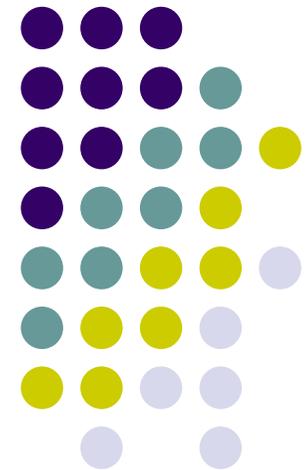


# 人体熱モデルを用いた 体温調節反応の解析

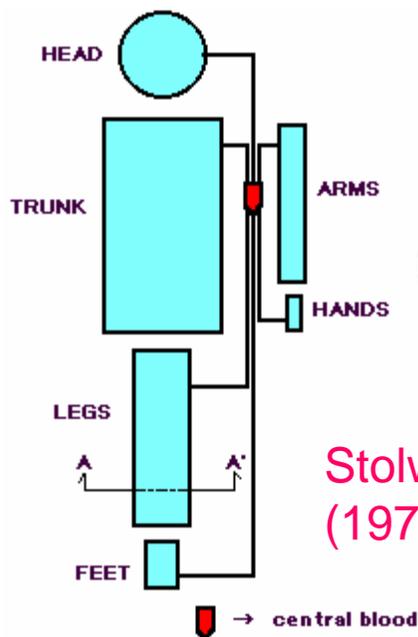
神戸大学大学院工学研究科  
建築学専攻  
高田 暁



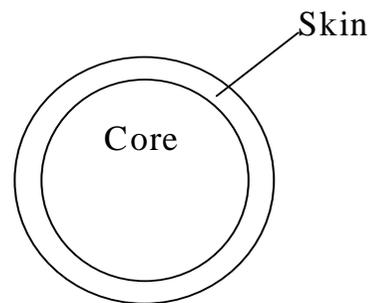
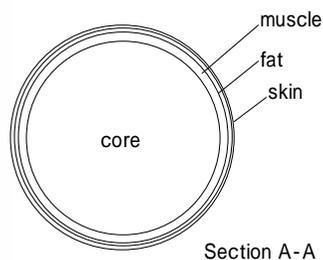
# 人体熱モデルの概要



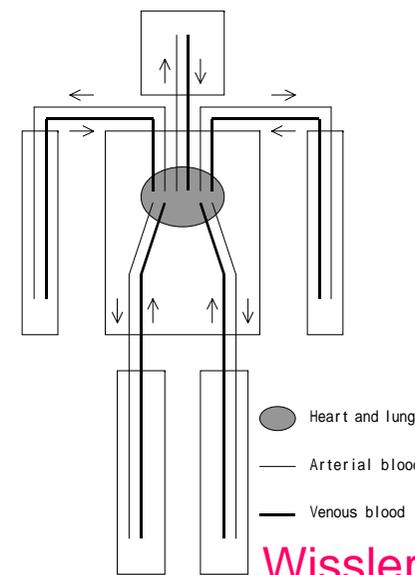
- 人体の各部位を代表する複数の節点についての熱収支式
- 発汗・血流・ふるえ(調節反応) 皮膚・筋・深部温の関数として記述



Stolwijk model  
(1971)



Two-node model  
(1971)



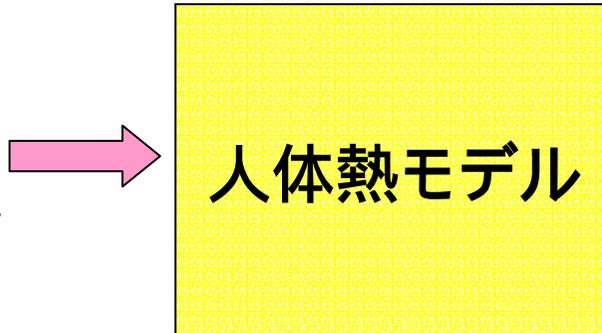
Wissler model  
(1961)

# 人体熱モデルを用いた計算例

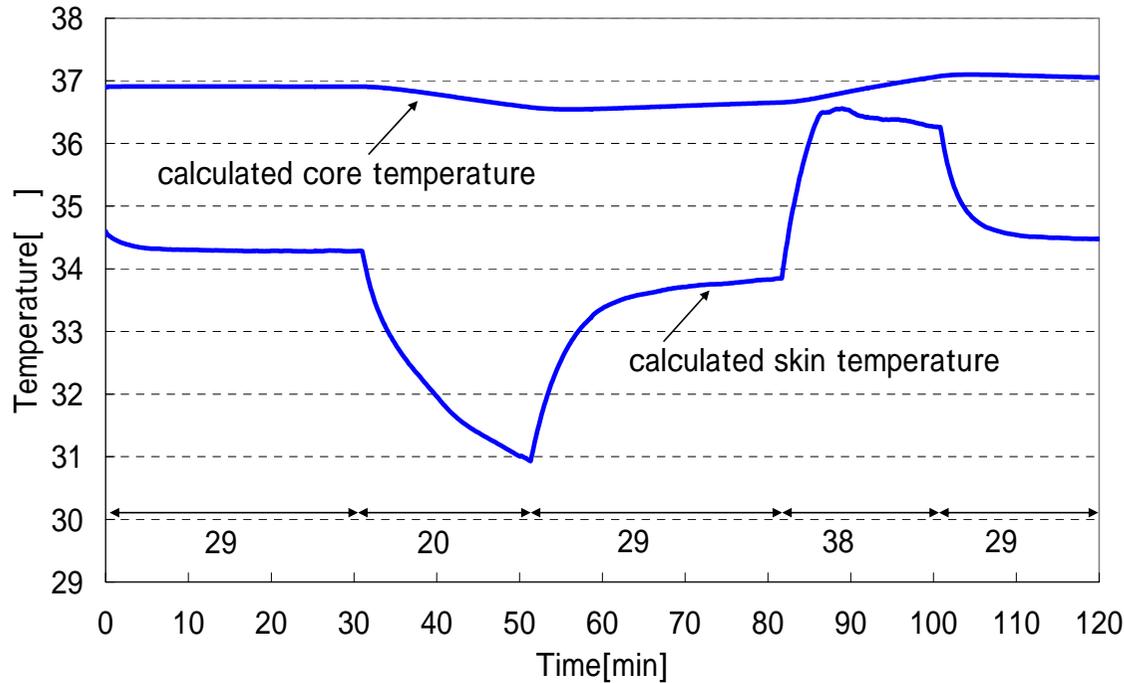
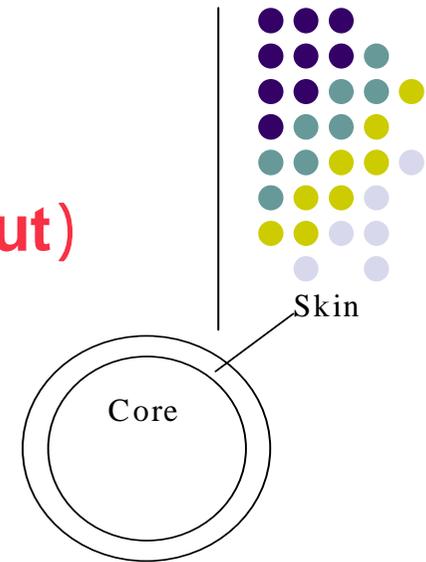
物理量 (input)

生理量 (output)

- 気温
- 湿度
- 風速
- 放射温度
- 着衣
- 代謝量



- 体温分布
- 発汗量
- 血流量



RH=const.

V=const.

MRT=Ta

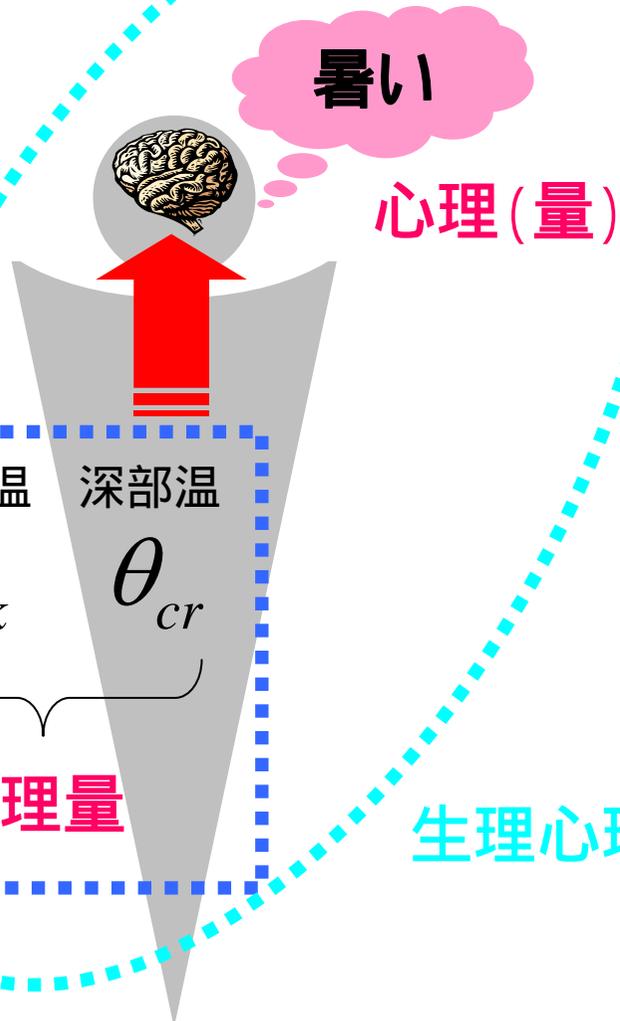
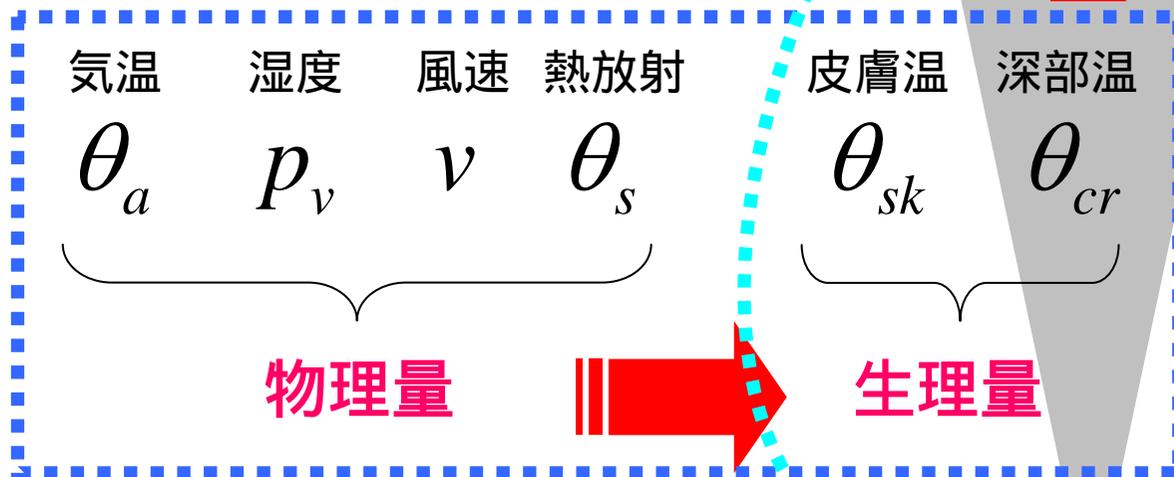
Clothing: const.

Metabolic rate:  
constant

# 人体周辺での伝熱と 快適感の評価モデル



## 人体熱モデル



## 生理心理モデル

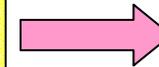
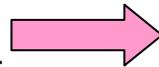
# FangerのPMV (予測平均温冷感申告)



物理量 (input)

心理量 (output)

- 気温
- 湿度
- 風速
- 放射温度
- 着衣
- 代謝量



- 予測平均  
温冷感申告

- 膨大な被験者実験を基に導出
- 人体の熱収支を考えたとき、熱的平衡 (= 熱的中立) が熱的快適のための必要条件との仮定
- 熱的快適の際の、代謝量 vs 皮膚温、および代謝量 vs 蒸発量を大胆にモデル化 (線形回帰式)
- **定常状態**を対象

# 非定常温冷感予測式の提案



生理量 (input)

心理量 (output)

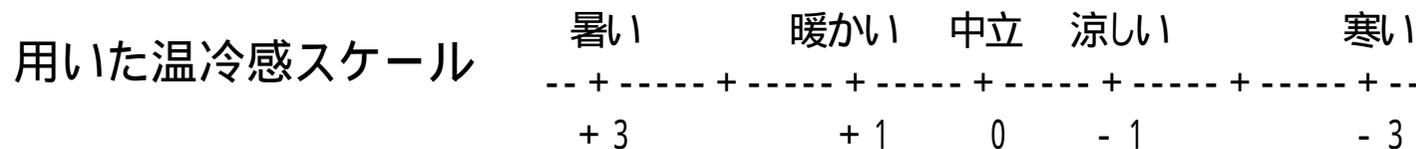


- 被験者実験を行い、得られた温冷感申告値 ( $I$ ) と生理量との関係を、重回帰式で表現

$$I = A \cdot q_{sk} + B \cdot T_{sk} + C \cdot \frac{dT_{sk}}{dt} + D \cdot T_{cr} + E \cdot \frac{dT_{cr}}{dt} + F$$

定数項

$A \sim F$ は定数 (単位は異なる)



# 非定常温冷感予測式の概要 (生理心理モデル)



## 温冷感申告値 ( $I$ ) の重回帰モデル

$$I = A \cdot q_{sk} + B \cdot T_{sk} + C \cdot \frac{dT_{sk}}{dt} + D \cdot T_{cr} + E \cdot \frac{dT_{cr}}{dt} + F$$

定数項

$A \sim F$ は定数(単位は異なる)

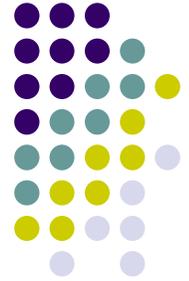
暑い	暖かい	中立	涼しい	寒い
---+-----+-----+-----+-----+---				
+ 3	+ 1	0	- 1	- 3



# 人体熱モデルの用途

- **空調制御計画** (温湿度、風速・風向)
  - 静的・均一な温度設定から動的・不均一な制御への展開
  - 気流制御計画(大空間空調、タスク・アンビエント空調)
  - 局所冷却の効果検討
  - 睡眠環境の快適制御
  - 高アメニティ空間の制御
- **建築温熱環境の評価**
  - 室内環境の快適性(分布を考慮した評価)
  - 放射冷暖房システム(床暖房)の快適性
  - 車内環境の快適性
  - 屋外環境の生体への影響(熱中症の危険予測)
  - 入浴環境の快適性評価・ヒートショックの予防

# 人体熱モデルの研究動向と課題



- **多分割モデルの開発が活発**

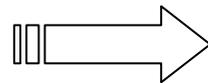
解像度は向上、但し現象再現のための情報は不足

- **計算結果と実験結果の対応確認が不足**

モデルの信頼性評価が不十分

- **個体差**

モデルにおいて差を考慮する手法が未知

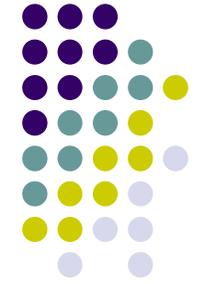


- ・現象を再現可能なモデルの構成
- ・モデルにおける個体差の考慮
- ・個体差の構造解明



# 個体差を考慮した人体熱モデル

# 研究目的と方法

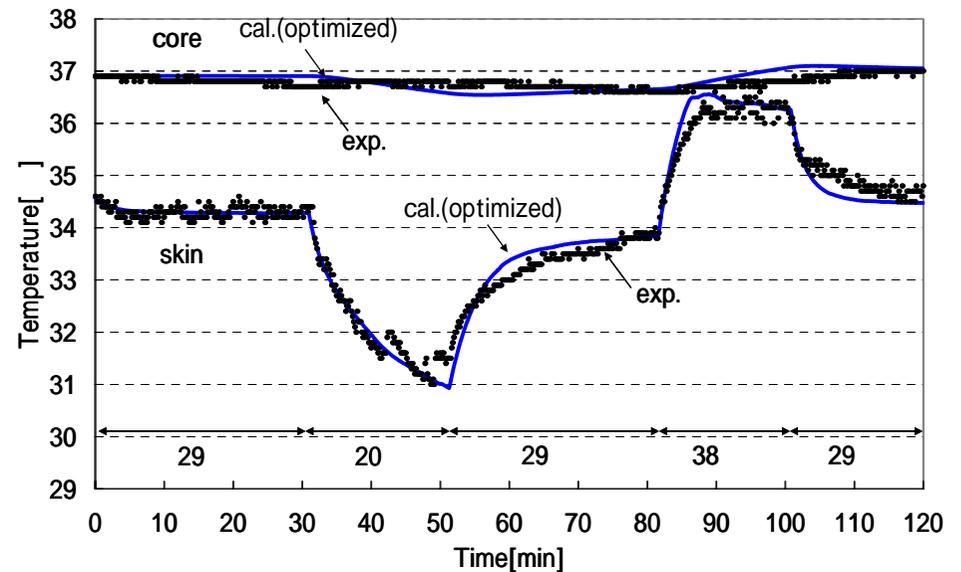


- 人体熱モデルにおいて個体差を考慮  
体温調節系における個体差の記述法を開発

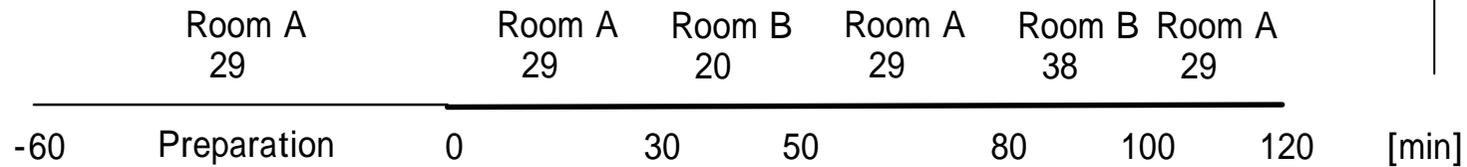
Step 1: 被験者を用いた実験  
非定常過程での皮膚温・深部温を測定(二つの恒温恒湿室)

Step 2: two-node modelを用いた計算  
実験結果にフィットするモデル内の  
係数値を同定

同定された係数値群  
= 個体差を量的に表す指標  
と考えられる

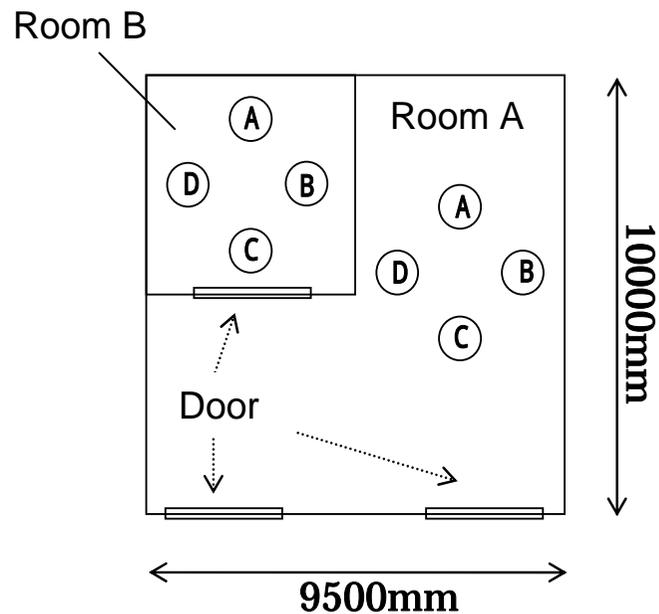


# 被験者実験の方法



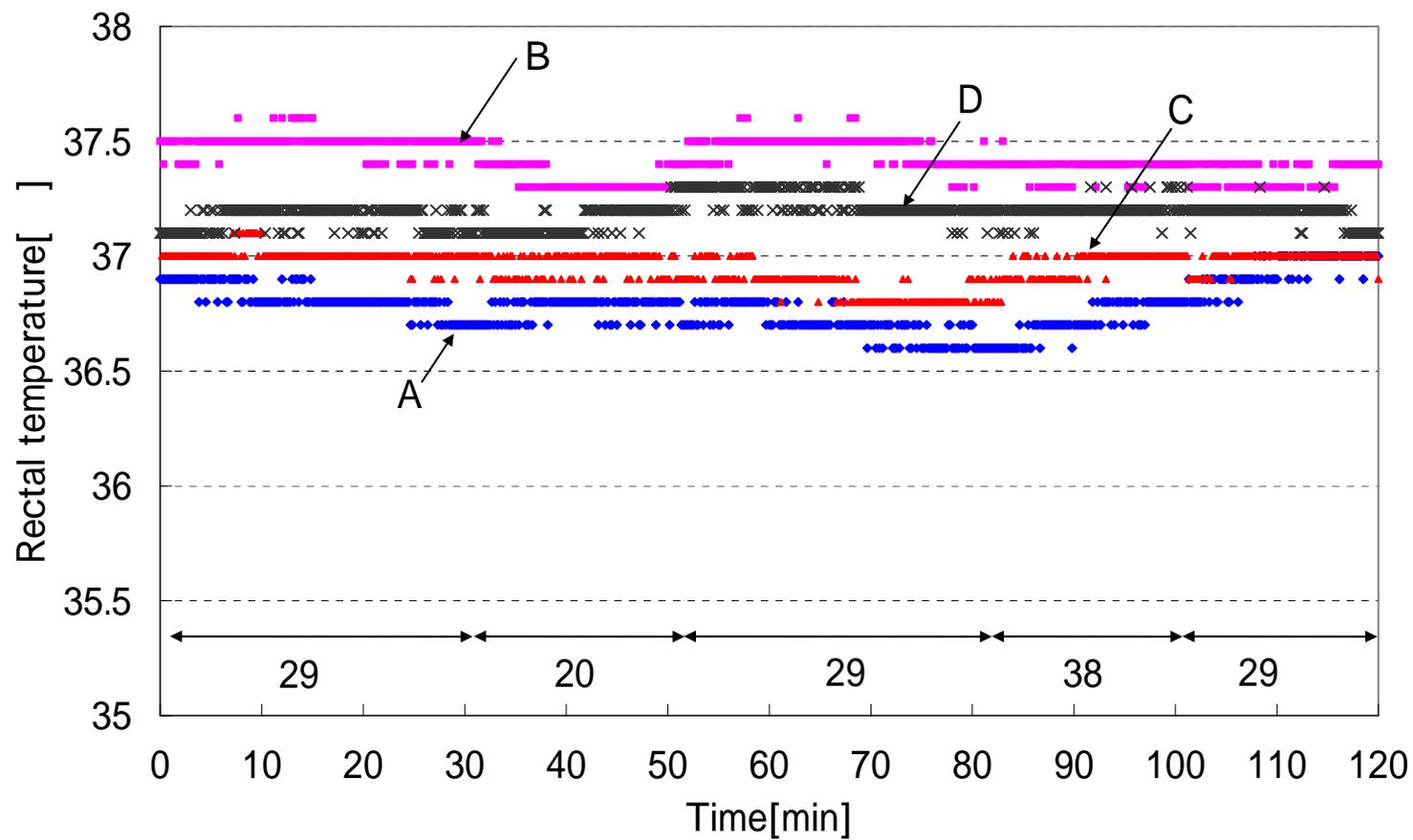
Relative humidity: 50%, Clothing: Trunks only, Seated

	AGE	HT	WT	SEX	BSA
	[year]	[cm]	[kg]	[-]	[m <sup>2</sup> ]
A	25	169	55.6	Male	1.64
B	24	167	66.0	Male	1.73
C	24	163	54.8	Male	1.59
D	24	174	76.8	Male	1.89

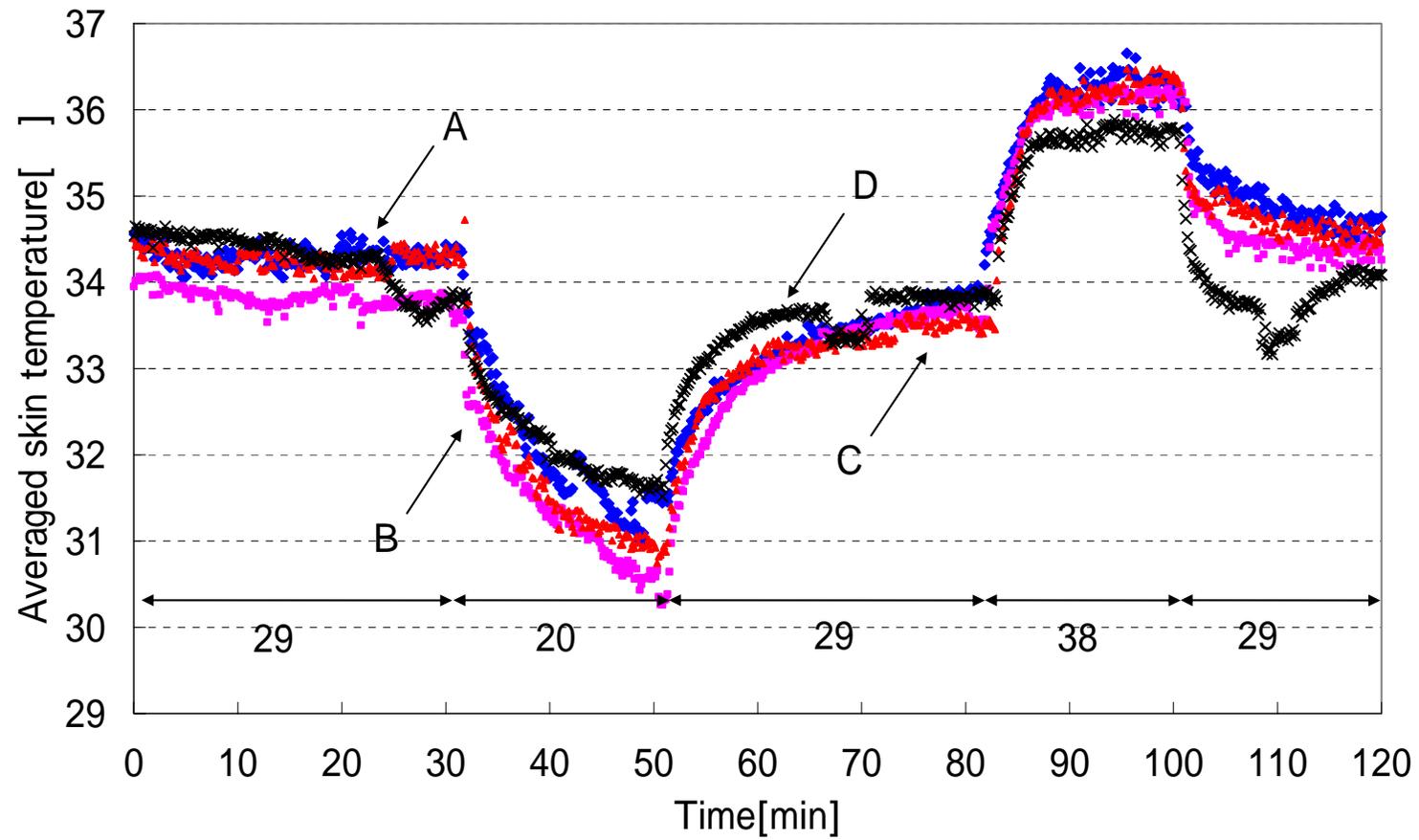


インテックセンター内の恒温恒湿室にて実施

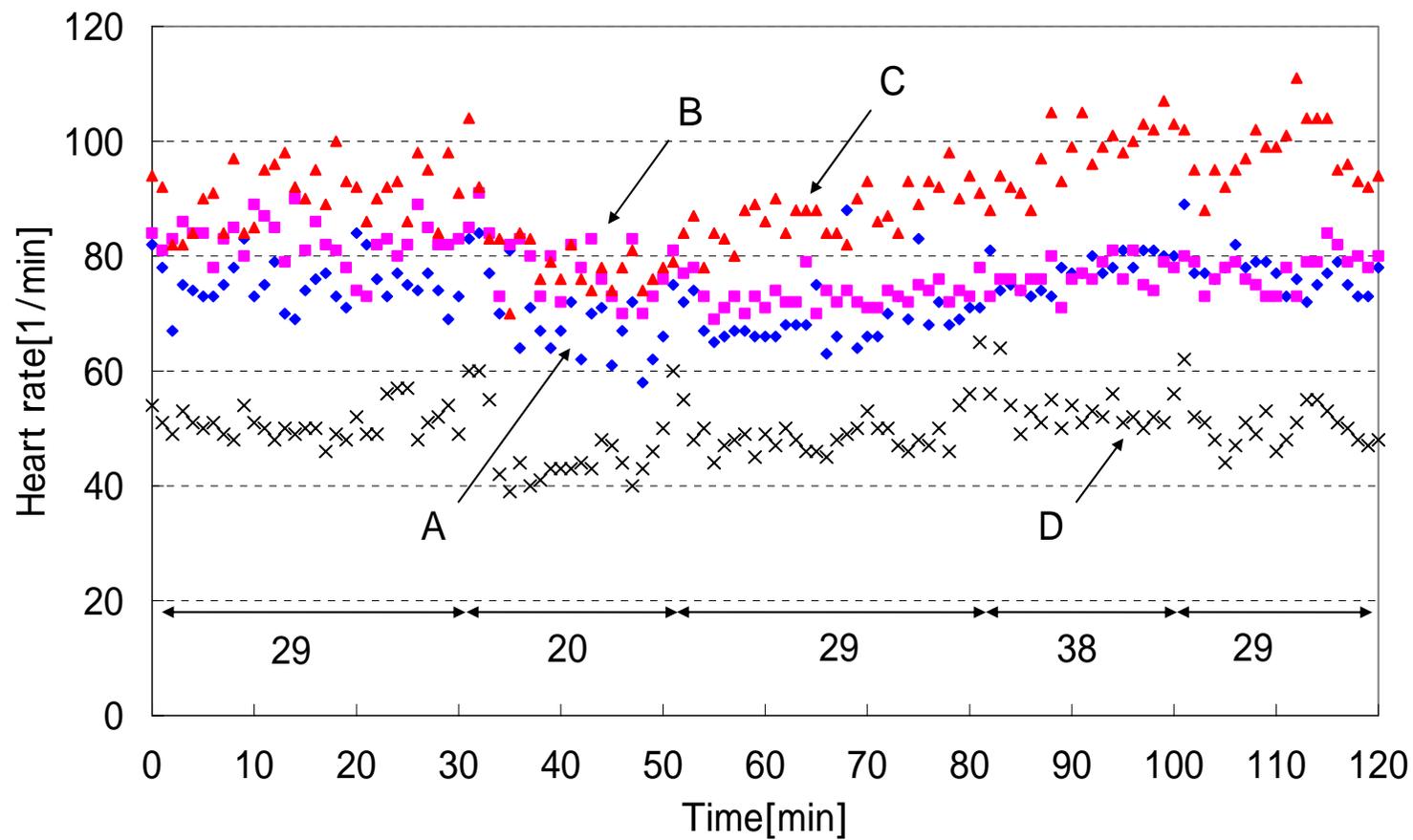
# 実験結果(直腸温)



# 実験結果(平均皮膚温)

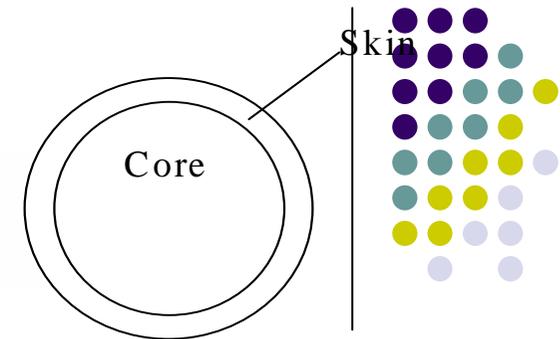


# 実験結果(心拍数)



# Two-node model 基礎式

モデルを提案したGaggeらによるDefault値が与えられている  
(生理学的実験の結果に基づくと思われる。)



Core  
熱収支式

$$\frac{c_{cr} W_{cr}}{S} \frac{dT_{cr}}{dt} = (1 - \eta)M - q_{res} - (c_{bl} v_{bl} + K_{min}) \cdot (T_{cr} - T_{sk})$$

Skin  
熱収支式

$$\begin{aligned} \frac{c_{sk} W_{sk}}{S} \frac{dT_{sk}}{dt} = & (T_{cr} - T_{sk}) \cdot (K_{min} + c_{bl} v_{bl}) \\ & - (\alpha_c + \alpha_r) \cdot (T_{sk} - T_o) \cdot F_{cl} - (q_{diff} + q_{rsw}) \end{aligned}$$

Skin 表面  
水分収支式

$$0 = \alpha' (X_o - X_{sk}) + \alpha_{sk}' (X_{sk,sat} - X_{sk}) + m_{sw}$$

発汗量

$$m_{sw} = 2.78 \times 10^{-5} \cdot (T_{sk} - T_{sk,setpoint}) \cdot (T_{cr} - T_{cr,setpoint})$$

皮膚血流量

$$v_{bl} = \frac{1.75 \times 10^{-6} + 2.08 \times 10^{-5} \cdot (T_{cr} - T_{cr,setpoint})}{1 - 0.5 \cdot (T_{sk} - T_{sk,setpoint})}$$



# 計算方法

発汗量モデル

$$m_{sw} = pr3 \cdot (T_{cr} - pr1)(T_{sk} - pr2) \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{1000}$$

皮膚血流量モデル

$$v_{bl} = \frac{pr4 + pr5(T_{cr} - pr1)}{1 + pr6(pr2 - T_{sk})} \cdot \frac{1}{3600}$$

実験値と計算値の差 (皮膚温・深部温)

$$J = \sum_{i=1}^N \left\{ (T_{cr,i} - T_{cr,i}')^2 \right\} + \sum_{i=1}^N \left\{ (T_{sk,i} - T_{sk,i}')^2 \right\}$$

各被験者について最もJ値が小さくなるパラメーターの組み合わせを探す (1,260,000通りの非定常計算を行い、ベストの結果を与えるパラメーターの組み合わせを探す。)

pr1	pr2	pr3	pr4	pr5	pr6
37.7	34.7	100	12.6	150	1
37.5	34.5	80	10.08	120	0.8
37.3	34.3	60	7.56	90	0.6
37.1	34.1	40	5.04	60	0.4
36.9	33.9	20	2.52	30	0.2
36.7	33.7	10	1.26	15	0.1
36.5	33.5	5	0.63	7.5	0.05
36.3	33.3		0.315	3.75	0.025
36.1	33.1		0.1575		0.0125
35.9	32.9		0.07875		0.00625
35.7	32.7				
35.5	32.5				
35.3	32.3				
35.1	32.1				
34.9	31.9				

# 計算結果

(各被験者についての最適パラメーター群)



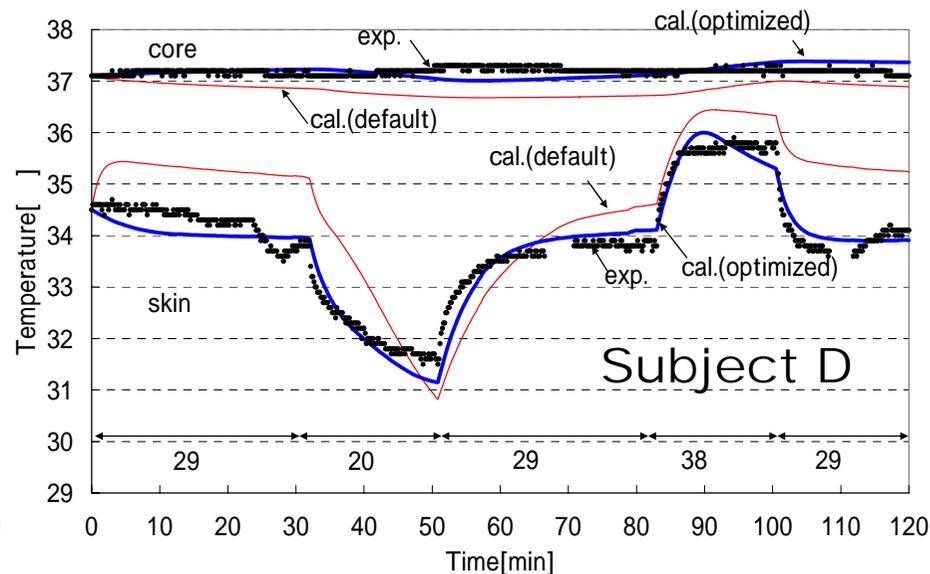
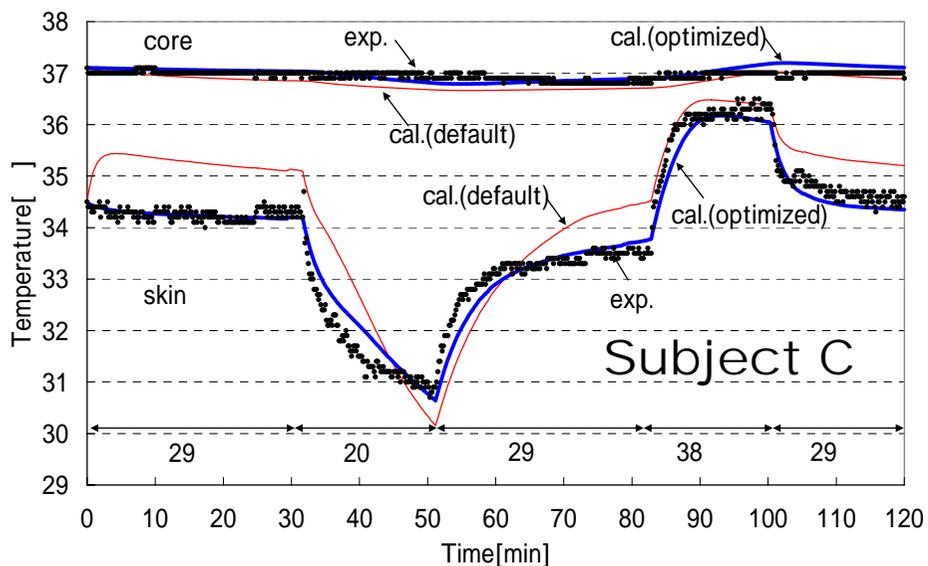
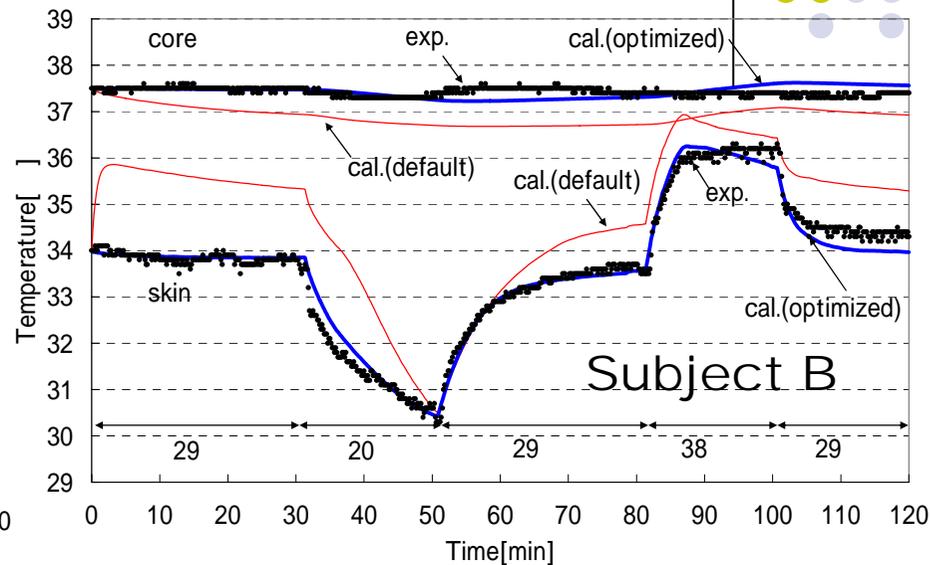
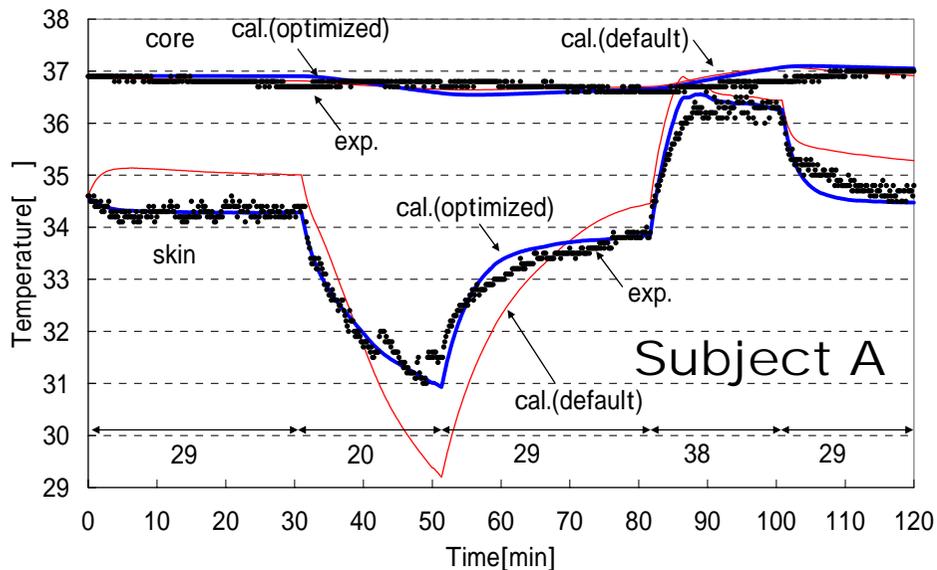
Subject	Parameter					
	Pr1	Pr2	Pr3	Pr4	Pr5	Pr6
	$T_{cr,set}$ [ ]	$T_{sk,set}$ [ ]	Perspiration [g/(m <sup>2</sup> ·h·K <sup>2</sup> )]	Basal blood flow rate [kg/(m <sup>2</sup> ·h)]	Vaso dilation [kg/(m <sup>2</sup> ·h·K)]	Vaso constriction [1/K]
A	36.1	32.7	10	1.26	15	0.00625
B	36.9	32.3	20	0.07875	15	0.00625
C	36.7	32.1	20	2.52	30	0.00625
D	37.1	33.1	100	7.56	7.5	0.00625
default	36.6	34.1	100	6.3	75	0.5

## 計算条件

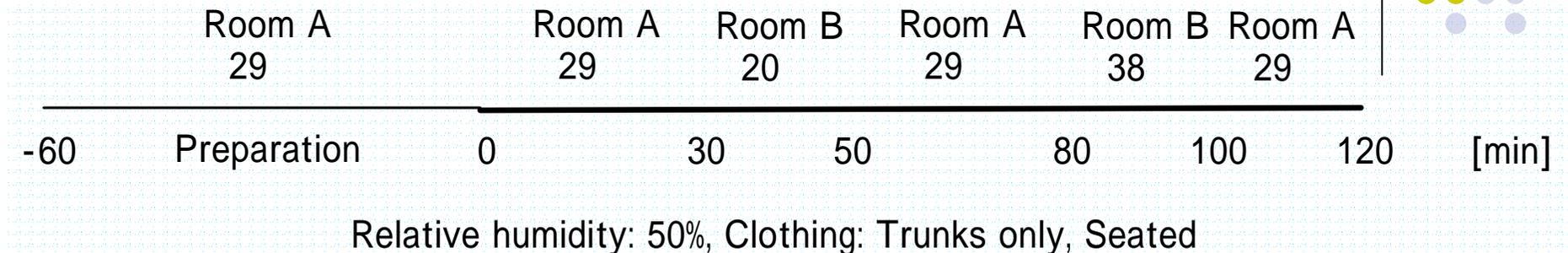
Air temperature	Measured data
Air humidity	Measured data
MRT	Equal to air temperature
Convective heat transfer coefficient	3.1[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
Radiative heat transfer coefficient	4.65[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
Clothing	0.1[clo]
Metabolic rate	58.2[W/m <sup>2</sup> ]
External mechanical efficiency	0

# 計算結果

実験結果にフィットするパラメーター群を同定することができた。

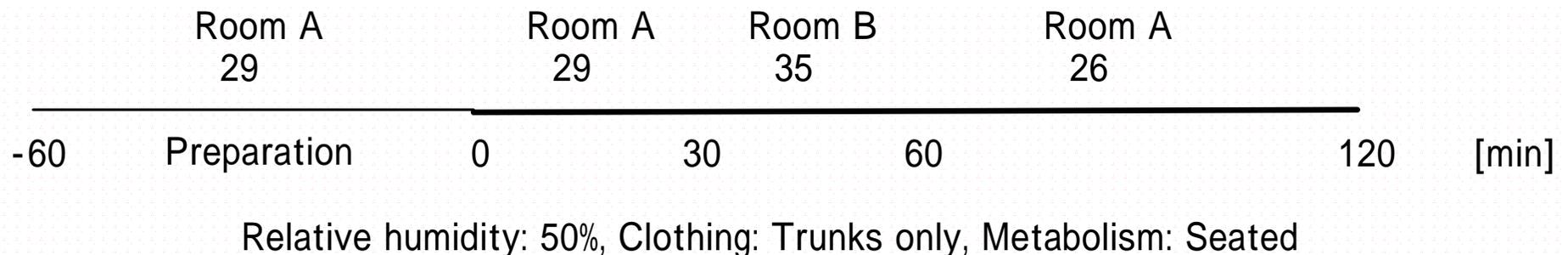


# 同定したパラメーター群の妥当性確認

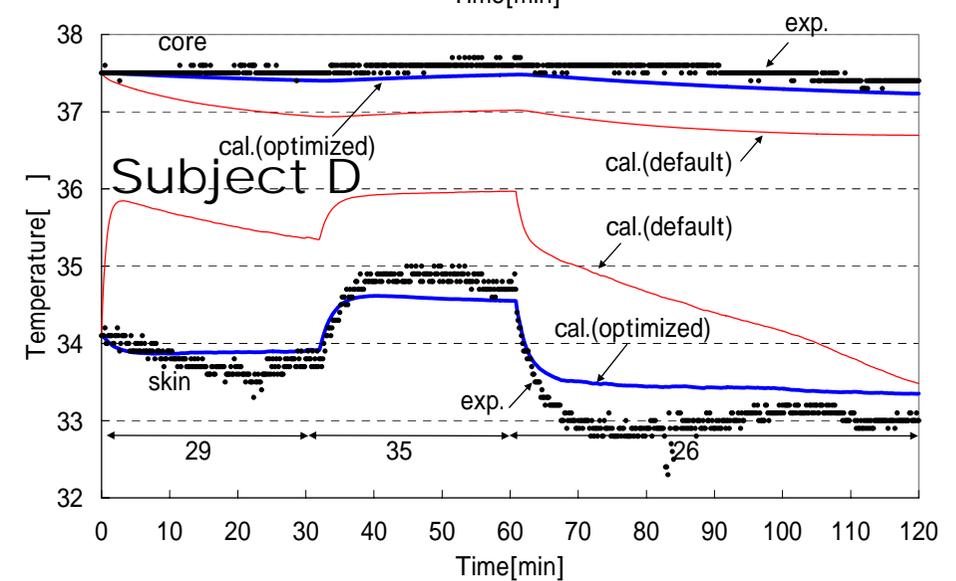
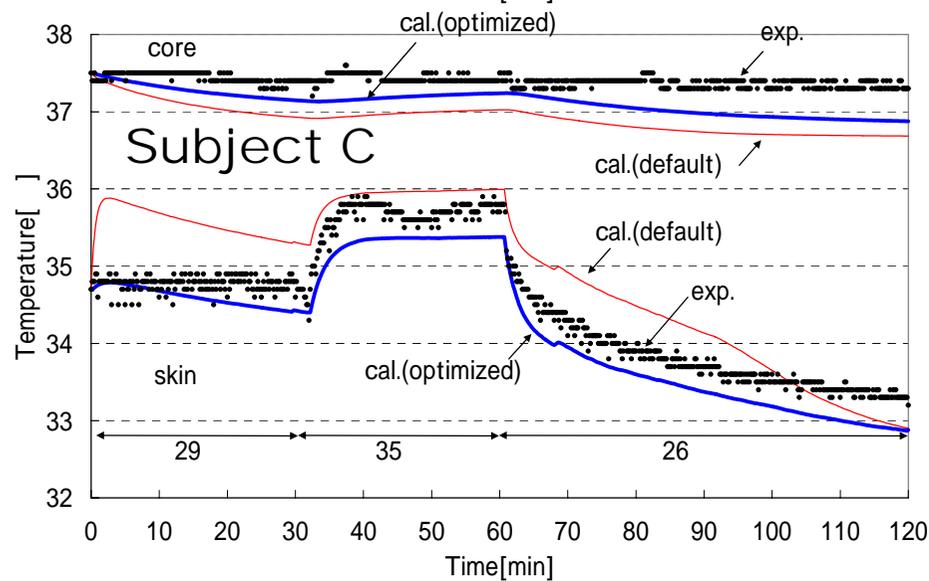
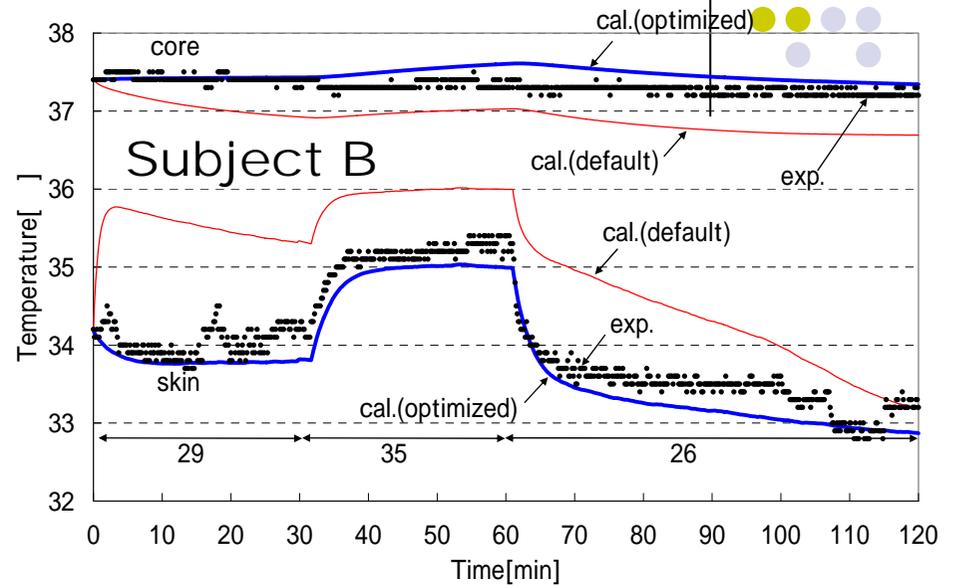
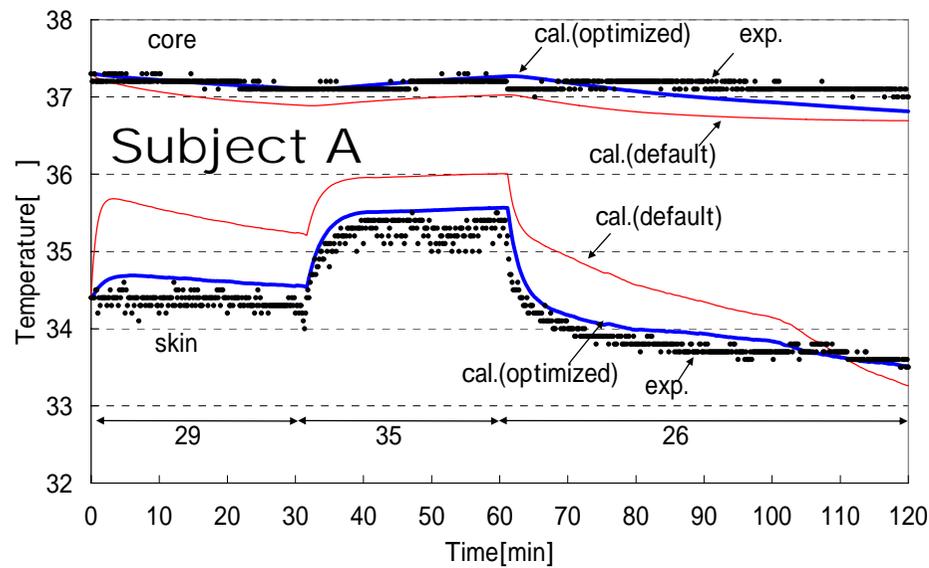
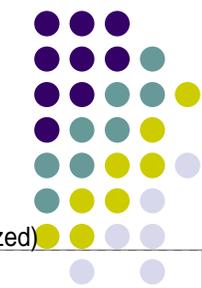


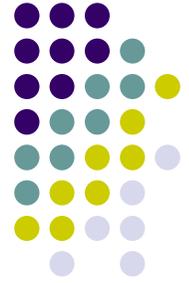
⇒ この非定常過程について実験結果にフィットするパラメーターの組み合わせを決定できた。

⇒ このパラメーター群により、別のタイプの非定常過程についての実験結果も再現できるか？



# 別の非定常過程についての再現性確認





## まとめ

- 気温のステップ変動に複数の被験者を曝露し、体温調節反応における個体差を量的に把握した。深部温の個体差が大きい。
- 人体熱モデル(Two-node model)に含まれる体温調節の係数値群を、各被験者についてチューニングすることが可能である。
- チューニングした係数値群により、体温調節系の個体差を定量的に記述する手法を提案した。

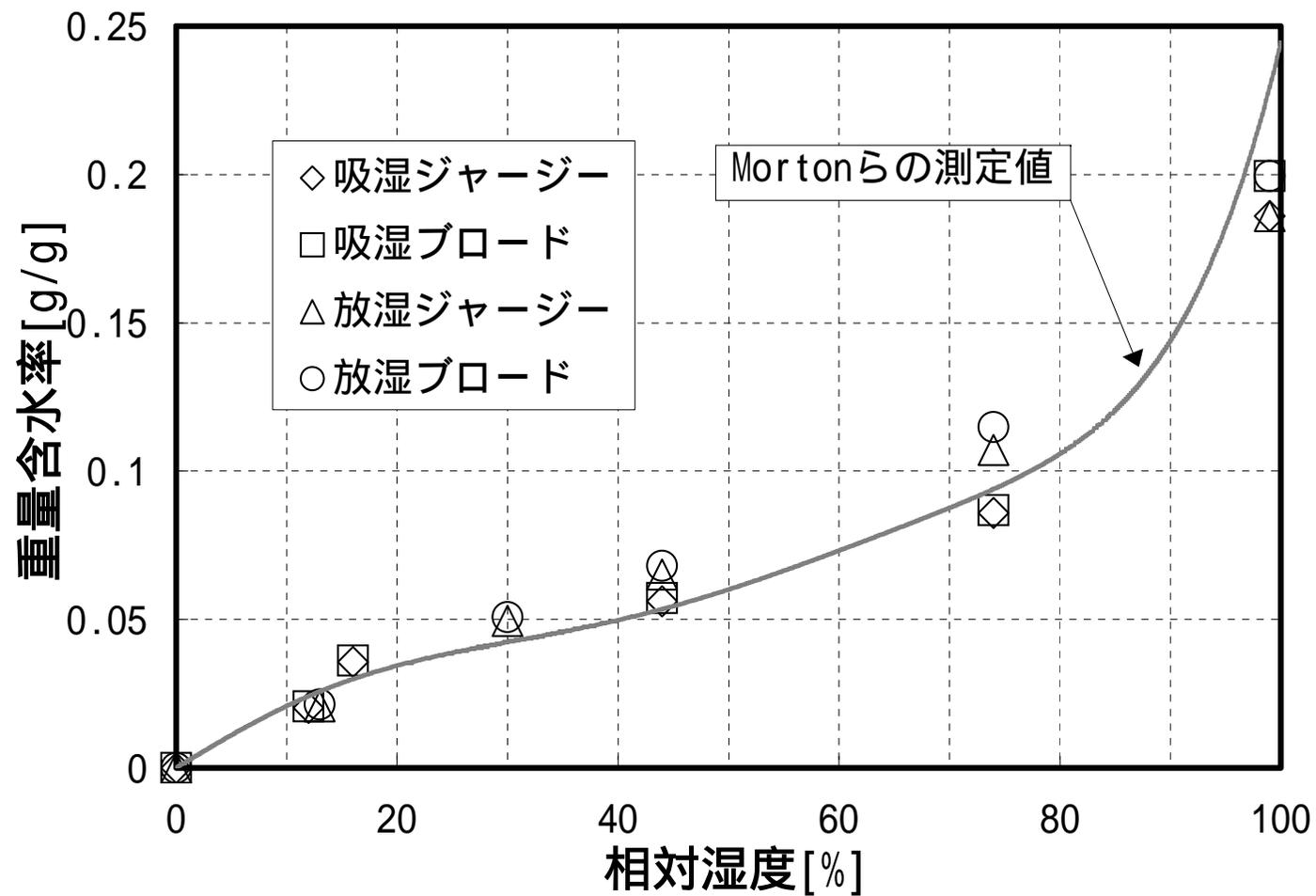


# 着衣での熱水分移動を考慮した 人体熱モデル

# 平衡含水率曲線(等温吸着線)



綿



# 熱水分同時移動方程式(着衣)



水分収支式

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right] \longrightarrow \rho_w \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right]$$

熱収支式

$$c_{cl} \rho_{cl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\lambda + rD_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} + rD_{wv} \frac{\partial w}{\partial x} \right]$$

平衡含水率

$$w = f(H)$$

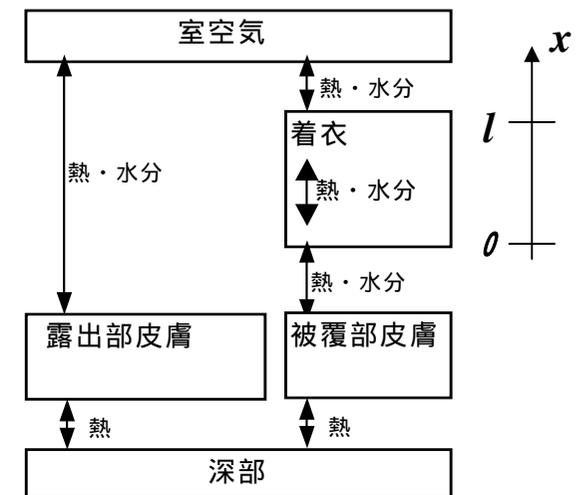
## 境界条件 (着衣の室空気側のみ示す)

水分について

$$\left( -D_w \frac{\partial w}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=l} = \alpha' (X_{x=l} - X_a)$$

熱について

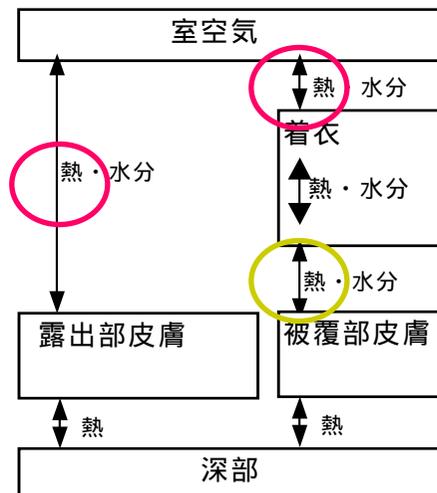
$$\left\{ -(\lambda + rD_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} - rD_{wv} \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \Big|_{x=l} = (\alpha_c + \alpha_r) \cdot (T_{x=l} - T_a) + r\alpha' (X_{x=l} - X_a)$$



# 計算条件



湿気伝導率	$6.48 \times 10^{-7}$ [kg/(ms kg/kg')]
平衡含水率 (等温吸着線)	RH=w/0.045 (0 w < 0.045) RH=1 (0.045 w 0.773)
熱伝導率	0.0556 [W/(mK)]
比熱	1380 [J/(kgK)]
実質部密度	1540 [kg/m <sup>3</sup> ]
空隙率	0.773 [n.d.]
厚さ	0.5 [mm]

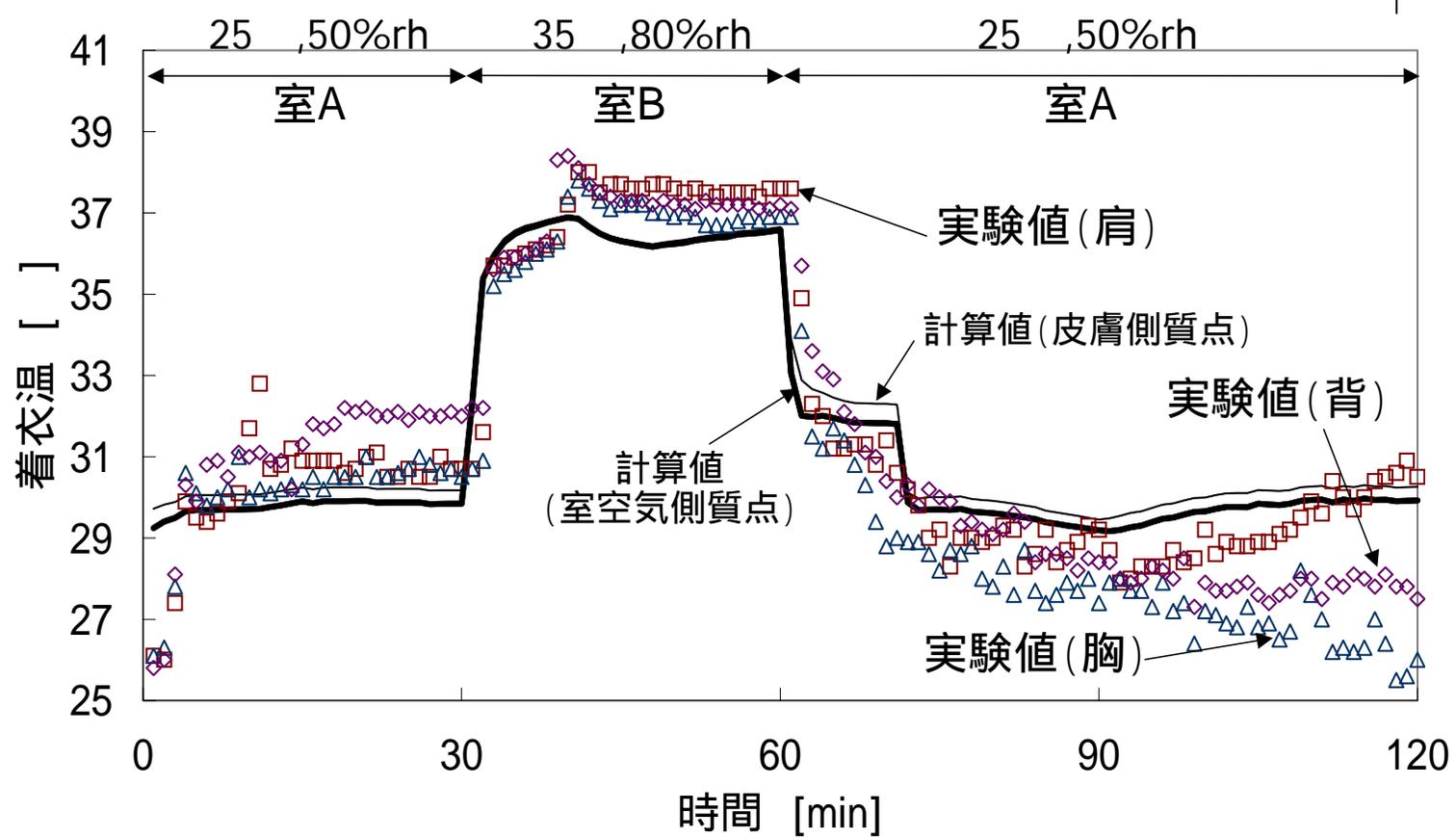


時間 [分]	対流熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> K)]	放射熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> K)]	湿気伝達率 [kg/(m <sup>2</sup> s kg/kg')]
0-30	4.0	4.65	$4.0 \times 10^{-3}$
30-60	1.5	4.65	$1.5 \times 10^{-3}$
60-120	4.0	4.65	$4.0 \times 10^{-3}$

時間 [分]	熱コンダクタンス [W/(m <sup>2</sup> K)]	湿気コンダクタンス [kg/(m <sup>2</sup> s kg/kg')]
0-120	14.65	$10.0 \times 10^{-3}$

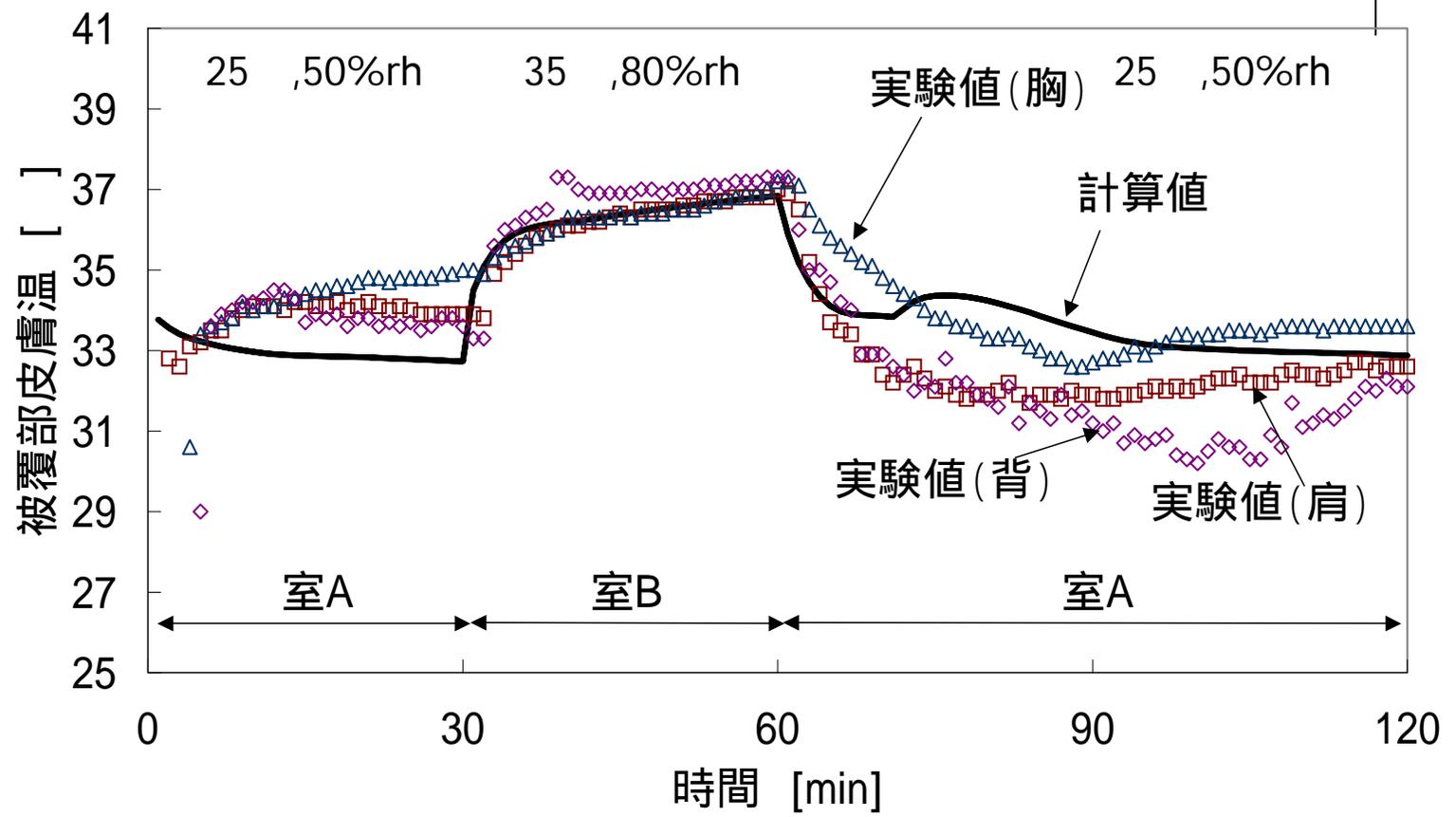


# 着衣温 (実験値と計算値の比較)



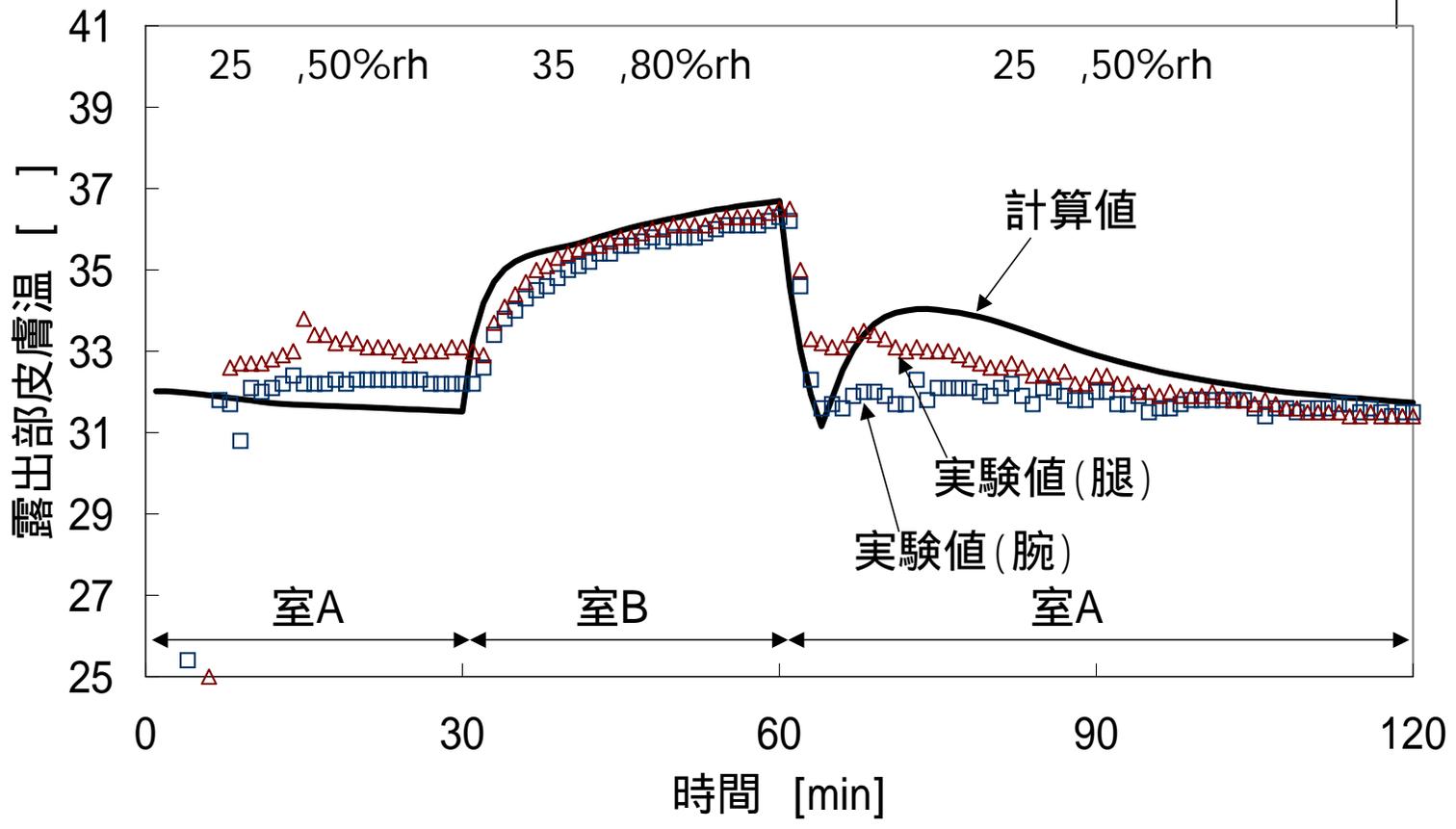


# 被覆部皮膚温 (実験値と計算値の比較)

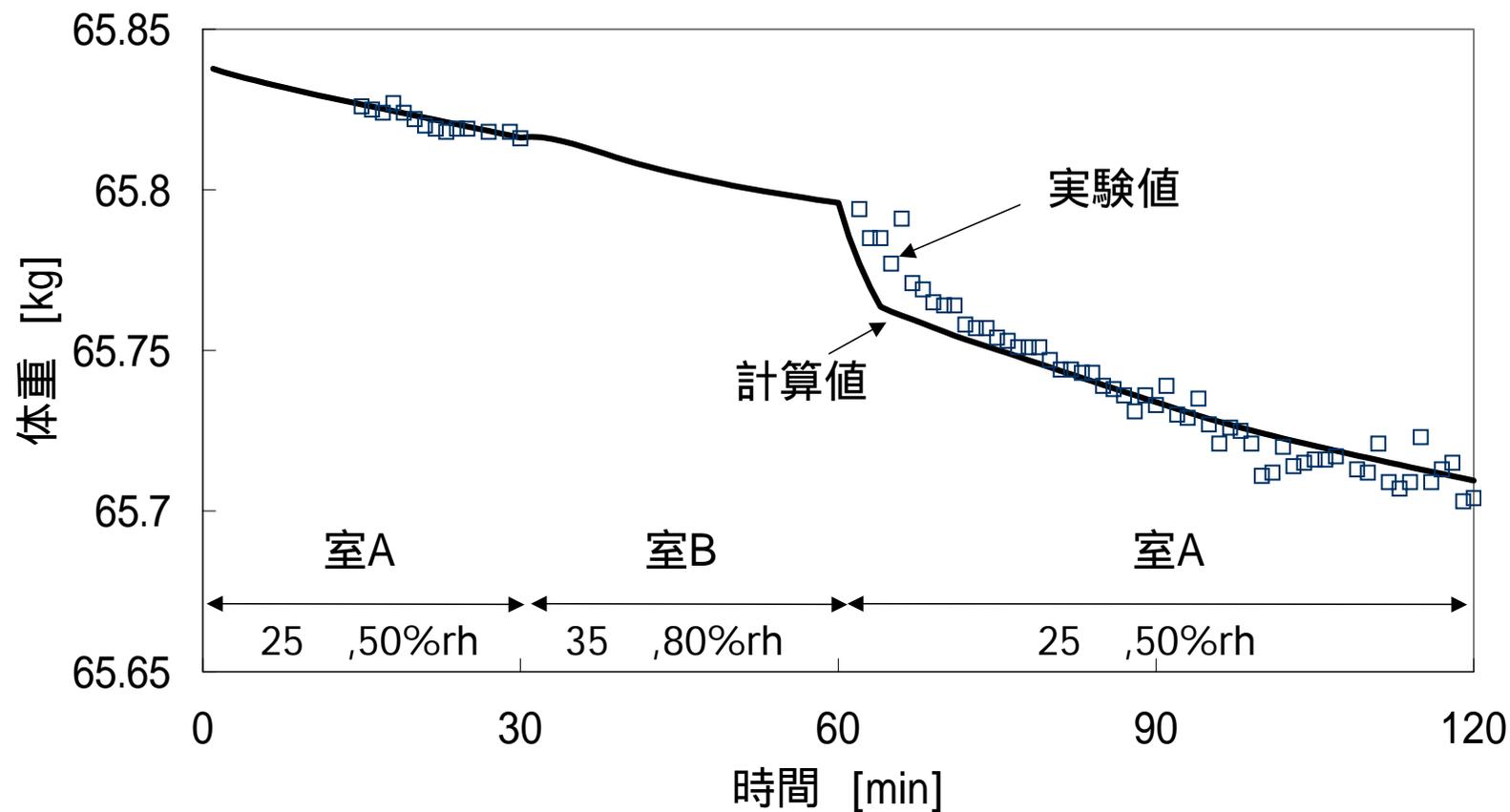




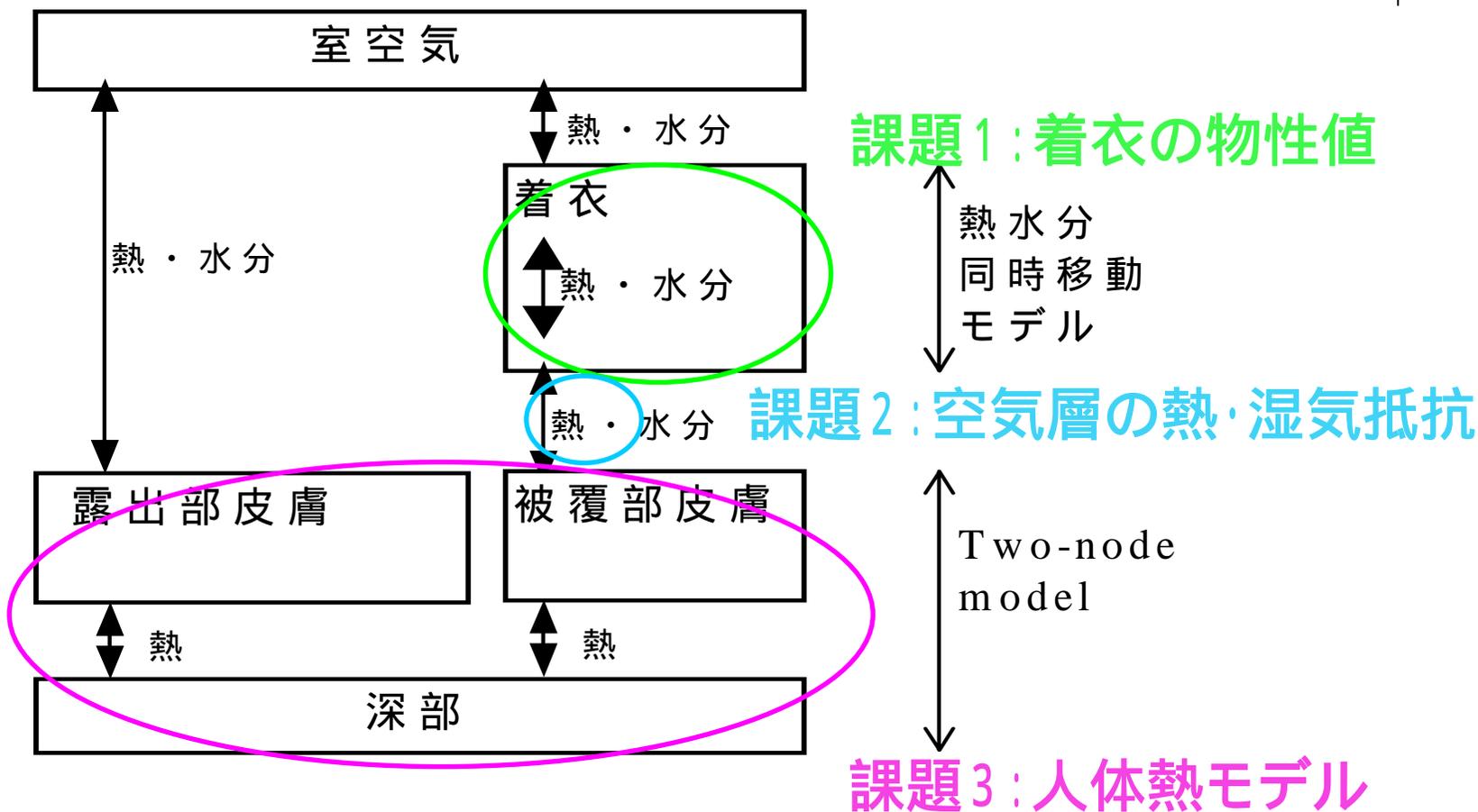
# 露出部皮膚温 (実験値と計算値の比較)



# 体重 (実験値と計算値の比較)



# 着衣 人体 非定常熱水分収支モデル





# 入浴時の体温変動予測 シャワー入浴のモデリング

# 入浴の快適性と安全性



- 入浴環境の特殊性

- 皮膚表面熱流 空気曝露時より大
  - 着衣なし
  - 対流熱伝達率 水>>空気
  - 皮膚と水の温度差(日本の場合、特に大)

- 快適性と安全性

- 実験による基礎的情報収集、および快適性の評価は進められているが、安全性の評価は十分でない(実験が困難)
- モデリングは非常に少ない(特にシャワー浴)

- シャワー時の皮膚表面熱流のモデリング

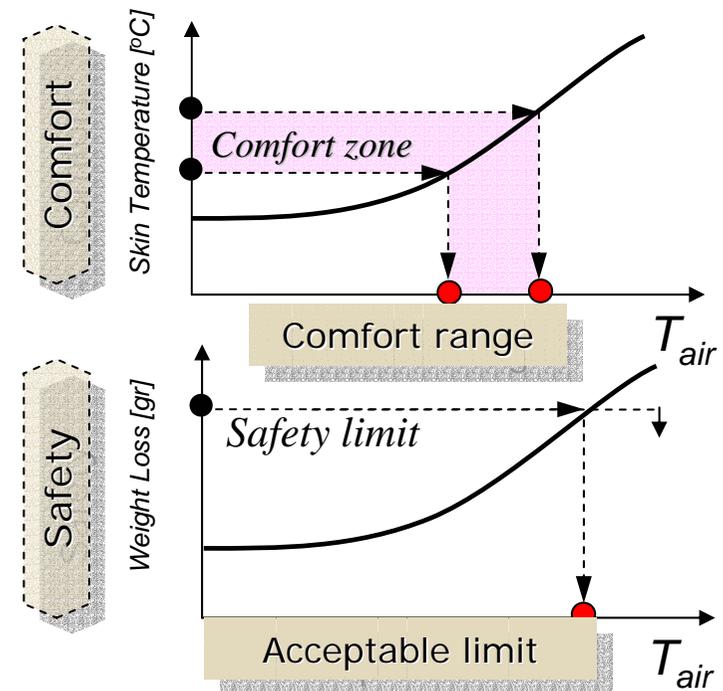
(+ 人体熱モデル)



# 入浴の快適性・安全性評価のイメージ(例)と課題

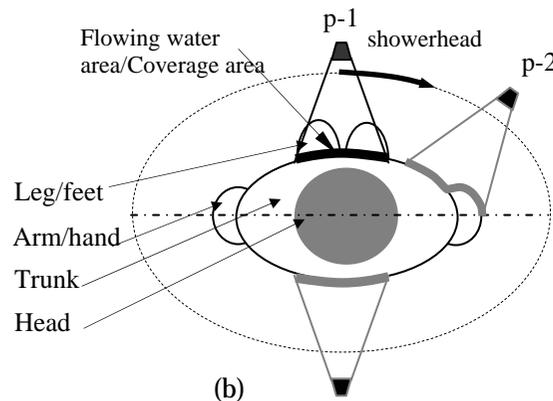
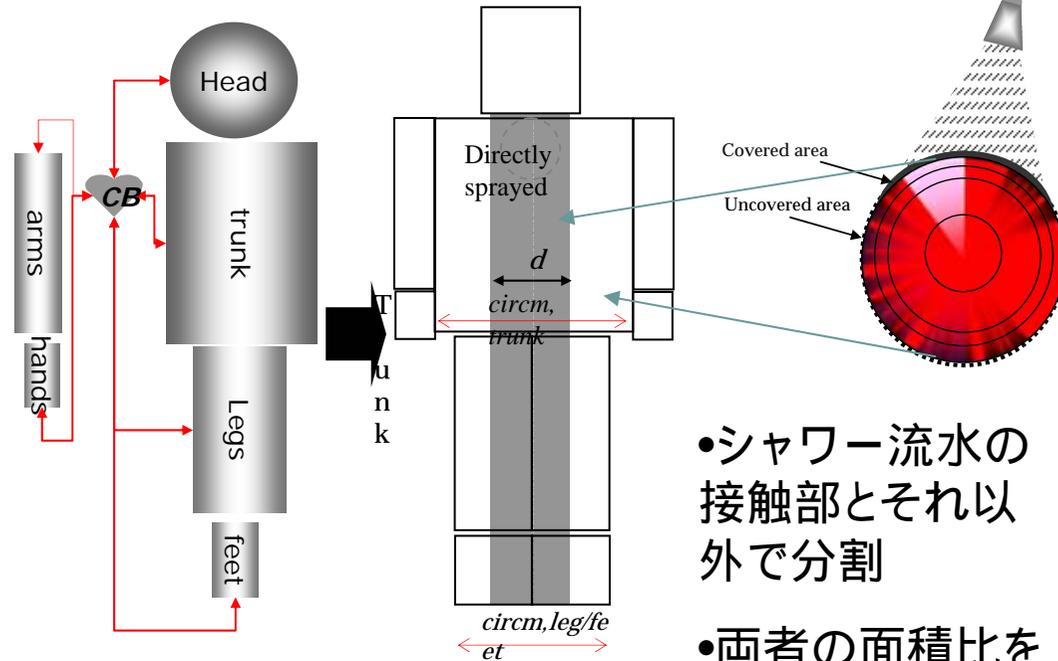


- 入浴時の生理量(体温・血流量・発汗量等)の計算結果を浴室気温との関係で整理
  - 浴室の温熱環境設計の指標
- 各生理量と快適域/許容限界の対応関係についての情報不足



# シャワー入浴時のモデル

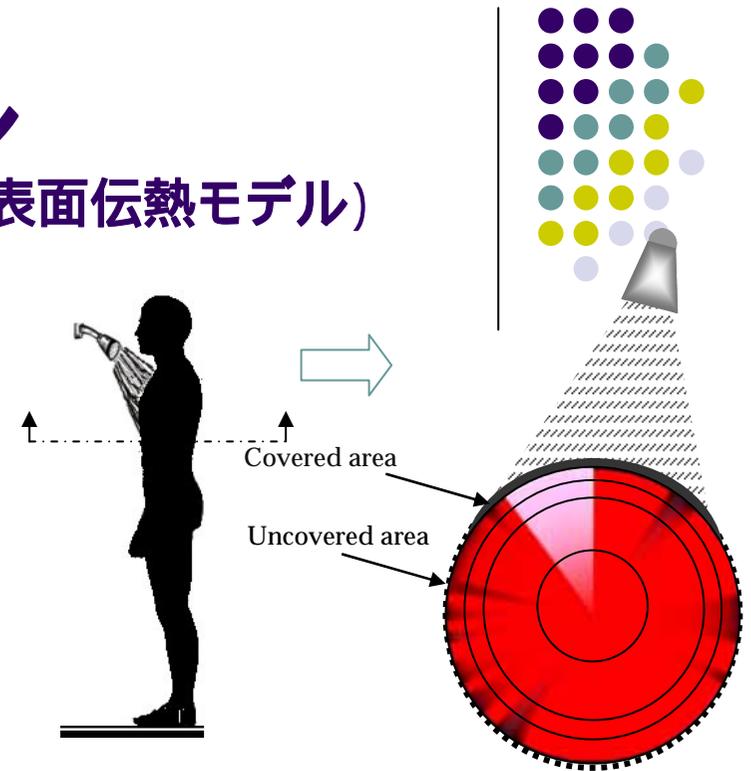
(Stolwijkの人体熱モデル+シャワー時の皮膚表面伝熱モデル)



•シャワー流水の接触部とそれ以外で分割

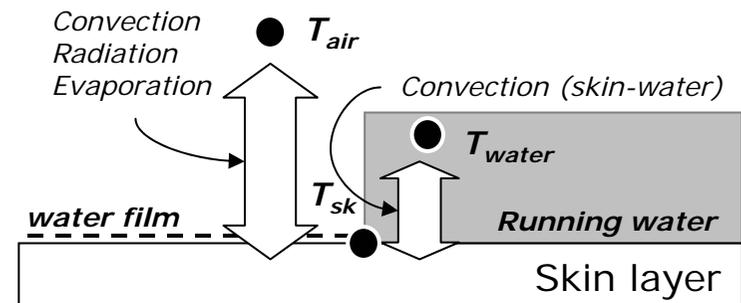
•両者の面積比を単純な幾何学的考察により決定

•シャワー流水接触部での対流熱伝達率を別途実験で求める

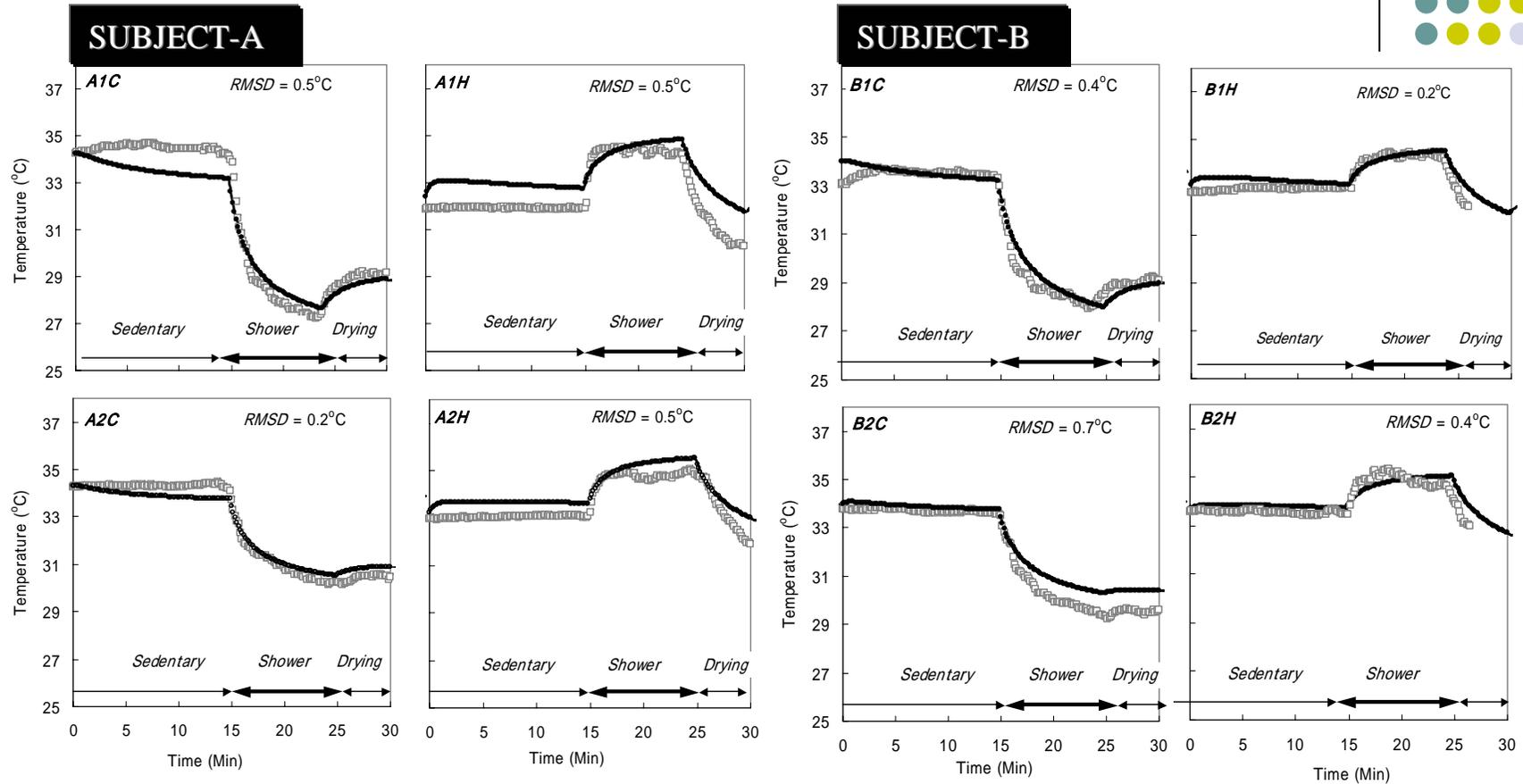


uncovered-skin  
(1- )

covered-skin  
( )



# 実験結果と計算結果の比較 (固定シャワー)



低温水シャワー

高温水シャワー

低温水シャワー

高温水シャワー

シャワー入浴時の皮膚温度変動を大略予測可能