

機関番号：82641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860067

研究課題名（和文）居住者の内発的な熱環境調整行動と快適性に関する研究

研究課題名（英文）Study on the Thermal Environment of Occupants' and Thermal Cognition

研究代表者

岩松 俊哉（IWAMATSU TOSHIYA）

（財）電力中央研究所・システム技術研究所・主任研究員

研究者番号：80553297

研究成果の概要（和文）：

本研究では、自宅における居住者の室内温熱環境や内発的な熱環境調整行動と温熱快適感の許容限界との関係を明らかにすることを試みた。日頃の温熱環境、熱環境調整行動、温熱感覚の三者には深く関わりがあり、熱環境の調整を冷暖房の使用に依存している被験者と依存していない被験者で、快適とする許容限界温度に1～4℃程度の差があることが明らかになった。冷暖房を極度に使用せずに、快適と感じる温熱感覚が培われる生理的なメカニズムの解明と、個人の温熱感を考慮した熱環境計画の重要性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to reveal the relationship among the thermal environment, thermo-environmental adjustment behavior of occupants' and the threshold of thermal cognition. The thermal environment and environmental adjustment behavior are connected with the personal thermal cognition. It was found a clear difference in the threshold temperature between subjects who addicted to use air conditioner and subjects who use a little. It suggests that it is important to design the thermal environment taking into account consideration of personal thermal cognition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	530,000	159,000	689,000
2010年度	370,000	111,000	481,000
年度			
年度			
年度			
総計	900,000	270,000	1,170,000

研究分野：建築環境学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：熱環境、温熱感、環境調整行動、エクセルギー

1. 研究開始当初の背景

「地球環境問題」に関連するエネルギー資源浪費の問題や二酸化炭素の大量排出問題を背景に、近年では建築外皮や冷暖房機器の性能を向上させることによって、化石燃料などのエネルギー資源の投入を小さくしつつ、居住者の快適性が高くなるような建築熱環境の実現が目指されてきている。ところが、冷暖房機器のエネルギー利用量や、化石燃料

由来のエネルギー利用に伴う二酸化炭素排出量は、今後も増加していく可能性がある。

したがって、建築外皮や建築設備の性能向上による冷暖房機器のエネルギー利用削減効果を期待するだけではなく、居住者が自身の感覚や行動できる能力を活かしながら、室内熱環境や着衣の調整を積極的に行って、自ら温熱快適感を獲得できるようにし、その温熱快適感が得られることが、人という生物の

活動（体温調節などの生理的側面）にとっても、相応しくなることが望ましいと考える。また、室内熱環境の質を人間側から高められれば、延いては、冷暖房機器における化石燃料由来のエネルギー利用削減を無理なく実現することにつながるが考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、冷暖房機器を過度に使用しない居住者と、冷暖房機器に熱環境調整を依存している居住者それぞれを対象として、自宅において最も長く滞在する室での熱物理量の実測と被験者の温熱感・快適感の申告調査を行なって比較し、居住域における熱環境と内発的な温熱環境調整行動、温熱感覚との対応関係を明らかにしていく。

また、実測により得られた熱物理量に基づき、従来の人体熱エネルギー収支による温熱快適性評価のほか、人体の熱・水分収支について熱力学（エクセルギー）の概念によって記述し、人体における熱拡散や物質拡散に伴う資源性の消費を明示していく。以上より、居住者の熱環境調整行動を活発にし得る熱環境計画を行っていく上での基礎的知見を得る。

3. 研究の方法

冷暖房機器の使用が多い居住者と少ない居住者において、自宅における熱環境や熱環境調整行動、温熱感の許容限界を以下の方法で調べた。

(1) 居住者の熱環境実測と熱環境調整行動

被験者 10 名（大学生 男 5・女 5）を対象に、冬季（2010 年 2 月）と夏季（2010 年 8 月）で、日常の熱環境調整に関する質問紙調査と、自宅において最も長く滞在している室で、小型温湿度ロガーを用いて、室内温湿度の測定を 5 日にわたって実施してもらった。実測期間 5 日のうち、最低 3 日について、在室時間帯、冷暖房などの運転状況、在室時の着衣・活動の状態について記録してもらった。なお、冬季の被験者のうち、6 名は夏季にも協力してもらっている。

(2) 被験者実験による温熱感の把握

質問紙調査と自宅での熱環境実測を行なってもらった被験者 10 名を対象に、温熱感の快適許容限界を把握することを目的に人工気候室を用いて被験者実験を実施した。図 1 に実験で使用した人工気候室を示す。

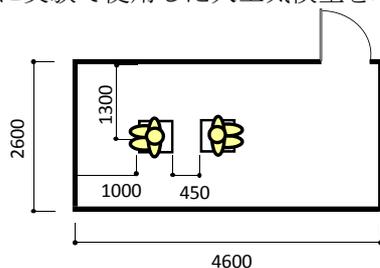


図 1 人工気候室の平面図

① 冬季における被験者実験

図 2 に冬季における被験者実験のスケジュールを示す。実験室では、はじめに空気目標温度を 22℃に設定しておき、そこで被験者にはスウェット上着・スウェットズボンに着替えてもらうとともに、靴下とスリッパを着用してもらった。その後、10 分ほど安静にもらったのちに 90 分間滞在してもらった。滞在してもらっている間には、15 分ごとに 1℃ずつ、実験室の空気目標温度を低下させていき、90 分後には 17℃程度になるようにした。併せて 10 分間隔で温熱感に関する質問をした。

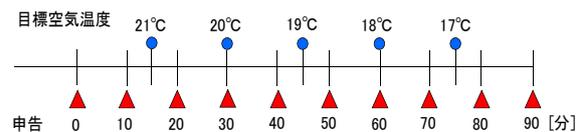


図 2 冬季の実験スケジュール
(人工気候室)

② 夏季における被験者実験

図 3 に夏季における被験者実験のスケジュールを示す。実験方法は冬季に実施した場合に準じた。実験室では、空気目標温度を最初 26℃に設定し、被験者には半袖シャツ・長ズボンに靴下とスリッパを着用した状態で、実験開始まで 10 分安静に着席してもらった。滞在中には 15 分ごとに 1℃ずつ、実験室の空気目標温度を上昇させていき、90 分後には 31℃程度になるようにし、並行して、10 分間隔で温熱感を質問した。目標相対湿度は 60% 一定とした。被験者近傍気流速は平均 0.4m/s となった。写真 1 は被験者実験の様子である。

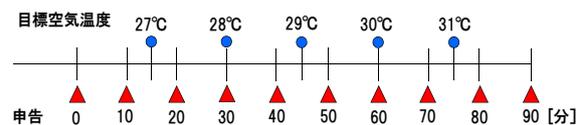


図 3 夏季の実験スケジュール
(人工気候室)



写真 1 被験者実験（夏季）

4. 研究成果

(1) 熱環境調整に関する質問紙調査の結果

① 冬季における質問紙調査

表1に調査の主たる質問を示す。

被験者の住宅の種類は、被験者10名のうち5名が戸建住宅、残り5名が集合住宅であり、構造は戸建住宅に住まう5名のうち4名は木造、1名が鉄骨造の家に住んでいた。住居形態では、実家が7名、下宿が3名であった。また、「あなたは寒がりですか」という問いに対して、「寒がり」と回答したのは5名で、そのうち2名は暖房を使っているにもかかわらず寒さを感じると答えていた。なお、寝室（自室）を測定したのは、5名であり、暖房の使用がある時には、被験者本人が行っていた。

表1 主たる質問内容（冬季）

- a. 現在の住まいで使っている暖房機器
- b. 暖房機器の設定温度 または 強さ
- c. 寒がりか否か
- d. 暖房を行なっても 寒い と感じることもあるか否か

② 夏季における質問紙調査

冬季の場合と同様に、被験者10名（a～j）に対して、熱環境調整に関する質問紙調査を実施した。被験者a～c、f、h、jは、冬季にも協力してもらっている。

表2に調査の主な質問を示す。生活記録から、在室時間に対するエアコン冷房を使用していた時間の割合（エアコン使用時間率）を算出したところ、エアコン使用時間率の低い（12%以下）4名（a～d）は女性であり、そのうち3名（a・b・d）はエアコンが嫌いであると回答していた。被験者aは、在室時には全くエアコンを使用していなかった。一方、エアコン使用時間率が高い4名（g～jで、58%以上）のうち、3名はエアコン好きだと回答している。エアコンが好きであると回答した被験者は6名いるが、そのうち4名（e、h～j）は「暑がり」だと回答している。エアコン冷房使用率の高い上位3名（a～cで、83%以上）は、「エアコン好き」かつ「暑がり」と回答していた。エアコン使用時間率が90%を越えているiとjは、在室時には全く通風を行なっていなかった。hとiはエアコンの設定温度を25℃とすることがあり、他の被験者に比べて低く設定していることが明らかになった。

表2 主たる質問内容（夏季）

- a. エアコンの好き/嫌い
- b. 暑がりか否か
- c. エアコンの設定温度と運転モード
- d. 扇風機の使用
- e. 通風の有無

(2) 自宅における熱環境実測

各被験者において、在室時における熱環境について調査をした結果を述べる。

① 冬季における熱環境実測

図4は冬季において、被験者が測定対象室に居る時間帯における外気温度と室内空気温度との関係を示す。×は、熱環境調整に関する質問紙調査で「寒がり」と回答した被験者、●は「寒がりではない」と回答した被験者より得られた計測値である。

「寒がり」と回答した被験者と「寒がりではない」と回答した被験者とで、外気温度が同じ場合でも、室内空気温度が20℃に満たないところでは、両者の室内空気温度に顕著な差は見られない。

ところが、「寒がりではない」と回答した被験者は、室内空気温度が20℃を越えることは少ないのに対して、「寒がり」と回答した被験者は、室内空気温度が25℃近くに達することが少なからず見られる。

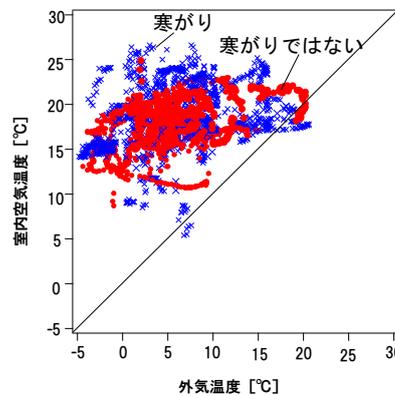


図4 外気温度と室内空気温度との関係

図5は被験者が実測対象室の滞在時における最大・平均・最小値を被験者ごとに示したものである。被験者10名の室内空気温度の平均値は■に示すように13.3～26.6℃の範囲である。

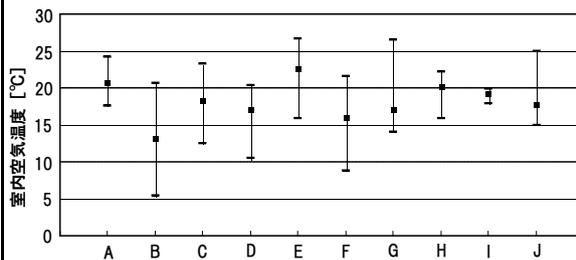


図5 実測対象室の室内空気温度の最大・平均・最小値（冬季）

被験者B（「寒がり」と回答）は室内空気温度の平均が15℃に満たないが、暖房機器を使用せずに、室内で重ね着（コートやウインドブレーカーなどの上着類も含む）をするなどして、寒さを凌いでいることが分かった。

被験者E（「寒がり」と回答）は室内空気温度の最大・平均・最小ともに他の被験者の質に比べて最も高く、空気平均温度は22.6℃

であり、最低温度は 15℃を下回っていない。在室時間帯のうち、暖房（ファンヒーター）の使用時間は約 7 割を占めており、暖房使用時間の割合も他の被験者に比べて、最も高かった。

被験者 G は、生活記録によると、実測を行なった室でエアコンを使用する時は、設定温度を 27℃としているものの、室内空気温度の平均値は 17.1℃と他の被験者に比べて高くないことから、建築躯体の熱性能が低い可能性が考えられる。

② 夏季における熱環境実測

図 6 は夏季において、被験者が実測対象室に滞在している時間帯における室内空気温度の最大・平均・最小値を被験者ごとに示したものである。■は平均値、×は実測値の平均外気温度を示す。被験者 10 名の室内空気温度の平均値は 26.3～30.9℃の範囲であった。

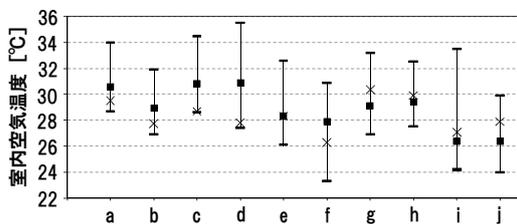


図 6 実測対象室の室内空気温度の最大・平均・最小値（夏季）

エアコン使用時間率の低い被験者 a～d は室内空気温度が高めで、そのうち a・c・d は平均温度が 30℃を越えている。なお、被験者 a・b・d はエアコンが嫌いであると回答している。c はエアコンが好きであると回答しつつも、比較的高温の熱環境で過ごしていた。

在室時のほとんどでエアコンを使う被験者 i・j は、室内空気温度の平均が 26℃と他の被験者よりも低めで、エアコン使用時間率の低い被験者より平均温度で 4℃低い。i・j とともに、質問紙調査では、エアコンが好きと回答しており、前述したエアコン使用時間率の低い a・b・d と同様に、エアコンの好みと、熱環境の調整行動、実現した熱環境につつまが合っている。

被験者 h はエアコン好きで、エアコン使用時間率が 83%と高いが、室内空気温度の平均が 29℃程度であり、比較的高温の熱環境になっている。g はエアコン使用時間率が 50%を越えているが、h と同様に、室内空気温度の平均が 29℃であり、エアコン嫌いとしていた。被験者 e・f のエアコン使用時間率は、それぞれ 33%、41%で、室内空気の平均温度は 28℃程度であった。

(3) 人工気候室における被験者実験の結果

① 冬季における被験者実験の結果

図 7 は人工気候室における被験者の温熱感申告を示したもので、●印の大きさは申告した人数に対応している。時間経過に伴って「寒い」側の申告をする人数が増えていくことが分かり、実験が終了する 90 分後（空気温度が 17℃）には、9 名から「寒い」とする申告が得られている。

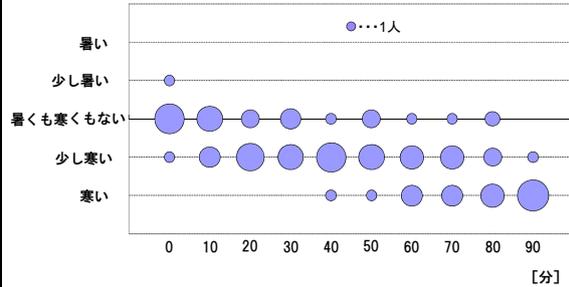
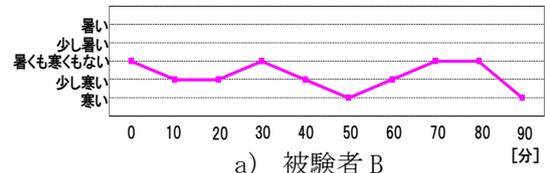
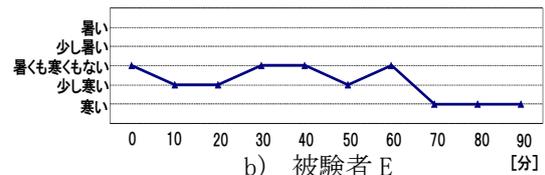


図 7 人工気候室における被験者申告の変化（冬季）

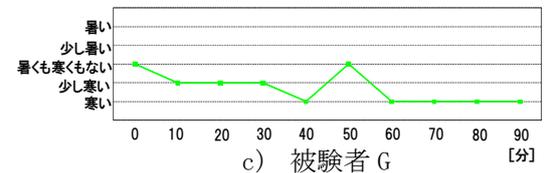
図 8 は主たる被験者の温熱感申告の変化を示したものである。



a) 被験者 B



b) 被験者 E



c) 被験者 G

図 8 被験者 B・E・G の申告変化

被験者 B・E・G は、実験開始後から 10 分が経過（空気温度は約 22℃）して、「暑くも寒くもない」から「やや寒い」という申告へ変化しており、いずれの被験者も、熱環境調整に関する質問紙調査では、「寒がり」であると申告していた。このことから、寒さを感じやすいことが申告に顕れたことが考えられる。

図 9 は被験者 H の申告変化を示したものである。質問紙調査では「寒がり」と回答していなかったものの、実験開始時から「やや寒い」と申告しており、1 時間後（空気温度で 19℃ほど）には「寒い」と回答している。実験開始時の空気目標温度は、自宅における室内空気温度よりも低くないが、自宅では床暖房のみを使用しており、日常とは暖房方式が異なること、また、実験時の着衣量 (0.8clo) が日常 (1.2clo) よりも小さいことが、寒さを感じる原因となったと考えられる。

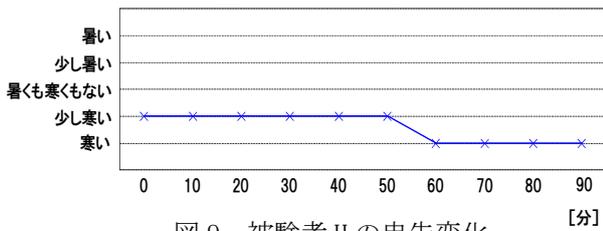


図9 被験者Hの申告変化

図10は被験者Fの申告変化である。Fは、実験開始30分後（空気温度は約20℃）に、はじめて「暑くも寒くもない」から「やや寒い」としている。図5から室内空気温度の計測値の平均は16.1℃と低めであり、質問紙調査では「寒がりではない」と回答していて、比較的低温の熱環境を受け入れていると考えられる。

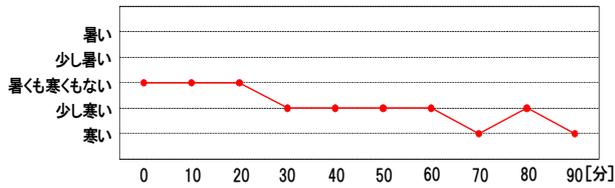


図10 被験者Fの申告変化

② 夏季における被験者実験の結果

図11は冬季の場合と同様に、人工気候室における被験者の温熱感申告を示したものである。●の大きさは被験者の人数に対応する。空気温度が30℃となっている70分後に「やや暑い」と申告する人数が増える。実験終了時には9名が暑い側の申告をして、そのうち4名が「暑い」と申告している。

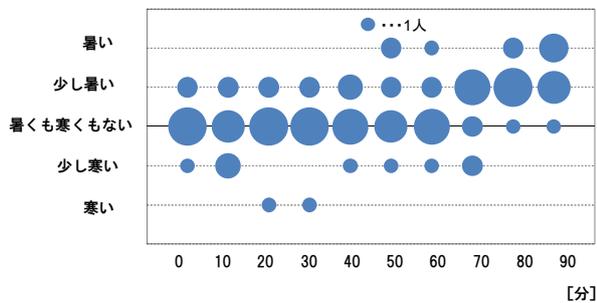
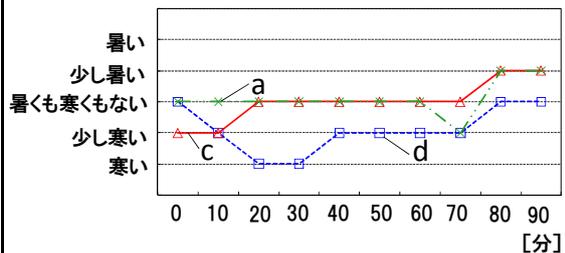


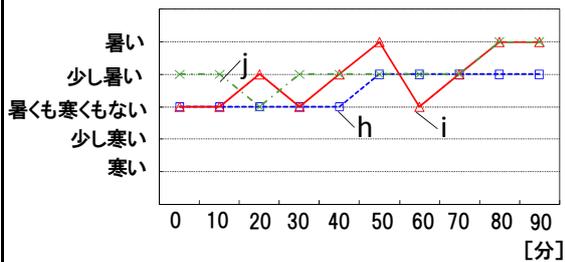
図11 人工気候室における被験者の申告変化

図12は主たる被験者の温熱感の申告変化を示す。a)はエアコン使用時間率の低い被験者 a・c・d、b)はエアコン使用時間率の高い被験者 h~j の申告変化である。a)に示すエアコン使用時間率の低い被験者 dは暑い側の申告（「暑い」・「やや暑い」）を一度もしていない。a・cは実験開始から80分後に「やや暑い」と申告しており、空気温度が31℃を越えた段階で、暑い側の申告が見られた。なお、bはエアコン使用時間率が低いものの、70分後には「暑くも寒くもない」から「やや暑い」とし、a・c・dより早い段階で暑い側の申告をしていた。

一方、エアコン使用時間率の高い被験者 h は、空気温度が29℃となっている50分後には「やや暑い」と申告しており、エアコン使用時間率の低い被験者に比べて、1℃程度低い状況で、暑い側の申告をしている。iは「暑くも寒くもない」とする申告も見られるが、空気温度が27℃となっている20分後には「やや暑い」とし、空気温度が31℃となっている80分後には「暑い」と申告している。jは空気温度が26℃となっている実験開始時から「やや暑い」とし、31℃になっている80分後には「暑い」と申告している。エアコン使用時間率の低い被験者に比べ、4℃ほど低い状況で暑い側の申告を得ていることが明らかになった。



a) エアコン使用時間率の低い被験者



b) エアコン使用時間率の高い被験者

図12 主たる被験者申告の変化

(4) 自宅の実測対象室滞在時における人体エクセルギー消費速さ

(2)において自宅における熱環境実測と生活の記録に基づいて、人体エクセルギー収支を計算し、人体における熱拡散や物質拡散に伴う資源性の消費を明らかにした。人体エクセルギー収支計算には、室内空気温湿度、放射温度、気流速、代謝量、着衣量に加えて外気温湿度が必要となる。室内空気温湿度は各被験者の実測値を用いた。放射温度は空気温度と同じであると仮定した。気流速は冬季の場合には0.1m/sとし、夏季の場合には通風や扇風機の使用がある場合には、0.3m/sとした。生活の記録より得られた着衣量・活動の状態から推定した着衣量と代謝量に加えて、外気温湿度は、被験者の住まいから最も近いアメダス観測値を用いた。

① 冬季における在室時の人体エクセルギー消費速さ

図 13 は冬季において、各被験者が自宅での実測対象室に滞在している時の人体エクセルギー消費速さの平均値を示す。人体エクセルギー消費速さの範囲は $2.75 \sim 4.42 \text{ W/m}^2$ だった。人体エクセルギー消費速さが小さいほど身体への負担が小さいと考えられるが、消費速さが 0 W/m^2 となることは、人体と環境との温度差や湿度差が無くなり、生命維持をしていないことになる。

人体エクセルギー消費速さが小さめになっている被験者 E・I は、人体周囲温度が高めである傾向が見られ、体温と人体周囲温度との差が小さいことによって、熱拡散が抑制されていることが考えられる。暖房機器への投入エネルギーを小さくして、人体エクセルギー消費速さも小さくするには、建築外皮の断熱が極めて重要であることが示唆される。一方、被験者 B・D・H は、人体エクセルギー消費速さが大きめであるが、被験者 B は人体周囲空間の温度が他の被験者に比べて低めであること、D・H は人体周囲温度が比較的高いものの、活動による代謝熱量平均で 1.3 met 程度と他の被験者より大きいことが、起因している。

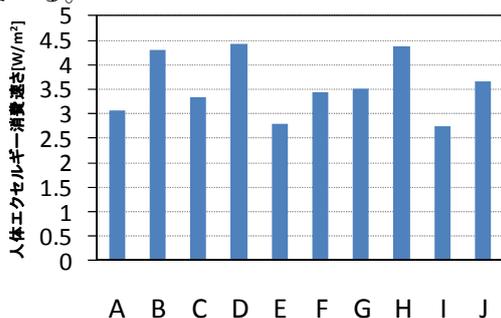


図 13 人体エクセルギー消費速さ (冬季)

② 夏季における在室時の人体エクセルギー消費速さ

図 14 は夏季において、各被験者が自宅での実測対象室に滞在している時の人体エクセルギー消費速さの平均値を示す。人体エクセルギー消費速さの範囲は、 $1.3 \sim 2.9 \text{ W/m}^2$ である。被験者 c・d・j の人体エクセルギー消費速さは 2 W/m^2 を越え、他の被験者よりも大きくなっているが、冬季の場合と同様に、代謝熱量が平均で 1.3 met 程度になっていたことが起因している。エアコン使用時間率が比較的高い被験者 (a・b) は、人体エクセルギー消費速さが、エアコン使用時間率の少ない被験者 (h・i) に比べて 3 割ほど大きくなっている。人体エクセルギー消費速さが大きいのは、人体周囲空間が低温低湿になっていて、熱拡散と物質拡散 (汗) が促されたことによって、熱拡散や水蒸気拡散が過度に起こると、身体に負担がかかる可能性が考えられるので、エクセルギー消費速さが生体にとって、小さめになるように熱環境計画をすることが重要であることを示唆していると考えられる。

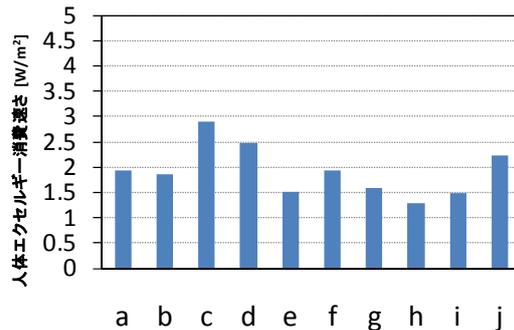


図 14 人体エクセルギー消費速さ (夏季)

(5) まとめ

本研究では、自宅における居住者の室内温熱環境や環境調整行動や内発的な温熱快適感と温熱快適感の許容限界との関係を明らかにすることを試みた。居住者の日頃の温熱環境、熱環境調整行動、温熱感覚の三者には深く関わりがあり、熱環境調整を冷暖房の使用に依存している被験者と依存していない被験者で、快適とする許容限界温度に $1 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の差があることが明らかになった。冷暖房を極度に使用せずに快適と感じる温熱感覚が培われる生理的なメカニズムの解明や、個々人の温熱感や生理的な負担を考慮した熱環境計画の重要性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

岩松俊哉、浅田秀男、深井友樹、福田秀朗、宿谷昌則、高温放射冷房と通風による温熱快適感と人体エクセルギー収支に関する研究、日本建築学会環境系論文集第 75 巻 653 号、査読有、2011、pp.585-594

〔学会発表〕 (計 1 件)

岩松俊哉、冬季における住宅の熱環境調査と居住者の温熱感に関する研究、日本建築学会、2010 年 9 月 9 日、富山大学

〔図書〕 (計 1 件)

宿谷昌則 (編著)、西川竜二、高橋達、斉藤雅也、浅田秀男、伊澤康一、岩松俊哉、マーセルシュバイカ、井上書院、エクセルギーと環境の理論 [改訂版] -流れ・循環のデザインとは何か-、2010、350

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩松 俊哉 (IWAMATSU TOSHIYA)

(財)電力中央研究所・システム技術研究所・主任研究員

研究者番号：80553297