放射率の低下は確認されず、波長依存性が著しく改善されていることが明らかとなった。3.33~25.42 μmの積分放射率を図9に示す。石灰釉Dのみで90%を越える積分放射率を示していることが分かり、積分放射率が90%を越

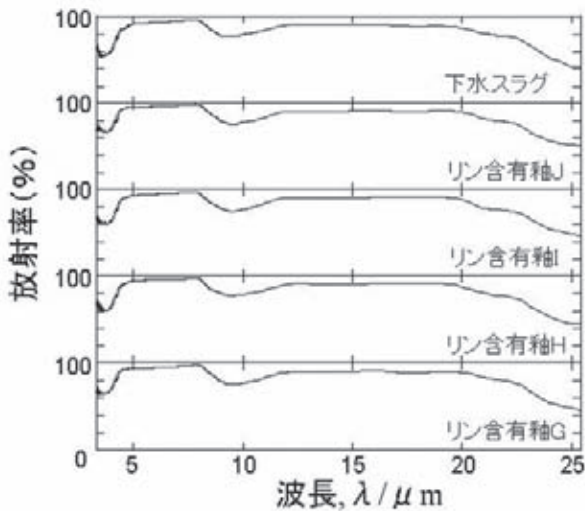


図10 リン含有釉の遠赤外線放射率曲線

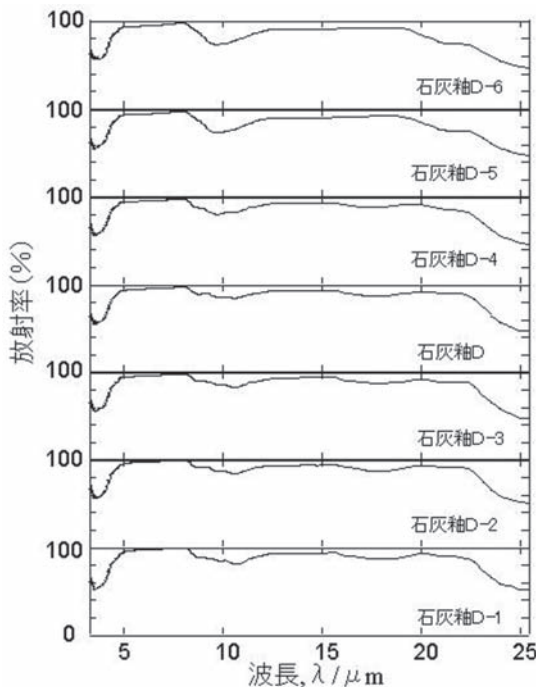


図11 石灰釉Dシリーズの遠赤外線放射率曲線

える石灰釉を初めて作製できた。

一方、リン酸により、ケイ酸成分を減じたリン含有釉の放射率曲線を図10に示す。ケイ酸成分が30~40%台と極端に少ないにもかかわらず、8~10μmでの放射率の低下抑制には効果がほとんど無いことが明らかとなった。また、積分放射率も86~88%となり、90%以上を示さなかった(図9)。このことから、リン酸を用い、ケイ酸成分の量を抑えた釉薬は、放射率の改善策として適切ではないことが分かった。

積分放射率が90%を越えた石灰釉Dのアルミナ成分とシリカ成分を変化させた釉薬の放射率曲線を図11に示す。石灰釉D-1からD-3においては、石灰釉Dと同

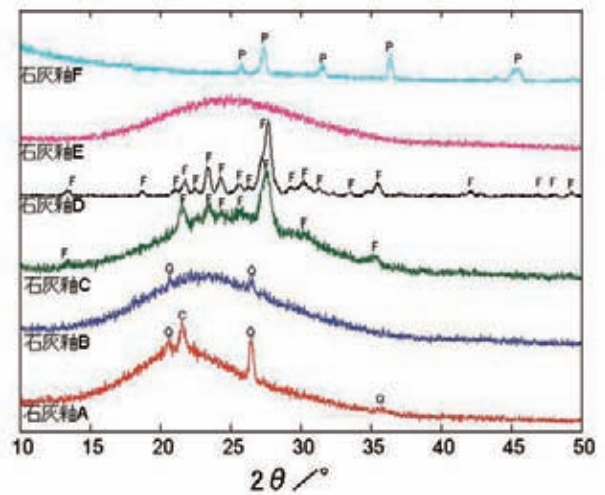


図12 各種石灰釉の薄膜X線回折パターン

様に高い積分放射率を示し、最大で91.5%であった。しかしながら、石灰釉D-1からD-3は、釉薬の熔融状態があまりよくなく、若干ざらざらとした質感であり、岩盤浴などの陶板としては好ましくないと思われるものとなった。また、一辺約45mm、厚さ約4mmのサンプルは、焼成後素地の方に大きく反った状態になり、釉薬の熱膨張が非常に小さいことが推察され、釉薬としては適切ではないことが分かった。このことから、釉薬Dの組成が適切であると判断された。

3.4 釉薬の放射率に及ぼす因子の検討

石灰釉において、釉薬の組成の相違により放射率が著しく影響された原因を検討するために、薄膜X線回折装置を用いて、釉薬層の構成鉱物を測定した結果を図12に示す。石灰釉A、B、C、Eにおいて、主相はガラス相であり、結晶相の析出はわずか、または、ほとんどないことが分かった。これに対し、高い積分放射率を示した石灰釉Dでは、ガラス相の存在を示すハローは確認されず、長石の結晶が生成していることが明らかとなった。また、石灰釉Fは擬珪灰石が析出していた。このことから、長石が析出し、ガラス相がほとんどない釉薬において放射率が高くなることが分かった。また、ケイ酸成分を少なくすることで、放射率の改善に繋がると期待し、上述のように各種釉薬の試作を行なった。ケイ酸成分量と積分放射率の関係を図13示す。この図より、ケイ酸成分の量が少なくても積分放射率の著しい改善にはなっておらず、ケイ酸成分量が約50%付近で高い放射率を示していることが分かった。高い積分放射率を示すサンプルに共通する点は、表面の光沢が比較的少ないことである。そこで、各サンプルの光沢

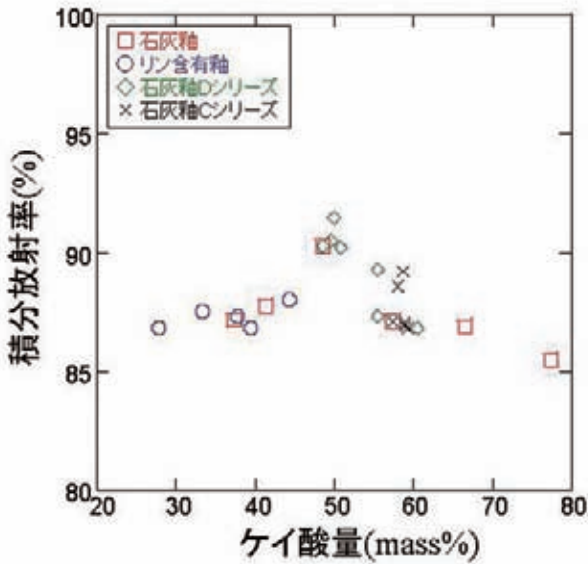


図13 ケイ酸量と積分放射率の関係

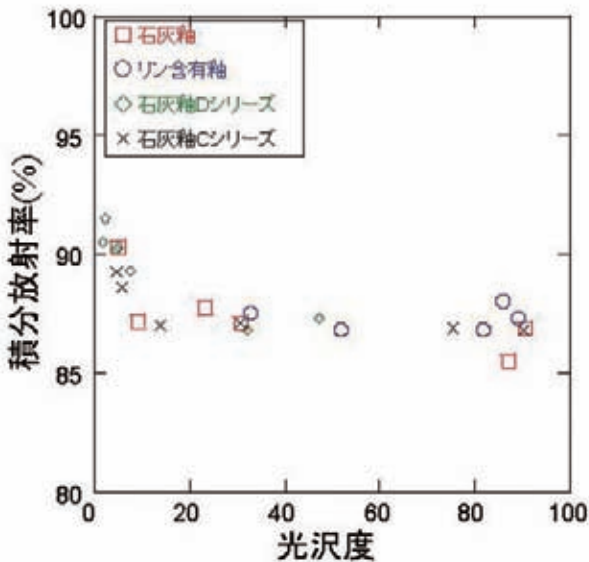


図14 光沢度と積分放射率の関係

度を測定し、積分放射率との関係について検討した(図14)。光沢度が10%以上のサンプルでは、積分放射率が約87%であり、ほぼ一定であるが、光沢度が10%以下では積分放射率が高くなっており、相関があることが分かった。このことから、光沢度を下げることによって高い積分放射率を得られる可能性が示唆された。

3.5 金属酸化物を添加した石灰釉の放射率

各種金属酸化物を石灰釉Dに添加した陶板の概観と遠赤外線積分放射率を図15、図16にそれぞれ示す。金属酸化物を添加していない基本となる釉薬の積分放射率は、89.6%であった(図16の点線)。金属酸化物を5mass%添加したサンプルの中には、積分放射率が低

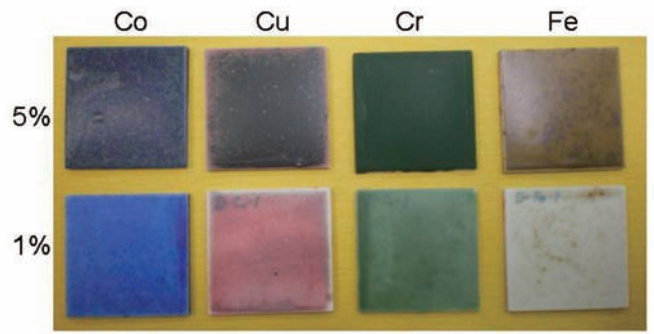


図15 金属酸化物を添加した石灰釉Dのテストピース

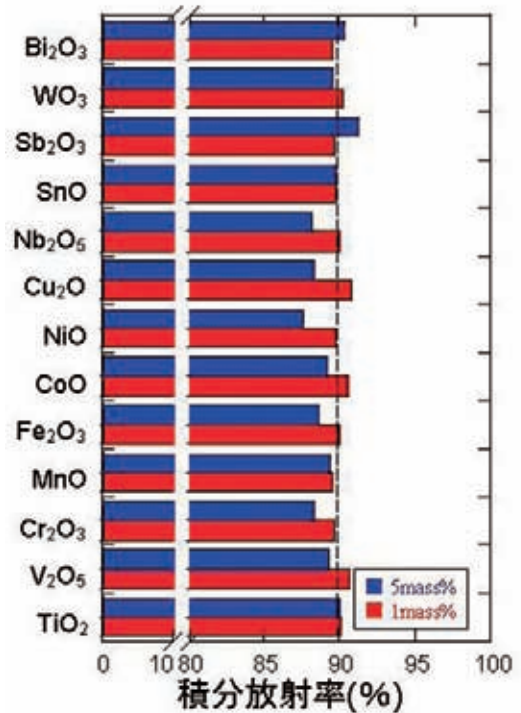


図16 各種金属酸化物を添加した石灰釉Dの積分放射率
(点線は金属酸化物未添加である石灰釉D)

下しているものもあったが、金属酸化物の添加量が1mass%では、どの金属酸化物においても著しい低下は見られないことが分かった。また、図15に示すように1mass%でも陶板への着色が可能であり、石灰釉Dをベースとすることで積分放射率を低下させることなく、陶板に着色できることが明らかとなった。

3.6 遠赤外線が及ぼす生体への生理学的作用の評価

背部(肩・腰付近)皮膚温の変化を図17に示す。背部皮膚温は高放射条件で有意に高い値を示し (p<0.05)、コントロール条件に比べて1~2℃高い値を示した。一方、直腸温および平均皮膚温の変化に条件間の差は見

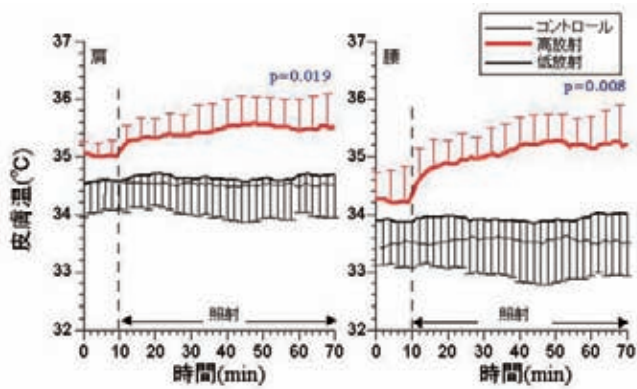


図17 背部(肩・腰付近)の皮膚温変化

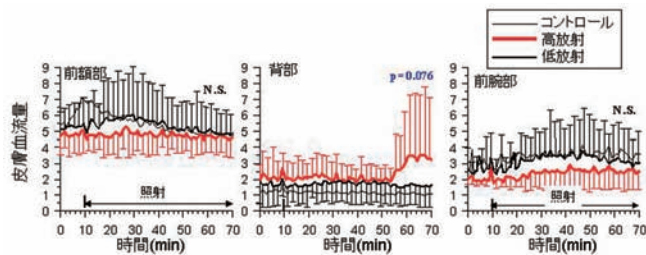


図18 各部位(前額部・背部・前腕部)の皮膚血流量

られなかった。このように、遠赤外線が直接当たっている部分のみに温める効果が確認された。

皮膚血流量は前額部および前腕部では、条件間の差は見られなかったが、背部では高放射条件で他の条件よりも高い傾向(p=0.076)を示した(図18)。局所発汗量は前額部、前腕部および背部において条件間に差は見られなかった。また、全身発汗量、心拍数および血圧にも条件間の差は見られなかった。

温熱的快適感、温冷感、発汗感は高放射条件で高い傾向が見られたが、個人差が大きく有意差は見られなかった。また、背部の局所温冷感も高放射条件で高い傾向を示したが、有意差は見られなかった。その他の部位の局所温冷感に条件間の差は見られなかった。

このように、深部体温、平均皮膚温、発汗量、全身温冷感、温熱的快適感などの全身的な応答に遠赤外線の影響は見られなかったが、加熱部位にあたる背部においては、皮膚血流量が高放射条件で他の条件に比べて高い傾向を示し、個人差が大きく有意ではないが局所温冷感も高い傾向を示した。

本研究で用いた66 Wm²程度の低い輻射量の遠赤外線は、全身的な生理心理反応への影響は及ぼさないが、加熱部位での局所的な反応に影響を及ぼすことが明らかになった。

4. まとめ

遠赤外線高放射率の条件の解明、遠赤外線高放射率釉薬の開発および遠赤外線の生理学的作用について検討し、以下の知見を得た。

- (1) セメントは、種類によらず90%を越える高い積分放射率を示し、波長依存性が少ないことが明らかとなった。
- (2) 長石が析出している釉薬で高い積分放射率を示し、白色系の釉薬でも積分放射率が90%を越えた。また、一般的な石灰釉に比べ、波長依存性が少なくなった。
- (3) 釉薬において表面の光沢度が低いものほど、高い積分放射率を示す傾向が見られた。
- (4) 金属酸化物を1mass%添加し、着色しても放射率の著しい低下は確認されなかった。
- (5) 遠赤外線の放射量が少ない低温域における遠赤外線の生理学的作用は、全身的には確認されず、加熱部位での局所的な反応のみであった。

文 献

- 1) 高嶋廣夫、杉山豊彦、セラミックス、23(4)、pp.287-293(1988).
- 2) 高田紘一、セラミックス、23(4)、pp.310-315(1988).
- 3) 石黒智明、舛田純男、加藤一実、富山県工業技術センター研究報告、No.4、pp.14-15(1990).
- 4) 島田忠、加藤布久、倉知一正、岐阜県陶磁器試験場研究報告、pp.12-17(1991).
- 5) 尾谷賢、北海道立工業試験場報告、No.293、pp.115-121(1994).
- 6) 天野和男、浅井徹、山田義和、愛知県産業技術研究所研究報告、pp.95-101(2002).
- 7) 角田世治ら、平成17年度青森県工業総合研究センター事業報告書、pp.70-74(2005).

謝 辞

遠赤外線が及ぼす生体への生理学的作用の評価において、ご協力を賜りました九州大学大学院芸術工学院若林研究員ならびに人間工学教室の方々に心より御礼申し上げます。