

# 高い保温性と運動機能性を両立した 快適なウェットスーツの開発

実践女子大学 鎌田佳伸  
(共同研究者) 海洋研究開発機構 許正憲  
ゼロカンパニー 川南正

## Development of Comfortable Wet Suit with Both High Thermal Insulation Property and Functional Property for Motion

by

Yoshinobu Kamata

*Jissen Women's University*

Masanori Kyo

*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Tadashi Kawaminami

*Zero company*

### ABSTRACT

The purpose of this research is to carry out the quantitative estimation of the thermal insulation properties of some inner clothes of the wet suit. Four different samples of the inner cloth used for this experiment are selected among the recent typical products in the wet suits market. The first one of the samples is made of the hollow fiber which contains large volume of air, and is one of the most popular materials for the warm wet suits. The second is a very thin plain knit of one layer. The third is coated with the titanium powder for the smooth surface. The fourth is permeated with the fibroin to produce the minus ion. The evaluation was done by using time-constant theory based on Newton's Cooling law. The hollow fiber is effective on the improvement of thermal insulation property for the inner cloth under the condition which doesn't contain water.

Thermal insulation property of each wet suit containing water warmed up by the body heat is almost same as the one under the condition which doesn't contain water. When water flows into and out of the wet suit through such openings as a neck or other end parts, the inner cloth with good drainage property is effective on the improvement of thermal insulation property.

## 要 旨

この研究は、ウェットスーツのインナー素材の保温特性について定量的な評価をすることを目的としている。実験に使用したインナー素材試料は最近のウェットスーツ市場の典型的な素材から4種類を選択した。その第1は、大量の空気を含む中空繊維で作られていて、温かいウェットスーツ素材としてもっともポピュラーなものの一つである。第2はきわめて薄い一層の平編ニット地である。第3は滑らかな表面が得られるようにチタンの粉末で被覆している素材である。第4はフィブロインを用い、マイナスイオンを発生させると言われている素材である。評価はニュートンの冷却法則に基づく時定数理論を用いて行った。水分を含まない状態で中空繊維をインナー素材として用いることは保温性の向上に有効である。体温で暖められた水がインナー素材に滞留している状態の保温性と水分を含まない状態の保温性とはほぼ同等である。ウェットスーツの首その他の開口部から水が流入・流出するとき、優れた水はけ性を有するインナー素材は保温性の向上に有効である。

## 緒 言

ウェットスーツはマリンスポーツなどにおいて、主に保温を目的として着用される衣服である。ウェットスーツ内に流入する水（海水）を体温によって温め、その温められた水をスーツ内に滞留することで保温する。スポーツの種類によって、それぞれのウェットスーツに要求される機能は大き

く異なるが、とりわけサーフィンでは水中および水上（空気中）で使用されること（環境条件の多様性）、全身を使う激しいスポーツであること（運動機能性）などに留意しなければならない。そのウェットスーツは、一般的に2層または3層構造で構成されており、通常、防水・撥水性および保温性を満足する主材料として発泡ネオプレンゴム（以下では単にゴムと呼ぶ）が用いられている。これに加えて、そのゴム層の内表面（インナー）に、着心地感を与え、保温性を向上させることを目的に布等を貼り合わせている。また、外表面（アウター）にはファッション性およびゴム層の保護を目的として、極めて薄い布層を設けることもある。

今まで、ウェットスーツメーカーでは、経験則による製品の改良を行ってきた。しかしながら、保温性のさらなる向上については望まれるところである。保温性について望むべきは、ウェットスーツ内に水が入らないことであるが、もしウェットスーツ内に水が入るとするならば、体温で温められた水が滞留することである。しかし実際には、外の冷たい水（海水）が首や手首等の開口部分や、ファスナー部分から流入・流出するポンピング作用により保温性が低下する。以上のことより、有効な保温性を得るためには、①開口部分からの水の流入・流出の抑制、②肌に接する保温性素材の改良、等による改善が考えられる。本研究は、高い保温性と運動機能性を両立した快適なウェットスーツの開発を目的としている。ゴム層を厚くすれば保温性は高くなるが、運動機能性は低下する。

したがって、ゴム層はそのままにして、インナー素材部分の保温性の向上を図ることができれば、必然的に運動機能性を保有したままで保温性の向上が得られることとなる。この観点から、本研究では、インナー素材の材質と構造が保温性の向上に及ぼす効果を定量的に評価した。

### 1. アンケート調査

11月7日（日）の午前中に神奈川県鵠沼海岸（天候は晴れ、気温は午前10時が19.1℃で午前12時が21.3℃、水温は約20℃）において、サーフィンをしていた20歳から39歳が全体の76%を占める男女42人（男：20人、女：22人）を対象にウェットスーツの保温性などに関するアンケート調査を行った。ウェットスーツに対する品質要求としては、男女ともに保温性と運動機能性が高く、わずかに下がって身体との適合性となった。このことからウェットスーツの保温性と運動機能性が望まれていることが分かる。波待ちしている時や海から上がった時に寒さを感じるサーファーが多かった。このことは海から露出している身体の部分に寒さを感じるのであるから、空気中に出ている部分の保温の大切さが見受けられた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

ウェットスーツ素材の熱的特性を測定する手段として、主として次に述べる円柱熱源体の冷却による方法を用いた。水中でのウェットスーツ素材の保温性評価をする必要性からこの方法を選択した。また、一部データの検証のためにKES-FB Thermolabo II（カトーテック製）を用いた。

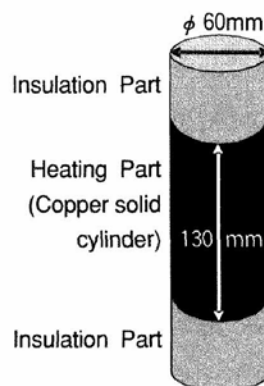


図1 Heated body

#### 1) 円柱熱源体の冷却による方法

熱源体には放射率0.94の黒体塗料を塗布した銅製円柱を用いた（図1）。大きさは、φ 60mm × L 130mmである。銅製円柱の側表面のみから放熱するように、円柱の上下を厚さ50mmの発泡スチロール材で断熱した。また、円柱の温度測定のために表面に長さ50mm、深さ1mmほどの溝を付けてφ 0.1mmのC.C.熱電対を埋め込んだ。測定に用いた試料については次の2. 2項で述べるが、試料で覆われた熱源体を自然冷却し、40℃からの温度降下データを用いて解析した。この時の環境は、20℃、65%RHの恒温恒湿室環境の場合と、およそ20℃の静止水環境に対応している。

#### 2.2 試料

実験に用いたウェットスーツ用の素材は表1の通りである。ゴム層は厚さは3mmのものを用いた。インナー素材に関しては、最近の市場の典型的なウェットスーツに使用されている素材から4種を選択した。試料Rは中空繊維を表面に持つ素材であり、中空部分に空気を含むもつともポピュ

表1 Samples

Sample name	Part	Product name	Primary features	Thickness(mm)
NP	Outer	Neoprene rubber	Foam	3
R	Inner	Hollow fiber	Air contained	0.83
J	Inner	Plain knit	Very thin	0.43
H	Inner	Hot capsule	Titanium coating	1.16
Y	Inner	Wartex bio	Silk-protein process	1.05

ラーな保温性の高い素材である。試料Jはきわめて薄い平編のニット地である。試料Hは素材表面がチタニウムの粉末で被覆されている素材であり、次の試料Yと共に毛羽が密集状態で面に垂直に立っている特徴がある。試料Yはフィブロインを用いることでマイナスイオンを発生させていると言われる素材である。インナー素材の表面写真と断面写真を図2に示す。インナー素材部分の布はゴム層に接着されている。

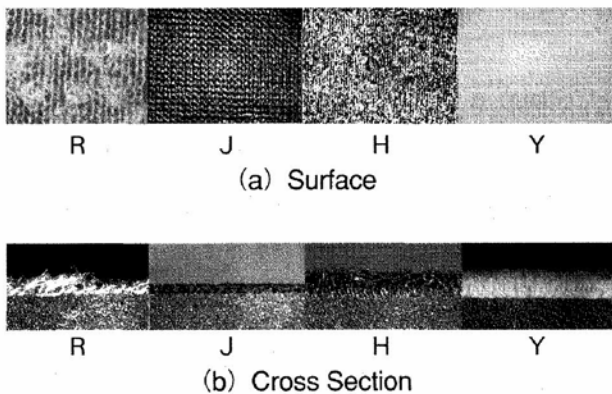


図2 Photographs of inner cloth sample

### 2. 3 計算方法

#### 1) 総括熱伝達率H<sup>1)</sup>

環境温  $\theta_a$  に対して熱源体が一様に冷却していく時、熱源体の一様温度  $\theta$  は、初期温度を  $\theta_1$  とすると、次の式 (1) あるいは式 (2) で与えられる。

$$\theta = (\theta_1 - \theta_a) \exp\left(-\frac{t}{K}\right) + \theta_a \quad (1)$$

$$\log_e = \frac{\theta - \theta_a}{\theta_1 - \theta_a} = -\frac{t}{K} \quad (2)$$

ここで、 $K \equiv C / (S \cdot H)$  は時定数と呼ばれる。Cは熱源体の熱容量、Sは熱源体の表面積、Hは総括熱伝達率である。Hは熱源体の表面が流体と直接接している場合には表面熱伝達率hとなる。式 (2) の左辺、すなわち、熱源体の対数無次元温度は、時間tの一次関数で原点を通る。その勾配からKの値が得られる。そして、 $K \equiv C / (S \cdot H)$  の関係から既知のCとSを用いることによってH

値が得られる。

#### 2) 表面熱伝達率hと有効熱伝導率λ

熱源体が円柱であって、その表面が試料で覆われている時、次式が適用される。

$$\frac{1}{H} = \frac{r_1}{\lambda} \log_e\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\frac{r_2}{r_1} h} \quad (3)$$

ここで、 $r_1$ は熱源体の半径で、 $r_2$ は試料を含んだ半径である。いま、試料の厚さをdとする時、 $1 \gg d/r_1$ の条件が成り立てば、式 (3) は式 (4) で与えられるので、伝熱抵抗 (1/H) と試料厚さとの直線関係から、ウェットスーツのインナー素材の見かけの熱伝導率λと表面熱伝達率hを容易に求めることができるが、本研究では、上記の近似条件が満たされない場合があるので、式 (3) に最小二乗法を適用してλとhを算出した。

$$\frac{1}{H} = \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h} \quad (4)$$

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 総括熱伝達率Hの測定例

図3は、加熱した裸状の熱源体を恒温恒湿室に鉛直に設置して、40℃から自然放冷させた時の温度降下の測定例である。縦軸は式 (2) の左辺

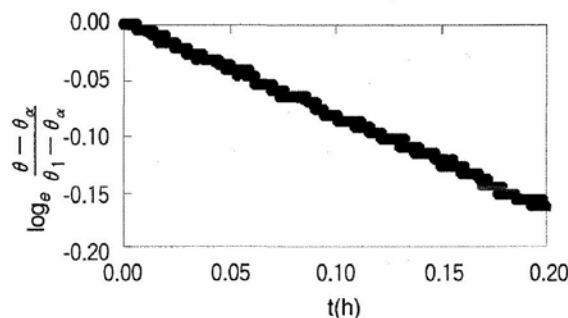


図3 Estimation of K value

の対数無次元温度で、横軸は時間経過である。図のプロットが直線であることは容易に認められる。その直線の勾配から式 (2) の関係を用いて、この場合の時定数Kが求められ、既知のCとSを用いて総括熱伝達率Hが得られる。ちなみに、事例

の勾配は $-0.181 \text{ h}^{-1}$ であるので、K値は $1.22 \text{ h}$ 、そしてH値は $10.1 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となる。裸状の測定であるからこの値は表面熱伝達率 $h$ ともなる。常温付近の測定であるから近似的に放射熱伝達率に式(5)を適用すると、hr値は $5.1 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となり、自然対流熱伝達率 $h_c$ 値は $5.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となる。この値は、文献値 [ $1-20 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ] <sup>2)</sup> の範囲にある。

$$h_r = 0.04 \epsilon C_0 \left( \frac{\theta_m}{100} \right)^3 \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon$ は熱放射率、 $C_0$ は黒体の放射係数、 $\theta$ は環境と熱源体の平均温度である。

### 3. 2 インナー素材のH値

2. 1項の方法を用いてインナー素材試料のドライとウェットの状態における熱特性を測定した。

熱源体を布試料で覆い、さらにそれを水分の遮断能力のあるきわめて薄い食品用のポリ塩化ビニリデンフィルム（以下では単にフィルムと呼ぶ）で覆って、加温器で $40^\circ\text{C}$ より若干高い温度まで加温した。その後加温器から取り出して測定に供した。ウェットの状態の布試料であっても水分の遮断能力のあるフィルムで覆っているため測定中に水分が蒸発していないと考えられる。さて、3. 1項の算出方法に基づき得られた結果を図4にまとめて示す。厚さに対する伝熱抵抗 ( $1/H$ ) の変化は、ドライ状態においてはR試料で大きい、逆にウェット状態ではR試料の変化がきわめて小さい。次に、式(3)に最小二乗法を適用して図4から算出された有効熱伝導率を図5に示す。図5(a)の記号□が円柱熱源法によるドライ状態の結果で、図5(b)の記号○がウェット状態の結果である。

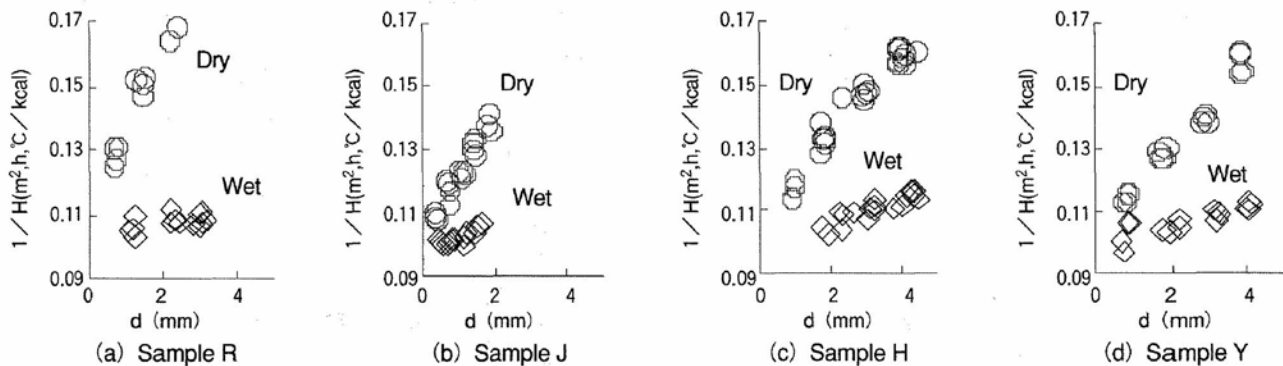


図4 Estimation of H values

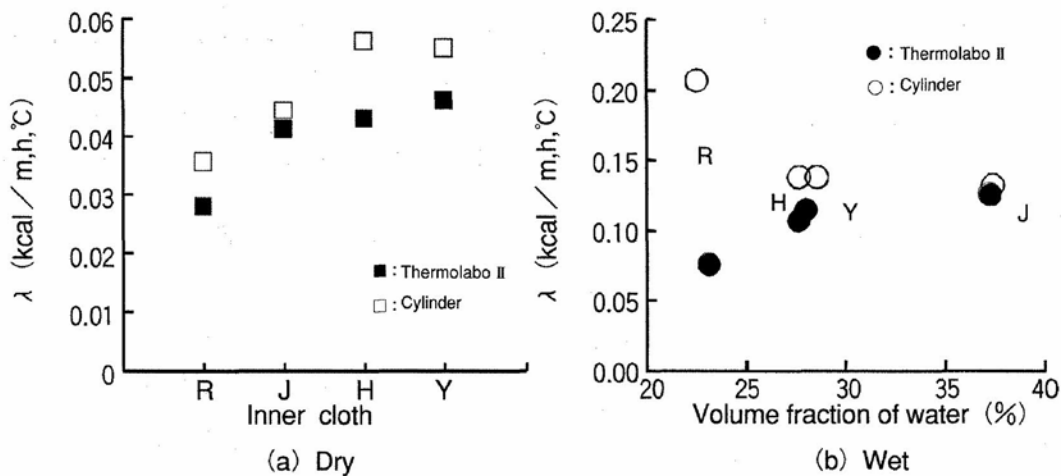


図5 Thermal conductivity of different inner cloth

試料Rのドライ状態の $\lambda$ は小さい。しかし、ウェットになると状況は一変して試料Rの $\lambda$ は他試料よりきわめて大きい。ここで、本研究の測定方法の妥当性の検証も含めて、KES-FB Thermolabo IIによる測定を行った。その結果は図3の記号●および記号■で示している。ドライ状態ではわずかに円柱熱源法の結果がThermolabo IIによる結果よりも大きい値を示しているが、概ね一致している。ウェットではH、Y、Jの三種はほぼ一致しているがRのみが大きく異なっている。これらの結果から試料Rにおいては、測定法に起因する何らかの違いが発生したことが予想される。これについてのさらなる考察は次項の3. 3で行う。

次に、インナー素材の伝熱抵抗をインナー素材1枚当たりの厚さと有効熱伝導率を用いて算出した結果を図6に示す。ドライ状態に関しては、試

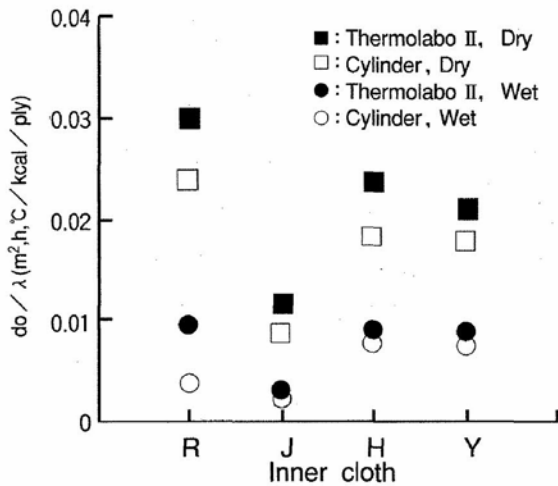


図6 Thermal resistance of different inner cloth

料Rの伝熱抵抗が大きい。これは中空繊維の利用と空隙の多さが断熱性に有効に働いているものと推測される。それに続く伝熱抵抗は試料HとYではほぼ同程度である。4種の中で試料Jがもっとも小さいが、これは試料の厚さが他に比してきわめて薄いことに起因している。ウェット試料に関しては、ドライに比して伝熱抵抗が小さくなることは空気を水で置換している部分が多くあることから当然であるが、試料Rの伝熱抵抗が小さい。これはウェット状態での有効熱伝導率が大きいこと

から必然的に小さくなった。試料Rはドライ状態で使用すると暖かいインナー素材であることが理解できる。

### 3. 3 インナー素材Rの有効熱伝導率に関する検討

3. 2項で述べたように、十分に湿潤しているインナー素材Rの有効熱伝導率は円柱熱源法を用いた場合にはThermolabo IIを用いた場合よりも明らかに大きくなった。その理由についてここで考察する。結果から推測するに、ウェット状態の試料Rを鉛直に置かれた円柱熱源体に取り付けている場合には、水の移動が生じて円柱下部に水が溜まるのが考えられる。一方、Thermolabo IIの測定では平板状で測定するので、重ねた上部布は水が少なく下部布に水が溜る構造が考えられる。図7は、試料Rのウェット状態の測定終了後を再現して、試料を高さ方向に5等分してその水分量分布を調べたものである。記号は測定方法の違い

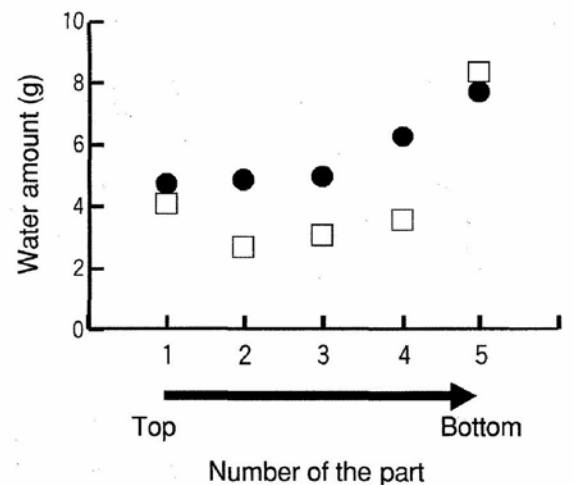


図7 Water distribution by using the cylinder method

を示している。記号●の場合は、フィルムをはずしてから円柱から試料を素早く抜き取り、その状態で下から切り取り、あらかじめ用意していた別のフィルムで包み、重さを測った。記号□の場合は、フィルムが円柱に巻いてある状態のまま切り取り、測定に供した。図から水分は測定中に下部へ流下していることが少なくとも分かる。こ

には、水分移動の1例を示したが、測定再現性は良くない。したがって、図7の結果は定性的な評価にとどまる。他試料の場合の水の流下は試料Rに比較してきわめて小さかった。このような水分移動が伝熱抵抗を変えたものと考えられることから次のモデルによる検討を試みた。試料内の水分の分布を明確に定められないので、もっとも簡単なモデルとして水分を含まない部分 ( $\lambda_f = 0.05 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ と仮定) と水分を含む部分 ( $\lambda_w = 0.51 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ と仮定) の二層構造モデルとした。図8のモデルAは試料が鉛直に設置されている場合で、図8のモデルBは水平の場合である。モデル計算の結果を図9に示す。図の縦軸は有効熱伝

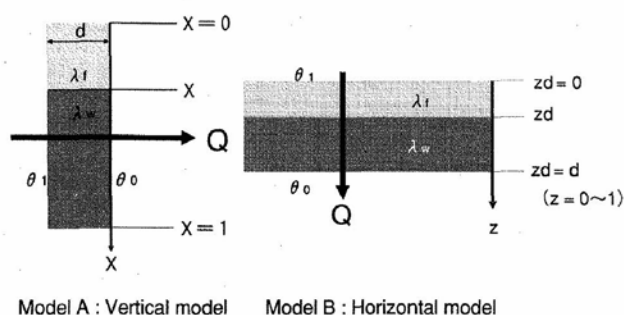


図8 Simple model based on water transfer

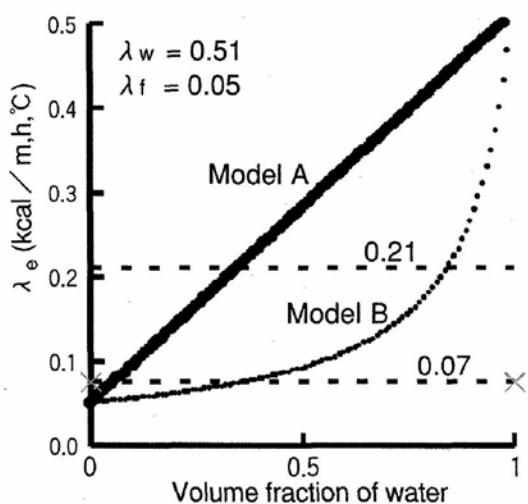


図9 Water distribution by using the cylinder method  
導率  $\lambda_e$  で、横軸は水の体積分率で図8の  $x$  あるいは  $z$  である。図中の数字0.21と0.07は、試料Rのウェット状態の有効熱伝導率であり、前者は円柱熱源体での測定結果で、モデルAが対応し、後者は Thermolabo II の結果で、モデルBが対応す

る。モデルAとBによる有効熱伝導率をそれぞれ式(6)と式(7)に示す。試料Rのウェット状態の水分体積分率は25%であった。図9では35~40%程度の体積分率で一致が見られ、一応の説明ができると考える。ここでは、定量的な議論はできないが、測定方法の違い(モデルAとBの違い)が有効熱伝導率の違いを引き起こしていると考えてよからう。

$$\lambda_e = \lambda_f \cdot X + \lambda_w \cdot (1 - X) \quad (6)$$

$$\lambda_e = \frac{1}{\frac{z}{\lambda_f} + \frac{(1-z)}{\lambda_w}} \quad (7)$$

### 3.4 ウェットスーツ素材の水中における伝熱抵抗

円柱熱源体を用いて、静止水中におけるウェットスーツ素材の伝熱抵抗 ( $1/H$ ) を調べた。用いた試料は、ゴム層とゴム層にインナー素材が張り合わされているウェットスーツ素材4種である。実験用試料は熱源体の円周より10%短い試料をウェットボンドを用いて円筒状に貼り合わせている。この状態はウェットスーツ着用時の密着状態に概略一致させた処置である。結果を図10に示す。図において、シールド試料とは試料の上下端から水が流入しないようにワセリンをもってシールを行った場合であり、アンシールド試料とはそのシールを行わないでインナー素材部への水の流入を許している場合である。インナー素材部分への水の流入は時間経過に伴いほぼ直線的に増大した。ちなみに、H試料では約13g、R試料では約6gの水がおおよそ30分間で流入した。さて、ドライ試料に関しては、伝熱抵抗 ( $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ ) がR試料で0.024、H試料では0.018とR試料が約0.006高く測定されている(図6参照)。しかし、図10ではそのような明白な差違は認められなかった。ただし、両試料の厚み方向への変形具合は異なり、その参考計測として例えば、R試料1枚

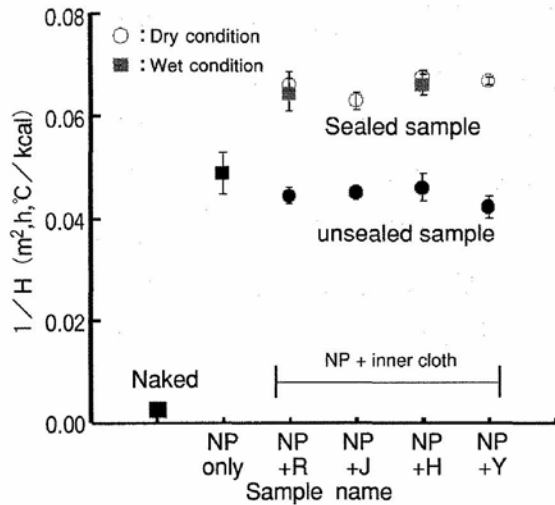


図10 Water distribution by using the cylinder method

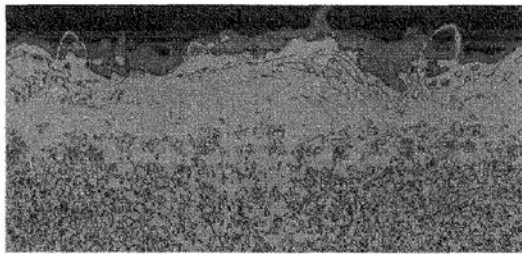
の厚さは無圧下で0.83mmであるが267g/cm<sup>2</sup>の加圧下で0.69mmと17%減少するのに対してH試料ではこのような加圧による厚さの減少が事実上見られなかった。以上のことから図6に見られる両者の差がなくなったものと推測される。また図10から（ゴム層+H試料）とゴム層単体との差はおよそ0.019 m<sup>2</sup>h °C/kcalである。この値は図6の結果とほぼ一致した。よって、概ねゴム層とインナー素材の伝熱抵抗の和はウェットスーツとしての複合素材の伝熱抵抗となっている。次に、ウェット試料について見ると、ウェット素材の伝熱抵抗はゴム層単体の伝熱抵抗よりも少なからず小さくなっている。これは、インナー素材部分にはほぼ一定の割合で流入した低い温度（18.5℃～20℃）の水を加温するために熱源体の熱が奪われるので、見かけ上传熱抵抗の値が小さくなったと解釈される。したがって、ウェットスーツを着用してサーフィンなどを行っている時には首などの開口部から海水の流入・流出が身体の動きによって必然的に生ずるが、このことによる見かけ上の伝熱抵抗の減少が保温性の低下を引き起こしていることが分かる。ところで、インナー素材部分に水を十分に含ませた試料を熱源体に取り付けて水の出入が生じないようにシールをした後に、水中に静かに沈めて測定をした場合についても検討

した。図10のシールド試料のウェット条件として示されている結果（試料RとHのみ）から明白なようにドライ試料と同様かあるいはわずかに小さい伝熱抵抗となった。このことはインナー素材内に水の出入りがなければ、すなわち素材内部に水が滞留しているならばウェットスーツの保温性が得られることを意味する。これは、インナー素材の空隙部分の空気が水により置換されることになるからインナー素材の熱伝導率は低下するが、一方においてその置換によって熱源体温度に加温されている水の存在による熱容量の増大が保有熱量を増大させるためと考えられる。

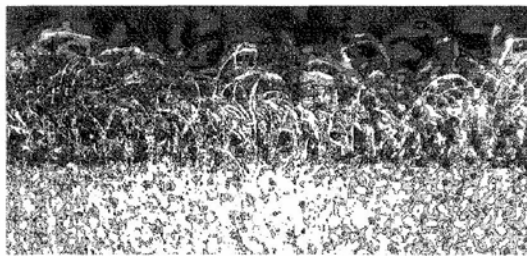
### 3. 5 インナー素材の保温性について

インナー素材の保温性についてサーフィンをしている状況を想定して考察する。ドライ状態でのインナー素材の保温性は試料Rが他試料よりわずかによいことが図6から明らかとなった。また、ウェット状態では、もしも海水の出入りがなければどの試料の保温性もドライと同様であることが図10から分かる。しかし、海水の出入りがある場合には、インナー素材に流入した海水の温度は低いので体熱を奪う作用をする。そのような状況でサーフボードにまたがり上半身を起こして気中に暴露している場合や海から上がった場合には、冬の低温環境下においてはウェットスーツの表面温度が低下して放熱が増大するのできわめて寒くなる。このような場合には、インナー素材部分に低温の海水がない方が高い保温性が得られると考えられる。そこで試料の水はけ性を検討した。ここでは、4種の試料の中から断面構造を考慮して、試料Rと試料Hを選択して用いた。図11に両試料の経方向の断面を拡大して示す。試料Rは繊維密度が少なく、溝が見える。一方の試料Hは一樣に密集している起毛構造をしている。これら試料の水はけ性の測定結果を図12に示す。図の縦軸の水はけ率は、長さ1 cm当たり0.77 gの保





Inner cloth R



Inner cloth H

図11 Detail of cross section of both R and H

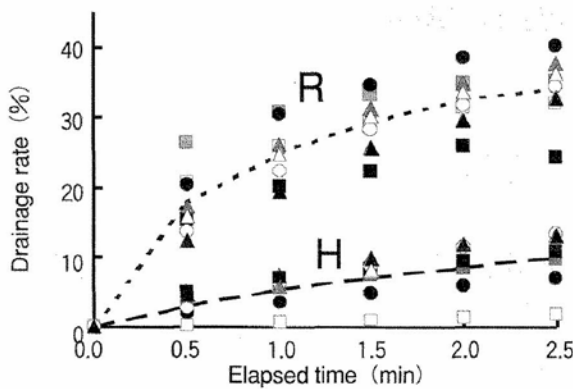


図12 Time dependence of drainage on different inner cloth

水を初期値とした排水の時間経過を%で示している。図の各種のプロットは円柱の3種の長さ(13cm, 26cm, 39cm)を表しているが、長さによる差は認められなかった。断面の溝の効果として予想されることではあるが、試料Rはきわめて水はけがよい。試料Hも水はけはあるが試料Rに比してかなり小さく、言い換えると保水性があ

る。水はけ性からの保温性評価としては試料Rが優れていると考えられる。

#### 4. まとめ

本題では、運動機能性を損なわないウェットスーツの開発目的として、とくに、サーフィンを第1に考えたインナー素材の保温性を検討した。

1. 水分を含まない状態で中空繊維をインナー素材に用いることは保温性の向上に有効である。

2. 体温で暖められた水がインナー素材部分に滞留する時の保温性は水分を含まない状態の保温性と同等になる。

3. 首その他から低温度の水がインナー素材部分に流入流出する場合には、水はけ性の良いインナー素材が保温性には有効である。

#### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、修士論文として実験にご協力頂いた実践女子大学大学院修士課程2年 長内美知君、並びに卒業論文としてご協力頂いた実践女子大学生活環境学科4年 中根真理子君に深甚なる感謝を申し上げます。

#### 文 献

- 1) 鎌田佳伸, 田中理恵, 横井麻理; 人体および衣服モデルとしての湿潤ろ紙からの、自然対流下における熱移動, 実践女子大学生生活科学部紀要, 第41号, 104-109 (2004)
- 2) 甲藤好郎; 伝熱概論, 第12版, 養賢堂, 東京, p23 (1987)