

〈特別研究課題〉 室内環境・快適性を拘束条件とした  
ZEH (Net Zero Energy House) の可能性の検討  
助成研究者 名古屋大学 飯塚 悟



## 室内環境・快適性を拘束条件とした ZEH (Net Zero Energy House) の可能性の検討

飯塚 悟  
(名古屋大学)

### Experimental and numerical investigations on the possibility of net zero energy house (ZEH) in consideration of indoor environment and comfort

Satoru Iizuka  
(Nagoya University)

#### Abstract :

Recently, energy consumption by public welfare section is continuously increasing and the household sector accounts for about 40 percentage of it. The reduction of energy consumption in the household sector has become an urgent need. Under such a social situation, net zero energy buildings (ZEB) and net zero energy houses (ZEH) based on active/passive energy saving techniques and high efficiency energy systems are highly expected.

In this study, in order to make ZEH feasible, the following two aspects are studied. (1) Techniques for ZEH realization and their structures. (2) Natural ventilation in summer season which is a design requirement (passive energy saving technique) for houses to achieve ZEH. Especially, the effectiveness of natural ventilation is clarified based on subject experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations.

#### 1. はじめに

近年、民生部門のエネルギー消費量が増え続けており、その削減が急務となっている。民生部門のエネルギー消費量の約4割は家庭部門であり、近年これもまた増加しつつある。このような社会

情勢の下、今後の建物はネットゼロエネルギーを目指し、エネルギーそのものを必要としないパッシブな省エネルギー手法を駆使した建築計画を必須条件として、さらに、太陽光・太陽熱などのアクティブ利用を含む、高効率エネルギーシステムを適用したZEB(net Zero Energy Building)やZEH(net Zero Energy House)が求められている。

本研究では、住宅のZEH化に向けた検討を行うことを目的とし、まず、ZEH実現のための手法やその構造について整理する。ZEHの実現において、太陽電池(太陽光発電)の普及は重要な要素となるが、その普及促進の1つとしての電気自動車(EV: Electric Vehicle)活用の検討も行う。次に、ZEH化を目指す上で必須条件となるパッシブな省エネルギー手法の導入に関して、夏期の自然通風に着目し、モデルハウスまたは実験住宅を対象とした被験者実験およびCFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレーションを通じて、自然通風の適用範囲や有効性を検討する。

## 2. ZEH実現のための手法とその構造

### 2.1 日本におけるZEHの実現と太陽電池

中緯度地域(東京から福岡の間)における住宅の屋根に太陽電池(3.35 kW)を設置した場合、年間3,829 kWh( $13,784 \times 10^6$  J)の発電量が得られる計算となる。一方、住宅のエネルギー消費量(2009年度時点)は $38,179 \times 10^6$  J/世帯(2次エネルギー基準)であり、その内訳はおおよそ、冷房2%、暖房25%、給湯28%、厨房8%、動力・照明その他37%となっている。以上を単純に比較すると、住宅の年間のエネルギー消費量の約36%を太陽光発電で賄えることになる。逆に言えば、住宅のエネルギー消費量を現在の約4割まで削減できれば、オンサイトでZEHが実現可能となる。

### 2.2 ZEH実現のための建築的手法と機械的手法

住宅のエネルギー消費量を削減してZEHを実現するためには、以下に示す建築的手法および機械的手法を組み合わせて住宅を計画する必要がある。

#### 建築的手法

- 1) 高断熱・高气密の徹底と計画換気、換気空気からの熱回収
- 2) 庇などによる夏季の日射遮蔽の徹底
- 3) 自然通風を十分に行える建築計画

#### 機械的手法

- 1) 高効率な冷暖房システムの導入
- 2) 高効率な給湯システムの導入
- 3) 高効率な照明システムの導入
- 4) 高効率な家電製品の使用

上記のうち、建築的手法として挙げた自然通風については、次の3章、4章において、被験者実験およびCFDシミュレーションにより、その適用範囲および有効性を検討している。

### 2.3 ZEHの構造

ZEHは、種々のエネルギーと種々の再生可能エネルギーの組合せで実現することができる。図1はそれらの組合せを整理したものである。ただし、これは前節で述べた建築的手法が十分に適用さ

れていることが前提となっている。

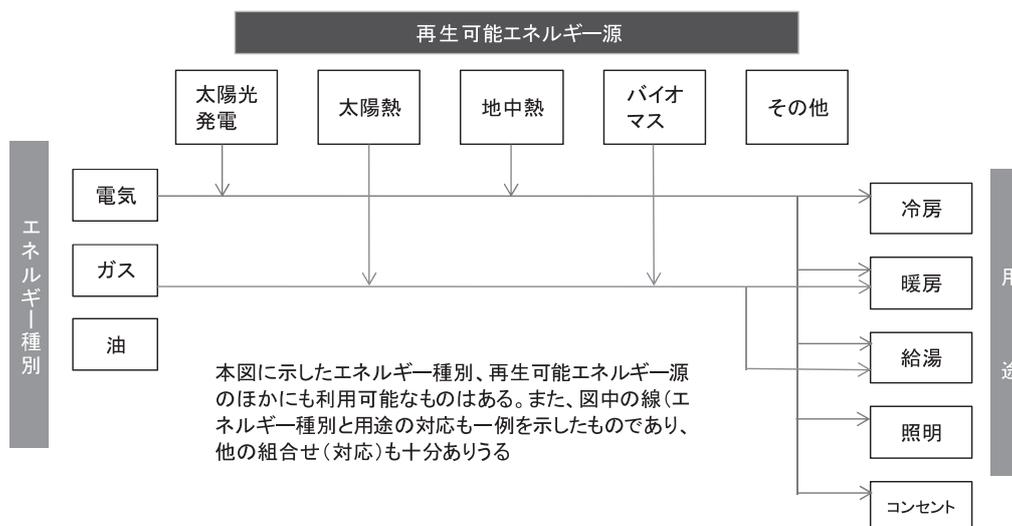


図1 エネルギー種別・再生可能エネルギー源・用途のマトリックス

電気を中心としたシステムであれば、高効率のヒートポンプが必要とされ、これは地中熱をヒートソース・シンクにすることも可能である。近年では、冷暖房と給湯の両者に対応できる多機能なヒートポンプも市場に出回っている。また、照明やコンセントに関しては、LED照明や低電力消費型の家電製品が注目を集め、さらには太陽光発電との対応を考えた場合の直流システム（LEDへの直流での電力供給や直流で稼働する家電製品など）が今後の技術として注目されている。

ガスや油を組み合わせたシステムにおいては、太陽熱利用やバイオマス利用などが考えられ、太陽熱については吸収式冷凍機の低温駆動化や吸着式冷凍機の開発などが再び行われている。バイオマスを燃料としたコージェネレーションなどもZEHを実現するための技術と考えられる。

また、ZEHの実現は1つの住宅で考えるのではなく、地域としての需要と供給の調整によってさらに実現可能性が高くなるものであり、スマートエネルギーシステムに向けての研究開発や実証も近年行われてきている。

## 2.4 EVによる太陽電池設置促進効果の検討

太陽電池を設置して地域の多くの住宅がZEH化した場合、需要と発電のミスマッチにより送電網へ負担をかける可能性がある。地域のエネルギーシステムをスマート化して需要と供給を制御することにより、すなわち、住宅に設置した太陽電池で発電した電力のうち、送電網に逆流された電力を他の住宅または他用途の建物が利用することにより、ある程度は収支が取れる。しかし、地域の太陽電池の設置面積がある面積を超えると（住宅への太陽電池の普及率がある率を超えると）、地域での収支が取れず、送電網に負担が生じる。その場合、何らかのバッファが必要となる。そのバッファの1つとしてEV（電気自動車）の電池を利用することが考えられ、EVの普及と太陽電池設置の可能性の関係を求めることを試みた。

具体的には、名古屋市の1つの配電変電所エリアを仮定し、太陽電池発電量が電力消費量を上回る分（余剰電力量）をEVで吸収するというシナリオでの検討である。対象としたエリアは戸建住宅

の比率が高く、余剰電力の生じやすいエリアである。対象エリア内の戸建住宅全てに太陽電池を設置した場合の電力消費量、太陽電池発電量、余剰電力量は図2のようになり、その余剰電力をいかにEVで吸収できるかを検討した。本検討を行う際、所有されているEVが1日の間でどこに滞在しているかという試算が必要となるが(自宅滞在のEVにより上記の余剰電力を吸収)、ここでは図3のbの部分に自宅滞在の比率とし、これを20%と設定した。また、EVは余剰電力蓄電のため、夜間電力による充電を控え、移動による電力消費または夜間の放電が行われることで太陽電池発電時に十分な充電が可能であると想定した。充放電は1時間当たり1.5 kWhと設定した。

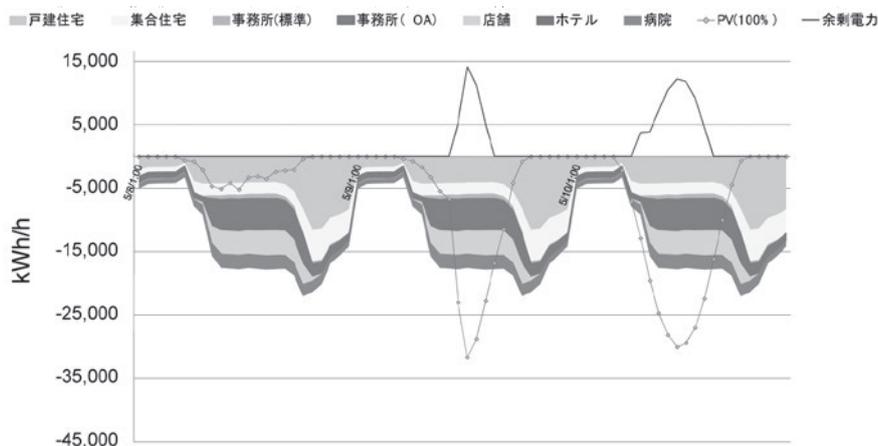


図2 対象エリア内の電力消費量・太陽電池発電量・余剰電力量

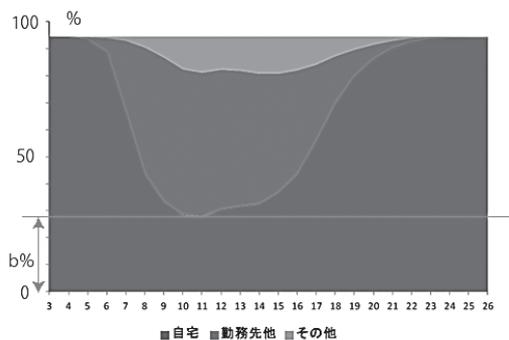


図3 EV滞在所の比率

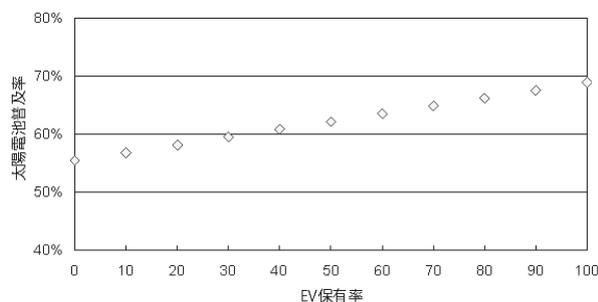


図4 EV保有率と太陽電池普及可能率

図4はEV保有率と太陽電池普及可能率の検討結果である。EV保有率が0%であっても、対象エリア内の戸建住宅以外の建物へ電力が融通されることにより余剰電力は発生せず、太陽電池普及率55%が確保される。EV保有率が上がることで、太陽電池発電時にEVへの蓄電が可能となり、EV保有率100%の場合、太陽電池普及可能率は69%まで上昇することが確認された。

### 3. 夏の自然通風効果に関する被験者実験

#### 3.1 実験概要

##### 1) 巡回型実験

2012年8月23～24日の2日間、愛知県豊田市所在のモデルハウスで被験者実験を行った。図5に実験住宅の平面図と評価場所を示す。心理申告は、評価場所の順序・照明ON/OFF・午前/午後と条件を変えて行った。図6は実験期間の屋外気温の経時変化である。実験両日ともに午前中は自然通風条件で実験を行ったが、午後はエアコンを使用した。また、いずれの場所においても直射日射が被験者に当たらないように配慮した。被験者は「家に1人でのいる」という想定で、場所の評価・温熱環境評価(表1参照)・生活行為評価を行った。

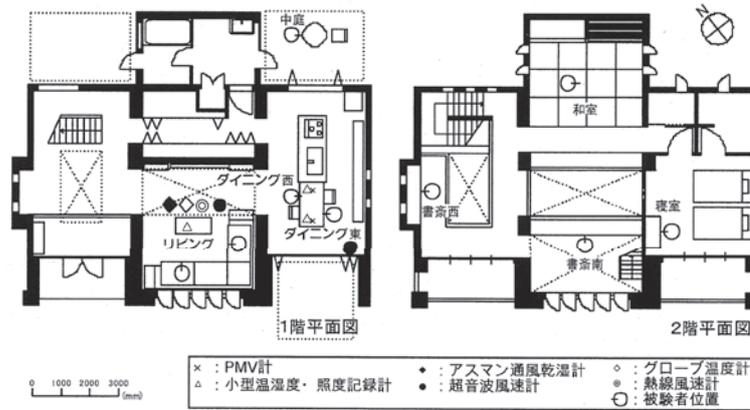


図5 実験住宅の平面図と評価場所

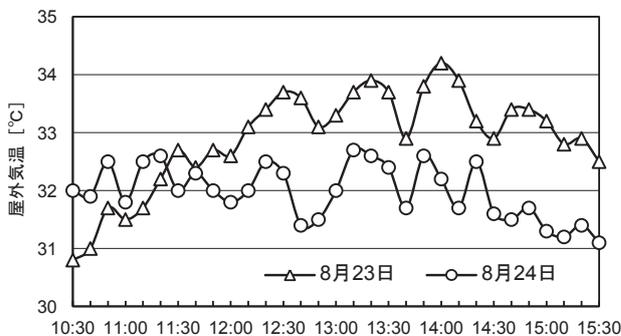


図6 屋外気温の経時変化

表1 温熱環境評価の質問項目

質問項目	評価尺度			
A 寒暑感	暑い	やや暑い	どちらでもない	やや寒い 寒い
B 涼暖感	暖かい	やや暖かい	どちらでもない	やや涼しい 涼しい
C 温熱快適感	快適	やや快適	どちらでもない	やや不快 不快
D 室温希望	下げたい	このままでよい	上げたい	
E エアコン必要性	かけたい	どちらかといえばかけたい	そのままでよい	
F 発汗感	汗が出る	汗は出ない		
G 気流感	感じる	感じない		
G-2 気流の熱さ	熱い	やや熱い	どちらでもない	やや冷たい 冷たい
H 窓開閉希望	開けたい	このままでよい	閉めたい	
H-2 開閉希望箇所	図に表記			
J 陽あたり満足感	満足	やや満足	どちらでもない	やや不満 不満
K 陽あたり希望	必要	やや必要	不要	
L 陽あたり必要性	増やしたい	やや増やしたい	このままでよい	やや減らしたい 減らしたい
M 窓からの冷放射	受ける	やや受ける	受けない	
N 足元の冷たさ	感じる	やや感じる	感じない	
O 乾燥感	乾燥している	やや乾燥している	乾燥していない	
P 許容(短期)	許容できる	許容できない		
Q 許容(長期)	許容できる	許容できない		

##### 2) 滞在型実験

実験期間(2日間)の午前中に1)の巡回型実験と並行して滞在型実験も実施した。リビングとダイニングの2か所を評価場所として、それぞれ20分間の滞在とした。心理申告は、5段階の寒暑感・涼暖感・温熱快適感、発汗感、気流感、温熱環境の許容性、陽当たり満足感、陽当たり必要性とし、10分毎に申告を行った。生理量としては、皮膚温を5点(額、胸、上腕、大腿、下腿)計測し、心理申告の終了直後に体重測定を行った。

##### 3) 被験者概要

被験者を4グループに分けて、1日2グループが実験に参加した。被験者は18～23歳の大学生

男女で、男性7名、女性8名の計15名とした。表2に被験者の身体的特徴と着衣量を示す。被験者は実験日ごとに異なり、実験時の着衣は実際の生活時に近くなるように、男性はTシャツと半ズボン、女性はTシャツとスカートとした。

表2 被験者の身体的特徴と着衣量

				年齢	身長 [cm]	体重 [kg]	体表面積 [m <sup>2</sup> ]	着衣量 [clo]
8月	23日	男	3人	18 ± 0.0	171 ± 1.1	66.5 ± 1.0	1.78 ± 0.00	0.53 ± 0.01
		女	4人	21 ± 2.4	162 ± 1.7	52.5 ± 6.1	1.54 ± 0.08	0.37 ± 0.01
	24日	男	4人	20 ± 0.7	171 ± 3.7	57.9 ± 3.8	1.67 ± 0.07	0.51 ± 0.01
		女	4人	20 ± 0.4	161 ± 2.8	46.9 ± 2.2	1.47 ± 0.05	0.36 ± 0.00

### 3.2 実験結果

#### 1) 巡回型実験

図7は自然通風条件時の室温と温熱快適感申告の関係を示したものである。室温が33℃までは快適側の申告が見られているが、33℃以上になると中立付近の申告となっている。風速(室内気流速度)別に見ると、風速0.6 m/s以上では男女ともほとんどが快適側の申告である。また、風速0.3 m/s以上0.6 m/s未満では、女性の方が不快側の申告が多い結果となっている。

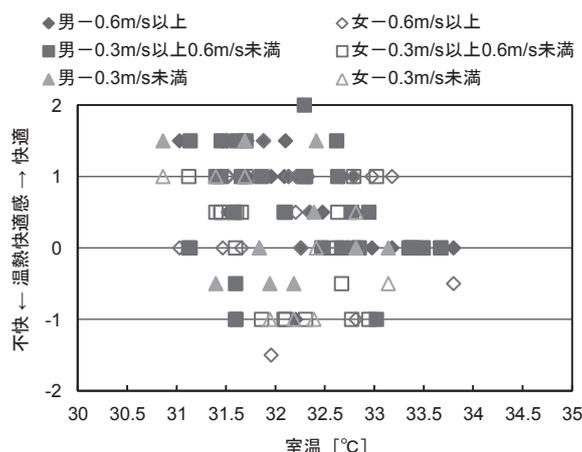


図7 室温と温熱快適感申告の関係(男女・風速別)

図8、図9はそれぞれ、自然通風条件時の風速(室内気流速度)と温熱快適感申告の関係、室温と温熱快適感申告の関係を示したものである。図8に示すように、0.6 m/s以上の風速が多く確認され、風速が大きくなるほど快適側の申告となっている。ただし、場所によっては風速0.6 m/s未満でも快適側の申告が見られている。各評価場所の結果を比較すると、書斎西では風速が小さいため(図8)、他の場所に比べて同じ室温でも不快側の申告になっている(図9)。一方、ダイニング西、ダイニング東、寝室、中庭では風速が大きいため、多くは快適側の申告となっているが、室温が34℃付近になると中立の申告へと変化している。以上の結果を踏まえると、自然通風により良好な温熱快適性が確保されるのは室温が33℃までと考えられる。

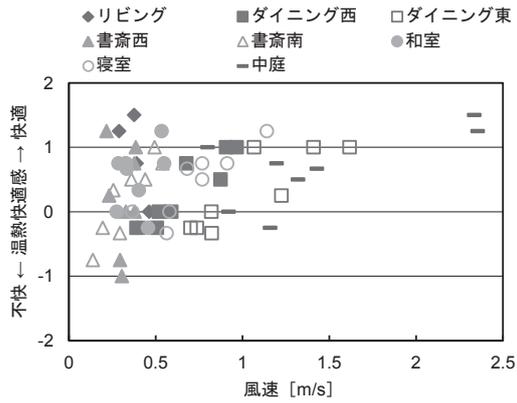


図8 風速と温熱快適感申告の関係(場所別)

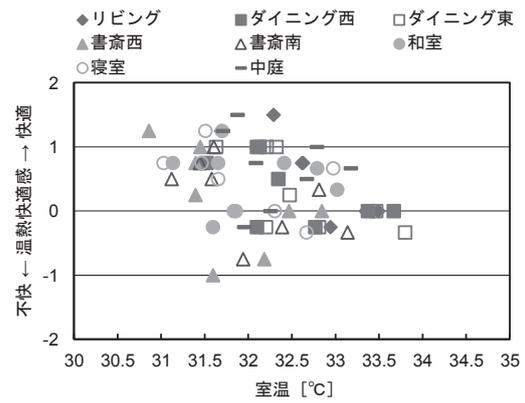


図9 室温と温熱快適感申告の関係(場所別)

## 2) 滞在型実験

図10は温熱快適感の申告割合の経時変化を示したものである。実験開始時(0分)には快適側の被験者は7割を超えていたのに対し、実験開始から40分経過後ではその割合が5割程度まで減少している。しかし一方、実験開始時に見られた不快側の申告割合は、40分経過後ではやや減少となっている。

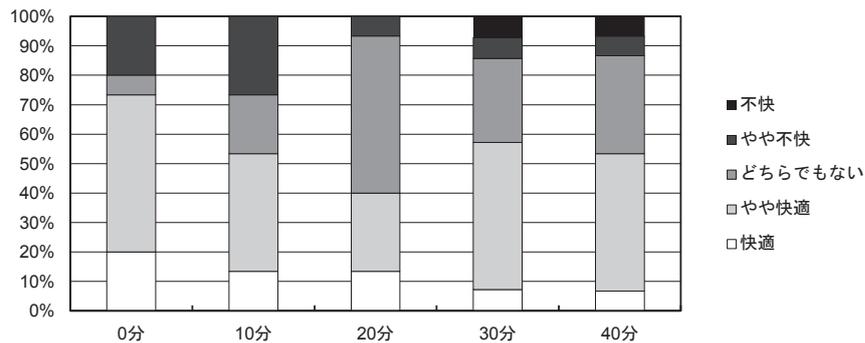


図10 温熱快適感の経時変化

図11、図12はそれぞれ、室温と風速(室内気流速度)の関係、室温と平均皮膚温の関係を示したものである。両図の凡例は、実験開始から40分経過後に快適・中立・不快側となったグループに分けて表示している。室温が33℃までは快適・中立側の被験者が多く、33℃以上になると快適側の被験者は見られなくなり、不快側の申告が増えている。

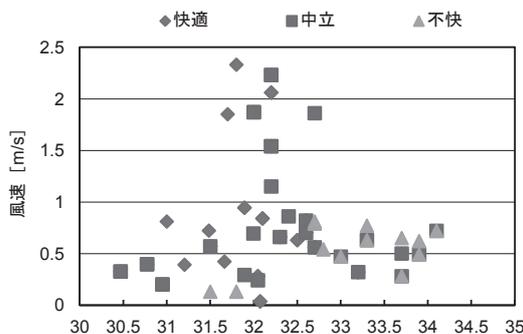


図11 室温と風速の関係

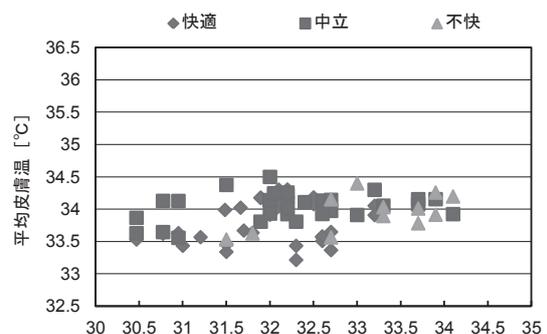


図12 室温と皮膚温の関係

比較のため、愛知県東海市所在の実験住宅で行った別の被験者実験(2012年8月9～10日)の結果を図13、図14に示す。図13は室温と平均皮膚温の関係、図14は風速(室内気流速度)と平均皮膚温の関係を示したものである。両図の凡例は図11、図12と同様で、実験開始から40分経過後に快適・中立・不快側となったグループに分けて表示している。豊田市モデルハウスの結果(図12参照)では、同程度の室温でも快適側の被験者は中立・不快側の被験者に比べて平均皮膚温が低くなる傾向が見られている。この傾向は、東海市実験住宅の結果においても同様である(図13)。しかし、図14に示すように、風速0.3 m/s未満が多い東海市実験住宅の結果では、風速0.3 m/s以上となっても皮膚温の上昇が生じている一方、風速0.6 m/s以上が多い豊田市モデルハウスの結果では、風速が小さな場合でも皮膚温の上昇は見られていない。さらに、豊田市モデルハウスの場合、室温が34℃付近でも皮膚温が上昇せず、平均皮膚温が34.5℃を超えていない(図12参照)。以上のように、高い室温の環境下でも、大きな風速(室内気流速度)が得られれば皮膚温の上昇を抑えることができ、不快でない温熱快適性が確保されることが分かる。

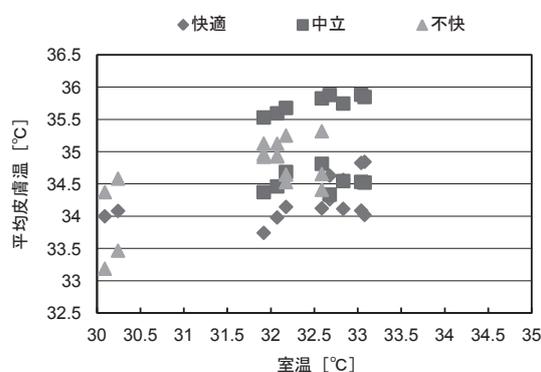


図13 室温と皮膚温の関係(東海市実験住宅)

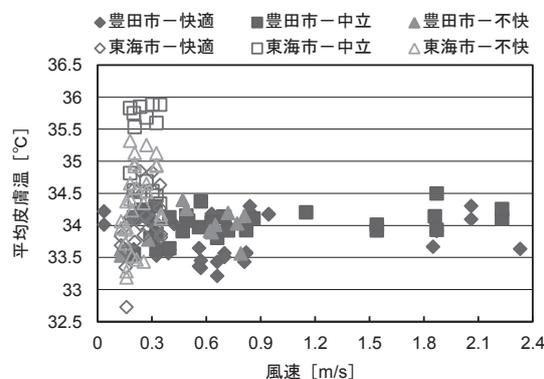


図14 風速と皮膚温の関係

#### 4. 夏期の自然通風効果に関するCFDシミュレーション

##### 4.1 シミュレーション概要

解析対象は、愛知県東海市所在の実験住宅の1室を想定した幅3.6 m×奥行7.0 m×高さ2.4 mの室内(図15)とした。対象室の南面には幅1.2 m×高さ1.0 mの開口部があり、これが夏期自然通風時の流入口となる。一方、対象室の北面(内壁面)には幅2.6 m×高さ2.0 mの開口部があり、これが通風時の流出口となる。流入風としては、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/sの5種類の速度、0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°の6種類の風向(流入口に対する法線方向からの角度)を検討した。なお、流入風の温度と相対湿度はそれぞれ32℃、50%の一定値とした。在室者は1名とし、室中央に直方体形状(幅0.5 m×奥行0.3 m×高さ1.5 m)の人体モデル(図16)を配置した。表3はシミュレーションの主な解析条件である。

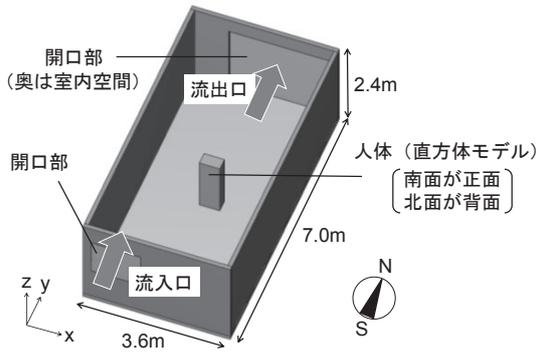


図15 CFDシミュレーション解析対象

(背面で空白になっている部位は正面と同じ部位)

- |        |           |
|--------|-----------|
| 1 頭    | 11 左前腕    |
| 2 首    | 12 左手     |
| 3 胸    | 13 右大腿(前) |
| 4 背    | 14 右大腿(後) |
| 5 腰(前) | 15 右下腿    |
| 6 腰(後) | 16 右足     |
| 7 右上腕  | 17 左大腿(前) |
| 8 右前腕  | 18 左大腿(後) |
| 9 右手   | 19 左下腿    |
| 10 左上腕 | 20 左足     |

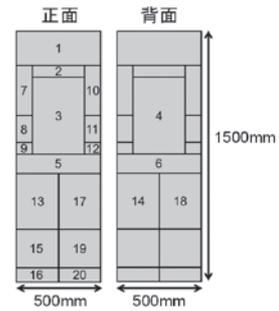


図16 人体(直方体)モデルにおける各部位

表3 CFDシミュレーション解析条件

1) 解析領域	3.6 m (x) × 7.0 m (y) × 2.4 m (z)
2) メッシュ数	45 (x) × 88 (y) × 33 (z) = 130,680
3) 差分スキーム	全ての支配方程式の移流項に対して QUICK
4) 乱流モデル	RNG k-εモデル (高レイノルズ数型)
5) 流入境界	本文参照
6) 流出境界	気流・温度・湿度全てに対して勾配0条件
7) 壁面境界	気流：対数則 温度：外壁・内壁 (0.5 W/m <sup>2</sup> ·K) と天井面 (0.35 W/m <sup>2</sup> ·K) は熱貫流を考慮、床面は断熱条件 湿度：透湿条件
8) 発熱体 (人体)	60 W (顕熱) + 63 W (潜熱)

#### 4.2 シミュレーション結果

室内環境のシミュレーション結果の1例として、図17に流入風速1.5 m/sの場合の室内水平断面(床上1.0 m)気流分布(風速ベクトル分布)を示す(温度分布も併せて図示)。流入風向0°の場合、流入風は横方向にほとんど拡散せず、人体モデルの右側(流入口に向かう面が正面)をほぼ真っ直ぐに吹き抜けている。人体モデル周辺では、右側でやや大きな流速となっているが、全体的に静穏な気流環境が形成されている。一方、流入風向(角度)が大きくなると、人体モデルに直接風が当たるようになり、人体モデル周辺で複雑な気流場が形成されるようになる。ただし、流入風向が40°以上になると、人体モデルの左側を通り抜けるようになり、室全体としては複雑な気流場が形成されているものの、人体モデル周辺では比較的静穏な気流環境となっている。図は省略するが、他の流入風速(0.5, 1.0, 2.0, 2.5 m/s)の場合も、流入風向の違いによる気流環境の変化はほぼ同様となっている。

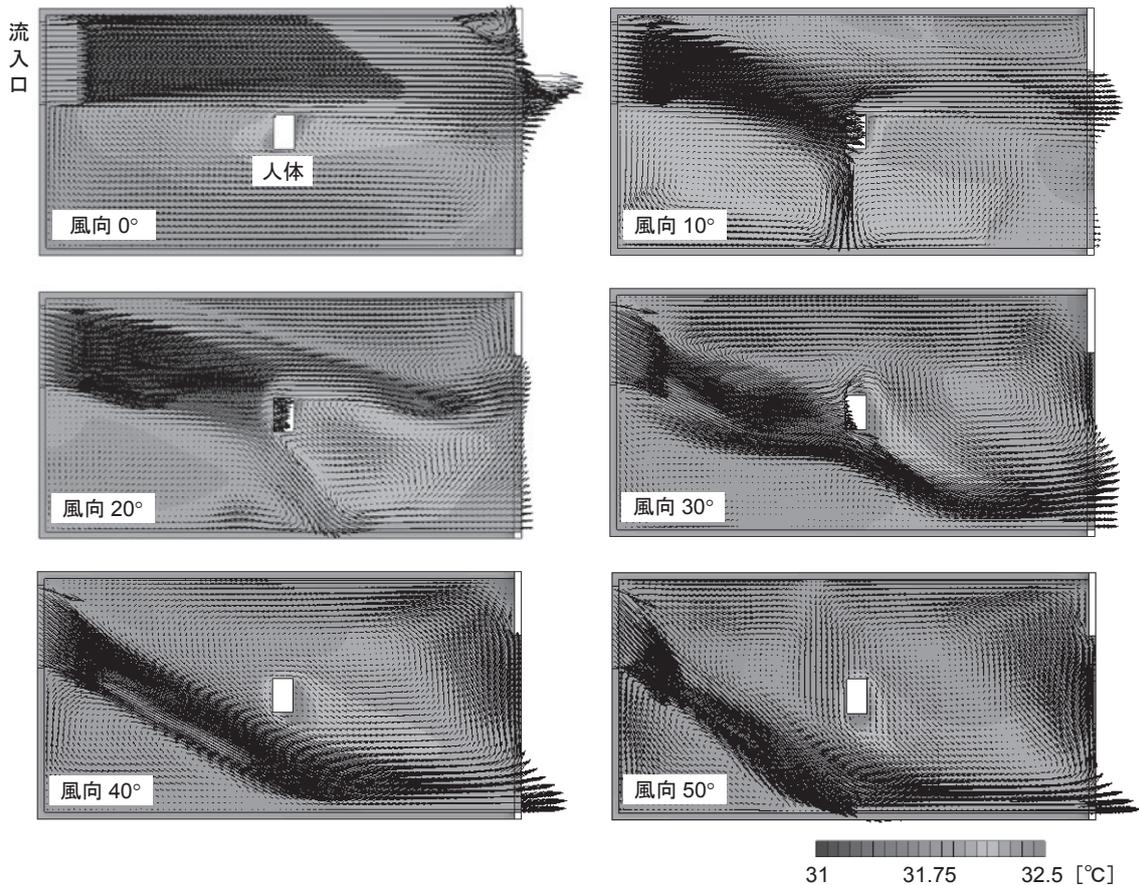


図17 室内水平断面(床上1.0 m)気流分布・温度分布(流入風速1.5 m/sの場合)

図18は、流入風向0°の場合の人体モデル各部位における対流熱伝達率と流入風速の関係を示したものである。部位毎に値も分布形状も異なっているが、概して、流入風速が1.0 m/sを超えると対流熱伝達率の値が大きくなり、大きな変化が見られている。また、流入風向0°の場合、人体モデル右側の流速が大きくなるため(図17参照)、対流熱伝達率の値も全体的に四肢左側よりも右側の方が大きくなっている。

図19は、各流入風向における人体モデルの平均対流熱伝達率(全部位の平均値)と流入風速の関係を示したものである。人体モデルに直接風があたる流入風向10°~30°の場合(図17参照)、流入風速の大きさにほぼ比例して対流熱伝達率の値が大きくなっている。人体モデル周辺で比較的静穏な気流環境が形成される流入風向0°, 40°, 50°の場合(図17参照)も、流入風速が大きくなるにつれて対流熱伝達率の値が大きくなる傾向は見られているが、流入風向10°~30°の場合に比べてその変化はずっと小さい。

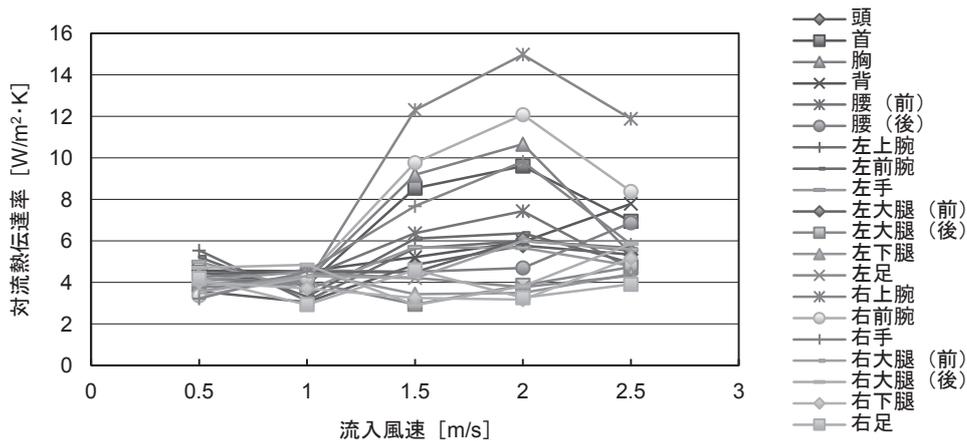


図18 人体モデル各部位における対流熱伝達率と流入風速の関係(流入風向0°の場合)

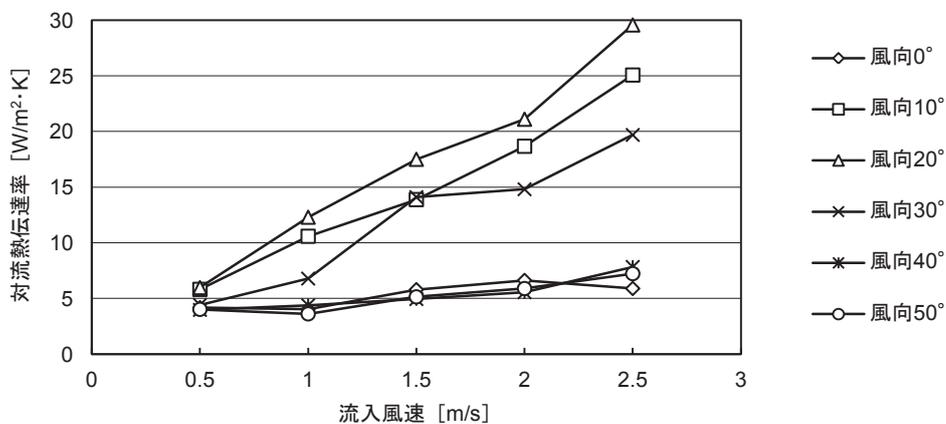


図19 人体モデルの平均対流熱伝達率と流入風速の関係

以上のように、CFDシミュレーションを用いることにより、室内気流・温熱環境の詳細な分布を解析することができ、その結果を基に人体の対流熱伝達率などを算出し、人体の放熱特性を検討することが可能となる。ただし、本研究で用いた人体モデルは、その形状はもちろんのこと、顕熱・潜熱の取り扱いも単純で簡易なモデルを使用しているため、その精緻化が今後の課題である。

## 5. まとめ

本研究では、住宅のZEH (net Zero Energy House) 化に向けた検討として、まず、ZEH実現のための手法やその構造について整理した。その一環として、太陽電池(太陽光発電)普及促進のための電気自動車(EV: Electric Vehicle)活用の検討を行い、EV普及が太陽電池普及のバッファ(太陽電池発電時の余剰電力の蓄電)として有効であることを示した。次に、ZEH化のためのパッシブな手法としての夏期自然通風の効果について、被験者実験およびCFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションによる検討を行った。特に被験者実験を通じて、自然通風により大きな室内気流速度が得られれば、高い室温(豊田市モデルハウスにおける被験者実験では33℃付近)でも良好な温熱快適性が確保できることが確認された。

## 謝辞

本研究は、名古屋大学大学院環境学研究科・奥宮正哉教授、齋藤輝幸准教授、太田早紀さん(博士前期課程2年)、芝秀輔君(同2年)、岸紗也子さん(同1年)との共同研究である。ここに記して謝意を表す。