

〈特別研究課題〉 住宅における夏の通風と冬の日照の  
効果に関する実験室実験  
助成研究者 名古屋大学 久野 覚



## 住宅における夏の通風と冬の日照の効果に関する 実験室実験

久野 覚  
(名古屋大学)

## Experiment on the effects of cross ventilation in summer and sunshine in winter in housing

Satoru Kuno  
(Nagoya University)

### Abstract

The aim of this study is to clarify the effects of cross ventilation in summer and sunshine in winter in Japanese housing. The previous field studies of the authors indicated that air movement more than 0.6m/s maintained subjects' thermal comfort even if the air temperature was 32 °C. They also showed that sunshine near subjects in winter brought thermal comfort. Computer simulations by a commercial CFD software including a human thermo regulation model were conducted firstly in this study. The effect of sunshine in winter became clear but that of cross ventilation in summer was not clear enough by the simulations. Then a chamber experiment using subjects for summer ventilation was conducted. The conditions to maintain thermal comfort were air movement more than 0.70m/s in air temperature 32°C, and more than 0.87m/s in 34°C. Those were the values where the convective heat transfer coefficient varied. It was concluded that subjects had become comfort when they had felt air movement clearly in hot environment.

### 1. はじめに

本研究の目的は、住宅における夏期の通風と冬期の日照の効果をシミュレーションおよび実験にて確認し、住宅設計に役立つ情報を提供することにある。

従来から、通風と日照の有用性は指摘されつつもあまり明らかにされてこなかった。その理由

は、実際のフィールドにおいては条件が様々であり、また理想的な条件を持つ測定対象が少なく分析に必要な十分なデータが得られなかったためである。筆者らは近年、安定した卓越風を持つ地域に立地し、周囲に十分な空間があり大きな建物もないという絶好の条件を有するモデルハウスにおいて、被験者実験を行いその成果を発表した(高ら<sup>1)2)</sup>)。リビングルームの掃き出し窓からの通風は室内の人体周辺でほぼ全面押し出し風を形成する。そこでは、気温が32℃であっても、風速が0.6m/s以上であると不快にならないことが分かった。定常状態における熱授受理論から導かれる従来からの定説を上回る通風の効果となっている。米国空調学会ASHRAEではオフィスにおける自然通風に関し快適域の拡張を行っているが<sup>3)</sup>)、理論的に明確ではなく、また筆者らの成果はそれよりも上回るものであった。また、冬期の日照は、直射日光が身体に当たっていても、陽あたりの側に行くと快適に感じるという結果であった。

一方で、近年急速にCFD(数値流体力学)の研究が進み、放射とも連成させた人体周りの物理環境シミュレーションが高精度化してきた。また、人体皮膚温を予測する生理モデルも開発されてきたが、こちらは人体生理の複雑さからまだ必ずしも十分なレベルではない。しかしながら、環境物理と人体生理を連成させた汎用シミュレーションプログラムも既に市販されている。

そこで、まず汎用シミュレーションプログラムで前述の通風・日照の効果を検討した。冬期の日照の効果はシミュレーションによっても十分確認されたが、夏期の通風についてはシミュレーションで十分に説明できないため、被験者実験を行った。

## 2. シミュレーションによる検討

シミュレーションプログラムは、非構造格子系の汎用CFDソフトSCRYU/Tetra ver.8を使用した。放射も連成して解くことができる。さらに、このプログラムには、人体熱モデルの一つであるJOSモデル<sup>4)5)</sup>)が組み込まれている。JOSモデルでは人体を17分割して、それぞれのコア部分から表面への伝熱と血流による熱搬送を解いている。また、発汗および蒸散についてもモデル化している。

### 2.1 夏期の通風の効果

図1に解析対象を示す。人体前方から全面定風速の気流を与える条件で、風速を0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5m/sの6条件、流入空気の気温を30, 31, 32, 33, 34, 35℃の6条件で行った。流入

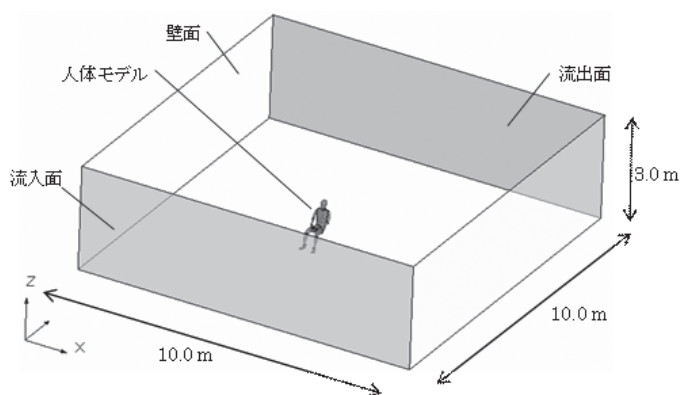


図1 解析対象(夏期通風)

表1 CFD解析条件(夏期通風)

1) 解析領域	10.0m(x)×10.0m(y)×3.0m(z)
2) 総メッシュ数	734,690
3) 差分スキーム	MUSCL (2次精度)
4) 乱流モデル	標準 k-ε モデル
5) 流入境界	U=0.1~1.5m/s, k=1.0×10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , ε=1.0×10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
6) 流出境界	表面圧力規定 (流出面において 0Pa)
7) 壁面境界	a) 速度 全て対数則 b) 温度 全て断熱

空気の湿度は60%RHである。表1にCFD解析条件を示す。人体の条件は、代謝量椅座安静状態1.0Met、着衣量0.6cloである。

図2は流入風が30℃、0.5m/sの場合の風速ベクトル図である。快適状態の平均皮膚温は約34℃、人体深部温はほぼ定常約37℃である。顕熱交換だけ考えれば、皮膚表面および衣服表面の温度は気温と人体深部温の間にある。気温が37℃を越えても発汗による潜熱放散があるため、しばらく皮膚温が37℃を越えることはない。汗による水分蒸散によっても放熱できなくなると深部温が上昇し危険な状態になる。気温30℃でも発汗しているなので、実際の皮膚表面温は複雑な変化をする。気温と皮膚温の温度差が小さくなると人体周りの自然対流が少なくなってくるため、全体の気流による影響が支配的になってくる。図2からその様子が分かる。

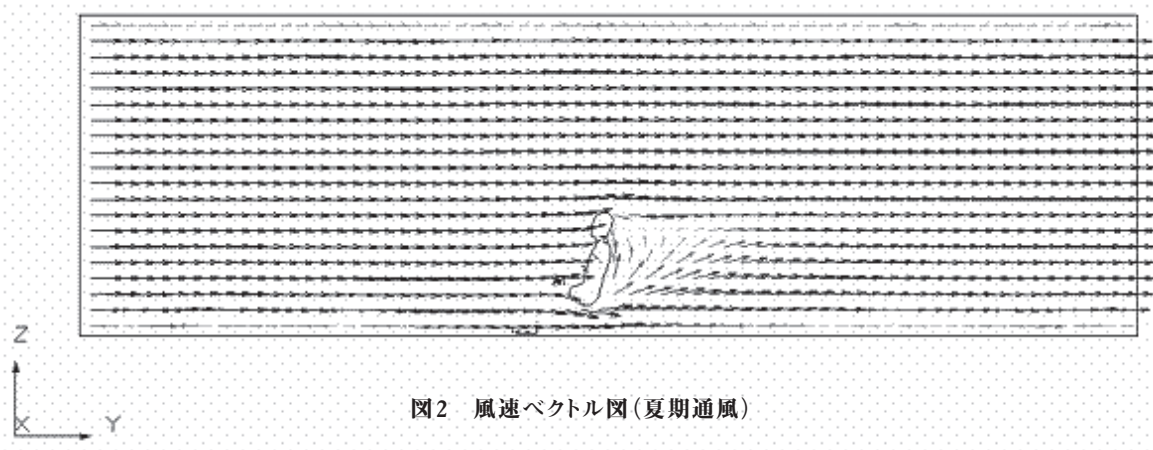


図2 風速ベクトル図(夏期通風)

図3は、気温32℃の場合の人体表面温度分布図である。図は省略するが、細かく数値を見ると、当然気温34℃の方が32℃よりもそれぞれの部位で皮膚温がほんの少し高くなっている。しかし、全ての部位の皮膚温が35℃を越し、36.5℃近くになっている部位もある。風速の違いもあまり明確な差が認めにくい。したがって、このプログラムで計算される値から気温と風速の明確な関係を見出すことは難しい。

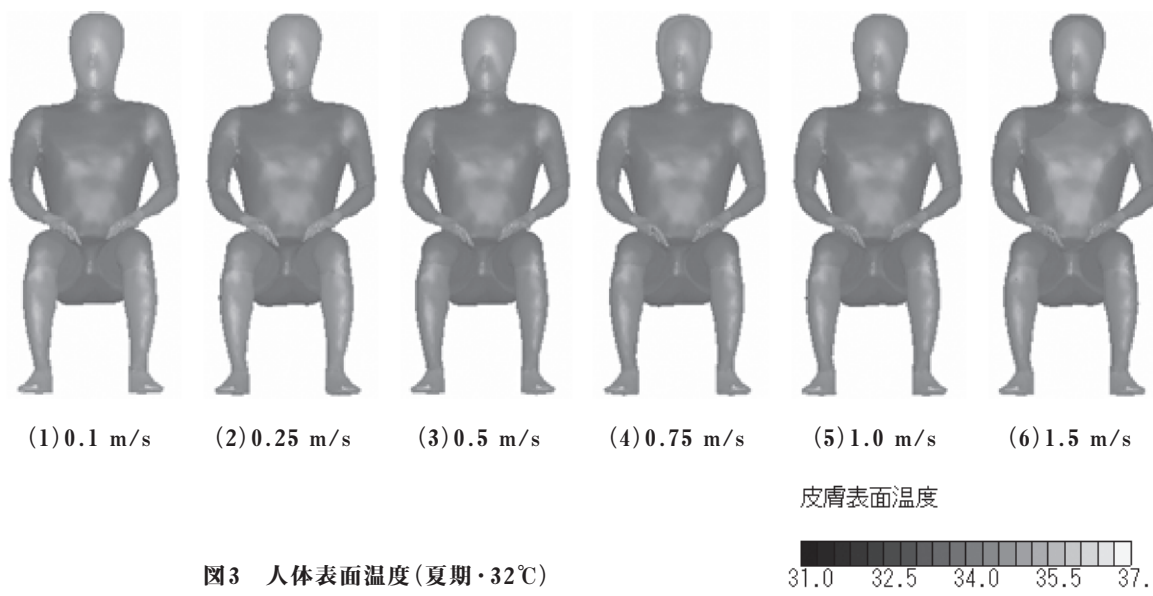


図3 人体表面温度(夏期・32℃)

図4は、このプログラムによって計算される気温32℃のときの各部位での平均的な対流熱伝達率である。水分蒸散による放熱は湿気熱伝達率で表されるが、湿気熱伝達率はルイスの関係から対流熱伝達率に比例する。各部位の対流熱伝達率を見ると、部位によって0.5m/sを越す辺りから上昇を始め、1.0m/sを越すと各部位とも急上昇する。気温が快適な範囲であると、0.5m/sくらいから急上昇し始める。一般に気温が快適範囲にある場合は、0.25m/sで気流を感じ始め、0.5m/sではっきり感じるとされている。周辺条件が快適状態の人体の平均皮膚温である34℃近辺の気温になると、0.5m/sを越すあたりで気流を感じ始め、1.0m/sくらいではっきり感じると考えられる。

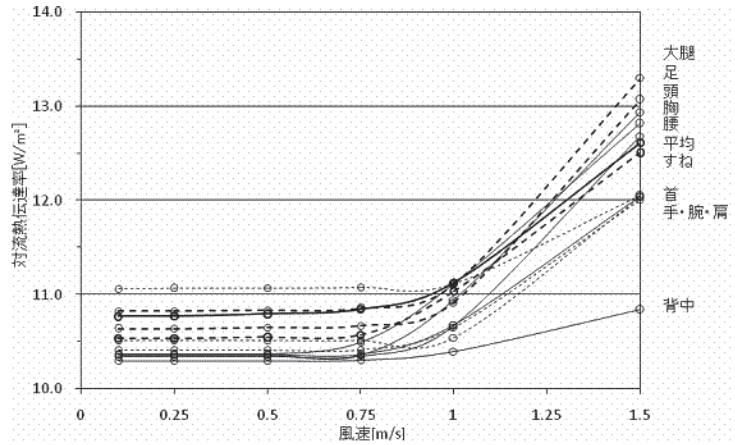


図4 各部位の対流熱伝達率(夏期通風32℃)

この結果からは、高温でも気流のある環境が不快にはならないことは、熱授受の面から十分に説明できない。

## 2.2 冬期の日照の効果

図5に解析対象を示す。気温を18℃、20℃、22℃の3条件とし、窓から日射が入っている場合と、日射なしでそれに相当する分を床暖房(床全面)している場合とを計算した。室内湿度は50%である。表2にCFD解析条件を示す。人体の条件は、代謝量椅座安静状態1.0Met、着衣量1.0cloである。この着衣量での快適気温は約22℃である。

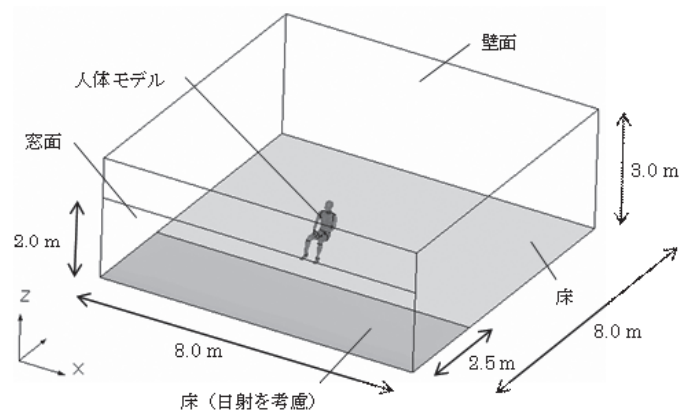


図5 解析対象(冬期)

表2 CFD解析条件(冬期日照あり)

1) 解析領域	8.0m(x)×8.0m(y)×3.0m(z)
2) 総メッシュ数	1344,641
3) 差分スキーム	MUSCL (2次精度)
4) 乱流モデル	標準 k-ε モデル
5) 壁面境界	a) 速度 全て対数則 b) 温度 窓面は熱貫流を考慮 それ以外の壁面は断熱
6) 発熱体	30W/m <sup>2</sup> (日射を模擬、窓面から2.5mの床面)

図6は、気温22℃、日射ありの場合の風速ベクトル図である。夏期条件と異なり、人体周りに自然対流が起きている様子を見ることができる。

図7は、気温22℃の場合の鉛直面温度分布図である。上段が日射あり、下段が日射なしの場

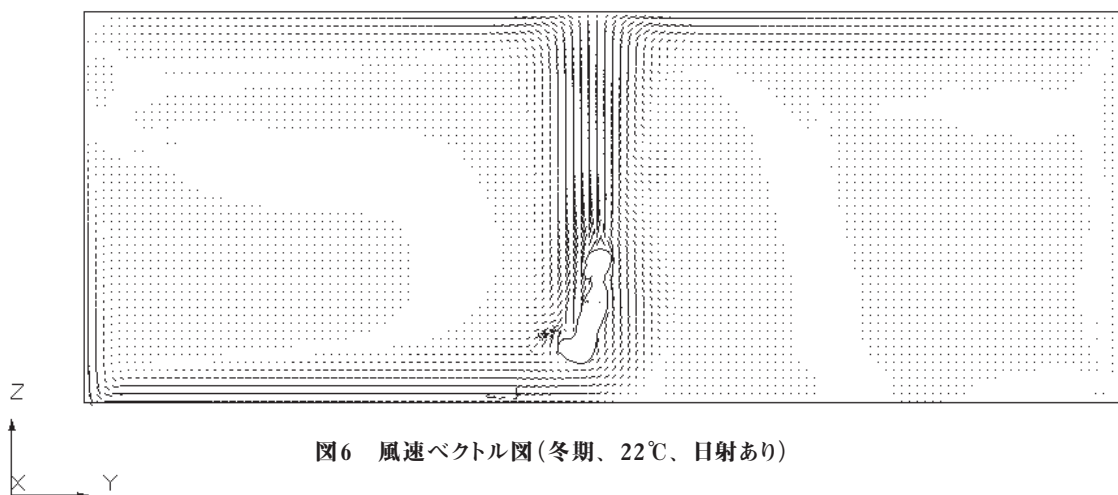


図6 風速ベクトル図(冬期、22℃、日射あり)

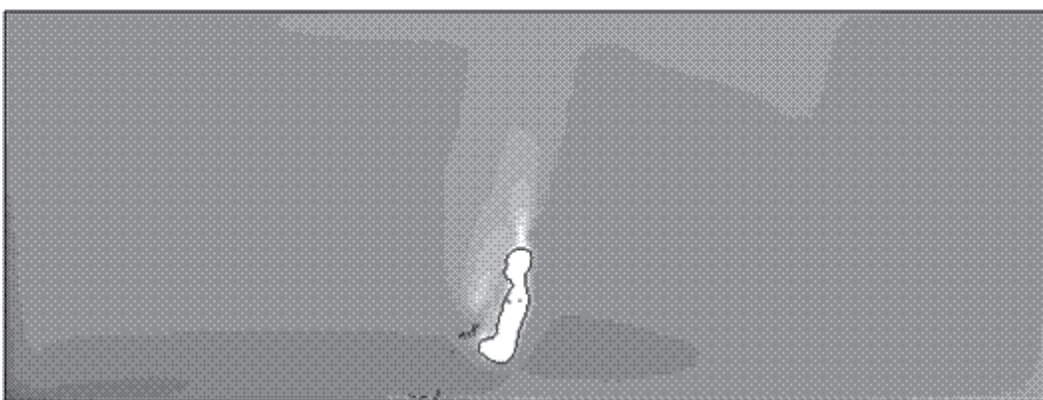
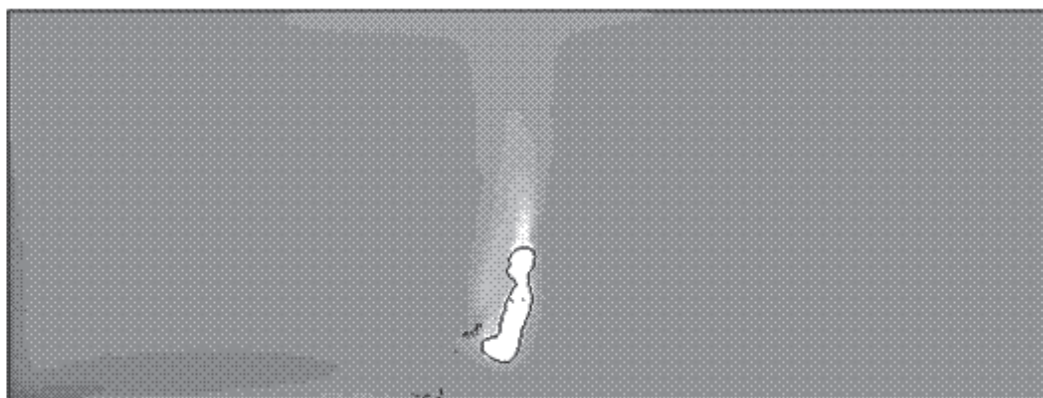
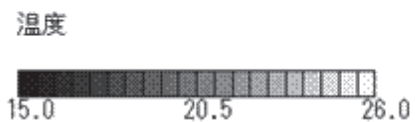


図7 鉛直面温度分布(冬期、22℃)  
 上段：日射あり  
 下段：日射なし・床暖房



合である。直射が入る場合は、暖房なしでも窓面のコールドドラフトが抑えられることがわかる。しかし日射なしで、日射相当分の床暖房をした場合、室温は維持されるものの窓面からのコールドドラフトを抑えられないことがわかる。18℃、20℃の場合も同様であった。

図8は気温18℃、20℃、22℃で日射ありと日射なし床暖房の場合の人体表面温度分布である。日射のありなしでほとんど差が出なかった。日射なしの場合、コールドドラフトが足部まで到達

しているの、皮膚温に変化があっても然るべきであるが、このモデルでは表現できていない。

ただ、室内物理環境としては、日射が入っている場合、暖房なしでも均質で良好な室内環境が形成されていることがシミュレーションの結果から予想可能になっている。

### 3. 夏期の通風に関する実験室実験

#### 3.1 背景と目的

冬期の日照の効果はシミュレーションによっても明らかとなったが、夏期の通風の効果はあまりよく分析できなかったので、被験者実験を行うこととした。

気流の効果に関しては、1987年の堀越ら<sup>6)</sup>、1992年の久保ら<sup>7)</sup>、1999年の堀ら<sup>8)</sup>などの既往研究がある。久保ら、堀らの研究は気温30℃までの実験であり、堀越らの研究では34℃の条件が含まれるが湿度が高く気流条件も2条件であった。筆者らの研究でも1999年の徐ら<sup>9)10)</sup>による変動風の効果の研究があるが、気温は30℃までであった。

標準化された温度指標であるSET\*で25.5-26.0℃くらいが中立温度であるとされている。従来の理論では、気温が32-34℃では風速が高くても中立まで下がらないと予想されていた。また、オフィス環境を目的とすることが多く、高風速では書類が飛ぶなどの問題が生じ、研究対象とされてこなかった。しかし、近年日本の都市では、露出水面・非舗装地面が減ったことなどにより、夏期は高温になるが相対湿度はあまり高くない。本研究では夏期住宅内を想定しているため、オフィスよりは高風速を受け入れやすい。そこで、高温・中湿度環境において、気流により環境を受容することができるかどうか確かめるとともに、快適に過ごすためにはどの程度の風速が必要であることを検証することを目的とした。

#### 3.2 実験概要

##### 3.2.1 実験日時及び実験場所

実験は、冬期を避け、2011年4月の5日間、各日ともに午後に実施した。実験場所は名古屋大学工学部9号館1階の空調実験室で、この実験室は全面風発生装置のある室Aとほぼ無風の室Bからなる。図9に実験室平面図、図10に被験者の着座状態、表3に全面風発生装置の概要を示す。本装置は背面から室内空気を吸い込んで整流しつつ吹出すものであり、吹出し気流温は室温に等しい。気流吹出し面から被験者頭部までの距離は1250mmとした。

##### 3.2.2 実験条件および実験方法

実験室の設定温度は32℃および34℃の2通りとした。実験室内の湿度は各条件とも50%RH程度を保つように調整し、室Aと室Bの温湿度は等しくなるよう調節した。表4に実験方法を示す。

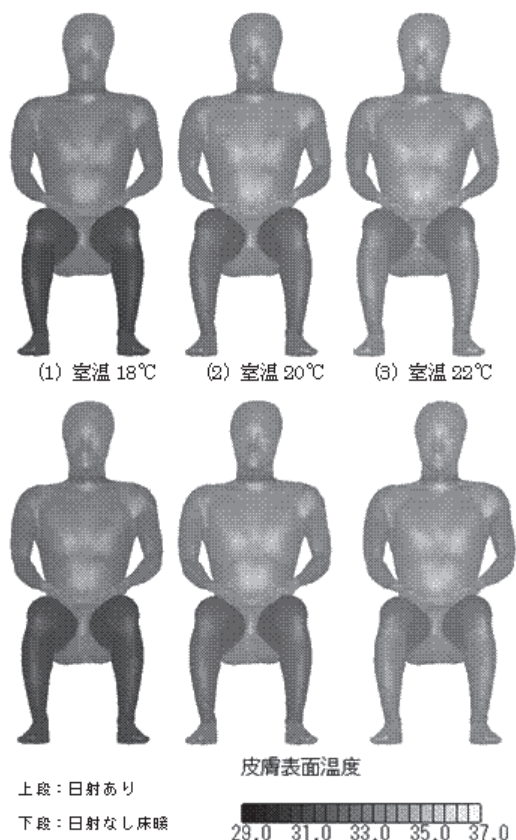


図8 人体表面温度(冬期)

被験者は更衣後、まず無風の室Bに30分間滞在し、その後0.5m/sの風の吹く室Aに移動して10分間滞在する。室A滞在10分経過時点以降は、申告の都度、被験者の希望により風速を変化させることとし、変更の希望があった際には被験者が心地よいと感じるまで0.1m/sずつ風速を変化させた。室A滞在60分経過時点で風速の希望を確かめたのち、実験を終了した。

心理量の測定には申告用紙を使用した。申告項目は、身体に対する7段階寒暑感・涼暖感・快適感、気流に対する7段階快適感・強弱、気流・室温に対する希望と温熱環境の受容性である。申告間隔は表4に示す通り5分もしくは10分とした。

### 3.2.3 被験者と着衣

表5に被験者の身体的特徴を表す。被験者は健康な男子学生で、各条件とも6人ずつとした。被験者の衣服は夏期の軽装を想定し、推定着衣量は0.44cloであった。

## 3.3 実験結果

### 3.3.1 室Bおよび室A初期における心理申告

図11・12に全身寒暑感、快適感の経時変化を示す。凡例は被験者名と温度条件を表している。室Bでは32℃でも「暑い」、「不快」側の申告となっている。0.5m/sの環境に移ると、入室直後は快適感が高くなる場合があるが、10分経過後は全身快適感の平均値で不快側になってしまう。図は省略するが、「風を強くしたい」と申告する人の割合が高くなっており、暑くて不快な状態を脱するためにはより強い風を求めている。

### 3.3.2 風速の変化

室A滞在10分経過後、被験者の希望に応じて風速を変化させた。図13に申告時に被験者が選択した風速と、その際のグローブ温度の関係を表す。白抜ききの点が32℃条件、塗りつぶしの点が34℃条件を表し、同一のマークは同一被験者を表している。実験時の制御の具合によって、室温が完全に一定していないので、実測値は実験条件とやや異なり、ばらつきを生じている。この図より、32℃条件では被験者により選択する風速は異なるが、OK32、KB32以外の被験者はグローブ温度の値に関わらず、一定の風速を選択する傾向が見られた。OK32を除くと、滞在中

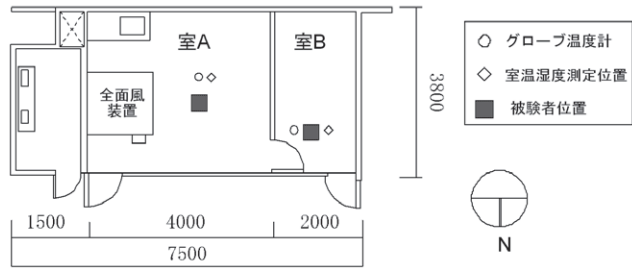


図9 空調実験室

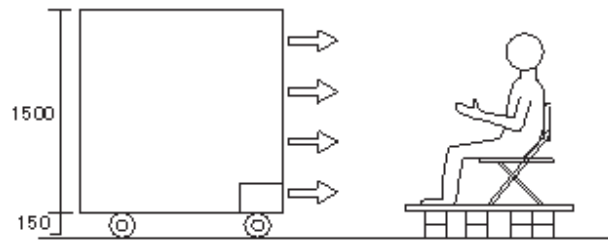


図10 全面風発生装置と着座状態

表3 全面風発生装置の概要

吹出面×奥行寸法	1500mm×1500mm×1500mm
最大面風速	1.5m/s
風量	12150m <sup>3</sup> /h
インバータ	三菱電機 FR-A720-5.5k

表4 実験概要

	室B	室A		
室温	32℃ or 34℃			
風速条件	無風	0～10分 0.5(m/s)	10～30分 希望により風速変化	30～60分 希望により風速変化
滞在時間	30分	60分		
申告間隔	10分	5分	5分	10分

表5 被験者の身体的特徴

	年齢(歳)	身長(m)	体重(kg)	体表面積(m <sup>2</sup> )
32℃	23.1±2.6	1.72±0.03	60.17±5.12	1.73±0.08
34℃	23.1±2.6	1.73±0.04	59.67±5.05	1.73±0.08

選択された風速は0.3~0.9m/s程度であった。OK32は実験終了時に「風は強いほど気持ち良い」とのコメントも残しており、他の被験者より強い風を好む傾向が見られた。なお、KD32においてグローブ温度が低下しているのは室温の調整不良によるものである。

一方、34℃条件の選択風速には被験者間での明確な差は見られないが、グローブ温度が高くなるのにしたがってより強い風を選択する傾向が見られる。全体としては0.6~1.2m/s程度の風が選択されていた。やはり、より暑い環境ではその状態を脱するためにより強い風が求められるようである。

次に、図14に室Aにおける風速の経時変化のグラフを、表6に実験終了時に希望した風速を示す。なお、32℃条件の平均値はOK32を除外した値となっている。

表6より、32℃条件では最終的に0.7m/s程度の風が要求されたのに対し、34℃条件ではそれよりやや強い0.9m/s程度の風が必要とされた。

### 3.3.3 SET\*による検討

室A滞在中の温熱環境と心理申告の関係を見るため、SET\*と全身快適感の関係を図15に表す。KD32の室温低下時のデータは除外した。図より、32℃条件における実測値により求めたSET\*の値は約27.5~30.5℃、34℃条件では同じく約29.5~31.5℃であった。2条件間で1~2℃程度差があった。

図15(a)の32℃条件全体では、SET\*の違いによる申告の変化は見る事ができない。しかし被験者別に分析すると、SET\*の値が小さくなるにつれて「不快」であった申告が「中立」に近づいたり、「快適」側に变化する傾向が見られた。環境状態の変化を敏感に感じ取って申告に反映させている被験者もいるようである。

一方、図15(b)の34℃条件ではそのような

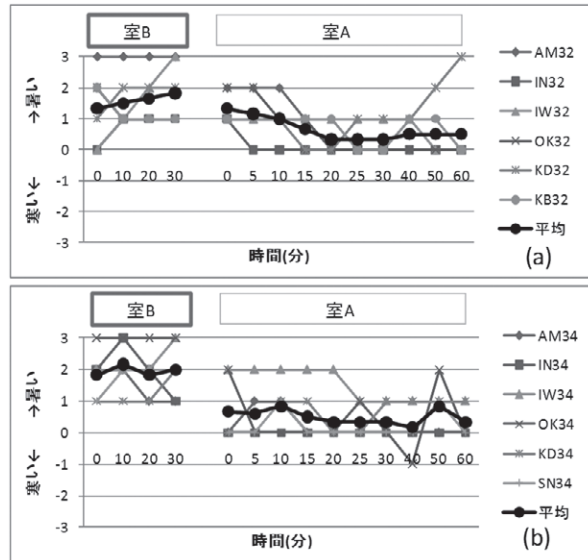


図11 全身寒暑感 (a)32℃条件、(b)34℃条件

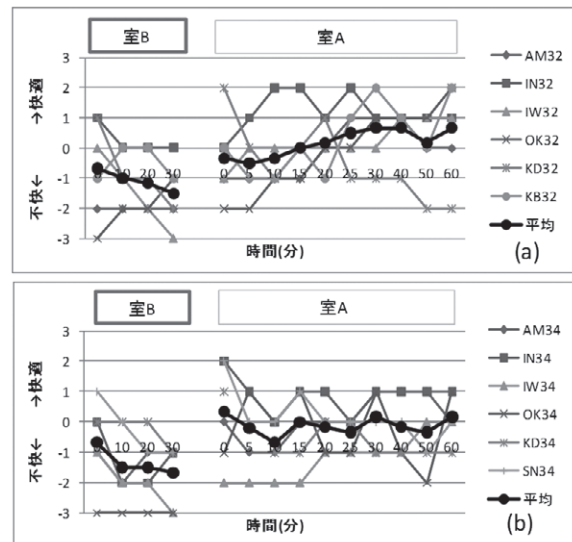


図12 全身快適感 (a)32℃条件、(b)34℃条件

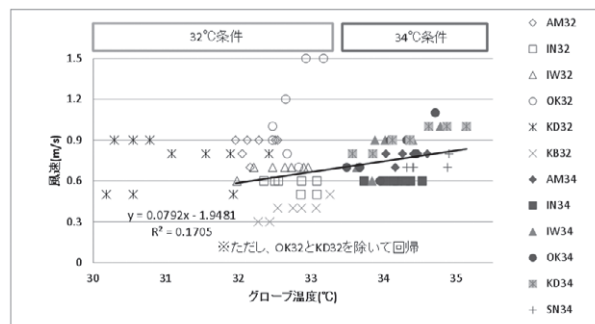


図13 選択した風速と選択時のグローブ温度の関係



傾向は見られない。同一のSET\*の値であっても申告値は被験者により異なり、どの温度帯においても「快適」「不快」の申告が混在しているが、SET\*31℃以上であっても快適側の申告が得られていることは注目すべきであろう。

### 3.3.4 夏期実験の結果のまとめ

32℃、34℃という夏期の高温室内環境を想定し、風を利用することでその環境を受け入れることができるか実験を行った。分析により得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 無風の室Bにおいては「暑い」、「不快」側の申告となり、32℃、34℃という高温条件下での無風の状態は受け入れがたい環境であることが確認できた。
- 2) 0.5m/sの風が吹く室Aに入室直後は、室B退室直前に被験者がより多く発汗を感じていた34℃条件の方が32℃条件よりも風に対する快適感が高かったが、その後10分滞在する間に全身快適感は両条件とも不快側となった。
- 3) 32℃条件では、時間経過後ある程度の風速で希望が安定したが、34℃条件では時間経過後もより強い風を希望する傾向があり、高温環境を受け入れるためにはより強い風が必要とされる可能性がある。
- 4) 本実験において、高温環境を受容するのに必要な風速は、平均値で、32℃条件では0.70m/s、34℃条件では0.87m/sであった。温熱環境に対する受容性には個人差があるものの、多くの被験者は風があれば32℃、34℃という高温環境を受け入れられることが確認できた。

### 3.4 考察

SET\*は、ある假定条件の下で人体と環境との熱授受を計算し、相対湿度50%、気流0.15m/s、平均放射温度=気温、着衣量0.6clo、代謝量1.0metを標準状態とし、同等の熱授受になる仮想気温を計算したものである。前述したように、25.5-26℃でほぼ中立状態とされている。32・34℃

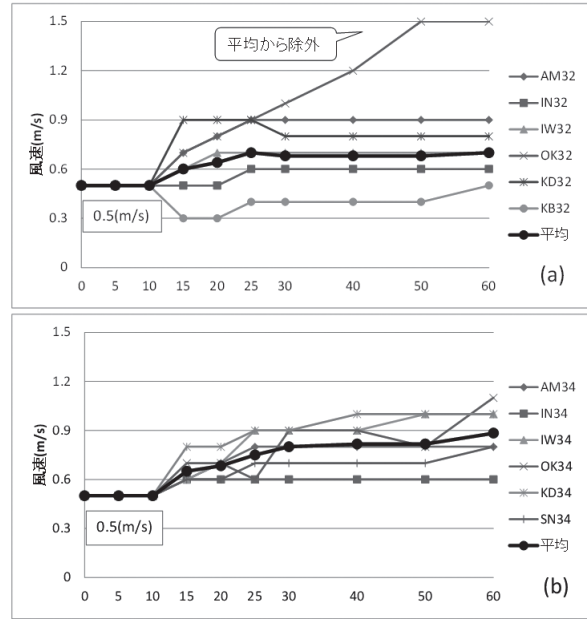


図14 風速の経時変化 (a)32℃条件、(b)34℃条件

表6 実験終了時の希望風速(m/s)

	AM	IN	IW	OK	KD	KB	SN	平均
32℃	0.9	0.6	0.7	1.5	0.8	0.5	-	0.70
34℃	0.8	0.6	1	1.1	1	-	0.7	0.87

“-”は対応する値のないことを表す。

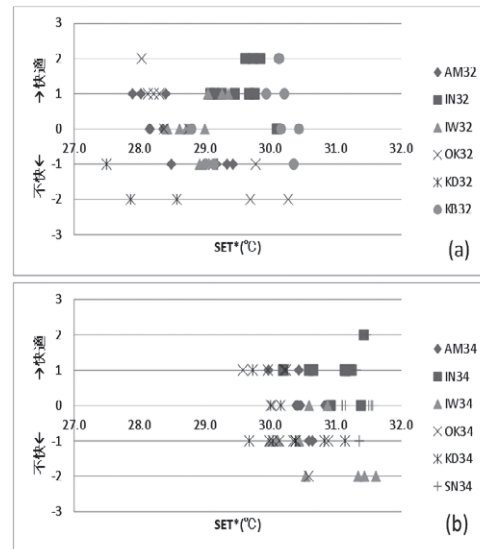


図15 SET\*と全身快適感の関係 (a)32℃条件、(b)34℃条件

の環境では風速があってもこの快適SET\*までは下がらない。しかしながら、被験者実験では、32℃実験で0.7m/s以上、34℃実験で0.9m/s以上という値が得られた。前述した高らのフィールド実験における32℃、0.6m/s以上で快適という結果ともほぼ合う。生理モデルがまだ十分でないため皮膚温の予測が正しいかはよく分からないが、シミュレーションの結果からも対流熱伝達率が変化する風速と一致する。現在の熱授受理論から行けば皮膚温は上昇して不快になるはずであるが、風を感じると快適になると考察される。また風速の強いところと弱いところができるため、人体表面が均一でなく非対称の状態になりこれも現在の温冷感モデルでは十分に説明できない。筆者の提唱する非定常温冷感を説明する二次元温冷感モデル<sup>11)–13)</sup>におけるプレザントネス効果が現れているとも考えられる。いずれにしろ、32℃でも気流があれば快適を保てると言えよう。

ただし、この実験条件は全面風であり、高らのフィールド実験も掃き出し窓からの通風で人体に対しては全面風である。扇風機のような局部風ではないことに注意が必要である。また、発汗をしているため、水分補給が必要である。さらに発汗機能の衰えている人にとっては危険な状態になることに留意する必要がある。

#### 4. おわりに

冬期の日照が有効であることはシミュレーションから確認された。夏期の通風が、ある条件下では有効であることも確認された。本年起こった東日本大震災の影響で、日本はしばらくの間電力不足が懸念される。都市の過密集中は、良好な通風・日照を阻害しているが、夏期および冬期の電力消費を減らす一方法として、自然環境をうまく利用してパッシブな暮らし方をすることを考えるにあたり、基礎的知見を得ることができたと考えている。

#### 【謝辞】

本研究は、名古屋大学大学院環境学研究科齋藤輝幸准教授、飯塚悟准教授、および同博士前期課程2年岩田香織さん、1年松原祐子・佐々木美奈さんとの共同研究である。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 高娟淑、久野覚、原田昌幸、中山和美、飯村龍：住宅における夏季の通風と冬季の日射が室内温熱環境評価に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、2009、第74巻、第638号、pp.427-433
- 2) 高娟淑、久野覚、原田昌幸、中山和美、飯村龍：住宅における生活行為の評価と温熱環境の季節変化に関する研究、日本建築学会環境系論文集、2010、第75巻、第656号、pp.869-876
- 3) ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- 4) 田辺新一、小林弘造、小川一晃：温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発、日本建築学会環境系論文集、2006、第541号、pp.9-16
- 5) Murakami, K., Tanabe, S., and Haneda, M.: Numerical thermoregulation model JOS for evaluation of thermal comfort, Roomvent, No.1241, 2007

- 6) 堀越哲美、小林陽太郎、土川忠浩、福島重治：修正湿り作用温度・温熱風速場・有効放射場および減効湿度場による温熱環境条件の人体影響表現方法の検討、日本建築学会計画系論文報告集、1987、第380号、pp.12-23
- 7) 久保博子、磯田憲生、梁瀬度子：蒸暑環境における好まれる気流速度の人体影響に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、1992、第442号、pp.9-16
- 8) 堀祐治、伊藤直明、須永修通：夏期蒸暑環境下の気流利用による熱的快適性の向上に関する実験研究、日本建築学会計画系論文集、1999、第521号、pp.47-53
- 9) 徐国海、久野覚、水谷慎吾、齋藤輝幸：変動風環境における生理・心理反応に関する研究 — 暑不快環境から気流のある中立環境へ移動した場合の温冷感実験 —、日本建築学会計画系論文集、1999、第519号、pp.47-53
- 10) 徐国海、久野覚、田中将彦、齋藤輝幸：暑不快環境から気流のあるやや暑い環境へ移動した場合の生理・心理反応に関する研究、日本建築学会計画系論文集、1999、第524号、pp.37-44
- 11) Kuno,S., Ohno,H., and Nakahara,N.: A two-dimensional model expressing thermal sensation in transitional conditions, ASHRAE Trans., Vol.93, Part.2, 1987, pp.396-406
- 12) Kuno,S.: Comfort and pleasantness, Proceedings of Pan Pacific Symposium on Building and Urban Environmental Conditioning in Asia, Nagoya, 1995.3, pp.383-392
- 13) 久野覚：温熱環境における快適性—Comfortとpleasantness、基礎心理学研究、第18巻、第1号、1999.9, pp.102-106

