変動微風空調システムの実用化に関する研究

- 変動微風が心理量および生理量に与える影響 -

PRACTICAL USE OF COLD AIR DISTRIBUTION SYSTEM WITH FLUCTUATING AIRFLOW

- Influence of fluctuating airflow on the quantity of psychology and physiology -

中村 弘和*, 射場本 忠彦**, 時津 晴司***

Hirokazu NAKAMURA, Tadahiko IBAMOTO and Kiyosi TOKITSU

Cold air distribution system with fluctuating airflow creates the feeling of coolness by generating airflow over the human body. The airflow is set as a fluctuating airflow within a range in which the human body does not feel uncomfortable. We confirmed from the experiments using test subjects that the sensation of comfort was maintained with a fluctuating airflow in a room. It is in a room condition that wind velocity of 0.4 to 0.8 m/s, temperature of 28 to 29 degree C 40%RH, a clothing to 0.4 to 0.6 clo and an activity level of 1.1Met.

Keywords : Fluctuating airflow, Ice storage, Cold air distribution System, Thermal sensation

変動微風, 氷蓄熱, 低温送風空調, 温熱感

1. はじめに

オフィスビルのOA化に伴う冷房負荷の増加は、電力負荷の季節間較差、日較差が拡大するという問題を生じさせている。電力負荷平準化の方策としては、蓄熱が有効であり氷蓄熱は現在の建物の熱負荷特性やスペース効率の点から急速に普及している。氷蓄熱による低温熱媒を有効活用する手法として低温送風があるが、これに変動微風^{注1)}を組み合わせ“不快感を伴わない程度の微風環境”をタスク域に形成することで、室温緩和、搬送系動力の削減等の利点を効果的に引き出すことが可能となる。また、室内が高温低湿度環境に設定されるため、発汗状態の外来者と不汗状態の長時間在室者の双方に快適な環境を提供できるものと考えられる。そこで、本研究では変動微風が人体に与える影響について検討した。

この分野については、これまでに多くの研究がなされてきた。窪田ら¹⁾は整流よりも噴流の方が、刺激が大きく爽やかな心理的効果を有し、乱れが強くなると等価に感じる整流流速も大きくなると報告している。桑沢ら²⁾は定常風に比べ変動風は平均皮膚温が低下しにくく、心理的冷却効果が高いと報告している。久保ら³⁾は変動気流暴露時に風向が変動する場合について検討し、より広範囲の風向変動が快適な気流と感じると報告している。この他にも多数の研究^{4)~12)}がなされているが、その多くは変動気流の物理的・心理的冷却効果を検討したものであり、また、在室者の前面もしくは側面から暴露されるパーソナル空調を想定しているものが多い。そのため、天井からの吹出し方式における暴露風速、変動周期、気温・湿度が人体に与える影響については不明な点が多く“不快感を伴わない程度の微風環境”についても曖昧である。

本研究では、変動微風が人体に与える影響を把握し、許容しうる（不快感を伴わない）環境を明確にすることを目的に被験者実験による検討を行った。最初の検討として、非定常および定常状態の人体に対する心理的・生理的影響の把握を試みるためアンケート申告、皮膚表面温度、発汗量、脳波等について人工気候室を用いて調査した。次に、“不快感を伴わない程度の微風環境^{注2)}”を明確にするため、長時間在室による影響、室温緩和の許容範囲について実用化レベルで検討した。検討フローを図1に示す。

変動微風空調システムは、高い省エネルギー性に重きを置き、快適性に関しては人間が許容しうるレベルの確保を目標としている。従って、高い快適性や空調品質が求められる空間（病院やホテルの客室）への適用ではなく、在室者が時々離席するような空間や外部からの入室者が多い空間（銀行や空港・駅のロビー、外勤者の多いオフィスビル、店舗など）を想定している。

図1 検討フロー図

本稿は既発表論文(1)~(4)を加筆・修正したものである。

* 東京電機大学大学院建築・建設環境工学専攻
大学院生・修士(工学)

** 東京電機大学工学部建築学科 教授・工博

*** 東京電力株式会社技術開発研究所 修士(工学)

Graduate Student, Civil and Building Environmental Engineering, Tokyo Denki University,
M. Eng.Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Denki University, Dr. Eng.
Institute of Technology, The Tokyo Electric Power Company, Incorporated, M. Eng.

2. 非定常および定常状態での心理的・生理的影響の把握

人体に対する変動微風および高温低湿度環境の影響を把握するため、人工気候室を使用した被験者実験を2001年8月に行った。本実験では、非定常状態および定常状態の心理的・生理的な影響について検討した。以下、本実験をSTS実験と呼称する(Short Time Stay)

2.1 実験概要

(1) **実験室概要** 人工気候室(図2, 東京電機大学内に設置)は、夏季の蒸暑環境(35℃80%RH程度)を想定した前室と、変動微風空調を行う主室に別れており、主室内天井に設置された4つの吹出口はダンパの開閉により2つずつ交互に吹き出すシステムとしている。

(2) **実験方法** 実験スケジュールを図3に示す。夏季の蒸暑環境からの入室を想定した前室において20分間の歩行運動を実施後、発汗状態で主室に入る。実験時間は、120分間とし椅座安静状態(1.0Met)を保つ。着衣量は、下着以外は統一したものを配布し女性0.43clo(半袖ブラウス, スカート, ストッキング), 男性0.45clo(半袖シャツ, 長ズボン, 靴下)とした。被験者概要を表1に示す。

(3) **調査項目** アンケートによる温熱感, 快適感申告を開始後0~20分までは5分間隔で行い, その後は10分間隔で計15回実施した。また、生理量として皮膚表面温度, 体重減少量を120分間(1秒間隔)測定した。皮膚表面温度は、Robertoの3点法(胸, 肩, 大腿)を参考として、手甲を加えた4点にT熱電対を貼付し計測した。体重減少量は、精密な体重計(精度1g/100kg)を用いて測定し、体重減少量を発汗量とした。この発汗量には、不感蒸泄量や呼吸による潜熱損失量を含んでいるが、これらはごく微量であるため無視して扱うこととした。

(4) **実験ケース** 実験ケースを表2に示す。被験者に対する暴露風速^{注3)}0.20、0.45m/sの2つに変動周期^{注4)}10、20、30秒を組み合わせた6ケースと、比較のために一般空調設定ケース^{注5)}を加えた計7ケースとした。変動微風ケースのアンビエント域の温度・湿度は28℃30%RHとなるよう模擬負荷を与え調整している(タスク域は成り行き)。実験中のタスク域の気温(床上1, 100mm)を図4に示す。同一変動周期内では気温の差異は見られず、0.20m/s(case1, 2, 3)で平均27.6℃、0.45m/s(case4, 5, 6)で平均26.9℃であった。風速波形の1例として0.20m/s, 0.45m/sの変動周期20秒を図5に示す。最大風速が概ね設定風速となるよう調整しているため、0.45m/sのケースでも平均風速は0.21m/s(乱れの強さ65%)となる^{注6)}。

2.2 アンケート申告結果

図6, 7は被験者全員の申告割合を示したものである。主室入室後0~15分を非定常状態、100~120分間を定常状態と呼称する。統計解析には、危険率5%の分散分析を用いた。また、同法で有意差が出たものについては、FisherのLSD法による多重比較を行った(生理量も同様の解析による)。p値は危険率を表している。

(1) **空気温冷感**(図6) 非定常状態の場合、涼しい側申告は0.20m/s(case1, 2, 3)が7割に対し、0.45m/s(case4, 5, 6)は9割以上を占めており、風速が強い方が有意に高かった($p<0.016$)。しかし、同風速での周期条件間に有意差は見られなかった。また、一般空調と0.20m/s, 0.45m/sを比較すると、どちらの風速も冷涼感が有意に高かった($p<0.01$)。定常状態に至るとケースによっては寒い側の申告も表れる。0.45m/sは全員が「寒い~やや涼しい」の申告をしており、非定常状態と同様に0.20m/sよりも有意に冷涼感が高かった

図2 人工気候室平面図 (STS実験)

図3 実験スケジュール (STS実験)

表1 被験者概要 (STS実験) ※平均値±S.D.

性別	年齢[歳]	身長[cm]	体重[kg]	実人数[人]	延べ人数[人]	着衣量[clo]
女性	23.0±1.2	159.8±1.8	45.3±1.3	4	28	0.43
男性	22.5±0.5	168.5±3.5	58.0±0.0	4	28	0.45

表2 実験ケース (STS実験)

実験ケース	暴露最大風速	変動周期	アンビエント域 設定温度・湿度	吹出し温度
case1	0.20[m/s]	周期 10 秒	28℃30%RH (タスク域は成り行き)	8[℃]
case2		周期 20 秒		
case3		周期 30 秒		
case4	0.45[m/s]	周期 10 秒		
case5		周期 20 秒		
case6		周期 30 秒		
case7	一般空調(暴露気流なし・変動なし)		26℃50%RH

図4 実験中のタスク域の気温 (STS実験)

図5 風速0.20m/s, 0.45m/sの実測波形 (STS実験)

($p<0.01$)。また、非定常状態では周期条件に有意差は見られなかったが、定常状態では周期が長い方が冷涼感が有意に高かった(10s-30s: $p<0.01$, 20s-30s: $p<0.01$)。10sと20sの2条件間に有意差は見られなかった。田中ら⁷⁾は、気流速度に着目した検討の中で、暴露風速の振幅が同じ場合、周期は短い方が温冷感が低いと報告しており、STS実験の結果とは異なる。田中らの実験は被験者の全身に前面から暴露したものであり、STS実験とは温冷感に与える影響が大きく異なるものと予想される。また、設定している周期が

長い(周期15秒と60秒あるいは60秒と120秒の比較)ことも影響している可能性がある。

非定常状態と定常状態を比較すると有意差が見られた($p<0.01$)。多重比較の結果、0.20m/sの場合、周期30sに有意差は見られなかったが、他の2周期は中立側へ有意に移行した(10s: $p<0.01$, 20s: $p<0.033$)。0.45m/sは、全周期で寒い側へ有意に移行した($p<0.01$)。なお、一般空調も寒い側へ有意に移行している($p<0.01$)。以上のことから、非定常状態の場合、変動微風は一般空調よりも冷涼感が高いものの、風速が強いと定常状態では寒くなることを確認した。一方、変動周期による影響は非定常状態では小さく、定常状態では大きかった。

(2) 温熱的快適感(図7) 非定常状態の場合、全ケースで高い快適感を示しているが、風速条件、周期条件による有意差は見られなかった。しかし、一般空調と比較すると両風速とも有意に快適感が高い($p<0.01$)。定常状態に至ると0.20m/sでは、「快適～どちらでもない」の申告が8割以上を占めるのに対し、0.45m/sでは、不快側の申告が4～5割と快適側申告の約2倍となっており不快感が有意に高かった($p<0.01$)。これは、空気温冷感申告で有意に冷涼感が高かったことから、寒さを感じていることが原因と判断できる。また、周期条件についても有意差が見られた($p<0.014$)。多重比較の結果、20sは他よりも有意に快適感が高かった(10s-20s: $p<0.039$, 20s-30s: $p<0.01$)。10sと30sの2条件間に有意差は見られなかった。このことから、定常状態の人体には周期20sが適していると思われる。また、非定常状態と定常状態を比較すると0.20m/sに有意差は見られなかったが、0.45m/sでは不快側へ有意に移行した($p<0.01$)。0.45m/sは周期条件でも有意差が見られ($p<0.025$)、多重比較の結果、30sは10sよりも不快感が有意に高く($p<0.01$)、20sよりも有意に高い傾向が見られた($p<0.1$)。

2.3 生理量測定結果

(1) 皮膚表面温度降下量(図8) 皮膚表面温度降下量とは、実験室入室後10分間の皮膚表面温度の最大値と最小値の温度差 Δt を、その温度降下に要した時間 S で除したものである。 $\Delta t/S$ が大きいほど被験者が得る爽快感が大きく、早く定常状態に達するものと考えられる。風速、周期の2要因で分散分析を行った結果、手甲については有意差は見られなかったが、他の部位は風速が強くなると降下量が有意に大きかった(胸: $p<0.01$, 肩: $p<0.039$, 大腿: $p<0.01$)。しかし、周期条件間に有意差は見られなかった。また、一般空調と比較すると胸、肩は0.20m/sの場合、降下量が有意に小さい(各 $p<0.018$, $p<0.045$)ことから、0.20m/s程度の気流では胸や肩など衣服で覆われた部位に関しては、大きな影響を与えないものと思われる。一方、大腿は、0.20m/sでは有意差は見られなかったが、0.45m/sでは有意に降下量が大きい($p<0.01$)。これは、被験者が椅座状態のため、大腿に気流が当たり易いことが原因ではないかと思われる。久保ら¹¹⁾は、気流(等温定常)の暴露面積が人体(定常状態)に与える影響を調査し、上半身への暴露は心理的影響が大きく、全身暴露に近い温冷感、快適感が得られるものの、下半身に暴露されることはあまり快適とは言えないと報告している。一方、桑沢ら²⁾は定常風に比べ変動風は平均皮膚温が低下しにくいと報告していることから、下半身へ暴露されるような状況であっても、暴露風速を調節することで不快には至らないものと考えられる。

図6 空気温冷感申告割合 (STS実験)

図7 温熱的快適感申告割合 (STS実験)

図8 入室後0～10分の皮膚表面温度降下量 (STS実験)

図9 非定常状態および定常状態の体重減少量 (STS実験)

(2) 体重減少量(図9) 定常状態に比べて非定常状態の体重減少量(汗の蒸散)は非常に大きいことが分かる。開始後0～5分間の体重減少量を風速、周期の2要因で分散分析した結果、風速が強い方が有意に大きかった($p<0.01$)。変動周期については、長い方が大きくなる傾向が見られるが、有意差は見られなかった。また、一般空調と比較すると変動微風ケースは有意に大きく、0.20m/sで1.1～1.3倍($p<0.013$)、0.45m/sで1.3～1.5倍($p<0.01$)となった。これは、一般空調よりも相対湿度が20%低いことに加え、変動微風により

物質熱伝達率が増大し、汗の蒸散作用を促進させたためと考えられる。定常状態の体重減少量に有意差は見られなかった。なお、定常状態での体重減少は、ほとんどが不感蒸泄によるものと考えられる。

3. 脳波等の生理量による変動微風評価

STS実験により変動微風が人体に与える心理的・生理的影響について把握できたが、人体にどの程度の負荷を与えているかは不明である。そこで変動微風が人間のリラックス状況に与える影響を検討するため、生理学的なデータとして脳波 (EEG)・心電図 (BPM)・皮膚電気伝導 (GSR) についての調査を2004年11月に行った。また、同時に調査する心理量との相関について検討を行う。本実験は、専門的な知識および装置が必要となるため、専門家^{注8)}の協力を得て行った。以下、本実験をEEG実験と呼称する (Electroencephalogram)。

3.1 実験概要

(1) 実験室概要 実験状況を図10に示す。変動微風は、被験者の周囲に簡易な木枠を組むことで頭上から暴露し、熱源としてスポットクーラーを用いた。室温は、室内のパッケージエアコンと床暖マットにより一定を保つよう調整している。

(2) 実験方法 実験スケジュールを図11に示す。1case 当たりの実験時間は、3分測定、10分椅座安静、3分測定の計16分で行った。椅座安静状態の10分間は、被験者が気流環境に慣れるまでに要する時間として割り当てた^{注7)}。着衣の統一は行わなかったが、気流を感じ易いよう半袖シャツを指定した。男女共に長ズボン、靴下、靴を着用しており、着衣量は0.5clo程度と推定される。

(3) 調査項目 生理量として、脳波・BPM・GSRを測定した。本実験で測定した生理量について測定方法^{13)~15)}を表3に示す。また、各ケース終了時に温熱感等に関するアンケート申告も実施した。

(4) 実験ケース 実験ケースを表4に示す。caseA (暴露気流なし) を基準として、風速別に4ケースを暴露し有意な差が見られるか検討した。緊張等による脳波の乱れを防ぐため、被験者は脳波測定に慣れている大学生年齢の6名とした。なお、実験は(都合上)11月上旬に行ったため、夏季の実験ケースとは室内の設定が異なる。

3.2 実験結果

(1) 脳波, BPM, GSR (図12) 図12は被験者別の脳波, BPM, GSRの相対値 (caseAの各生理量の測定値を1とした時の、暴露後の測定値を相対化したもの)を示したものである^{注8)}。脳波については、リラックスの指標に用いられる α 1波¹³⁾の量を比較し相対値を求めた。相対値が増加すればリラックスしており、減少すればストレスと判断できる。BPMについても平均心拍数を比較し相対値を求めた。人間はリラックスした状態では心拍数が低下する¹³⁾ため、脳波とは逆に相対値の減少はリラックス、増加はストレスと判断できる。GSRは、平均GSR値を比較し相対値を求めた。温熱性発汗とは異なり、精神性発汗は緊張や興奮などが影響し、リラックスした状態では発汗が低下する¹³⁾ため、相対値の減少はリラックス、増加はストレスと判断できる。図12より、脳波については α 1波の増加が見られるケースも存在するが、各被験者の反応は個人差が大きく一定の傾向は見られない。本実験で測定した生理量の場合、変動微風による影響よりも別の様々な要因 (雑音・考え事・疲労・集中力の途切れ) によって生じる影響の方が大きいことが考えられる。BPMについても同様である。GSRでは、0.4m/sの暴露でストレスと判断できる状

図10 実験状況 (EEG実験)

図11 実験スケジュール (EEG実験)

表3 本実験で測定した生理量 (EEG実験)

脳波 (EEG)	医療用の脳波計を用い、19箇所を脳波測定を行った。測定電極は国際電極10-20法を用いた。これは、頭部を前後左右に10分割し、頭頂を中心としてそれぞれ20% - 10% - 20%に分割した位置に電極を配置する。本実験では、人間がリラックスした時に現れる α 1波 (8~10Hz)の頭全体に現れる度合いから評価した。
心電図 (BPM)	本実験では、3電極を用いたモニター心電図により測定し、心電図より心拍数を算出した。人間はリラックスすると心拍数が低下する。
皮膚電気伝導 (GSR)	皮膚電気活動の測定法の一つで、掌の発汗 (精神性発汗) を電気的にとらえる。精神性発汗は、緊張や興奮などと関係するためストレス状態やリラックス状態を判断できる。計測には、人差し指と薬指に電極を付け、電極間の電位差を直接測定する方法を用いた。

表4 実験ケース (EEG実験)

case	暴露最大風速	変動周期	アンビエント域 空気温度	吹出し温度	作業量 着衣量	タスク域の 環境測定結果
caseA	暴露気流なし (平均0.1m/s以下)	20[sec] (10s-10s)	26[°C]	10~12 [°C]	1.0[Met] (椅座安静)	26.2°C±0.1
caseB	0.4[m/s]					25.3°C±0.3
caseC	0.6[m/s]					25.1°C±0.6
caseD	0.8[m/s]					24.9°C±0.5
caseE	1.0[m/s]					24.9°C±0.4

※暴露最大風速とは、床上1,100mmで計測した時の最大値の事。

(平均値±S.D.)

図12 被験者別の脳波, BPM, GSRの相対値 (EEG実験)

況が見られる。しかし、分散分析の結果 (危険率5%)、いずれの生理量においても統計上の有意差が見られる暴露風速はなかった。

(2) 快適感申告 (図13) 図13に全被験者のcaseAの快適感申告の

平均値を1とした時の他ケースの快適感申告の相対値および各生理量の全被験者の平均相対値を示す。その結果、快適感は0.4m/sが最も高く、1.0m/sが最も低かった。しかし、分散分析（危険率5%）の結果、風速条件間に有意な差は見られなかった。前述した通り、生理量についても有意差は見られなかったことから1.0m/s以下程度の変動微風は人体に大きな負荷を与えるほどのものではないと言える。また、今回測定した脳波、BPM、GSRによって、リラックス状況に生じる差異から本実験範囲の変動微風を評価する事は困難であると思われる。

4. 長時間在室が許容度合いに与える影響の把握

STS実験およびEEG実験により、変動微風の人体に対する効果および影響を実験室レベルでは把握できた。本実験は、実用化レベルの被験者実験として活動量や着衣量に幅を持たせるなど実生活に近い形で実施した。また、長時間在室を想定した実験の多くは、長くても3時間程度であることから、本実験では28℃30%RHで8時間（昼食休憩1時間含む）暴露した場合の、温熱感および許容度合いに与える影響を調査した（2004年8月に実施）。以下、本実験をLTS実験と呼称する（Long Time Stay）

4.1 実験概要

(1) **実験室概要** 実験室の詳細を図14に示す。本室は、東京電機大学内建物の一室（120m²）に変動微風空調を導入したものである。室内には12個の吹出口（市販角アネモを斜め下方向に吹くよう改良）があり、電動シャッターの開閉により吹出口1, 2, 3, 7, 8, 9と吹出口4, 5, 6, 10, 11, 12の6個ずつを交互に吹出すシステムとしている。気温、湿度、風速は吹出口5の周辺で計測したものを代表としている。

(2) **実験方法** 実験スケジュールを図15に示す。被験者は、夏季の蒸暑環境からの入室を想定し、高温多湿空間（35℃80%RH程度）で20分間待機した後、発汗状態で実験室に入る。実験時間は、オフィスでの執務を想定し10時～18時の480分間（昼食休憩は13～14時）とした。被験者の行動は標準的なオフィスでの作業範囲内（概ね1.1met程度）で自由とした。着衣についても標準的な夏服の範囲内（0.4～0.6clo）であれば自由としたが、気流感に影響を与えるため長袖シャツ、ノースリーブ等は禁止とし、半袖シャツを指定した。また、女性の場合はスカート、ズボンのいずれか自由とし、男性の半ズボンは禁止した。なお、極端に寒さを申告した被験者のみ長袖シャツ（0.2clo程度）の着用を許可した。被験者概要を表5に示す。

(3) **調査項目** アンケートによる温熱感、快適感申告を開始後0～20分までは5分間隔で行い、その後は10分後、30分後とし60分経過後からは60分間隔で計14回実施した。

(4) **実験ケース** 実験ケースを表6に示す。暴露風速0.4、0.6、0.8m/sの3ケース（変動周期20秒）に、比較のための一般空調設定ケースを加えた計4ケースで行った。変動微風ケースのアンビエント域の温度・湿度は、28℃30%RHとなるよう模擬負荷を与え調整している（タスク域は成り行き）。実験中のアンビエント域とタスク域の温度・湿度（床上1, 100mm）を図16に示す。タスク域では、暴露風速が強くなるに伴い気温が低下することが分かる。一般空調とほぼ同じ気温に至るのは、case3（0.8m/s）である。風速波形を図17に示す。STS実験と同様に最大風速が概ね設定風速となるよう調整しているため、case3（0.8m/s）でも平均風速は0.38m/s（乱れの強

図13 全被験者の脳波、BPM、GSR、快適感の平均相対値（EEG実験）

図14 実験室詳細平面図（LTS実験）

図15 実験スケジュール（LTS実験）

表5 被験者概要（LTS実験） ※平均値±S.D.

性別	年齢	身長[cm]	体重[kg]	実人数[人]	延べ人数[人]
女性	18.8±1.2	160.0±4.3	52.3±3.7	5	53
男性	22.4±1.5	169.9±6.3	59.9±6.1	10	75

表6 実験ケース（LTS実験）

case	暴露最大風速	変動周期	アンビエント域 設定温度・湿度	吹出し温度
case1	0.4[m/s]	周期 20 秒 (10s-10s)	28℃30%RH [タスク域は成り行き]	7～10 [℃]
case2	0.6[m/s]			
case3	0.8[m/s]			
case4	一般空調(暴露気流なし・変動なし) (市販のパッケージエアコンを使用)		26℃50%RH	-

※暴露最大風速とは、床上1,100mmで計測した時の最大値のこと。

さ73%)となる。また、風速が強くなるに伴い、乱れの強さが大きくなる傾向が見られる^{注6)}。

4.2 アンケート申告結果

図18, 19は被験者全員の申告割合を示したものである。実験開始後0～15分を非定常状態、420～480分を定常状態と呼称する。統計解析には、STS実験と同様に分散分析を用いた。

(1) **空気温冷感**（図18） 蒸暑環境での待機により発汗状態のため、汗の蒸散作用が促進され非定常状態では全ケース涼しい側の申告が

大半を占めた。暴露風速が強くなると涼しい側の申告が増加する傾向が見られるが、非定常状態における風速条件間に有意差は見られなかった。また、定常状態における風速条件間にも有意差は見られなかった。一般空調との比較でも非定常、定常ともに有意差は見られなかった。非定常状態と定常状態を比較すると、全ての風速条件で「どちらでもない」の申告が増加し、有意に中立温感へ移行した ($0.4\text{m/s}: p<0.030$, $0.6\text{m/s}: p<0.020$, $0.8\text{m/s}: p<0.021$)。以上のことから、 $0.4\sim 0.8\text{m/s}$ の変動微風が温冷感に与える影響は非定常状態および定常状態のどちらにおいても一般空調と同程度であると言える。定常状態の場合、STS 実験では風速が強くなると寒くなるとの結果を得たが、本実験の風速条件に有意差は見られなかった。 0.8m/s および一般空調ケースの場合、寒さを訴えた被験者には上着 (0.2clo 程度) の着用を許可したため、温冷感が中立側へ移行したものと考えられる。

(2) 温熱的快適感 (図 19) 非定常状態では全ケースで快適側の申告が 8 割を占める結果となり、風速条件間に有意差は見られなかった。定常状態における風速条件間には、有意差が見られた ($p<0.023$)。多重比較の結果、 0.4m/s と比較して 0.6m/s は有意に快適感が高く ($p<0.043$)、 0.8m/s と比較しても有意に高い傾向であった ($p<0.1$)。このことから、 0.6m/s の変動微風は $28^\circ\text{C}30\%\text{RH}$ の環境下で高い快適感を持続できると言える。一般空調と変動微風ケースの比較をすると、非定常状態では有意差は見られないが、定常状態では一般空調の快適感が有意に低かった ($0.4\text{m/s}: p<0.1$, $0.6\text{m/s}: p<0.01$, $0.8\text{m/s}: p<0.045$)。また、非定常状態と定常状態を比較すると、変動微風ケースには有意差は見られなかったが、一般空調は有意に快適感が低かった ($p<0.01$)。このことは、一般空調に比べて変動微風空調は、長時間在室でも快適感を損なう可能性が低いことを意味している。中原ら¹²⁾は、パーソナル空調による変動風暴露実験で、かなりの長時間滞在でも人体に悪影響を及ぼすことはないと報告している。ただし、この実験の暴露時間は 90 分である。

5. 室温緩和の許容範囲の把握

STS 実験, EEG 実験, LTS 実験の結果、非定常状態および定常状態の人体に与える効果や影響、不快感を伴わない程度の暴露風速・変動周期について概ね把握できた。しかし、省エネルギー性に大きく影響を与える要因である、室温緩和の許容範囲については不明である。アンビエント域の設定温度が 28°C 以上で変動微風を暴露した場合の温熱感に与える影響を調査するため、被験者実験を 2005 年 8 月に行った。以下、本実験を SK 実験と呼称する (Sitsuen Kanwa)

5.1 実験概要

- (1) 実験室概要 LTS 実験と同室 (図 14) を用いて行った。
- (2) 実験方法 実験スケジュールを図 20 に示す。1 ケース 180 分間で、1 日 2 ケース実施した。非定常状態の人体に対する影響は STS 実験および LTS 実験により把握したため、本実験では蒸暑環境での待機は行わず、実験空間内で 20 分程度待機した後、代謝が安定したと思われる状態で実験開始とした。被験者の行動、着衣は LTS 実験と同条件である。被験者概要を表 7 に示す。
- (3) 調査項目 アンケートによる温熱感、快適感申告を開始後 0～20 分までは 5 分間隔で行い、その後は 10 分後、30 分後とし 60 分経過後は 60 分間隔で計 9 回実施した。

図 16 実験中の温度・湿度 (LTS 実験)

図 17 風速 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s の実測波形 (LTS 実験)

図 18 空気温冷感申告割合 (LTS 実験)

図 19 温熱的快適感申告割合 (LTS 実験)

図 20 実験スケジュール (SK 実験)

(4) 実験ケース 実験ケースを表8に示す。室温 28, 29, 30℃ (各 40%RH) の3ケースに、暴露風速 0.4, 0.6, 0.8m/s を組み合わせた6ケースと、比較のために一般空調設定ケースを加えた計7ケースで行った。変動パターンは、LTS実験と同様の変動周期20秒とした。図21に、実験中のアンビエント域とタスク域の温湿度(床上1,100mm)を示す。タスク域では暴露風速が強くなるのに伴い気温が低下するものの、アンビエント域は概ね設定温湿度を保っている。風速波形および特性は、LTS実験(図17)と同様である^{注6)}。

5.2 アンケート申告結果

図22～24は、実験終了直前時(実験開始から180分経過)における被験者全員の申告割合を示したものである。本実験は、ケースにより被験者数にばらつきがあり、参加した被験者も一部異なるため、統計解析にはノンパラメトリック法のKruskal-Wallis検定を用いた。また、同検定方法により有意差が出たものについてはMann-WhitneyのU検定(以下、単にU検定と記す)を行った。

(1) 空気温冷感(図22) 28℃設定のケースに比べて、29℃設定では暖かい側の申告割合が高い。30℃設定では8割近くが暖かい側の申告をしている。風速条件における検定の結果、0.6m/s条件では、28℃に比べて29℃は有意に暖かい側の申告割合が高かった($p<0.030$)。0.8m/s条件では、室温が高くなると有意に暖かい側へ移行した($p<0.01$)。U検定の結果、0.8m/sの場合、30℃条件は他の2条件よりも有意に暖かい側の申告割合が高かった(28℃-30℃: $p<0.01$, 29℃-30℃: $p<0.011$)。しかし、0.6m/sで有意差が見られた28℃-29℃は、0.8m/sでは有意差は見られなかった。このことから、暴露風速を強くすることで室温緩和が温冷感に与える影響を小さくできると言える。また、同じ設定気温における風速条件間に有意差は見られなかった。0.4～0.8m/sの気流が温冷感に与える影響は、室温1℃の緩和に比べて小さいと考えられる。

(2) 温熱的快適感(図23) 全ケースで、快適側の申告割合が高い。空気温冷感では29℃、30℃の場合、暖かい側の申告割合が高かったが、不快に感じるほどではないことが分かる。しかし、室温が高くなると不快側の申告が増す傾向が見られ、30℃では快適申告は他よりも格段に低い。風速条件における検定の結果、0.6m/s条件では、28℃に比べて29℃の快適感には有意に低い傾向が見られた($p<0.1$)。0.8m/s条件では、室温が高くなると不快側へ有意に移行した($p<0.01$)。U検定の結果、0.8m/sの場合、30℃条件は他の2条件よりも快適感が有意に低かった(28℃-30℃: $p<0.01$, 29℃-30℃: $p<0.1$)。28℃と29℃に有意差は見られなかった。また、同じ設定気温における風速条件間にも有意差は見られなかった。全体的に空気温冷感とよく似た傾向を示していることがわかる。30℃設定は快適感が最も低いものの、それでも快適側の申告が7割以上を占めており、変動微風による室温緩和が期待できる。30℃40%RH環境については、前述した中原ら¹²⁾の実験でも中立温感を維持できると報告している。また、同報告では30℃60%RHでは中立を維持できなかったことから、アンビエント域の室温緩和と条件の限界は30℃40%RHであることを示唆している。

(3) 許容度合い(図24) 変動微風ケースの許容できない側の申告(1割前後)は、設定気温が同じ場合、暴露風速が強くなると減少していく傾向が見られるが有意差は見られなかった。また、暴露風速が同じ場合は、室温が上がると許容できる側の申告が減少する。

表7 被験者概要 (SK実験) ※平均値±S.D.

性別	年齢[歳]	身長[cm]	体重[kg]	実人数[人]	延べ人数[人]
女性	20.7±1.5	159.4±4.5	47.7±5.2	16	96
男性	21.7±1.8	171.2±3.7	62.5±5.1	11	150

表8 実験ケース (SK実験)

		アンビエント域 設定温度・湿度		
		28℃40%RH	29℃40%RH	30℃40%RH
暴露最大風速	0.4m/s	case1 (Female:3 Male:8)	—	—
	0.6m/s	case2 (Female:27 Male:43)	case4 (Female:21 Male:34)	—
	0.8m/s	case3 (Female:20 Male:26)	case5 (Female:7 Male:14)	case6 (Female:10 Male:15)
一般空調		case7 26℃50%RH (Female:8 Male:10)		

※ 暴露最大風速とは、吹出口直下の床上1,100mmで計測した時の最大風速の事。

※ 変動周期:20秒, 吹出し温度:7～10℃, 着衣量:0.4～0.6clo, 代謝量:1.1Met

図21 実験中の気温・湿度 (SK実験)

図22 空気温冷感申告割合 (SK実験)

図23 温熱的快適感申告割合 (SK実験)

図24 許容度合い申告割合 (SK実験)

風速条件における検定の結果、0.6m/s 条件では、28℃に比べて29℃の許容できる側の申告は有意に低い傾向が見られた ($p < 0.028$)。0.8m/s 条件では、室温が高くなると許容できない側へ有意に移行した ($p < 0.01$)。U 検定の結果、0.8m/s の場合、有意差が見られたのは28℃と30℃の2条件間のみで ($p < 0.01$)、快適感申告で有意差が見られた29℃と30℃は許容度合いは同程度であった。暴露風速0.8m/sの30℃設定は29℃設定に比べて快適感は損なわれるものの、29℃と同等程度には許容しうる環境であると言える。

6. まとめ

- 1) STS 実験より、非定常状態の場合、変動微風は一般空調よりも冷涼感が高く、また、暴露風速が強い方が冷涼感が高い。皮膚表面温度降下量、体重減少量についても、風速が強い方が大きくなることを確認した。一方、変動周期による心理的・生理的影響は非定常状態では小さく、定常状態では大きかった。本実験環境下では周期20秒が最も快適感が高かった。
- 2) EEG 実験より、今回測定した脳波、心電図、皮膚電気伝導には風速条件による有意差は見られなかったことから、1.0m/s 以下程度の気流は人体に大きな負荷を与えるほどのものではないことを示唆できた。従って、脳波等の生理量に生じる差異から、本実験範囲の変動微風を評価する事は困難であると思われる。
- 3) LTS 実験より、28℃30%RHの室内で、着衣量0.4～0.6clo、作業量1.1Met 程度の場合、風速0.4～0.6m/s(変動周期20秒)の時、非定常状態～定常状態まで高い快適感が持続することを確認した。また、長時間在室の際に、一般空調に比べて変動微風空調は快適感を損なう可能性が低いことを確認した。
- 4) SK実験より、29℃の場合、0.8m/sの変動微風を暴露することで28℃の0.4～0.6m/sの暴露環境と同程度の快適感・許容度合いとなることを確認した。30℃では、28℃よりも快適感・許容度合いは損なわれるものの、0.8m/sの変動微風を暴露することで29℃と同等程度の許容しうる環境であると言える。ただし、30℃でも快適側の申告が7割以上を占めており、変動微風による室温緩和が期待できる。なお、人体の温熱感・快適感にはタスク域の環境が影響を与えるが、本報では許容しうる環境としてアンビエント域の設定条件と暴露風速を示した。これは、図21からも分かるように、タスク域の環境はアンビエント域の温度と暴露風速によって決まるためである。吹出し温度^{注9)}や湿度も影響するが、本空調方式は氷蓄熱による低温送風との組み合わせを前提としているため、本報での実験範囲に近似するものと考えている。従って、本報における検討が変動微風空調システムの実用化を目指していることもあり、許容しうる環境としてアンビエント域の温度条件とタスク域の暴露風速を示した。

注

- 注1) 参考文献1)～10)では変動風あるいは変動気流と呼称しているが、本報では1.0m/s以下の気流を扱っているため、変動微風と呼称する。
- 注2) “不快感を伴わない”や“許容しうる”の判断は、建物の使用用途、在室者の挙動履歴、さらには個々人の考えにより異なるため、一概に規定することはできない。本報における“不快感を伴わない程度の微風環境”は、銀行のロビーのような発汗状態の人が存在する空間や一般的なオフィスビルでの執務を想定したものであり、不快申告が快適申告を上回らない程度を判断基準として設定した。
- 注3) 本報での暴露風速は、吹出口直下の床上1,100mmで計測した時の最大風速(振幅の最大値)のことを指す。
- 注4) 吹いている時間と吹いていない時間の合計を変動周期と定義する。
- ex.) 変動周期20秒は、10秒吹く・10秒吹かないを繰り返すパターン。

- 注5) 本実験では、26℃50%RH、暴露気流なし(タスク域での平均風速は0.1m/s以下の静穏気流)を一般空調設定ケースとして定義する。
- 注6) 変動微風暴露時の、温度分布、風速分布および特性等については参考文献9),10)を参照のこと。なお、温度計測にはT熱電対、風速計測には熱線風速計(STS 実験)もしくは、超音波風速計(EEG 実験, LTS 実験, SK 実験)を用いている。
- 注7) 被験者の疲労が生理量の不安定要因になることを防ぐため10分とした。
- 注8) 生理量に関する各項目の評価・解析・考察の骨子は、専門家(東京電機大学 人体科学研究質 町好雄教授)に依頼して行った。
- 注9) ASHRAE の COLD AIR DISTRIBUTION SYSTEM DESIGN GUIDE によれば、低温送風空調システムとは(より低湿度環境を意図して)4～10℃で送風することを指し、それより高い場合を従来空調システムと呼ぶ。しかし、日本では吹出し温度が13℃以下を低温送風と呼んでおり(低温送風空調システムの計画と設計, 空気調和・衛生工学会より)、本報では吹出し温度を7～10℃に設定しているため、日本における低温送風の一般的な温度よりも低い。この点については、留意する必要がある。

参考文献

- 1) 窪田英樹 他:「気流感」に関する研究(その1～10), 日本建築学会学術講演会梗概集(計画系), 1976～1982
- 2) 桑沢保夫, 鎌田元康 他:変動風の快適性に及ぼす影響に関する研究(その1～9), 日本建築学会学術講演梗概集(D環境工学), 1990～1997
- 3) 久保博子 他:夏季における室内変動気流の温熱的快適性に関する研究～その1.風向変化の影響について～, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1305-1308, 2001.9
- 4) 久保博子 他:夏季における空調吹出し方向による人体への影響について, 空気調和・衛生工学会論文集, pp.133-136, 1996
- 5) 久保博子 他:夏季におけるスポット冷風の温熱的快適性に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第492号, pp.31-37, 1997
- 6) 三島由美 他:室内気流の体感に及ぼす影響に関する実験的研究(その2～4), 日本建築学会学術講演梗概集(計画系), 1980～1982
- 7) 田中博子 他:変動気流の人体影響について, 日本建築学会学術講演梗概集(計画系), pp.917-918, 1984
- 8) 八木由紀, 久保博子 他3名:変動気流の前後風向持続時間が温熱的快適性に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会論文集, No.93, pp.97-103, 2004.4
- 9) 城田修司, 射場本忠彦 他8名:高温低湿度空調に関する研究(その1～6), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2000.9-2003.9
- 10) 城田修司, 射場本忠彦 他11名:変動気流を用いた大温度差空調に関する研究(その1～5), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 1997.8-2004.9
- 11) 久保博子 他3名:夏季における不均一気流の人体影響について -暴露面積の異なる場合-, 日本建築学会学術講演梗概集(D-1), pp.363-364, 1995
- 12) 中原信生 他5名:変動風を用いたパーソナル空調システムに関する研究その1～5, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1993-1994
- 13) 宮田洋, 柿木昇治 他2名:新 生理心理学1～3巻, 北大路書房, 1997
- 14) Yoshio Machi et al.: The External Qigong Simulator and Its Effects on The Human Body, Bridging Worlds and Filling in Gaps in The Science of Healing, pp.60-71, 2001.11
- 15) Yoshio Machi et al.: An Evaluation about the Characters of Four Inputting Methods of Mobile Phone based on Human Body's Physiological Indices, pp.364-368, AMT2005
- 16) 堤仁美, 秋元孝之 他4名:夏季における相対湿度・絶対湿度が在室者に与える影響の違いに関する被験者実験(その2 生理量及び知的生産性測定結果), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.681-684, 2003.9
- 17) 秋元孝之, 源馬健史 他6名:非等温気流タスク空調に関する研究, 2004.9-2005.8
- 18) 田辺新一, 堤仁美 他1名:オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.109, pp.1-9, 2006.4
- 19) COLD AIR DISTRIBUTION SYSTEM DESIGN GUIDE, ASHRAE, 1996
- 20) 低温送風空調システムの計画と設計, 空気調和・衛生工学会, 2003

本研究に関する既発表論文

- 1) 高温低湿度空調に関する研究(その5)分配式変動気流を用いた低温気流暴露時の温熱感実験: 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1705-1708, 2002.9
- 2) 変動微風空調システム実用化に関する研究(第1報)変動微風が快適性およびプロダクティビティに与える影響の把握, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.853-856, 2005.8
- 3) Study on Cold Air Distribution System with Fluctuating Breeze -Development of Thermal Sensation Sensor for Predicting Thermal Sensation-, Indoor Air 2005, pp.182-187, 2005.9
- 4) 変動微風空調システム実用化に関する研究(第4報)変動微風暴露時のタスク環境が温熱感に与える影響について, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1953-1956, 2006.9

(2006年10月5日原稿受理, 2007年5月11日採用決定)