

# ヒューマンファクターを考慮した空調制御・パーソナル空調

## Control Strategy of HVAC and Personal Air-Condition which Consider Human factor

立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科  
Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

近本 智行  
Tomoyuki CHIKAMOTO

キーワード：快適性 (Thermal Comfort)、人体生理 (Human Physiology)、温熱環境 (Thermal Environment)  
生産性 (Productivity)、環境行動変容 (Environmental Behavior Modification)、省エネ (Energy Saving)

### 1. はじめに

節電や省エネを目的として、軽装を促し冷房の設定温度を上げる (28°C) クールビズが推奨されている。2017年も例年通り 5 月 1 日にスタートした。ところが、5 月 11 日の副大臣会議で、設定温度 28°C に対し「実はかなり不快」(関環境副大臣)、「何となく目安でスタート」(盛山法務副大臣。クールビズ導入時の環境省の担当課長)などの発言があり、その後「28°Cには根拠がある」(山本環境大臣)、「科学的、法的根拠でしっかりと制度設計を行っている」(小池都知事 (クールビズ導入時の環境大臣)) と相次いで反論もあったため、にわかに注目が集まった。

そもそも 28°C 設定は、裸体状態の温熱感の上限設定温度として定められた経緯があり、単純に指標として用いる場合には快適性や作業効率低下や健康への悪影響を招く問題を有している。空気調和・衛生工学会でも、2014 年 4 月「我慢をしない省エネへー夏季オフィスの冷房に関する提言ー」報告書(空気調和・衛生工学会 温熱環境委員会 委員長：田辺新一早稲田大学教授)がまとめられた。28°C 設定の根拠と共に、28°C の意味、快適性・エネルギー消費に与える影響も議論されている。28°C は許容最低限度の上限値であり推奨値ではないこと、設定温度ではなく室温であり、場所によってはもっと高温にさらされる危険があること、設備的に無対策なまま室温緩和を行う場合、我慢を強いるだけでなく、省エネも期待できないまま、快適性や生産性を低下させている恐れのあることなどが述べられている。むやみな室温の緩和の危険性と、室温分布までも考慮する必要性が感じられる。

更に、各個人の温冷感の要求水準は異なり、もはや一律での設定温度緩和は限界を示し、各個人の状態に適し、各個人をターゲットとした個別空調制御を簡易なシステムで行うことが今後の鍵となる。

一方、従来の室内環境制御においては空調機器の単体制御が行われており、機器を中心とした技術開発が行われてきた。過度の省エネや節電要求の中で、人の快適性や生産効率を度外視した、必要以上の設定温度緩和が強いられていることも多い。機器のみの技術開発に限界が見えてきた中、快適性・知的生産性に影響を与える環境要素や人的要素などの「快適省エネヒューマンファクター」が重要技術として特定されている(資源エネルギー庁、NEDO「省エネルギー技術戦略 2016」)。建築学会でも 2013 年からヒューマンファクターに関する検討を始め、現在「ヒューマンファクターによる環境設計法小委員会」(2015~2017 年度)として活動を行っている。

ところでこれまでに快適性向上を目的として、PMV 制御や ET\*制御といった温冷感指標に基づいた制御方法が提案されているが、これらは定常状態での統計的な温冷感指標に基づく。すなわち、各個人間で異なり、また時々刻々変化する個人の温冷感を対象とした制御にはつながっていない。更に、人の周辺環境をセンシングするセンサーは、室のレイアウト変更に伴って撤去されることも多い。

これらのことから、今後求められる省エネ性と快適性を両立することのできるシステム開発のためには、ヒューマンファクターを熟知した上で、局所的な空調や、個人レベルの異なる要求に対応させることができる空調制御が必要となる。個人の温冷感はもはや統計的に導かれた平均値ではない。男女の差はもとより、個人のもつ特有の情報全てが含まれる。このためには個人の状態・要求事項をセンシングする技術、それを空調制御に活かすことのできるロジック、実際に空調を制御できる機器の開発、これらが一体となった検討が重要となる。

筆者らは、人体の生理現象や心理反応などのヒューマンファクターを重視した制御を目指し、パーソナル空調システムの開発と共に、時間変化に応じた人体のアダプティブ性能を確認してきた。特に開発中の渦輪を用いた吹出しユニット、体の局所刺激、短時間刺激を利用した制御は今後の空調システムを変える可能性がある。また、各個人の生理現象や心理状態に合わせて、周辺温度を非定常で制御することで、快適性や生産性を犠牲にすることなく、適切な省エネにつなげることのできることを示し、先導的建物で導入し、実践してきた。

本稿では、ヒューマンファクターの効果を考慮した空調システム・制御ロジックの実用化、複数の小型センサで空間分布を予測制御する検討事例を紹介する。

## 2. 一日の時変動を考慮した制御

アダプティブモデル (de Dear, R.J: ASHRAE Transactions 1998) では月平均外気温より、直近の日の外気温が室内中立温度へ大きく影響することが知られていたが、一日の外気温変化に対しての影響は確認されていなかった。

人は一日の外気温変化を日常生活で感じている。昼に外気温度が上昇することを人は経験的に知っており、外気温度が高い時間帯では室内環境に対する期待が緩和され、快適感を損なわずに設定温度そのものを緩和する。研究代表者らは、一日の中の外気温変化に対し、室内中立温度が変化することや (図2)、外気温度情報や外気を体験させることによる影響 (図3) が確認できる。

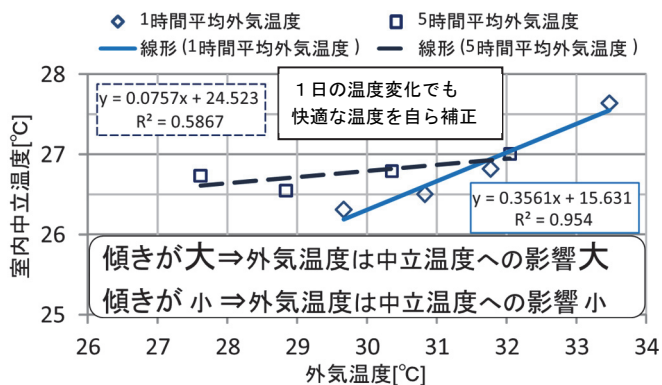


図2 平均外気温度の変化に対する被験者の中立温度の変化

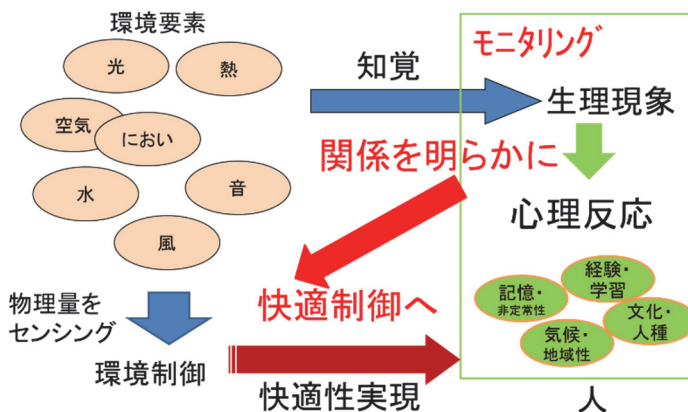


図1 室内の物理量の制御からヒューマンファクターを利用した制御へ

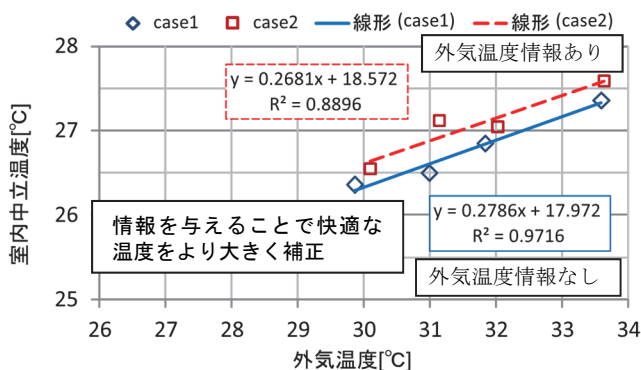


図3 外気温度情報を与えることによる被験者の中立温度の変化

これに対し、一般的に空調の設定温度は終日一定に制御されている。一方でオフィスワーカーの代謝量は出社後や昼食後をはじめ、一日の行動履歴に合わせて変化している。この代謝量の変化により、室温一定制御の空間内であっても暑い・寒いなど不快に感じることがある。そこで代謝量の変化に合わせて、不快感を和らげる方向に室温を制御することにより、オフィスワーカーにとってより快適で生産効率の高い空間を生み出せるのではないだろうか、と考えた。

そこで、一日の行動パターンに基づいて室温変動を行った被験者実験を行い、室温変動がオフィスワーカーの心理・生理に及ぼす影響を調査してみた。

実験の室温設定及び手順を図4に示す。case1を室温一定(26°C)、case2を室温変動(25~28°C)としている。まず、被験者に前室(24°C)で安静にしてもらい(15分)、次に出勤時の代謝量を再現するためにスクワット運動(5 Mets)を行った(5分)。その後、実験室にて実験準備を行いつつ、実験開始まで安静にもらった(10分)。昼休みは昼食のみで、運動は行っていない。健康な男子大学生4名を被験者とし、着衣量は0.6clo(クールビズ、長袖シャツ)である。

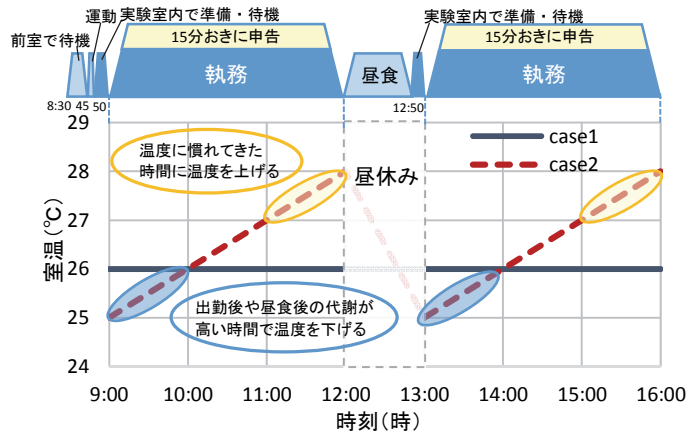


図4 実験ケースとスケジュール

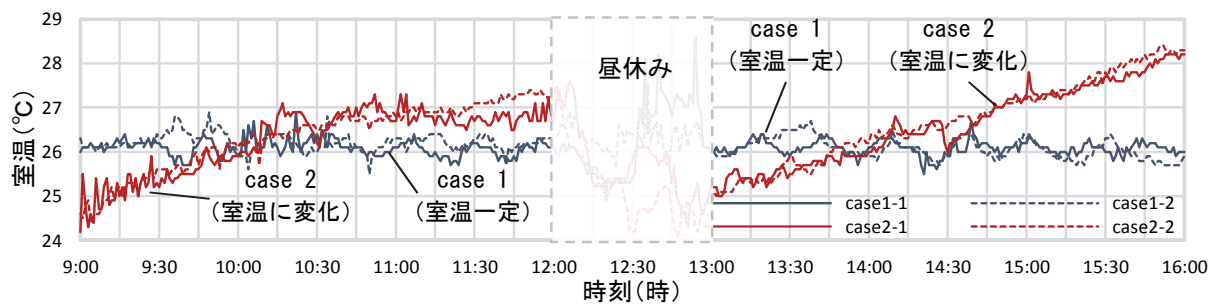


図5 室温の実測値

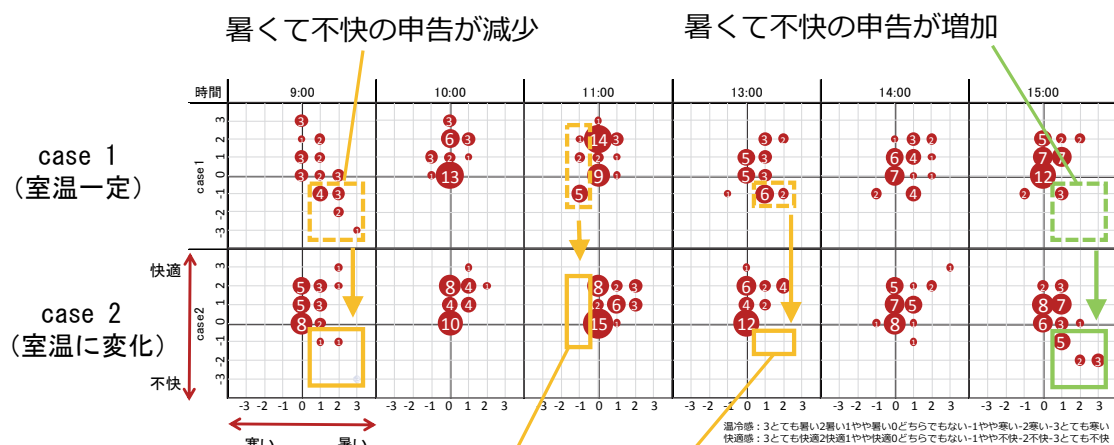


図6 1時間毎の被験者の温冷感と快適感の関係

図5に実験時の室温の実測値を示す。case1、case2共に想定通り制御できている。図6に各caseにおける1時間毎の被験者の温冷感と快適感の関係を示す。バブルの大きさ及び、バブル内の数字は申告数を表す。

9時台、13時台は暑い・不快側の申告が緩和され、9時台は出勤を模擬した運動、13時台は食事によって代謝量が大きくなるが、設定室温低下が有効であった。

一方、10時台、11時台、14時台には、室温を緩和しても許容され、室温が高いにも関わらず、温冷感や快適感で不利になっていないという結果となった。

ところで1日の外気温度変化に対する経験や情報・体感、快適と感じる中立温度を修正することがわかってきた。今回は、夕方に向けて外気温度が下降するという経験値が、15時台で無意識に中立温度を下げ、この結果、室温の上昇に伴い、暑い・不快側の申告が増加したという可能性も考えられるが、トータルとして室温変動制御が有効であることが示された。

### 3. センサ技術を利用した次世代の空調コントロール

#### 3.1 画像センサを利用した照明・空調のコントロール

現在、ネットワーク接続可能な小型で低消費電力型の実用的センサの開発が進んでいる（技術研究組合 NMEMS 技術研究機構など）。

様々なセンサ技術が空調制御を大きく変えつつある。まずは画像センサを利用した照明・空調のコントロールである。設定したエリアごとに、そこにいる人の数をカウントしてくれる在室検知センサ（画像センサ）を用いて、照明や空調の賢い制御に応用するものだ。効果を実際の事務所で検証してみた。天井からカメラで撮影しながら、そこに何人の人がいるかを1分単位で計測している。

赤外線を用いた人感センサによる照明制御が実用化されているが、動きの検知であるため、じっと作業することも多いオフィスでは、利用しにくい。ここでは、じっとしていても在室を感知し、撮影エリアに在室者がいない状態になってはじめて、エリアの照明が自動的に消灯される。また空調負荷が変化するオフィスでは、「いるか、いないか」ということより、「何人いるか」が重要となる。人の変動の大きいオフィス等では、人数の増減で室温が変動し、快適な環境を維持することは容易ではない。この制御は、人数変化から将来の環境変化を予測し、環境が悪化する前に先回りして空調の設定温度を変化させることで、省エネ性と快適性を目指す（図7）。

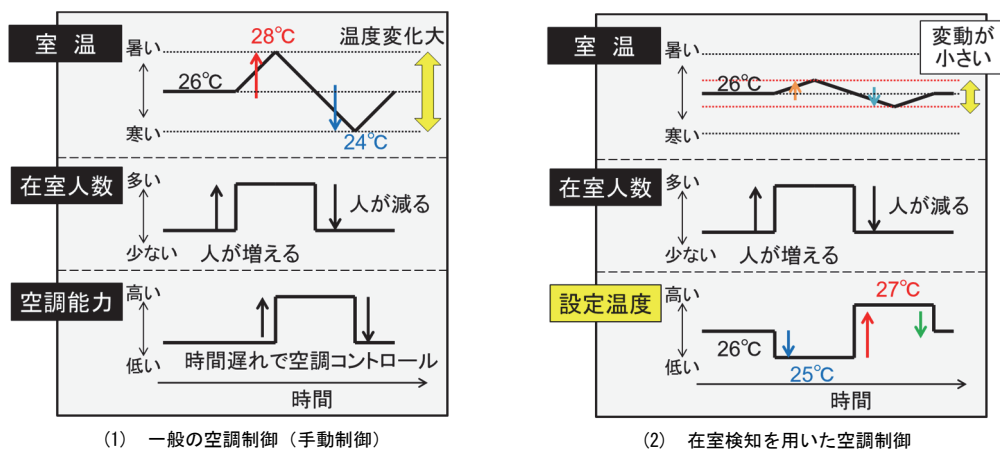


図7 空調制御の概念

まずは照明の結果である。センサによる在室検知制御時と、一般的な運用である手動運用時を比較した。図8に日毎の照明消費電力量（棒）と平均在室人数（折れ線）を示す。在室人数の差は小さいものの、在室検知時の照明電力量は手動運用時と比べて低くなっている。在室検知制御では、人数変化に伴い消灯でき、電力消費を削減できている。

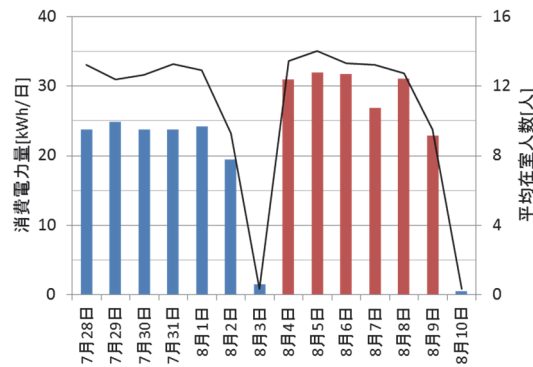


図8 日毎の照明による消費電力量比較

今度は空調の結果である。図9に在室人数と空調機（ガスヒートポンプ）の室外機ガス消費量の関係を示す。ガス消費量は在室検知時の方が少なくなっており、特に在室人数が少なくなればなるほど、大きく削減できている。結果は省略するが、温度むらや温度変化も小さくなった。

図10に快適感申告の結果を示す。在室検知時の温冷感申告は手動運用時と同等であり、快適感申告に至っては快適側の申告が多くなっている。これは在室検知制御によって室温の揺れ幅が小さくなったことで、執務者にとって快適な温度が長く維持されていたためだと考えられる。

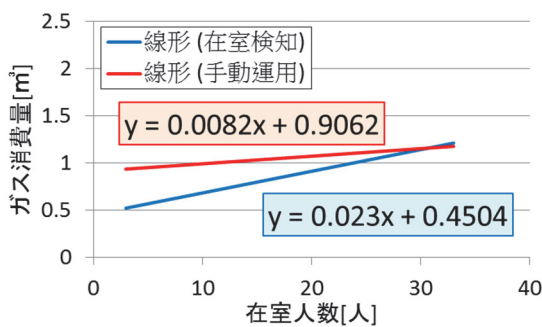


図9 在室人数による空調機ガス消費量の比較

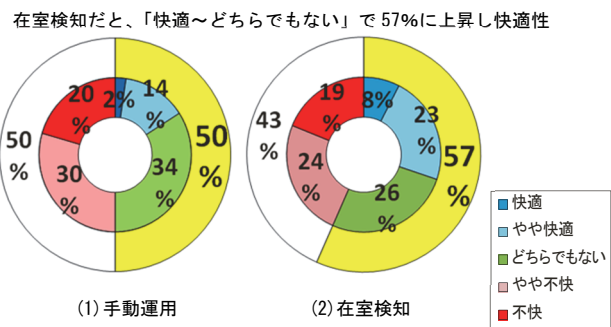


図10 在室者の快適感の比較

### 3.2 温度分布を予測しながら最適空調制御

更に別の検討例を紹介する（図11）。空調では空調機や壁、天井等の代表点1点に取り付けられた温度センサ情報に合わせて制御を行うことが一般的である。しかし、実際の室内には温度分布が生じ、絶えず状態が変化するため、温度センサが感知した温度と居住域の温度にはずれが生じる。そこで先程のエアコンのように赤外線センサで空調ターゲットに合わせた制御が検討されている。

安価で超小型のネットワーク型センサの普及はセンサそのものの設置数を増やしてくれる可能性もある。室内の複数のセンサ情報から室内全体の温度分布状況を推測することができれば、効率の良い空調制御につながると考えられる。

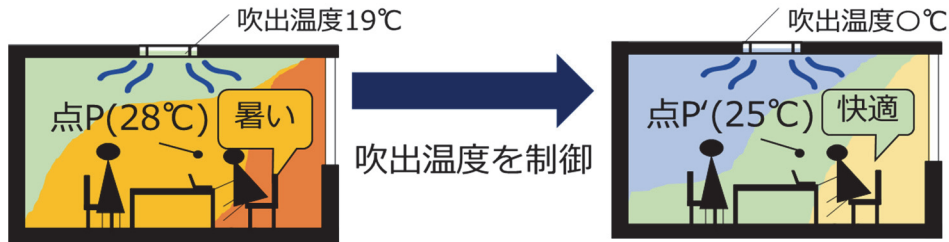


図 11 複数のセンサを使い特定のポイントの温度をターゲットに吹出気流の温度を制御

ここではまず CFD（コンピューターによる流体解析）により室内の温熱気流分布を解析した。次に換気効率指標（SVE4：対象点に対する吹出口の寄与率を評価する指標）を用いた温度分布予測モデル（図 12）により、制御対象（点 P）に A,B の各吹出気流が与える影響を評価することで、計測点 P の温度をターゲットの温度になるよう空調機の吹出温度を制御する、というものだ。結果は再度 CFD を解析することで検証した。

$$f_{PX} = \frac{SVE4 \times (\theta_i - \theta_s)}{(\theta_0 - \theta_s) \times \sigma_\theta}$$

$f_{PX}$ : P点におけるX吹出口から出た気流の影響  
 $\theta_i$ :  $f_P$ を算出する点の室温[°C]  $\theta_s$ : 吹出温度[°C]  
 $\theta_0$ : 基準状態での室温[°C]  $\sigma_\theta$ : 温度拡散係数

**換気効率指標(SVE)**  
 室内の換気特性の分布状況を評価する

**SVE4**  
 室内各所の環境形成における吹出口の寄与率を評価

**温度分布予測モデル**

$$\theta'_P = \theta_P + f_{PA}(\theta'_A - \theta_A) + f_{PB}(\theta'_B - \theta_B)$$

$\theta'_P$ : 目標温度[°C]  $\theta_P$ : 室内温度(CFD値)[°C]  
 $f_P$ : 吹出気流の室温形成への寄与率  
 $\theta'_A \cdot \theta'_B$ : 変化後の吹出温度[°C]  $\theta_A \cdot \theta_B$ : 変化前の吹出温度[°C]

図 12 温度分布の予測モデル概要  
 (特定のポイント P の温度を目標の温度にするために A と B の空調吹出温度を最適化する)

図 13 に解析結果を示す。温度分布を見ると、それなりに分布も生じている。試しに制御対象ポイント①～⑫をとる。温度分布予測モデルで示している点 P に相当する。様々な組み合わせで、制御対象ポイントを目標温度に変化させるために必要な吹出温度の算出を行った。算出結果を表 1 に示す。

その後、CFD で再解析したが、ほとんどの計測点で誤差 0.5°C 以下で制御が行っていた（結果省略）。

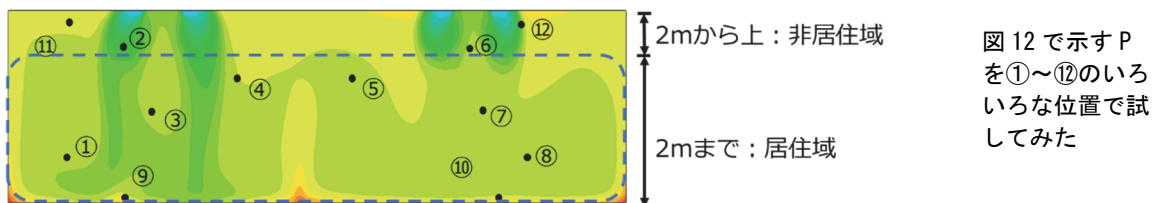


図 13 CFD による温度分布の結果と制御対象ポイントの設定位置 (①～⑫)

表1 温度分布の予測モデルによるA, Bの吹出温度の最適化結果

	計測点		$\theta'_p$ [°C]	$\theta'_0$ [°C]	Aの吹出温度[°C]	Bの吹出温度[°C]
case1	②	⑦	23	26	20.04	17.26
case2	③	⑥			18.07	17.73
case3	①	⑧			17.98	17.74
case4	④	⑤			17.14	17.98
case5	②	⑧			20.12	16.95
case6	①	⑥			17.96	17.77
case7	⑨	⑩			17.54	17.88
case8	⑪	⑫			17.23	17.57

■：計測点が非居住域

■：計測点が居住域

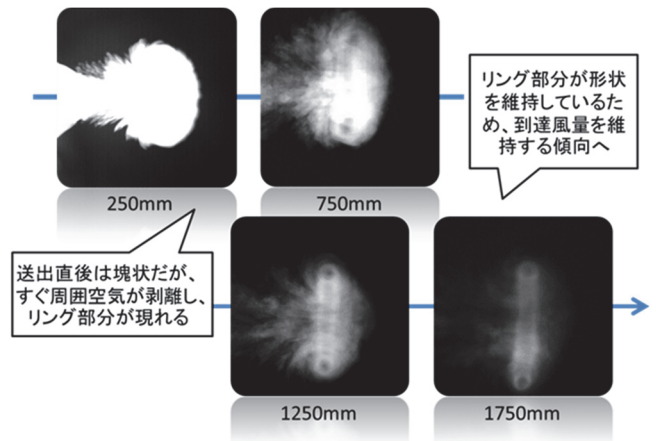
ターゲットとなる制御対象ポイントを目標温度にコントロールする最適な吹出温度を算出。この後、この吹出温度を境界条件にCFDを再計算したところ、誤差は概ね0.5度未満だった。

#### 4. 新たな気流送出方法

筆者らは、渦輪を用いたパルス気流制御（図14～15）に着目している。渦輪には直進性があり、気流の拡散性が少ないという特徴がある。その特徴を利用することで、従来の空調システムより少ない流量で執務者に熱量を効率的に届けることが期待できる。さらに、渦輪の送出間隔を変えることで各個人の快適性に適した制御を可能とする。このことにより、各個人の快適性と省エネ性の両立を目指すことができると考えられる。



図14 パルス気流概念図



渦輪は直進性が高く、また拡散性能が低いいため、ターゲットに直接冷気をあてることができる

図15 高速度カメラで撮影した渦輪の吹出し性状

現在、空調吹出しボックス内に設置する小型のユニットと、比較的遠い距離に気流を到達させる大型のユニットを開発中である。

小型ユニットの開発（図16）では、従来、ジャバラの中に冷気を挿入する際には送出口のシャッターを閉じ、渦輪を送出する際には反対に冷気を挿入する側のシャッターを閉じるという複雑な機構だったものを、空調吹出しボックス内にユニットを入れ、渦輪との間に発生する剪断力を弱めながら全体空調を行う周り吹出し気流を送出することで機構の煩雑さを回避した。このことは既存の空調システムに「ユニットのみ追加で対応可能」につながり、かつ連続送出、制御性も向上している。

大型ユニットの開発（図17）では、到達距離を延ばした上で直進性を上げる必要がある。今回、先端を絞る形状とすることにより、ユニットそのものの大きさの小型化を図ると共に圧縮率を高めている。最適な

縮流性（圧縮比）、また渦輪を回転させるライフレング（砲身の内側に刻んだ斜め形状のガイド）をユニット内表面に施し、その性能向上を図っている。

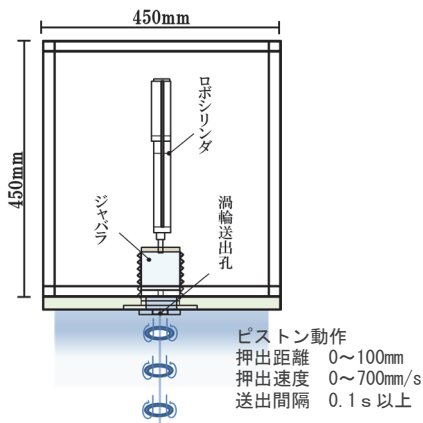


図 16 空調吹出口組み込み型  
小型ユニット



図 17 遠距離到達型大型ユニット

#### 4. まとめ

環境省では、低炭素型の行動変容を促す情報発信（ナッジ）による家庭等の自発的対策推進事業を進めている。家庭・業務・運輸部門等の CO<sub>2</sub> 排出実態に係るデータを収集・解析し、情報を個々にカスタマイズしてフィードバックし、低炭素型の行動変容を促す等、CO<sub>2</sub> 排出削減に資する行動変容のモデルを構築するという。

この環境行動変容に関しては、節電の促進と顧客困い込みの一環で、電力会社でも実践されている。『でんき家計簿』（東京電力）では、米国のエネルギー情報サービス会社 **Opower** と連携し、よく似た家庭との比較で競争意識を喚起することで、消費者の節電・省エネ行動に結びつけようとしている。わが家はきっと省エネしているだろうと思いきや、よく似た家庭と比較して使用量が超過していることや、省エネ上手な家庭ではもっと削減できていることを知り、自発的に行動させようというものである。**Opower** とは、米国のエネルギー情報局や国勢調査局が公開しているオープンデータを使用し、顧客を細かいセグメントに分け、同じ特性に分類された顧客を省エネ達成度によって1位から最下位までランキングし、ランキングを上げるための具体的な省エネ対策をアドバイスし、急成長している会社である。

単なる見える化では、複雑な情報を容易に認識できない上に、必ずしも行動に結び付かない。また、省エネアドバイスのメニューが的を外れていたり、繰り返されたりすると、その内、飽きてしまう。データの活用と、人間のヒューマンファクターを基に、実際の行動に繋げることが、これからもっと重要になる。このためには、人間の生理・心理と社会心理学双方からのアプローチが重要であろう。

活動量計の他、心拍計や GPS も備えた腕時計型の情報端末でライフログを取るのが当たり前になり、人をセンシングしながら、様々な機器が IoT でつながりつつある。ヒューマンファクターを考慮した制御が一般化してゆくのも当然の流れと考えられる。