

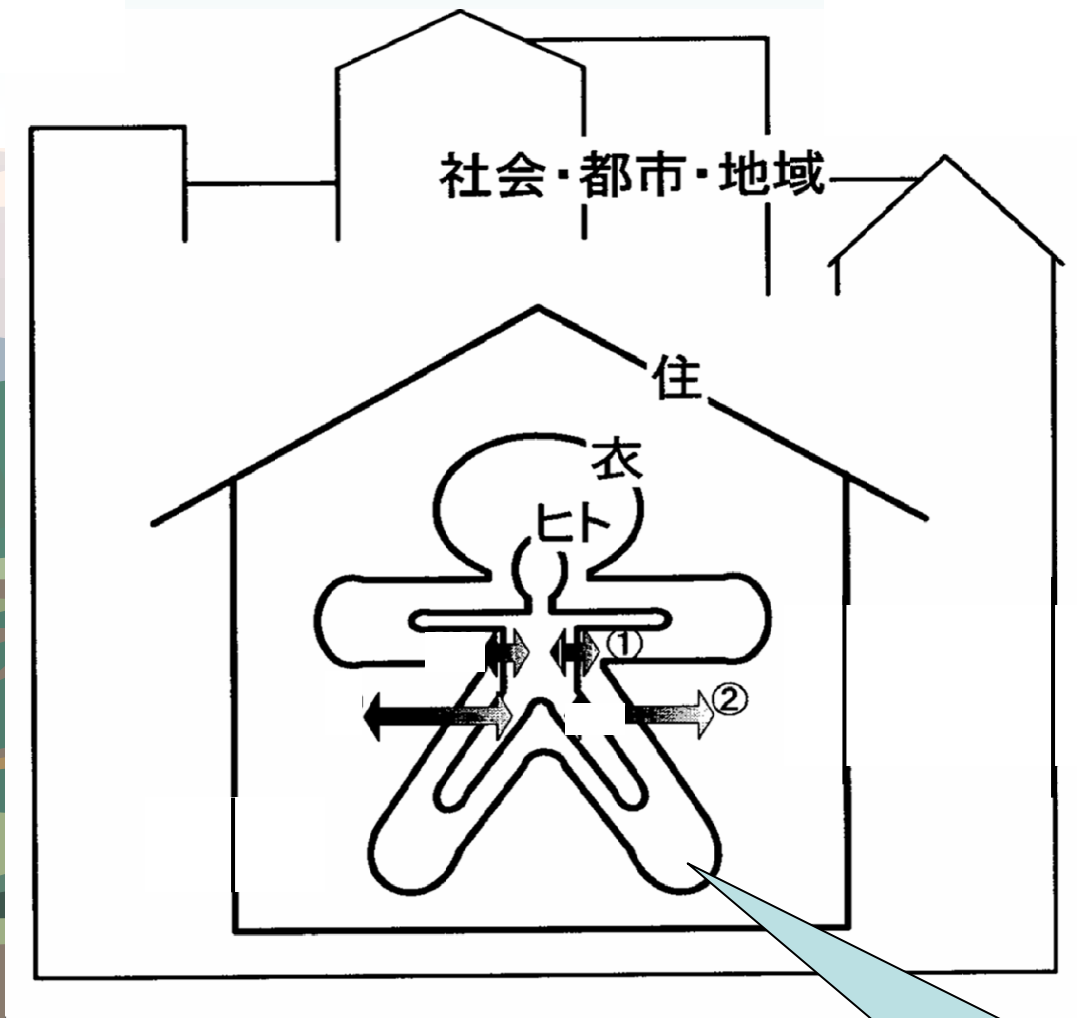
人も一個の熱源体である。

しかし、……

富山大学人間発達科学部  
人間環境システム学科

諸岡 晴美





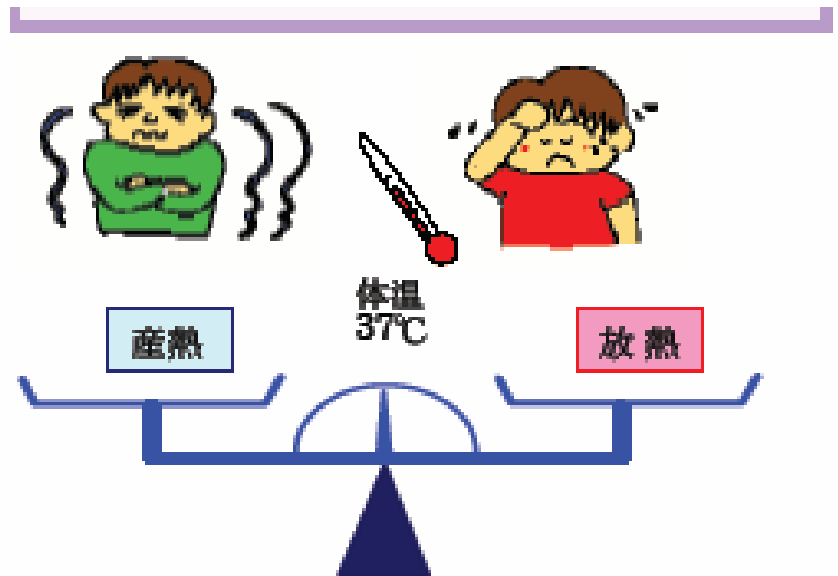
衣服：モバイル環境

- 人が**健康**であるための条件

体温  $37^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$

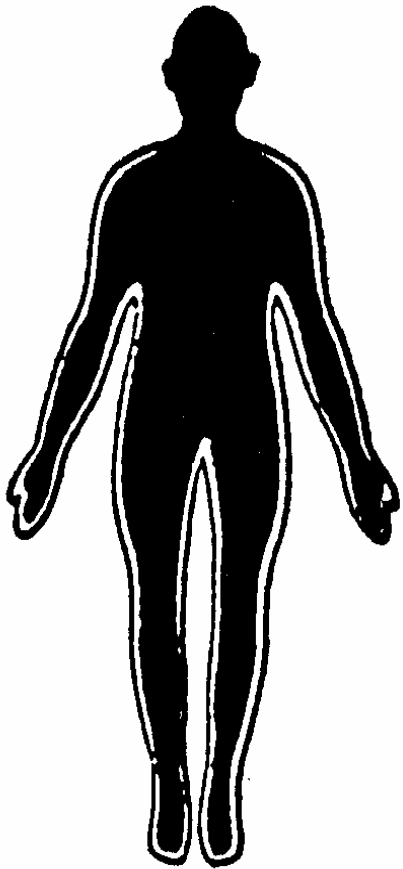
- 人が温熱的に**快適**と感じるための条件

平均皮膚温  $32^{\circ}\text{C} \sim 33^{\circ}\text{C}$

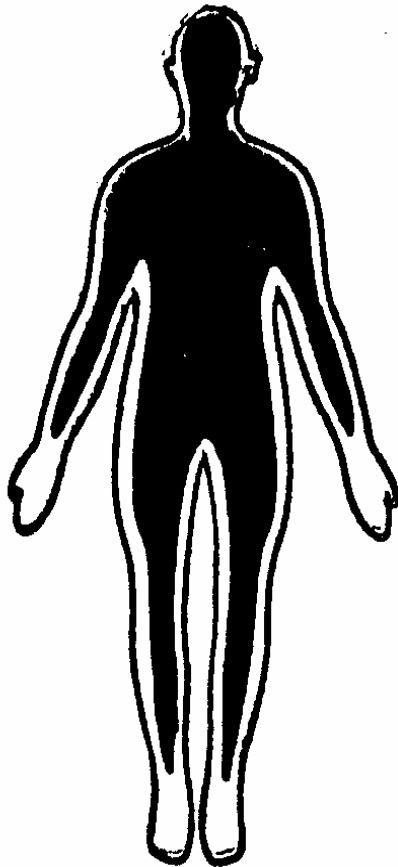


体温  
 $37^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$

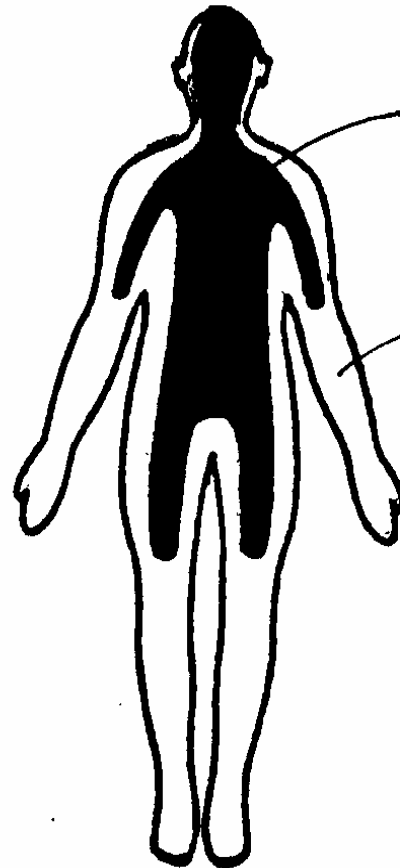
暑



暖



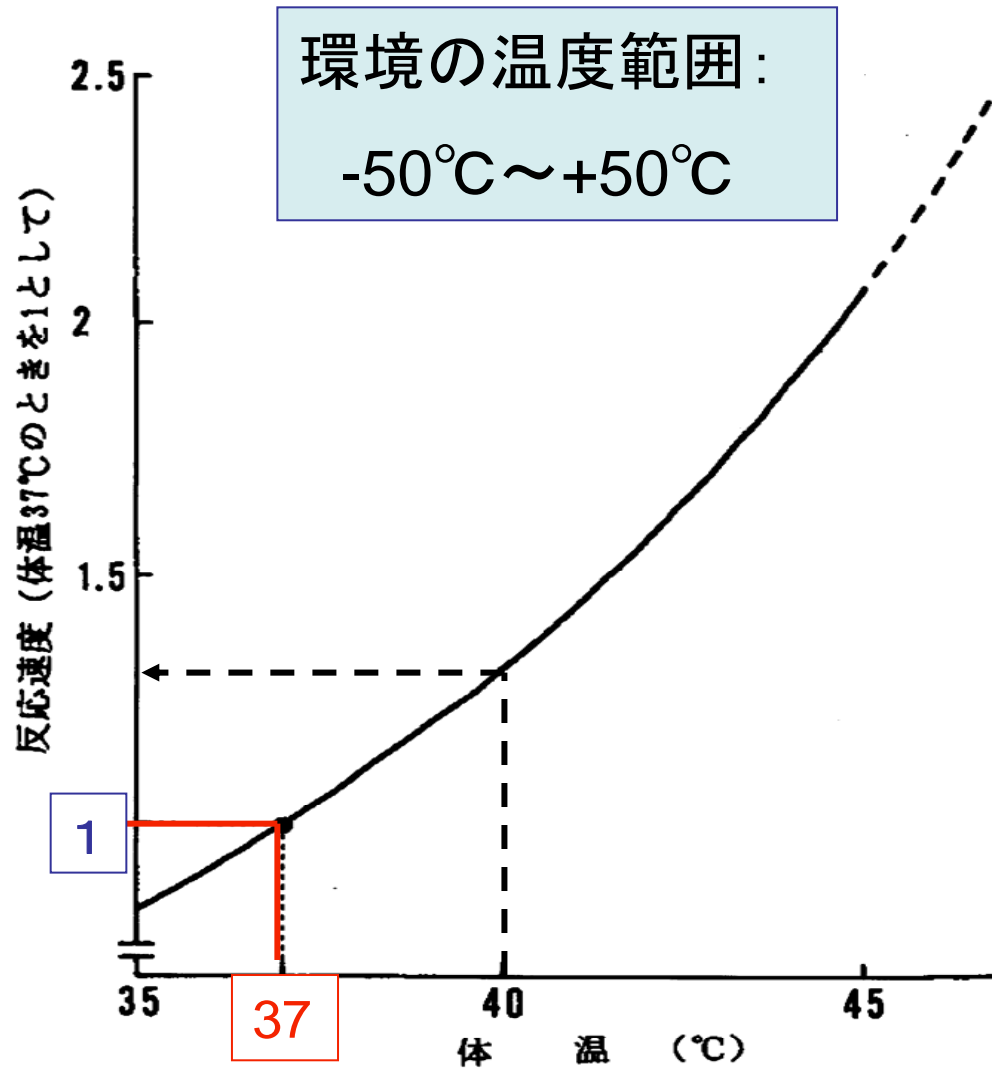
寒



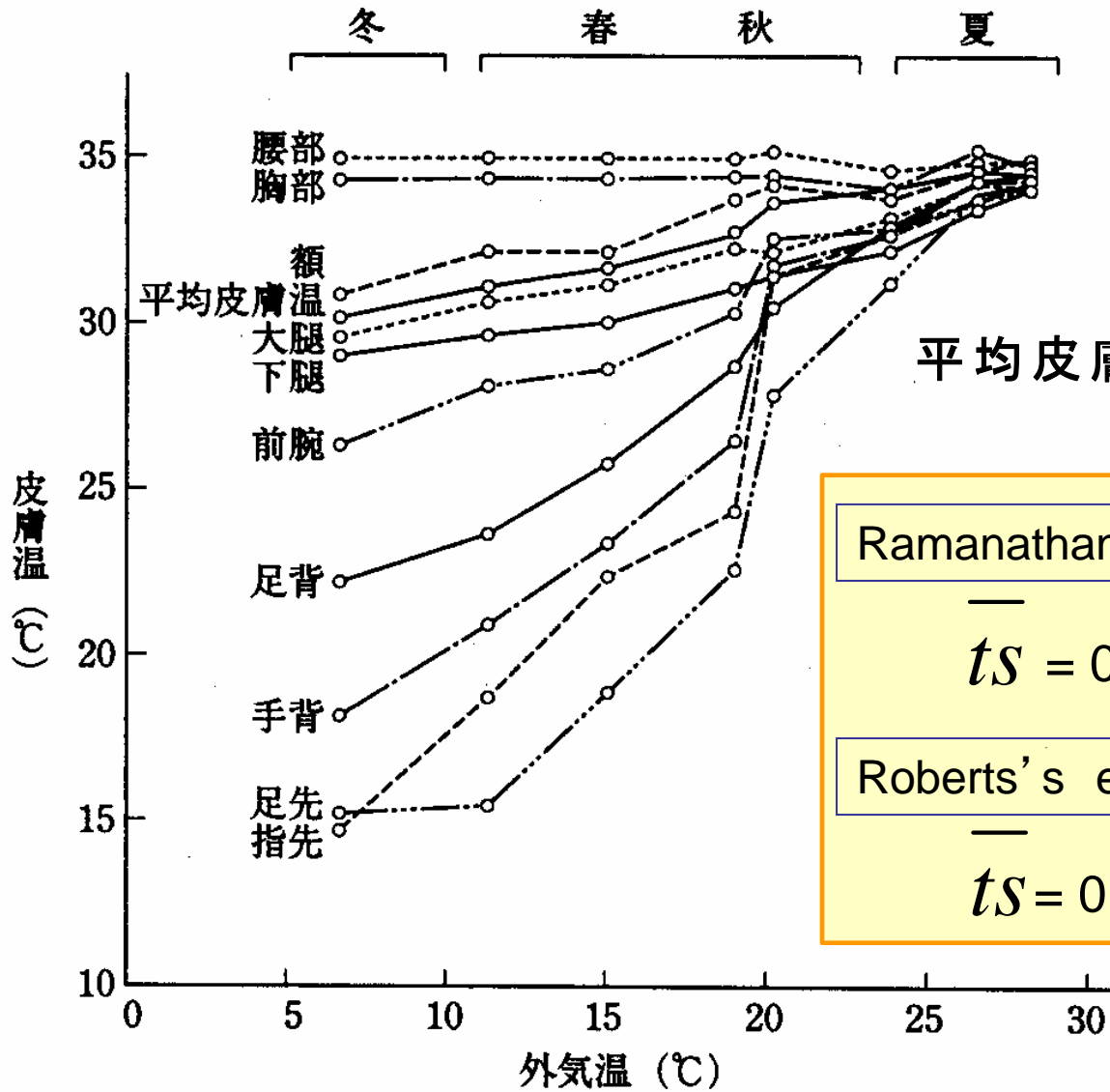
中核部 Core

外殻部 Shell

外殻部の表層温:  
皮膚温



1 温度と化学反応速度 (小川, 1994)



平均皮膚温  $\bar{tS} = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) / n$

Ramanathan's eq.

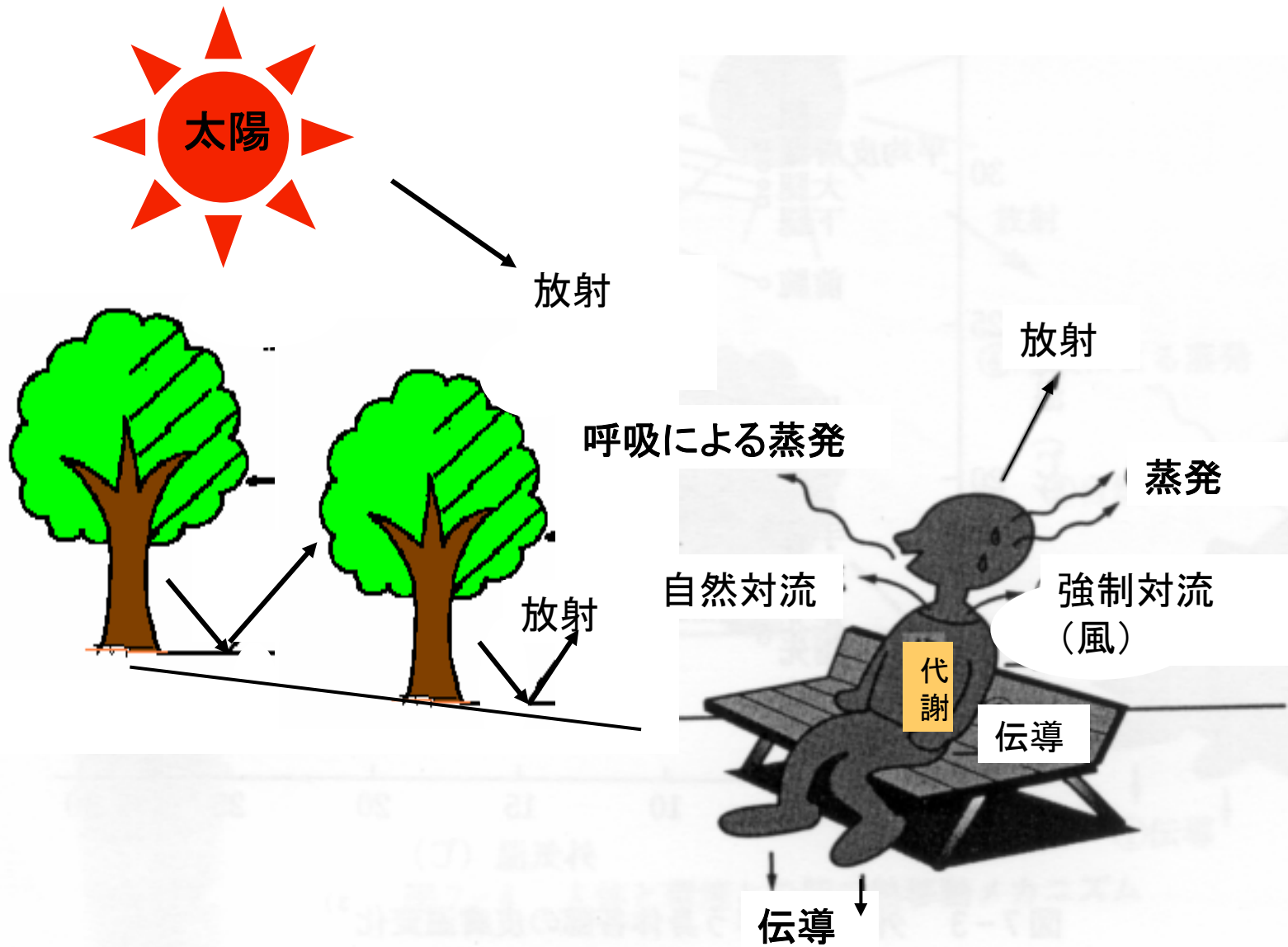
$$\bar{tS} = 0.3 (t_1 + t_2) + 0.2 (t_3 + t_4)$$

胸 上腕 大腿 下腿

Roberts's eq.

$$\bar{tS} = 0.43t_1 + 0.25t_2 + 0.32 t_3$$

図 7-3 外気温に伴う身体各部の皮膚温変化<sup>3)</sup> (万木, 1980)



# 人体と環境との間の熱移動

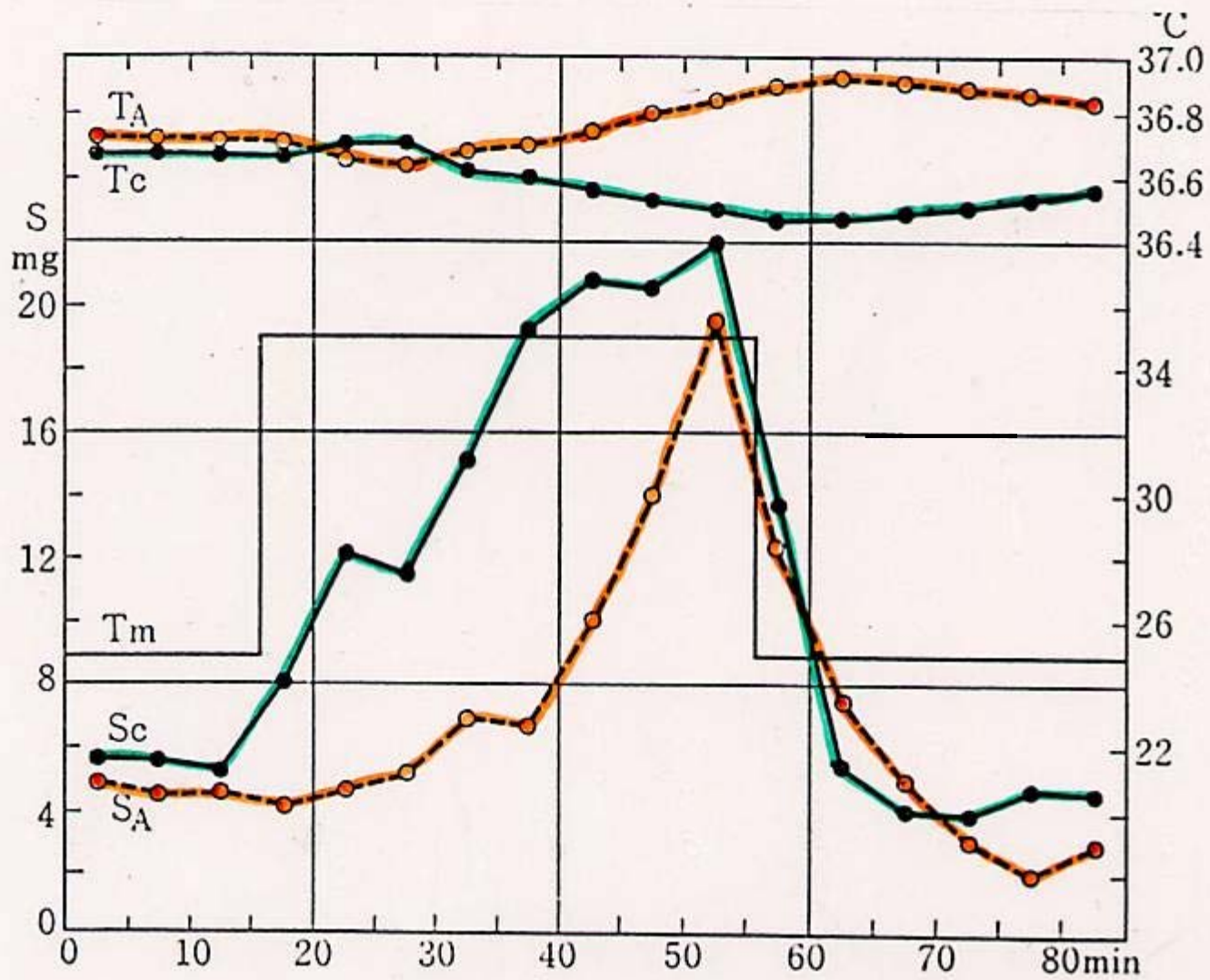
# (1) 産 熱

日本人の年齢別・性別  
基礎代謝基準値

(中山, 1981)

性別		男	女
年齢			
0月～	}	kcal/m <sup>2</sup> /hr	
2 ～		48.7	48.4
6 ～			
1歳～		53.6	52.6
2 ～	}	56.2	55.1
3 ～		57.2	55.6
4 ～		56.5	54.0
5 ～		55.1	51.6
6 ～		52.9	49.5
7 ～		51.1	47.6
8 ～		49.3	46.2
9 ～		47.5	44.8
10 ～		46.2	44.1
11 ～		45.3	43.1
12 ～		44.5	42.2
13 ～		43.5	41.2
14 ～		42.6	39.8
15 ～		41.7	38.1
16 ～		41.0	36.9
17 ～		40.3	36.0
18 ～		39.6	35.6
19 ～		38.8	35.1
20 ～		37.5	34.3
30 ～		36.5	33.2
40 ～	35.6	32.5	
50 ～	34.8	32.0	
60 ～	33.7	31.5	
70 ～	32.3	31.0	





## 小児と成人との発汗比較

Scは小児、SAは成人 Tcは小児 TAは成人 (久野, 1975)

表7-5 日常生活およびスポーツ時のエネルギー代謝率RMR<sup>9)</sup>(中山, 1981)

日常生活		スポーツ時	
食 事	0.4	100 m 走	195
身仕度	0.4	400 m 走	54
入 浴	0.7	1500 m 走	22.7
通勤(歩)	3.0	マラソン	14.3
通勤(乗物)	0.4~2.2	100 m 自由型水泳	41.4
階段上がり	10.0	1500 m 自由型水泳	18.4
階段下がり	2.5	遠 泳	6.8
教 養	0.2	ゴルフ	2.0
娛 楽	0.5	社交ダンス	3.0
休 息	0.0	野球(140分)	
休 憩	0.2	投 手	5.8
立ち休み	0.4	捕 手	4.5
炊 事	1.0~2.5	野 手	2.0
歩行(50m/分)	1.6	軟式庭球	
歩行(60m/分)	1.8	前 衛	4.1
歩行(70m/分)	2.2	後 衛	7.0
歩行(80m/分)	2.8	ラグビー	11.1
歩行(90m/分)	3.6	バスケットボール	12.0
歩行(100m/分)	4.7	ボート	24.0

$$\text{RMR} = \frac{\text{活動時エネルギー代謝量} - \text{安静時エネルギー代謝量}}{\text{基礎代謝量}}$$

# 生物学的熱方程式

$$\Delta S = M - (W + Q_e \pm Q_k \pm Q_c \pm Q_r)$$

産熱

放熱

貯熱量

$\Delta S = 0$  恒体温

$\Delta S > 0$  体温上昇

$\Delta S < 0$  体温低下

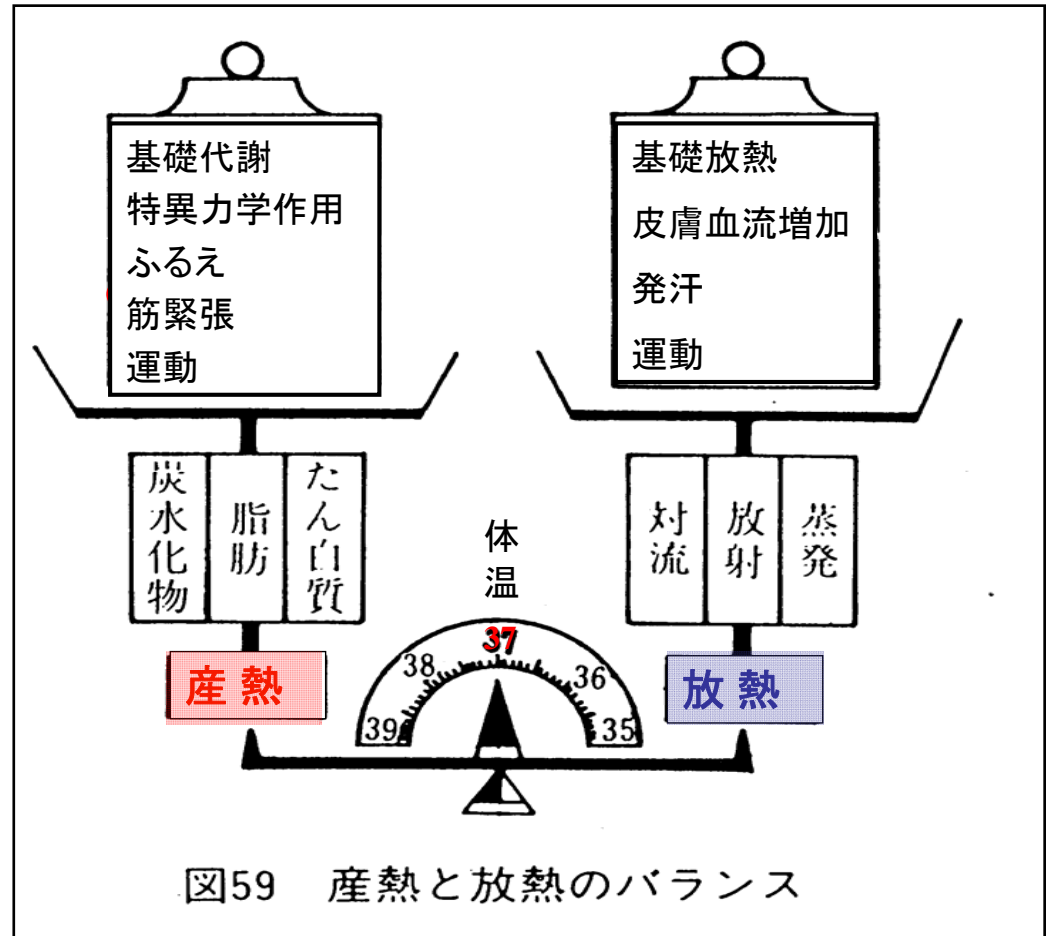
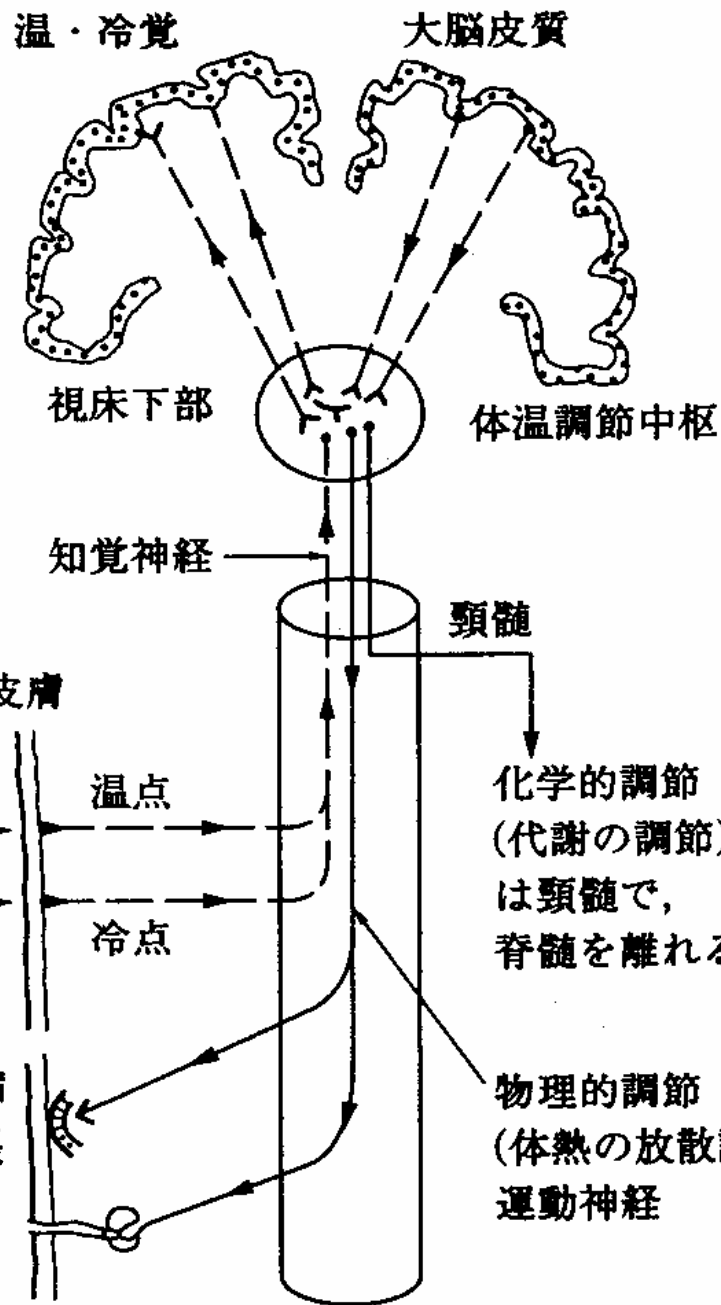


図59 産熱と放熱のバランス



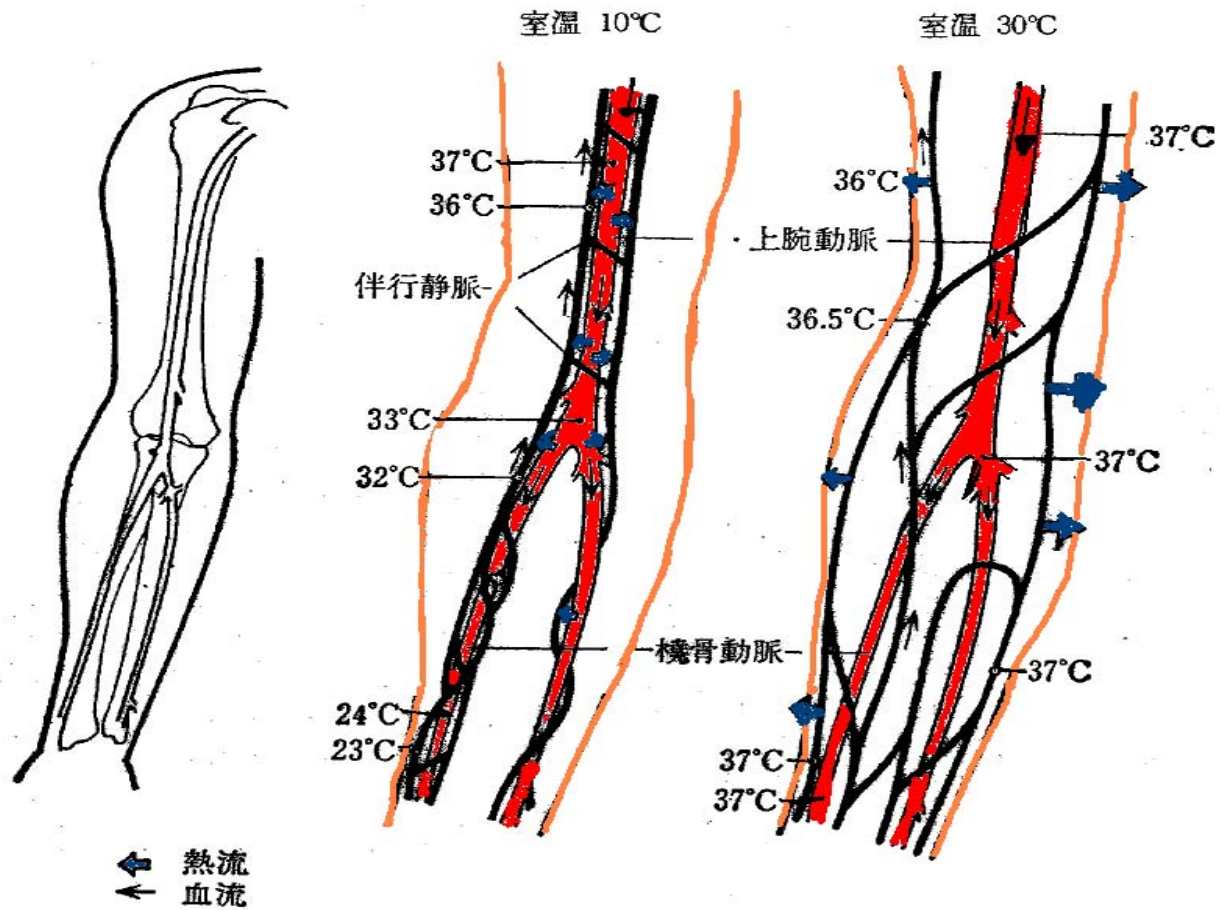
一過性の鍛錬(季節差)  
鍛錬・馴化

身体部位差  
個人内・個人間変動

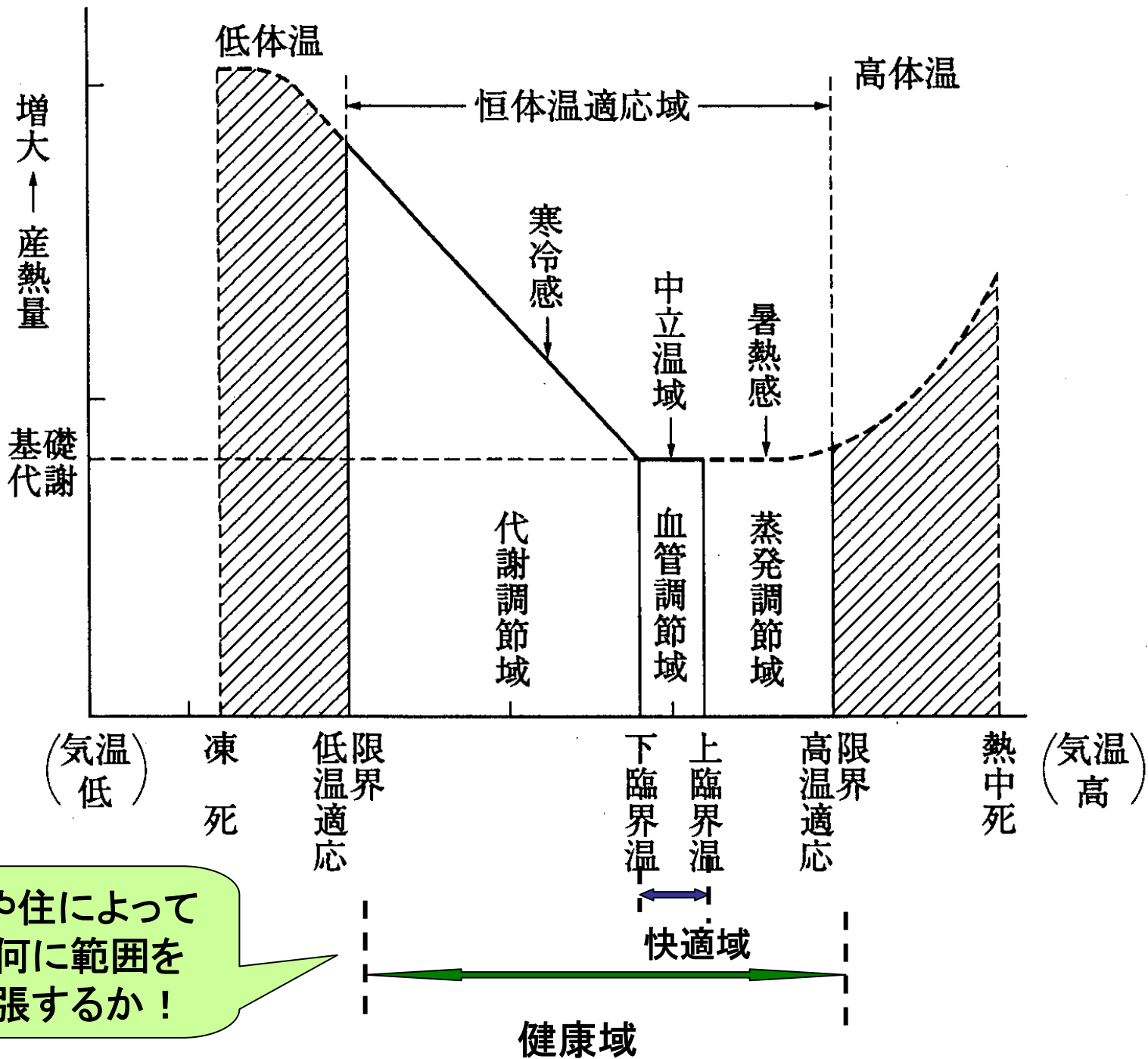
化学的調節  
(代謝の調節)  
は頸髄で、  
脊髓を離れる

物理的調節  
(体熱の放散調節)  
運動神経

図7-6 自律性体温調節の仕組み<sup>10)</sup> (田村, 1981)



腕における対向流熱交換 (Bullard, 1966)



衣や住によって  
 如何に範囲を  
 拡張するか！

## (2)放 熱

人も自然界においては1個の熱源体である。

しかし、着衣により放熱制御が可能。

①伝導

②対流

③放射（輻射）

④蒸発

4つの物理的法則に従って  
熱が移動する

# (1) 伝導(Conduction)

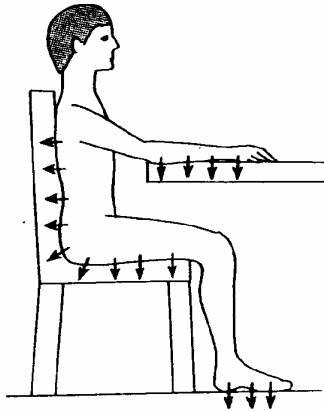


図43 伝導による放熱

物質中を物質移動を伴わずに高温部から低温部に熱が伝わる現象

伝導放熱

皮膚温は伝導と循環によって決定する

$$Q_k = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (t_s - t_o)$$

熱伝達係数  
(熱コンダクタンス)

$Q_k$ : 伝導放熱量 (W)  
 $\lambda$ : 布の熱伝導率(W/(m·k))  
 $d$ : 布の厚さ(m)  
 $t_s$ : 皮膚温(k)  
 $t_o$ : 布の表面温度(k)  
 $A$ : 有効面積(m<sup>2</sup>)

人体深部→身体表面  
→衣服(布)→接触物体



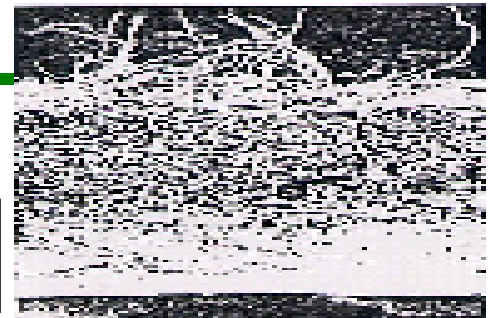
表 7-1 各種物質の熱伝導率

物質名	測定温度 K	熱伝導率 $\lambda$ W/(m·K)
銅	293	372.1
コンクリート	293	0.81~1.40
皮革	293	0.163
木材 (ひのき)	303	0.15
水	293	0.602
空気	293	0.026
絹繊維*	—	0.155
綿繊維*	—	0.243
毛繊維*	—	0.165
ポリエステル繊維*	—	0.157
絹織物	—	0.028
綿編物	—	0.059
毛編物	—	0.044

\*繊維軸に垂直方向の熱伝導率  
衣生活の科学 (2002)<sup>6)</sup> および藤本・関  
(1989)<sup>7)</sup> より作成

材料グループ	試料数	体積分率 %	
		平均値	標準偏差
毛皮	7	5.10	0.69
フェイクファー	5	1.67	0.20
ダウン	2	1.36	—
新素材防寒材料	2	7.69	—
天然皮革	5	27.0	3.19
合成皮革	10	19.4	3.26
梳毛織物	34	18.2	8.01
紡毛織物	11	11.9	2.88
綿織物	24	17.8	5.18
化繊織物	20	23.9	7.06
毛編物	19	15.9	5.63
綿編物	1	12.6	—
化繊編物	4	18.2	5.94
混紡布	1	15.2	—
絹織物	1	27.2	—

(藤本, 関 1985)



布の厚さ $d$  は、測定時の圧力に依存

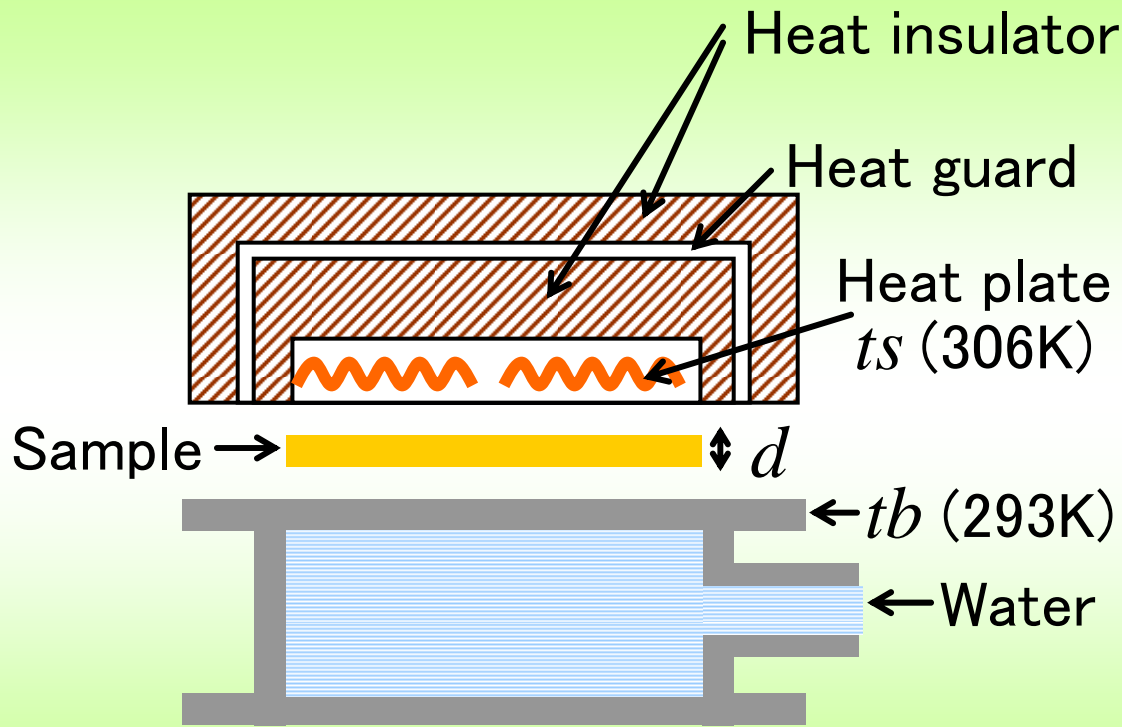
表 5.2 単繊維の熱伝導率<sup>30)</sup>

繊維名	熱伝導率 W/m·K		$\frac{K_L}{K_T}$
	繊維軸方向 $K_L$	繊維軸垂直 方向 $K_T$	
カーボン繊維	7.948	0.662	12.00
アラミド繊維 (Kevlar49)	4.334	0.104	41.67
綿	2.879	0.243	11.85
麻	2.831	0.344	8.23
ガラス繊維 (E-glass)	2.250	0.509	4.42
レーヨンフィラメント	1.895	—	—
絹	1.492	0.118	12.64
ナイロン	1.433	0.171	8.38
レーヨンステーブル	1.414	0.237	5.97
ポリエステルフィラメント	1.257	0.157	8.01
ポリプロピレン (Pilen)	1.241	0.111	11.18
ポリエステルステーブル	1.175	0.127	9.25
アクリル (Xlan)	1.020	0.172	5.93
毛	0.480	0.165	2.91

繊維両端温度 35℃, 25℃ にて測定. (川崎, 1986)

# 見かけの熱伝導率の測定

- ◆ 測定機器： サーモラボ II (カトーテック製)
- ◆ 測定条件： 293K, 65%RHの環境下で測定



- ◆ Apparent conductivity

$$\lambda_d = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (t_s - t_b)}$$

- ◆ Thermal conductance

$$C_d = \frac{\lambda_d}{d}$$

$A: 25\text{cm}^2$

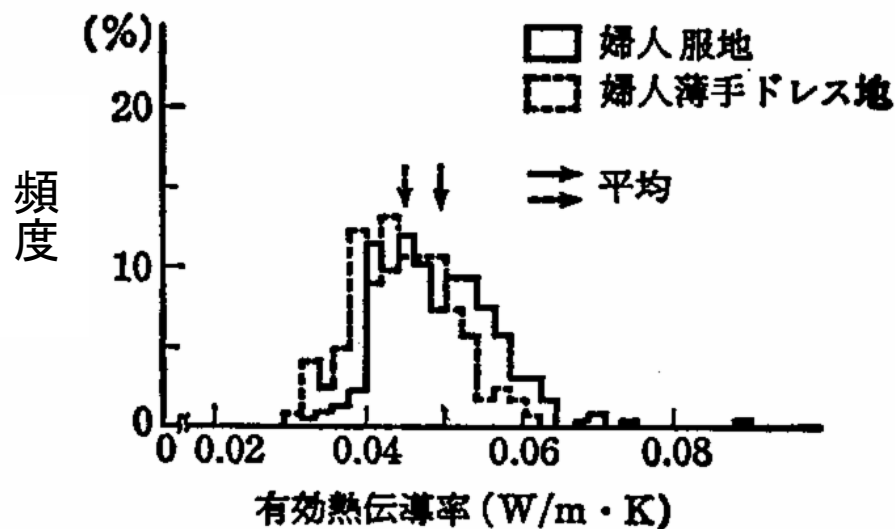
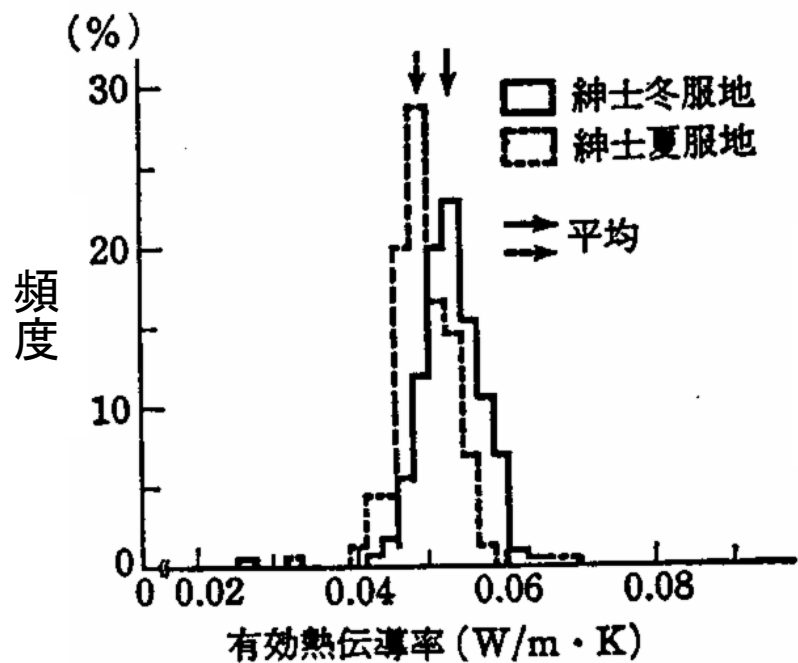
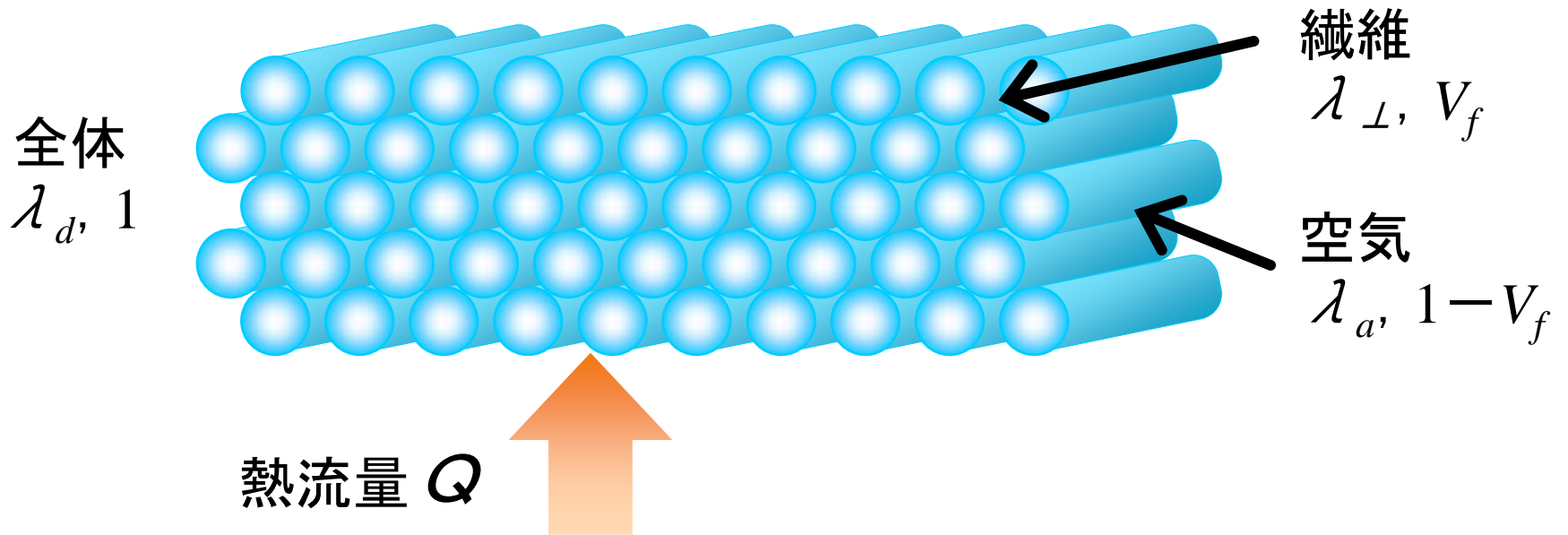


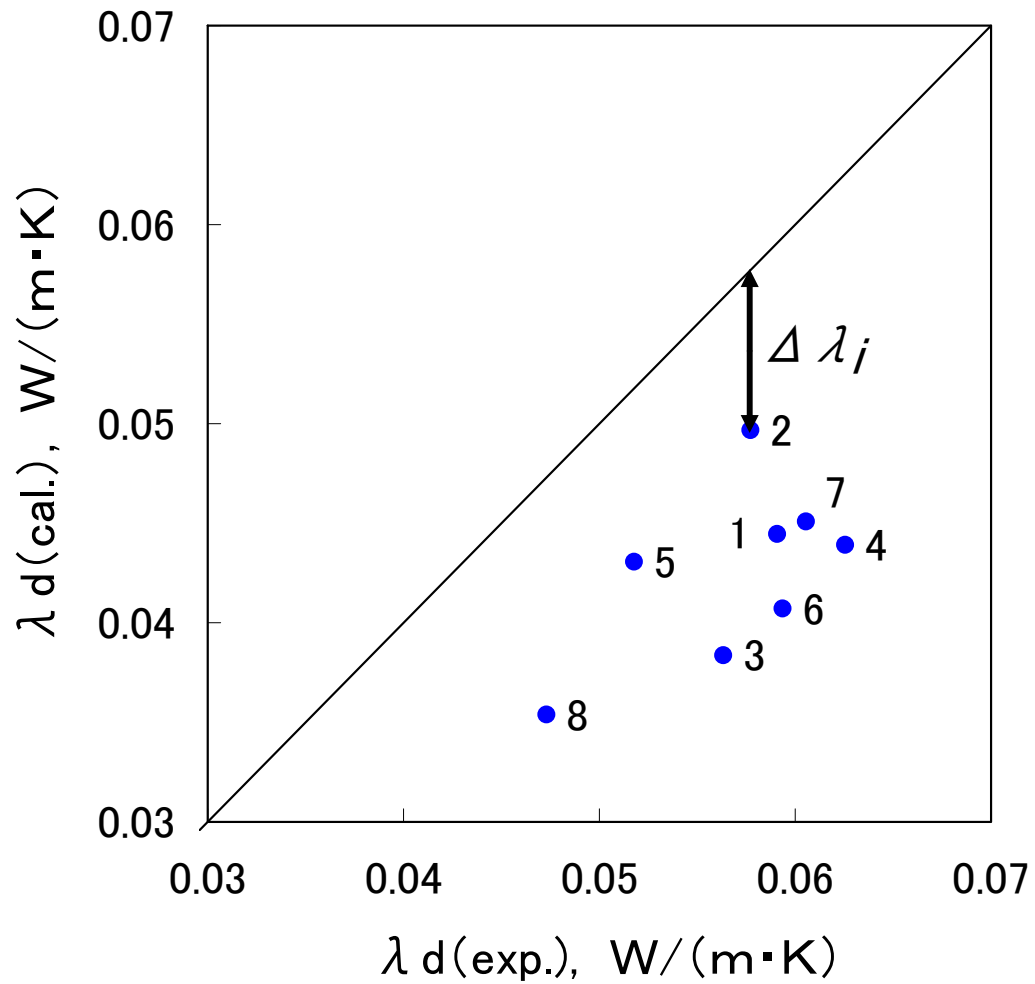
図 31 各種布地の有効熱伝導率の分布 (妹尾・米田・丹羽, 1985 a)

# 一軸配向繊維集合体モデルを用いた $\lambda_d$ の算出



$$\lambda_d (\text{cal.}) = \lambda_a \cdot \frac{1 + \frac{m-1}{m+1} V_f}{1 - \frac{m-1}{m+1} V_f} \quad \text{---} \quad \text{①}$$

where,  $m \equiv \lambda_{\perp} / \lambda_a$ ,  $V_f$ : partial volume of fiber

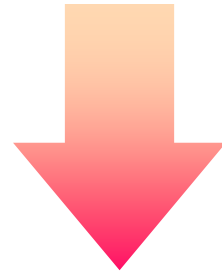


Calculated values  $\lambda d'(\text{cal.})$   
vs experimental values  $\lambda d(\text{exp.})$

布の厚さ

繊維の水分率

$$\Delta \lambda = 0.0601T + 0.0767 (r_{75} / 100) - 0.0177$$



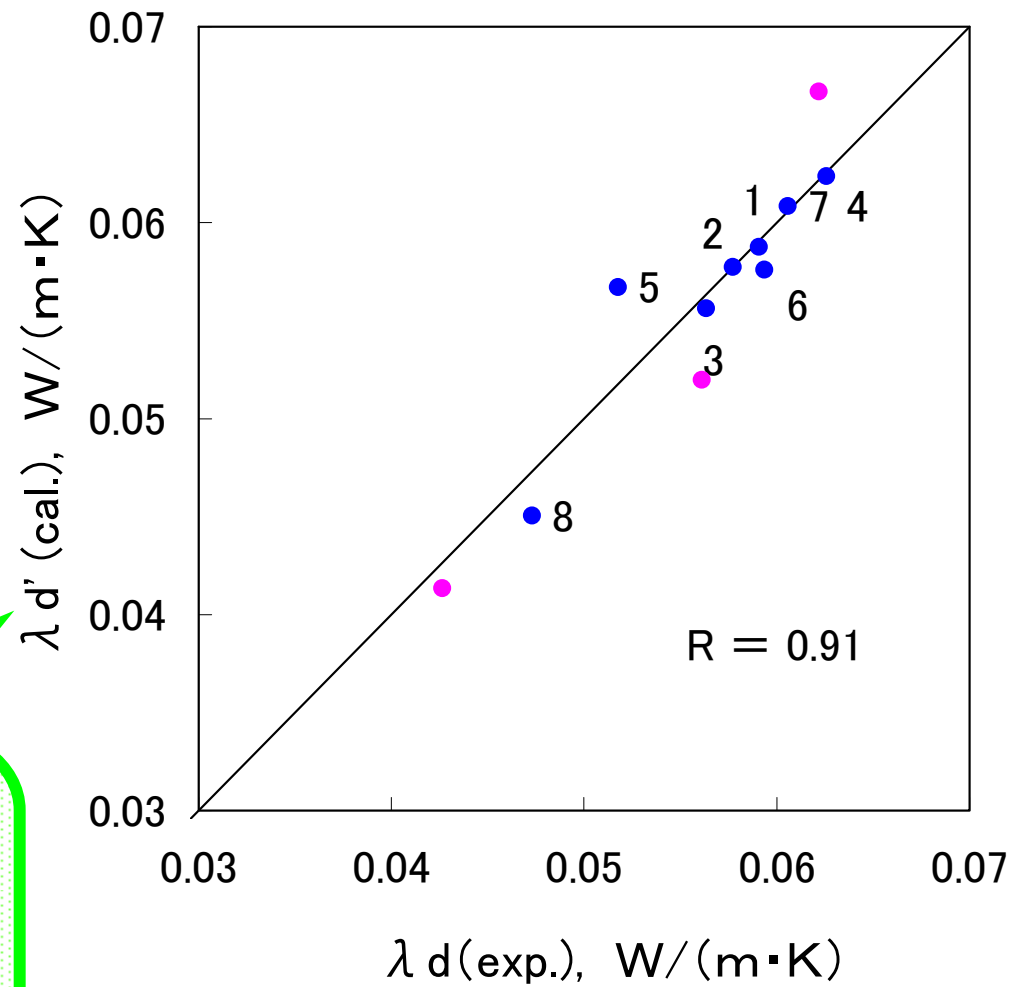
$$(R = 0.86^*) \quad \text{---} \quad \textcircled{2}$$

$$\lambda d'(cal.) = \lambda a \cdot \frac{1 + \frac{m-1}{m+1} V_f}{1 - \frac{m-1}{m+1} V_f} + \Delta \lambda$$

where,  $m = \lambda_{\perp} / \lambda_a$ ,  $V_f$ : partial volume of fiber

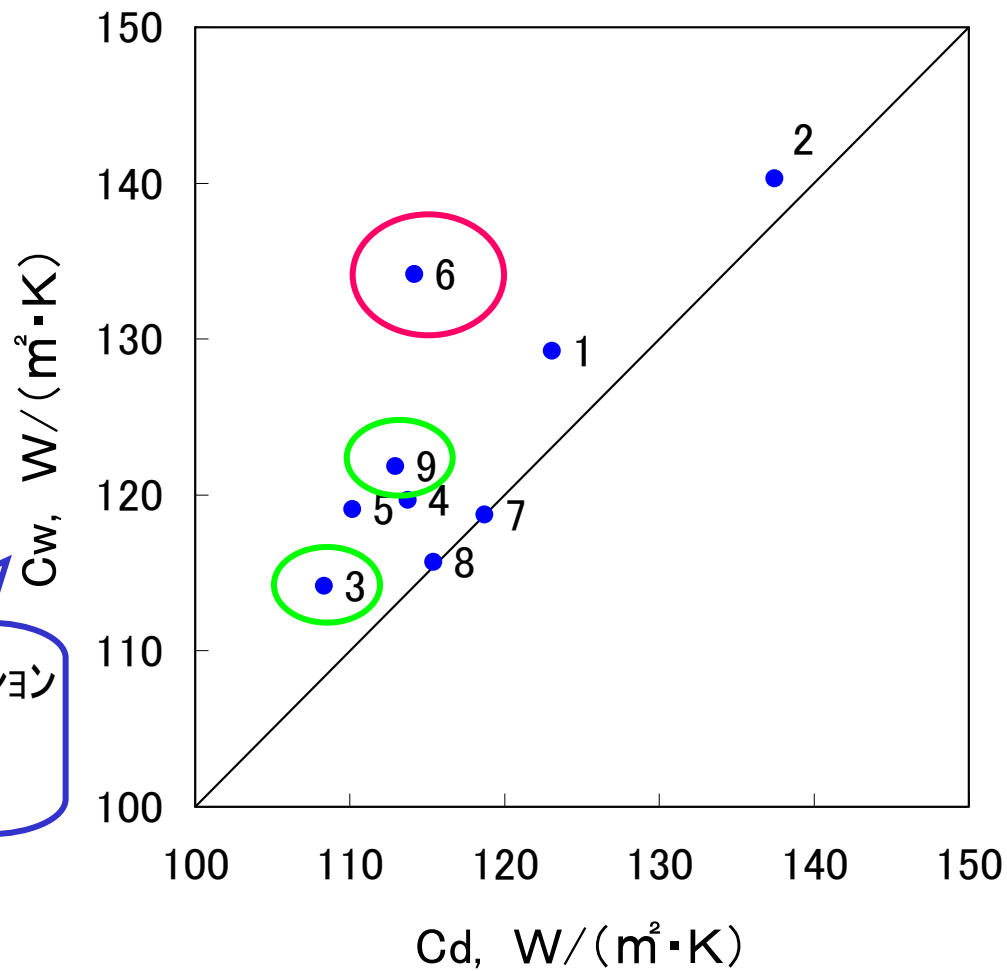


- 繊維の熱伝導率
- 繊維の体積分率
- 布の厚さ
- 繊維の吸湿性

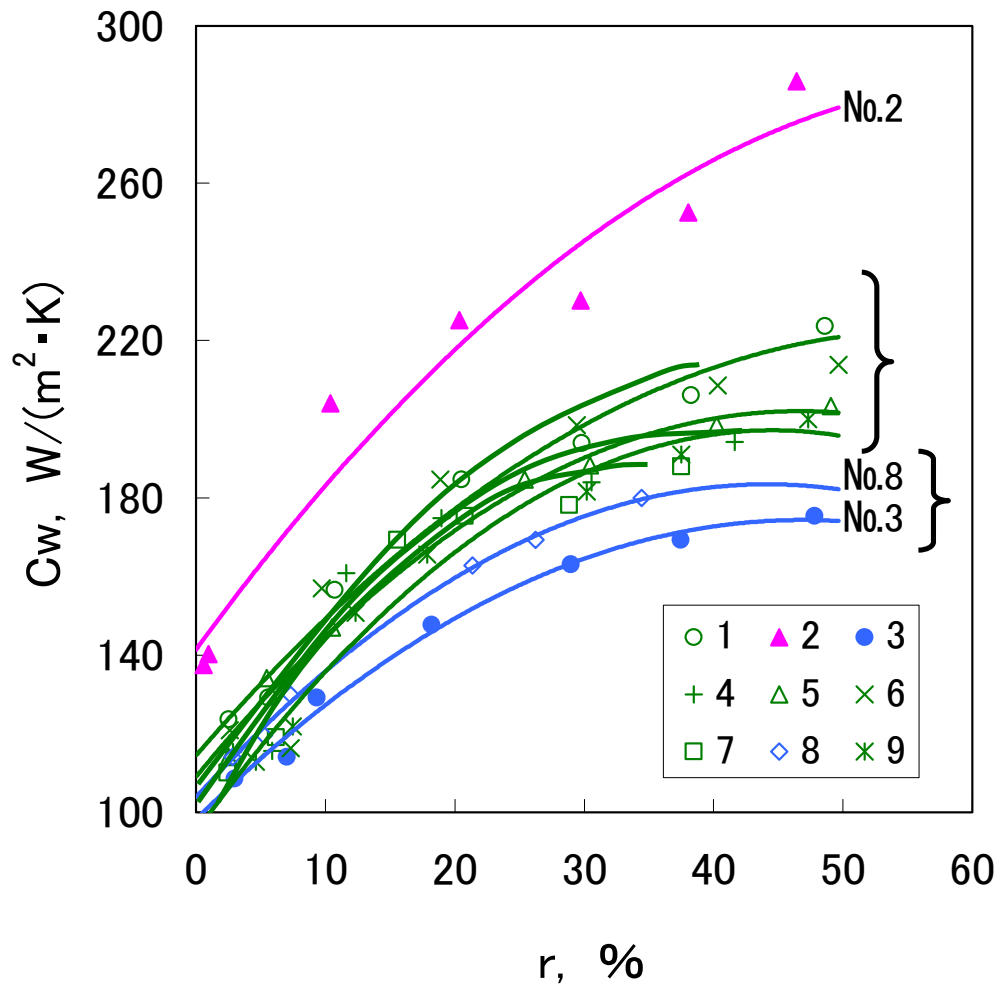


Theoretical values  $\lambda d'$  (cal.)  
vs experimental values  $\lambda d$  (exp.)

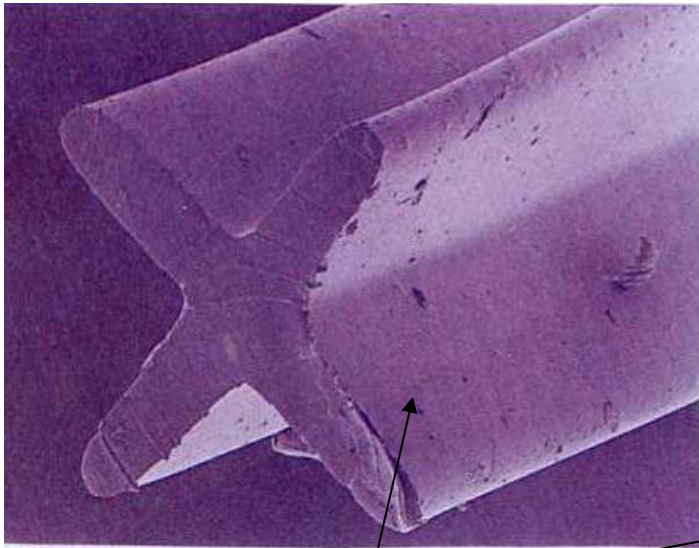
不感蒸泄をシミュレーション  
293K, 93.2%RH  
霧囲気内で調湿



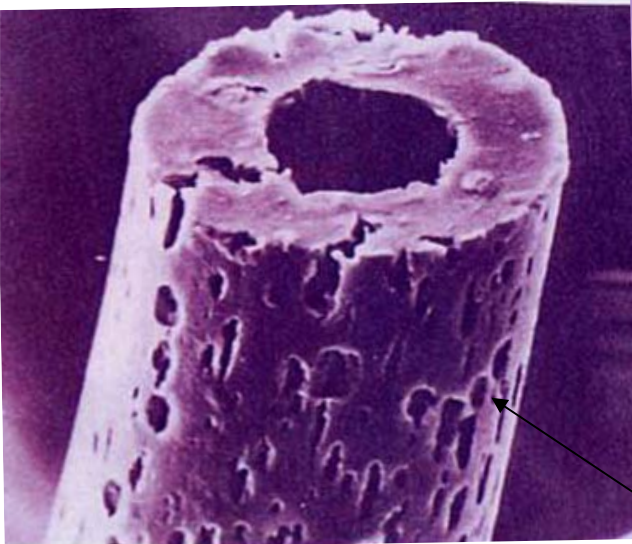
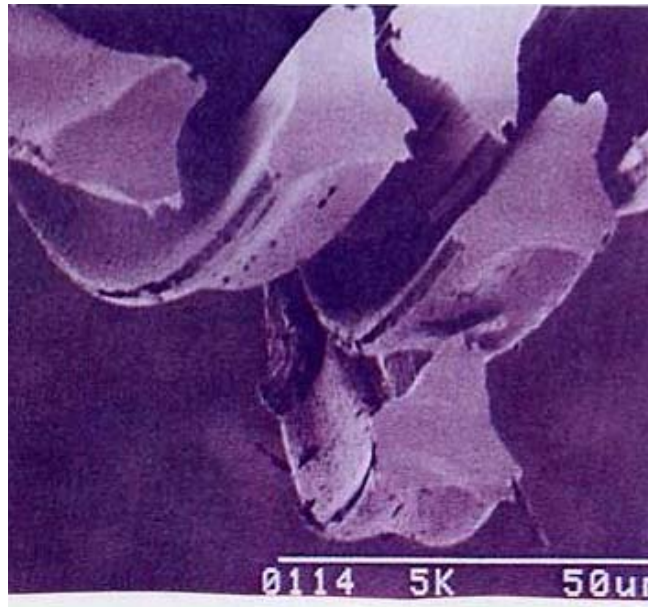
$C_d$  vs  $C_w$  ( conditioning at 93.2% )  
in dry and wet conditions, respectively.



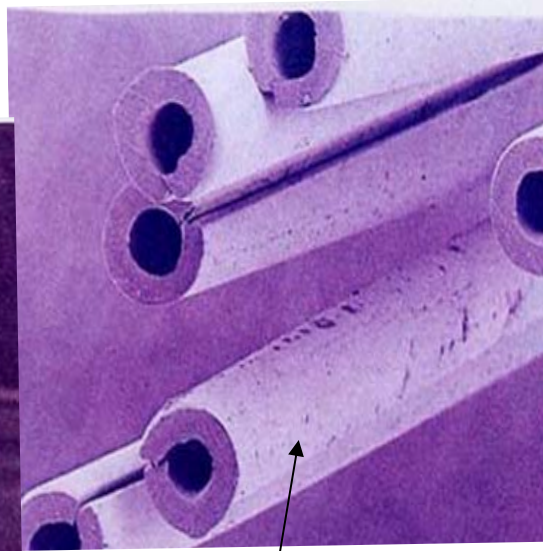
Relation between  $C_w$   
and moisture regain  $r$



異型断面繊維



中空繊維



ランダム化

## 自然対流

## 強制対流

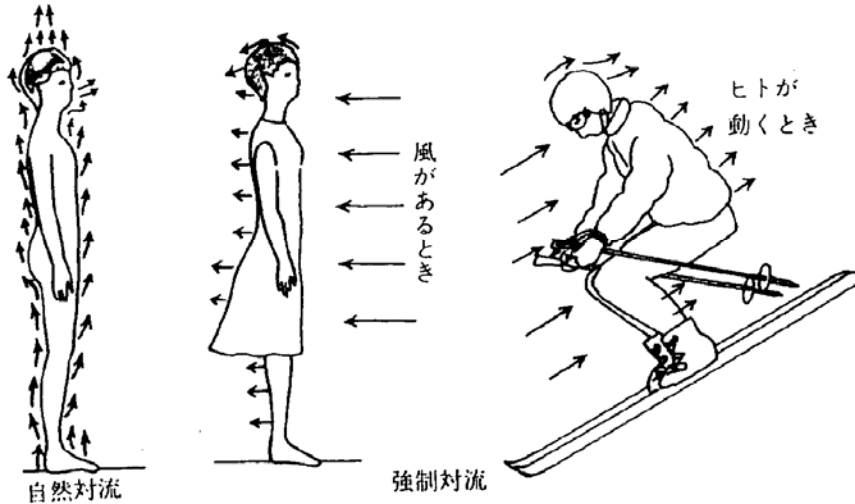


図44 対流による放熱

## (2) 対流放熱 (Convection)

液体や気体のような流体の移動に伴う熱移動

$$C = hc \cdot \sqrt{v} \cdot (\bar{t}_s - t_a) \cdot A$$

布の表面形状による変化

姿勢・着衣による変化

$Q_c$ : 放射放熱量 (W)

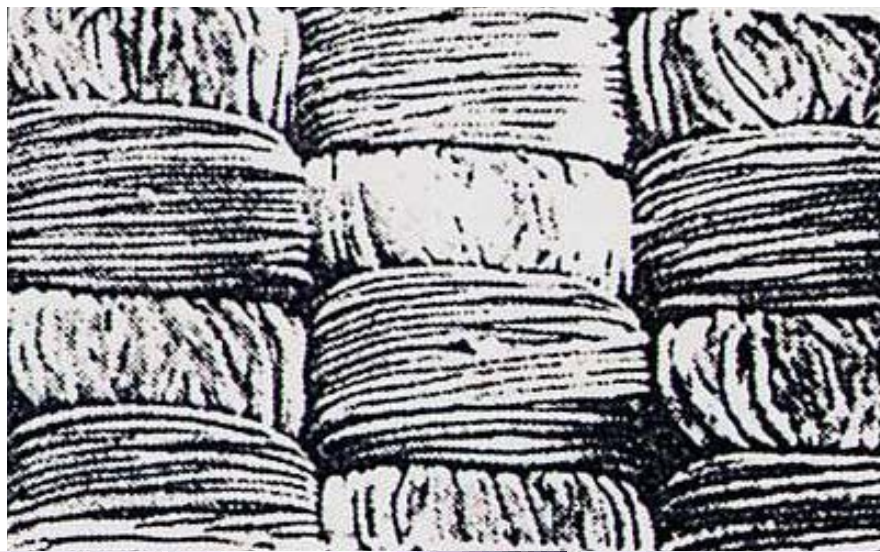
$hc$ : 対流熱伝達率 (W/(m·k))

$\bar{t}_s$ : 平均皮膚温 (k) / 布の表面温

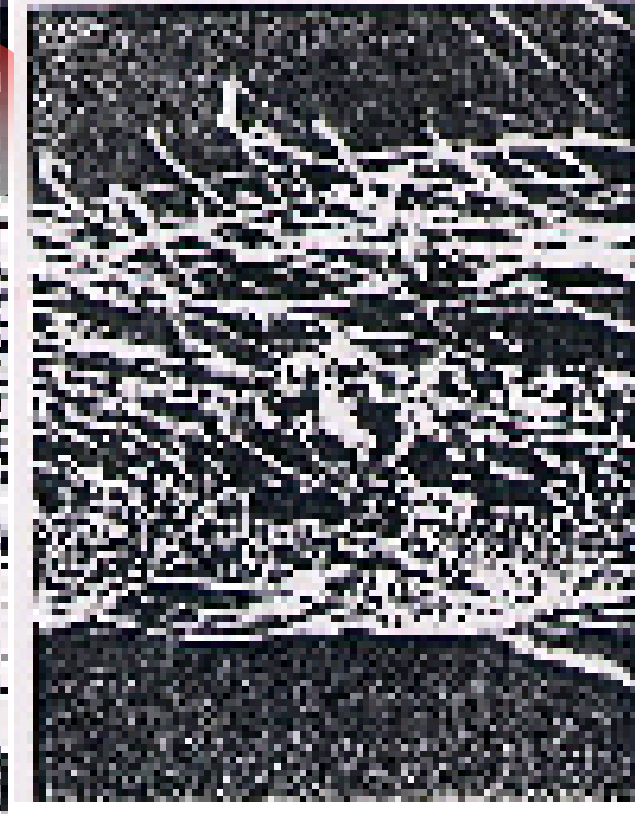
$t_a$ : 気温 (k)

$A$ : 有効面積 (m<sup>2</sup>)

$v$ : 風速 (m·s)



静止空気層の厚さをどう見積もるか？  
表面形状が定量化できるか！



### (3) 放射放熱 (Radiation)

物質からその温度に相当した電磁波が放出され、  
他の物質に吸収される現象

$$Q_r = s \sigma A (\bar{t}_S^4 - \bar{t}_w^4) \\ = hr \cdot A (\bar{t}_S - \bar{t}_r)$$

姿勢・着衣による変化

$Q_r$ : 放射放熱量(W)

$s$ : 皮膚の放射率(≒1.0) / 布の放射率

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数

$5.68 \times 10^{-8} (\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k}))$

$\bar{t}_S$ : 平均皮膚温 / 布の表面温(k)

$\bar{t}_w$ : 周囲物体の平均温度(k)

$\bar{t}_r$ : 周囲物体の平均放射温度(k)

$hr$ : 放射熱伝達率

$A$ : 有効面積( $\text{m}^2$ )

## (4) 蒸発放熱 (Evaporation)

水分が蒸発する際に熱が奪われる現象

$$Q_e = 2.43E$$

$Q_e$  : 蒸発放熱量(W)

2.43 : 33°Cにおける蒸発潜熱(kJ/g)

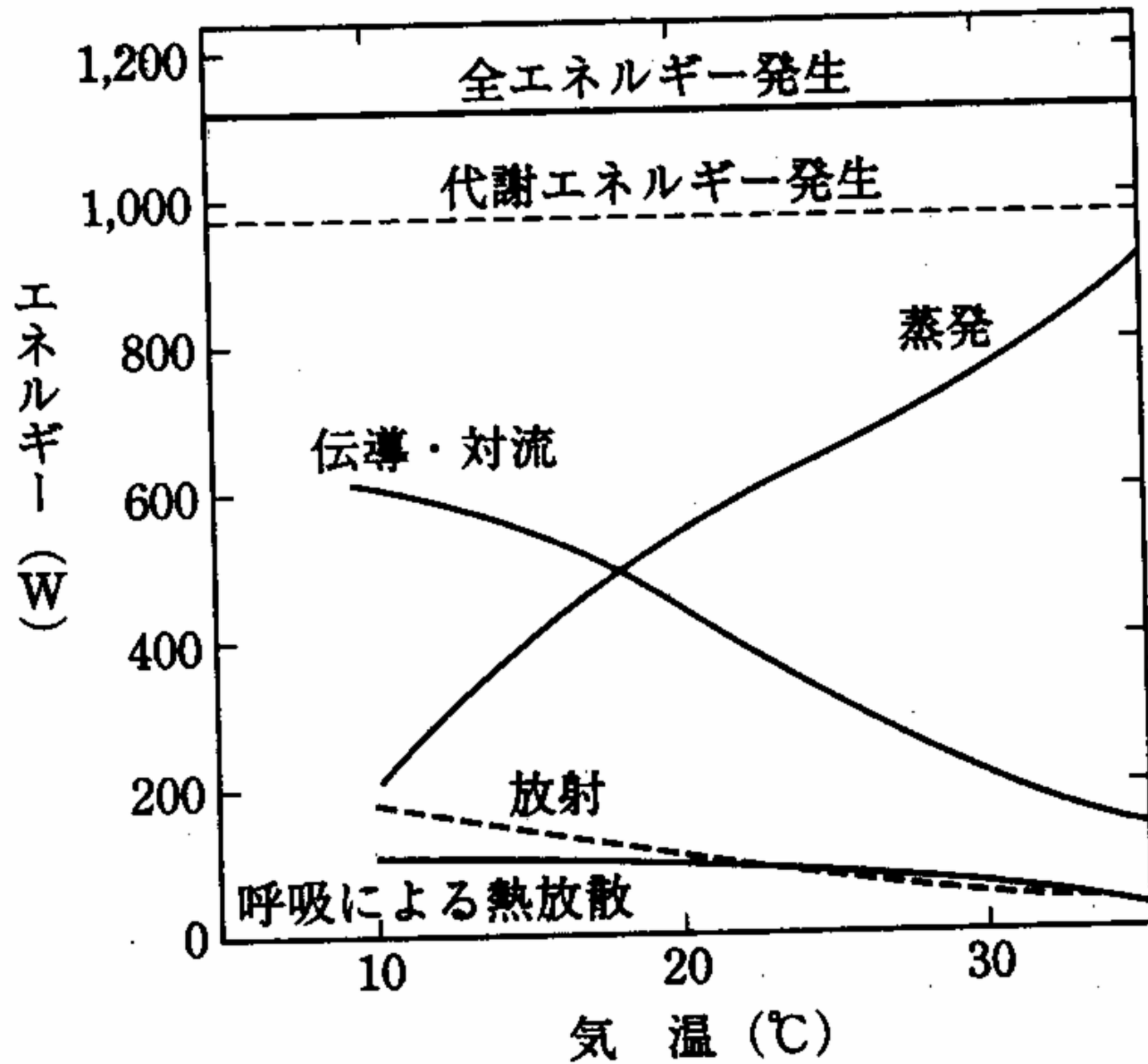
$E$  : 蒸発水分量(g/h)

$E \neq$  汗量

有効汗量と  
無効汗量

皮膚表面と衣服内の水蒸気圧差  
及び  
衣服内と環境の水蒸気圧差に依存

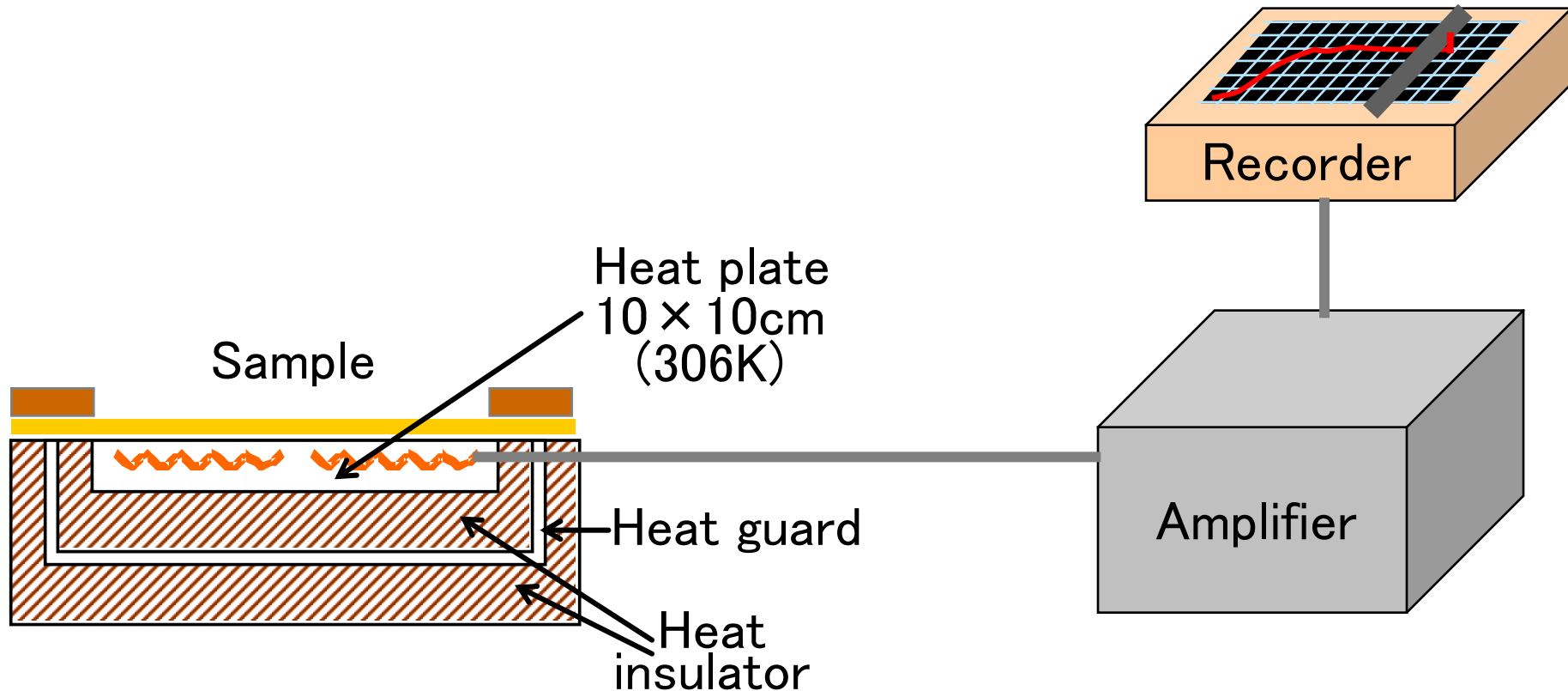




(中山, 1981)

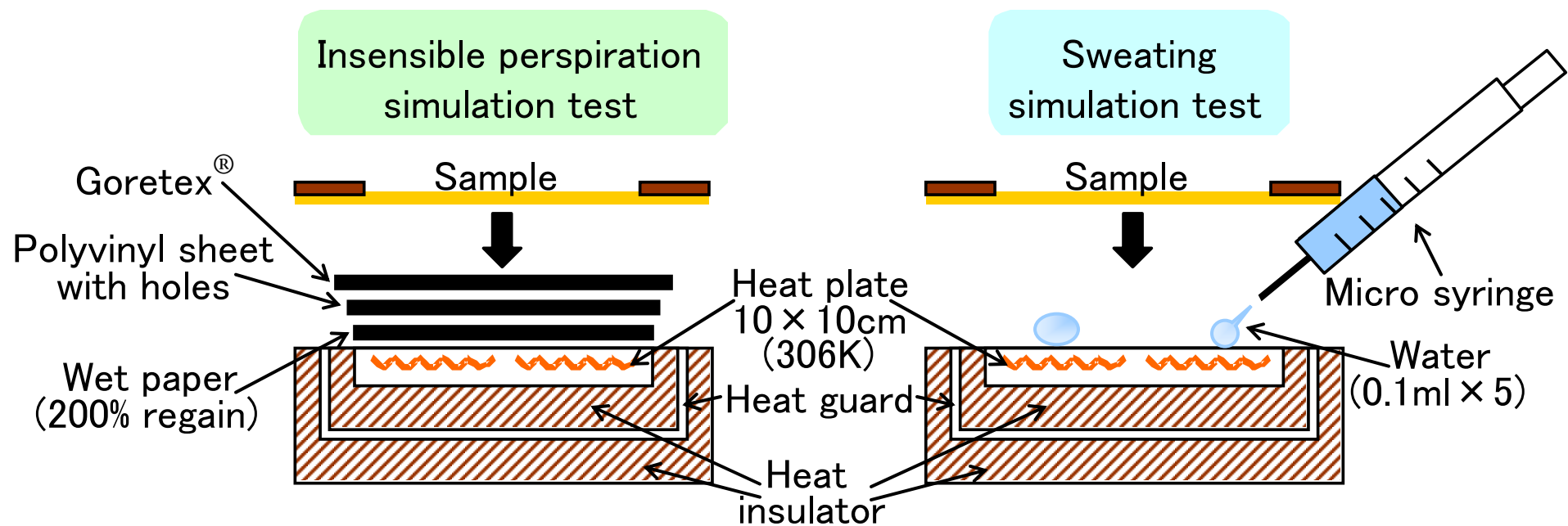
# 乾熱損失量(保温性)の測定

- ◆測定機器：サーモラボⅡ(カトーテック製)
- ◆測定条件：293K, 65%RHの環境下で測定
- ◆測定項目：乾熱損失量( $H_d$ ) Dry heat loss



# 不感蒸泄時・発汗時の熱損失量の測定

- ◆測定機器： サーモラボⅡ（カトーテック製）
- ◆測定条件： 293K, 65%RHの環境下で測定
- ◆測定項目： 湿熱損失量( $H_{wn}$ ,  $H_{ws}$ ) Wet heat loss

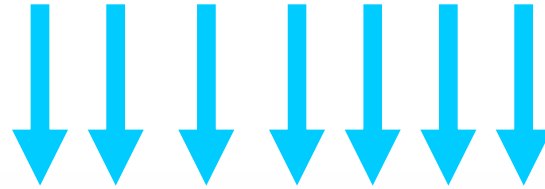


$$H_{wn} = H_{tn} - H_d'$$

$$H_{ws} = H_{ts} - H_d$$

**Air Velocity**  
0.16m/s, 0.48m/s, 0.83m/s

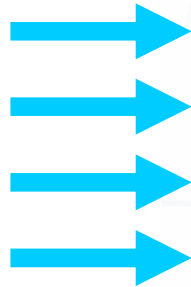
Ta=293K  
Ha=65%RH



Sample

\* Insensible perspiration simulation test

Goretex®



Heat plate  
(306K)

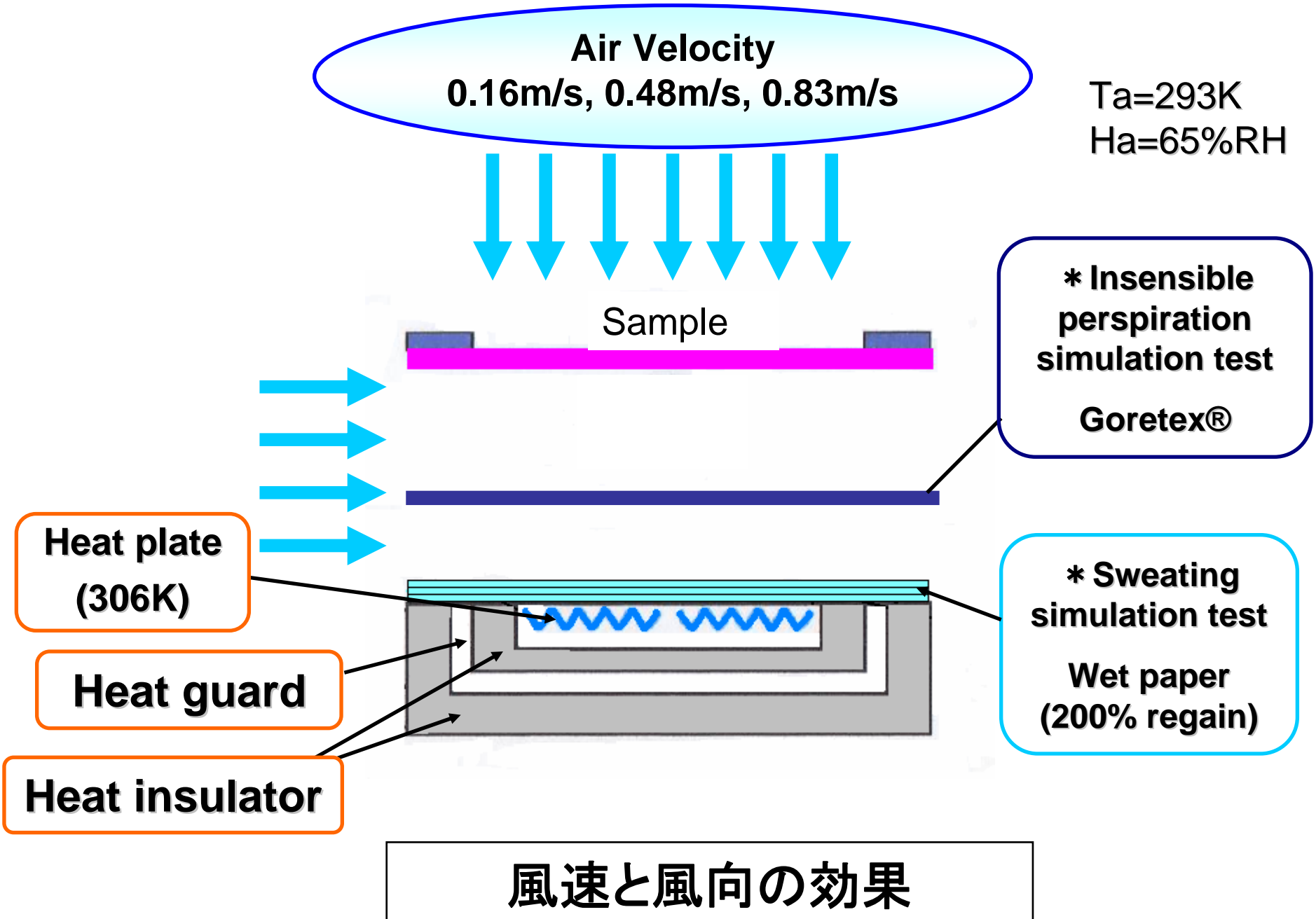
\* Sweating simulation test

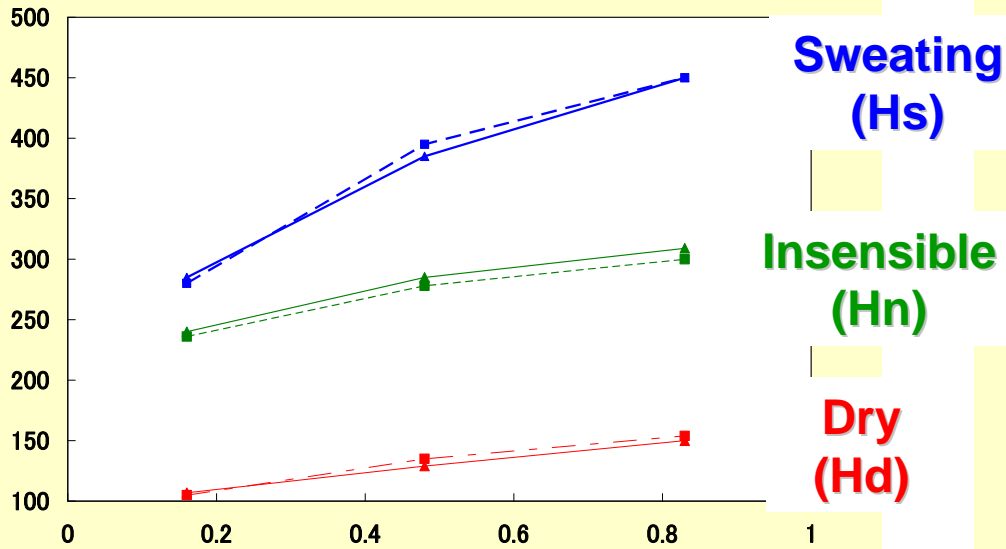
Wet paper  
(200% regain)

Heat guard

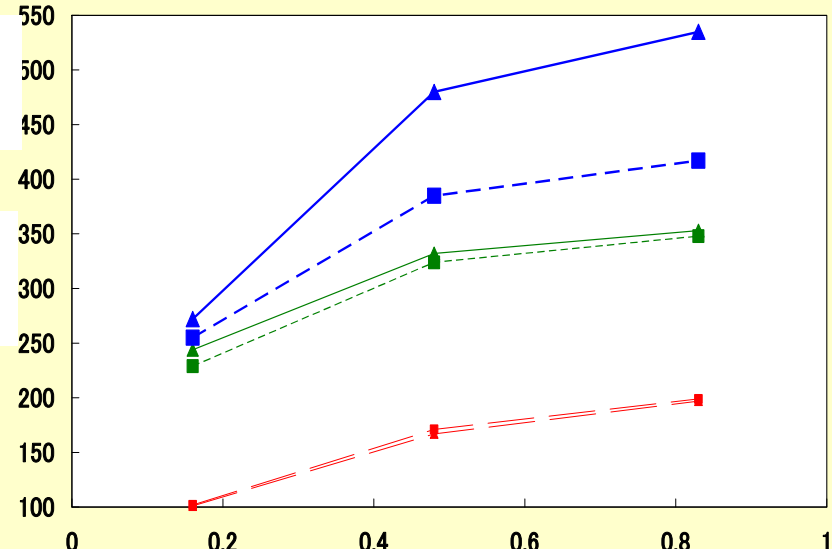
Heat insulator

風速と風向の効果

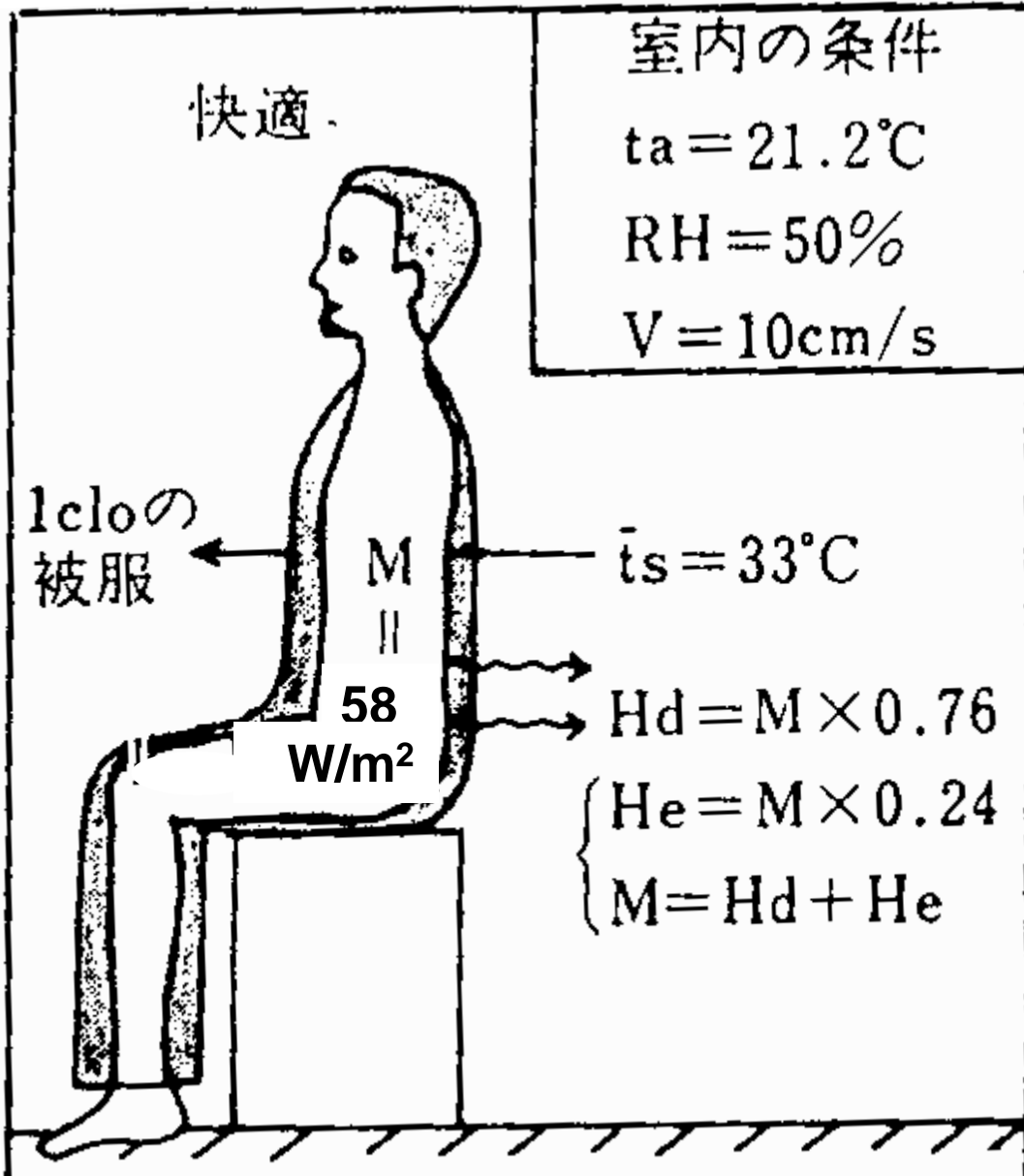




水平方向の風



垂直方向の風



$$M = 58\text{ W/m}^2$$

$$H_d = 58 \times 0.76 = 44.1$$

$$H_d = (\bar{t}_s - t_a) / (R_{cl} + R_a)$$

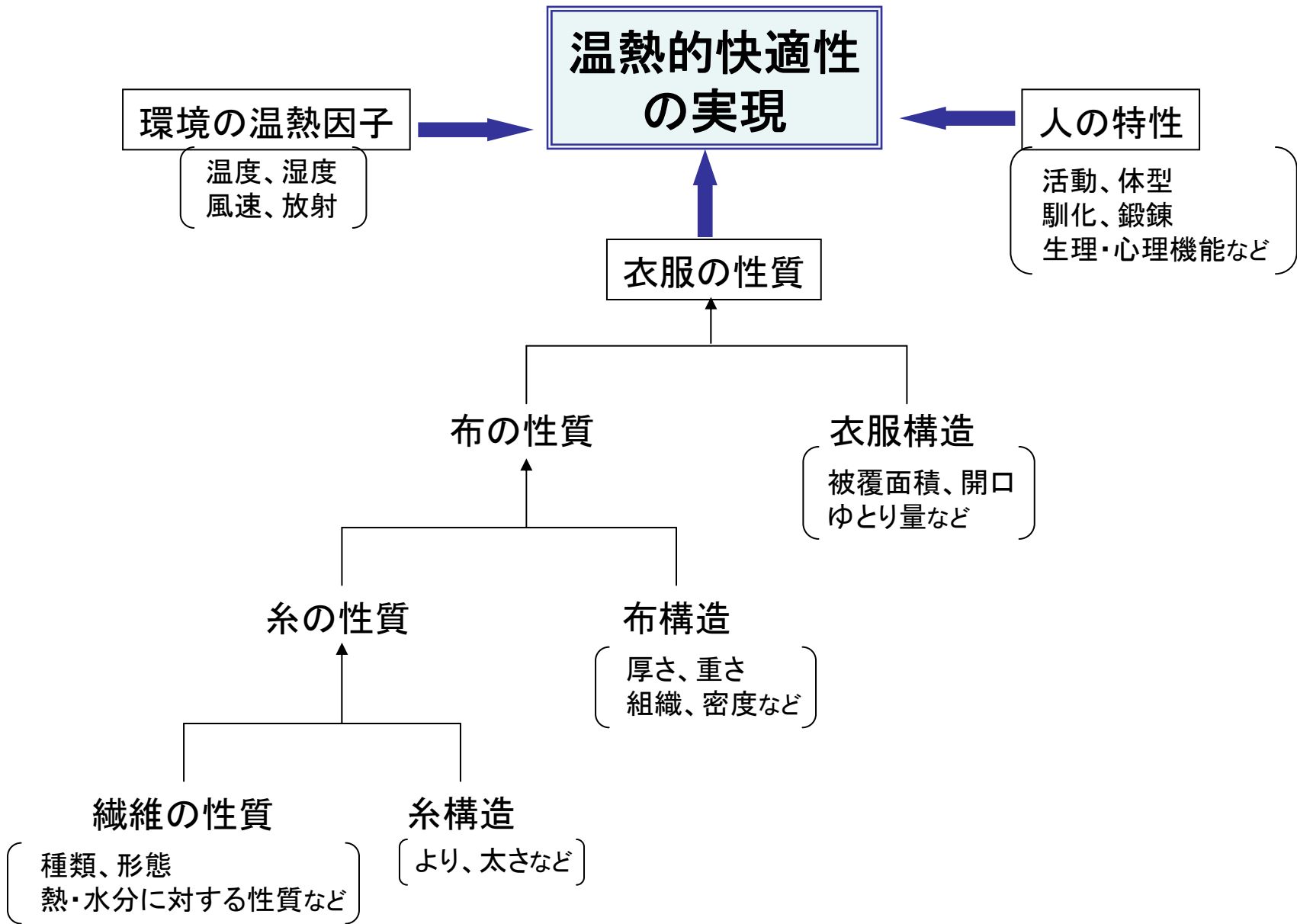
$$R_{cl} = 0.27 - 0.12 = 0.15$$

したがって、

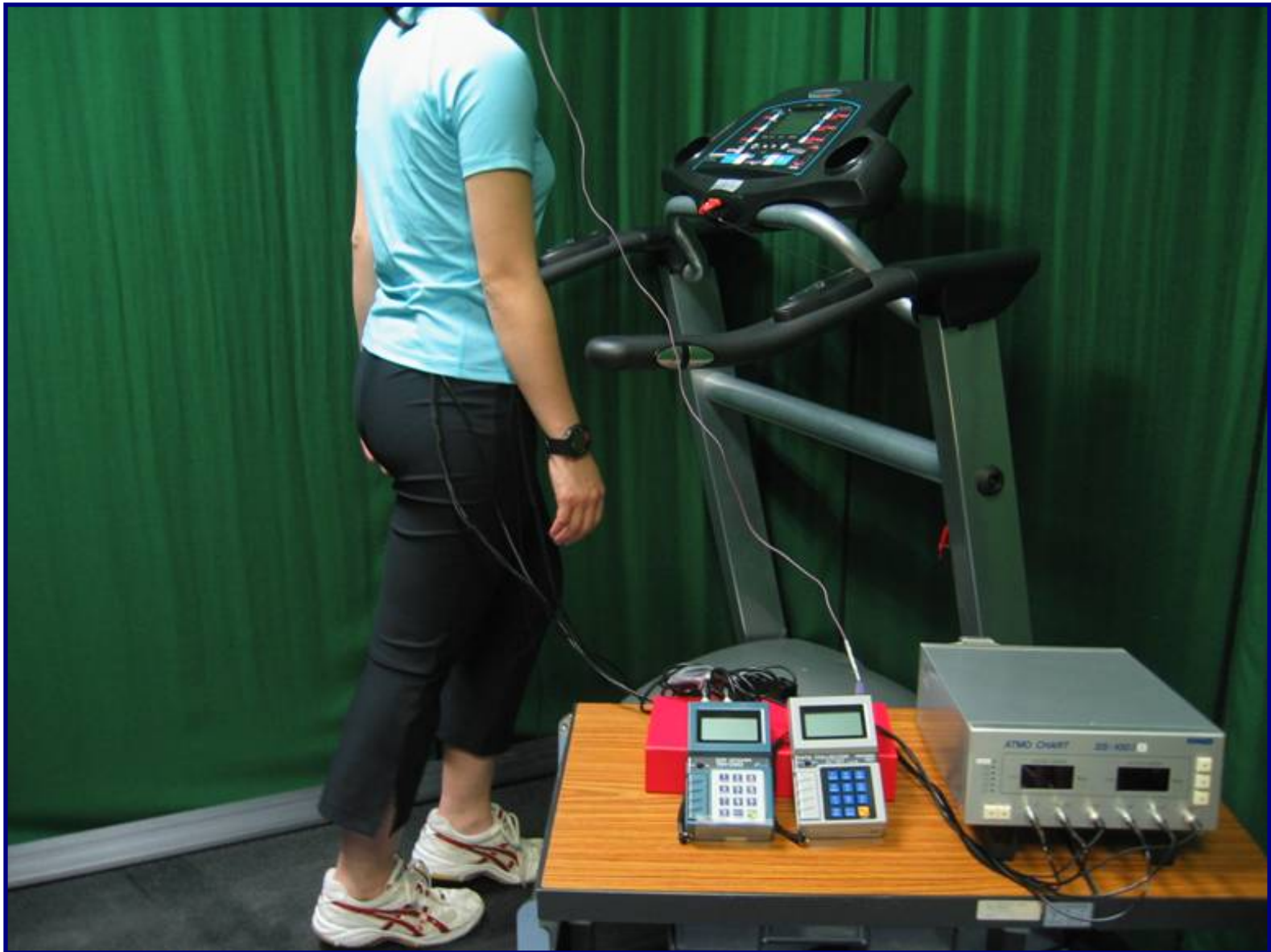
$$1\text{ clo} = 0.15\text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

30°C	0clo
21.2°C	1clo
12.4°C	2clo
3.6°C	3clo

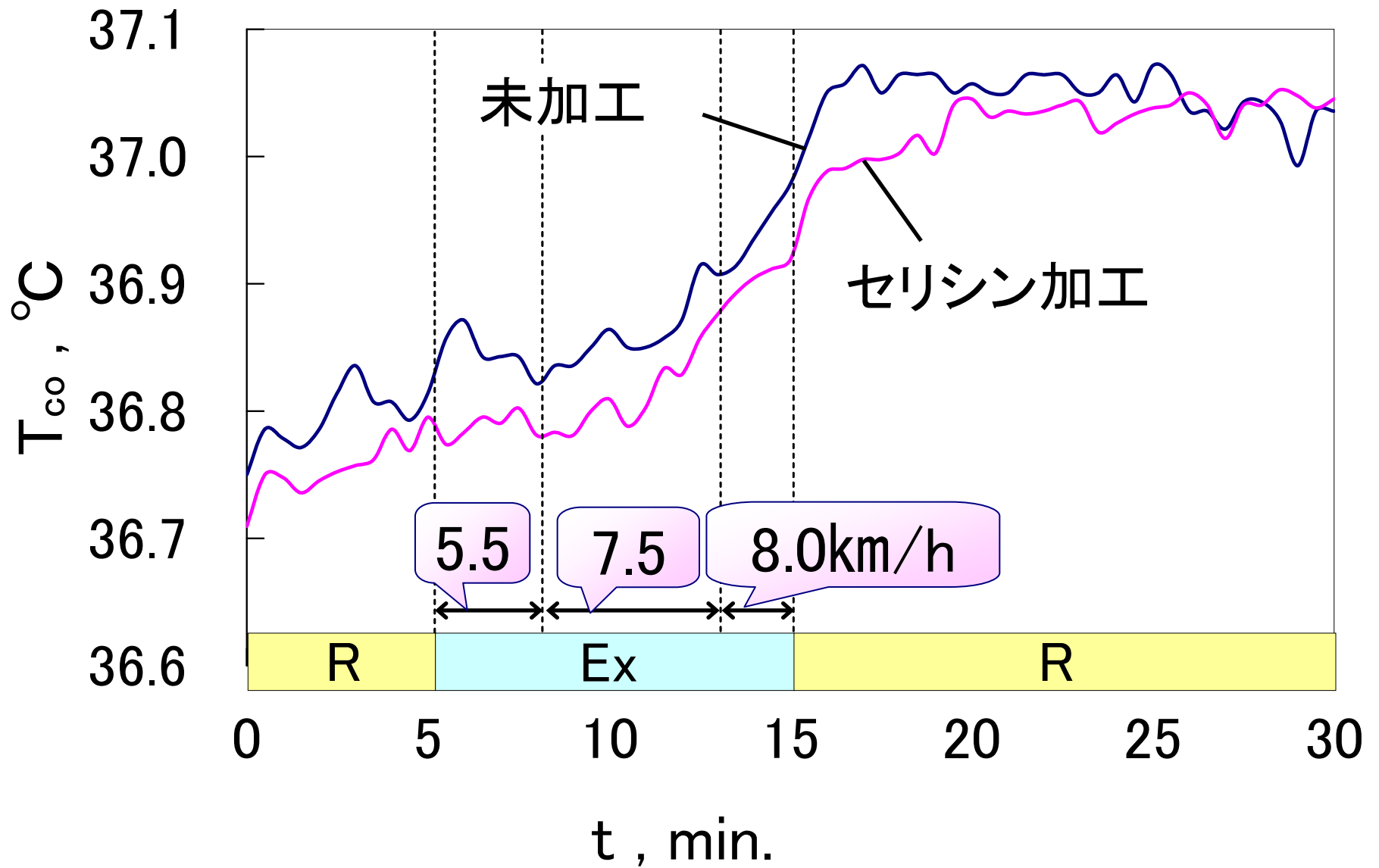
着衣の熱抵抗 (Clo) by Gagge



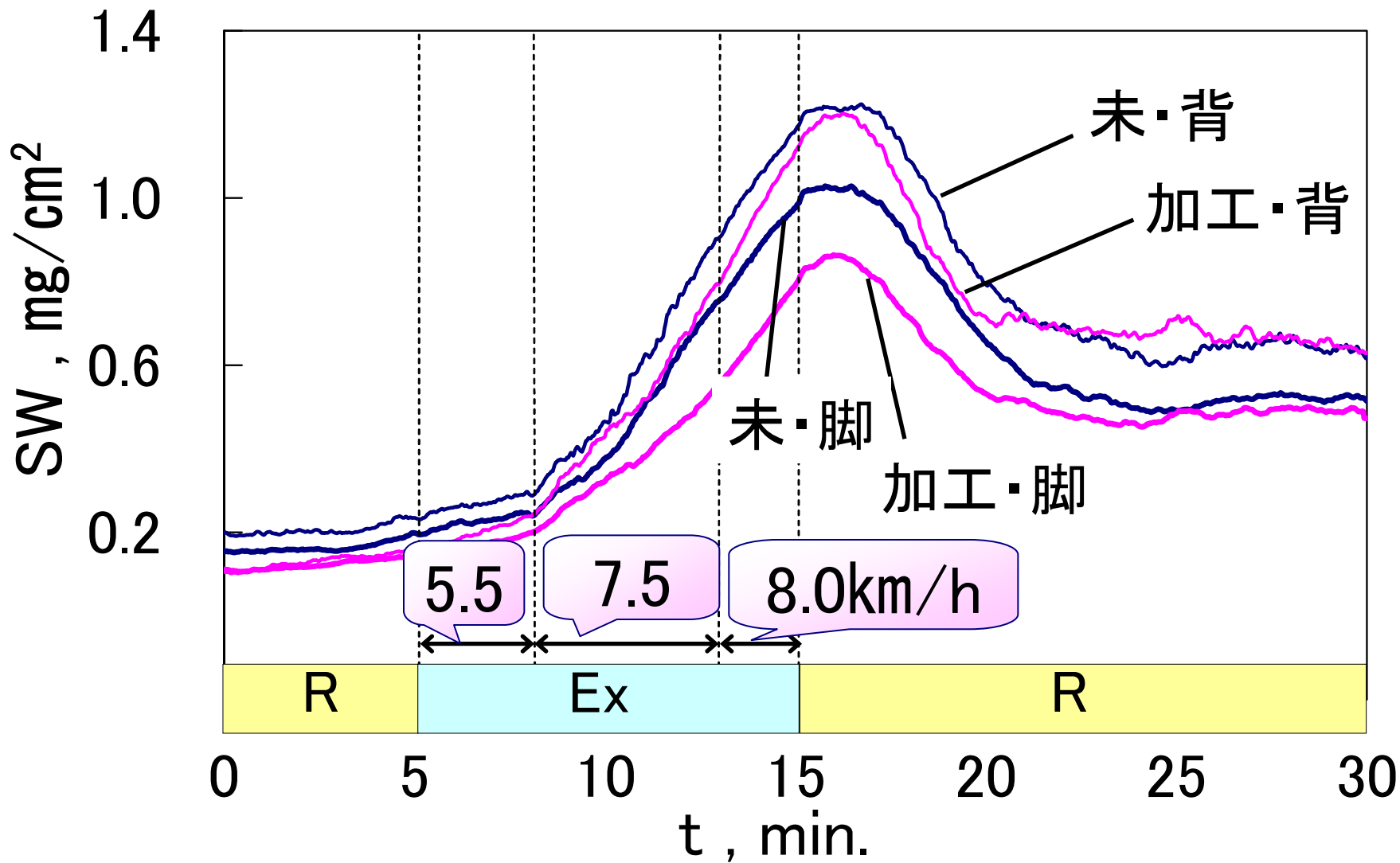
# 衣服の熱・水分特性と生理反応



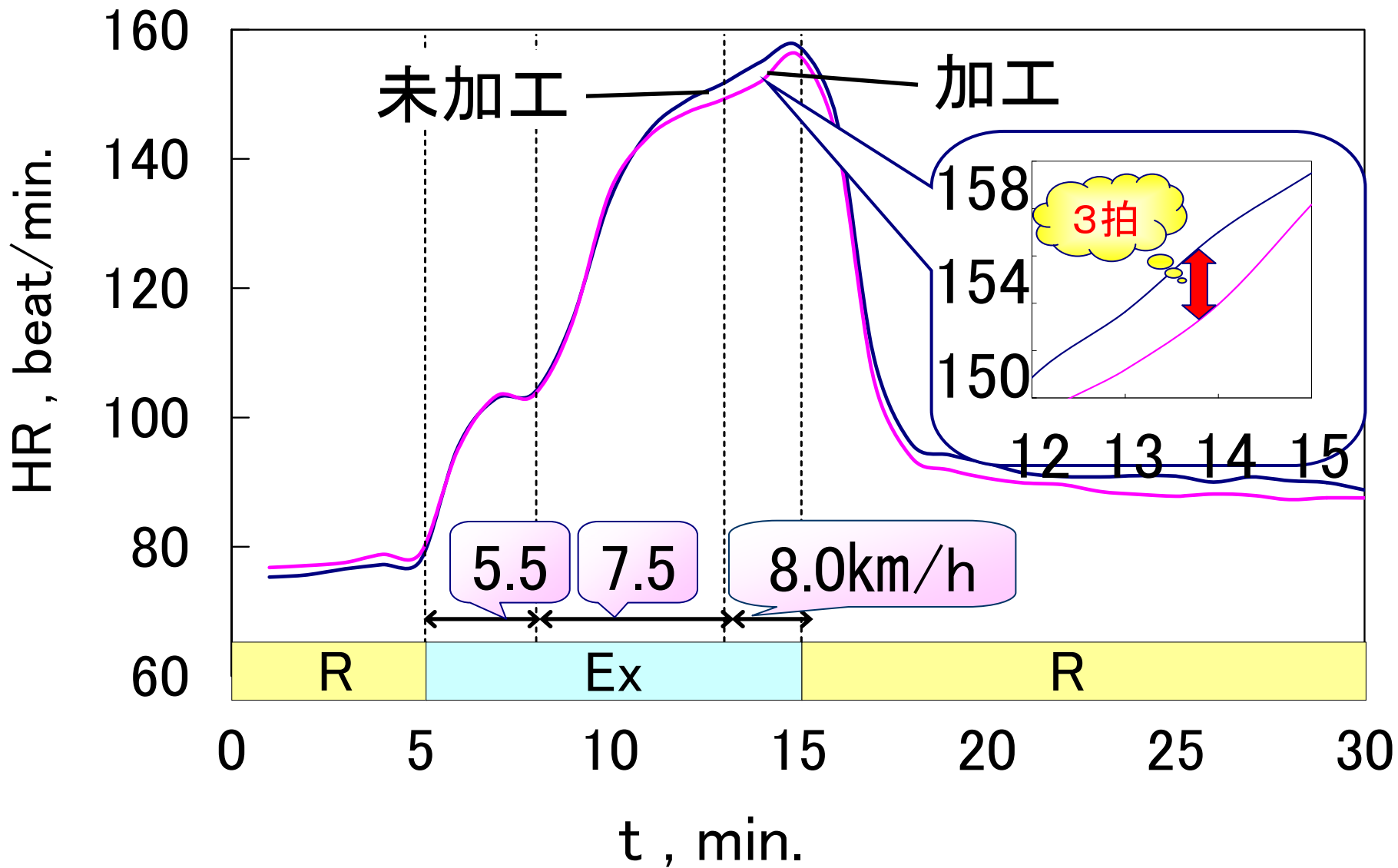




口腔温  $T_{co}$  の変化挙動



発汗量 SW の変化挙動



心拍数 HR の変化挙動

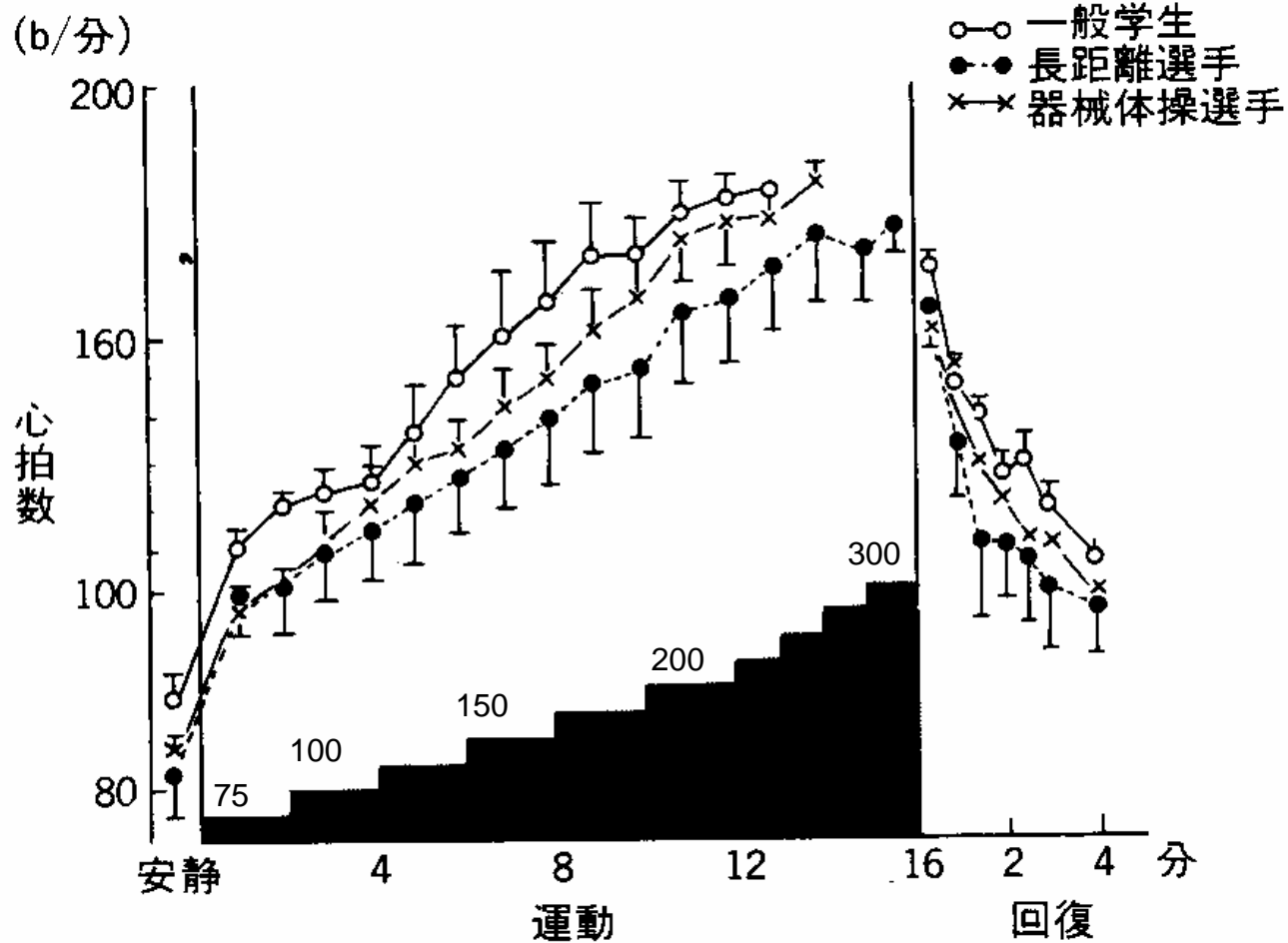
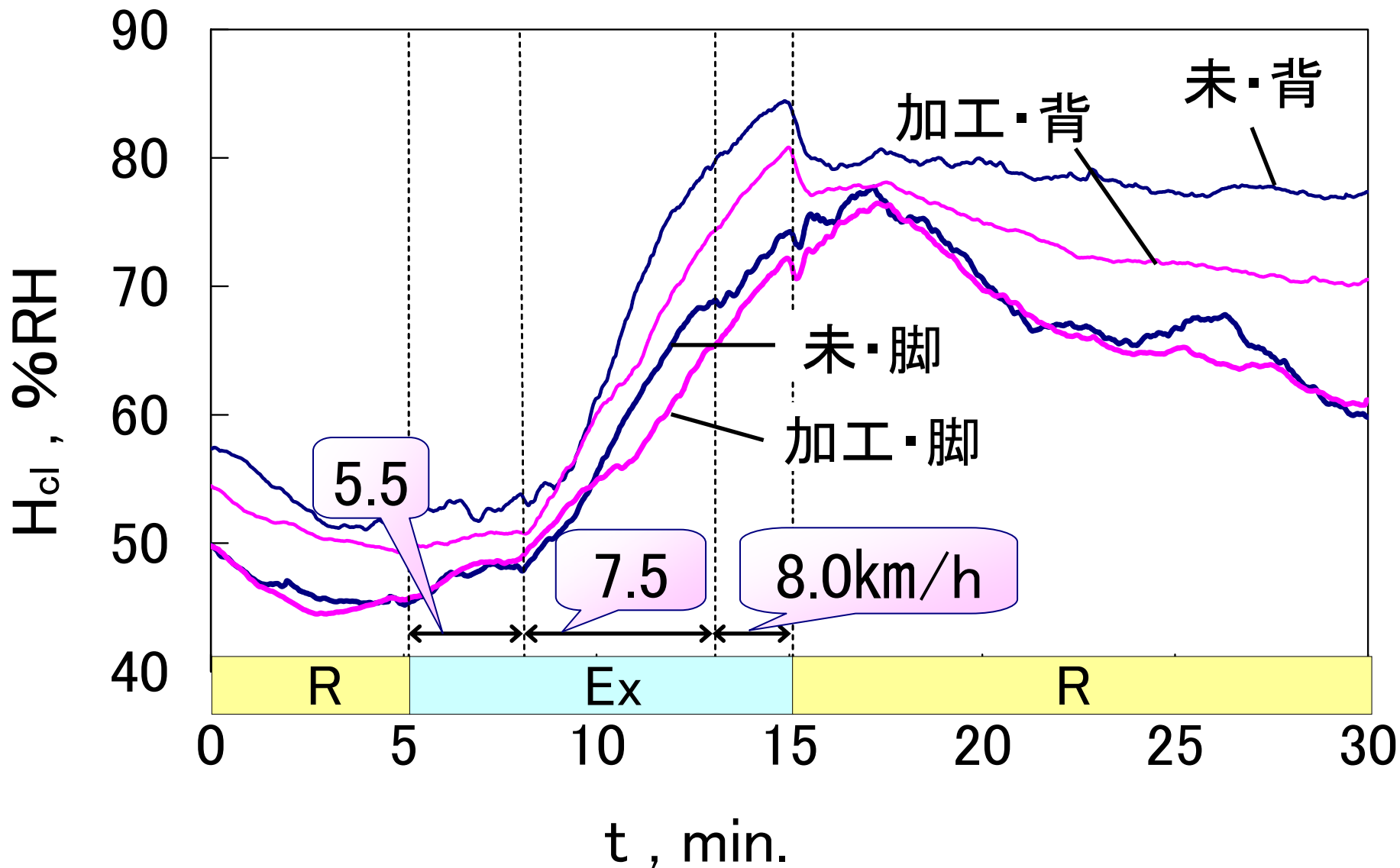


図2 自転車エルゴメーター負荷前・中・後の各被験者群の平均心拍数およびSD  
仕事は、単位がwattで示してある。

(中原凱文：国土館大学体育研究所報，第2巻，pp.47-80，1981)



衣服内湿度 H<sub>cl</sub> の変化挙動

## 加工と未加工の差

Term		$\Delta X = X_R - X_P$						Max. (Time)
Tco		0.04	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	0.02	-0.01	0.09 (6min.)
HR		-1.3	-0.1	<b>1.9</b>	<b>2.6</b>	2.2	2.2	3.5 (21min.)
SW	背	<b>0.07</b>	0.05	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>	-0.03	-0.02	0.11 (13min.)
	脚	0.04	0.05	<b>0.18</b>	<b>0.16</b>	0.05	0.03	0.21 (14min.)
Tcl	背	<b>-0.08</b>	0.01	<b>0.08</b>	-0.07	0.02	0.14	0.21 (11min.)
	脚	-0.02	-0.07	<b>-0.13</b>	-0.06	-0.06	0.00	-0.22 (14min.)
Hcl	背	2.2	1.7	<b>5.1</b>	3.1	<b>5.7</b>	<b>6.7</b>	7.1 (28min.)
	脚	0.4	-0.3	<b>3.8</b>	1.3	<b>2.0</b>	<b>2.1</b>	5.2 (11min.)
Experimental time (min.)		0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	
		Rest	Exercise		Rest			

$X_R$ : 未加工,  $X_P$ : 加工

# 相關分析

	T <sub>co</sub>	SW	HR	T <sub>cl</sub>
運動前	SW	0.158		
	HR	<b>0.734</b> **	0.282 *	
	T <sub>cl</sub>	0.471 **	0.048	0.308 **
	H <sub>cl</sub>	-0.125	-0.072	0.006
運動中	SW	0.268 **		
	HR	0.215 *	<b>0.792</b> **	
	T <sub>cl</sub>	0.408 **	-0.270 **	-0.352 **
	H <sub>cl</sub>	0.143	<b>0.774</b> **	<b>0.817</b> **
回復期	SW	0.327 **		
	HR	0.277 **	0.345 **	
	T <sub>cl</sub>	0.308 **	-0.045	-0.319 **
	H <sub>cl</sub>	0.206 **	<b>0.551</b> **	0.246 **

\*\* : p < 0.01, \* : p < 0.05

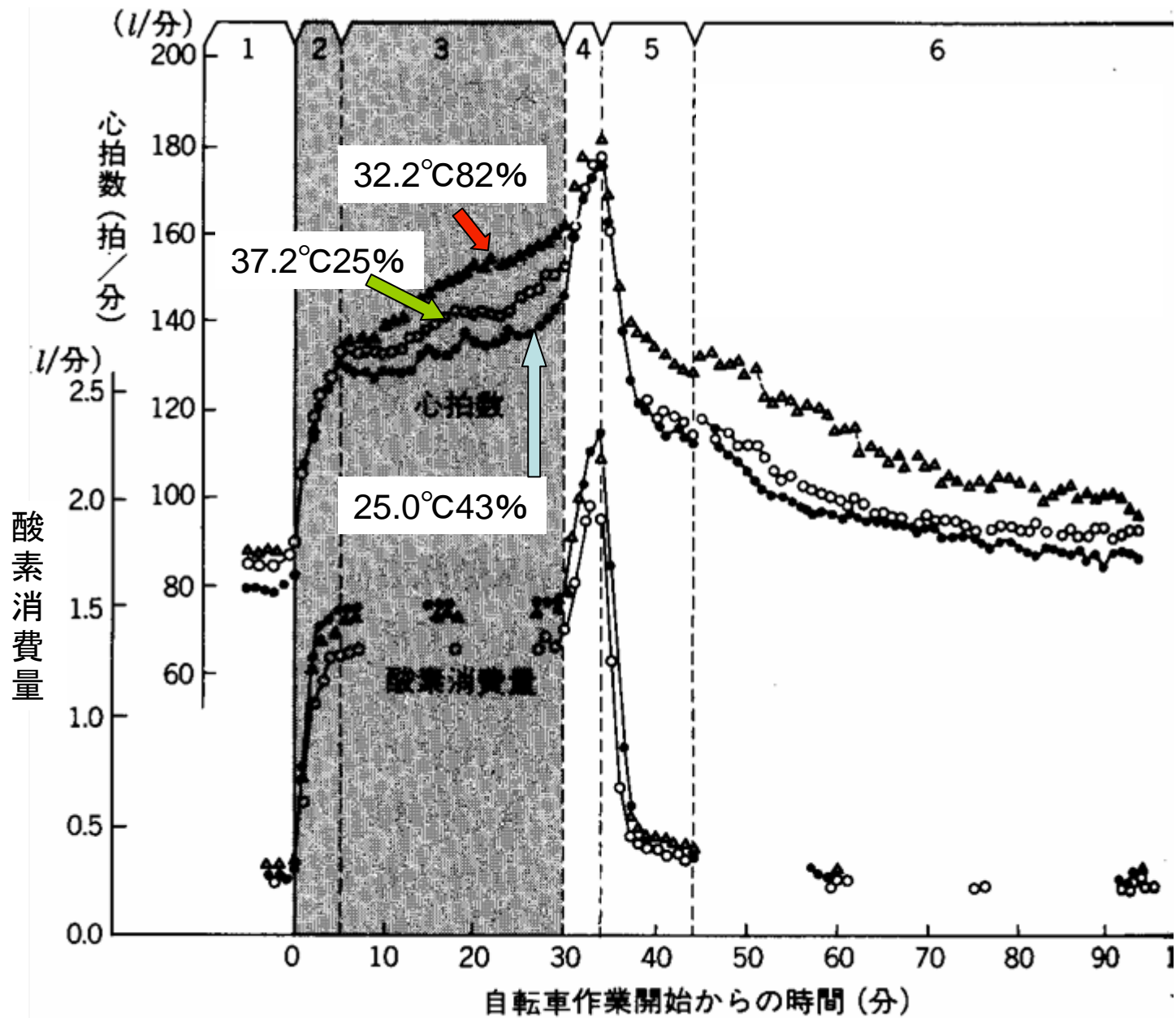


図3 環境条件による心拍数と酸素消費量の変化(6名)(中原, 1992)



運動

産熱増大

皮膚血流量の増加

心拍数の上昇

発汗

衣服内湿度の上昇

口腔温上昇

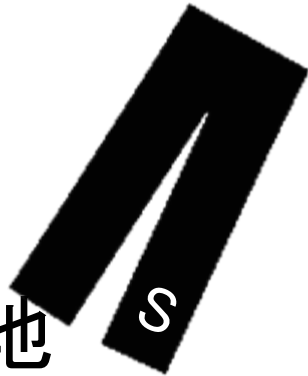
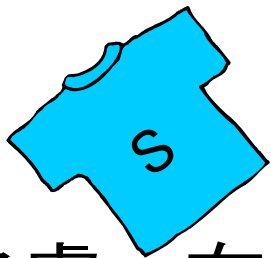
一回拍出量の減少

放熱を増加

潜熱移動が減少

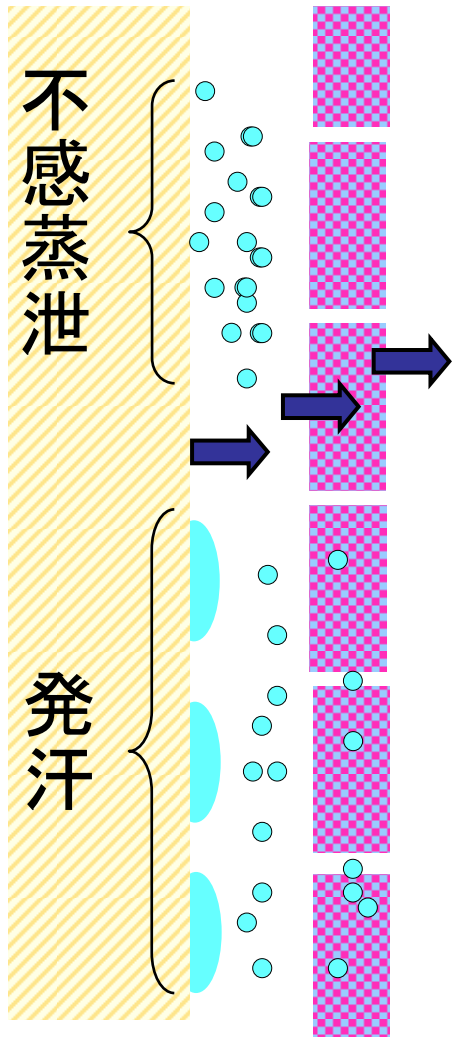
皮膚血流量の増加

フィードバック



皮膚

布地



吸湿性・吸水性

特に衣服の吸湿性が重要である

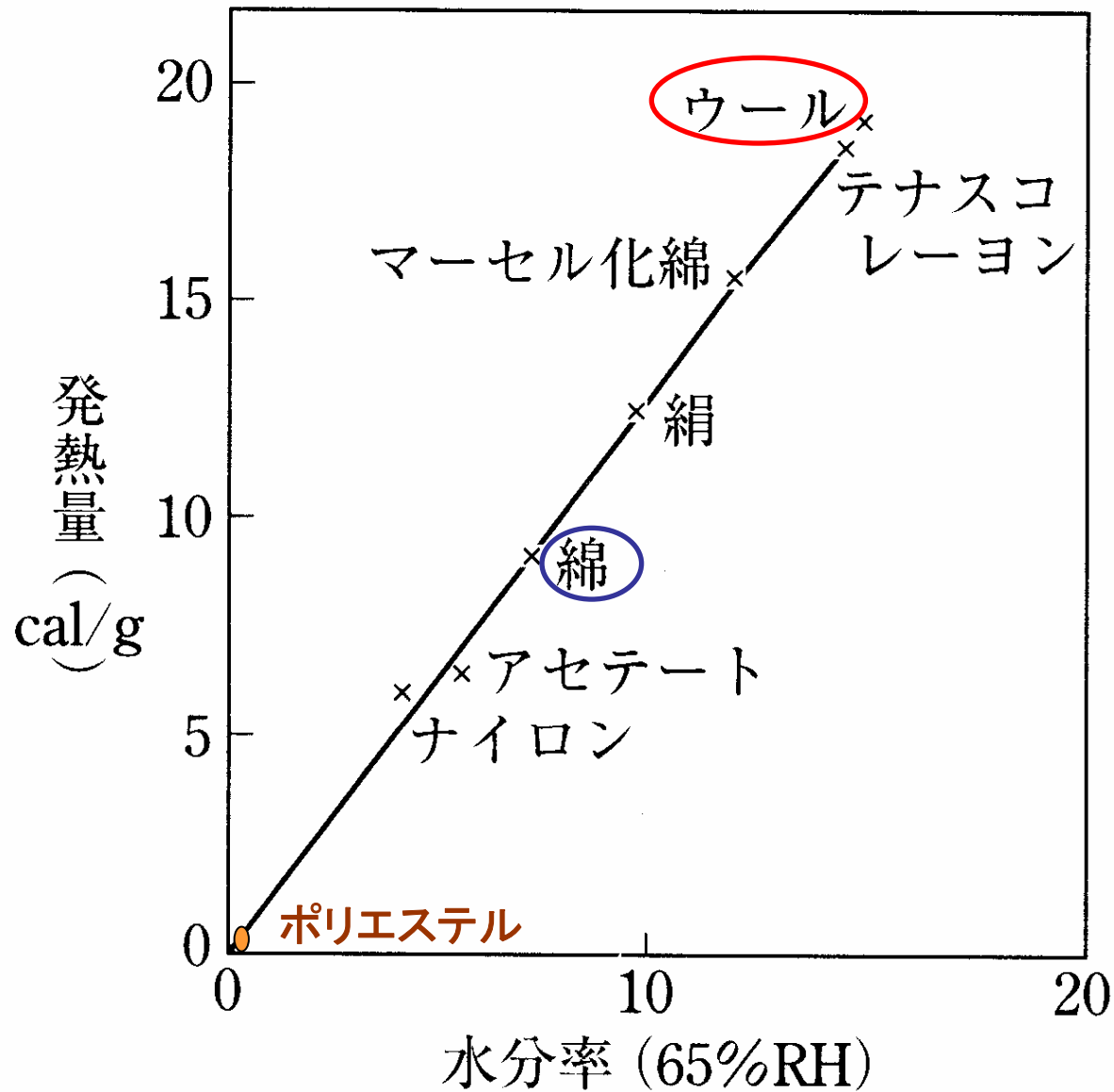
衣服内湿度の低下



汗の円滑な蒸発



発汗量・心拍数・口腔温の低下

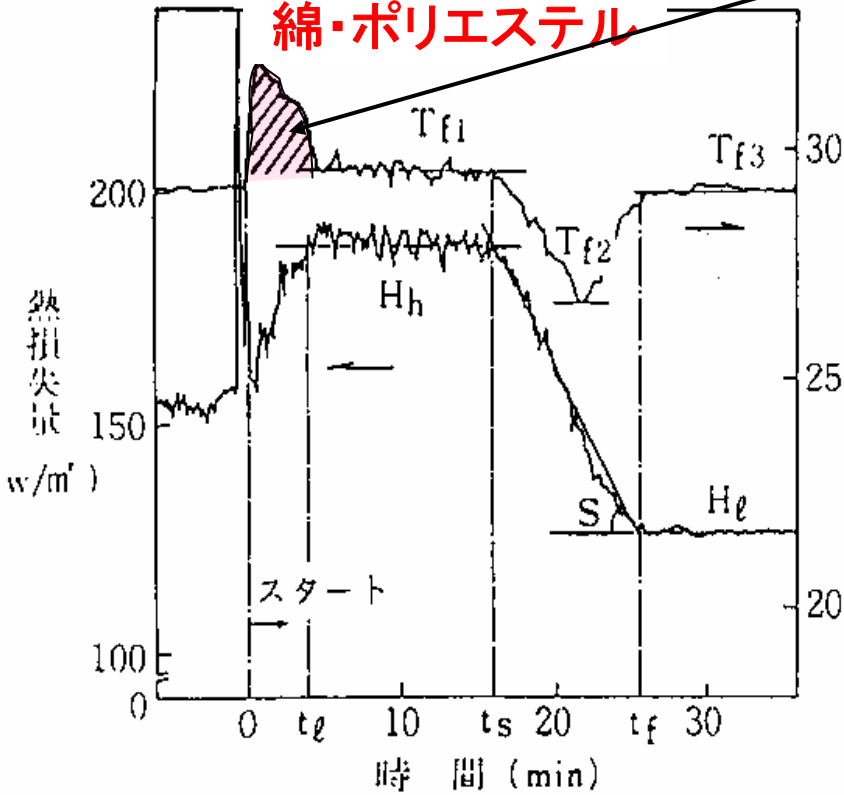


水分率と発熱量との関係

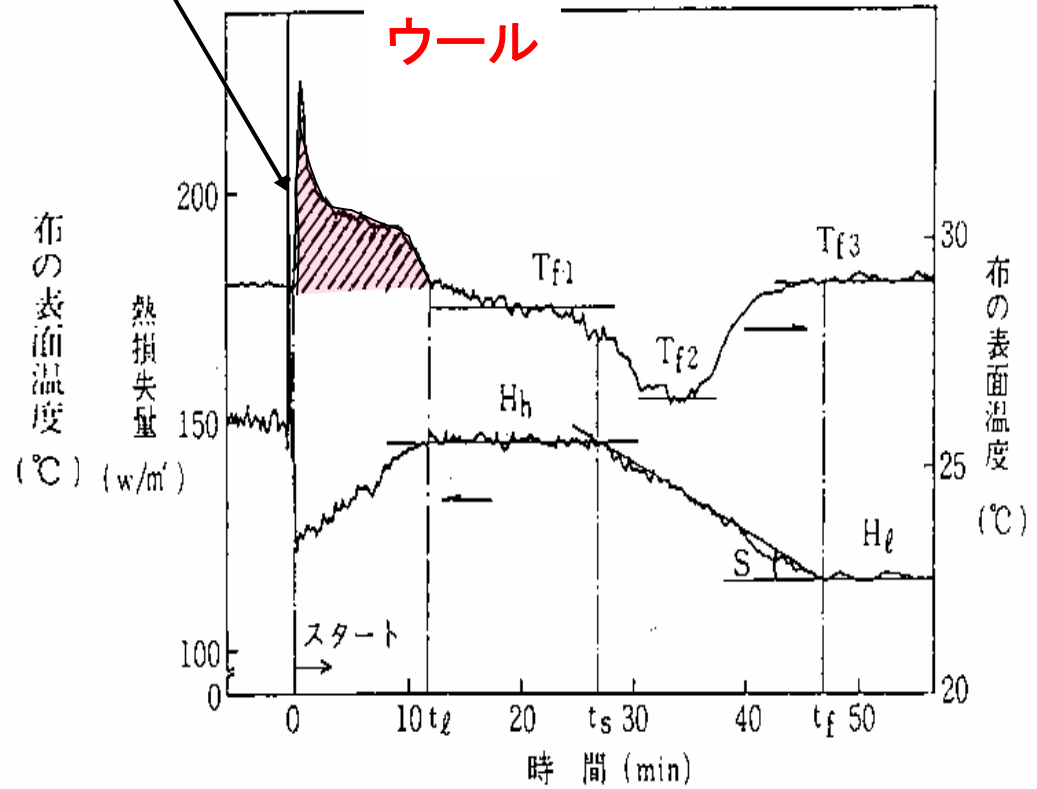
(繊維製品消費科学ハンドブック<sup>7)</sup>より)

# 吸着発熱

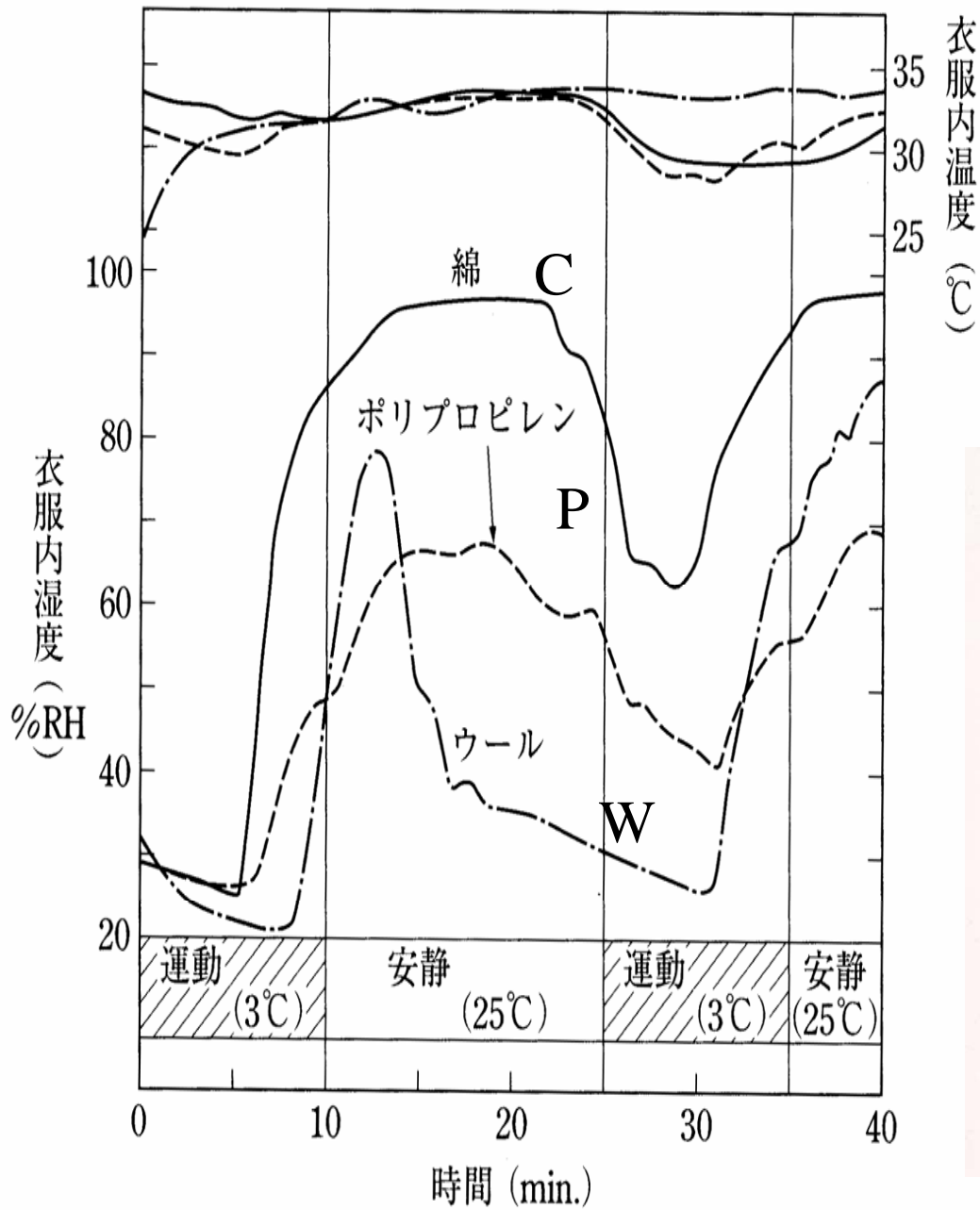
綿・ポリエステル



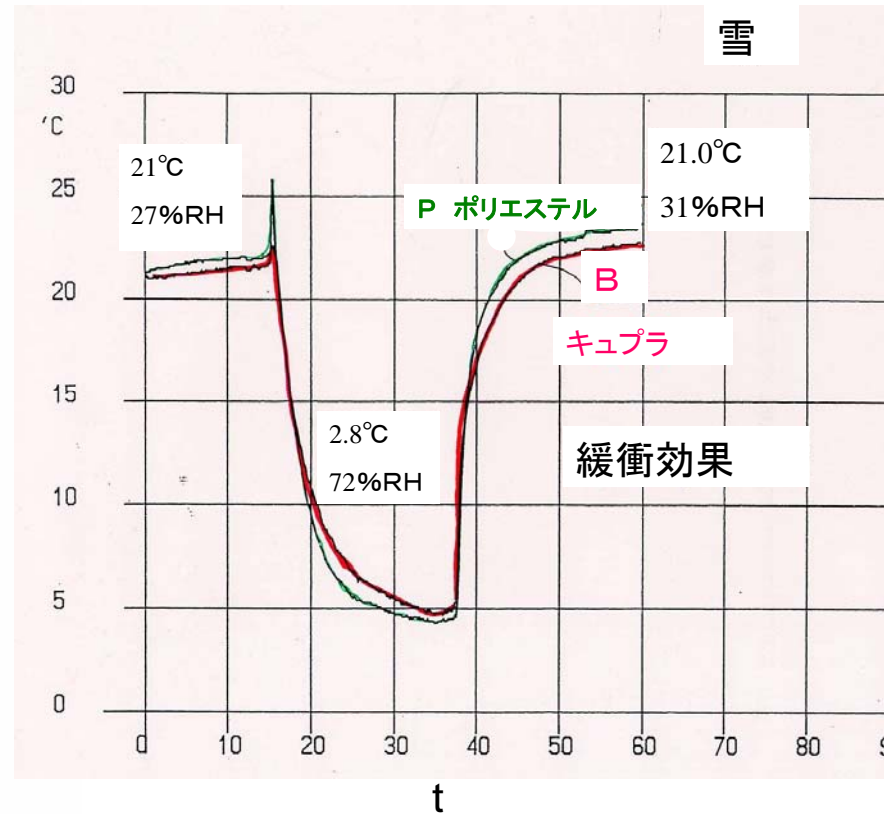
ウール



発汗シュミレーション実験における熱損失量と布の表面温度



	C	P	W
吸湿性	○	×	◎
吸水性	○	×	×



着用実験における衣服内湿度・温度

ご清聴ありがとうございました。

