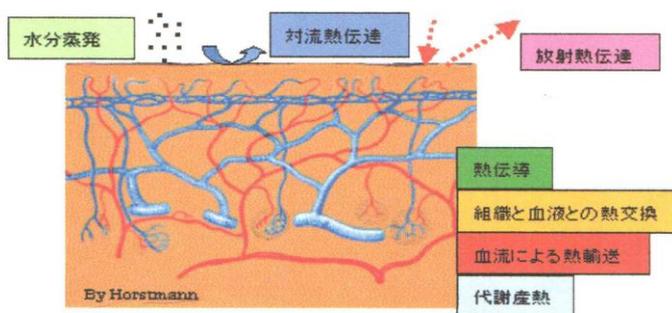


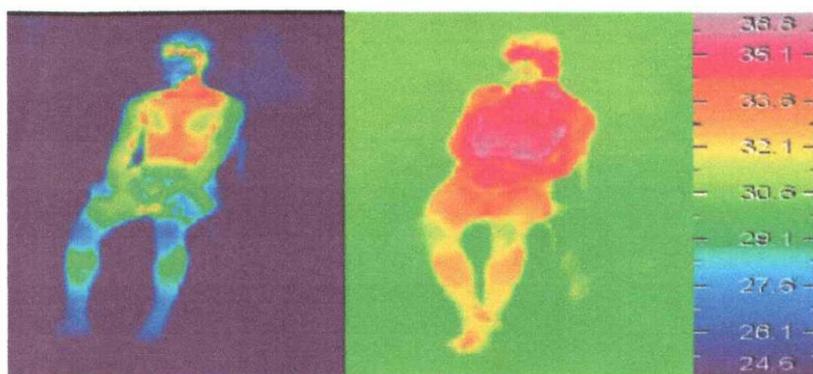
第六讲 生物传热

6.1 概要

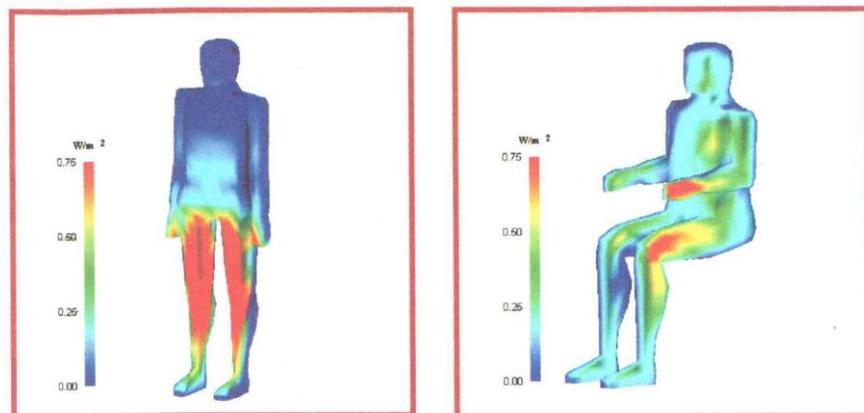
人体组织与外界的传热模式



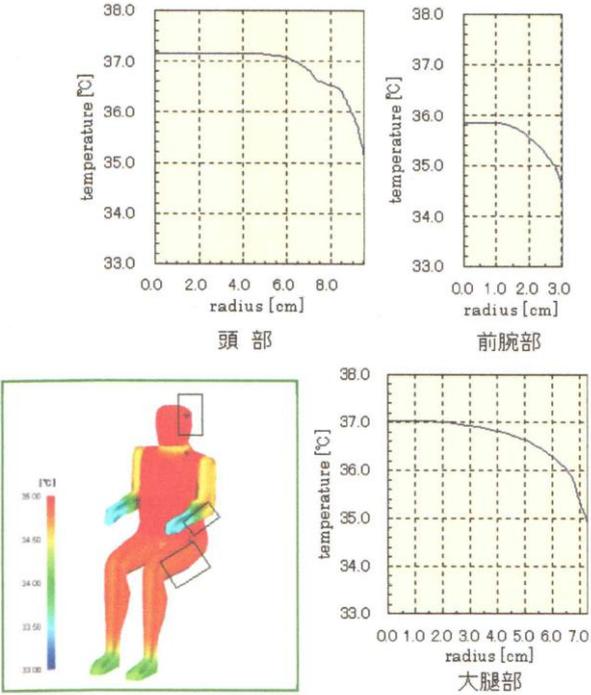
被实验者在 24 度和 30 度环境温度下的皮肤表面温度



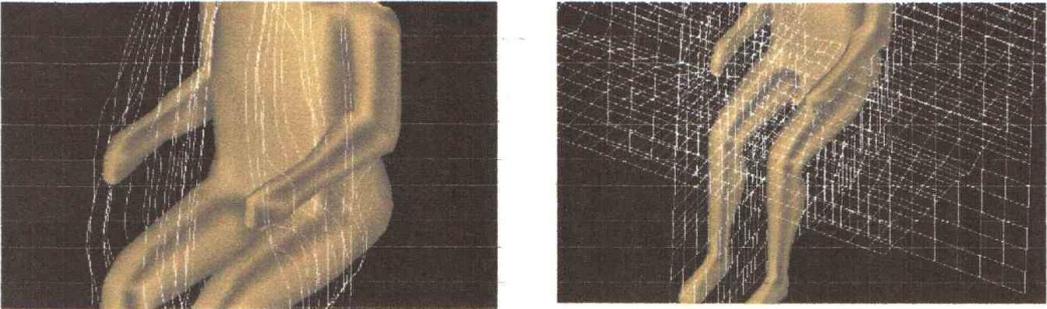
人体计算机热模型在不同环境下的皮肤温度分布



由人体热模型模拟出来的人体各部分的温度



利用人体热模型考察人体与环境的关系



安静时和劳动时人体内脏各部分所产生的热量

- ◇ 人体在安静时所产生的热量是 83.72W（每小时 72 kcal）
- ◇ 劳动时所产生的热量是安静时的 3 倍 251.16W（216 kcal）

部 位	安 静 時	劳 作 時
全 身	83.72	251.16
筋 肉	31.81	174.42
肝 臟	10.40	5.51
胃 腸	6.35	4.05
腎 臟	6.28	1.81
脾 臟	5.30	6.98
心 臟	3.70	11.16
腦	2.51	2.79
脾 臟	1.12	0.49
血 液	0.91	0.91
唾 液 腺	0.56	0.21
計	37.13	33.91

表 2-1 安静時と劳作時における各内臓の代謝量 (W)

生物传热包括两大内容

- A) 人体的热生理学
 - 人体维持体温恒定的机理
 - 人体与热环境间的关系
- B) 热能与生物组织的反应（高温和低温）

6.2 人体的体温

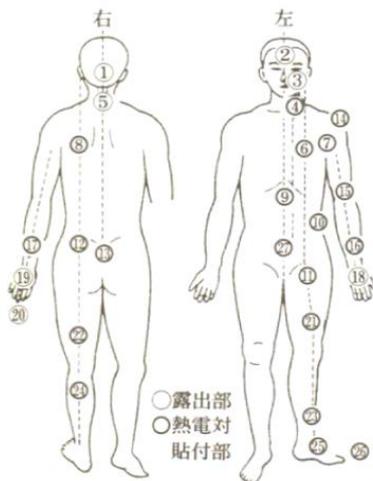
人体是恒温动物（warm-blooded animal）

深部体温： 37±1 °C

保持深部一定温度的优点：能够使身体里酶的作用保持在最佳状态，并使人体内的各种化学

反应速度保持一定。

测定皮肤温度的方法：热电偶，热阻，红外热像仪等



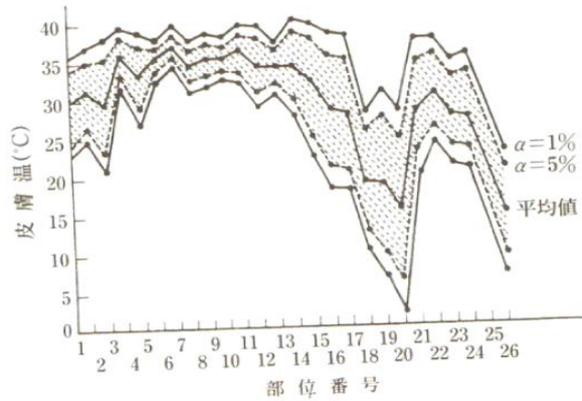
- | | |
|------------------------|------------------------------|
| ① 頭部後面中央線の後頭部 | ⑮ 前膊内面中央線上にて前膊下1/3の点 |
| ② 額中央眉上2 cm | ⑯ 前膊背面中央線下1/3 |
| ③ 眼球線鼻翼側 | ⑰ 手掌面中央線前1/4 |
| ④ 副胸骨線と鎖骨との交点直上の肩胛鎖骨三角 | ⑱ 手背中央線1/2 |
| ⑤ 第5頸骨 | ⑳ 中指末節背面 |
| ⑥ 乳腺と第4肋骨の交点 | ㉑ 大腿前面中央線上にて鼠蹊腺と膝蓋上端との間の下1/3 |
| ⑦ 腋窩 | ㉒ 大腿後面（おおむね大腿後面中央線下1/3に該当） |
| ⑧ 肩胛線肩胛棘直下 | ㉓ 下腿前面中央線にて下腿下1/3(脛骨縁の外側) |
| ⑨ 劍伏突起直下 | ㉔ 下腿後面中央線上1/3 |
| ⑩ 腹側中央の臍の高さ | ㉕ 足背中央線中心 |
| ⑪ 大腿前面中央線と鼠蹊腺との交点直下 | ㉖ 拇指末節背 |
| ⑫ 肩胛線上にて腸骨前上棘の高さ | ㉗ 臍と恥骨上縁間の中心点 |
| ⑬ 腸骨部中央 | |
| ⑭ 三角筋中央点 | |
| ⑰ 上膊下部内上髁上約1 cm | |

图 6.1 人体皮膚温度分布測定点(文部省科学研究・季節生理班, 1952)

图 6.1 表示的是热电偶在人体各部位的测点，依次是：头部，身体，上肢，下肢。图 6.2 表示的是各个部位的温度，从中可以看出：四肢的温度要小于躯干的温度，头部和躯干的皮肤温度差距较小，手指的温度最低。

图 6.5 表示的是在不同环境温度下，人体内部和体表的温度分布。在正常的环境温度下，身体的大部分区域都保持在 37 °C，温度的变化主要集中在皮肤和皮下组织部分。当收到冷刺激后，躯干和头部的大部分区域仍保持 37 °C，四肢的温度明显降低，温度变化的范围扩大。

图 15 和 16 是 Pennes1948 年发表在生理学杂志上的结果.图 15 是实验测得的上肢截面的温度分布曲线,16 是理论分析结果.图 6 中的 V 表示的是血液灌注率,结果表明,当灌注率为零时,上肢温度远小于实测值,而当灌注率不为零时,理论分析值与实测值相近,而且,随着灌注率的增加,温度也随着上升. Pennes 在这篇文章中所推导的公式至今仍然被广泛应用,就是著名的 Pennes 生物传热方程。



- | | | | | | |
|-------|-------|-----------|---------|-----------|-----------|
| 1 後頭部 | 6 胸 | 11 大腿前面上部 | 16 前腕内面 | 21 大腿前面下部 | 26 足第1指背面 |
| 2 額 | 7 腋窩 | 12 側腰 | 17 前腕背面 | 22 大腿後面下部 | |
| 3 頬 | 8 背 | 13 腰 | 18 手掌 | 23 下腿前面 | |
| 4 頸 | 9 上腹 | 14 肩 | 19 手背 | 24 下腿後面 | |
| 5 項 | 10 側腹 | 15 上腕 | 20 中指指面 | 25 足背 | |
- 標本数 $N=34$, 環境気温 $7.0 \pm 3^\circ\text{C}$

図 6.2 冬期の皮膚温の平均値と棄却限界(文部省科学研究・季節生理班, 1952)

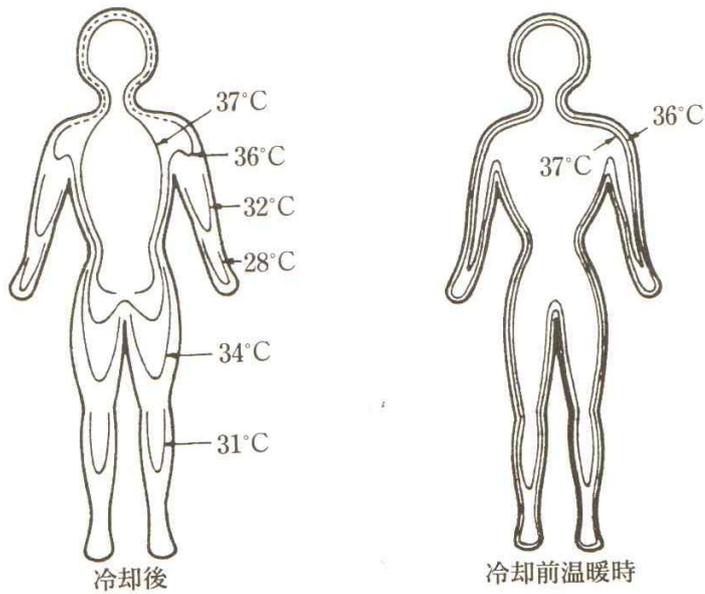


図 6.5 身体冷却時の体内温度勾配 (Aschoff and Weber, 1958)

Pennes 关于上肢的测量和理论分析结果。

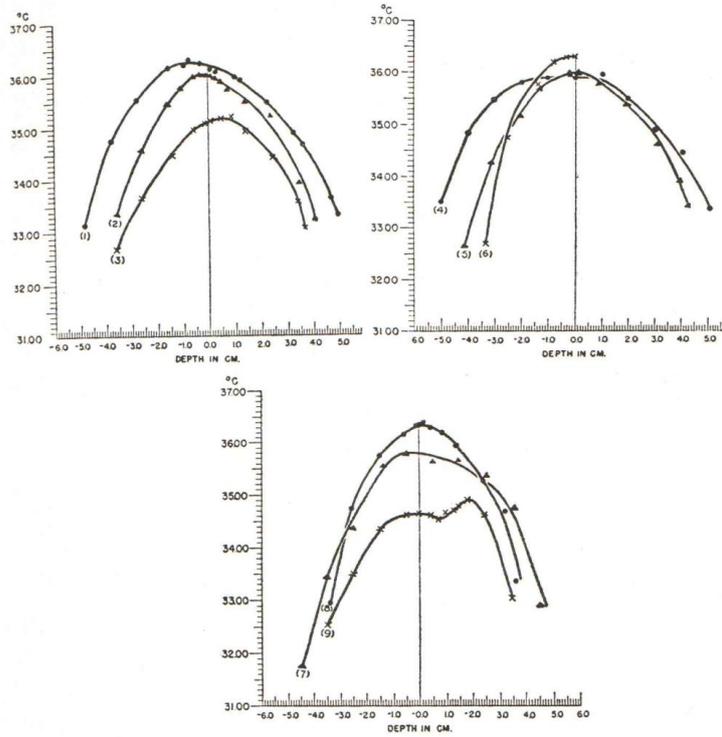


Fig. 15. TISSUE TEMPERATURE-DEPTH CURVES in 9 subjects; plane I, transverse axis of forearm. See text section VI. Room temperatures: curve 1, 26.5°; 2, 26.6°; 3, 26.1°; 4, 26.7°; 5, 26.3°; 6, 27.4°; 7, 26.3°; 8, 26.7°; 9, 27.1°. The negative abscissa values represent the lateral side of the forearm, and the positive values the medial side.

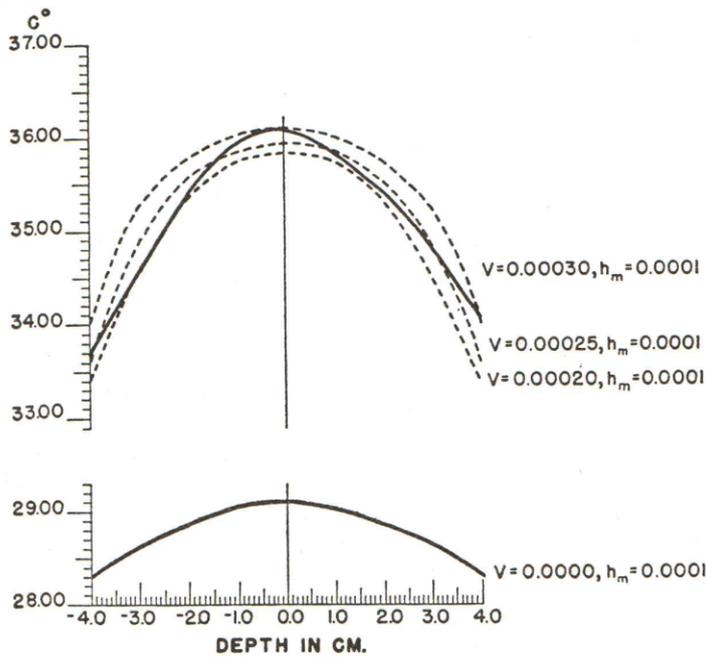


Fig. 16. MEAN EXPERIMENTAL and theoretical curves.

6.3 人体与环境的热交换

人体与环境的热交换途径:

- ◇ 热传导
- ◇ 对流换热
- ◇ 热辐射
- ◇ 蒸发散热
- ◇ 由呼吸引起的散热

6.3.1 热传导:

$$q = -\lambda_s \frac{dT_s}{dn} \quad \text{傅里叶传导法则} \quad (6.1)$$

λ_s — 皮肤的热传导率 单位 W/mK

T_s — 皮肤温度

6.3.2 皮肤与周围流体的对流换热

$$q = h_c (T_s - T_a) \quad \text{牛顿冷却定律} \quad (6.2)$$

h_c — 对流换热系数 W/m²K

T_s — 皮肤温度 T_a — 流体温度

在强制对流换热下, h_c 由风速确定。自然对流时, h_c 由温度差决定。对流换热系数还由形状决定, 代表尺寸越小, 对流换热率越大。

表 6.1 给出了各种物质的热传导率。可以看到, 热传导率基本上是由金属—) 非金属—) 纺织物逐渐递减。

表 6.4 给出了人体在不同状态时的对流换热系数, 而图 6.6a 给出了对流换热系数随人体步行速度的变化曲线。可以看出, 对流换热系数和周围环境的气流速度和人体自身的状态相关。

图 6.6b 是人体不同部位的对流换热系数, 可以看出头, 脚, 手的部位换热系数较大。

6.3.3 热辐射

$$Q_r = \varepsilon_s \varepsilon_e \sigma \{ (T_{sm} + 273.15)^4 - (T_{em} + 273.15)^4 \} \quad (6.3)$$

ε_s -- 皮肤的放射率 0.98

ε_e -- 周围环境的平均放射率

σ -- Stephan-Boltzman law, Stephan-Boltzman constant

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad W / m^2 K^4$$

6.3.4 由蒸发引起的换热

$$Q_e = h_e(P_s - P_a) \approx 2.2h_c(P_s - P_a) = 2.2h_c(P_s^* - P_a) \quad w \quad (6.4)$$

h_e 物质的换热系数 (W/m² mmHg)

P_s --皮肤的水蒸气分压

P_a --环境的水蒸气分压, 可由蒸气表查得。

h_c ---对流换热系数

P_s^* --对应于皮肤温度的饱和水蒸气分压 (mmHg), 可由蒸气表查得

6.3.4 伴随呼吸的换热

伴随呼吸的换热量是由呼气和吸气所产生的能量差而定

$$Q_{res} = V_e i_e - V_a i_a \quad (6.5)$$

$$i_a = 0.240T_a + X_a(597.3 + 0.441T_a)$$

$$i_e = (0.200F_{eO_2} + 0.204F_{eCO_2} + 0.249F_{eN_2})T_e + X_e(597.3 + 0.441T_e) \quad (6.6)$$

V_e V_a : 分别为呼气和吸气量 单位: kg (dry air) /h

i_e i_a : 分别为呼气和吸气时的焓 单位: kcal/kg (dry air)

T_a X_a : 吸气温度和吸气绝对湿度 kg/kg (dry air)

F_{eO_2} F_{eCO_2} F_{eN_2} : 呼气时 O₂ 的重量比, 呼气时 CO₂ 的重量比, 呼气时非活性气体的重量比。在 i_e i_a 公式中的系数 0.240, 0.2, 0.204 和 0.249 分别是大气, 氧, CO₂ 和非活性气体的定压比热。

通常, 呼气量可以实测, 而且, 不活性气体的重量不会改变, 那么吸气量可以由下式得到

$$V_e F_{eN_2} = V_a F_{aN_2} \quad (6.7)$$

Fanger(1970) 提出了另一种经验公式计算伴随呼吸的换热量

$$Q_{res} = V_e \{575(X_e - X_a) + 0.24(T_e - T_a)\} \quad V_e = 0.0060M \quad M -- 总代谢量$$

(6.8)

$$Q_{res} = 0.0023M(44 - P_a) + 0.0014M(34 - T_a) \quad (6.9)$$

图 6.9 表示的是呼吸换热量和总代谢量的相互关系。图 6.11 表示的是根据不同经验公式计算出来的呼吸换热量。

表 6.3 各種物質の熱伝導率λ (kcal/mh°C)

空 気	0.0204	氷	1.5
羊 毛	0.033	ガラス	0.4~0.9
絹	0.034	煉瓦壁	0.60~0.75
木 綿	0.048	磁 器	0.7~0.9
紙	0.04~0.06	鉄筋コンクリート	1.3
フェルト	0.03~0.07	土 壤	2.0
麻	0.072	自然石	2.5
木 材	0.082~0.18	水 銀	6.5
なめし皮	0.14	鉛	30
牛 脂	0.15	鉄	56
皮 膚	0.18	銅	320
鮮 肉	0.43	銀	360
水	0.514		

表 6.4 平均対流熱伝達率(kcal/m²h°C)と気流, 歩行速度(m/sec)の関係

平均対流熱伝達率	状 態	備 考
$h_c = 10v^{0.5}$	座 位	室内気流は熱線風速計にて測定
$h_c = 5.6v_{tw}^{0.39}$	トレッドミル上歩行	v_{tw} は室内におかれたトレッドミル速度
$h_c = 7.4v_{fw}^{0.53}$	歩 行	v_{fw} は室内における歩行速度
$h_c = 7.4v_{fw}^{0.53} + 1.7v_a^{0.86}$	歩 行	気流 v_a に向かって歩行

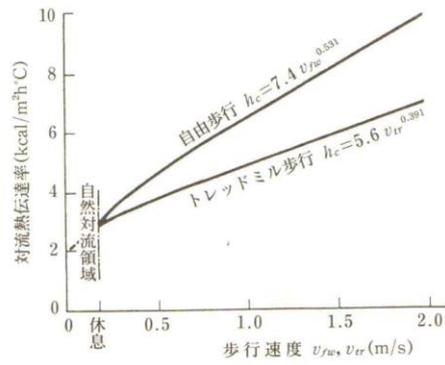


図 6.6 (a) 人体の対流熱伝達率の推定例(1)(西, 1981)
自由歩行, トレッドミル歩行時における平均対流熱伝達率(kcal/m²h°C)

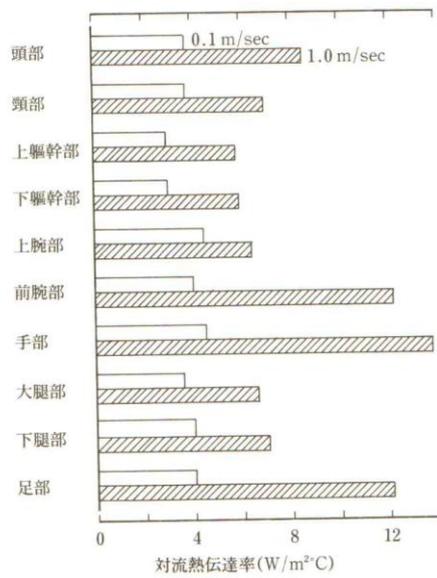


図 6.6 (b) 人体の対流熱伝達率の推定例(2)
気流 0.1 m/sec と 1.0 m/sec における各部位の対流熱伝達率(W/m²°C)

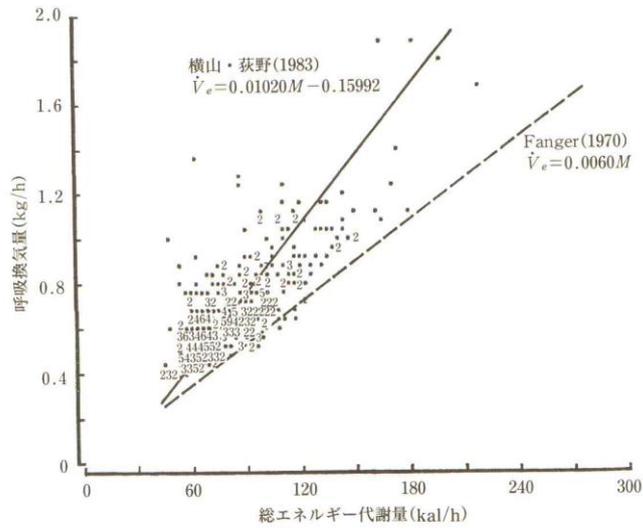


図 6.9 呼気量 (V_e) と総代謝量 (M) との関係 (Yokoyama and Ogino, 1983)

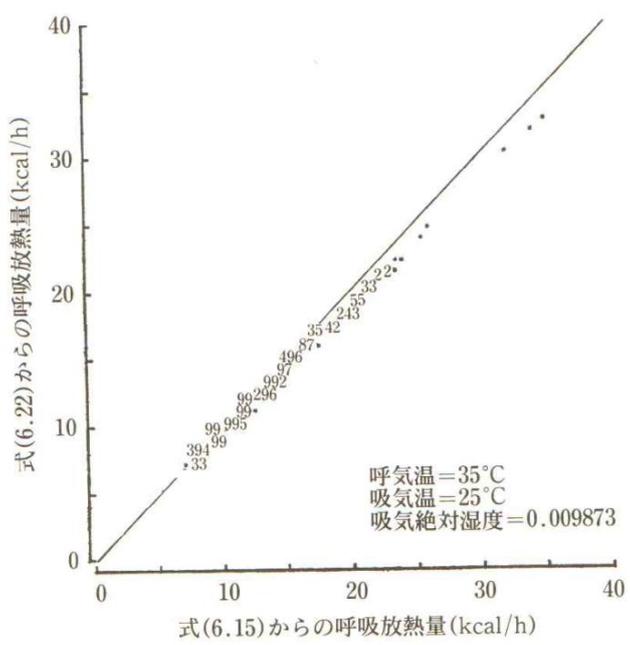


図 6.11 方程式(6.15)と式(6.20)による呼吸放熱量の比較 (Yokoyama and Ogino, 1983)

6.4 生物体的物性値

測定方法：通过測定尸体组织的切片或者用其他哺乳类的切片进行測定。这一測定方法的缺点是：未考虑血流，未考虑各向异性（例如：肌肉组织，沿肌肉纤维方向热传导率非常卓越）

6.5 穿衣状态下的热阻和湿气阻抗

衣服与人体之间的热阻，湿气阻抗，热容量和湿气容量对人体体温调节起着重要作用。图 6.13 列出了各种材料衣服的热阻，单位 $1\text{clo}=0.18\text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$

表 6.13 衣服の熱抵抗 (clo 値)

男 子 用			女 子 用		
衣 服 名	重 量 (g)	clo 値	衣 服 名	重 量 (g)	clo 値
背広上衣(薄)	567	0.35	ドレス(薄・裏地付)	150	0.17
背広上衣(厚)	848	0.49	ドレス(厚)	1,180	0.63
長そでシャツ	201	0.29	長そでブラウス(薄)	85	0.20
半そでシャツ	167	0.19	長そでブラウス(厚)	167	0.29
長そでニットシャツ(薄)	196	0.24	半そでブラウス(薄)	88	0.17
長そでニットシャツ(厚)	301	0.37	ジャケットブレザー(薄)	510	0.31
半そでニットシャツ(薄)	201	0.22	ジャケットブレザー(厚)	709	0.43
半そでニットシャツ(厚)	293	0.26	そでなしセーター(薄)	173	0.17
ズボン(薄)	332	0.26	長そでセーター(厚)	301	0.37
ズボン(厚)	513	0.32	ベスト(薄)	193	0.20
ランニングシャツ	85	0.08	ショール(薄)	227	0.30
半そでアンダーシャツ	99	0.09	スラックス(薄)	162	0.26
ブリーフ	57	0.06	スラックス(厚)	621	0.44
ソックス(薄)	57	0.03	スカート(厚・裏地付)	422	0.22
ソックス(厚)	113	0.04	長スリッパ		0.19
短靴	459	0.04	フグジャーヒパンタイ		0.04
オーバー(ナイロン・綿)	454~510	0.55	パンタイストッキング		0.01
			タイツ(厚)	113	0.06
			ガードル		0.04
			靴	284	0.03
			オーバー(ナイロン・綿)	454~510	0.55

Nevins, G.R. et al. ASHRAE, J. (April): 41, 1974より抜粋

穿衣状态时由皮肤所散出的热量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)

$$H_d = H_c + H_r = \frac{1}{0.18I_{clo}} (T_s - T_{clo}) \quad (6.10)$$

I_{clo} : 穿衣状态时的热阻

T_s, T_{clo} : 分别为皮肤温度和穿衣时衣服表面的温度 ($^\circ\text{C}$)

H_d : 无蒸发时的放热量

H_c : 对流换热量

H_r : 辐射发热量

$$H_e = \frac{1}{0.18I_{clo}\eta/2.2 + 1/2.2h_c} (P_s - P_a) \quad (6.11)$$

h_c : 对流换热系数 (kcal/m²h°C)

P_s : 皮肤的水蒸气分压 (mmHg)

P_a : 环境的水蒸气分压 (mmHg)

I_{clo} : 穿衣时的热阻 (clo)

η : 透湿系数 $\eta \approx 1.62(0.18I_{clo})^{1/8}$

6.6 生物体内的传热问题

6.6.1 与生物传热相关的应用

- ◇ 人体体温调节
- ◇ 基于热能的外科手术 (激光, 射频 RF, 微波, 超声波)
- ◇ 低温保存, 低温手术 (cryopreservation)
- ◇ 热损伤

6.6.2 生物传热的数学模型

生物组织内传热问题的难点: 非均质性, 各项异性。

原因: 存在血管网络系统, 有血流, 基础代谢以及体液的流动

Pennes bioheat equation

$$\rho_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla(k_t \nabla T_t) + q_{met} + \omega \rho_b c_b (T_a - T_v) \quad (6.12)$$

1- $\rho_t c_t$, 2- q_{met} , 3- $\rho_b c_b$, 4- k_t , 5- ω , 6- T_a , 7- T_v

- 1- volumetric specific heat of tissue 组织的体积比热
- 2- metabolic heat generation 由新陈代谢所产生的热量
- 3- volumetric specific heat of blood 血液的体积比热
- 4- thermal conductivity of tissue 组织的热传导率
- 5- blood perfusion rate 血液灌注率
- 6- temperature of artery 进入组织的动脉血液温度
- 7- temperature of vein, which is assumed to be equal to the local tissue temperature 流出组织的静脉血液温度

与普通热传导方程相比, 增加了一项散热项。在方程中

假定: 进入组织深部的血液温度为动脉血液温度, 离开组织的温度与组织温度达到平衡

优点: 简单, 易于分析; 应用非常广泛。

缺点:

1. 组织的血液灌注率较难确定

2. 公式中认为组织各部分的血液灌注率相同，实际上，各部分组织的灌注率不同
3. 在毛细血管层面，静脉温度和组织温度相等的假设是合理的，但在大血管部位，这一假设会有偏差。

例题：试着求解中心部温度 T_c 和皮肤温度 T_s 之间的温度分布。设定中心至表面的距离为 δ 。

解：由一维稳态，无代谢产热情况下的生物热传导方程为

$$0 = k_t \frac{d^2 T_t}{dx^2} + \omega \rho_b c_b (T_c - T_t) \quad (6.13)$$

边界条件

$$T(0) = T_c \quad T(\delta) = T_s$$

对方程无量纲化

$$\theta = \frac{T_t - T_c}{T_s - T_c} \quad \eta = \frac{x}{\delta}$$

这样方程变为 $\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \delta^2 \theta = 0$ （二阶其次方程的标准形式） (6.14)

这里 $m^2 = \frac{\omega \rho_b c_b}{k_t}$

边界条件变为 $\theta(0) = 0 \quad \theta(1) = 1$

方程的一般解为

$$\theta(\eta) = C_1 \exp(m\delta\eta) + C_2 \exp(-m\delta\eta) \quad (6.15)$$

将两个边界条件带入一般解，得到

$$\theta(\eta) = \frac{\exp(m\delta\eta) - \exp(-m\delta\eta)}{\exp(m\delta) - \exp(-m\delta)} \quad (6.16)$$

思考：画出 6.16 的图线，并与常规的热传导方程的结果相比较。例：

$\rho = 1056 \text{ kg/cm}^3$ $k_t = 0.293 \text{ W/mK}$

$c = 3.78 \text{ KJ/kgK}$

$\omega = 24 \text{ ml/100ml skin/min}$

$\delta = 3 \text{ mm}$