

河川・緑地による気候緩和作用の 定量的評価手法の提案

1. 要旨
2. 新しい屋外用温熱感指標の提案
 - 2.1 はじめに
 - 2.2 人工気象室での実験概要
 - 2.3 実測値からの人体熱収支の算定法
 - 2.4 人体の熱収支の結果
 - 2.5 新しい屋外用温熱感指標の理論的枠組み
 - 2.6 温熱感指標としての仮想熱負荷量の妥当性
 - 2.7 第2章の結論
3. 多摩川河川敷への適用例
 - 3.1 はじめに
 - 3.2 観測方法
 - 3.3 観測結果および考察
 - 3.4 3章の結論

参考文献

1. 要 旨

河川・緑地による気候緩和作用を定量的に評価するためには、気温・湿度・放射といった外的な気象要因の変化を把握することが重要である。さらに、それらの複合要因を統合し、人間が実際にどの様に感じるか、といった「人間環境工学」的視点からのアプローチも必要となる。本研究では、屋外環境における人間の温熱感を定量的に評価しうる指標についてまず検討を行った。具体的には、気温・風速・湿度・放射といった屋外気象要因を任意に制御できる人工気象室において、気象要素・人体生理・温熱アンケートの同時調査を行い、それらの結果を基に、屋外環境に適した温熱感指標について検討を行った。不快指数や建築の屋内空間で使用されている既存の温熱指標（SET* and PMV）および人体熱収支に基づいて新たに提案した仮想熱負荷量（VTL）を相互に比較し、その得失について論じた。仮想熱負荷量は、実際の温熱感と非常に良い一致を示し、発汗を伴うような著しい暑熱環境下における体感温度指標として有効であることが示された。

次に、この温熱指標と人体の熱収支解析を用いて、実際の屋外環境へ適用する試みを行った。実際の屋外への適用に当たっては、人体が受ける複雑な放射環境の計測が問題となるが、本研究では、黒色と白色のグローブ温度を併用することにより、人体が受ける平均放射温度を推定する手法を提案した。多摩川における、気象要素・人体生理・温熱アンケートの同時計測の結果、仮想熱負荷量は、実際の河川空間においても温熱感をよく表現することが示された。その一方、日向から急に木陰に入った時のように熱環境の非定常性が強い場合には、実際の温熱感は仮想熱負荷量の予測からずれるという問題点も指摘された。また、河川敷空間は、人体への熱負荷を低減させるという点において有意に作用していることが定量的に示された。

2. 新しい屋外用温熱感指標の提案

2.1 はじめに

2.1.1 研究の目的

都市構造物の周辺域への熱的影響や、森林・河川などが有する気候緩和機能の解明など、微気象学的な見地に立った研究が土木工学分野においても活発に行われるようになってきた。その一方で、それらの成果をいかにして定量的な環境評価・計画に結びつけていくか、という視点からの研究も工学上はきわめて重要であろう。その場合、周囲環境の把握のみならず、人間側の反応にまで立ち入ったいわゆる「人間環境工学」的アプローチが不可欠となる。神田・土屋（1995）¹⁾は屋外の実測と人体熱収支を基礎理論とした物理的なアプローチにより、植生やアスファルトなどの土地被覆の違いが人体の温熱環境そのものにもどのような影響を及ぼすかを論じた。しかし、そこで用いられた熱収支指標はあくまで物理的に導出された指標であり、実際の人体の温熱感との関係については論じられなかった。また熱収支解析において用いら

れる様々な仮定は、屋外環境に比してきわめて平穏な室内環境での生理学的知見をそのまま踏襲したものであり、それらが屋外環境でも成り立つ保証はない。屋外熱環境の評価に人体熱収支解析を導入している研究はいくつかあるが²⁾、いずれも室内の温熱環境指標をそのまま使用しているのが現状である。本研究の目的は、以上を踏まえて、1) 屋外暑熱環境における人体の温熱生理反応を実験的に把握すること、2) その結果を人体熱収支式に取り入れ、合理的な温熱感指標を導出すること、および、3) その指標が実際の温熱感を代表するものであることを確認するの3点とする。

2.1.2 本論文で考える温熱感指標の前提条件

本研究で目指す温熱感指標は、あくまで「環境評価」のためのものである。

(a) **客観性**：工学的使用の見地から、温熱感指標は、測定が容易な気象データのみから導出され得ることが望ましい。人体生理パラメーターは本質的な部分のみにとどめる。

(b) **空間スケール**：屋外の気象環境は本質的に局地性の強いものである。日陰と日向で体感温度は大きく異なる。この点を考慮し、人体スケールに対応できる温熱感指標を目指す。

(c) **時間スケール**：10分～15分程度。通常の気象値（気象庁では10分平均値）に対応した平均的温熱感指標を考える。これ以上長いと気象条件そのものが変化してしまうし、短いと変動成分の非定常性の影響が大きくなる。

2.2 人工気象室での実験概要

2.2.1 人工気象室の概要

使用した人工気象室は、熊谷組技術研究所所有の「人工気象シミュレータ」である。大きさは、水平10m×6m×高さ7mで、内壁は全てステンレス製である。制御できるのは、温度・相対湿度・風速・日射量である。人工気象室内は床面に取り付けられた50cm四方の排気口・吸気口を通じて、室外の循環式ダクトとつながっており、このダクト部で人工気象室内に流入する空気の温度および相対湿度を制御する仕組みとなっている。従って、1) 風速ファンを起動しない無風条件下でも、換気に伴うきわめて微弱な循環流（室内風速 0.3 m s^{-1} 以下）が存在すること、および、2) 壁面の熱輻射の影響で、実際の人工気象室内の気温・湿度は流入空気の設定値とは異なる（日射が多い条件の時ほどこの違いは顕著になる）、という2点に留意しておく必要がある。気温は、10～30（℃）、相対湿度は40～80（%）の取囲で制御可能である。日射装置は、高さ7mの天井に取り付けられており、太陽光のスペクトル特性に極めて近いメタルハライドランプを使用しており0～800（ W m^{-2} ）の範囲での制御が可能である。風速は、直径50cmの風速ファン2台によって0～5（ m s^{-1} ）の範囲で制御される。ファンの風が、人体正面に平行に吹き付けるように人工気象室内にセットされている。

2.2.2 実験条件

実験は、2種類行っている。

実験A：被験者の詳細な温熱生理学的データの取得を目的とし、男女それぞれ1名について行った。

実験B：温熱感および生理反応の個人差の影響を平均化することを目的とし、実験Aをやや簡略化した形で、4人の男子学生について行った。以下、その詳細について述べる。

(a) **実験A概要** 被験者は、快適に保たれた控え室で1時間過ごした後、裸体（水着）となり、日射病防止のためのヘルメットを着用して人工気象室に入室し、直ちに、部屋の中央の椅子に着席する。椅子の下には精密電子台秤がセットされ体重変化が測定される。呼吸活動に伴う酸素吸収量・二酸化炭素放出量を計測するためのマスクを装着し、腋下にはコア温度測定用のサーミスタ温度計を挟む。被験者の真正面には風速ファンが、その奥にはサーモグラフィが設置されており、体表面温度および周囲壁面温度の計測が行われる。被験者は、5分おきに被験者アンケートに回答する作業を行う以外は、椅座のまま安静状態を保つ。人工気象室内の気象測定項目は、気温・湿度・風速・上向きおよび下向き短波放射・上向きおよび下向き長波放射・黒球温度・白球温度であり、各センサーは被験者の横に置かれた床上高さ1mの三脚にコンパクトにセットされる。以上の測定項目と測定機器を表1に示す。また、アンケート調査内容を表2に示す。実験開始後、流入空気の温度・湿度および日射条件を一定値としたままで、風速を20分ごとに、 $2 \text{ (m s}^{-1}\text{)} - 1.2 \text{ (m s}^{-1}\text{)} - 0.0 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$ と段階的に変えながら、1時間の連続測定を行い、これを1ケースとする。男女各1名に対し、流入空気温度を2段階（30、27℃）、流入空気湿度を2段階（80%、40%）、日射を3段階（80、40、 0 W m^{-2} ）に変えて組み合わせた計12ケースの実験条件を設定し、これを男女それぞれ一名に対して行った。その設定条件一覧を表3に示す。

(b) **実験B概要** 実験Aとの相違点を以下に述べる。男4人が同時に並んで、被験者となる。体重測定、コア温度測定、 O_2 および CO_2 測定は行わず、それ以外は実験Aと同じである（表1）。1ケースの測定時間は40分で、風速は、20分で $2.0 \text{ (m s}^{-1}\text{)} - 0.0 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$ に切り替える。その他の環境設定条件は、実験Aと同じである（表3）。

(c) **被験者プロフィール** 被験者は、いずれも20代である。他の年齢層については今後の課題としたい。被験者のプロフィールを表4に示す。表中の人体の表面積AD (m^2)は、身長H (m) および体重W (kg) から、以下のDuboisの式(1)を用いて算出した。

$$AD = 0.202 W^{0.425} H^{0.725} \quad (1)$$

表1 測定項目一覧

(a) 人工気象室内

測定項目	測定機器	測定時間
気温・湿度	白金式温度	連続
風速	熱線式風速計	連続
上下長波放射	放射収支計	連続
上下短波放射	ネオ日射計	連続
散乱短波放射	遮蔽バンド日射計	連続
壁面温度	サーモグラフィ	5分
黒球温度	グローブ温度計	連続
白球温度	グローブ温度計	連続

(b) 人体生理関係

測定項目	測定機器	測定時間
※体重	精密電子台秤	20秒
※O ₂ , CO ₂ 消費量	ジルコニア・ 赤外線吸収方式	10秒
※体温(腋下)	サーミスタ温度計	1分
皮膚温	サーモグラフィ	5分
アンケート	表2参照	5分

※印は実験Aのみの測定

表2 アンケート内容

(a) 温熱感

1 寒い
2 涼しい
3 やや涼しい
4 暑くも寒くもない
5 やや暖かい
6 暖かい
7 暑い
8 すごく暑い
9 耐え難いほど暑い

(b) 快適感

1 非常に不快
2 不快
3 やや不快
4 やや快適
5 快適

(c) 皮膚の湿り感

1 発汗なし
2 うっすらと汗ばむ
3 普通に汗ばむ
4 体表面が濡れている
5 汗が滴り落ちる

表3 実験の設定条件一覧

実験番号	氏名	温度		湿度		日射 W/m ²
		設定 °C	実測 °C	設定 %	実測 g/m ³	
caseA1	男a女a	30	(37)	70	(21)	800
caseA2	男a女a	30	(38)	40	(15)	800
caseA3	男a女a	26	(35)	70	(18)	800
caseA4	男a女a	26	(35)	40	(13)	800
caseA5	男a女a	30	(35)	70	(20)	400
caseA6	男a女a	30	(38)	40	(16)	400
caseA7	男a女a	26	(35)	70	(18)	400
caseA8	男a女a	26	(31)	40	(13)	400
caseA9	男a女a	30	(31)	70	(22)	0
caseA10	男a女a	30	(30)	40	(15)	0
caseA11	男a女a	26	(31)	70	(18)	0
caseA12	男a女a	26	(30)	40	(13)	0
caseB1	男abcd	30	(36)	70	(19)	800
caseB2	男abcd	30	(37)	40	(16)	800
caseB3	男abcd	26	(35)	70	(18)	800
caseB4	男abcd	26	(36)	40	(14)	800
caseB5	男abcd	30	(32)	70	(19)	400
caseB6	男abcd	30	(35)	40	(16)	400
caseB7	男abcd	26	(32)	70	(17)	400
caseB8	男abcd	26	(32)	40	(14)	400
caseB9	男abcd	30	(30)	70	(19)	0
caseB10	男abcd	30	(31)	40	(15)	0
caseB11	男abcd	26	(30)	70	(18)	0
caseB12	男abcd	26	(30)	40	(14)	0

表4 被験者プロフィール

実験A

氏名	年齢 (歳)	身長 (m)	体重 (kg)	体表面積 (m ²)
男a	25	1.71	56	1.65
女a	25	1.49	44	1.35

実験B

氏名	年齢 (歳)	身長 (m)	体重 (kg)	体表面積 (m ²)
男a	25	1.71	56	1.65
男b	22	1.76	72	1.87
男c	22	1.68	57	1.64
男d	29	1.71	65	1.76

2.3 実測値からの人体熱収支の算定法

2.3.1 代謝量の算定

代謝量 M ($W m^{-2}$) は、各栄養素の分解熱から理論的に算出可能であり、酸素消費量 VO_2 (min^{-1}) と二酸化炭素産生量 VCO_2 (min^{-1}) の計測値より、以下の式 (2) によって算定される³⁾。

$$M = 351.82 (0.23 VCO_2 + 0.77 VO_2) / AD \quad (2)$$

2.3.2 発汗放熱量の算定

精密台秤 (解像度 1 g) の計測値から算出される単位時間当たりの体重の減少量 ΔW ($g min^{-1}$) から、ガス交換による減少分 Q_{LOSS} ($g min^{-1}$) をさし引いた量が、人体からの総発汗熱量 E に相当する³⁾

$$Q_{LOSS} = 0.00155 M \quad AD \quad (3)$$

$$E = C_1 (\Delta W - Q_{LOSS}) / AD \quad (4)$$

ここで、 C_1 は単位扱算に伴う定数で、 $C_1 = 40.61$ 。人体からの総発汗熱量 E ($W m^{-2}$) は、理論的に皮膚からの発汗蒸発熱 E_{sk} 、皮膚からの不感蒸泄熱 E_{diff} 、呼吸蒸発熱 E_{res} の和で表せる (式 (5))。

$$E = E_{sk} + E_{diff} + E_{res} \quad (5)$$

このうち、呼吸蒸発熱 E_{res} は、呼気の比湿 q_{res} (コア温度 T_c での飽和比湿) と大気比湿 q_a ($g g^{-1}$) の差と代謝量 M の積として式 (6) より理論的に算定される³⁾。不感蒸泄熱 E_{diff} は、皮膚からの可能最大蒸発熱の6%であることが経験的に知られている (式 (7))³⁾。皮膚からの可能最大蒸発熱量は地表面蒸発の定式化と同様、皮膚表面の飽和比湿 q_s と大気比湿の差および熱交換係数 (式 (9)) の積として式 (8) で表すことにする。以上の式 (3)~(9)により皮膚からの発汗蒸発熱 E_{sk} が見積もられる。暑熱環境下では、 E_{diff} 、 E_{res} の寄与は、発汗の1割程度であり³⁾、体重計測による誤差も数%程度であるから、この算定法による E_{sk} の精度は、約1割程度と推定される。

$$E_{res} = 0.026 M (q_{res} - q_a) \quad (6)$$

$$E_{diff} = 0.06 E_{max} \quad (7)$$

$$E_{sk} = \beta L Ch U (q_s - q_a) \quad (8)$$

$$Ch = 88.73 U^{-1.531} \quad (9)$$

ここで、 β : 空気硬度 ($g m^{-3}$)、 L : 水蒸気潜熱 ($J g^{-1}$)、 U : 風速 ($m s^{-1}$)、を表す。

2.3.3 顕熱量の算定

人体から大気への総顕熱輸送量 C は、皮膚顕熱 C_{sk} と、呼吸顕熱 C_{res} の和で表せる (式 (10))³⁾。皮膚顕熱は、皮膚温 T_s と気温 T_a の差と熱交換係数 (式 (9)) の積として式 (11) で表わすことにする。また、呼吸顕熱は呼吸蒸発熱と同様に、コア温度 T_c と気温の差と代謝量の積として、式 (12) で表せる。 C_p は、定圧比熱 ($J g^{-1} K^{-1}$) を表す。

$$C = C_{sk} + C_{res} \quad (10)$$

$$C_{sk} = C_p \rho Ch U (T_s - T_a) \quad (11)$$

$$C_{res} = 0.0016 M (T_s - T_a) \quad (12)$$

2.3.4 純放射量の算定

人体に入射する純放射量 R_n は、式(13)で表せる。入射短波放射量 R_s および入射長波放射量 R_L は式(14)、(15)を用いて各種放射成分の計測値から求められる。人体の形態係数の算定は、ASHREハンドブックによった⁵⁾。

$$R_n = (1 - \alpha_h) R_s + R_L - \epsilon_h \sigma T_s^4 \quad (13)$$

$$R_s = (\gamma_1 S_T + \gamma_2 S_D + \gamma_3 \alpha_s S) \quad (14)$$

$$R_L = \epsilon_h (\gamma_4 L_a + \gamma_5 L_s + \gamma_6 L_w) \quad (15)$$

α_h 、 α_s ：人体および床面のアルベド ($\alpha_h = 0.3$ を仮定)、 S_T 、 S_D 、 S ($W m^{-2}$)：直達短波放射、散乱短波放射、全天日射の計測値、 L_a 、 L_s 、 L_w ：天井、床面、壁面からの長波放射の計測値、 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 、 γ_5 、 γ_6 ： S_T 、 S_D 、 S 、 L_a 、 L_s 、 L_w に対する人体の形態係数。 ϵ_h ：皮膚の射出率 (= 0.98を仮定)。

2.3.5 蓄熱収量の算定

蓄熱項 F ($W m^{-2}$)は、各熱収支項の和の残差から求める。

$$F = M + R_n - E - C \quad (16)$$

2.4 人体の熱収支の結果

図1、2には、最も厳しい暑熱環境条件にあるcaseA1の人体生理要因の時系列データを示す。ここで、体表面温度とは、サーモグラフィーによって計測された全体表面温度の平均値を示している。

2.4.1 人体熱収支の内訳

(a) 代謝量 男aが50 ($W m^{-2}$)、女aが30 ($W m^{-2}$)程度でほぼ一定である。図3は、全ケースの代謝量をまとめたものであるが、代謝量はほぼ一定で、かなりの暑熱環境下にあっても代謝量の変化は無視しうることを示している。

(b) 潜熱量 男女ともほぼ150 ($W m^{-2}$)程度で、これは380 ($g hr^{-1}$)の重量損失に相当する。熱収支項目の中で最大の値を示しており、発汗作用を無視できないことを示している。20分ごとに風速が弱められていくため、潜熱輸送係数は減少しているはずであるが、皮膚の湿り度が増しているため、潜熱量としてはほぼ一定である。

(c) 顕熱量 皮膚温よりも気温が高いため、男女とも顕熱は負の値を示している。特に女aの皮膚温は男aよりも2~4 ($^{\circ}C$)低いいため、顕熱の絶対値も2倍程度大きい。

(d) 純放射量 純放射量は、日射成分の寄与が効いて正の値を示している。女aの体温のほうが男aよりも低いいため体表面からの長波放射が小さく、結果として女性の方が多くの純放射を受けている。

(e) 蓄熱項 1時間経過後も蓄熱項は $50 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$ 程度の値を示しており、熱的平衡が保たれていない。これ以上の時間スケールでは気象条件が変化してくるため、基本的に暑熱環境下にある人体は、熱的非平衡状態にあるものと考えた方が合理的である。

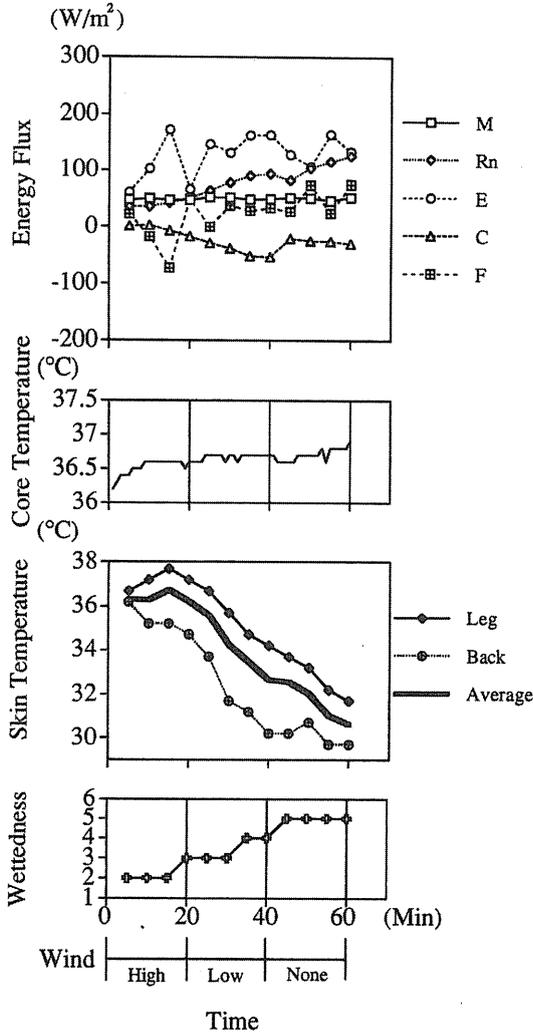


図1 人体生理データの一例(男a)実験CaseA(表3参照)
 (a) 人体熱収支内訳. (b) コア温度. (c) 皮膚表面温度.
 (d) 皮膚の湿り感 (表2(c)参照)

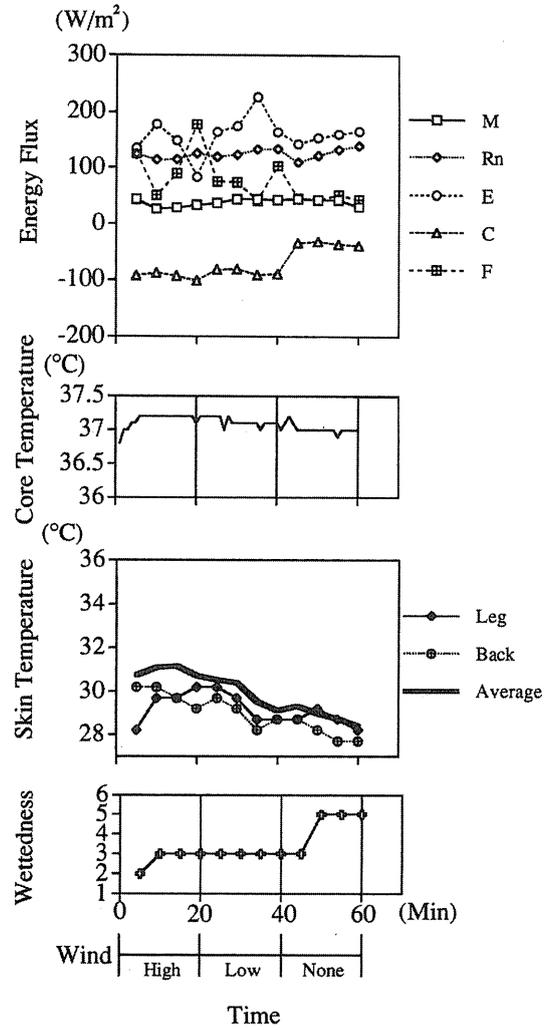


図2 人体生理データの一例(女a)
 その他は図1に同じ

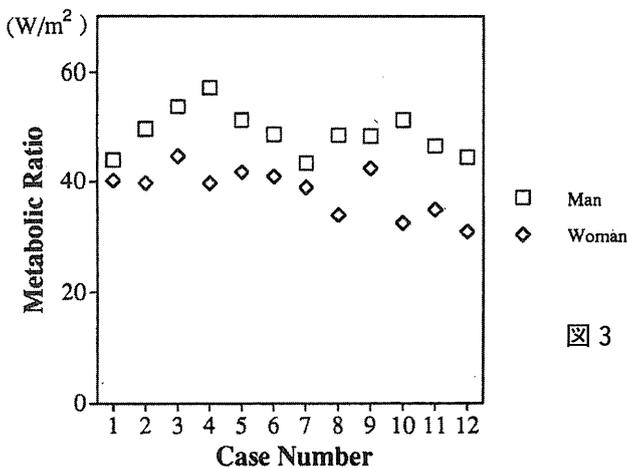


図3 実験Aにおける平均代謝量
 (横軸の番号は表3参照)

2.4.2 体表面温度および体温

(a) コア温度 体温は、初期の10分間で顕著な増加傾向がみられるものの、全体的に変化が小さく、恒温性が顕著である。

(b) 体表面温度 体表面温度の変化はコア温度に比べて非常に大きい。実験開始10分程まで皮膚温は上昇しているが、その後急激に低下している。これは、皮膚の湿り度と関係しており、皮膚のほとんど湿っていない初期段階では、皮膚温は上昇するが、発汗にともなう皮膚の湿り度の増加とともに、皮膚温度は低下する。男女の違いとして、1) 女aの方が体表面温度の変化が小さいこと、また、2) 平均皮膚温よりも足の温度が低い（いわゆる女性の冷え性）といった局所的な皮膚温分布の違い、などが上げられる。しかし、モデル化の上で本質的な違いではない。

2.4.3 従来の皮膚温モデルの適合性

人体の熱的平衡を前提とした従来の生理学的モデルでは、皮膚温の上昇によって発汗作用や皮膚の湿り度の増加を説明しており、本実験の結果と全く逆である。この違いは、人体が本質的に熱的非平衡状態にあることに起因している。図4には、熱的平衡を仮定して得られた皮膚温の計算（2ノードモデル⁶）使用）と、実測で得られた皮膚温を比較したものである。計算値が34（℃）を越える発汗条件下では、いずれも実測の皮膚温の方が低温となっており、発汗フィードバックが作用している熱的非平衡状態を反映した結果となっている。

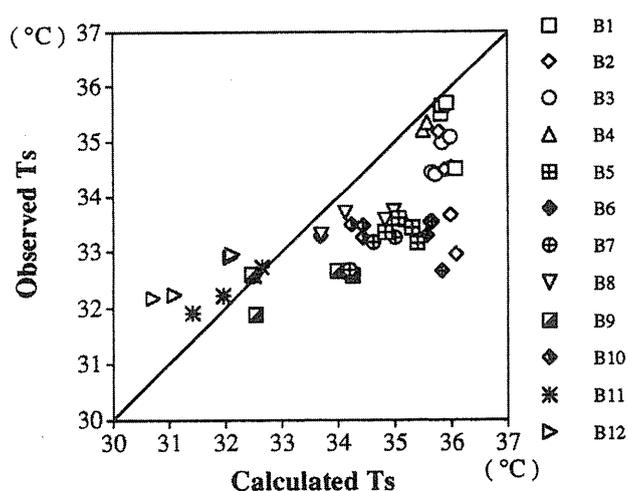


図4 皮膚温の計算値と実測の比較
(実験B 4人の平均)

2.4.4 温熱感との対応関係

図5は、コア温度と温熱感の対応関係を示したものである。コア温度は恒温性の傾向があり（36.5℃）、弱い暑熱環境（温熱指標6以下）では温熱感と全く相関が無く、強い暑熱環境（温熱指標6以上）では若干の相関はあるものの、指標としては温度変化の感度が純すぎる。皮膚温と温熱感の対応関係を示したのが図6である。一つの皮膚温に対して温熱感は発汗のない場合（温熱指標6以下）とある場合（温熱指標6以上）とで2価性を示している。以上より、コア温度・体表面温度を温熱感の直接的な指標にすることは難しいと言える。また、そのような複雑な皮膚温度・コア温度の予測を前提とした温熱感指標のモデル化は得策ではないと言える。

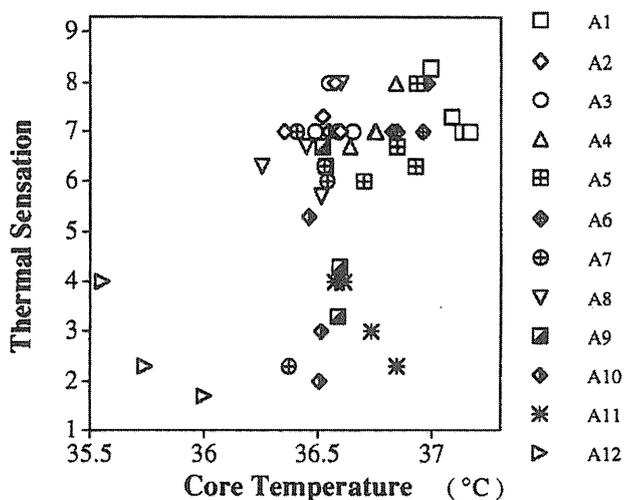


図5 コア温度と温熱感の対応関係
(実験A全データ)

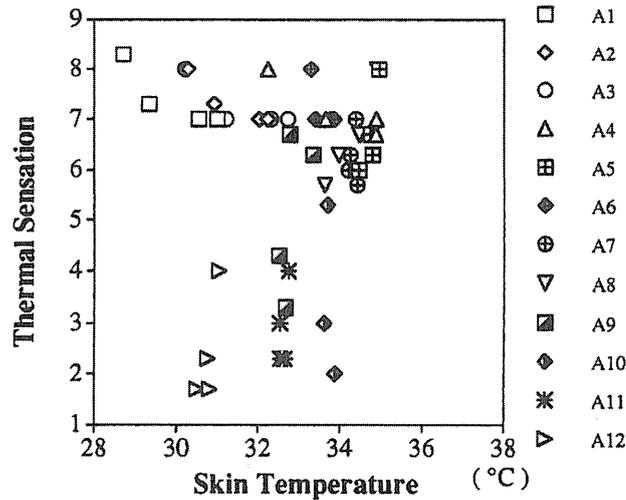


図6 皮膚温度と温熱感の対応関係
(実験A全データ)

2.5 新しい屋外用温熱感指標の理論的枠組み

2.5.1 本研究で提案する「仮想熱負荷量」の定義

暑熱環境下における人体熱収支上の最大のポイントは、1) 熱的非平衡状態にあること、2) 発汗によるフィードバックが働いていること、の2点である。この点を踏まえ新しい屋外用温熱感指標として「仮想熱負荷量 (Virtual Thermal Load=VTL)」を以下のように定義する。『人体のコア温度・表面温度とも全く変化しないと仮定した (絶対恒温性の仮定) 場合の、人体の受ける仮想的な熱負荷量 ($W m^{-2}$)。』その際、皮膚の湿り度 (β) は仮想熱負荷の関数として表し、発汗によるフィードバックを考える。もちろん実際には人体のコア温度および皮膚温度は変化していくので真の貯熱項 (F) と仮想熱負荷 (VTL) は異なる。

2.5.2 既存の温熱指標のレビュー

既存の主な温熱感指標を表5にまとめた。人体の熱的非平衡性と発汗フィードバックに留意してみると、以下のような問題点が上げられる。

(a) 不快指数：完全な経験則である。

(b) SET* (Gagge, et al., 1976⁶⁾)：人体の熱収支に基づいた理論だが、熱的平衡性を仮定している。

そのため発汗モデルとしてきわめて煩雑な2ノードモデルを用いている。

(c) PMV (Fanger, 1970⁷⁾)：人体の熱収支に立脚しており、熱負荷量的な考えを導入しているが、肝心の発汗によるフィードバック作用が考慮されていないため、暑熱環境解析に向かない。

表5 既存の温熱指標と仮想熱負荷量

	理論	熱的状态	発汗モデル	結果
不快指数	経験則	-----	-----	☒ 9 a
SET*	熱収支	平衡	2ノード	☒ 9 b
PMV	熱収支	非平衡	なし	☒ 9 c
VTL	熱収支	非平衡	βモデル	☒ 9 d

2.5.3 仮想熱負荷の計算手順

仮想熱負荷量は式(17)より導かれる。

$$VTL = M + R_n - C - E \quad (17)$$

(a) 人体温度の仮定 人体温度は熱的中立時の平均的な値を仮定する(具体的には $T_{sk}=33^{\circ}\text{C}$ 、 $T_c=36.5^{\circ}\text{C}$)

(b) 代謝量の仮定 人工気象室の実験結果より代謝量は静止状態を仮定すればほぼ一定と見なせる。以降、一般的な静止椅座時の代謝量 $50(\text{W m}^{-2})$ を用いることとする。

(c) 純放射量の算定～簡易測定法の提案 R_n は厳密には、各種放射計測値を用いて式(13)～(15)より求められるが、煩雑で実用的でない。神田・土屋(1994)は、グローブ温度を用いた簡易純放射量測定法を提案しているが、人体のアルベドの補正が困難であった。そこで、黒グローブに加えアルベドの異なる白グローブ温度を用いて、任意のアルベドをもつ物体の純放射量推定法を提案する。グローブ球の熱収支は、蓄熱 F 、潜熱 E 、代謝 M が無視でき、純放射量 R_n と顕熱輸送量 C が釣り合った状態であることから、それぞれ式(18)～(23)となる。

$$R_{nw} = C_w \quad (18)$$

$$R_{nb} = C_b \quad (19)$$

$$R_{nw} = (1 - \alpha_w) R_s + R_L - \epsilon_w \sigma T_w^4 \quad (20)$$

$$R_{nb} = (1 - \alpha_b) R_s + R_L - \epsilon_b \sigma T_b^4 \quad (21)$$

$$C_w = C_p \beta Ch U (T_w - T_a) \quad (22)$$

$$C_b = C_p \beta Ch U (T_b - T_a) \quad (23)$$

ここで、下付添え字 w, b は白・黒グローブを意味する。グローブのアルベド(α_w, α_b)およびグローブの射出率(ϵ_w, ϵ_b)は予め同定しておく必要があり、ここではそれぞれ以下のようにした。

$\alpha_w = 0.45$ 、 $\alpha_b = 0.01$ 、 $\epsilon_w = 0.997$ 、 $\epsilon_b = 1.0$ 。風速(U)・気温(T_a)・グローブ温度(T_w, T_b)は計測値であるから式(18)～(23)の実質的な未知変数は、入射短波放射 R_s 、入射長波放射 R_L の2つとなり、連立方程式の解として求まる。グローブと人体の形態係数が異なるため、グローブと人体への入射放射量は厳密には異なるが、形態係数の影響はアルベドの影響に比してきわめて小さいことがわかっているので、近似的に等しいと見なせる。従って、式(14)、(15)を直接計測しなくても人体に入射する R_s, R_L が推定されることになる。以上のようにして求められた R_s, R_L を式(13)に代入すれば、人体の受ける

純放射量が推定される。このようにして推定された人体への入射放射量と放射成分の測定から式 (13)～(15) により厳密に計測された入射放射量を図7に比較する。両者はきわめて良い一致を示しており、簡易推定法の有効性が示される。

(d) 顕熱の算定 風速、温度の実測値を用いて、式 (10)～(12) によりCを算定することができる。

(e) 潜熱の算定～皮膚の湿り度 (β) のモデル化 式 (5) で表せる潜熱Eのうち、 E_{diff} 、 E_{res} は式 (6)、(7) により推定可能であるが、皮膚からの発汗蒸発量 E_{sk} を気象データから推定する必要がある。ここでは、土壌面蒸発等で用いられる β 法を応用して、式 (24) のように定式化する。

$$E_{sk} = \beta \rho L C h U (q_s - q_a) \quad (24)$$

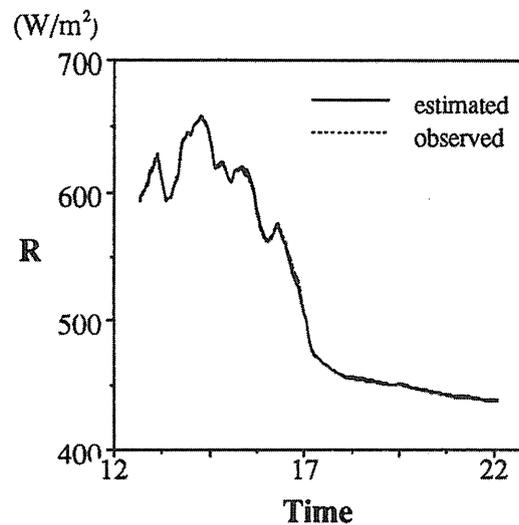


図7 人体への入力放射量の厳密測定値と簡易測定法の比較

ここで、 β は皮膚の湿り度を意味する唯一の人体生理依存パラメーターであり、人体生理反応のモデル化はこの β に全て集約されているとあって良い。そこで、実験Aの電子天秤による発汗データから逆算された β と仮想熱負荷量の対応関係を図8に示す(男女ともまとめて掲載)†仮想熱負荷と皮膚の湿り度はほぼ価関係で表せる(式(25a)、(25b))。すなわち、仮想熱負荷量に対応して皮膚の湿り度が決定されている。

$$\beta = 0.94 (VTL/60)^2 + 0.06 \quad VTL > 0 \quad (25a)$$

$$\beta = 0.06 \quad VTL < 0 \quad (25b)$$

(f) 収束計算 式 (17) 中のEの算定において、 β がVTLに依存しているため、収束計算が必要である。

(g) 衣服の影響を考慮する場合 簡単のため、裸体時を想定して解説を行ってきた。衣服の影響は、熱・水蒸気交換係数に衣服抵抗を導入することにより容易に拡張可能である(神田・土屋、1995¹⁾参照)。

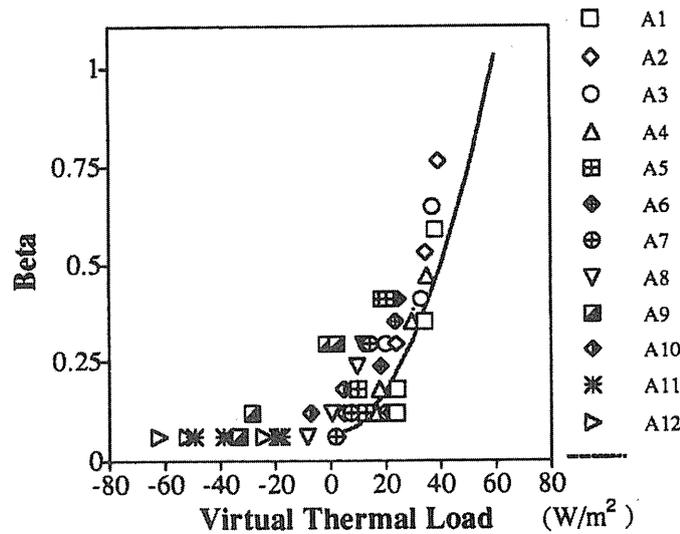


図8 皮膚の湿り度 (β) と仮想熱負荷量の関係

2.6 温熱感指標としての仮想熱負荷量の妥当性

前章で得られた仮想熱負荷量と体感アンケートという対応関係を調べる。使用するデータは β の同定に用いなかった実験 B の結果であり、5 分間隔データを15分平均とし、また4 人分の実験結果の平均値を用いて整理を行った。

2.6.1 温熱感指標

図9には、各種温熱感指標と実験 B における温熱感アンケートとの対応関係を示す。経験則である不快指数だけが他の指標と比べ最もばらつきが大きい。同じ気温・湿度条件は同一の不快指数を与えるが、実際には日射条件等がかなり温熱感に効いていることによる。それに対して、既存のSET*、PMVは、比較的温熱感との対応が良い。これは、人体熱収支に基づき、気温・湿度以外に日射・風速等が総合的に考慮されているためである。しかしながら、その対応関係は線形ではなく、暑熱状態が顕著になってくる温熱感6近傍を境に、温熱感に対する指標の感度が鈍る。SET*では、人体が熱的に平衡になった最終状態を仮定しているため、暑熱環境での熱指標が実際の体感温度よりも高めに算定されるものと思われる。一方、PMVでは熱的非平衡性を考慮しているものの、発汗によるフィードバックプロセスが考慮されていないため、暑熱環境下ではやはり熱負荷を実際の体感温度より過大に評価する。

本研究で提案する仮想熱負荷量は、温熱感との対応関係がもっと良く、しかも線形関係が保持されているその関係は、以下のように表せる

$$\text{温熱感指数} = a \text{VTL} + b \quad (26)$$

ここで、温熱感指数とは表2の温熱感の値を意味し、 a 、 b は定数である ($a=0.057$ 、 $b=5.57$)。このように熱的非平衡性と発汗フィードバックを考慮したことにより、VTLは暑熱環境条件に使える温熱感指標となっている。VTLが熱量の次元を持つこと、しかも実際の温熱感と線形性を有することは環境評価等に利用する上できわめて実用的な指標であるといえる。

2.6.2 快適感指標

快適感は、温熱感のみならず様々な人体感覚の影響を受けているため指標化することが難しいと考えられている。図 10 には、各種温熱感指標と実験 B における快適感アンケートの対応関係を示す。全般的傾向として温熱感指標と快適感の適合性は良いとは言えず、特に不快指数の適合性が悪い。特筆すべきは、快適指数 3 以上の快適条件下では、温熱感指標と快適性の適合性が悪い反面、快適性が 3 以下の不快条件下では、温熱感指標が比較的良く対応しており、特に VTL は快適性との明確な線形関係が認められる点である。

このことより、温熱指数 6 (=暖かい) を越えるような暑熱発汗状態においては、温熱感が不快感の支配的な要因になっていることが想像される。一方、温熱指数 5 ~ 2 程度の領域では、温熱感が不快感を与えないため、気象因子以外の別のファクターが快適性の支配要因となっている可能性が考えられる。

2.7 第 2 章の結論

- 1) 代謝量は気象因子に依存せず一定と見なせる。
- 2) 発汗によるフィードバックにより皮膚表面温度は低下する。
- 3) 屋外の暑熱環境下での人体は、基本的に熱的非平衡状態として扱う必要がある。
- 4) 以上の実験結果を踏まえ、新しい屋外用温熱感指標として「仮想熱負荷量」を提案した。また、その簡易測定法を提案した。
- 5) 上記仮想熱負荷量が温熱感指標としてきわめて有効であることを示した。

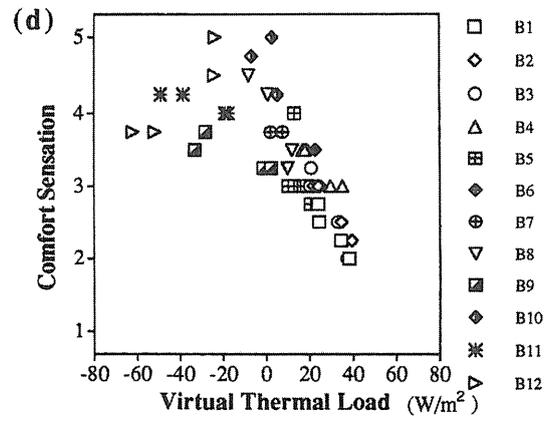
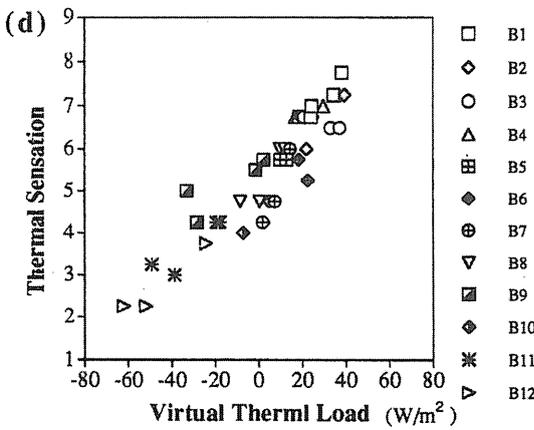
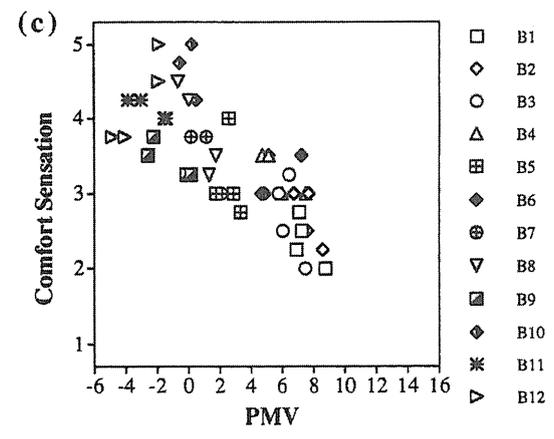
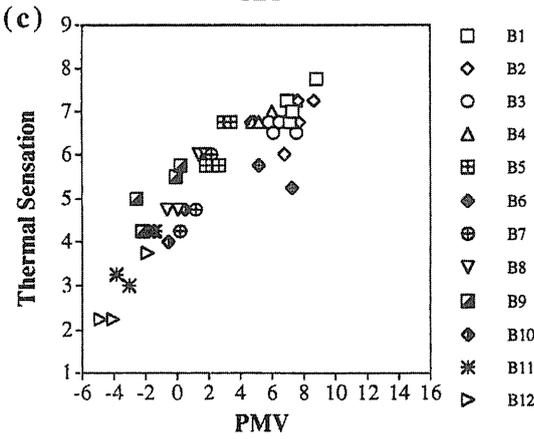
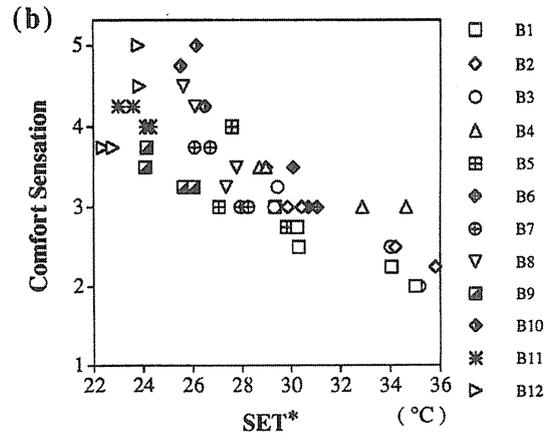
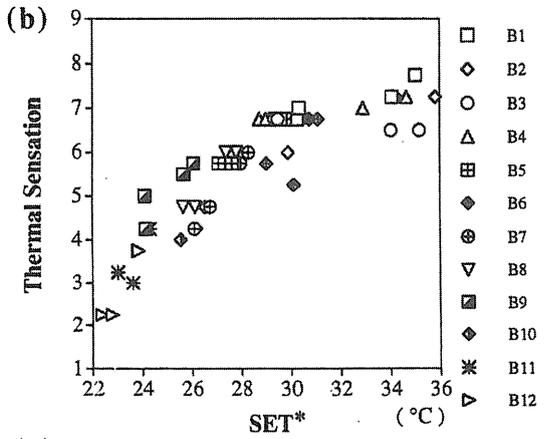
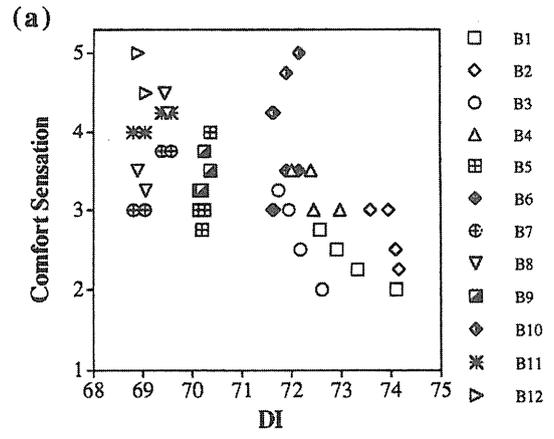
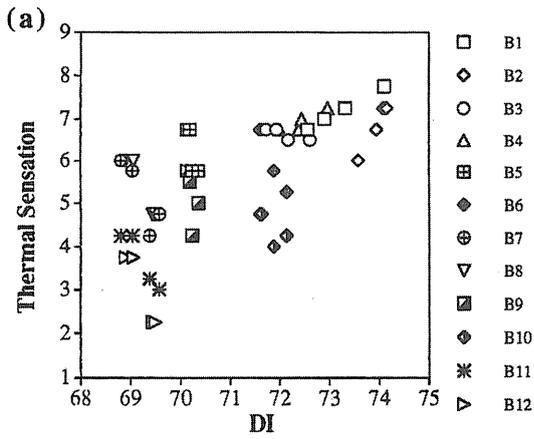


図9 温熱感と各指標の対応関係

図10 快適感と各指標の対応関係

3. 多摩川河川敷への適用例

3.1 はじめに

著者は、屋外における温熱環境を人間工学的視点から評価するための手法として、不快指数や各種屋内体感温度指標に変わる新しい屋外用温熱感指標の提案を行ってきた。そして様々な場所・季節における屋外実験^{1) 8)} および前章で述べた人工気象室を用いての人体温熱実験の結果から、人体熱収支理論に基づいた新しい指標 (=仮想熱負荷量 Virtual Thermal Load) を提案した。

本観測の目的の一つは、屋外におけるVTLの有効性を確認することである。この指標は、日射・風速・湿度・気温をよく制御した人工気象室においては人間の温熱感をきわめて良く表現することがわかっているが、実用に資するためには、気象変動の激しい実際の屋外環境においても温熱感アンケートと照合させて真に有用であるかどうかを検討しておく必要がある。

目的のもう一つは、この指標と解析法を用いて、多摩川を例に取り、都市河川周辺の温熱環境の評価を試みることである。近年、河川工学分野でも河川の大気環境が高い関心を集めており、その熱収支特性¹⁰⁾や音・熱・臭いなどの複合環境場¹¹⁾としての実態把握はかなり進んできている。しかしながら、他の屋外環境同様、温熱感アンケートなどのケーススタディーを蓄積していくことと同時に、客観気象データだけからその場の人間工学的な温熱環境を客観的かつ定量的に評価する手法が構築できればきわめて有用であろう。

3.2 観測方法

3.2.1 観測項目

(a) 観測点の状況 観測場所は、東急二子玉川園近傍の親水公園として有名な兵庫島である。測定点の位置関係を図 11 に示す。堤外から堤内までの散歩コースに沿った 8 ヶ所 (図中①~②) を観測ポイントとした。各測定点の環境概況を表 6 に示す。P4 (水際 2) とは、本川に 5 m 程突き出した親水用突堤部を意味する。

(b) 温熱感データ 被験者は身体的特徴の近い (身長 170 cm 前後、体重 65 kg 前後) 25 ~ 30 歳の成人男性 5 人である。服装は典型的な夏服 (ジーンズ、Tシャツ、運動靴、帽子なし) である。被験者全員で P1 ~ P8 までの測定点を散歩コースに沿って歩き、1 周で 1 ケースの測定とする。各測定点では約 10 分立ったまま静止し、その間の平均的な温熱感を記入してもらう。記入が終わったら、順次、次の測定ポイントまで歩いて移動する。散歩コース一回りに要する時間は約 1 時間である。次回の測定までは、車内で安静にしておく。調査は 1) 8:30-9:30、2) 11:00-12:00、3) 14:00-15:00 の 3 ケース行った。アンケート内容を表 7 に示す。

(c) **人体生理データ** 発汗量および鼻上皮膚温の測定は計測器数の制約上、5人の内の1人のみについて行った。発汗量は、温熱感調査の出発時と到着時での体重差を電子台秤（精度1g）で計測することにより1時間の平均値を求めた¹⁾。鼻上皮膚温度は、スポット放射温度計を用い各測定ポイント毎に3回計測し、その平均値を鼻上皮膚温度とした。ただし、計器の不調で8:30-9:30の計測は行っていない。鼻上皮膚温は室内実験結果より体表面温度としての代表性が強かつ温熱感と良い対応を示すとの報告がある。

(d) **客観気象データ** 人体の熱収支解析に必要な1) 白グローブ温度、2) 黒グローブ温度、3) 気温、4) 相対湿度、5) 風速、の計5成分は8地点全てにおいて定点自動観測を行った。測定点4においては参考値として5成分に加え風向・全天日射量計測も行った。

(e) **データ整理方法** 気象データは全て10秒間隔でサンプリングを行っているが、熱収支解析ではグローブ温度計の応答性の制約上、10分平均値に変換している。アンケートは5人の結果を平均化して用いる。

表6 観測ポイントの状況

測点	場所(図1)	日照	地面	備考
P1	国道246高架下	日陰	砂利	騒音が顕著
P2	河川敷芝生上	日向	芝	視界広い
P3	水際1(のり面)	日向	コンクリート	
P4	水際2(突堤部)	日向	コンクリート	
P5	森林緑地内	日陰	土	
P6	兵庫橋上	日向	コンクリート	
P7	堤内1(民家)	日向	コンクリート	マンション群
p8	堤内2(道路)	日向	芝	多摩堤道路脇

表7 アンケート内容

6	すごく暑い
5	かなり暑い
4	暑い
3	やや暑い
2	暖かい
1	やや暖かい
0	中立
-1	やや涼しい
-2	涼しい

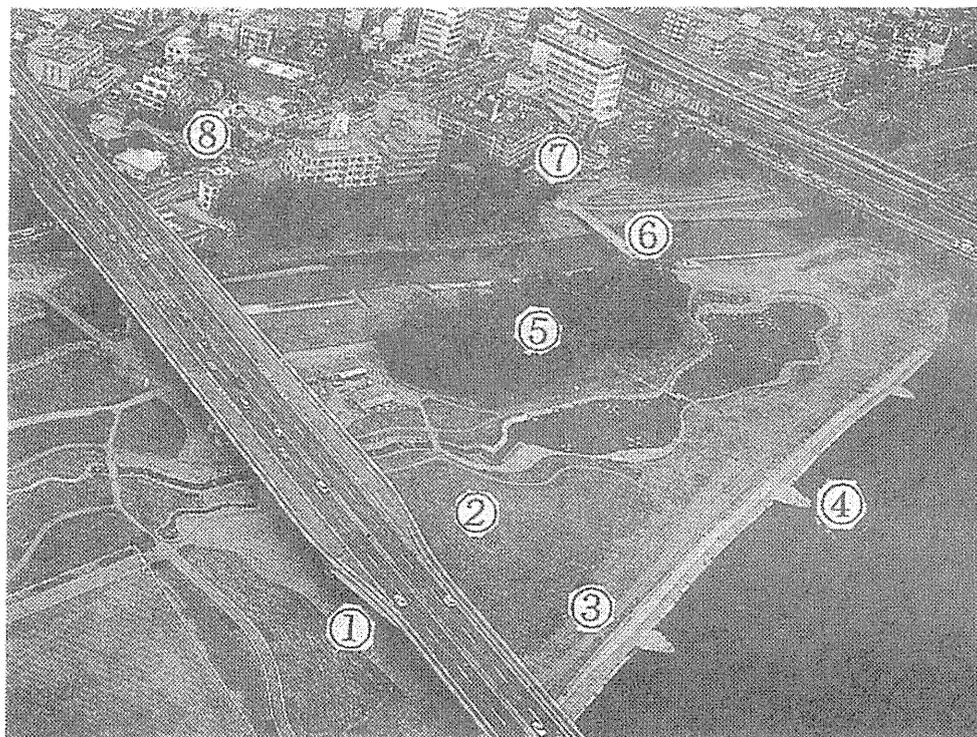


図11 観測場所(上が北、左が上流)

3.2.2 観測日の気象状況

観測日は、平成7年9月6日である。図12には、測定点4における気温・湿度・風速・風向・日射の時間変化を示す。温熱感調査時間（図12中⇔印）の気象状況を以下簡単に述べる。

- (a) 8:30-9:30 日射データからわかるように観測時間中晴天であった。風は河川上流側（北西、図11の左側）からの陸風である。気温・風速の上昇期に対応している。
- (b) 11:00-12:00 風は河川下流側（南東）からの海風が変わっている。11:30までは晴天であったが、その後雲による日射減衰とそれに伴う気温の低下・相対湿度上昇・風速の増加が顕著である。
- (c) 14:00-15:00 完全に曇天となっている。気温・湿度・風速・日射はこの時間中ほとんど変化がない。風は南東からの海風モードのままである。

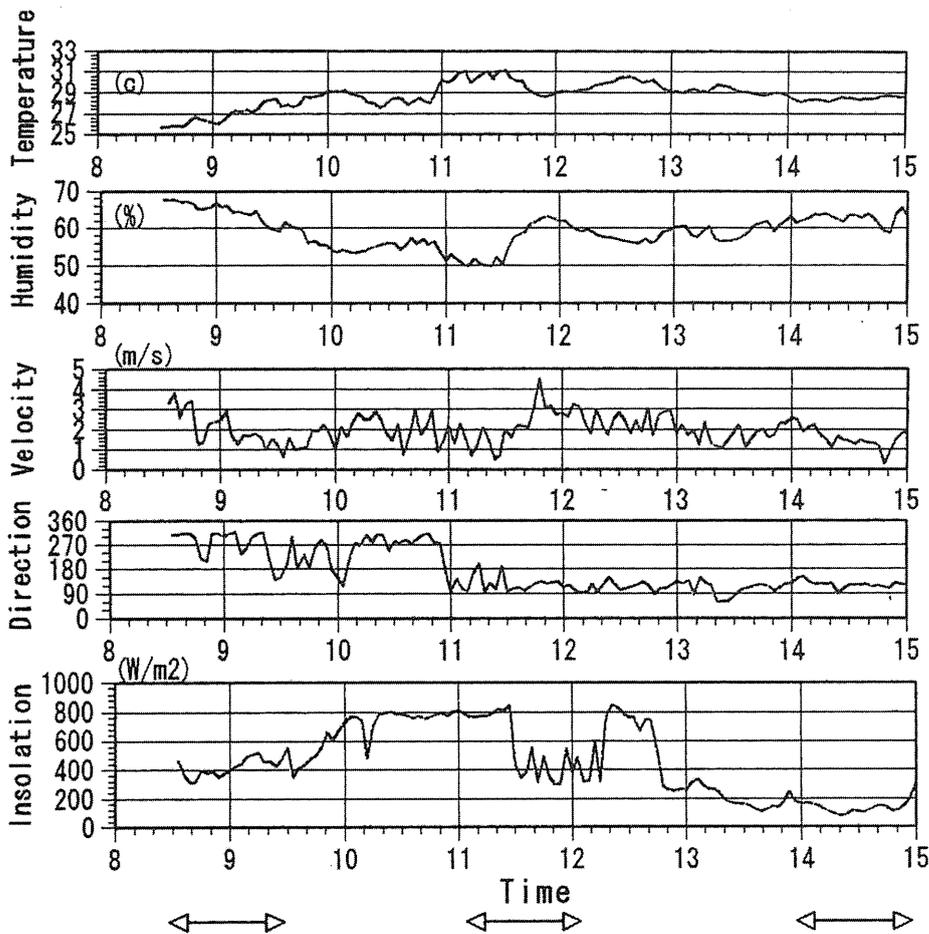


図12 観測点4における気象変化（上から気温・風速・風向・日射）

3.3 観測結果および考察

3.3.1 人体生理データと温熱感

(a) 鼻上皮膚温度 図13には、温熱感と鼻上皮膚温度の関係を示す。今回の実験の範囲においては、全体的傾向として鼻上皮膚温度は温熱感と適合性が良く、鼻上皮膚温度は良好な人体生理指標になっていると言える。室内実験の結果では、平均皮膚温度は顕著な発汗を伴わない状況下で温熱感と良い適合性を示すものの、激しい発汗時には潜熱輸送による恒温性保持のためのフィードバック効果により、皮膚温が低下していく傾向が見られた。しかしながら、今回の現地観測ではそのような傾向は見られない。今回の実験は、激しい発汗を伴う状況を含んでいないため、この点についてはより暑い状況での確認が必要である。

また、図中矢印で示した点は、11:00からの測定における緑地（P5）での結果である。全体的傾向から見て同じ程度の鼻上温度のデータと較べ低い温熱感を申告している点特徴的である。日向から緑地の日陰に入った時の温熱感ギャップを実際の温熱環境よりも過大に評価している可能性がある。

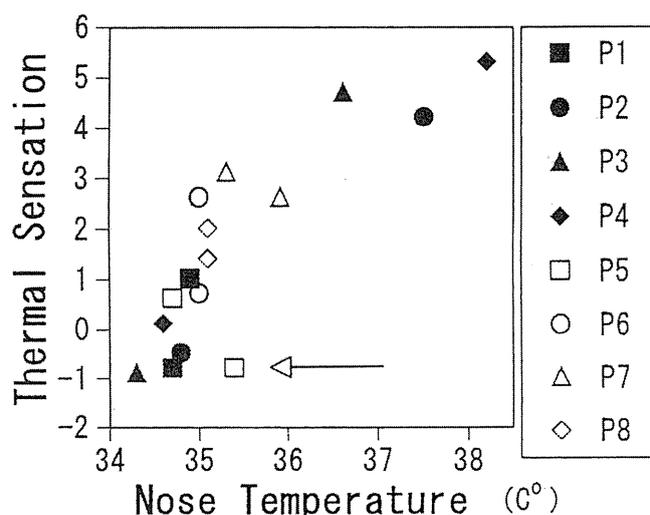


図13 鼻上皮膚温度と温熱感の関係

(b) 発汗量 図14には発汗量と温熱感（1時間平均値）の対応関係を示す。人体に出入りする熱が発汗のみとすれば、発汗量と温熱感は逆相関になくはならないが、結果は正の相関を示している。これは、人体の熱収支において、潜熱項が支配的ではなく、熱負荷を軽減するための副次項として効いているに過ぎないことを示唆している。事実、後述する図18より明らかなように、潜熱は受熱や顕熱に較べて全般的に小さくなっている。図15には、発汗量の実測値と、次章で述べられる人体熱収支解析から算定される発汗量の計算値を比較したものである。両者は線形関係を有しており解析法の妥当性を示している。絶対値は実測値が大きめであるが、ここでの解析は皮膚温度の不変性を仮定しているため、実際の熱収支よりも各項を小さめに見積る（逆に熱負荷は大きめに見積もる）ことは当然の結果である。熱収支解析自体は、ある個人の「真」の熱収支を予測するものでなく、温熱感の指標となる「仮想」の熱負荷量を算定するためのものであるから、この絶対値の不一致は、問題にはならない。

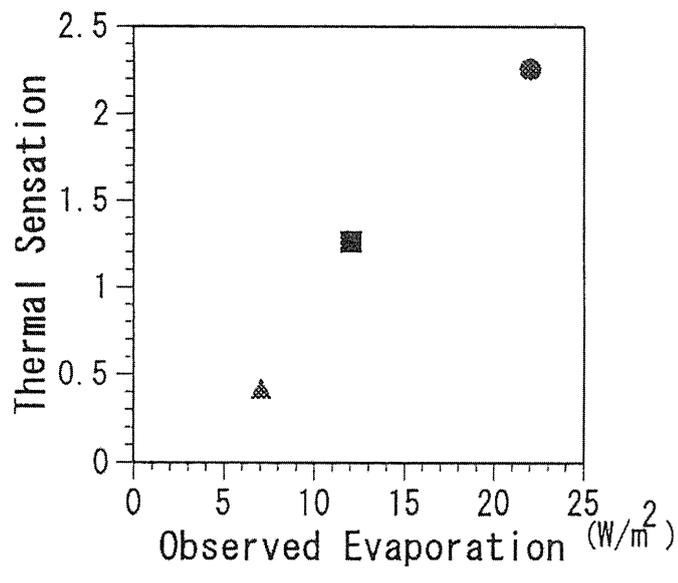


図 14 発汗量と温熱感の関係

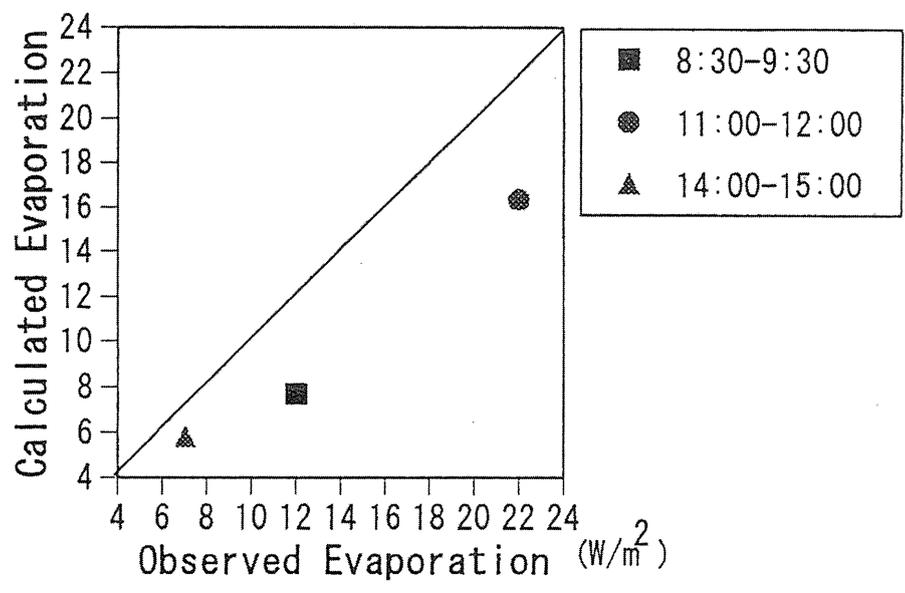


図 15 発汗量の実測値と計算値

3.3.2 仮想熱負荷量 (Virtual Thermal Load) と温熱感

(a) 仮想熱負荷量の算出法

解析法の詳細は前章で詳細に述べられているのでここでは簡単に述べる。人体表面での熱収支は以下の式 (17) で表せる。M (代謝量) は運動状態に併せて一定値を仮定 (8:30-9:30は被験者が器具のセッティングを行いながらアンケートを行ったので軽作業時の代謝量として $60 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$ 、他の時間は徒歩による移動と立位静止時の代謝量として $50 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$ を仮定)。 R_a は黒球温度・白球温度・風速・温度データから球の熱収支式 (18)~(23) を基に推定可能、Eは式 (24) のようにバルク式で表せ、皮膚の湿り度は仮想熱負荷量の関数として式 (25) より求められる。顕熱も式 (10)~(12) より求まる。

(b) 仮想熱負荷量と温熱感の関係 客観気象データのみから人体熱収支解析によって導出された「仮想熱負荷量 VTL」と温熱感アンケートとの対応関係を図 16 に示す。気象変動がほとんど無視できる人工気象室の場合よりもかなりばらつきがあるものの、概ね仮想熱負荷量は温熱感と良好な対応関係を示しており、実際の屋外環境下においても体感温度指標として有効であることがわかる。

ただし、暑くも寒くもない=中立に近い温熱感領域 (温冷感指数 0) に着目すると、1) データのばらつきが大きく、2) 図中も囲い線内のデータは、全体的傾向からみて、低い (涼しい) 温熱感申告側にシフトしている、3) しかもそれらのデータはいずれも堤外 (P1~P5) のもので、特に森林内のデータはすべてここに属していることがわかる。中立近傍では、ちょっとした他の要因で温熱感が影響されることが予想される。鼻上皮膚温度でも同様の傾向が認められたように、森林は「涼しい」ものだという潜在観念や、気象環境が急変した場合に受ける印象など、人間の心理効果も温熱感に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

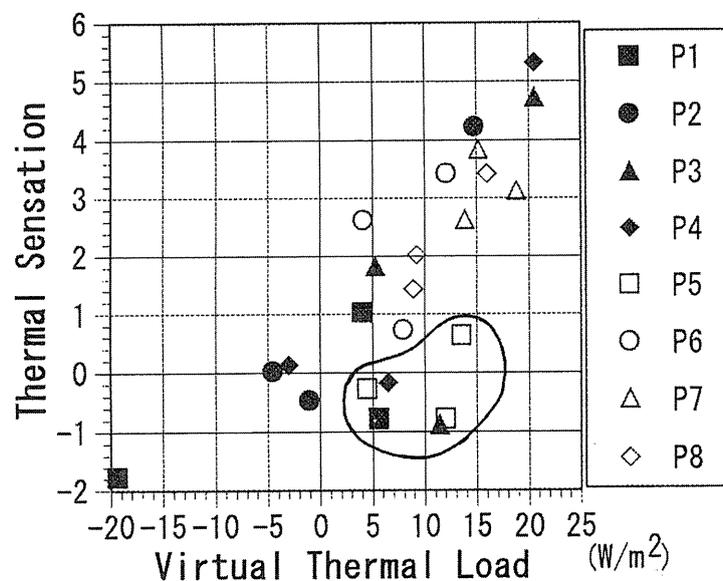


図 16 仮想熱負荷量 (VTL) と温熱感の関係

3.3.3 温熱環境の時空間特性

各時間帯における各測定点での温熱感データを図17に、人体熱収支解析結果を図18に示す。

(a) 温熱感の個人差 大きいときで温熱感指数で4～5程度の個人差がある。気象条件が安定している室内ではこれほど大きな差は生じなかったことから、屋外特有の非定常乱流変動に対する温熱感の受け止め方に、個人差が存在すると予想される。

(b) 温熱感の時空間特性 1時間の観測中に大きな気象変化がなかった8:30-9:30と14:00-15:00のデータに着目すると、全体的傾向として堤外(P1～P5)から堤内(P6～P8)へかけて温熱感は増加していく傾向にある。完全に曇天で日射の影響が小さかった14:00-15:00に特にその傾向が顕著である。晴天時の8:30-9:30では、当然ながら日陰であるP1(高架下)やP5(森林内)での冷涼感が大きい。堤防内外の微気象特性は武若ら¹⁰⁾によって検討されているが、温熱感の観点からも堤外は好ましい熱環境を提供していると言える。

11:00-12:00では、図12に示したように、堤外(P1～P5)では晴天であったが、堤内(P6～P8)では、曇天となった。その影響によりP2～P4などの河川際よりも堤内(P6～P8)での温熱感が低くなっている。注目すべきは、森林内(P5)の測定時は晴天であったにも関わらず、曇天の堤内域よりも著しく低い温熱感を申告している点であり、これは先述した「心理的」効果を反映しているものと思われる。実際、11:00-12:00の森林内のVTLは堤内と大差なく、受熱放射はむしろ大きな値となっている。

(c) 人体熱収支の時空間特性 全体的傾向として、VTLは温熱感の空間特性と一致している。

8:30-9:30は晴天であったが気温がまだ低かった。そのため、発汗の寄与は小さく、受熱放射と顕熱がVTLを左右している。堤内(P6～P8)の受熱放射量が多いのは、コンクリートなどの周囲物体から赤外放射が寄与しているものと思われる。14:00-15:00は曇天であったため、受熱放射の寄与が相対的に下がっている。11:00-12:00は、温熱感の考察で述べたとおり、堤外・堤内での受熱放射量の違いがVTLを左右している。ただし、11:00-12:00の堤防内測定時の日射量は8:30-9:30の堤防外測定時よりも大きくなっているにも関わらず、受熱放射量はむしろ小さくなっていることから、堤外における周囲からの長波放射の影響が小さいことが推察される。

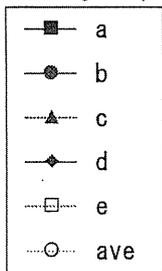
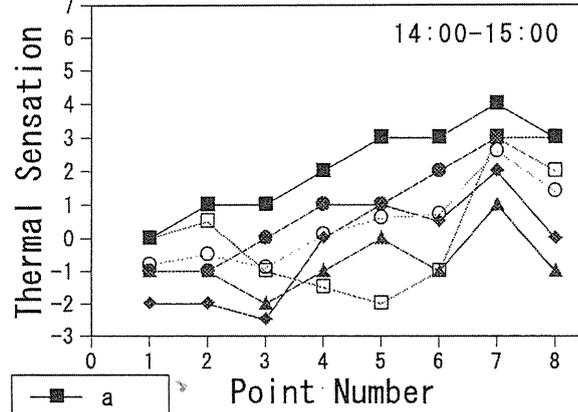
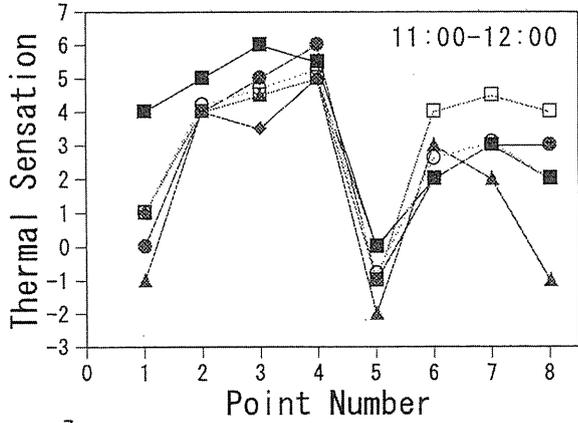
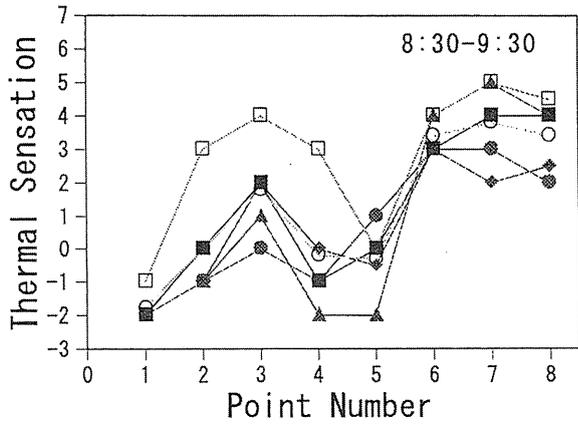


図17 各測定点における温熱感

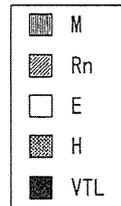
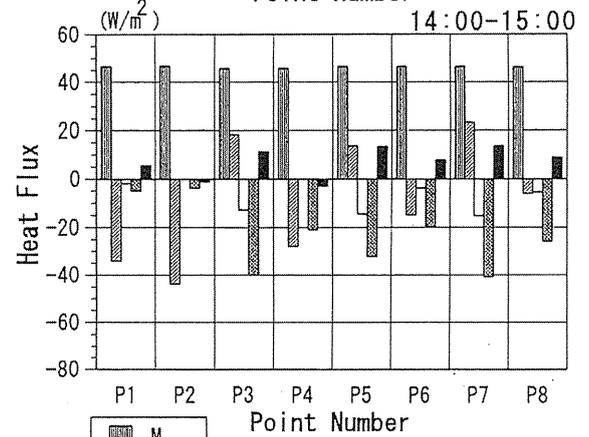
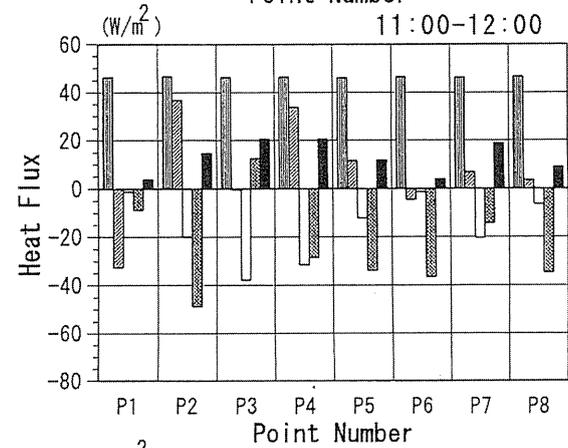
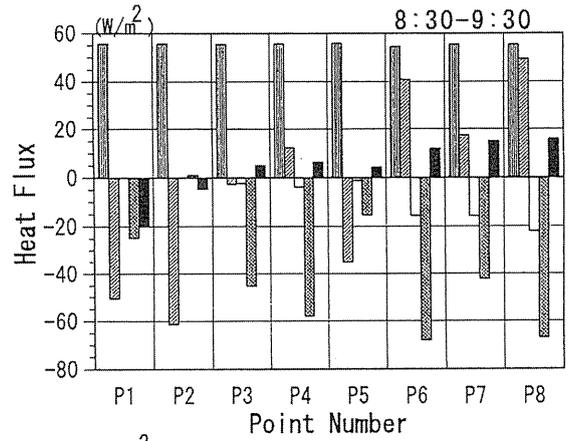


図18 各測定点における人体熱収支

3.4 3章の結論

今回の現地観測の範囲において以下のことが結論できる。

- 1) 鼻上皮膚温度は温熱感と良好な対応関係を示し、屋外環境における生理的温熱指標として有効である。
- 2) 仮想熱負荷量は温熱感との良好な対応関係を示し、屋外環境における物理的温熱指標として有効である。
- 3) 温熱感ギャップが時空間的に大きい場合や日射環境が急激に変化する場合など、「心理的効果」により実際の熱負荷よりも過大に温熱感を評価する場合がある。
- 4) 全般的に堤外は堤内よりも「冷涼な温熱感」環境を提供している。

参考文献

- 1) 神田学, 土屋信夫: 微気象観測に基づいた屋外における人体の温熱環境解析, 土木学会論文集, No. 509 / II - 30, PP. 35 - 44, 1995.
- 2) 例えば, 宇多高明, 小俣篤, 浅対亨: 海岸の温熱環境と快適性の関係および海岸の空間規模の評価法に関する研究, 土木研究所資料, No. 2939, 1991.
- 3) 中山昭雄: 温熱生理学, 理工図書, 1981.
- 4) Monteith, P.J.: *Principles of Environmental Physics*, 1973.
- 5) ASHARE Handbook, Fundamentals, 1989.
- 6) Gagge, A.P., Nishi, Y. and Nevins, R.G.: The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, ASHRAE Transaction, PP. 234 - 247, 1976.
- 7) Fanger, P.O.: *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, 1970.
- 8) 神田学・土屋信夫: 微気象観測に基づく人体熱収支解析の試み, 水工学論文集, 38, 1994.
- 9) 神田学・柳本記一・宇梶正明: 人工気象室における人体の温熱環境実験, 水工学論文集, 39, 1995.
- 10) 武若聡・池田駿介ほか: 都市内河川による大気冷却効果, 土木学会論文集, 47, 1993.
- 11) 木内豪・栗城稔・小林裕明: 複合環境下における河川空間と周辺市街地の快適性評価, 環境システム研究, 1995.