

個人差を考慮した体温調節モデルの検討

垣 鏑 直

キーワード：1) 体温調節, 2) 蓄熱量, 3) 体組成, 4) 放受熱量, 5) マネキン, 6) カロリメータ, 7) 熱・湿気同時移動, 8) 代謝量, 9) 体表面積, 10) 皮膚温

1. 研究の目的

最近では、オフィスビルにおける室内環境の快適性の研究が進められ、その成果が空気調和設備などに生かされている。しかし、不特定の在室者を対象として評価基準が定められており、特定の集団（高齢者、幼児、身障者など）は対象としていないのが現状である。室内環境設計において、集団による違い、ひいては個人による違いをいかに組み込むかという問題は、環境工学の分野における重要なテーマとなっている。特に、住宅における室内環境の快適性の問題は、個人の問題に行き着くはずである。そこで、個人差を考慮した体温調節モデルを構築することが、問題の解決の糸口になると考えられる。

これまでの熱収支理論には、個人の熱的特性は反映されていない。そのことを踏まえると、応用性があり且つ信頼性の高いモデルや理論の構築が必要になってきている。そこで、これまで従来の温熱環境評価法の信頼性を検討した。研究成果としては、微風速域の人体の対流熱伝達率に新しい要素を導入して定義し、対流及び蒸発による熱収支量の算定法を提案したり¹⁾、非対称放射の人体への影響局所放射の影響^{2), 3)}などが挙げられる。本研究は、これまでの研究を基礎に個々の被験者の体組成と蓄熱量や放受熱量の関係を定量的に評価し、そのデータに基づいて体温調節モデルとしての蒸汗マネキンを試作することが目的である。

2. 人体の部位別放熱量の測定

個人差を考慮した体温調節モデルを検討するに当たり、個人差を量的に評価する必要がある。そこで、最初に体組成を個人差の特性として捉え、モデル作成の基礎データとして必要な人体放熱量・蓄熱量を測定するためにカロリメータを試作し、部位別の放熱量を測定することとした。

2.1 実験内容及び方法

2.1.1 被験者の体格及び体組成の評価

被験者は、豊田高専建築学科の最終学年の男子学生9名、女子学生10名を対象とした。被験者の体格及び体組成を人体計測法に従って計測した。体重はデジタル精密

体重計（UC-300, A&D社）で、身長は伸縮式ハンドル身長計（YG-200, ヤガミ）で測定し、身体各部位の代表的な周長幅、長さをマルチン式人体測定器を用いて測定した。さらに、肥満度を評価するために8カ所の皮下脂肪を皮下脂肪厚計（MK-60, ヤガミ）を用いて測定した。

2.1.2 カロリメータの試作

試作したカロリメータの外枠は、厚さ25mmの断熱材を内装した内寸が縦1500mm、横991mm、深さ448mmのステンレス製の矩形ボックスで、上部は片開きの扉を取り付け、頭部及び頸部を除く身体を納められるようになっている。内部は、断熱材を内装した仕切板により、胸部、臀部と大腿部、下腿部、両腕に分割できる構造にした。

各コンパートメントの仕切板は、首や手足の横断する開口部の気密性を確保することと血流を妨げない必要があったので、接触面表面はソフトラバーで仕上げた。

供給側には最大流量70 l/minのコンプレッサーを2基並列に熱交換器に接続し、その後流側に20 lの耐圧タンクを配置した。タンクには5つの浮き子式流量計を取り付け、各コンパートメントへの供給空気量を調節した。また、マスフロー（SEF, エステック社）を流量計の後流側に組み込み、供給空気量をオンラインでモニターできるようにした。供給空気は、各コンパートメントの床

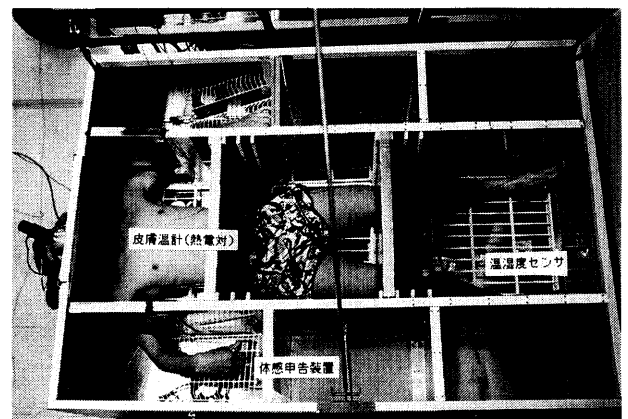


写真2-1 カロリメータ内の被験者

面に配置した開口部 (12mm φ) から供給され、扉の開口部 (12mm φ) から排気されるようにした。被験者は、カロリーメータ内で仰臥位になるので、身体と床が密着しないように鋼製のすのこを敷いた。写真 2-1 にカロリーメータとカロリーメータ内の被験者の全景を示す。

2.1.3 測定項目及び測定機器

実験は、豊田高専建築学科に設置された人工気象室内で行った。カロリーメータ内では1時間の曝露を行った。被験者は1日に1回、日を分けて2回の実験に参加し、実験の2時間前からの飲食は禁止された。人工気象室内の温湿度条件は25℃、40%と30℃、40%の2条件とした。以下に、測定項目毎に列挙する。

①代謝量

代謝量を測定するために、被験者に流量計が組み込まれた呼吸用マスクを介して呼吸させ、酸素消費量、分時換気量をエアロモニタ (AE-280S, ミナト医科学) で連続測定した。各々の期間の平均値を求め、以下の式から代謝量 (M, W/m²) を求めた。結果を表 2-1 に示す。

$$M = \frac{(0.773 + 0.128 \times RQ) \times 5.047 \times VO_2 \times 60}{A_D} \dots\dots(1)$$

ここに、RQ : 呼吸商 (N.D.)

A_D : 体表面積 (m²)

表 2-1(a) 酸素消費量と代謝量 (男子被験者)

被験者番号	VO ₂ (L/min)	VCO ₂ (L/min)	V _e (L/min)	A _D (m ²)	M(W/m ²)
A	221	187	6.23	1.73	28.2
	218	168	5.89	1.73	28.6
B	218	176	8.17	1.63	28.0
	238	156	6.99	1.63	29.2
C	267	196	8.45	1.68	35.9
	285	227	8.71	1.68	38.6
D	272	220	9.60	1.68	37.8
	254	181	7.53	1.68	34.1
E	205	161	6.60	1.66	28.1
	232	179	7.08	1.66	31.7
F	331	214	9.62	1.78	41.5
	388	222	10.78	1.78	48.1
G	328	178	7.98	1.58	45.6
	326	179	7.55	1.58	46.2
H	346	222	9.16	1.69	45.6
	374	202	8.49	1.69	48.5
I	317	204	9.47	1.62	43.6
	296	199	9.73	1.62	40.9

表 2-1(b) 酸素消費量と代謝量 (女子被験者)

被験者番号	VO ₂ (L/min)	VCO ₂ (L/min)	V _e (L/min)	A _D (m ²)	M(W/m ²)
A	187	128	8.46	1.42	38.1
	191	138	7.16	1.42	32.1
B	282	176	8.40	1.69	37.1
	217	164	7.06	1.69	29.1
C	186	147	6.67	1.52	27.9
	229	169	7.14	1.52	34.1
D	203	145	7.27	1.38	33.1
	179	147	6.39	1.38	21.1
E	184	133	4.86	1.36	30.5
	238	164	8.00	1.36	39.1
F	258	183	8.20	1.57	37.0
	233	145	7.26	1.57	32.0
G	226	81	4.24	1.48	32.7
	203	127	6.41	1.48	30.4
H	208	167	10.3	1.52	31.2
	187	115	6.15	1.52	27.3
I	215	81	4.20	1.57	29.4
	199	138	6.72	1.57	28.6
J	203	79	4.30	1.50	29.1
	205	100	5.71	1.50	29.8

VO₂: 酸素消費量 VCO₂: 二酸化炭素発生量 V_e: 分時換気量
A_D: 体表面積 M: 代謝量

VO₂: 酸素消費量 (l/min)

但し、呼吸商は下式で定義されている。

$$RQ = \frac{VCO_2}{VO_2} \dots\dots(2)$$

また、体表面積は、最近日本人を対象に提案された倉澄の式⁴⁾を用いて算出した。

$$A_D = 100.315 \times W^{0.383} \times H^{0.693} \dots\dots(3)$$

ここに、W: 体重 (kg) H: 身長 (cm)

②鼓膜温度、皮膚温

身体深部温度として鼓膜温度を測定した。鼓膜温度センサ (センサテクニカ) を1/100温度トレーサ (テクノセブン, D641) を接続した。また、皮膚温は熱電対を用いて、左上腕、左手背、左下腿、左足背、胸部、右上腕、左大腿の7カ所を測定した。

③頭部の熱収支量

頭部からの放熱は、熱流計 (京都電子) と試作した蒸汗計⁵⁾を額に取り付けて測定した。

④コンパートメントの熱収支量

外枠と仕切板は断熱材を使用しており、表面はステンレス板で仕上げられているので、理論的には人体と壁面との間の放射熱収支量は無視できる。予備実験で壁面に熱流計を貼り付けて測定した結果、初期時には±1.7~2.7W/m²の放射熱収支量を記録したが、数分後には±0.09~0.27W/m²に減少し安定した。周壁面積が1.5~2.0m²なので単位時間当たりの熱収支量に換算しても無視し得ることを確かめた。従って、コンパートメント毎に分割された身体部位からの放熱量は、供給空気と排気空気のエンタルピー差とコンパートメント内の空気のエンタルピーの変化量から求めることができる。そこで、出入り空気の温湿度と空気流量を測定した。給気口と排気口に温湿度センサ (ヒューミキャップ HMP35A, バイサラ) を取り付け、流量は給気口の上流側に組み込んだマスフローメータ (RF-20, エステック) で連続して測定した。

⑤空隙量

コンパートメント内の空気のエンタルピーを求めるためには、被験者が存在している時のカロリーメータ内の空隙の容積を知る必要がある。また、空隙量から曝露部位の体積が求められる。空隙量 V (cc) は、微量の炭酸ガス (200cc) を注入する前後の濃度を下式に代入し換算した。

$$V = 0.01 \times (ICO_2\% - LCO_2\%) / 200(cc) \dots\dots(4)$$

ここに、ICO₂% : 注入前の濃度 (%)

LCO₂% : 注入後の濃度 (%)

各コンパートメントの容積から空隙量を差し引いた値が関与する人体部位の体積となる。全身の体積は体重と体密度から求められるので、腕、胴部、大腿、下肢、頭

部の体積及び全身の体積に対する体積率を求め、さらに体積率から面積率も見積もった。

②～④の測定は、出力をデータロガー (CADAC60, 江藤電気) に取り込み、さらに RS232C を介してパーソナルコンピュータ転送してオンラインで収録した。

2.2 実験結果

2.2.1 被験者の体格及び体組成の特徴

表 2-2 に身長, 体重, 体表面積, 体脂肪率, 脂肪組織率を示す。脂肪組織率は体脂肪率や身長などから算出でき, 皮下脂肪の体重に対する重量比に等しく, 体組成を考慮した蓄熱量を算出するための重要な指標となる。また, 人体計測の結果から, 被験者の体格を評価するた

表 2-2(a) 男子被験者の資料

被験者番号	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	$A_p(m^2)$	体脂肪率(%)	脂肪組織率(N, D)
A	20	167.6	65.6	1.73	21.0	0.27
B	21	169.7	54.9	1.63	16.5	0.25
C	20	172.1	57.6	1.68	21.9	0.33
D	21	167.0	61.4	1.68	18.3	0.26
E	20	167.5	58.35	1.66	21.9	0.27
F	17	173.2	66.3	1.78	15.2	0.20
G	18	158.2	57.55	1.58	22.8	0.31
H	18	168.1	60.8	1.69	18.8	0.25
I	19	161.3	59.1	1.62	17.9	0.27
平均±SD	19.3±1.3	167.2±4.5	60.2±3.6	1.67±0.06	19.4±2.5	0.27±0.035

表 2-2(b) 女子被験者の資料

被験者番号	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	$A_p(m^2)$	体脂肪率(%)	脂肪組織率(N, D)
A	20	153.0	45.90	1.42	22.0	0.29
B	20	169.7	60.55	1.69	21.4	0.29
C	20	159.9	50.75	1.52	29.7	0.42
D	20	151.6	43.55	1.38	26.0	0.32
E	19	154.8	40.35	1.36	16.1	0.37
F	17	158.4	56.05	1.57	33.4	0.51
G	17	153.3	51.00	1.48	35.8	0.48
H	19	161.4	49.65	1.52	29.7	0.58
I	19	170.1	49.75	1.57	25.5	0.55
J	20	153.1	52.75	1.50	21.1	0.44
平均±SD	19.1±1.14	158.5±6.5	50.0±5.6	1.5±0.09	26.1±5.8	0.425±0.1

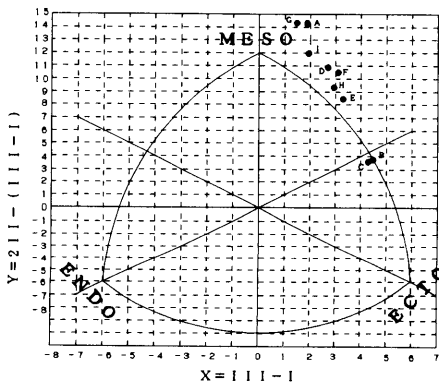


図 2-1 男子被験者の体型図

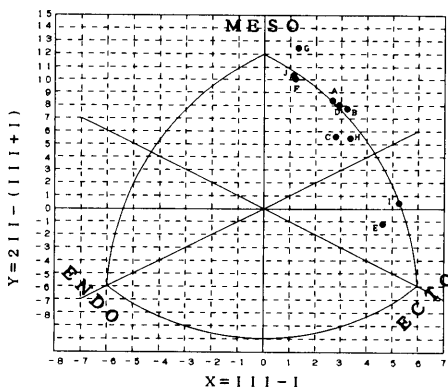


図 2-2 女子被験者の体型図

めに, それぞれ内胚葉要素, 中胚葉要素, 外胚葉要素を Heath-Carter の体型評価法を用いて求めた。結果を図 2-1 ~ 2-2 に示す。男女ともに中胚葉と外胚葉要素が大で, 筋肉質または痩せ気味の被験者群であった。

2.2.2 蓄熱量と体組成の関係

各コンパートメントの熱収支量の期間平均値を関与する部位の皮膚面積率で重み平均して全身の放熱量を求め, 代謝量との差として蓄熱量を求めた。一方, 鼓膜温度と平均皮膚温の変化量から蓄熱量を求めた。それらと, 温度変化率を Hardy-DuBois の式に代入して求めた蓄熱量と垣鍔の体組成を考慮した式⁶⁾に代入して求めた蓄熱量を比較した。結果を図 2-3 ~ 2-4 に示す。

Hardy-DuBois の式

$$S = \frac{0.71 \times m \times (0.8 \times \Delta T_{rec} + 0.2 \times \Delta T_{sk})}{A_D} \dots \dots \dots (5)$$

ここに, S : 蓄熱量 (W/m^2) m : 体重 (kg)

ΔT_{sk} : 平均皮膚温の変化率 ($^{\circ}C/h$)

ΔT_{rec} : 体温の変化率 ($^{\circ}C/h$)

垣鍔の式

$$S = \frac{0.72 \times m \times \{(1 - 0.5\alpha) \times \Delta T_{rec} + 0.25 \times \alpha \times \Delta T_{sk}\}}{A_D} \dots \dots \dots (6)$$

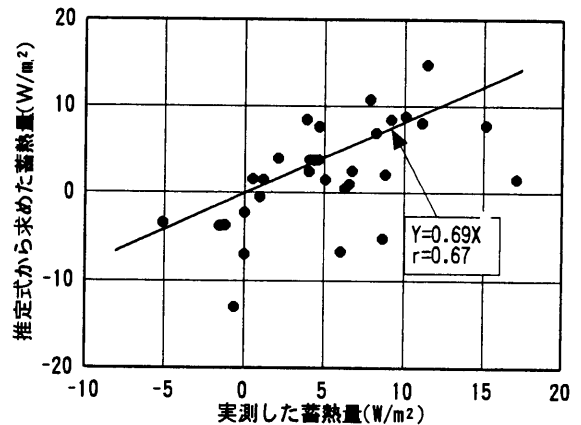


図 2-3 代謝量と放熱量から求めた蓄熱量と鼓膜温と皮膚温の変化を Hardy-Dubois の式に代入して求めた蓄熱量の比較

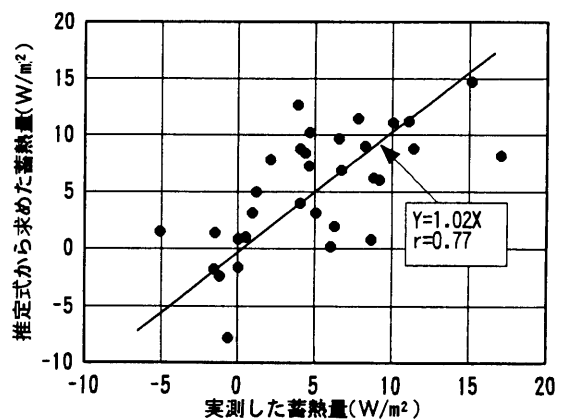


図 2-4 代謝量と放熱量から求めた蓄熱量と鼓膜温と皮膚温の変化を体組成を組み込んだ垣鍔の式に代入して求めた蓄熱量の比較

ここに、 α ：皮下脂肪率 (N.D.)

6式では、個人の熱的特性（皮下組織の熱抵抗）を蓄熱量の算定に反映するために、皮下脂肪率 (Adiposity) を導入している。以上の結果から、体組成を考慮した式のほうが実際の蓄熱量と良く相関することが確かめられた。

2.2.3 部位別放熱量と皮下脂肪との関係

部位熱の放熱量と皮下脂肪の関係を検討するために、各部位の皮下脂肪厚と周径から熱抵抗を下式から求めた⁽⁷⁾。

$$R = \frac{\mu}{k} \times \text{Log}_e \left(1 + \frac{\delta}{k} \right) \quad (\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 μ ：部位の代表径 (m)

δ ：皮下脂肪の厚さ (m)

k ：皮下脂肪の熱伝導率 (W/m・C)

結果を図2-5～図2-8に示す。各部位の皮膚温の平均値を求めた結果、腕で32.6°C、大腿+臀部で34°C、胴部では35.2°C、下腿で32.5°Cであった。また、平均皮膚温の平均値は34.2°C（偏差1.63°C）であった。全体としては冷却側への曝露は少なく、むしろ暑熱側への曝露が多く、結果的に発汗を誘引する程の温熱刺激は与えなかった。従って、血管調節域の体熱損失を実測したことになる。

熱損失熱抵抗と各部位からの放熱量の関係から、どの部位も熱抵抗が0.034～0.043 (C・m²/W) 以下で放熱量が熱抵抗に依存する傾向を確かめた。従って、皮下脂肪があるレベル以下の被験者では、同一皮膚温における体表面からの放熱量が大きくなり、体熱損失が増加する結果

を得た。一方、熱抵抗が0.034～0.043以上では放熱量にあまり差が見られなかった。

2.3 考察

カロリメータに関する研究は数多い^{(8), (9), (10)}。これまで試作されたカロリメータは、全身を密閉容器に入れて放熱量を測定する方法が採用されているが、本研究では、初めて分割型のカロリメータを開発した。仕切を完全に断熱及び機密にすることは困難ではあるが、被験者をカロリメータ内に仰臥させた状態で気密性を試験した結果では良い成績を得た。また、内壁を反射率の大きな表面で仕上げれば、直接測定が難しい放射熱収支量を最小に押さえることができることも確かめた。これらの実験手法上の問題を解決して実験を行った結果、体組成を考慮した推定式から求めた蓄熱量と実測した蓄熱量がかなり相関のあることを確認した。

Webb⁽⁸⁾は、水を循環させるスーツタイプのカロリメータを開発し、被験者に自由な活動をさせられることを強調しているが、概してカロリメータでの実験では被験者の姿勢や活動を制限することも欠点となる。しかしながら、カロリメータを利用する意義は、直接人体からの放熱量を測定できる利点を生かし、経路別熱収支の内在する問題を解決することにある。これまでの研究では技術的な内容が優先し、多くの被験者を対象に実際の熱収支を測定した例が少なかったが、本研究では、19名の被験者の個人的な熱的特徴を蓄熱量の算定に組み込み、

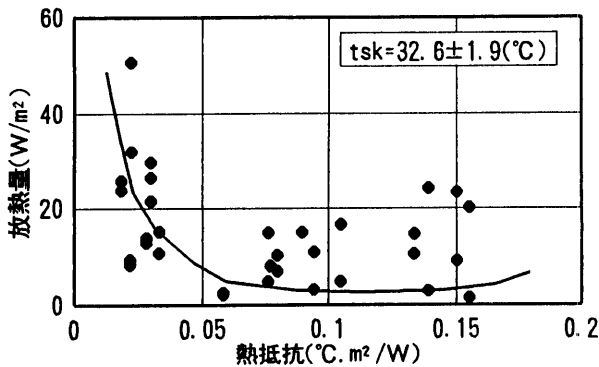


図2-5 腕からの放熱量と熱抵抗の関係

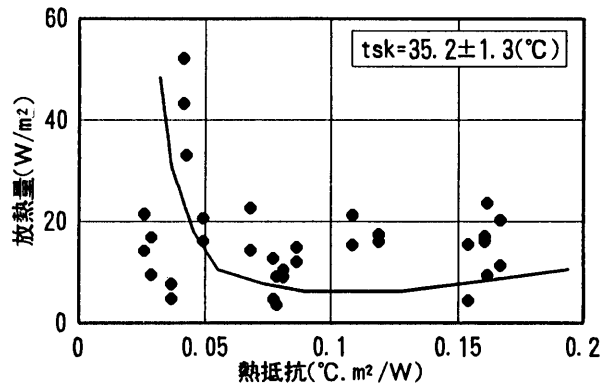


図2-7 胴部からの放熱量と熱抵抗の関係

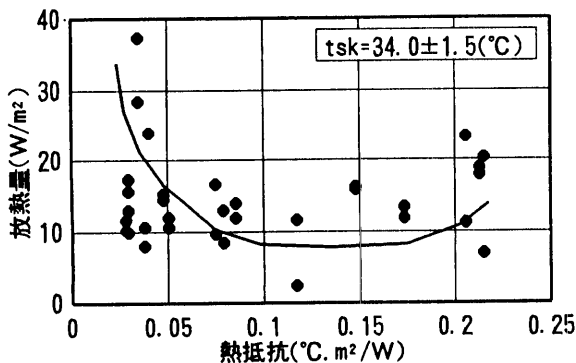


図2-6 大腿+臀部からの放熱量と熱抵抗の関係

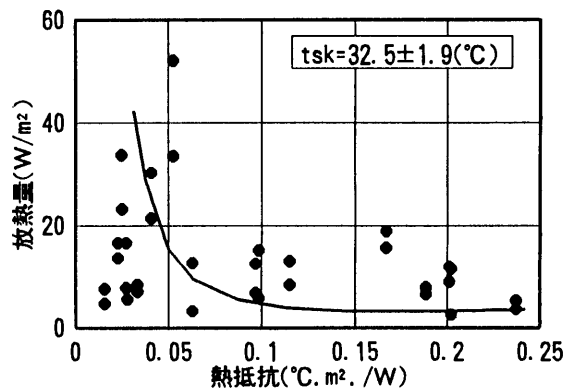


図2-8 下腿からの放熱量と熱抵抗の関係

実測値との比較検討を行った。その結果、標準の体格或いはそれに相当するモデルに対する放熱量が求められれば、熱的に個体差のある場合にも体組成を介してそれらを適用できることが示されたと考える。そこで、以上で求められた人体の各部位の放熱量のデータを参照し、以下に述べる体温調節モデルとしての蒸汗マネキンの開発を行った。

3. 熱・湿気同時移動時の着衣熱・湿気特性と蒸汗マネキンの試作

サーマルマネキンを用いた温熱環境評価法については三平ら^{x11)}や田辺ら^{x12)}の研究があるが、それらはそのマネキンの構造上、人体の顕熱放受熱のみでの評価にとどまり、潜熱放熱すなわち不感蒸泄を含めた発汗による放熱作用の評価することは不可能である。

そこで、本研究では、人体の顕熱・潜熱の放受熱量を模擬できる水蒸気発散機能を持つサーマルマネキン（以下、蒸汗マネキンと呼ぶ）を開発の対象とした。まず、マネキン本体の表面素材を含めた一般着衣の熱・湿気性能評価方法の問題点について述べ、つぎに水蒸気発散サーマルマネキンの構造について述べる。これらの一連の開発・組立の過程では、前述の部位毎の放熱量などが設計基礎データとなっている。

3.1 熱・湿気同時移動時におけるマネキン表面素材の熱・湿気特性の吟味

サーマルマネキン内部に水蒸気発散機能を持たせた場合、その表面素材は透湿性が確保されていなければならぬこと、さらにその熱・湿気特性が把握されている必要がある。そのため、蒸汗マネキン表面素材の特性を検討する。熱・湿気同時移動時における布素材を含む平面素材の熱及び透湿抵抗を測定する装置を開発し、マネキン表面素材及びその上に着衣素材としての綿布を重ねた場合の特性について実測・検討を行った。

3.1.1 測定原理

定常状態での平面素材試料の熱・湿気同時移動時における熱流量及び透湿量を、別々に測定するための装置断面を概念図として図3-1に示す。これは基本的に従来の透湿抵抗測定に用いられているカップ法^{x13)}を応用したもので、試料下面には透湿抵抗を無視し得るような透湿性面状ヒーターを設置していることが特徴である。ここで装置内水温、装置内気温及び面状ヒーター部の温度を同一に制御すると、面状ヒーターへの供給熱量は試料を通過する顕熱量とみなすことができ、これと試料両面の温度差から、試料の熱抵抗が求められる。

また、装置全体の単位時間における重量減少量を、透湿量とみなすことができ、これと装置内外の水蒸気圧差から透湿抵抗値が求められる。なお、水分蒸発量の換算

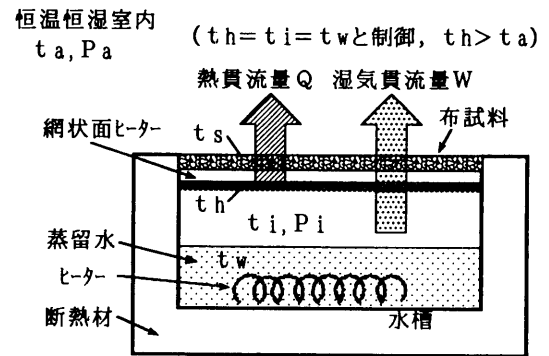


図3-1 熱・湿気同時移動実験装置概念図

熱量と水中ヒーターに供給した熱量は理論的には等しくなる。

3.1.2 実験方法

試料面の大きさを30cm四方とした図3-2のような装置を開発した。試料下面に設置する面状ヒーターには、市販のステンレス網（網目約1mm、太さ0.1mm）を利用した。

本研究においては蒸汗マネキンの表面素材として、その強度、加工性、予測される透湿性等を考慮して、なめし皮を選択した。測定対象のなめし皮及び綿布の設定を以下の3種とした。

- 実験①：なめし皮（厚さ約0.5mm）1枚から5枚重ねる
- 実験②：なめし皮1枚に綿布1枚～3枚重ねる
- 実験③：なめし皮1枚に綿布1枚～3枚を空気層（2mm程）を設けて重ねる

なめし皮を重ねて測定するのは、なめし皮1枚の熱・湿気抵抗を算定するためと、なめし皮表裏の水蒸気圧差の熱・湿気抵抗に及ぼす影響を検討するためである。

上記設定の装置を恒温恒湿室内(25℃, 20% RH, 静穏

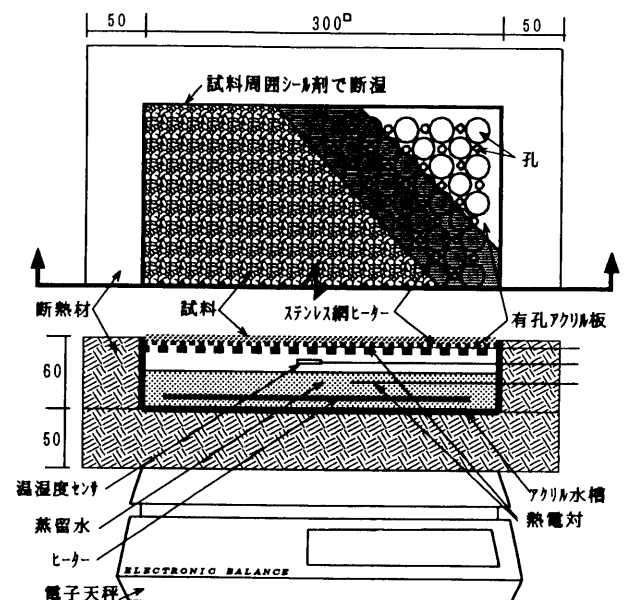


図3-2 実験装置平面・断面図

気流)に設置し、装置内温度を人体皮膚表面温度近傍とされる33℃として定常実験を行った。なお、温度・湿度についてはφ0.2mm T熱電対、温湿度測定器(VAISALA HMP32)及びデータロガー(YOKOGAWA HR-1300)、全体の重量変動については電子天秤(A&B EP-20KA、秤量20kg、感度0.1g)とパソコンによって、測定・記録する。

3.1.3 実験結果及び考察

実験①における、なめし皮の重ね枚数と熱貫流・湿気貫流抵抗を図3-3に示す。湿気貫流抵抗について、重ね枚数が増すごとに1枚当たりの抵抗値が大きくなる傾向が認められる。これは1枚当たりの水蒸気圧差が小さくなるに従い、その湿気抵抗が大きくなることを示していると考えられる。

また、熱貫流抵抗については、4~5枚目で1枚当たりの抵抗が小さくなる傾向が認められる。これはなめし皮の含湿量が増加し、その熱抵抗が低下したものと考えられる。以上のことから、このなめし皮の透湿抵抗は水蒸気圧差に対して完全な線形性を有していないこと、また、含湿量が増加すると熱抵抗が低下する性質があることが明らかとなった。しかし、この特性はなめし皮だけにいえることではなく、一般的な布または衣服にも符合すると考えられるが、従来の研究ではほとんど問題視されておらず、本研究で開発した装置・方法によって明らかになったものである。

実験②③の結果について、なめし皮1枚のときの熱、湿気貫流抵抗値を差し引いて図3-4に示す。布のみの場合は、枚数が増すごとに湿気抵抗も大きくなるが、熱抵抗は逆に小さくなる傾向がある。これは綿布を重ねるに従い、含湿量が急増したことの影響と考えられる。

一方、空気層を設けた場合には、熱抵抗は重ね枚数とほぼ線形関係にあることが分かった。湿気抵抗については、重ね枚数に従い、その値が大きくなる傾向を示しているが、1枚当たりの抵抗値は僅かだが小さくなる傾向を示している。これは布の重みによって部分的に密着していたことが影響しているものと考えられる。

従来、着衣の透湿性については、Nishiら²¹⁴⁾が提案した透湿効率fpclが用いられている。Nishiらは、ナフタレンの昇華性を利用した布の透過実験結果から透湿性を定量化しているが、直接水蒸気移動を扱った本研究の結果を考慮するならば、布の熱・湿気性能は、水蒸気圧差、含水量及び空気層の状態によって大きく変化することが明かであり、ルイス関係を利用することは限界があるものと考えられる。

3.2 蒸汗マネキンの試作と性能試験

3.2.1 蒸汗マネキンの試作

前項で求めた素材の基本性能をもとに、蒸汗マネキン

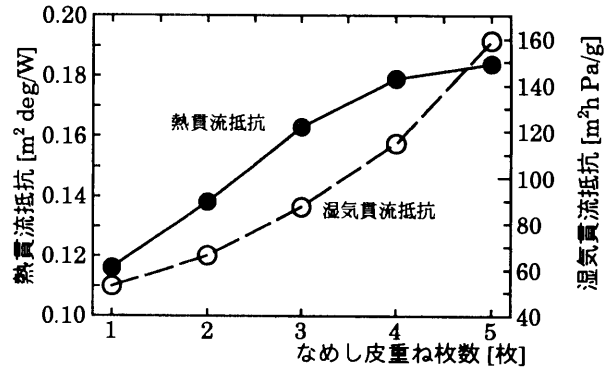


図3-3 なめし皮重ね枚数と熱、湿気貫流抵抗との関係

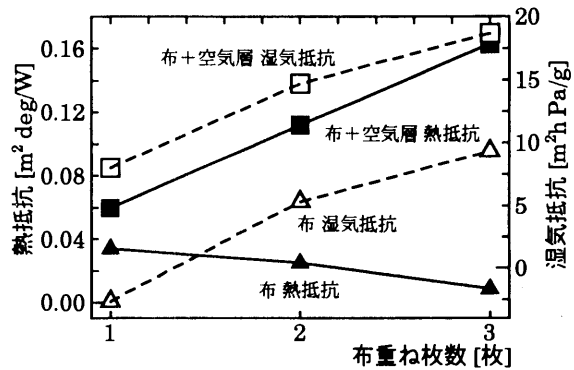


図3-4 布重ね枚数と熱、湿気貫流抵抗との関係

を試作した。試作した蒸汗マネキンの熱・湿気の発生構造の概略を図3-5に示す。

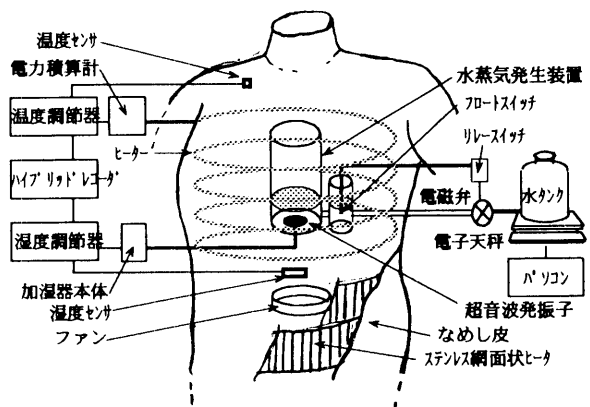


図3-5 蒸汗マネキンの熱・湿気発生機構

マネキン外形は縫製用人台(婦人用胴部)の大きさを基に針金を用いて、頭部を除いた胴部及び四肢の表面の骨組みを作成した。胴部には線状ヒーター、超音波振動子を用いた自作の水蒸気発生装置、温湿度センサー、攪拌ファンなどを内蔵している。

両腕部及び両脚部については、内部に水蒸気発生装置は備えておらず、躯体との接合部分に攪拌ファンを設置し、胴部で発生された水蒸気を送り込むようにした。なお、肩部、肘部及び膝部は、着衣させやすいように多少動かすことができるようにした。

マネキン表面には、透湿性を確保しつつ各部位の表面温度を独立に制御するために、ステンレス製の網を用いた自作面状ヒーターを取り付けた。なお、手と足先は取付の困難さから今回は除いた。ヒーターは、図3-6に示すように、人体各部位の形状を考慮して水平方向のユニットとして取り付けた。軀幹部のヒーター取り付け状況を写真3-1に示す。それぞれのヒーターはユニットごとに発熱量を調整することが可能であることと、熱容量が小さいので被験者実験による人体各部位表面温度変動を鑑みながら調整することができる。その上に疑似皮膚としての前述のなめし皮を張り付けた。マネキン全体像を写真3-2に示す。

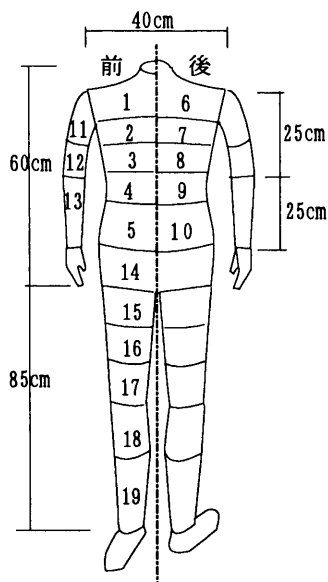


図3-6 マネキン表面ヒーター配置

3.2.2 熱・湿気性能試験

試作した蒸汗マネキンの表面ヒーターの発熱特性、水蒸気発生装置による蒸汗性能を検討するために、豊田高専人工気候室内(25℃, 40% RH)に設置し、定常実験を行った。

マネキンの表面の発熱区分を軀幹上部、軀幹下部、両腕、両脚上部、両足下部に分け、それぞれをスライダックに接続して、表面温度を人体表面温度33℃のほぼ均等になるように調整し、供給電力から熱量を算定した。また、内部ファンの発熱量も合わせて測定した。人体表面温度はDuBoisの12点法のうち、マネキンの発熱部位に対応する点(胸乳、三角筋、前膊外、^{へそぶ}臍部、大腿前、下腿前、^{けんこうきよく}肩胛棘、腸骨楯の計8点)でφ0.2mm T熱電対で測定した。また、サーモグラフィ装置で全体の温度分布の確認を行った。

マネキン内の相対湿度は温湿度計(神栄 THP-B4T)と湿度調節器(神栄 RHI-600)によって調節することができるが、本報告では水蒸気が最大発生量となるよう設定した。内部水蒸気発生装置への給水は、自作フロート



写真3-1 ステンレスヒーターの取り付け

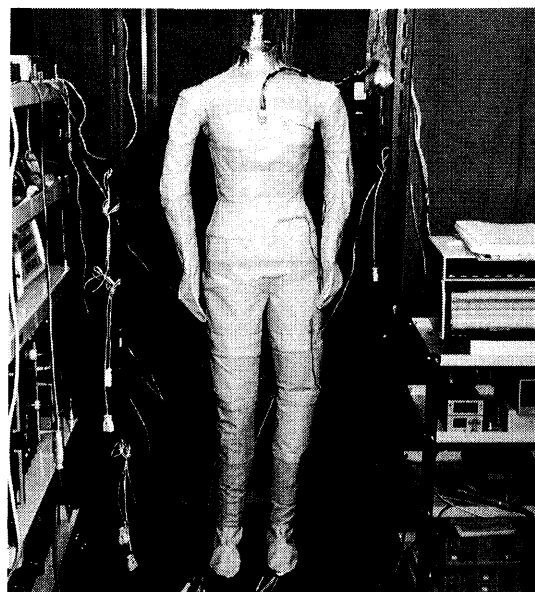


写真3-2 蒸汗マネキン

スイッチと電磁弁によって制御され、給水量を電子天秤とパソコンによって測定・記録した。

3.2.3 測定結果及び考察

1) 表面温度分布と供給熱量

人工気候室内の温湿度は、設定通りに保たれた。蒸汗マネキンの熱電対測定部位が33℃程度になるように、各部発熱量を調節した。しかし、内蔵の超音波振動子の発熱により内部温度上昇による影響で、測定開始60分で結果的に平均表面温度34.7℃(偏差0.7℃)を得た。試作マネキンは熱容量が小さいので、蒸気発生させないときは、20分程度で定常となるが、蒸気発生時の振動子の発生熱量が予想以上に大きく、その熱量の定量化と取り扱いが今後の課題となる。このときの各部発熱量を電力積算計で測定し換算したところ、軀幹上部15.1W、軀幹下部16.0W、両腕22.3W、両脚上部24.3W、両足下部21.1Wとなり、マネキン表面全体で98.8Wとなった。

図3-7に示した各部位の放熱量と放熱パターンから人体の放熱量のデータと比較してほぼ同等で同様な結果を得た。このことより、蒸汗マネキンの放熱特性は十分な性能があると考えられる。サーモグラフィにより表面温度分布を測定した結果の一例を写真3-3に示す。既存のデータ¹⁵⁾と比べ、同様な分布であった。

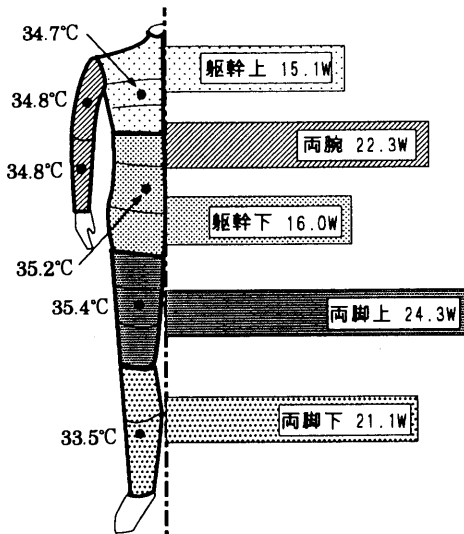


図3-7 マネキン表面温度及び部位発熱量

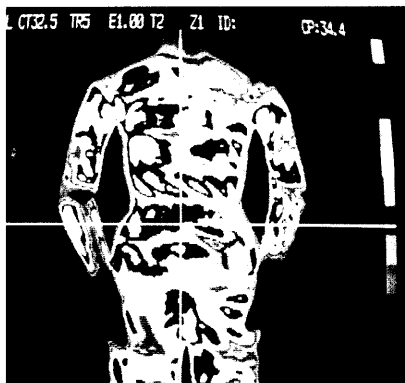


写真3-3 サーモグラフィによる表面温度分布

2) 蒸汗性能

マネキン内部湿度については、内部に隔壁を設けていないこととファンで攪拌していることを理由に、内部水蒸気圧は瞬時平衡である。水蒸気発生量としての給水量を図3-8に示す。表面ヒーターと超音波振動子により、

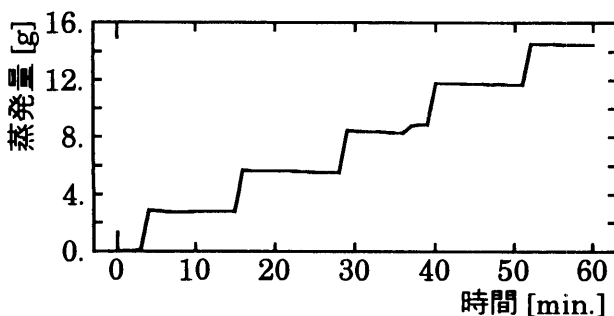


図3-8 蒸発量 (供給水量) の時間変動

結果的に内部温度は42°Cになり、相対湿度は26% RHとなった。このときの内部水蒸気圧は2132.8Pa (16mm Hg)となる。また、人工気候室内の水蒸気圧は1293.2Pa (9.7mm Hg)であるから、マネキン内外の最大水蒸気圧差は839.6Pa (6.3mm Hg)となった。図から判断できるように水蒸気はほぼ定期的に発生 (13.8g/h) されているが、これは無汗状態の人体の椅座安静時水分蒸発量¹⁶⁾よりも少ない量であった。従って、マネキン内部発生水蒸気量をさらに増加させる必要があることを確かめた。結果として、マネキン全体の表面のなめし皮をはさんだ湿気貫流率は0.016g/h・Paとなった。

3.3 蒸汗マネキンの特徴

蒸汗マネキンによる温熱環境評価の基礎研究として、マネキン疑似皮膚としてのなめし皮の熱・湿気特性を平面熱・湿気同時移動装置を開発して、検討を行った。また、着衣としての布地をなめし皮の上に重ねておいた場合の熱・湿気特性を検討した。その結果、熱・湿気同時移動状態では、従来、別々に求められていた熱及び湿気抵抗とは顕著に異なり、素材の含湿量、水蒸気圧差に依存することが明らかとなった。

これをもとに、内部に水蒸気発生装置を有するシェル型サーマルマネキン、いわゆる蒸汗マネキンを試作した。表面にステンレス網の面状をヒーターを張り、その上になめし皮を張った。人工気候室内 (25°C, 40% RH) で、熱・水蒸気発生定の定常実験を行って、性能を検討した。温度分布は、人体モデルとしてはほぼ満足できるものであった。水蒸気発生量については、その発生量は安定しているものの人体の椅座安静時の蒸汗量よりも少なく、若干の改良の必要がある。しかし、熱・湿気移動を同時に考えられた人体モデルとしては、総合的に見て十分な性能を発揮できると考える。

4. 結語

本研究の主眼は、従来の熱収支理論を改善し温熱環境評価の信頼性を高めることである。そこで、これまで皮膚温と体温の変化量に各係数で重み平均することで定義されてきた蓄熱量に、個人の熱的特性としての体組成の影響を量的に組み入れることを試みた。カロリメータを用いた実験により、全身の熱収支量と体組成の関係や各部位での放熱量と皮下の熱抵抗 (皮下脂肪率) の関係を定量的に把握した。これらのデータを参照することにより、標準サイズのモデルを取り扱う場合でも、個人差の影響を定量的に評価できるようになった。さらに、このデータに基づき、実際に人体の温熱生理的特性を反映したモデルとして蒸汗マネキンを開発した。本研究によって人体と環境の間の熱収支に個人差を考慮する道が開かれたと言って良い。

蒸汗マネキンに関しては、疑似皮膚としてのなめし皮の熱・湿気特性を平面熱・湿気同時移動装置を用いて求め、着衣としての布地をなめし皮の上に重ねておいた場合の熱・湿気特性を検討した。その結果をもとに、内部に水蒸気発生装置を有する人体体温調節モデルとしてのシェル型サーマルマネキン、いわゆる蒸汗マネキンを試作した。人工気象室内での熱・水蒸気発生の定常実験から温度分布・放熱特性に関してはほぼ満足できる結果を得た。水蒸気の発生機能は完全ではなかったが、従来のマネキンと比較すると、モデルとしての性能は優れており、十分な機能を発揮されると思われる。

本研究で一応の成果は見たものの、マネキンの量産等を考えると、この成果をもとにフィードバック機能として蒸汗量や皮膚面自体の水蒸気圧を直接測定できる機器を開発することが必要であろう。

<参考文献>

- 1) Kakitsuba, N. and K.R.Bondi: Heat transfer from the human body in hyperthermic low gas-velocity environments., *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol.58(3), pp.227-236, 1987
- 2) 堀越哲美, 小林陽太郎, 土川忠浩, 平川慶太郎, 蔵澄美仁: 非対称および不均一熱放射環境の人体影響表現方法の研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第413号, pp.21-28, 平成2年
- 3) Horikoshi, T., Kobayashi, Y., Tanaka, M. and Kawagoe, K.: Evaluation and prediction of the influence of the thermal environment upon the human skin temperatures., *Proc. the 4th Int. Symp. on the Use of Computers for Environ. Eng. related to Buildg.*, 1983
- 4) 蔵澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原齊樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会誌, 第31巻, 第1号, pp.5-29, 1944
- 5) Mekjavic, I.B., K.D.Mittleman and N.Kakitsuba: The role of shivering thermogenesis and total body insulation in core cooling rate., *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol.6(2), pp.61-68, 1987
- 6) Kakitsuba, N. and T.Katsuura: Development of a new device to measure local heat exchange by evaporation and convection., *Aviat. Space Environ. Med.* Vol.63, pp.538-542, 1992
- 7) Kakitsuba, N. and I.B.Mekjavic: Determining the rate of body heat storage by incorporating body composition., *Aviat. Space Environ. Med.* Vol.58(4), pp.301-307, 1987
- 8) Webb, P., J.F.Annis and S.J.Troutman, Jr: Human-calorimetry with a water-cooled garment., *J.Appl. of Physiol.*, Vol.32(3), pp.412-418, 1972
- 9) Benzinger, T.H., R.G.Huebscher, D.Minard and C.Kitzinger: Human calorimetry by means of the gradient principle., *J.Appl. of Physiol.* Vol.12, suppl.1, pp.1-28, 1958
- 10) Visser, J. and T.Hodgson: The design of a human calorimeter for the determination of body heat storage., *S. African mech. Engr.*, Vol.9: pp.243-269, 1960
- 11) 三平和雄, 多屋秀人, 新井広: サーマル・マネキンに関する研究, No.13(2), pp.47-53, 人間工学誌, 1977
- 12) 田辺新一, 長谷部ヤエ: 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, No.448, pp.1-8, 日本

建築学会計画系論文報告集, 1993

- 13) JIS Z 0208 「防湿包装材料の透湿度試験方法」
- 14) Nishi, Y and Gagge, A.P.: Moisture permeation of clothing-a factor governing thermal equilibrium and comfort, *ASHRAE Trans.*, Vol.76, pp.137-145, 1970
- 15) 人間-熱環境系, 人間-熱環境系編集委員会, 日刊新聞社, 1989
- 16) 西安信: 温熱生理学 (中山昭雄編), 理工学社, p.46, 1981

<研究組織>

主査	垣鏑 直	国立豊田工業高等専門学校 建築学科助教授
委員	堀越 哲美	名古屋工業大学工学部 社会開発工学科教授
	土川 忠浩	国立岐阜工業高等専門学校 建築学科助教授
協力	鈴木 健次	国立豊田工業高等専門学校 建築学科助手