

## 人体熱モデルによる非定常温熱生理応答の予測（その1） 深部温のセットポイントが解に及ぼす影響

高田 暁<sup>\*1</sup>, 銚井修一<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 京都大学大学院工学研究科

### Prediction of thermophysiological response in non-steady state by using temperature regulation model of human body Part 1 Influence of set point of core temperature on solution of two-node model

Satoru TAKADA<sup>\*1</sup> and Shuichi HOKOI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>Kyoto University (satoruta@archi.kyoto-u.ac.jp)

**ABSTRACT:** The influence of the set point of core temperature in the two-node model on the calculated physiological variables is investigated quantitatively. In the experiments, subjects wearing only trunks experience thermal transient that consists of consecutive sweating and sweat evaporation processes. The calculated skin temperature by two-node model showed better fit with the measured values when a core temperature measured for each subject in thermal neutrality was used as the set point.

#### 1. はじめに

屋外で活動した後に建物へ入り、室内である活動状態に落ち着くまでの過程で、人間にとっての最適空調条件は時々刻々変化していると考えられる。人体の温熱的生理、心理の非定常特性を考慮することで、より快適な空調システムを提案できると考えられる。これまでに筆者らは、Two-node model と熱水分同時移動モデルを組み合わせて構成したモデルにより、衣服を身につけた人体について、発汗とその蒸発の過程における過渡応答を検討してきた。実験結果とモデル解析の結果とを比較した結果、皮膚・着衣における熱水分移動に関してはモデルが概ね妥当であることが示された<sup>1)</sup>。しかしながら、体温調節モデルに関しては検討項目が残された。その一つが深部温の扱いである。

解析において、深部温の初期値がその後1~2時間の過程に及ぼす影響は大きい<sup>2)</sup>。これまで、解析対象の最初の時刻での実験値を初期条件としていたが、気温が26~27℃の環境条件下で1~2時間安静にした後にもかかわらず、その値は複数の実験間で最大1.5℃程度異なっていた（表1参照）。その一方、モデルでは深部温のセットポイント値が一つ与えられ、それに基づいて発汗量や血流量が決定されるため、ある一回の実験結果をよく再現する計算結果が得られても、他の実験については全く良い結果が得られないという例が見られた<sup>2)</sup>。本論文では、深部温のセットポイント値が結果へ及ぼす影響を定量的に把握し、解析対象の人体に適合したセットポイントの設定方法について検討することを目的とする。

#### 2. 発汗とその蒸発を想定した被験者実験

発汗しその汗が蒸発する過程を実験室で再現し、皮膚

温、深部温、体重、着衣温、血流量、発汗量、心拍数を連続的に測定した。実験は1999年9月および2000年7月に合計4回、京都大学工学部建築学科内で行われた。被験者はトランクスのみを着用した健康な男子大学生である。被験者の体格は表1に示す通りである。（実験2と3の被験者は同一人物である。）被験者は夏季の冷房室を想定した低温低湿の室A（27℃、50%RH）とそれに比して高温高湿な室B（36℃、90%RH）に図1の通り滞在し、椅座安静を保つ。代謝量に関しては、実験開始前の行動履歴が影響しないのが理想である。本実験では被験者に実験開始の約1時間前から26℃50%RH程度に調整された室でデスクワークを行うよう指示した。本研究では、図1の0分から30分までを前室と位置付け、0分以前の行動履歴が代謝量に及ぼす影響を、最初の30分間で十分に小さくできると考えて実験を解析する。なお、発汗量はB室においてのみ測定した。

Table 1 Physical data on subject, measured core temperature at 30<sup>th</sup> min and initial conditions of body temperature.

| # | 被験者名 | 身長[cm]<br>体重[kg] | 深部温 (測定値, 30分) |         |         | 体温初期条件  |         |
|---|------|------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
|   |      |                  | 鼓膜 [°C]        | 腋窩 [°C] | 直腸 [°C] | 深部 [°C] | 皮膚 [°C] |
| 1 | HA   | 167.2<br>58.0    | 35.6           | 36.3    | 36.5    | 36.1    | 32.2    |
| 2 | KM   | 178.0<br>58.0    | 37.0           | —       | —       | 37.0    | 31.7    |
| 3 | KM   | 178.0<br>58.0    | 36.9           | 36.3    | —       | 36.6    | 31.6    |
| 4 | HN   | 179.5<br>65.0    | 36.2           | 35.2    | 36.4    | 36.0    | 31.8    |

#### 3. Two-node model による解析

人体熱モデルとしてTwo-node model<sup>3)</sup>を用いた。計算対象は、実験開始後30分から終了までである（図1参

照)。温度の初期条件は 30 分における実験値を基に決定した (表 1 参照)。皮膚と深部の質量比<sup>3)</sup>は 4 : 96、代謝量は 1Met (58.2W/m<sup>2</sup>) 一定とした。無効発汗は考慮しない。皮膚表面での熱、湿気伝達率は表 2 の通りとした。Two-node model<sup>3)</sup>においては深部温、皮膚温のセットポイントがそれぞれ 36.6°C、34.1°C と与えられている。ところが、表 1 に示すように、概ね熱的中立と思われる状態で測定した深部温は 36~37°C に分布している。そこで、本論文では、深部温のセットポイント値 (以降  $T_{cr,set}$  と記す。) を 3 段階に変えて (36.6±0.5°C) 計算を行った。

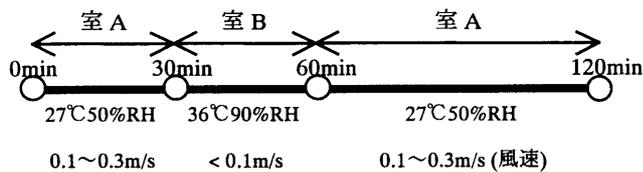


Fig. 1 Schedule of Single Experiment

Table 2 Heat and Moisture Transfer Coefficients

| 時間 [min] | 対流熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> K)] | 放射熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> K)] | 湿気伝達率 [kg/(m <sup>2</sup> s kg/kg <sup>-1</sup> )] |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|--|
| 30-60    | 1.5                           | 4.65                          | 1.5 x 10 <sup>-3</sup>                             |
| 60-120   | 4.0                           | 4.65                          | 4.0 x 10 <sup>-3</sup>                             |

#### 4. 実験および解析の結果

解析対象外である 15~30 分の実験値も参考のため掲載する。

##### 4.1 実験 1 (被験者 HA) (図 2~6 参照)

$T_{cr,set}$  を 36.1°C とした場合の計算結果が、実験結果を最もよく再現していると考えられる。深部温の実験値は、直腸、鼓膜、腋窩のいずれについても、高温の室 B への入室時 (30 分) に 0.2~0.5°C 程度低下した後上昇し、低温の室 A への再入室時 (60 分) にいったん上昇してから低下する。計算ではその傾向が再現できていない (図 2)。これは実験 2~4 についても共通して言える。

室 B での発汗過程における皮膚温 (計算値) は、どのセットポイントの場合も実験値によく一致している。汗の蒸発過程に関しては 60~70 分に見られる皮膚温 (計算値) の低下幅が、どの場合も実験値より小さい (図 3)。これは発汗量が計算において過小となっているためと推測される (図 4)。皮膚温 (実験値) は 60~70 分頃に低下から上昇に変わる。これは皮膚表面に蓄積していた汗の蒸発が完了した時点で起こる。この傾向は  $T_{cr,set}$  を 36.1°C にした場合のみ再現されている (図 3)。皮膚血流量の実験値は 30 分~40 分においてほぼ一定で、40 分を経過してから単調増加し、60 分に低温室へ移動すると、急に低下しほぼ一定となる。一方、計算で得られる血流量 (深部と皮膚の間で交換される血液量) の変動傾向は全般的に見て、 $T_{cr,set}$  が 36.1°C の場合に最も皮膚血流量の実験結果に近くなる。ただし、65 分に血流量が下降から上昇に転ずる傾向は皮膚血流量の実験値には見られ

ない。これについては検討が必要である (図 5)。

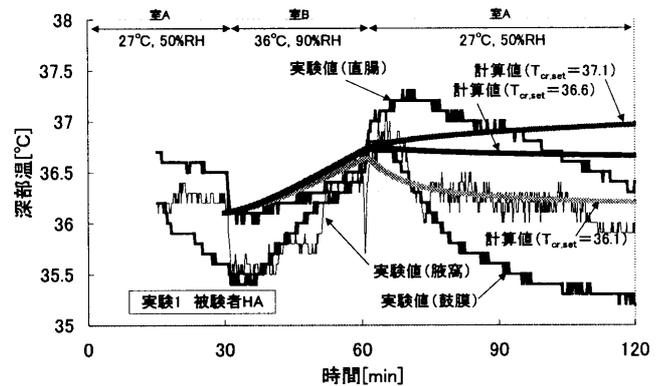


Fig. 2 Measured and calculated core temperature (Exp. No.1)

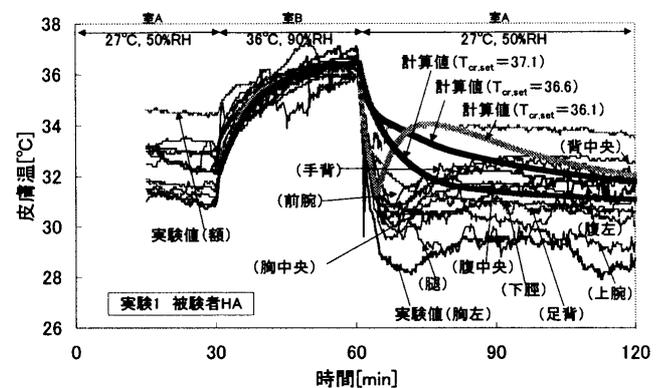


Fig. 3 Measured and calculated skin temperature (Exp. No.1)

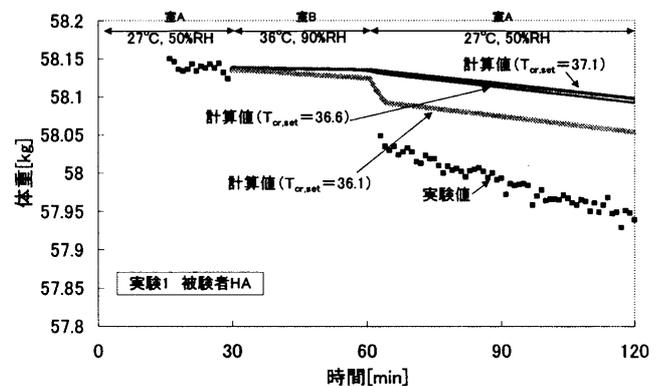


Fig. 4 Measured and calculated body weight (Exp. No.1)

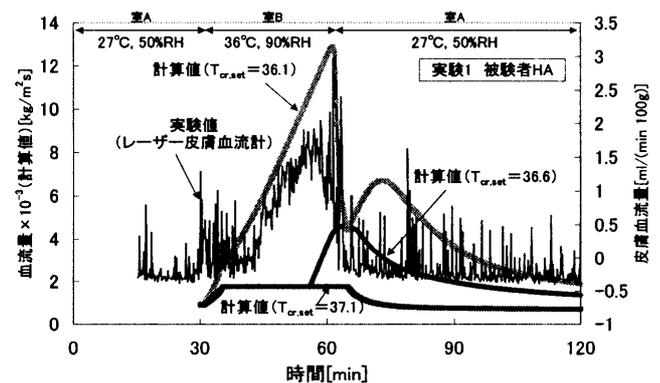


Fig. 5 Measured and calculated blood flow rate (Exp. No.1)

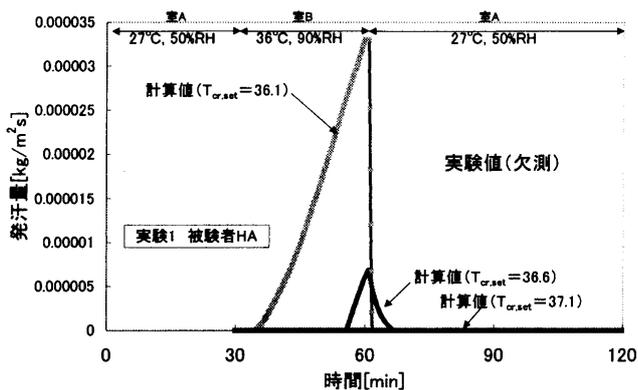


Fig. 6 Calculated sweating rate (Exp. No.1)

4.2 実験2 (被験者 KM) (図7~11 参照)

$T_{cr,set}$  を 36.6°C とした場合の計算結果が、実験結果に最も近い。30~60 分における皮膚温の計算値は実験値より 1~2°C 高い。ほぼ定常状態と見させる 120 分頃の計算値は実験値とよく一致しているのに対し、それ以前の非定常過程ではずれが大きい (図 8)。 $T_{cr,set}$  が 37.1°C の場合、汗の量が過小評価され (図 10)、60 分以降の皮膚温が実験値より高い (図 8)。 $T_{cr,set}$  が 36.6°C の場合、60~65 分の皮膚温の低下については、実験値の傾向とよく一致しているが、65 分頃に皮膚温が大きく上昇する点で実験と異なっている (図 8)。同じ時刻に血流量の計算値 ( $T_{cr,set} = 36.6^\circ\text{C}$ ) にも皮膚血流量の実験値には見られない上昇が認められることから、血流モデルの性質がこれに関与している可能性も考えられる (図 9)。一方、 $T_{cr,set}$  が 36.1°C の場合、汗の量が過大評価され、皮膚温の低下が実験値より 10 分以上長く続く (図 8)。図 10 から判断して、蒸発の総量 (実験値) は  $T_{cr,set}$  が 37.1°C の場合の計算値と 36.6°C の場合の計算値との中間である。なお、図 11 より発汗量 (実験値) が 40 分頃に急増する性質は、計算では  $T_{cr,set}$  が 37.1°C の場合に見られる。

4.3 実験3 (被験者 KM) (図12~13 参照)

この実験では室 B の温湿度が目標値より低くなったため (34°C85%RH 程度)、発汗量が比較的少なかった。そのため、実験全体を通じて皮膚温の変化幅が小さい。総合的に見て、 $T_{cr,set}$  を 36.6°C とした場合の計算結果が実験結果に近いと思われる。120 分頃の深部温については、 $T_{cr,set}$  が 36.6°C の場合、実験値に最も近い (図 12)。室 B における皮膚温の計算値は実験値より 1~3°C 高い。一方、60 分以降の皮膚温 (計算値) については、 $T_{cr,set}$  が 36.1°C の場合のみ、65 分頃に極小値をとるという傾向が見られるが、それ以外の場合には単調に低下する (図 13)。発汗量が少ないためと思われる。発汗量は  $T_{cr,set}$  が 37.1°C の場合にゼロとなる (図は省略)。体重は  $T_{cr,set}$  が 37.1°C か 36.6°C の場合に実験値に近くなる (図は省略)。

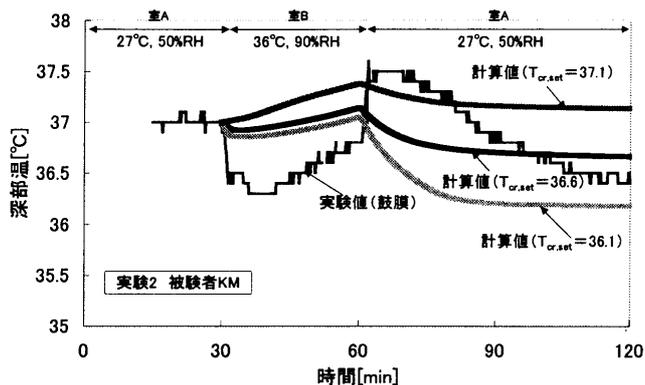


Fig. 7 Measured and calculated core temperature (Exp. No.2)

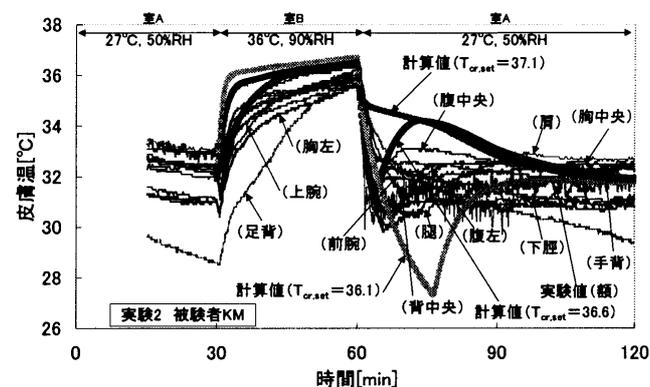


Fig. 8 Measured and calculated skin temperature (Exp. No.2)

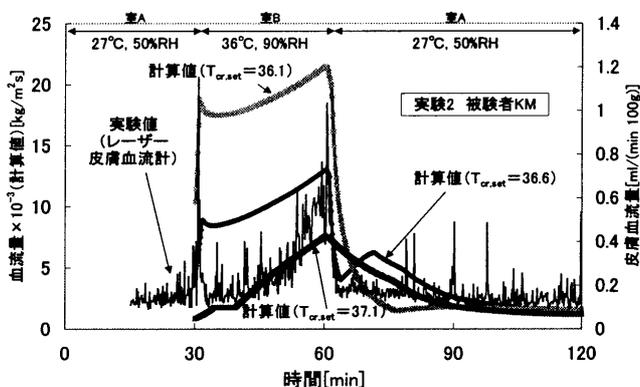


Fig. 9 Measured and calculated blood flow rate (Exp. No.2)

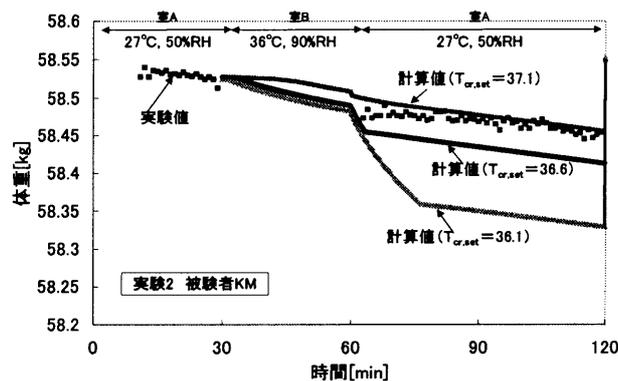


Fig. 10 Measured and calculated body weight (Exp. No.2)

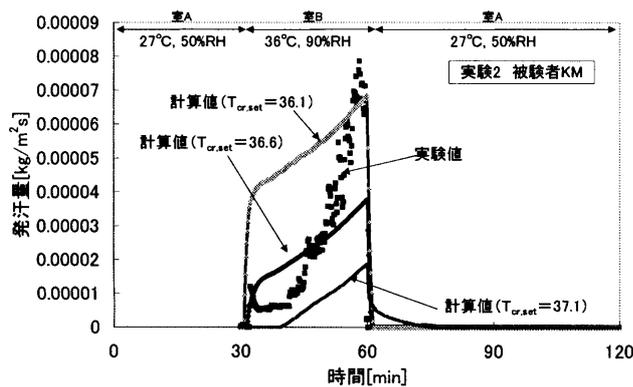


Fig. 11 Measured and calculated sweating rate (Exp. No.2)

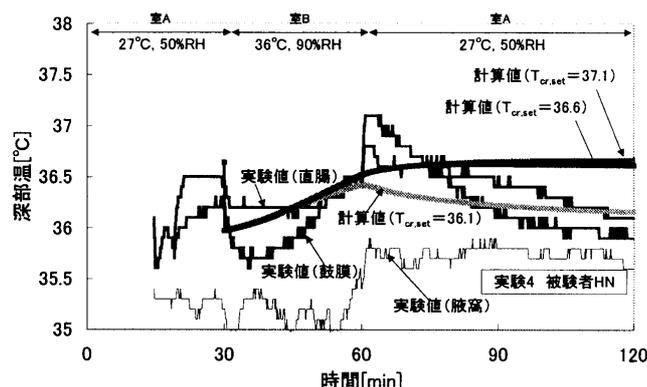


Fig. 14 Measured and calculated core temperature (Exp. No.4)

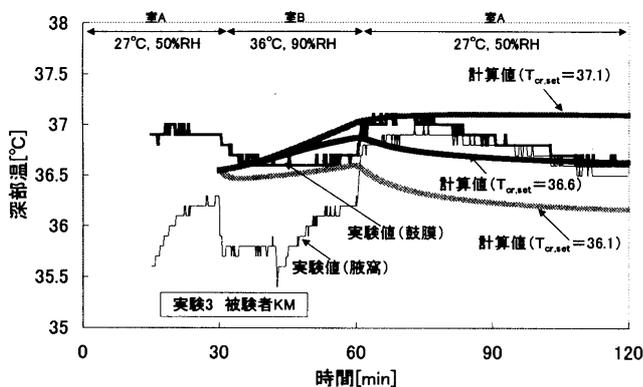


Fig. 12 Measured and calculated core temperature (Exp. No.3)

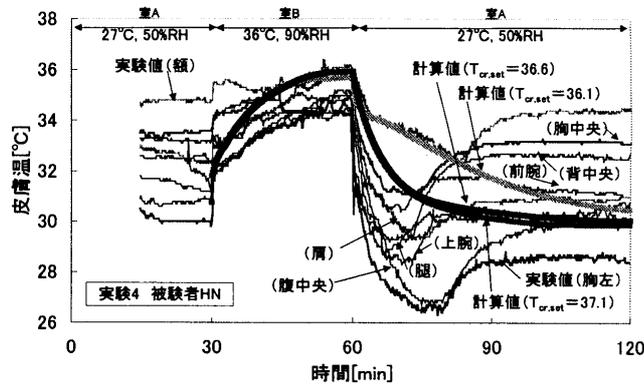


Fig. 15 Measured and calculated skin temperature (Exp. No.4)

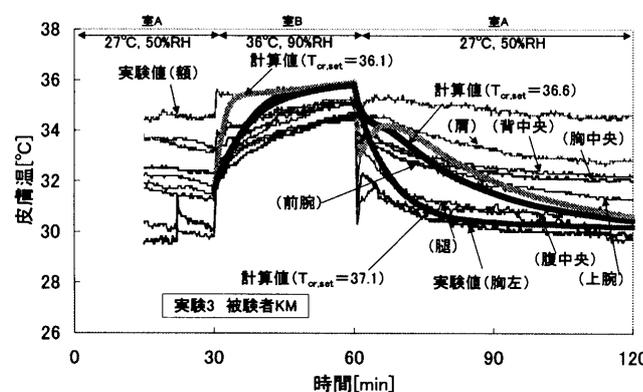


Fig. 13 Measured and calculated skin temperature (Exp. No.3)

#### 4.4 実験4 (被験者 HN) (図 14~15 参照)

深部温の結果から見て  $T_{cr,set}$  を  $36.1^{\circ}\text{C}$  とした場合の計算結果が、比較的实验結果に近いと考えられるが (図 14)、発汗量の計算結果が実験と比べて過小であることにより、全体に実験結果とは異なっている。実験開始前と終了時で体重は  $180\text{g}$  程度減少した。これに対し計算では  $50\sim 70\text{g}$  程度の減少という結果となっている (図は省略)。汗の蒸発により 60 分以降、皮膚温はいったん下降するが、計算ではそれが再現されていない。 $T_{cr,set}$  としさらに小さな値を設定することで結果が改善される可能性がある。

## 5. 結論

人体熱モデル (Two-node model) における深部温のセットポイントの設定について、裸体の被験者を用いた 4 回の実験とモデル解析により検討を行った。

1. 深部温のセットポイントを  $36.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  の 3 段階に設定して計算を行い、結果への影響を定量的に検討した。非定常状態における実験結果を比較的良く再現できるのは、ほぼ熱的中立時に測定した深部温に近い値をセットポイントとした場合であった。解析対象の人体に適合したセットポイントを設定することで、体温調節系の過渡応答の予測精度が向上する可能性がある。
2. 4 回の被験者実験すべてにおいて、人体周辺の気温がステップ的に変化した直後の数分間、鼓膜温、腋窩温、直腸温は気温の変化方向と逆向きに  $0.2\sim 0.8^{\circ}\text{C}$  程度変化した。
3. 人体周辺の気温がステップ変化する際の深部温、および血管収縮反応が緩和される際の皮膚温、皮膚血流量の実験結果と解析結果から考えて、血流モデルの過渡特性を検討する余地がある。

本研究の一部は、文部科学省平成 13 年度科学研究費補助金 (奨励研究 A) 12750528 の助成を受けた。

### 参考文献

- 1) 高田, 銚井他, 着衣における熱・水分の移動と蓄積を考慮した人体の非定常温熱生理応答 —被験者実験と Two-node model を用いた解析—, 日本建築学会計画系論文集第 549 号, 23-30, 2001.11.
- 2) 高田, 銚井他, 人体熱モデルの非定常状態への適用可能性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 II), 397-398, 2001.9.
- 3) Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. and Nishi, Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans., 77, 247-262, 1971.