

温熱的に安全・快適な空間提供に向けた人体動作を伴う 動的環境下における着衣デザインの最適化

岡山県立大学 島崎 康弘
(共同研究者) 大阪府立大学 吉田 篤正
岡山県立大学 齋藤 誠二
大阪府立産業
総合技術研究所 山本 貴則

A Method of Optimal Design of Clothing Under Dynamic Thermal Environmental Changes for Providing Better Living Environments

by

Yasuhiro Shimazaki, Seiji Saito
Okayama Prefectural University

Atsumasa Yoshida

Osaka Prefecture University

Takanori Yamamoto

Technology Research Institute of Osaka Prefecture

ABSTRACT

People now concerns about health effect of thermal environments. Clothing is considered as one of major influential factors on thermal environment around human, in this sense, it is important to understand the thermal effects of clothing for establishing better living environments. Considering dynamic thermal environmental changes in outdoor situations, a method for evaluating thermal states of wearers was examined. Since thermal properties have impact on wearers, firstly, thermal conductivity, heat transfer coefficient, and also radiative properties were measured. Then, experimental

method for understanding the relations among environments, thermal properties of clothing, human physiology, and human perceptions was carefully considered and used for measurement. Human energy balance is in general a useful tool for expressing thermal states of human, and in this study a method for clothed human energy balance calculation which is applicable to various environments, clothing ensembles, and human physiological states, was newly developed. Under typical outdoor situations such as solar radiation and wind conditions, the clothed human energy balance was verified by comparing experimental results, and proved with satisfactory accuracy. Finally, we provide a suitable way to think about appropriate clothing for given situations, and at the same time the results of the study also provide a database for designing better living environments with clothing.

要 旨

温熱状態を適正範囲に保ち安全に活動できる環境づくりが求められており、近年注目される着衣を用いた温熱環境調整作用についての取り組みを行った。とりわけ、温熱環境要素が変動するような動的な環境を想定し、環境と着衣熱物性との関係性に影響される着衣者の生理・心理状態の予測手法を検討した。着衣物性は、熱伝導率、対流熱伝達率、ふく射特性に分類して測定・整理した。また着衣と人体応答との関係性把握を目的とした被験者実験を詳細に検討するための実験手法を確立した。環境情報に加え生理量、熱物性を考慮したうえで、人体の温熱状態を反映する着衣人体熱負荷量の予測モデルを考案し、一定精度で定量的な予測が可能であることを確認した。従って、本研究の手法を用いることで、環境に適したアンサンブルを検討することができるようになった。

緒 言

活動的な生活をおくることは心身の健康にとどまらず、他者との共働・交流を通じて生活の質(QOL)の向上にもなることから社会的役割も大きい。一方で、厳しい夏冬を経験する日本において

では、熱中症など温熱環境に関わる健康上の課題も存在する。従って、人体の温熱状態を適正範囲に保ち安全に活動できる環境づくりが求められる。

人体の温熱状態は人体とその周囲環境との間の熱授受である人体熱収支により把握でき¹⁾、主に気温、湿度、放射、気流、活動量(代謝)、着衣の温熱環境六大要素により決定される。このなかでも着衣は、身体からの放熱量、外部からのふく射熱、水分蒸発などの調整機能を果たしており、また、コントロール可能な数少ない要素である。そこで本研究では、着衣のもつ人体温熱状態調節作用に着目した。これまでも着衣が人体に与える影響に関して様々な研究が行われてきたが、着衣素材単体や定常的な静的環境下での特性計測が主である。実生活、とりわけ屋外での活動環境を想定すれば、上述の温熱環境要素が変動するような動的な環境における着衣の役割を把握し、適切な活動空間提供を目指すための最適着衣の検討を行った。

1. 実験方法

温熱環境要素が変動するような動的な環境を考慮したうえで、着衣素材単体の熱特性に加えて、

人体-着衣-環境の系に関わる環境物理量, 人体生理量, 心理量を同時測定し, それらの関係性把握のための方法論を検討した.

1.1 着衣素材の熱物性

着衣による効果を伝熱的に説明すると, 伝導, 対流, ふく射の三種となる. これらそれぞれを熱伝導率, 対流熱伝達率, ふく射特性 (反射, 透過, 吸収率) で評価する.

元来, 着衣素材の物性はその着衣毎に異なる. 従って, 以下に示す物性は本実験で用いた着衣素材での値であることに留意する必要があるが, 後述する着衣と人体応答との関係性把握における方法論として有用であると考え.

実験試料として, スポーツ現場で着用されるタイトフィット型スポーツウェア上下 (Mizuno Bio Gear) を用い, ふく射物性の異なる白および黒色の2色を使用した. 試験試料は市販品で有り, ポリエステル 85% - ポリウレタン 15%, 厚さ 0.3 mm であった.

1.1.1 熱伝導率

KES-F7 (Kato Tech, Thermo Labo) により, 定常熱伝導率を測定した. これは, 一定温度 (30°C) の熱板から試料を介し, 他の一定温度 (20°C) に保たれた熱板への熱の伝わりやすさを測定するものである.

1.1.2 対流熱伝達率

風洞 (図 1, 外寸 1000 mm × 300 mm × 200 mm の透明アクリル製) を用いて着衣素材の対流熱伝達率測定を行った. 人体形状を簡単に円筒型と見なし, 1/10 スケールで模擬した円筒型ヒーター (直径 30 mm, 長さ 150 mm, 印加電圧 10 V でヒーター発熱量 22.5 W/m²) の側面に空隙を設け着衣素材を装着し, 円筒型ヒーター, 着衣素材, および着衣空隙の温度計測を行い, 円筒型ヒーターから外気への対流熱伝達率を導出することにより, 保温性・断熱性はどのように変化するか評価する.

なお, 風洞装置の乱流強度は風速 0.8 m/s で 0.039 であった. 試料は円筒ヒーターに伸ばさずに巻き付けて装着し, その際の着圧は 15 hPa であった.

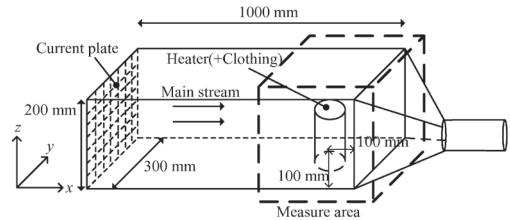


図 1 対流熱伝達率測定装置概略図

実験では, 円筒型ヒーターおよび衣服素材, 着衣空隙の温度変化を計測した. 各温度変化は 1 分毎に記録し, 定常状態と見なしたところから 30 分間の平均値を用い, このとき対流熱伝達率 h [W/(m²K)] を式 (1) で定義する.

$$q - q_{rad} = h (T_{heater} - T_{room}) \quad (1)$$

$$q_{rad} = h_{rad} (T_{heater} - T_{room}) \quad (2)$$

h_{rad} はふく射熱伝達率 [W/m²] である.

ここで, q はヒーター発熱部の熱流束 [W/m²], q_{rad} は放射熱流束 [W/m²], T_{heater} はヒーター温度 [K], T_{room} は室内温度 [K] である.

1.1.3 ふく射特性

着衣素材のふく射特性として, 日射吸収率, 日射透過率, 日射反射率の測定を行った⁵⁾. 実験装置の概略を図 2 に示す. 日射光及び反射光の測定に長短波放射計 (EKO MR-60, 短波スペクトル範囲: 0.3 ~ 3 μm), 透過光の測定に日射計 (EKO MS602) を用いた.

測定場所がオープンスペースであり, 試料が完全拡散反射, 周囲物体との多重反射がないことを考慮すると, 衣服素材の反射率 ρ_{clo} [N.D.] は以下式 (3) となる.

$$\rho_{clo} = \frac{(\rho_{clo-obs} - (1 - \phi_{clo}) \times \rho_{other})}{\phi_{clo}} \quad (3)$$

ここで, $\rho_{clo-obs}$ は衣服素材の見かけの反射率 [N.D.], ϕ_{clo} は形態係数 [N.D.], ρ_{other} は

周辺表面被覆材の反射率 [N.D.] である。

入り口に衣服素材を配置しない際の日射 $S \downarrow$ と、衣服素材を配置した際の日射 $S' \downarrow$ の比を同時刻に測定することで衣服素材の透過率 τ_{clo} [N.D.] を求めることができる。

$$\tau_{clo} = \frac{S' \downarrow}{S \downarrow} \quad (4)$$

吸収率 a_{clo} [N.D.] はエネルギー保存則より以下の式で求められる。

$$a_{clo} = 1 - \rho_{clo} - \tau_{clo} \quad (5)$$

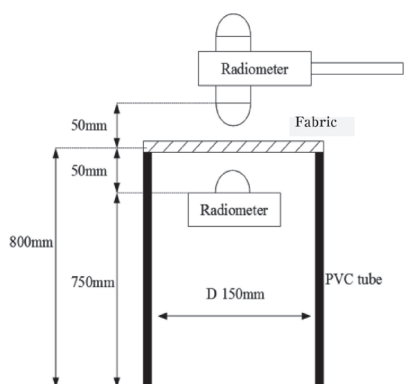


図2 ふく射特性測定装置概略図

1.2 着衣時の人体温熱状態および心理量

上述のように予め着衣素材の熱物性を求めたうえで、さまざまな動的環境下における人体温熱状態と心理量を測定することを目的とした被験者実験を実施した。なお、実験は所属機関の倫理規定に準拠して行われた。

環境情報として、気温および相対湿度 (T&D TR-73U)、風速 (Young CYG-81000)、短波放射量および長波放射量 (EKO MR-60) を測定した。人体生理情報として、皮膚温は Hardy-Dubois の平均皮膚温算出法にならひ²⁾、前額、上腕、腹、手甲、大腿、下腿、足甲の7点を、深部温として直腸温をそれぞれサーミスタ (Nikkiso Thermo N542) で測定した。また、皮膚温測定と同様の7点の発汗量 (Rousette Strategy SNT-200) を測定した。心拍数は心拍計 (POLAR RS800CK) を用

いて測定した。代謝量は、呼吸代謝モニタリングシステム (S&ME VO2000) により酸素摂取量および二酸化炭素排出量を測定し、代謝量を算出した。心理情報として、被験者自身が現在感じる温冷感 (-3: 寒い~暑い: +3)、快適感 (-2: 不快~快適: +2)、発汗感 (0: かいていない~非常にかいている: +4) に当たる箇所に縦線を記入させるものであり、ASHRAE の指標に基づき³⁾、線型スケールに変換して測定した。なお、環境および人体生理情報は1分毎に、心理情報は2分毎に記録した。

実験は環境制御可能な室内で行い、実験開始15分前から被験者は測定場所に滞在し、センサー類の装着を行なった後の30分を実験時間とした。いずれの実験も代謝量や発汗量への影響を考慮し、食事から実験準備開始時刻まで2時間以上空けた。

調査環境として、日射量の違い (日射量 900 W/m^2 , 日射なし)、風速の違い (風速 2 および 4 m/s, 静穏)、湿度の違い (50%R.H., 80%R.H.) に加えて、トレッドミル上での歩行運動 (時速 4 km/h の歩行) の有無に分けて実験を実施した。

2. 実験結果

2.1 着衣素材の熱物性

2.1.1 熱伝導率

3度の測定試行より、用いた着衣素材の熱伝導率は表1の通りとなった。熱伝導率には、色の違い、上下アンサンプルの違いによる影響はみられない。

表1 熱伝導率測定結果

(W/m/K)	White		Black	
	Shirt	Pants	Shirt	Pants
Thermal Conductivity	0.142	0.163	0.141	0.163

2.1.2 対流熱伝達率

3度の測定試行により、用いた着衣素材の対流熱伝達率は図3となった。図は衣服素材なし、

および空気層厚さ 1.5 mm (単層) の結果である。データは、定常とみなした時刻から 5 分間の平均値を使用した。対流熱伝達率は風速の増加に伴って大きくなり、また、衣服素材がない場合、単層着衣の順に値が低くなった。これは、着衣空隙を設けることで、衣服の断熱性が向上することを示している。

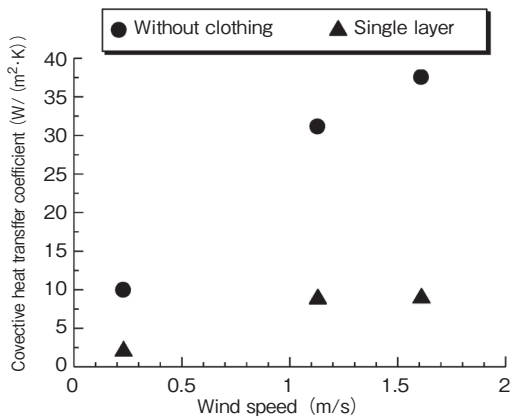


図3 対流熱伝達率測定結果

2. 1. 3 ふく射特性

3度の測定試行より、各特性値は図4の通りとなった。一般に、濃い色の素材は吸収率が高く、逆に反射率は低い。本実験試料では、白色素材は、大まかに吸収率で黒色素材の半分、反射率で2倍となっている。

2. 2 異なる状況における人体応答

日射や気温変動による人体への影響は報告があ

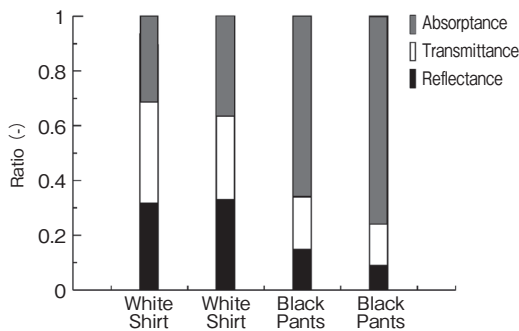


図4 ふく射特性測定結果

る⁴⁾。そこで、紙面の制約を考慮し、最も新規性の高い風速変動、湿度変動に関する結果を以下に示す。ここでいう風速とは、単に気象的な風のみならず、活動時にいわゆる風を切ることによる相対風速を含めての想定である。

図5は異なる湿度環境における心理応答を示している。被験者は8名の健康な男性学生(20.8±1.2 Yr)であり、値は平均化処理してある。温冷感に関して、両身体活動状態とも80%R.H.の方が50%R.H.よりも増加量大きい。快適感に関して、両身体活動状態とも80%R.H.の方が50%R.H.よりも減少量大きい。発汗感に関して、両身体活動状態とも80%R.H.の方が50%R.H.よりも増加量大きい。一定気温条件においても高湿度環境下の方がより「暑い」、「不快」、「汗をかいている」と感じることを意味している。従って、湿度が温冷感、快適感、発汗感に及ぼす影響は大きいということが示唆された。また、実験開始10分間における快適感を身体活動状態別に着目すると、立位時よりも歩行時の方がより快適であると申告している。これは、10分以降歩行時の快適感が下回るものの、立位安静から歩行へと切り替わる際に生じる、姿勢変化に伴う対流による放熱の増加が原因であると考えられる。このときの生理量に関して、立位時での深部温は50%R.H.で0.1℃上昇、80%R.H.で0.3℃上昇し、平均皮膚温は50%R.H.で0.4℃下降、80%R.H.で0.2℃上昇した。歩行時での深部温は50%R.H.で0.3℃上昇、80%R.H.で0.3℃上昇し、平均皮膚温は50%R.H.で0.4℃上昇、80%R.H.で1.1℃上昇した。また、両身体活動状態とも、80%R.H.では深部温および平均皮膚温が50%R.H.より常に高い値を示した。

さらに、心理への風速の寄与を明らかにするため、風速変動を加えた結果が図6である。被験者は12名の健康な男性学生(22.3±1.5 Yr)であり、値は平均化処理してある。

風速が大きくなると、温冷感、発汗感は減少し、

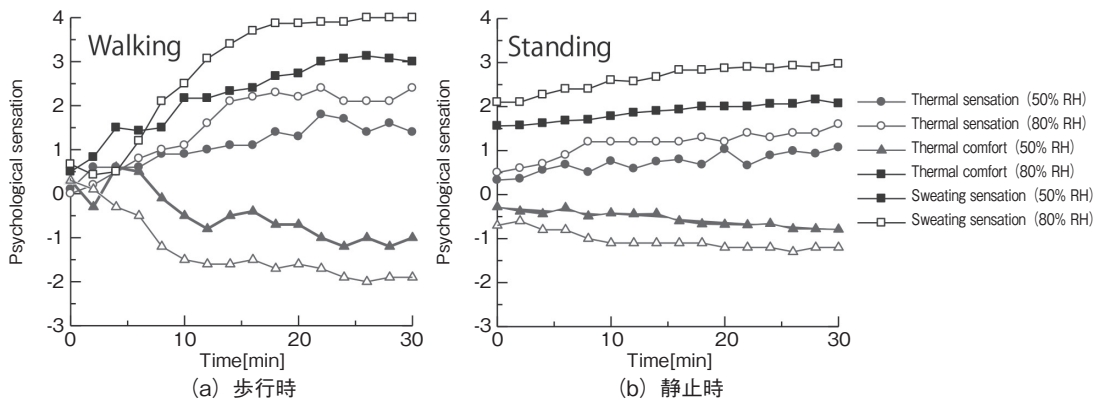


図5 異なる湿度における心理

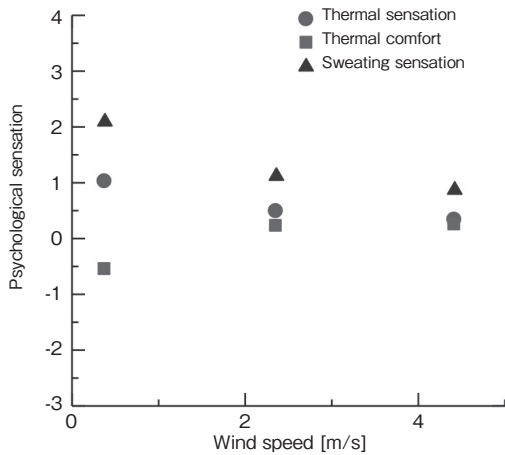


図6 各風速における心理

快適感は増加した。また、発汗感と快適感に関して、汗をかいていないと感じるにつれ、快適感が増加している。発汗感は、発汗が起きる場合に快適感との対応が生じる。冬季以外の時季での汗ばむ感覚が、快適性に影響を与える。さらに、発汗感と全身発汗蒸発量の関係に関して、風速が大きくなると発汗蒸発速度が増加し、皮膚表面に汗が残らないため、全身発汗蒸発量の増加に伴い発汗感が減少したと考えられる。

3. 検討と発展

衣服設計における人体熱モデルの活用は、設計段階における衣服の機能・快適性予測を可能とし、被験者による評価実験費用の削減にも繋がる。し

たがって、ヒト・衣服・環境系の情報を精度よく考慮した人体熱モデルを構築する。屋外環境では、ふく射（日射）と対流（風）の影響が特に強い。衣服を着用する際には、ふく射による素材の日射特性のほかに、着用する衣服の枚数、着衣空隙の厚さ、対流熱伝達率の影響を総合的に考慮し、最適なアンサンブル（着衣の組み合わせ）を考えることが重要である。その例を本研究で得られた知見を基に着衣人体熱負荷量の予測を試みた。

人体を簡易形状として円筒と仮定し、系の熱移動を一次元非定常熱伝導方程式で表現すると式(6)となる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

ここで r は座標軸 [m], T は温度 [K], λ は熱伝導率 [W/m/K], ρ 密度 [g/m³], C は定圧比熱 [J/kg/K] であり、着衣素材および空気層それぞれの物性が反映される。境界条件として、人体の生理発熱、伝導伝熱、ふく射伝熱、対流熱伝達による熱の流れを考えた上で熱流束による定式化を行った。衣服内空気層は伝導伝熱、対流熱伝達による熱輸送を考慮し、素材についてはふく射（特に短波放射）の影響を考慮した内部発熱体として捉え、外部環境との対流熱伝達による放熱も考慮した。以下では、日射および風環境における検証を行う。

例として、日射あり、空気層厚さが 15 mm、

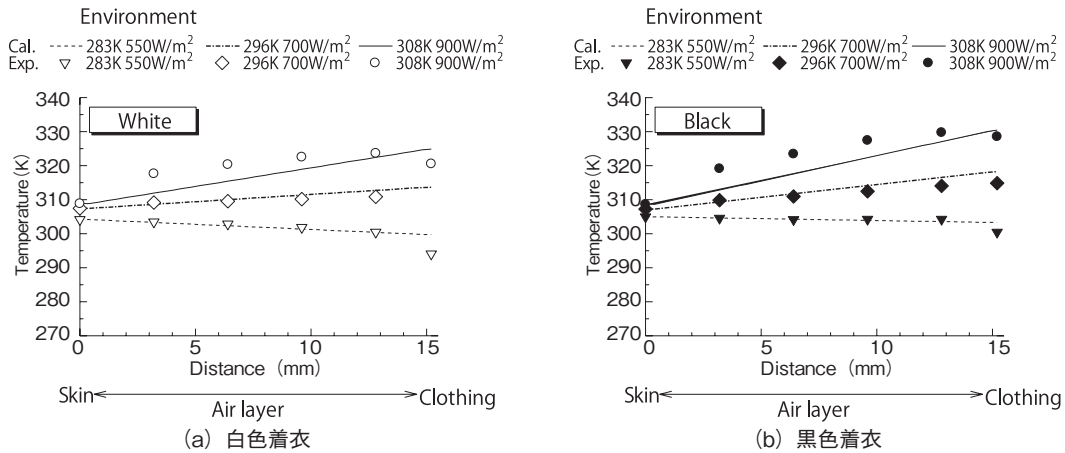


図7 様々な環境条件における日射ありの温度分布

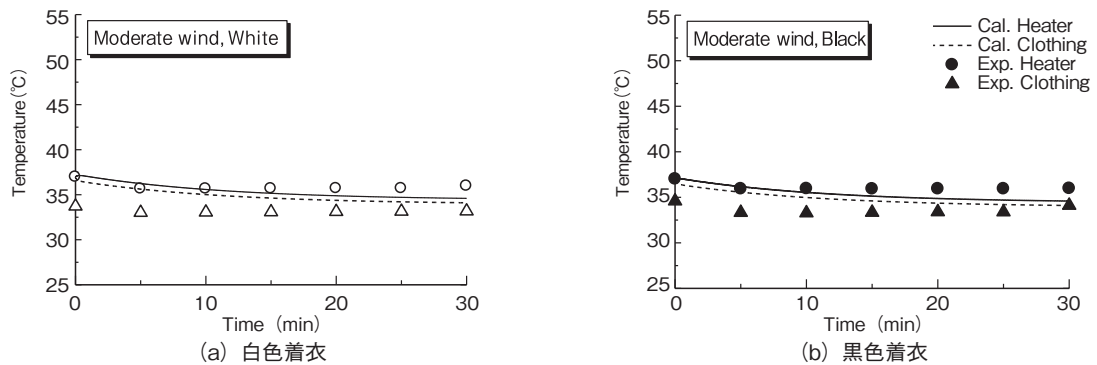


図8 風速2 m/s時の着衣表面温度の変化

素材が黒色と白色の、実験値における測定系の温度と解析モデル値を図7に示す。また、風速2 m/s時の着衣温度の時間変化を図8に示す。実験値と数値解析結果を比較すると、異なる色、気象条件においても温度変化傾向は概ね定性的に一致しており、素材の日射特性、対流熱伝達を考慮したモデルの有用性を示すことができた。

これにより、着衣人体熱収支算出に必要な衣服近傍の温度予測が可能となった。たとえば、風速変動時(上述図6に対応)の人体熱負荷を計算すると図9となる。風速が大きくなるにつれ潜熱損失量が増加し、人体への熱負荷が減少していることがわかるなど被験者応答と同期しており、本手法の妥当性を確認できる。

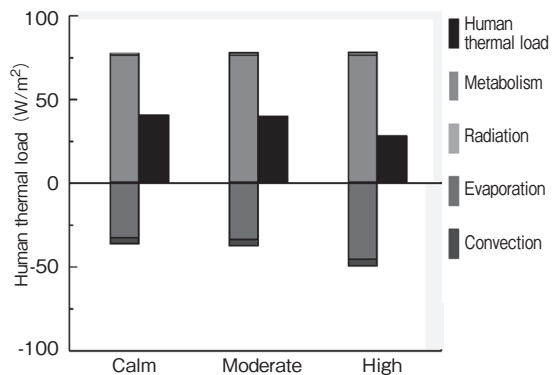


図9 風速変動時の人体熱収支

4. 結論

温熱環境要素が変動するような動的な環境、とりわけ屋外でのふく射と対流の影響が特に強い環

境, を考慮した着衣設計に有用な着衣伝熱モデルを検討し, また, それに必要な着衣物性と被験者実験実施方法を検討し, それらの検証を行った. 本手法の一定精度の妥当性を確認し, 着衣時の人体温熱状態の定量的な予測が可能となり, 適切な着衣を検討する基礎データを提供できるようになった.

謝 辞

本研究の実施にあたり, 助成を賜りました, 公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます.

文 献

- 1) Fanger P. O., Thermal Comfort. *Danish Technical Press* (1970)
- 2) Hardy J. D., DuBois E.F., The technic of measuring radiation and convection. *Journal of Nutrition*, 15(5) 461-475 (1938)
- 3) ASHRAE, ASHARE handbook – Fundamentals-. ASHRAE (2013)
- 4) Shimazaki Y., Yoshida A., Suzuki R., Kawabata T., Imai D., Kinoshita S., Application of human thermal load into unsteady condition for improvement of outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 46(8) 1716-1724 (2011)
- 5) Shimazaki Y., Yoshida A., Satsumoto Y., Taketani, S Effect of Properties of sports surface and clothing materials on human thermal load under hot environment. *Procedia Engineering*, 72, 502-507 (2014)