寝具及び衣料製品の熱伝導特性(放射及び熱伝導) の評価方法の検討(第1報)

1. はじめに

私たちが毎日着ている衣料製品に求められる基本的な機能として"暖かさ(保温性)"がある。近年は、衣料製品の基本的な機能である静止空気を含むことによる消極的保温だけではなく、吸湿発熱性や放射特性などの付加価値を加えた機能性繊維を用いた積極的保温による"暖かさ"を追求した衣料製品の開発がアパレル業界に求められている。

もちろん繊維製品である寝具にも衣料製品と同様に"暖かさ"が求められている。これらは、温熱快適性という機能性として共通であり、いずれも繊維製品の機能性評価として重要なキーワードとなっている。

機能性として見た"暖かさ"を理解する上で3つの熱伝導形態を区別する必要がある。1つ目は接した物質同士の伝導による熱移動、2つ目は空気や水などを介在した対流による熱移動、3つ目に真空中でも伝わる放射による熱移動である。本来の衣料製品や寝具などの"暖かさ"の評価では、この3つの熱移動形態を総合的に判断することが必要である。しかし、例えば JIS 規格の保温性評価「JISL1096」などは、主に伝導による熱移動を評価対象としており、対流による熱移動をいわば変動因子のように捉えて極力対流が少ない状況での測定が行われている。

更に、これらの評価に対して放射による熱移動を評価に加えた"暖かさ"の評価は、見当たらない。そこで、本研究では、評価対象の繊維製品を減圧環境(真空環境下)で計測することにより、対流の効果を抑制し、放射による熱移動に特化した"暖かさ"の評価方法を検討することにした。

この方法は、これまでに無かった評価方法であるので、まずは対流の影響を抑制しながら測定可能な装置の試作および評価方法の検討を行った。その結果、水分や二酸化炭素の影響を低減した装置が完成し、また、いくつかのサンプルにおいてその装置及び測定方法の有効性が確認できたので報告する。

なお、この研究は、機械システム振興協会が行っている「平成 30 年度イノベーション戦略策定事業」に一般社団 法人遠赤外線協会が応募し採択された事業の一部で行わ れた研究である。

2. 実験

(1) 恒温機密容器

本実験での遠赤外線分光放射率は、パーキンエルマー社製 Frontier FT IR/NIR の外部光源取り込みポート部分に、試作した恒温気密容器を接続することにより測定を行った。したがって、遠赤外線の放射率の輝度情報は、 $1.2\mu\sim25\mu$ までの感度を有しているが、窓材で使用する ZnSe の光学特性により、測定は超範囲を $5\sim15\mu$ の範囲で遠赤外線分光放射率の測定を行った。

最初に試作した恒温気密容器の仕様特性について確認 を行った。恒温気密容器の内面からの放射加熱により試料 を加熱するが、まず、その試料が置かれている環境での背 景放射特性を試料設置部で検証した。2つ目に窓材の光学 特性を検証したところ、5~15μの範囲で透過率が約 70%あり、当初予想した特性の範囲であることを確認した。 3つ目に恒温気密容器の表面の温度と容器内の温度の昇温 到達時間と安定性について検証したところ、容器の温度は 約1時間必要であることがわかった。次に容器内温度につ いては、約2時間で一定温度(約50℃)になることがわ かった。4つ目に恒温気密容器の内部温度の変動は、繊維 材料で標準偏差 0.100℃、金属製のサンプルホルダーで 0.049℃、標準試料である炭化珪素 (SiC) の円盤で 0.053℃ であることがわかった。なお恒温気密容器の温度設定値と 内部に設置した試料の温度は、放射輝度の差異から検証す ると、50±0.18℃で放射輝度は1%の変動があり、50±0.37℃ で2%の変動があることがわかった。なお、従来ラウンド ロビンテストなどで標準資料として使用していた SiC を 測定すると、放射率の波長に対する挙動は同じ傾向を示し ており、恒温気密容器をとりつけた遠赤外線放射率測定装 置全体が、妥当性のあるものであることがわかった。装置 がおおよそ完成したところで、この装置を活用して特定の 材料に対してどのような測定となるのか検討した。

(2) 測定試料

紙面の制約により、様々な試料を用いて検討した実験結果をすべて掲載することができないので、本稿では、多孔性試料である低密度ポリウレタンスポンジ(以下赤スポンジ)を用いて、大気中での計測環境で多孔性繊維集合体試

料の構成要因が放射特性に及ぼす影響について検討した 結果のみ記載する。詳細について興味のある方は、一般財 団法人機械システム振興協会から公開される報告書を参 照してほしい。

赤スポンジの諸元を表1に示す。

表 1 赤スポンジの諸元

厚みδ(m)	V _f *1(%)	k*2(m3)	ρ *3	組成
2.00×10^{-3}	3.56	1.59×10^{-6}	1.15	ポリウレタン

*1 繊維の体積分率, *2:試料の見かけの体積, *3:繊維の比重

赤スポンジの外観は、図1の通りである。





図1 赤スポンジの外観

この赤スポンジを積層することにより、試料の厚みによって、観測結果がどのように変化するのか検討した。

なお、試料の積層および裏面にアルミ箔を設置しない場合と設置した場合を組み合わせて検討した(表2)。

表 2 赤スポンジの積層時の計測組合せ

	試料背面のアルミ箔の有無		
2mm 厚	無し	有り	
4mm 厚	無し	有り	
8mm 厚	_	有り	
55mm 厚	無し	ı	

恒温気密容器内の試料設置部に、何も置かずに測定した場合、その時の放射輝度は擬似黒体とほぼ同等であることが測定されている。それゆえ、試料裏にアルミ箔を置かない場合は疑似黒体が裏にある場合と同等と考えられる。また、アルミ箔を裏面に設置することでアルミ箔を薄くしても裏面からの放射の影響を排除して評価できると考えた。そこで、実験は試料裏面にアルミ箔を置くか、アルミ箔を置かない疑似黒体内に設置した条件で実験を行った。

3. 結果と考察

(1) 放射率測定に関する規格の調査

本研究を進めるにあたり、放射率測定方法に関する JIS 規格について調査をした結果、表 2 のような結果となった。これらの規格の中では、JIS R1801 が本研究の装置構成と一番似ているが、JIS R1801 の記載では前述したように含気率の大きなサンプルへの対応は難しく、また試験対象がセラミックス材料であり、測定対象の温度域も異なっ

表2 放射率の測定方法に関する JIS 規格一覧

表上 放列中 0 M 2 M 1							
規格番号	名称	制定年月日					
JIS A 1423	赤外線放射温度計による垂直放射	1983/03/01					
	率の簡易測定方法						
JIS R 1693-1	ファインセラミックス及びセラミ	2012/06/20					
	ックス複合材料の放射率測定―第						
	1 部—						
JIS R 1693-2	ファインセラミックス及びセラミ	2012/06/20					
	ックス複合材料の放射率測定―第						
	2 部—						
JIS R 1693-3	ファインセラミックス及びセラミ	2012/06/20					
	ックス複合材料の放射率測定―第						
	3 部—						
JIS R 1801	遠赤外線ヒータに放射部材として	2002/03/20					
	用いられるセラミックスの FTIR に						
	よる分光放射率測定方法						
JIS R 1803	遠赤外ヒータの遠赤外線域におけ	2005/03/20					
	る分光放射エネルギーの測定方法						

ているため、参考とはなるがこのまま測定できないことがわかった。

(2) 試作装置の開発

上記のような測定方法に関する規格の状況を考慮し、試作装置が具備する必要な要件を検討した結果、以下のとおりになった。①背景放射の処理についてどのように課題解決するか、②大気中の水蒸気による吸収によって生じる課題をどのように解決するか、③大気中の二酸化炭素による吸収によって生じる課題をどのように解決するか、④測定環境中で温度差によって生じる空気の対流をどのように抑制するかの4つの課題が想定された。

①の課題については、背景放射として、測定対象を設置する試料台の周辺の状況や測定装置そのものからの放射などがあるが、ひとまず試料の設置場所に放射率の小さい(反射率の大きい)金メッキミラーを設置することによる周辺環境からの背景放射を実測することにした。②、③の課題は、測定環境として恒温気密容器をつくることにより、真空(減圧)もしくは乾燥窒素を充填させることにより、測定系から水蒸気や二酸化炭素を排除することにした。④の空気の対流を抑制する方法は、恒温気密容器が真空(減圧)されていれば、原理的に対流はおこらない。それ以外にも単一の乾燥された気体が均一に加熱されていれば、その気体の密度差が生じないため原理的に対流が抑制されると考えて装置を設計、試作した。

最後に、観測用の窓の設計が課題として残った。その窓材が備える要件として、赤外線波長域に透明で、かつある程度の機械的強度を持つ材料である必要がある。その候補として、ゲルマニウム(Ge)およびセレン化亜鉛(ZnSe)を選定したが最終的には、透過率の大きさや透過範囲からZnSeを選定した。

これらのことを考慮したいわゆる恒温気密容器を設計 し、試作した。(装置の概略図を図2)に示す。

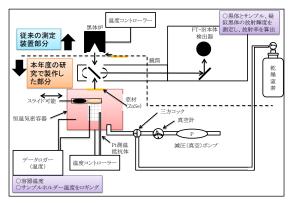


図2 装置の概略図

なお、これらの試作した恒温気密容器を用いれば、図3のような二酸化炭素と水蒸気の吸収による影響を除去しながら ZnSe の窓材による信号減少の結果が得られることを期待して設計を行った。

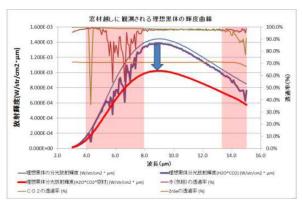


図3 窓材越しに観測される理想黒体の輝度曲線(予想)

(3) 多孔質材料の測定

図4に、積層した赤スポンジの放射率の測定結果を示した。測定は、機密容器内に試料を設置し、機密容器内には乾燥窒素を満たして測定した。測定に用いた試料は、赤スポンジを重ねたもので、2枚(4mm)、3枚(6mm)、4枚(8mm)と55mmで、試料の裏面はアルミ箔のある場合とない場合の1種類である。測定回数は、2枚(4mm)が4回、3枚(6mm)が2回、その他は各1回である。複数回測定した場合はその平均をデータとして用いている。これらのデータ中で、2枚(4mm)のみ標準偏差を付け加えている。図中のエラーバーが標準偏差を示している。

図 4 の縦軸の放射率は厚さやアルミ箔の有無による違いを示すために、0.8~1.0 の範囲を拡大して表示している。 図 4 では、厚さやアルミ箔の有無による傾向は認められず、 様々な実験条件のデータが混在している。

図 5 はそれを明確にするために、波長 10µm における放射率を厚さに対してプロットした。ここでは、アルミ箔付きの試料を対象としている。この図からも 5%ほどのばらつきの下、厚さに対する依存性は認められない。先の標準

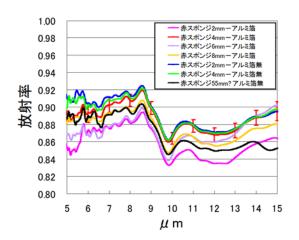


図4 赤スポンジの測定結果

偏差と平均値から、ちなみに変動係数を算出すると 5μm ~15μm の範囲で約±2%であった。以上の実験では、厚さの影響もアルミ箔の有無の影響も見いだすことができなかった。

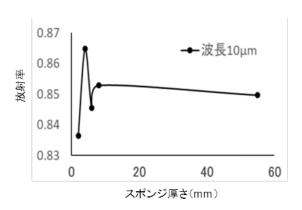


図5 波長10μmでの赤スポンジの厚さと放射率

図 6 は、1 枚(2mm 厚)~4 枚(8mm 厚)の 4 種で測定した結果である。赤スポンジ 1 枚(2mm 厚)の場合は他に比して明らかに低い放射率を示している。

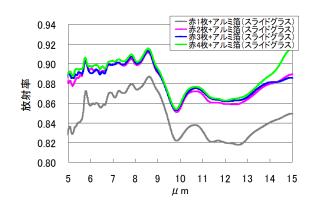


図6 赤スポンジの放射率(裏面アルミ箔)

赤スポンジの放射率は図4と図6のデータ群から1枚

(2mm 厚) の場合を除いて平均化し、それに標準偏差を重ね合わせると図7となる。低波長域の水分と15µm付近の炭酸ガスの影響のある波長域の変動が幾分大きく観測されている。

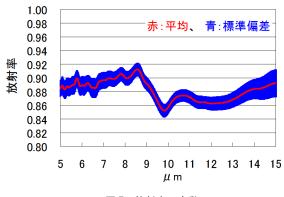


図7 放射率の変動

試料裏にアルミ箔を設置してスポンジの枚数による影響を検討したところ、1 枚 (2mm) の時に放射率がそれ以上の厚みの時と比較して小さくなった。これは、裏に設置したアルミ箔の位置以降に試料が存在するとした時の放射がアルミ箔によって阻害されたためと考えられる。それ以上の厚みでは、55mm (アルミ箔無)でも放射率は2-8mm(裏アルミ箔)と近似値であったため、厚み方向に影響せず一定の誤差範囲にあると考えられた。

4. まとめ

本研究で用いた装置により、乾燥窒素中において、水蒸気の影響を低減しながら測定する効果が確認できた。気密性容器内で水蒸気や二酸化炭素の影響を排除しながら繊維製品の暖かさに関する評価ができることがわかった。

今後、減圧(真空)環境での測定を試み、測定対象を拡張するとともに、測定装置や測定方法の改良を予定している。装置や測定方法の妥当性を確認しながら、本装置の評価方法により繊維材料を中心とした新規の機能性繊維が開発されていくことを期待している。