

新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価 ----- 多摩川河川敷における観測を例に -----

Application of New Outdoor Thermal Sensation Index to Evaluation of
Thermal Environment Around River

神田学*・木内豪**・小林裕明**

BY Manabu KANDA, Tsuyoshi KINOUCHI and Hiroaki KOBAYASHI

A meteorological and physiological field observation was conducted in summer on Tama River to verify the applicability of 'new thermal sensation index to evaluation of outdoor thermal environment. The results and analysis based on human energy budget show that 1) Virtual Thermal Load calculated from meteorological data agree with thermal sensation, 2) nose temperature agree with thermal sensation, 3) Thermal sensation is affected by 'physiological effect' such as large gap of meteorological conditions or prejudice for forest. Temporal and spatial characteristics of thermal environment around river are also discussed.

Keywords : thermal sensation, virtual thermal load, river

1. はじめに

著者らは、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)・2)}および人工気象室を用いての人体温熱実験^{3)・4)}などの結果から、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。

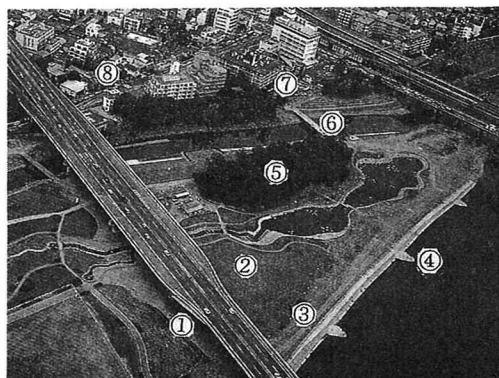
目的のもう一つは、この指標と解析法を用いて、多摩川を例に取り、都市河川周辺の温熱環境の評価を試みることである。近年、河川工学分野でも河川の大気環境が高い関心を集めており、その熱収支特性⁵⁾や音・熱・臭いなどの複合環境場⁶⁾としての実態把握はかなり進んできている。しかしながら、他の屋外環境同様、温熱感アンケートなどのケーススタディーを蓄積していくことと同時に、客観気象データだけからその場の人間工学的な温熱環境を客観的かつ定量的に評価する手法が構築できればきわめて有用であろう。

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部開発システム工学科

** 正会員 建設省土木研究所都市河川研究室

表－１ 観測ポイント概況

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 視界広い
P2	河川敷芝生上	日向	芝	
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	マンション群 多摩堤道路脇
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	
p8	堤内２（道路）	日向	芝	



図－１ 観測場所（上が北、左が上流）

２．１ 観測方法

(a) **観測点概況** 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－１に示す。堤外から堤内までの散歩コースに沿った８カ所（図中①～⑧）を観測ポイントとした。各測定点の環境概況を表－１に示す。P4（水際２）とは、本川に５ｍ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１７０ｃｍ前後、体重６５ｋｇ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１周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－２に示す

表－２
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

(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⁴⁾。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く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・日射の計測も行った。

(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。

２．２ 観測日の気象概況

観測日は、平成７年９月６日である。図－２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２中印）の気象概況を簡単に述べる。

(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１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。

3. 観測結果および考察

3.1 人体生理データと温熱感

(a) 鼻上皮膚温度 図-3 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、良好な生理指標になっていると言える。室内実験⁴⁾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比べ低い温熱感を申告している点が特徴的である。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。

(b) 発汗量 図-4 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ってはならないが、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-8より明らかのように、潜熱は受熱や顕熱に比べて全般的に小さくなっている。図-5 には、発汗

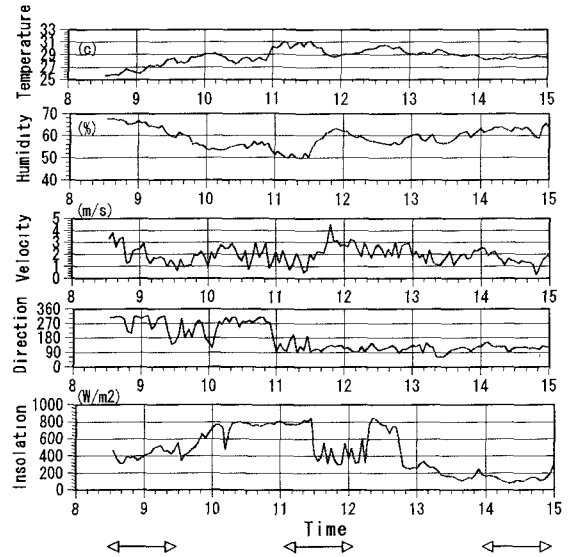


図-2 観測点4における気象変化

上から気温、風速、風向、日射

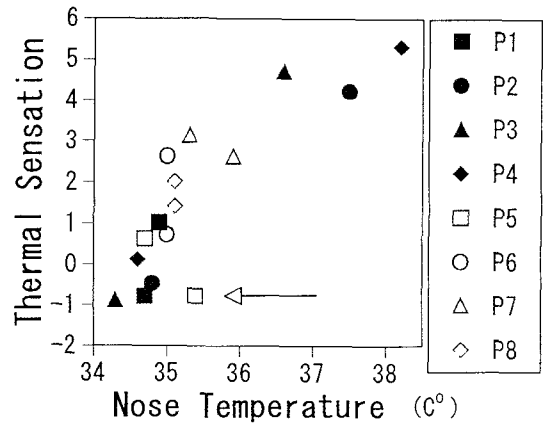


図-3 鼻上皮膚温度と温熱感の関係

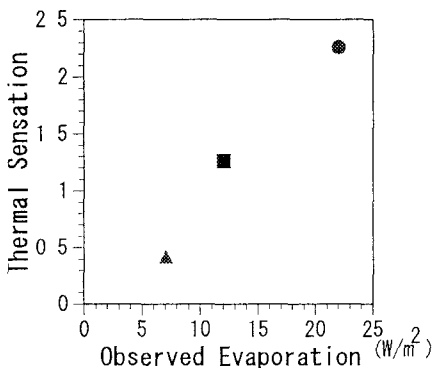


図-4 発汗量と温熱感の関係

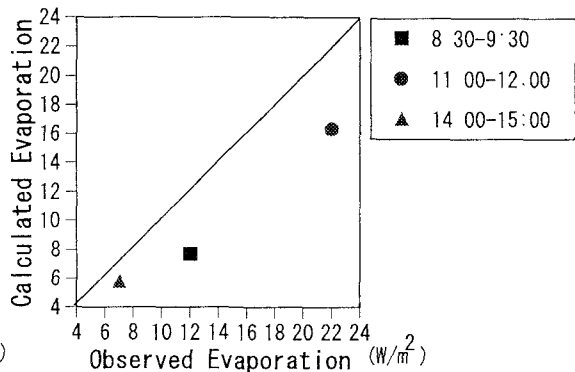


図-5 発汗量の実測値と計算値の関係

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（詳細は文献4参照）。

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

解析法の詳細は文献^{1)~4)}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(1)で表せる。

$$VTL = M + Rn + E + H \quad (1)$$

$$E = ChU\beta (qs-qa) \quad (2)$$

$$\beta = VTL/3600 \quad (VTL > 0) \quad (3)$$

VTL:仮想熱負荷量、M:代謝量、Rn: 正味受熱放射量、E:発汗潜熱量、H:顕熱量（単位はいずれもW/m²）。 Ch:熱輸送係数、U:風速、qs:皮膚の飽和比湿、qa:大気比湿 β:皮膚の湿り度。M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(W/m²)、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(W/m²)を仮定）、Rnは黒球温度・白球温度・風速・温度データから球の熱収支式を基に推定可能、Eは式(2)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(3)より求められる。顕熱も式(2)と同様なバルク式より求まる。

(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-6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) 図中の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」ものだという潜入観念や、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。

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-7に、人体熱収支解析結果を図-8に示す。

(a) 温熱感の個人差 大きいときに温熱感指数で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。

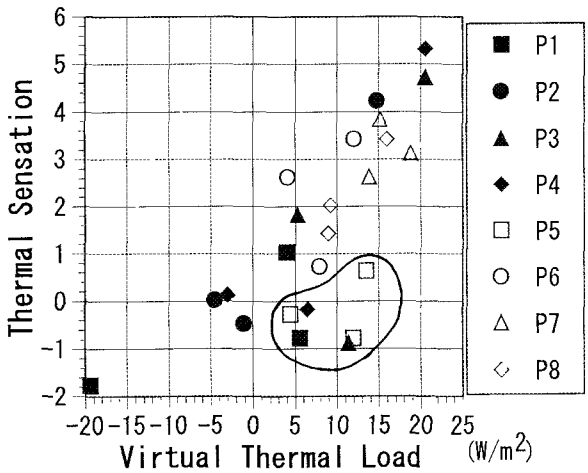
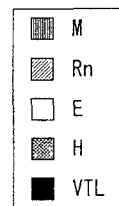
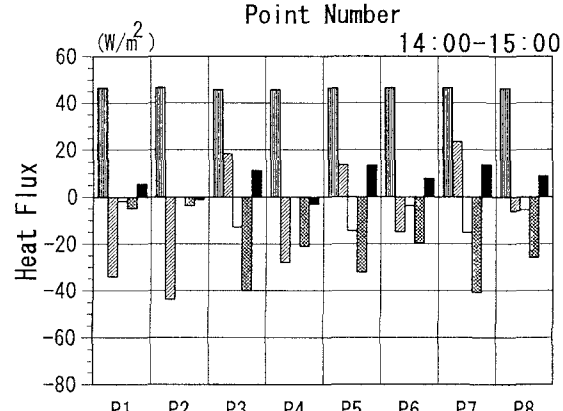
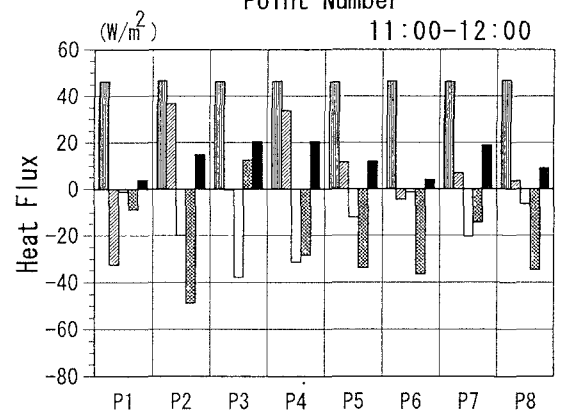
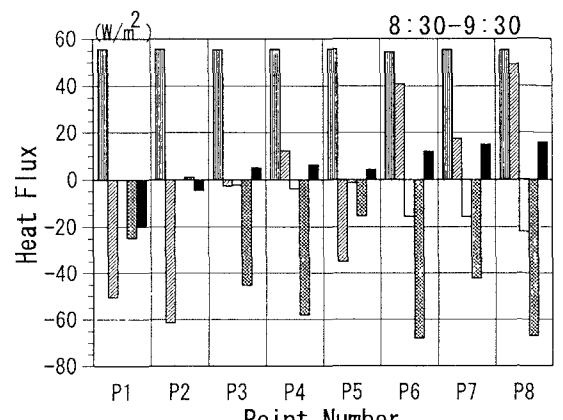
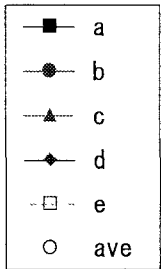
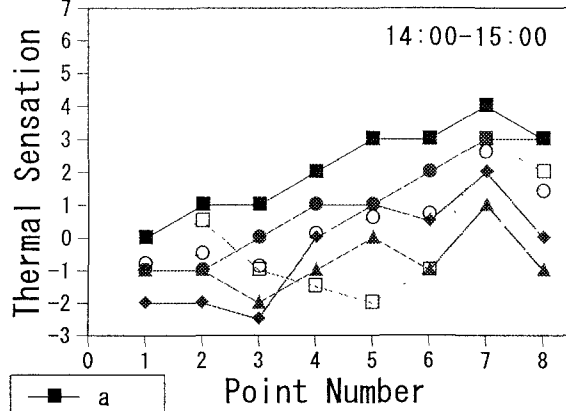
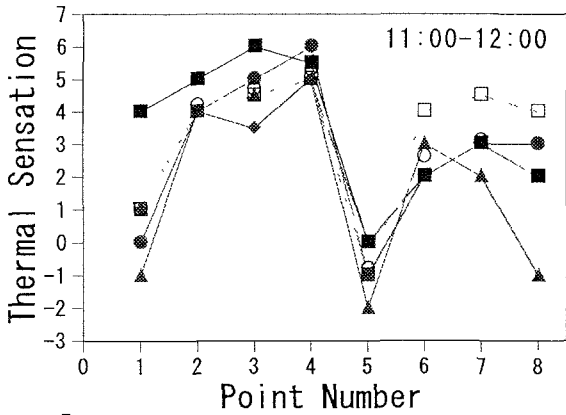
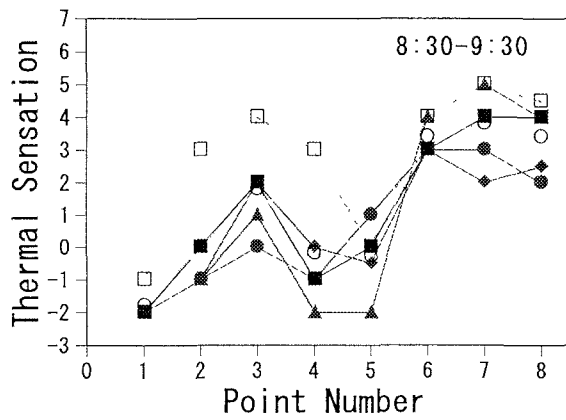


図-6 仮想熱負荷量 (VTL) と温熱感の関係



図一 各測定点における温熱感

a~eは被験者番号、
aveは5人の平均値

図一 各測定点における人体熱収支内訳

(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⁵⁾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2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。

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、「心理的效果」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。

謝辞 本研究は、平成7年度河川環境管理財団河川美化・緑化調査研究助成研究および文部省科学研究費一般C07650594の援助を受けました。また、観測においては、東京工業大学4年生福田忠弘・森脇亮の2氏に手伝っていただきました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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、30、1995。
- 3) 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。
- 4) 神田学・柳本記一・宇梶正明：新しい屋外用温熱感指標の提案、土木学会論文集(投稿中)、1995。
- 5) 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、479、1993。
- 6) 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。

6.