

研究の動向

■ 温熱環境と知的生産性—持続可能なライフスタイルをめざして—

聖心女子大学 西原 直枝

1. はじめに

持続可能な社会の構築は、ますます重要となっている。地球の資源やエネルギーは限られているが、日本をはじめ先進国にて多く消費され、さらに新興国、途上国での需要も急増している。また、人間の活動による地球温暖化をはじめとする気候変動、大気、水、土壌などの汚染、生物多様性の減少などの問題や、地域間の格差の問題など、課題は山積している。

持続可能な社会を構築するためには、ライフスタイルの変革が重要である。2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」にて記載された2016年から2030年までの国際目標であるSDGs¹⁾では、先進国を含む国際社会全体の開発目標として17の目標を設定している。各目標の詳細については割愛するが、これらの目標は、人間のライフスタイルに密接にかかわっており、家政学分野、生活科学分野の果たす役割は大きいといえる。

筆者は、これまで、省エネルギーとともに、人間を取り巻く環境である衣服および室内環境に関する熱的快適性や知的生産性の研究、またそれらの知見をいかした家庭科教育に関する研究に取り組んできた。人間の特性をとらえて、人間と環境との間の関係を定量的に評価することにより、問題の解決につながるかもしれないと感じている。

研究としては、具体的には、人間に最も近い外部環境である衣服に冷却機能を持たせることにより個別に高温作業環境対策を行うことで室内全体の空調に費やすエネルギーを抑制する冷却衣服の熱的快適性に関する研究^{2)~4)}、熱的中立時に、人体各部位に冷刺激が与えられた場合の皮膚温、温冷感、熱流束について、冷刺激が与

えられた部位の局所変化や局所冷刺激による全身への影響を明らかにする研究⁵⁾、温熱環境をはじめとする室内環境が、働く人の知的生産性に与える影響に関する研究^{たとえば6)~8)}などに取り組んできた。また、近年では、教育の果たす役割が大きいと感じ、ESD（持続可能な開発のための教育）として家庭科教育をとらえることを目的とした研究を行っている⁹⁾¹⁰⁾。本稿では、筆者らが取り組んできた研究のうち、温熱環境と知的生産性の研究について紹介し、今後の展望について述べることにしたい。

2. 知的生産性の定義と経済効果

地球温暖化をはじめとする気候変動は、私たち人間の活動、特にエネルギー消費による二酸化炭素などの温室効果ガスの排出によって引き起こされている¹¹⁾。民生部門のエネルギー消費（オフィスなどの業務等部門および家庭部門）は、日本におけるエネルギー消費全体の約3分の1を占めており、1973年から比べると、業務等部門で2.4倍、家庭部門で1.9倍（2015年データ）と伸びが大きい¹²⁾。人間はその90%以上の時間を室内で過ごしているといわれるが、オフィスや家庭をはじめとし、室内での省エネルギーを図ることが喫緊の課題となっており、様々な分野でその取組が行われている。

一方で、省エネルギーを図るとともに、その室内で生活する人の健康性、快適性、生産性も保っていく必要がある。省エネルギーのために、暑く換気量の少ない環境で働いて健康を害したり、生産性を低下させたりするようでは持続可能な社会を作っていくことができない。人間側の生活や生理、心理特性を把握し、健康、快適、生産性の保たれた環境を作っていくことが重要である。

最低限の健康性や快適性については、これまでの多くの研究に基づいて、建築基準法や建築物における衛生的環境の確保に関する法律など、法律の整備が行われている。しかし、近年では、よりグレードの高い健康性、快適性、生産性への関心が高まっており、その評価方法も議論されてきている。特に現代のオフィスにおいては、

Naoe NISHIHARA

聖心女子大学文学部教育学科・准教授・博士（学術）

〔著者紹介〕（略歴）お茶の水女子大学卒業、同大学院修了後、日本学術振興会特別研究員（PD および RPD）、早稲田大学理工学研究所次席研究員（研究院講師）、聖心女子大学文学部教育学科専任講師を経て現職。

〔専門分野〕家庭科教育学、被服衛生学、建築環境学

知的活動が多く行われており、知識や情報の理解、活用、処理、あるいは、新しい発想とその具現化、高付加価値化、などが求められてきている。最低限の健康を保つだけでなく、より健康に、より快適に、生産性の高い環境とするためにどうしたらよいのか、それらのことと室内環境、省エネルギーはどのように関わっているのかという議論も盛んになっている。

一般的に生産性は、投資に対する、成果の割合であると定義されている。成果を、それを得るために投入した資源（投資した費用やその他の資源）で除した指標により示される。生産性の指標を考えてみると、投資側の定量化は、たとえば衣服や室内環境設備への投資費や維持管理費等の費用を見積もるなど、ある程度、定量化はしやすい。なお、環境負荷に対する生産性を考える場合には、エネルギー消費量等を投資側に見積もることもある。一方、成果側の定量化は、成果が知的活動によるものだけに、難しい面が多い。

これまでの研究では、知的活動を行う人間の件費に着目し評価する研究手法が、欧米を中心に提示されている。健康影響を考慮し、室内環境質の改善による経済効果を試算した例としては、米国のNIOSH（米国国立労働安全衛生研究所）による研究¹³⁾がある。室内環境を改善することにより、8,900万人の米国の室内執務者のうち、1,500万人以上の健康に良い影響を与え、その推定便益は年間50億～750億米ドルであると試算されている。

また、作業効率の向上を考慮して行った米国の試算¹⁴⁾では、温熱環境の改善による執務者の作業効率の向上は、米国における年間の潜在的利益として、年間120億～1250億米ドルに値すると報告されている。このように、作業効率の向上が認められる場合、人件費が高い先進国においては、大きな潜在的な利益が認められる。

作業効率の向上の定量化のためには、オフィス等の現場で、仕事効率の指標を用いて測定する方法や、オフィス作業を模擬した知的作業を被験者に課し、その速度や正確性を実験室実験により定量的に測定する方法がある。客観的指標が難しいときは、執務者の主観申告から見積もる場合もある。

3. 暑い環境は作業効率を低下させるのか

室内環境の質としては、温熱環境、空気環境、光環境、音環境など、様々な環境質が問題となるが、ここでは温熱環境と作業効率との関係について述べたい。

実は、温熱環境と作業効率の関係についての研究はかなり古くからある。初期の研究は、主に工場における労働生産性に関するものが多い。たとえば、Vernon¹⁵⁾は、ブリキ工場における季節による生産高の変化について、暑いと生産高が落ちることを示した。また、Chrenko¹⁶⁾

は、高温により事故率が増加したと報告した。

近年では、このような労働生産性だけでなく、先に述べたとおり、オフィスワーカーの知的生産性に関する関心が高まっており、温熱環境との関係について研究が行われている。温熱環境と知的作業効率の関係については、例えば、Seppänen¹⁷⁾が、室内温度と作業効率との関係について複数の文献を基に調べ、室内温度約22℃から、1℃の上昇または低下の温度変化によって、約1%の作業効率低下があるというモデルを提案している。一方で、Lorsh¹⁸⁾やSundstrom¹⁹⁾が指摘するように、温熱環境をはじめとする室内環境要因がオフィス作業に与える影響については統一した見解が必ずしも得られていない。その原因として、McIntyre²⁰⁾が指摘しているように、覚醒やモチベーション等の心理的な要因が作業成績等に関係していることが考えられる。著者らも加わって行ったDe Dear²¹⁾の、1991年から2011年の温熱環境研究のレビュー研究では、温熱環境が生産性に影響する可能性については一定の知見が集まっているものの、知的生産性に最適な温熱環境条件については、まだ明確になっていないと述べ、Seppänen¹⁷⁾らの22℃を最適温度とするモデルに疑問を呈している。

4. 温熱環境と作業効率に関する研究

温熱環境と作業効率に関する、著者らの実験室実験および現場実測の一部を紹介する。

まず、空気温度や湿度等の環境条件を制御できる人工気候室内で、作用温度を25.5℃、28℃、33℃に設定し、曝露時間1.5時間の被験者実験⁶⁾を行った。作業成績に関しては、課した作業の多くにおいて環境間で差が認められず、統一した見解は得られなかった。一方で、疲労感の評価では温熱環境の違いによる差が認められ、33℃の暑い環境は、25.5℃の環境に比べ、「いらいらする」等の精神的な疲労の指標の訴え率が高かった。

次に、より長い曝露時間（約6時間）の実験を行った²²⁾。作用温度25℃、28℃とし、スーツ着用の条件に加え、28℃でジャケット、ネクタイを着用しないクールビズ条件を設定した。長時間の実験では、疲労の訴え率が高くなると作業成績が低下するという関係があった（図1）。

室内環境の温度が暑く不快な場合、長い時間の曝露によって、居住者の疲労が高くなり作業効率低下する傾向があるが、この傾向は被験者実験だけでなく実際のオフィス環境での実測でも示されている。たとえば、コールセンターにおいて、四季を通じ累計13,169人分のコールデータを対象として行った現場実測では²³⁾、平均室内空気温度が25.0℃が26.0℃に1.0℃上昇したときに、時間平均応答件数が低下し、その作業効率の低下は1.9%程

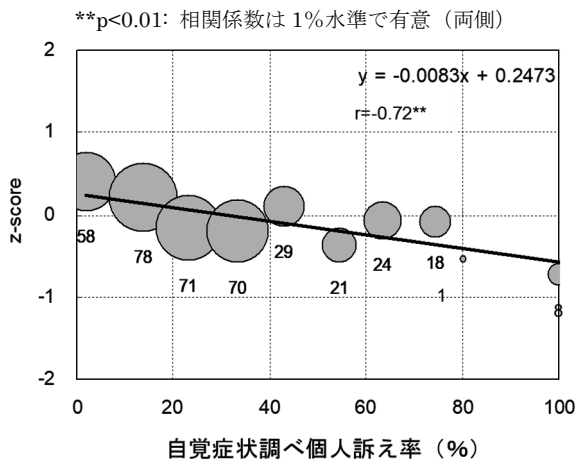


図1. 自覚症状調べ個人訴え率と作業成績⁽²²⁾

度であった。この低下率は小さいように感じられるかもしれないが、たとえば、25℃から28℃に空気温度が上昇した場合の低下率は6%程度であり、それを1日8時間の労働時間に換算すれば、約30分相当の残業時間に相当する。無視できない程度の効率低下であるといえる。

5. 夏季クールビズオフィスの温熱環境と作業効率

環境負荷軽減の取り組みとして、オフィスでは、夏季の冷房設定温度緩和および軽装化を主とした、いわゆるクールビズ⁽²⁴⁾が2005年より政府主導で実施されてきている。クールビズの推進により、オフィス内の冷房設定温度として28℃という値が浸透し^{*1}、軽装化が推奨され、ノーネクタイ、ノージャケットが典型例として提示された。

クールビズ推進当初、クールビズに積極的に取り組み、軽装を推奨しているオフィスを対象として、2006年8月に、盛夏の室内環境と着衣の状況について測定した研究について、以下に紹介する⁽²⁵⁾。

この対象オフィスでは、「冷房設定温度28℃」として取り組んでいたが、執務者周辺では28℃を超えて、より高温となる場所や時間帯があった。同オフィスにおける温熱環境測定結果⁽²⁶⁾でも、オフィスの内部発熱量の偏りや空調方式の影響によって、空気温度や放射温度が30℃を超える場所や時間帯が生じていた。着衣量調査により、平均着衣量は男性で0.54 clo、女性で0.52 cloであり、1974-1975年の成瀬⁽²⁷⁾の調査に比べ、特に男性において軽装化が進んでいた。NakanoとTanabe⁽²⁸⁾は半屋外を、田村と丸田⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾は屋外を対象として着衣の調査を行っており、着用される着衣量と日平均外気温との間に相関があることを報告したが、これらの研究でのクロ値の下限は約0.5 cloであった。夏季の軽装化が推奨されている本調査対象のオフィスでは、在室者が、屋外等の下限値に近い着衣量で過ごしていたことがわかる。

多くの執務者が、改善したい環境要素として温熱環境を挙げ、扇風機等を使用して、暑さの対策を行っていた。また、本実測オフィスの執務環境の質が作業性に与える影響として、「低下させている」側に申告した割合は72%、「集中しにくい」側に申告した割合は62%だった。省エネルギーを図るとともに、室内で働く執務者の疲労や満足度を損ねずに、作業効率を保つことが重要であり、軽装化に加えて、気流等の工夫を行う必要があることが示唆された。また、「室内環境があなたにとって最適である時のあなたの最大限の作業能力を100とすると、本日の室内環境における作業能力はどれくらいになりますか。」という質問に対し、0から100のスケール上で申告させた主観作業能力は、温熱環境に関する満足度が高いと有意に高いという正の関係が認められた⁽²⁶⁾。

6. 個別調節の導入

温度などの設計基準を満たしている場合でも、およそ20%の人はオフィス室内の温熱環境に不満を持っているといわれている。前項でも示したように、働く人ひとりひとりの好みや行動内容に温熱環境をカスタマイズすることで、個人ごとの環境への満足度があがれば、知的生産性の向上につながる可能性がある。

たとえば、被験者が風速を自分の好みに合わせて自由に調節できる条件と、できない条件を設け比較した被験者実験では、風速を調節できる条件で、作業意欲減退に関する疲労の症状が低下した(図2)⁽³¹⁾。

また、クールビズオフィスを想定した環境で、卓上ファン、メッシュ椅子、ファン付シャツの各採涼アイテムを導入した際の執務者の作業効率に関する被験者実験⁽³²⁾について紹介する。

実験条件は作用温度(25.5℃、28.5℃)と着衣量(スーツ0.96 clo、軽装0.57 clo)、および採涼手法(図3)の使用可否で構成した。作用温度25.5℃+スーツ、28.5℃+スーツ、28.5℃+軽装を設定した。また、

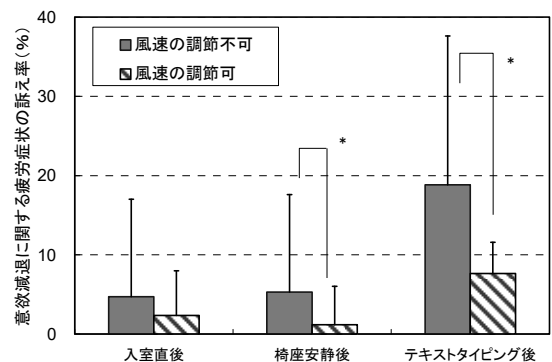


図2. 気流の個別制御の有無と作業意欲減退に関する疲労症状
文献⁽³¹⁾より筆者作成



a) 卓上ファン b) ファン付シャツ c) メッシュ椅子

図3. 実験で用いた採涼アイテム³²⁾

28.5℃ + 軽装に加え、卓上ファンを使用可能とした条件および、さらに、軽装条件の半袖 Y シャツの代わりにファン付シャツを着用させ、クッション椅子の代わりにメッシュ椅子を使用した条件を加えた。卓上ファンは風量調節と首振り機能の使用を、ファン付シャツは風量調節を許可し、自由に使用させることにより、温熱満足度の向上を図った。

実験中の採涼手法の使用時間の調査では、使用可能とした75%程度の時間でファン付シャツや卓上ファンを使用していた。また、温熱満足度と、作業効率（乗算作業、校正作業）の客観的な作業成績との間には正の相関が認められた。採涼の度合いを個人ごとに調節できる工夫を加えることにより温熱満足度が向上すれば、室温を高めに設定した室内においても執務者の作業成績を向上させ、疲労度を軽減できる可能性がある。

7. 温熱環境と脳血流量

疲労や精神的負担度など、知的作業時の人間の状態を知るために、アンケート等の主観評価だけでなく、そのときの人間の生理反応の測定も行っている。精神的負担度が高いと脳内酸素代謝測定による総ヘモグロビン濃度が増加することを示し、これにより、脳血流量変化を作業時の精神的努力の客観的指標とし、温熱環境との関係を調べた。図4に、近赤外線分光による脳内酸素モニタ装置および実験風景を示す。作用温度26℃および33.5℃の各環境に50分間被験者を順応させた後、計算作業を課した場合の脳血流量の変化を見たところ、作業負荷が高く、かつ、作業成績を保つ場合、高温の環境下では、熱的中立状態に比べ脳血流量が増加することを示し、精神的負担の程度が高い可能性が示された³³⁾。

8. 持続可能なライフスタイルにいかす

地球温暖化等による気候変動が問題となる中、オフィスや家庭における省エネルギーを行うことが必須となり、省エネルギー性や地球環境保全の観点を保ちながら、いかに、疲れずに柔軟に、快適に人間が活動できることが



図4. 近赤外線酸素モニタ装置および被験者実験風景

ますます重要となってくる。快適性、満足度を高く保ち、質の高い知的活動の成果を確保するために、人びとの活動や場を支える衣服や室内環境において、どのような技術や工夫が有効なのか、人間の特性データに基づきながら考えていく必要がある。これらのエビデンスは、室内環境、空調機器、衣服の設計に役立つだけでなく、これらを利用し、運用していく際にも重要なデータとなる。

また、これらのエビデンスをきちんと整理し、子どもたちをはじめ、生活をする人々にその重要性を伝えていくことも重要である。小学校、中学校、高等学校の家庭科教育の教科書をESDの観点から分析を行ったところ、家庭科の教科内容に多くの持続可能なライフスタイルに関するキーワードを含んでいた⁹⁾。この充実した教科内容を、さらに時代の課題解決とともにブラッシュアップしていくためには、常に、エビデンスを積み重ねる研究と、教育との両輪で進めていく必要がある。また、研究者、専門家から一方的に知見を伝えるだけでなく、生活者から研究者、専門家へと、生活をする中での着眼や考えなどを伝えるコミュニケーションの風通しを良くし、より実際にあった課題解決をしていくことも重要である。「生活」や「ライフスタイル」は多様で複雑であるが、持続可能な社会を作っていく上で重要な役割を持っている。学際的に、また一つひとつの科学的エビデンスを積み上げながら、今後も研究を進めていきたい。

謝 辞

本稿で引用紹介した室内環境質と知的生産性に関する研究事例は、早稲田大学建築学科田辺新一教授のもとで行った一連の研究を中心としている。関係者各位に感謝申し上げます。

脚 注

*1 クールビズは開始当初、「冷房設定温度28℃」として政府主導でスタートしたが、2017年8月現在、環境省のホームページ (<https://ondankataisaku.env.go.jp/coolchoice/coolbiz/>) では、「室温28℃」は冷房の設定温度のことではなく室温の目安としているものであり、必ず「28℃」でなければいけないということではない、と補足説明されるようになっていいる。本稿では、当時浸透していた「冷房設定温度28℃」としていたオフィスでの測定結果を紹介している。

参考・引用文献

- 1) United Nations. "Sustainable Development Goals." <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs> (入手日: 2017.8.29)
- 2) 田辺新一, 西原(吉見)直枝, 長谷部ヤエ, 羽山広文, 小松正佳. 通信機械室における快適作業環境維持のための冷却ベストに関する研究—冷却ベストの試作と着用実験—. 空気調和・衛生工学会論文集. 2000, **79**, 61-70
- 3) Nishihara, N.; Tanabe, S.; Hayama, H.; Komatsu, M. Thermal Comfort Conditions by Wearing a Cooling Vest. *J. Home Econ. Jpn.* 2001, **52**, 1199-1207
- 4) Nishihara, N.; Tanabe, S.; Hayama, H.; Komatsu, M. A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*. 2002, **21**, 75-82
- 5) 西原直枝, 長谷部ヤエ. 局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差. *日本生気象学会誌*. 2003, **39**, 107-120
- 6) 西原直枝, 田辺新一. 中程度の高温環境下における知的生産性に関する被験者実験. *日本建築学会環境系論文集*. 2003, **568**, 33-39
- 7) Tanabe, S.; Haneda, M.; Nishihara, N. Workplace productivity and individual thermal satisfaction. *Building and Environment*. 2015, **91**, 42-50
- 8) Nishihara, N.; Wargocki, P.; Tanabe, S. Cerebral blood flow, fatigue, mental effort, and task performance in offices with two different pollution loads. *Building and Environment*. 2014, **71**, 153-164
- 9) 西原直枝, 井元りえ, 妹尾理子, 志村結美, 佐藤裕紀子, 大矢英世, 加賀恵子, 佐藤典子, 檜府暢子. 家庭科におけるESDの構成概念および学習内容の明確化—小学校・中学校・高等学校の教科書分析を基に—. *家*
教誌. 2017, **60**, 76-86
- 10) Nishihara, N.; Ito, Y.; Ono, K. Class Practice in Primary School about Kasanegi (Wearing Clothing in Layers) for ESD. *J. Home Econ.* 2016, **9**, 95-106
- 11) IPCC WG1. "Fifth Assessment Report: AR5." 2013, 気象庁翻訳. <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/> (入手日: 2017.8.15)
- 12) 資源エネルギー庁. "エネルギー白書2017." <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017html/2-1-1.html> (入手日: 2017.8.15)
- 13) Mendell, M. J.; Fisk W. J.; Kreiss, K.; Levin, H.; Alexander, D.; Cain, W. S.; Girman, J. R.; Hines, C. J.; Jensen, P. A.; Milton, D. K.; Rexroat, L. P.; Wallingford, K. M. Improving the Health of Workers in Indoor Environments: Priority Research Needs for a National Occupational Research Agenda. *American Journal of Public Health*, 2002, **92**, 1430-1440
- 14) Fisk, W.; Rosenfeld, A. Estimates of improved productivity health from better indoor environments. *Indoor Air*. 1997, 1997, 158-172
- 15) Vernon, H. M. The influence of hours of work and of ventilation on output in tinsplate manufacture. Report to Industrial Fatigue Research Board. No. 1. London. HMSO, 1919
- 16) Chrenko, F. A. Bedford's Basic Principles of Ventilation and Heating. London. H. K. Lewis & Co. Ltd., 1973, 431-464
- 17) Seppänen, O.; Fisk, W. J.; Lei, Q.H. Room temperature and productivity in office work. *Proceedings of Healthy Buildings 2006*. 2006, 243-247
- 18) Lorsch, H. G.; Abdou, O. A. The impact of the indoor environment on occupant productivity - Part 2: Effects of temperature. *ASHRAE Trans.* 1994, **100**, 895-901
- 19) Sundstrom, E. "Work environments: offices and factories." *Handbook of environmental psychology*. Vol. 1. Stokols et al. eds. New York. John Wiley, 1987, 733-782
- 20) McIntyre, D. A. "Temperature and performance." *Indoor climate*. London. Applied Science, 1980, 346-371
- 21) de Dear, R. J.; Akimoto, T.; Arens, E. A.; Brager, G.; Candido, C.; Cheong, D.; Li, B.; Nishihara, N.; Sekhar, S. C.; Tanabe, S.; Toftum, J.; Zhang, H.; Zhu, Y. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*. 2013, **23**, 442-461
- 22) 西川雅弥, 西原直枝, 田辺新一. 中程度の高温環境下の長時間作業が作業効率と疲労に与える影響に関する被験者実験. *日本建築学会環境系論文集*. 2009, **638**, 525-530
- 23) Tanabe, S.; Kobayashi, K.; Kiyota, O.; Nishihara, N.; Haneda M. The effect of indoor thermal environment on productivity by a year-long survey of a call centre. *Intelligent Buildings International*. 2009, **1**, 184-194

- 24) 土居健太郎. COOL BIZ. 空気調和・衛生工学. 2006, **80**, 5-7
- 25) 西原直枝, 羽田正沖, 田辺新一. 夏季冷房28℃設定オフィスにおける執務者の着衣量および主観申告調査. 家政誌. 2010, **61**, 169-175
- 26) 羽田正沖, 西原直枝, 中村駿介, 内田智志, 田辺新一. 夏季室温緩和設定オフィスにおける温熱環境実測および執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価. 日本建築学会環境系論文集. 2009, **637**, 389-396
- 27) 成瀬哲生. 室内の温熱環境. 空気調和・衛生工学. 1980, **54**, 43-50
- 28) Nakano, J.; Tanabe, S. Thermal comfort and adaptation in semioutdoor environments. ASHRAE Trans. 2004, **110**, 543-553
- 29) 田村照子, 丸田直美. 現代社会における衣服着用率の季節変化. 日生氣誌. 2004, **40**, 351-360
- 30) Maruta, N.; Tamura, T. Clo value and environmental temperature. Proceedings of ICHES05. 2005, 454-458
- 31) Nishihara, N.; Tanabe, S. Effect of individual control of air velocity on office workers' productivity with subjective experiment. J. Home Econ. Jpn. 2005, **56**, 153-161
- 32) 羽田正沖, 西原直枝, 川口玄, 田辺新一. 夏季に室温を高めに設定したオフィスにおける知的生産性—採涼手法の導入による温熱満足度の向上と作業効率および疲労への影響—. 日本建築学会環境系論文集. 2009, **646**, 1329-1337
- 33) Tanabe, S.; Nishihara, N.; Haneda, M. Indoor Temperature, Productivity and Fatigue in Office Tasks. ASHRAE HVAC&R Research Journal. 2007, **13**, 622-632