新しい保温材料と保温性測定法*

立岡良夫**

西桜光一***

—— 最近の技術 ——

1. はじめに

この数年、スポーツ衣料を中心とした分野では heavy duty (高機能性) をうたう新製品 (透湿性布帛や保温性中入綿など) が続々と上市されている。カタログ文化を共通の連帯手段としているヤング世代、スニーカーミドル世代には機能を代弁する素材指名買いが購入の主流となっている。まさに高機能性イコールファッションの等式が成立ったかのように思える。

本稿ではこの時代の潮流に乗った高機能性のうち、保温性をうたった衣料用保温性材料 (中入綿) およびこれに関し保温性測定法、繊維集合体と保温性の関係などについて概観してみたい。

2. 保温性の尺度

通常良く使用される熱貫流抵抗, およびクロー (clo) 値について述べる。

2.1 熱貫流抵抗

熱移動は対流, 伝導, 輻射の三要因によるがこれを熱移動媒体の面から模式化したのが図1である。人体から

図1 熱流定常時の温度変化

布帛外面 B までが熱伝導, 布帛外面 B から流体 (空気) への熱移動が熱伝達, 熱伝導の総合された人体 A から流体 C までの熱移動が熱貫流と定義される (T は各点での温度)。詳細は略すが熱貫流抵抗 ($1/K$) は熱伝導抵抗 ($1/\lambda_m/d$) と熱伝導抵抗 ($1/\alpha$) の和で表わされる (単位はいずれも $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}/\text{kcal}$)。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\lambda_m/d} + \frac{1}{\alpha} = \frac{T_1 - T_3}{Q}$$

d : 布帛厚さ (m)

Q : 定常熱流 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

上式は重要な式であり, 従来 $1/K$ を上げる手段は主として布帛厚さ d を大きくすることであったが今後は λ_m , α を小さくする必要のあることがわかる。後述のように新しい保温材はこの点も考慮したものである。布帛特に入綿などの場合には図1の AB 間は均一物質が充填されているわけでないためこの熱伝導領域のなかで輻射, 対流が発生していることになる。BC 間は AB 間ほど複雑ではないが同様である。

繊維製品の場合は布帛表面の凹凸, 毛羽, 組織などにより保温性の変化することが知られており, その意味では評価尺度としては $1/\alpha$ を含む熱貫流抵抗値の方が良いように思う。

2.2 clo 値

Gagge, Burton の定義により「1 clo とは気温 21°C , 湿度 50% 以下, 気流 $10 \text{ cm}/\text{sec}$ の室に安静にしている被験者が快適でかつ平均皮膚温 33°C を維持できる衣服の保温力」である。この定義のみを聞いて clo 値とは官能値であり物理量ではないと誤解する人がいるが, 上式の定義より人体代謝量 $50 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ (実際にはこのうちの dry heat loss 分 = 76% となるが) を上記条件に代入すると 1 clo は $0.18^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}/\text{kcal}$ という物理量に

* New Accumulated Warm Insulation Materials and their Testing Methods.

** Y. Tatsuoka, 東レ テキスタイル開発センター兼繊維研究所

*** K. Nishizakura, 東レ テキスタイル 開発センター

換算できる。

ただし 1 clo 値の定義は熱伝導抵抗のみの評価値であり快適性との対応化の場合は布帛の外面の空気への熱伝達抵抗 $0.14^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}/\text{kcal} = 0.78 \text{ clo}$ という一定値を加算していることに注意する必要がある。

空気の熱伝導率 $0.022 \text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ から単純計算すると上記抵抗値は 3mm 厚さの非対流空気層があれば達成されることになるがこの程度のパイルや起毛品は一般製品にもあり、この場合空気の断熱性がさらに増すことも考えられ一定の熱伝達を加算するだけでは実態に合わない場合もあるのではないと思われる。特に有風時の保温性実験では熱貫流抵抗を基準化して clo 値にした方法¹⁾が用いられている。

有風時の保温性の低下は風速に対し指数関数的に低下するが前述のパイル、起毛品や表面状態¹⁾によっても異なることが知られている。

3. 保温性測定法

3.1 生理学的測定

実際に人間に保温材料を着せて一定の人工気象室で生理特性を測定し、下記の式より保温性 (R : 熱貫流抵抗, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}/\text{kcal}$) を求める。

$$R = \frac{T_s - T_a}{M \pm \Delta H - E}$$

T_s : 平均皮膚温 ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : 外気温 ($^{\circ}\text{C}$)

M : 代謝量 ($\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

ΔH : 蓄熱量 ()

E : 蒸発熱損失量 ()

ΔH は皮膚上昇の場合負号となる。基本的には 2.1 の式と同一だが酸素消費量より M 、直腸温、皮膚温変化より ΔH 、体重減少量より E が算出される²⁾。右辺の分母のうち、 E は呼吸、発汗、不感蒸泄による熱損失量で wet heat loss、分母の値は dry heat loss である。本法は非常に精度は良いが個人差、実験期間、材料調達の点で困難さがある。

3.2 サーマル マネキン法

3.1 の方法において人体の代りにシミュレータ=等身大の加熱可能なマネキンを用いる³⁴⁾もので工業化もされている。本法は 3.1 の式の分母=dry heat loss をブロック別のヒータに対応した熱流センサでチェックすることにより R を求める。本法は個人差、実験期間などの問題は無い。材料調整については 3.1 と同じく同じデザインの縫製品での比較が必要になる。

3.3 布帛での測定

3.1, 3.2 の方法はそれぞれの長所があるが繊維製品の設計、開発の面からは布帛の状態での測定もきわめて重

要なことである。

A. 非定常法

過渡的な熱流移動を解析対象とするもので保温性よりも瞬間的な熱の移動=温冷感の評価法として用いられている³⁾。

B. 定常法

a. 標準板比較法 (JIS A1412)

熱伝導抵抗が既知の標準板を用い、これに重ねて試験布を設置して定常熱流 Q を与え、標準板および試験布の高低温度差 ΔT , ΔT_s を求める。標準板および試験布の熱伝導抵抗を r , r_s とすると

$$Q = \frac{\Delta T}{r} = \frac{\Delta T_s}{r_s}$$

が得られ、この式より

$$r_s = \frac{\Delta T_s \cdot r}{\Delta T}$$

が得られ、測定値 (ΔT , ΔT_s) を代入して r_s が求められる。本法は比較的簡単な装置で測定値を得られるが試験布の高、低温別の温度測定には注意が必要であり特にパイルや起毛品などの場合には測定部の設定に配慮する必要がある。

また本法では熱貫流抵抗は測定できない。

b. 直接法 (JIS A1413, ASTM D1518-64)

a. と異なり試験布表面温度を一定に保つための熱量をヒータから与えた電力として直接求めるもの。ヒータは 2 種類の保護ヒータでプロテクトされ垂直方向以外の熱流損失を防止している。JIS 法では低温側に冷却板を設置するが繊維製品の場合には ASTM 法のような空冷却の方が良い。ASTM 法の測定装置を図 2 に示す。測定値は 3.1 と同じ基本式

$$R = \frac{T_s - T_a}{H}$$

で求められる。

R : 熱貫流抵抗 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}/\text{kcal}$)

T_s : 熱板温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : 外気温 ($^{\circ}\text{C}$)

H : 熱板温度を一定に保つのに必要な熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

ただし ASTM 法では熱貫抵抗を求め、さらに試験布を除いたペア プレートの保温性を差引いて熱伝導抵抗を求める方法も示されている。

C. その他

a. 熱流計法

測定物表面に熱流計を貼付して熱流量を測定する。B.

a. と同一の原理で熱特性既知のセンサの表裏両面の温度を測定することにより下記の式から熱損失量 Q ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$) が求められる。 r はセンサの熱伝導抵抗、

図2 ASTM型保温性測定装置

T_s は熱源側温度, T_a は外気側温度.

$$Q = \frac{T_s - T_a}{r}$$

熱源が一定の場合 Q の小さい方が保温性に優れることになる。本法の場合センサ自身が断熱材として機能する可能性があるような面積の小さい測定物や表面が起毛、パイル物は B. a. と同様に測定に当たっては注意する必要がある。

人体用には 1×2 cm の小さな熱流素子も用いられているが⁹⁾センサを小さくすると外乱もそれだけ受けやすくなり精度の低下する傾向にあることも注意する必要がある。

b. 赤外線画像

Wien の変移則 ($\lambda_m \cdot T \approx 3000$, λ_m : 極大波長 μ , T : 絶対温度 $^{\circ}\text{K}$) により人体は 9.5μ の極大波長を中心とした輻射を行っている。赤外線画像はこの輻射 (赤外線) をセンサでとらえ画像処理により熱流損失を視覚的にとらえるものである。保温材料の一對縫製品で左右の色相差を保温性差として調べる方法⁷⁾や外部マイコンとの接続により画面の任意の部分の熱流計算⁸⁾や多点の温度経時変化をチェックする方法も用いられる。視覚的に保温程度を調査できる長所は大きい。が表面の生地や放射率が大きく異なるものの比較や構造的にまったく異なったものの比較の場合はデータ解釈に注意する必要がある。

以上、保温性測定法について述べた。他に JIS L1018 など保温率で示す方法もあるが物理量としての意味を持たないので省略した。

これらの測定法は3.1の生理学的測定以外は dry heat

loss のみを測定対象としていることを認識しておく必要がある。dry heat loss の割合が圧倒的に多い寒冷条件 (生理学的には化学調節域⁹⁾) 下では保温性のみで考えても大きな間違いはないと思われる。一方、環境が通常の血管調節域および暑熱条件に対応する物理調節域では不感蒸発、発汗の問題を含めた快適性の評価が必要となる。例えば通常のポリエステルと吸湿ポリエステルでは dry heat loss と wet heat loss の割合が異なることが報告されている¹⁰⁾。暑熱条件での快適性については Woodcock の i_m (透過係数)¹¹⁾や Belding, Hatch の Heat Stress Index¹²⁾CHSI) による評価法やシュミレータによる衣服内気候の解析法¹³⁾が知られているがこれらについては本題ではないので省略する。

4. 新しい保温中入綿材料

表1に新しい保温材料の保温性能をまとめた。厚さ当りの clo や目付け当りの clo 値単独では性量当りの保温性が明瞭でないため本表では新尺度として「Warmth Index」を導入してみた。すなわち一般樹脂綿を100として厚さ、目付け当り clo 値を指数化してこの相乗平均をとったものである。これによるとダウンは目付け当りの保温は優れているが総合的にはさきほどのものではなく合成繊維による中入綿の構造設計も良く考えられているものであることが理解できる。ただしこの Warmth Index のディメンジョンは物理的意味は持たない。次項においてこれらの新しい中入綿材料の構造を保温性と関連づけて考察してみたい。

5. 繊維構造体と保温性

保温性を向上させるためには熱移動3要因を抑制することが必要である。各要因について保温性向上のための方向性について考察してみる。

5.1 対流

2.1で述べたように構造体表面から流体への熱移動が熱伝達であり、この熱伝達のうち、熱エネルギーを有する流体自身が移動することが対流である。繊維構造体の場合は表面からの対流と構造体内部の繊維表面からの対流とが考えられる。まず後者について対流の基本式から考えてみる。

$$\frac{1}{\alpha_v} = \frac{\chi}{N_u \cdot \lambda}$$

α_v : 対流伝達率

N_u : ヌッセルト数

χ : 固体表面形状寸法

λ : 流体の熱伝達率

対流は繊維の表面に粘性抵抗で捕足されている空気の間 (境界層=図3¹⁴⁾) の移動可否によって決定される。

表1 新しい保温性材料 (中入綿)

名 称	メーカ	素 材	目付け (g/㎡)	厚 さ (mm)	構 造 の 特 徴	保 温 性		Warmth Index
						目付け当り	厚さ当り	
“サンステート”	東 レ	ポリエステル	160	3	特殊極細短繊維積層体	58	627	191
“サンステートⅡ”	〃	〃	100	6	特殊極細長繊維積層体	140	411	240
“シンサレート”	3 M	ポリプロピレン ポリエステル	175	8	特殊極細短繊維と通常短繊維の混 綿積層体	85	319	165
“ユニセルアイザック”	帝 人	ポリエステル ポリプロピレン	110	5	特殊発泡短繊維積層体	108	370	200
“パイウォーム”	パイリーン	ポリエステル	140	5	通常短繊維のニードルパンチ品	74	370	165
“SP-27”	ノートン (NASA開発)	ポリエステル 金属	180	3	通常短繊維と金属蒸着不織布の ニードルパンチ品	46	456	145
“メタアルファ”	安眠工業	〃	80	5	通常短繊維と金属蒸着不織布のニ ードルパンチ品	126	342	208
“タビルス”	エクソン 岩崎産業	ナイロン ポリエステル	100	4	超極細ナイロン短繊維と細繊維ポリエ ステル短繊維のニードルパンチ品	82	336	166
ダ ウ ン	—	ダウン フェザー	80 20	200	50	—	169 120	142
一般樹脂綿	—	ポリエステル	180	32	—	100	100	100

注1) 一般樹脂綿のデータは市販品5種のデータを平均したもの。

注2) 上記表は筆者が入手した材料のデータ。

図3 水平円柱断面の境界層

対流を小さくする、すなわち $1/\alpha_v$ を大きくするためには一見 λ (繊維径) を大きくするか、 N_u を小さくする必要があるように思える。(λ は定数) とところで N_u (ヌッセルト数) は対流がない状態での流体の熱伝達率 λ の増加係数と解釈され、物理的には流体の加熱膨張による浮力の関数であるグラスホフ数と単調増加関数にある¹⁴⁾。このグラスホフ数は形状寸法 λ の3乗に比例するため、この関係を前述の基本式に代入すると結局分母に λ^2 が残ることになる。すなわち

$$\frac{1}{\alpha_v} \propto \frac{1}{\lambda^2 \cdot \lambda}$$

(ただし厳密な意味での比例関係ではない)

となり、もとの基本式からの予想とは異なり繊維径を細

くすることにより対流熱伝達率の低下が可能となることがわかる。

新しい保温材料、“サンステート”、“サンステートⅡ”、“シンサレート”、“ユニセルアイザック”、“タビルス”などはこの原理を用い(超)極細繊維により保温性向上をはかっている。繊維を細くすることは対流熱伝達率を低下させるほかに同重量での繊維の構成本数を多くすることができるため繊維の総表面積を増加させ、つまりは粘性抵抗で捕捉する空気量を増加させて保温性を向上させる効果も有する。これらの効果を動きにくい空気層=不動空気層=デッドエア効果ともいう。また構造体表面からの対流防止は表面積を小さくすることは事実上不可能なので特に手立てはなさそうである。ただし表面をパイル、ループ、起毛にすると保温性がやや向上することが知られているが中入綿の場合はこれもむずかしい。

5.2 伝 導

固体など通常は均一物質内の熱の移動をいう。ただし中入綿などは含気率が高く空気の中に繊維が散在している状態であり構造体の熱伝導といっても実際には対流、輻射も伴った複合されたものとなる。空気の熱伝導率 (0.022 kcal/m・hr) と例えばポリエステルの熱伝導率 (0.250 kcal/m・hr) では10倍もの差があり、したがってこの空気を効率良く利用することが保温性向上につながることになる。繊維集合体の見掛けの熱伝導についての報告もあるが¹⁵⁾一般式として使用するにはむずかしそ

うである。

繊維の熱流に対する配置も直交する場合の方が平行の場合よりも保温性に優れている¹⁶⁾。この技術を応用したのが“サンステートⅡ”、“ユニセルアイザック”である。前者は長繊維の極薄膜が厚さ方向に無数に積層され後者も短繊維の薄膜構造となっている。

そのほか中空繊維など繊維内部に含気するものも保温性効果がみられるが表面に連通するような構造のものは効果が小さいと思われる。新しい保温材料は極細繊維というむずかしさはあるが含気繊維という点ではさらに検討の余地がありそうである。

5.3 輻射

物体はステファン・ボルツマンの法則に従い、その周囲に対し輻射を行い、その量はそれぞれの絶対温度の4乗の差に比例することになる。輻射後は反射、吸収、透過の3経路をたどり吸収された分は繊維の内部エネルギーを高めた上で再び対流、伝導、輻射の形で熱移動が行われる。

この輻射反射を利用したのが“SP-27”、“メタアルファ”である。米陸軍のデータでは人体からの熱損失の内 dry heat loss が73%でその内訳が輻射38.5%、対流が31.5%となっており輻射を真に防止すればかなりの効果は期待できる。ただし輻射反射材と熱源との間に介在物が存在するとその効果が減少することも知られており¹⁷⁾、これらの材料の使用にあたってはその効果が発揮できるような形で用いるのが望ましい。ちなみに構造物表面をフラットにするだけで赤外反射率が通常の中入綿

より向上することを“サンステート”、“サンステートⅡ”において確認している。

6. おわりに

保温性に関する問題も寒冷、暑熱ストレスを含めた快適性のなかで考えていくべきものである。今後とも各位の御指導を得て鋭意努力していきたいと考える。本稿ではかなり割切った表現をしたため正確さに欠ける部分もあると思うが限られた枚数のなかでご容赦願えれば幸いである。

引用文献

- 1) Hauser; J. of Coated Fabrics, 9, 161~172 (1980)
- 2) 中山編; 温熱生理学 (1981) 理工学社
- 3) 三平; 家政誌, 28, 216 (1977)
- 4) Book-PAP-NATL-TECH-CONF-AATCC (1980)
- 5) 米田, 川端; 繊維誌, 34, 45 (1981)
- 6) 鶴谷ら; 家政誌, 30, 550 (1979)
- 7) 西桜; 消費科学会誌, 22, 8 (1981)
- 8) 日経産業新聞, 56.1.8付
- 9) 三村; ヒトの適応能 p35~42 (1977) 共立出版
- 10) 登倉; 第5回人間-熱環境系シンポジウム報告集, p. 48 (1981)
- 11) Woodcock; Text. Res. J., 32, 628 (1962)
- 12) Belding, Hatch; Heating, Piping and Air Conditioning (1955)
- 13) 原田ら; 繊維誌, 35, P 203 (1982)
- 14) 保温入門, p. 20~25 (1978) 省エネルギーセンター
- 15) 堀川; 繊維集合体物理講習会, p. 1-4 (1970, 4月), 繊維機械学会
- 16) 竹中; 家政誌, 14, 2 (1963)
- 17) Fourt, Hollies (三平ら共訳); 被服機構学, p. 150 (1970), 光生館

サファイックス

トランスファとトランスポート

熱、湿度その他のエネルギーが異なった相の間を飛び越えて移動するとき、これを英語で transfer と呼んでいる。transfer は、エネルギー自体が、その温度差 (熱落差)、含有水分率の差、濃度差など、要するにエネルギーの落差によってエネルギーあるいは物質が移動するときに用いられる用語である。

いっぽう transport は、エネルギーが、他の力によって移動させられる現象であって、前述のような自動的意味を含んでいない。トランスポートという言葉について、1960年アメリカ人3人 R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot が著した「Transport Phenomena」を引用する人がいるが、この本は流体と伝熱に関する本で大変よくまとまっているが、以上の3人は当時としては流体や伝熱の専門家とはいいいく人達である。アメリカでの出版事情からみて、このような本を、用語の出典とするのは暴挙である。

メリヤスという言葉は英語では knit であるが、ドイツでは Strickware (よこ編物) と Wilckware (たて編物) とに分けて用いる。

ドイツ語では熱 (Wärme) の伝わる用語として、

wärme leitung : 伝導

wärme strahlung : 輻射

wärme konvektion : 対流

wärme übergang : 伝達

wärme durchgang : 通過、貫流

wärme übertragung : (移動、渡過)、伝達

英語では

heat conduction : 伝導

heat radiation : 輻射

heat convection : 対流

heat transmission : 熱移動、通過、貫流、伝達

heat transfer(transport) : 熱移動、熱伝達

などが用いられており、異相間の熱移動では用語はややあいまいである。

日本で、衣服の伝熱特性や、透過性に関連してトランスポートという言葉が使用されているが、学会の品位と資質を保つ上で、新しい用語の使用には十分注意されることを望むや切なるものがある。(A. K.)