

現地実測による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討

—学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その1)—

Field Intervention Survey on Thermal / Air Environment Effects on Academic Performance Study on the Productivity in Classroom (Part 1)

金子隆昌*, 村上周三**, 伊藤一秀***, 深尾仁****

Takamasa KANEKO, Shuzo MURAKAMI, Kazuhide ITO, and Hitoshi FUKAO

This paper (Part 1) gives an outline of the series of this productivity research and presents on the results of field intervention experiment. Here, we focused our attention on the effects of air change rate and studied thermal / air environmental effects on academic performance. The field intervention experiment was conducted in actual classroom with actual students, during normal lessons. It also involves quiz that are a part of a teaching curriculum. When air change rate is increased from 2.6 to 18.6 m³/h per person, academic performance evaluated by quiz score is improved significantly by 5.8% on average (p<0.0007). Similar trends were observed for self-estimated performance. Correlation analyses show that lower air change rates link to reduced academic performance. This experiment indicates that improving indoor environment conditions in classroom can substantially improve academic performance.

Keywords: Productivity, Academic performance, Schools, Field survey, Air environment, Thermal environment

プロダクティビティ, 学習効率, 学校, 現地実測, 空気環境, 温熱環境

1. はじめに

近年オフィスや学校の室内環境に求められる機能の1つとしてプロダクティビティ(作業効率や学習効率)が注目されており、特にその向上ならびに室内環境の質に対する潜在的価値の評価が強く求められている¹⁾。室内環境の質と作業効率の関係に関する検討は欧米を中心に、特に実験室実験という手法により行われてきた²⁾。また現地実測ではコールセンターを中心として作業効率の定量評価可能な実際の業務成績を用いた検討が行われている³⁾。さらに実験・実測によるプロダクティビティの直接評価に加え、室内環境水準の向上を1つの目的としたコストシミュレーション、つまり質の高い室内環境の提供に伴う建物のライフサイクルコストとプロダクティビティ向上による利益の比較が行われ、室内環境への投資は費用対効果の高いことが示されている^{4,5)}。

しかしながら室内環境の質がプロダクティビティに及ぼす影響の検討を行う際には、ホーソン効果に代表されるようにモチベーションの影響が多であることが指摘されており^{6,7,8)}、また評価方法が十分に確立されていない^{9,10)}ことも相まって、その定量的な効果に関して統一した見解が得られていない¹¹⁾。このため、室内環境の質がプロダクティビティに及ぼす影響は十分には明確になっていないのが現状

である。

一方、学校等の学習環境を対象とした研究では、教室の室内環境の質が出席率ならびに健康に及ぼす影響の調査・研究が多く、室内環境の質が学習効率に及ぼす影響を直接的に検討した報告は殆どない¹²⁾。また、加算や読解テストを学習効率の指標とした基礎的検討は行われている¹³⁾が、授業の理解度を直接的な学習効率として行った検討¹⁴⁾は数例である。一般に多くの報告から学校の教室の温熱・空気環境はオフィスよりも劣る場合が多いことが指摘されており¹⁵⁾、これらの環境によって起こされる健康被害や学習効率の低下は、子どもにとっても社会にとっても不利益をもたらすこととなる。特に学習効率は健康被害のない室内環境レベルであっても悪影響が出ると考えられており、高いレベルでの室内環境の改善が必要とされている¹⁵⁾。しかし学校は質の高い室内環境を提供するには慢性的な資金不足であるとともに、室内環境の質を向上させるためには科学的な根拠も不足していることが指摘されている¹²⁾。このため室内環境の質と学習効率に関する早急な、かつ大量のデータ収集が求められている。

このような背景のもと、本研究では学習環境を対象として学習効率に着目したプロダクティビティの総合的な検討を行う。本研究は教室の温熱・空気環境の質が学習効率^{註1)}に及ぼす影響を検討するもので

※本論文は、本研究に関する既発表論文1)ならびに6)に新たな知見を加え、加筆・修正したものである

* 慶應義塾大学大学院

大学院生

Graduate student, Keio Univ

** 慶應義塾大学理工学部

教授・工博

Prof., Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr. Eng.

*** 東京工芸大学

助教授・工博

Associate Prof., Tokyo Polytechnic Univ., Dr. Eng.

**** ㈱大成建設 技術センター

部長・工博

General Manager, Tech. center, Taisei Corporation, Dr. Eng.

あり、特に、実際に講義が行われる教室にて現地調査を行うと共に、ほぼ同条件を再現した実験室での被験者実験も行う。本研究では現地調査と実験室での被験者実験において全く同一の学習効率評価方法(DVDによる映像講義+統一確認テスト)を用いることにより、従来では厳密な比較検討が困難であった、現地実測と被験者実験の整合性について検討を試みるものである。現地実測においては、実験室実験では再現が難しいモチベーションなどの被験者心理を再現することが可能である。また、環境条件が曖昧になりがちな点に関しては実験室実験のデータにより補うことが可能であり、室内環境の質と学習効率の関係に関して多角的に考察することができるという点に本研究の特色がある。加えて、学習効率の主観評価(アンケート形式の質問票)により得られる結果の信頼性の検討も行う。主観評価は実施容易性などからプロダクティビティデータの収集に優れる¹⁷⁾が、主観評価により得られるデータの信頼性については十分に確認されておらず、客観的評価データを用いて信頼性を検討することによりデータ収集の機会増加に寄与するものと思われる。

また、本研究では成人を対象として学習効率の評価を行う。ワークプレイスを中心とした既往研究ではテキストタイピング作業などの作業をこなす時間(Throughput Time)の効率化、すなわちアウトプット側の作業効率の評価が中心であり、インプット側の学習効率に着目した事例はほとんど無い^{2,12)}。本研究で成人を対象とすることにより、室内環境の質がインプット側のプロダクティビティに及ぼす影響を検討すると共に、インプット効率である学習効率と Throughput Time を評価した作業効率との比較・検討も可能となる。

本報(その 1)では、本研究の全体概要を示すと共に、換気量が異なる環境条件に着目し、室内環境の質が学習効率に及ぼす影響に関して行った現地実測の結果を報告する。次報(その 2)では、現地実測と同様に換気量に着目した実験室での被験者実験に関して報告するとともに、現地実測と実験室実験の整合性の検討を行った結果を報告する予定である。

2. 学習効率向上に関する研究全体概要

本報を含む一連の研究では学習環境における学習効率改善に着目し、全国展開している資格受験対策予備校を対象として、室内環境の質が学習効率に及ぼす影響に関して多角的に検討する。図 1 に研究全体のフローを示す。本研究で実測対象とする資格受験対策予備校は、映像講義を用いて全国で均一な講義環境を提供している。また、授業毎に授業理解度を問う確認テストを実施している。

一般に、講師(教師)の教授レベルが学習効率に与える影響は大きく、それ故、異なる教室間・講師によって行われた講義(授業)を対象として、特に室内環境の質が学習効率に与える影響の比較検討を行うことは大変困難となる。本研究で対象とする資格受験対策予備校は、同一の映像コンテンツを用いた画一的な講義を全国で提供しており、更に統一された確認テストにより講義毎に学習成果を確認しているため、現地実測においても、再現性のある学習環境の作出と統一的な評価が可能となる。また映像講義ならびに確認テストを利用することで、実験室における被験者実験を行う際にも、現地実測の授業システム(学習効率に関する評価方法)を厳密に再現することが可能となる。

以上の特徴を踏まえ、本研究では現地調査と実験室での被験者実験の両者のアプローチにより、室内環境の質が学習効率に与える影響

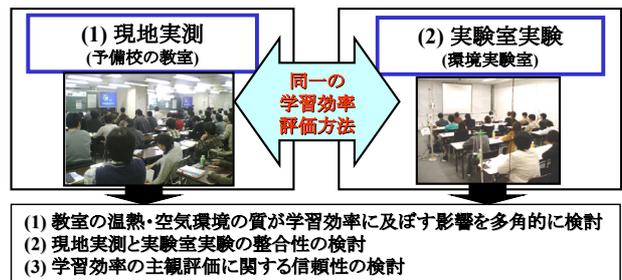


図 1. 研究のフロー

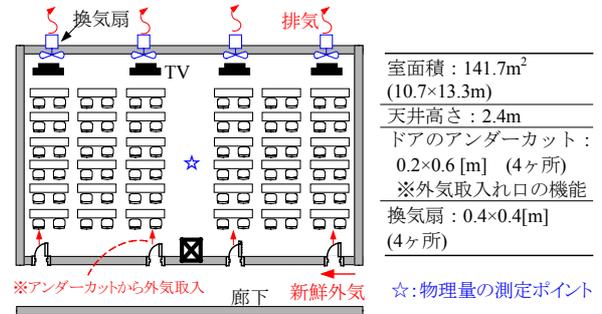


図 2. 現地実測の対象空間の概要ならびに測定ポイント

表 1. 現地実測の条件

実測日	換気量	講義科目	被験者数
3/20(日)	大(3.5回/h)	論理系	41(人)
3/27(日)	小(0.4回/h)	科目	41(人)
4/3(日)	小(0.4回/h)	暗記系	50(人)
4/10(日)	大(3.5回/h)	科目 I	50(人)
5/15(日)	大(3.5回/h)	暗記系	57(人)
6/12(日)	小(0.4回/h)	科目 II	57(人)

表 2. 物理環境測定項目

(1)空気環境要素	換気量、粉塵濃度、CO ₂ 濃度、VOC、真菌濃度
(2)温熱環境要素	空気温度、放射温度、相対湿度、風速
(3)光環境要素	机上上面照度
(4)音環境要素	等価騒音レベル

を検討する。客観的な学習効率の評価として、実際の授業で使用されている確認テストを採用する。このため、実測における学習効率評価において、全ての校舎・教室にて統一された方法を用いることが可能となり、室内環境の質が異なる教室間の学習効率の比較が可能となる。また、実測ならびに実験室実験において、統一された学習効率評価方法(統一確認テスト)を用いることで、室内環境の質が学習効率に及ぼす影響を多角的に検討できる。多くの既往研究では実タスクを実験室にて厳密に再現することが困難であるが故、実測ならびに実験室実験において完全に同一の評価方法を用いて学習効率、すなわちプロダクティビティを検討した例は殆どなく、本研究でのアプローチは、プロダクティビティ研究に関して貴重なデータを提供するものと考えられる。

2.1 現地実測

学習効率の調査に先立ち、現地実測を行う教室の室内環境の質、特に物理環境を明らかにすることを目的として換気量、空気質、照度、音環境等に関する事前調査を行う。室内環境の質と学習効率に関する事前調査の後、室内環境の質が異なる 2 教室において、実際の予備校

生を対象に検討を行う。実測では被験者心理が再現されているため、ホーン効果が見れにくいという大きなメリットがある。この現地実測の結果に関して、本報にて報告する。

2.2 実験室における被験者実験

実測で対象とした資格受験対策予備校の教室環境ならびに授業システムを模擬した実験室実験を行う。実測では制御が困難な室内環境の質を厳密に制御し、室内環境の質が学習効率に及ぼす影響を詳細に検討するとともに、測定ケースが限定された現地実測の結果を補充・充実させる目的で、環境条件をパラメトリックに変化させて被験者実験を行う。被験者実験ならびに現地実測においては、それぞれの特性を生かして互いにデータの補充を行うことが可能であり、またプロダクティビティ研究における実験室実験ならびに現地実測の整合性についても検討を行う。実験室における被験者実験結果は続報(その2)にて報告予定である。

3. 学習効率に関する現地実測の概要

資格受験対策予備校の教室を対象として、異なる温熱・空気環境要素が学習効率に及ぼす影響を検討することを目的として現地実測調査を行う。温熱・空気環境の両者が変化しているが、操作要因として換気量を選んだので環境条件を換気量(大)、換気量(小)と呼ぶ^{注2)}。また、学習効率の評価を行う上で、確認テストの点数を用いた客観評価と、心理量のアンケート調査による主観評価の2種類の評価方法を採用し、主観評価の信頼性の検討も併せて行う。

3.1 現地実測期間・場所

学習効率に関する現地実測は2005年3月～6月にかけて資格受験対策予備校である日建学院池袋校にて行った。実測の対象教室の概要ならびに物理環境要素の測定ポイントを図2に示す。各教室の天井には温度制御を目的とした定風量式空調機が設置されている^{注3)}。新鮮外気は廊下端部に設置された外気取入用の開口部から取入れる方式であり、廊下を介して、各教室にはドアのアンダーカット部分から外気導入する。教室には換気扇が設置されており、換気扇を運転することで各教室内が負圧となり、廊下より外気が流入する方式となっている。

すなわち、教室に導入する新鮮外気量は、教室内に設置された換気扇の運転の有無により制御を行うこととなる。

3.2 現地実測の条件

本研究で設定した教室内環境条件を表1に示す。室内空気質(IAQ)の性状が学習効率に与える影響に着目し、特に換気量を変化させて現地実測を行う。換気量(小)の条件は、教室内に設置された換気扇を常時OFFとし、換気量(大)の条件は換気扇を常時ONとした。また、講義として提供する科目に関しては、論理系科目(建築構造分野)、暗記系科目(建築計画、建築施工分野)の2つに大別し、さらに暗記系科目はIとIIに分類した。理論系科目ならびに暗記系科目の各々において換気量(大)、換気量(小)の室内環境条件における学習効率を比較・検討する。

被験者となる一般受講生のサーガディアンリズム^{注4)}に配慮し、同一曜日・時間帯に行われる講義を対象として実測を行っている。

3.3 被験者

現地実測の対象となる被験者は日建学院池袋校の一級建築士講座の受講生である。受講者のほぼ全員が7月に実施される一級建築士の資格試験を受験するため、講座受講に対する動機付けは高い。実測期間を通じて被験者数は70人程度であり、20代から40代の社会人が中心である。受講生は提供されるカリキュラムに従って全ての講義を履修するため、各実測ケースでの被験者群は概ね同一となっている。被験者に換気量を変化させることは告知しない。また環境測定ならびに申告票の記入は、教室環境改善のためのデータ収集を目的とし、日建学院主催で実施した。

3.4 測定項目

3.4.1 教室内物理環境の測定

(1) 空気環境要素の測定

現地実測中に二酸化炭素濃度の連続測定を行うと共に、粉塵濃度の測定を行う。二酸化炭素濃度はマルチガスモニター(光音響法)、粉塵濃度はデジタル粉塵計(光散乱方式)を用いる。

また受講生の不在時に、換気回数、化学物質濃度(揮発性有機化合物(VOC)とカルボニル系化合物)、真菌濃度(空中浮遊真菌・空中落下

表3. 代表的な統一確認テストの内容(計画①)

問10	事務所建築に用いられる各種配線方式に関する次の記述のうち、最も不適当なものはどれか。
1.	フリーアクセスフロア配線方式は、床を二重床とし、その間に配線スペースとして使用する方法で、床の設計荷重を軽減する効果がある。
2.	事務所ビルにおいて、基準階の床は、高さ6cmのフリーアクセスフロアとし、オフィスのレイアウトの変更に対応できるように配慮した。
3.	アンダーカーペット配線方式は、床上に極薄のケーブルを直接布設する方式で、特殊な床仕上げを必要であるが、増変更には容易に対応できる。
4.	バスタクト配線方式は、必要な場所に配線を行い、これに導体を収容・保護させる方式で、最大許容電流が大きく、大容量の電力供給に適している。
5.	バスタクト配線方式に使用される導体は、一般に、銅又はアルミニウムである。

表4. 主観評価の申告票の一部

5. 空気の汚れやにおいなどの空気環境について伺います。	
① 現状の空気環境に満足しておられますか？	
1. 不満 2. やや不満 3. どちらともいえない 4. やや満足 5. 満足	<input type="checkbox"/> (1~5)
② 今日の空気環境は授業理解のしやすさにどのような影響を与えていると考えられますか？	
1. 低下させている 2. やや低下させている 3. 影響しない	
4. やや高めてくれる 5. 高めてくれる	<input type="checkbox"/> (1~5)
8. 受講状態や授業理解度について伺います。	
⑤ 今日の授業において、教室内の様々な環境が原因で授業理解に影響を及ぼした頻度や影響を、ロスしたと思われる時間に換算してお答えください。	<input type="checkbox"/> 分程度

菌)の測定を行う。換気回数の測定は、SHASE S-116 に定められたステップダウン法により行う。トレーサースガスとしてSF₆を用い、濃度測定にマルチガスモニターを用いた¹⁶⁾。測定中は空調設定温度 25°C で運転した。揮発性有機化合物は Tenax TA にアクティブサンプリングし、加熱脱着の後、GC/MS にて定性定量分析を行う。カルボニル化合物は SepPak-DNPH にてアクティブサンプリングし、溶媒抽出の後、HPLC にて定性定量分析を行う。空中落下菌は、PDA 培地を設置した直径 90mm の滅菌シャーレを室中央部の床面位置に設置してパッシブサンプリングを行う。空中浮遊真菌はアクティブサンプリングにより PDA 培地上に捕集する。両者はサンプリング後、28°C に設定したインキュベータ内で培養し、7 日目の PDA 培地表面での真菌発育状況(コロニー数)を観察する。

(2) 温熱環境要素の測定

現地実測の期間中に空気温度、風速、相対湿度、放射温度を連続測定する。空気温度は熱電対、風速は熱線式(無指向性)のクリモマスター風速計、湿度はデジタル湿度計、放射温度はグローブ温度計にて連続測定を行う。全てのデータは1分間隔で保存する。

その他、音環境は騒音計により室内の等価騒音レベルの測定を行うとともに、光環境に関しては、デジタル照度計にて机上面照度を測定する。表2に物理環境測定項目をまとめて示す。

3.4.2 学習効率の評価

(1) 客観的な学習効率の評価

講義の理解度を問う統一確認テストの点数により客観的な学習効率を評価する。講義内容は一級建築士試験対策で、確認テストは五者択一形式で全 20 問である。代表的な確認テストの内容の一部を表3に示す。解答速度は評価対象とせず、授業理解度(正答率)にて評価する。授業理解度は集中力、講師の話を理解する力、暗記能力、テスト解答時の文章読解力、計算・論理的思考(論理系科目)等を含む。異なる講義内容に関するテスト点数を比較するため、日建学院実施全国平均点データをテストの難易度とみなして、全テストの難易度を統一した^{注5)}。

(2) 主観的な学習効率の評価

自己申告票を用いて主観的な学習効率に関する評価を行う。主観評価の申告票の一部を表4に示す。申告票の項目¹¹⁾は、1.回答日 2.基本情報(体調、年代ならびに着衣量等)^{注6)}、3.光環境、4.熱環境、5.空気環境、6.音環境、7.空間環境(部屋の広さやインテリア)、8.学習効率関連で構成される。2~6.の物理環境に関して「満足度」ならびに「授業理解へ及ぼす影響」を問う。満足度の回答のうち、1.不満、2.やや不満と回答した人の割合を不満足者率として算出する。また8.学習効率関連ではバックグラウンドデータとして既習率ならびに興味度を問う^{注6)}。主観的な学習効率の定量的評価項目として「室内環境の要因によってロスしたと思う時間(分)」、「現状の室内環境要因(空気環境、温熱環境、光環境、音環境、空間環境)が改善された場合の授業理解度の予想向上率(%)」の2つを設けた。

3.5 現地実測手順

現地実測は通常の講義進行スケジュールに準拠し、講義開始時刻である午前9:00から実測を開始する。180分間の講義後(12:00)、30分の確認テストを行い、その後、引き続き申告表の記入を行う。180分の講義中、5分程度の休憩が3回ある。図3に1回の講義進行と実測手順を示す。

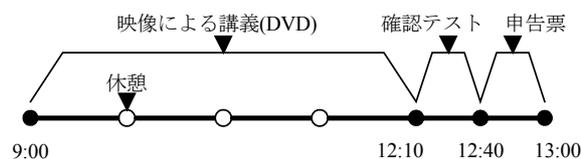
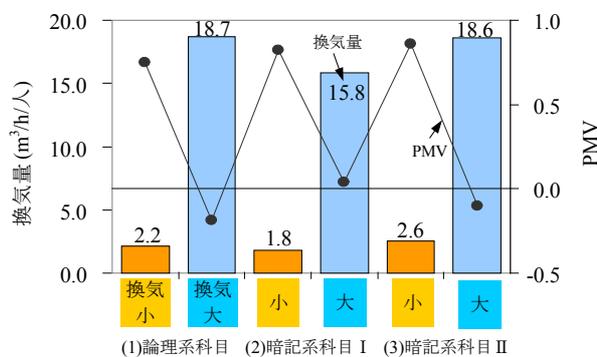


図3. 実測手順



(1)論理系科目 (2)暗記系科目Ⅰ (3)暗記系科目Ⅱ
図4. 一人当たりの換気量ならびにPMV

表5. 温熱環境要素の測定結果(床面より1.1m地点)

環境条件		空気温度 [°C]	放射温度 [°C]	相対湿度 [%]	風速 [m/s]	クロ値 [clo]
論理系科目	(大)	24.2±0.4	24.5±0.4	22±1	0.04±0.04	0.80
	(小)	27.1±0.6	27.0±0.7	35±5	0.07±0.07	0.80
暗記系科目Ⅰ	(大)	25.2±0.6	25.5±0.4	43±1	0.04±0.04	0.65
	(小)	27.3±1.0	27.2±0.8	44±3	0.03±0.02	0.74
暗記系科目Ⅱ	(大)	24.5±1.8	24.8±1.0	42±5	0.07±0.08	0.70
	(小)	28.1±1.1	27.2±1.1	63±3	0.03±0.01	0.54

3.6 統計解析方法

学習効率(テスト点数ならびに主観申告)の環境間比較には、等分散を有意水準 5%で仮定できるものに対しては対応のある t 検定を行う。等分散を有意水準 5%で仮定できない学習効率結果ならびに順位尺度による申告結果の環境条件間比較には、対応のある順位尺度の検定として Wilcoxon の符号付順位和検定を用いる。

4. 学習効率に関する現地実測結果

4.1 物理環境測定結果

(1) 空気環境要素

図4に一人当たりの換気量の測定結果を示す。換気量(大)のケースにおける外気導入量は 1190[m³/h] (=換気回数 3.5 回/h)、換気量(小)のケースにおける外気導入量は 136 [m³/h] (=換気回数 0.4 回/h)となった。換気量を変化させた場合に、粉塵濃度は 0.014[mg/m³]程度で変化しない結果となった。二酸化炭素濃度は換気量(大)で 990±80ppm となり 1000ppm 弱で一定となった。換気量(小)では初期濃度 700ppm から人体起因の二酸化炭素発生により徐々に室内濃度が上昇し、最大で 5000ppm を超える結果となった。平均値±標準偏差は 2800±1400ppm となった。

受講生不在時に行った化学物質の室内空気濃度測定結果は、ホルムアルデヒド 10 μg/m³以下、アセトアルデヒド 12 μg/m³以下など厚生労働省の室内濃度指針値を超える物質はなかった。

空中浮遊真菌、空中落下菌はそれぞれ 10.0[cfu/m³]、1.6[cfu/100cm²]であり、冬期の実測ということもあり室内真菌は殆ど観察されない結果となった。

(2) 温熱環境要素

表 5 に温熱環境要素測定結果を示す。また、図 4 に PMV 算出結果を示す。PMV は代謝量 1.0met とした。着衣量は毎回、その教室内で一般的な着衣量と思われる 2 名を測定者が主観的に選出して着衣を記録し、それに基づき算出した⁷⁾。換気量(小)で PMV が 0.8 程度、換気量(大)で PMV が -0.1 程度となった。換気量(小)では新鮮外気導入量が減少したため、内部の熱負荷(人体ならびに OA 機器)により室温がやや高めに上昇した。換気量(小)では ASHRAE の熱的な快適推奨域をやや外れる結果となった¹⁸⁾。実測対象とした教室の空調システムが定風量吹出方式のため、換気量(外気導入量)の変化により温熱環境も変化し、結果として換気量(大)・(小)で温熱環境が異なる結果となった⁸⁾。

(3) 光・音環境

在室者無しの条件で行った机上面照度は 817 lx、また映像講義がない状態における暗騒音の等価騒音レベルは 46.9 dB であった。

4.2 学習効率評価結果

4.2.1 客観的な学習効率の結果

図 5 に客観的な学習効率(確認テスト)の結果を示す⁹⁾。論理系科目(建築構造分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化することで、有意に 4.7 点向上する結果になった(p<0.03)。換気量(小)の条件の点数を基準として学習効率の向上率を百分率換算すると 5.4% 向上となる。また、暗記系科目 I (計画並びに施工分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化することで有意に 6.4 点向上した(p<0.002)。学習効率の向上率を百分率換算すると 8.7% の向上となる。また、暗記系科目 II (計画分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化することで、有意に 4.6 点向上した(p<0.0007)。学習効率の向上率を百分率換算すると 5.8% の向上となる。

4.2.2 主観的な学習効率の結果

(1) 室内環境が原因でロスした時間

図 6-(1)に「室内環境が原因でロスしたと思う時間」の申告結果を示す。論理系科目では換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化させたことにより、「室内環境が原因でロスしたと思う時間」が有意に 6.8 分減少した(p<0.004)。また、環境の変化による学習効率変化の百分率換算を行うため、講義有効時間を定義する。講義有効時間とは、「講義時間(180 分)」から「ロスしたと思う時間(申告結果)」を差し引くことにより算出した。

換気量(小)の条件の講義有効時間を基準として学習効率(時間換算)の向上率を百分率換算した場合、4.0% 向上となる。暗記系科目 I では換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化したことにより、ロスしたと思う時間が有意に 3.8 分減少した(p<0.04)。学習効率(時間換算)の向上率を百分率換算すると、講義有効時間は 2.2% の向上となる。暗記系科目 II では換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化したことにより、ロスしたと思う時間が有意に 4.7 分減少した(p<0.02)。学習効率(時間換算)の向上率を百分率換算すると、講義有効時間は 2.8% の向上となる。

(2) 環境改善による学習効率の予想向上率

「環境改善による学習効率の予想向上率」申告結果を図 6-(2)に示す。この項目は「室内環境の要因が改善すれば、授業理解のし易さほどの程度向上すると考えられますか? % 向上と思う」と対する申告結果である。論理系科目において換気量(小)から換気量(大)に

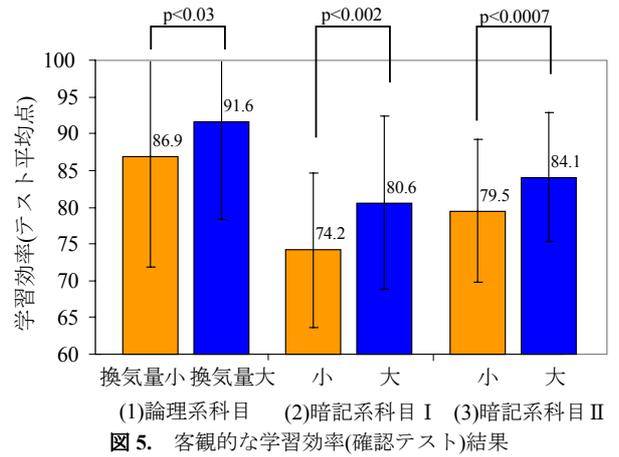


図 5. 客観的な学習効率(確認テスト)結果

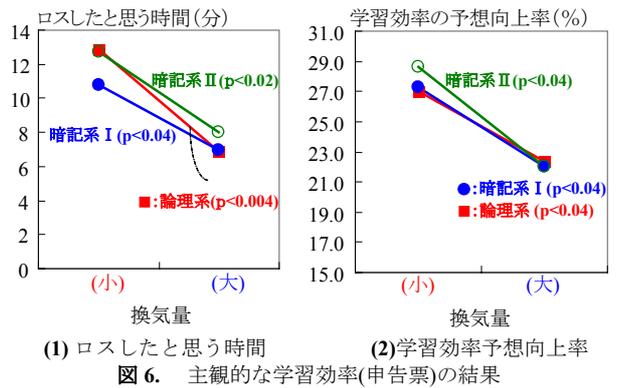


図 6. 主観的な学習効率(申告票)の結果

表 6. 空気環境ならびに温熱環境に関する不満足者率

環境要因	空気環境不満足者率(%)		温熱環境不満足者率(%)	
	換気量小	換気量大	換気量小	換気量大
論理系科目	7.9	11.3	50.0	29.6
	p<0.301(n.s)		p<0.003	
暗記系科目 I	18.1	8.0	44.6	33.0
	p<0.078(n.s)		p<0.171(n.s)	
暗記系科目 II	11.3	9.3	59.7	34.9
	p<0.064(n.s)		p<0.0005	

環境条件を変化させたことにより、予想向上率が有意に 4.6% 低下する結果となった(p<0.04)。言い換えれば、換気量を(小)から(大)に環境改善することにより、学習効率が 4.6% 向上した(p<0.04)と判断することができる。同様に、暗記系科目 I では換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化させたことにより、予想向上率が有意に 5.3% 低下する結果となった(p<0.04)。すなわち学習効率が 5.3% 向上した(p<0.04)。暗記系科目 II では換気量小から換気量大に環境条件を変化したことにより、予想向上率が有意に 6.6% 低下した(p<0.04)。すなわち学習効率が 6.6% 向上した(p<0.04)。

(3) 空気環境ならびに温熱環境に関する不満足者率

空気環境ならびに温熱環境に関する不満足者率を表 6 に示す。空気環境の不満足者率は換気量(小)から換気量(大)に変化することで論理系科目では 2.4% 増加し(n.s)、暗記系科目 I・II ではそれぞれ 10.1%、2.0% 減少した(各 p<0.078, p<0.064)。温熱環境の不満足者率は換気量(小)から換気量(大)に変化することで論理系科目ならびに暗記系科目 II でそれぞれ 20.4%、24.8% 有意に減少した(各 p<0.003, p<0.0005)。暗記系科目 I では 11.6% 減少する傾向となった(n.s)。

4.2.3 学習効率の客観評価と主観評価の整合性の検討

論理系科目、暗記系科目Ⅰならびに暗記系科目について、確認テスト(客観評価)ならびに申告票(主観評価)における学習効率の向上率(%)を図7にまとめて示す。今回の測定では、主観評価は客観評価と比較して相対的に過小評価する傾向となっている。客観評価を基準とした主観評価(講義有効時間ならびに予想向上率)の差異は、平均値(±標準偏差)で-2.4%(±2.2)となった。「予想向上率」による評価と「講義有効時間」による評価では、「予想向上率」を用いた方が客観評価とより対応する結果となった。

5. 学習効率の成績群別検討

被験者群を成績上位群と成績下位群の2群に分けて、温熱・空気環境が学習効率に及ぼす影響を分析する。論理系科目、暗記系科目ⅠならびにⅡのそれぞれにおいて換気量(小)の条件のテスト点数を用いて、平均点以上を成績上位群、平均点以下を下位群に分類した。

5.1 客観的な学習効率の成績群別結果

図8に客観的な学習効率(統一確認テスト)の成績群別結果を示す。論理系科目では、成績上位群で各環境条件での実験結果に有意差は認められず、成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に換気量を増加することで有意に11.2点(17.9%)向上する結果となった($p<0.009$)。また、暗記系科目Ⅰでは成績上位群で有意差は認められず、成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に換気量を増加することで有意に13.7点(19.8%)向上した($p<0.00002$)。暗記系科目Ⅱでは成績上位群で環境条件間に有意差は認められず成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に換気量を増加することで有意に8.6点(12.9%)向上した($p<0.00007$)。

以上の結果より、論理系科目、暗記系科目Ⅰならびに暗記系科目Ⅱの全てにおいて、成績上位群では設定した環境間において学習効率の有意差は認められず、成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に環境が変化することで学習効率が有意に向上する結果となった($p<0.009$)。今回の検討では成績下位群が環境の影響を受けやすい結果となった。

5.2 主観的な学習効率の成績群別結果

5.2.1 室内環境が原因でロスした時間

表7に室内環境が原因でロスした時間の成績群別結果を示す。論理系科目では成績上位群で換気量(小)から換気量(大)に環境を変化することで有意に6.9分減少した($p<0.05$)。成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に改善することで有意に6.9分減少した($p<0.04$)。暗記系科目Ⅰでは成績上位群、下位群ともに環境間に有意差は認められなかった。暗記系科目Ⅱでは、成績上位群における環境条件間での有意差はなく、成績下位群で換気量(小)から換気量(大)に改善することで有意に6.0分減少した($p<0.007$)。

5.2.2 環境改善による学習効率の予想向上率

表8に環境改善による学習効率の予想向上率の成績群別結果を示す。論理系科目ならびに暗記系科目Ⅰでは成績上位群、下位群ともに環境間に有意差は認められなかった。暗記系科目Ⅱでは成績上位群で環境条件間における有意差は認められず、成績下位群では換気量(小)から換気量(大)に改善することで有意に8.2%向上した($p<0.04$)。

以上より、主観評価では客観評価と比較して明確な傾向が見られない結果となった。客観評価で用いた確認テストの平均点と比較して、

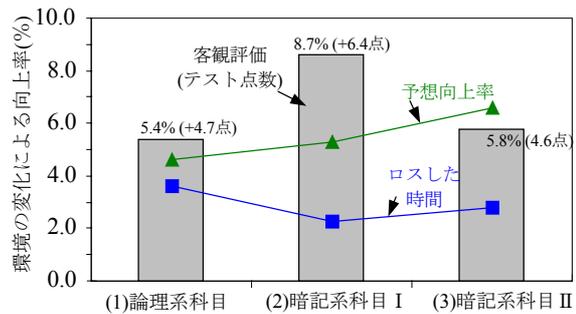


図7. 客観評価と主観評価の対応関係(向上率%)

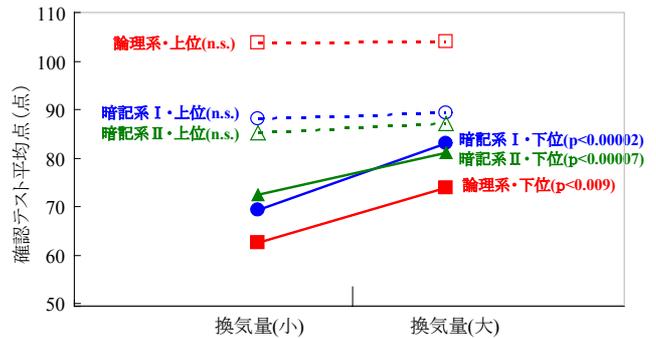


図8. 客観的な学習効率(テスト平均点)の成績群別結果

表7. ロスしたと思う時間(分)の成績群別結果

換気量	成績上位群		成績下位群	
	小	大	小	大
論理系科目	11.7(±10.0)	4.8(±6.6)	13.1(±12.0)	6.2(±7.6)
	$p<0.05$		$p<0.04$	
暗記系科目Ⅰ	12.0(±12.7)	9.0(±8.1)	10.0(±11.1)	5.3(±6.4)
	n.s.		n.s.	
暗記系科目Ⅱ	15.0(±9.9)	11.7(±11.3)	10.9(±9.5)	4.9(±5.0)
	n.s.		$p<0.007$	

表8. 予想向上率(%)の成績群別結果

換気量	成績上位群		成績下位群	
	小	大	小	大
論理系科目	28.3(±27.2)	23.8(±23.1)	25.9(±24.6)	21.2(±18.3)
	n.s.		n.s.	
暗記系科目Ⅰ	28.3(±20.1)	22.7(±20.6)	24.9(±20.4)	18.5(±11.4)
	n.s.		n.s.	
暗記系科目Ⅱ	22.8(±17.0)	17.7(±10.4)	34.6(±25.3)	26.4(±21.5)
	n.s.		$p<0.04$	

「ロスしたと思う時間」や「予想向上率」は申告値に幅があり、即ち、ばらつきが大きかったことが十分な統計的信頼性が確保されなかった原因だと推察される。今回の設問のような数値を自由に申告させる比尺度(ratio scale)による主観評価は、順序尺度(ordinal scale)と比較してより多くのデータ数が必要である可能性が考えられる。

6. 学習効率に関する相関分析

論理系科目ならびに暗記系科目の計3ケースの結果を統合し、独立変数を不満足者率や環境要因、従属変数を学習効率として相関分析を行った^{注10)}。暗記系科目における、空気質に関する不満足者率と確認テスト平均点の相関分析結果を図9に示す。線形近似により $R^2=0.79$ の相関が認められた($p=0.11$)。近似直線は $y = -0.823x + 89.21$ となった。また、図10に暗記系科目における、一人当たりの換気量と確認テ

ト平均点の相関分析結果を示す。対数近似により $R^2=0.74$ の相関が認められた($p=0.15$)。図 11 にエンタルピーと確認テスト平均点の相関分析結果を示す^{註 11)}。対数近似により $R^2=0.59$ の相関が認められた($p=0.08$)。また相対湿度と学習効率の間に対数近似により $R^2=0.61$ の相関が認められた($p=0.067$)。対象教室内の VOC 濃度が知覚されない程度の濃度だったことから、今回の検討では、空気質の不満足要因に相対湿度やエンタルピーといった温熱環境要素が大きく関与している可能性がある。有意な相関分析をするにはデータ数が十分ではないため、今後測定データ数を増やすことが必要である。

7. 考察

不満足者率と学習効率の相関は線形近似、環境要因と学習効率(プロダクティビティ)の相関は対数近似でよく近似できる点は既往研究²⁾と一致している。近似直線の式より、空気質の不満足者率を 10%削減すると学習効率が 9.1%向上する結果となった。また一人当たりの換気量が 1.80[m³/h]から 18.6[m³/h]への増加に対し、確認テスト平均点が 74.2 点から 84.1 点に向上したことから、一人当たりの換気量を約 10 倍にすると学習効率が 13%向上する結果になったといえる。今回対象とした被験者は成人だが、小学校等の学習環境では室内環境に曝露されるのは子どもであり、環境の影響をより大きく受けると考えられる¹⁴⁾。また一般的な学校では、温熱・空気環境の質が教師に対しても悪影響を及ぼすことが考えられ、結果として教授レベルが低下することを考慮に入れば、学習効率の低下は今回の検討結果よりさらにも大きくなる。

本実測で得られた結果と既往の実測結果を比較する。以下コールセンターにおける検討をレビューする。Wargocki らの温熱・空気環境に関する実測では換気量 10 倍で 6%、室温 2 度低下で 9%の作業効率向上という結果を得ている^{3, 19)}。また小林・田辺らは室温の低下 1℃あたり 2.1%の作業効率向上を報告している²⁰⁾ことから室温 2 度低下で 4.2%の作業効率低下になる。Tham らは 2℃の低下で約 6%の低下を報告している²¹⁾。

これらの結果から環境要因の単独影響と複合影響に関して予備的に検討する。上述の実測の空気環境と温熱環境の結果を加算すると 10-15%となり、本実測の 13%向上と同程度の向上率となる。今回の検討において、設定した範囲における温熱・空気環境の複合影響は線形モデルであることが推察される。

8. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化させたことで、客観的な学習効率(確認テスト平均点)が論理系科目で有意に 4.7 点(5.4%) 向上し($p<0.03$)、暗記系科目 I で有意に 6.4 点(8.7%) 向上し($p<0.002$)、暗記系科目 II で有意に 4.6 点(5.8%) 向上した($p<0.0007$)。
- (2) 換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化させたことで、主観的な学習効率が 2.2%~6.6%有意に向上した($p<0.04$)。
- (3) 学習効率の客観評価と主観評価はよく対応する関係にあるが、主観評価がやや過小評価する傾向となった。客観評価を基準としたときの差異は-2.4%(±2.2)となった。
- (4) 成績群別に分析した結果、換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化させたことで、成績上位群で学習効率に有意な差は見られず、

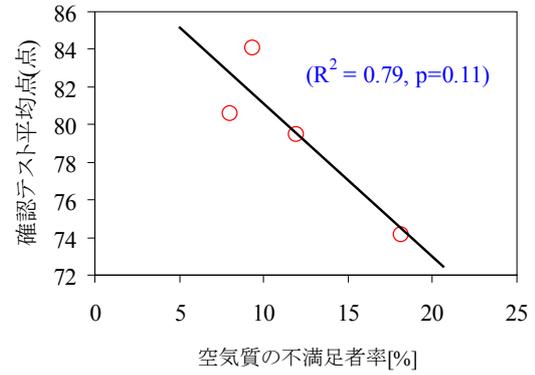


図 9. 空気質不満足者率と確認テスト平均点の関係

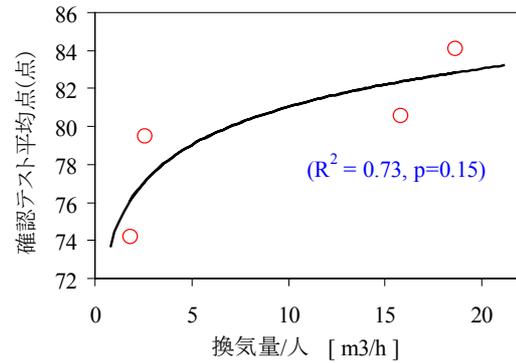


図 10. 一人当たりの換気量と確認テスト平均点の関係

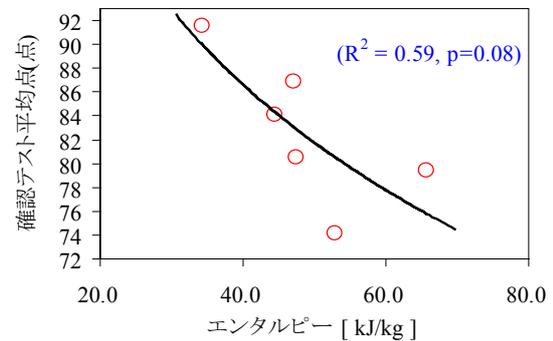


図 11. エンタルピーと確認テスト平均点の関係

成績下位群では 17.9%~19.8%有意に向上($p<0.009$)したことから、今回の検討では成績下位群が環境の影響を受けやすい結果となった。

- (5) 空気質の不満足者率、換気量、エンタルピーや相対湿度と学習効率の間に相関傾向が確認された(それぞれ $R^2=0.79(p=0.11)$, $R^2=0.74(p=0.15)$, $R^2=0.59(p=0.08)$, $R^2=0.61(p=0.067)$)。相関分析をするにはデータ数が十分でないため、今後データの蓄積が必要である。
- (6) 本実測では、換気量(換気回数)を変化させた場合の学習効率に与える影響を主な検討課題としたが、一般的な空調システムを対照としたため換気量の変化に伴い温熱環境も変化している。学習効率に対して、空気環境と温熱環境のどちらの影響が卓越しているかに関して、実験室での被験者実験により今後詳細に検討する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり日建学院 西生一次氏、井澤真悟氏、東京工業大学 仙田満教授に多大なご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。また、実測にご協力いただいた大成建設(株) 森川泰成氏、樋渡潔氏、慶応大学 亀田健一氏、島崎祐輔氏、東急建設(株) 原祥子氏(当時慶大)にお礼申し上げます。被験者としてご協力下さった方々に感謝致します。また、本研究の結果並びに考察に関して、空気調和・衛生工学会ワークプレイスプロダクティビティ小委員会(委員長 慶応大学 村上周三教授、副委員長 千葉大学 川瀬貴晴教授)のメンバーよりご助言頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

注

- 注1)本研究では、室内環境の質が、授業理解度ならびに確認テストの解答に及ぼす影響を検討することを研究対象としている。
- 注2)環境条件名として、便宜的に「換気量(大)」、「換気量(小)」というケース名にした。「換気量(小)」は一人当たりの換気量が2.0[m³/h]でやや暖かい環境、「換気量(大)」は一人当たりの換気量が18.0[m³/h]で熱的に中立な環境の環境条件となっている。環境操作要因として換気量を変化させたが、換気量(小)では新鮮外気導入量が減少したために、内部の熱負荷(人体ならびにOA機器)により室温がやや高めに上昇し、「換気量(大)」、「換気量(小)」では空気環境に加えて温熱環境も変化している。
- 注3)空調はビルマルチで、実測期間中は常に運転した。主に冬季の定風量吹出方式を対象とした設定とし、3月(論理系科目)は暖房モード、4月以降(暗記系科目)は冷房モードとした。
- 注4)曜日、時間帯等による、さらには個人に特有の、体調のリズム。
- 注5)日建学院の昨年度の平均点データは母集団が極めて多い(約10,000人)ためテストの難易度を代表するものとみなした。
- 注6)設問文と評価スケールを示す。①体調：過去1年間で最も調子の良かった体調状態を100%として、現在の体調を相対値でお答え下さい。；%程度 ②既習率：今日のテストの設問のうち、授業を受ける前から覚えていた内容は何%程度ありましたか？；%程度 ③興味度：今日の授業内容の興味度はどの程度でしたか？；(1.全く興味がない 2.興味がない 3.どちらともいえない 4.興味がある 5.大変興味がある) ④着衣量：他の方と比べて着衣量はいかがですか？；(1.薄着、2.普通、3.厚着)
- 注7)着衣量は毎回、その教室内で一般的な着衣量と思われる1名を、3名の測定者がそれぞれ主観的に判断して選出し着衣を記録した。着衣量算出結果は3名の着衣記録の平均値であります。また、着衣量に関する設問^{注6)}に対して全ての実測日において毎回8割以上が「2.普通」を選択する結果を得た。
- 注8)換気量(小)では新鮮外気導入量が減少したため、内部の熱負荷(人体ならびにOA機器)により室温がやや高めに上昇した。
- 注9)学習効率に大きな影響を及ぼすと考えられる①体調(%)②既習率(%)③講義に対する興味度に関して申告票データより1σでスクリーニングを行い、信頼性の高い被験者データのみを採用した。また、各ケースにおいてスクリーニングの過程で対にならなくなった被験者データも破棄した。
- 注10)不満足者率と学習効率の関係は、不満足者数の減少に比例して集団の学習効率の平均値が向上すると考えられるため線形近似を選択した。一方物理想と学習効率の関係は、ある室内環境レベルを超えると学習効率の向上率は頭打ちになると考えられるため、そのような形状である対数近似を選択した。両者とも既往のプロダクティビティデータの散布形状を参照した²⁾。
- 注11)図9～11において図11のみ論理系科目ならびに暗記系科目Ⅰ・Ⅱの計6ケース分のプロットである。今回は相関分析を行うためにはデータ数が十分でなく、強い相関関係が得られたものを予備的な検討として示した。

本研究に関する既発表論文

本報で報告する内容は以下の既発表論文の内容に加え、新たな実測結果、分析結果を加えてまとめたものである。

- 金子隆昌、村上周三、伊藤一秀、深尾仁：学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その1)室内環境の質と学習効率の関係に関する予備的実測、建築学会関東支部研究報告集、pp533-536、2005.3
- 原祥子、村上周三、金子隆昌、伊藤一秀、深尾仁、樋渡潔：(その2)温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響に関する被験者実験、建築学会関東支部研究報告集、pp537-540、2005.3
- 原祥子、村上周三、金子隆昌、伊藤一秀、深尾仁、樋渡潔：(その3)被験者実験による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討、建築学会関

東支部研究報告集、pp541-544、2005.3

- 金子隆昌、村上周三、伊藤一秀、深尾仁：(その4)教室における温熱・空気環境が学習効率に及ぼす影響の被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005.9
- 原祥子、村上周三、金子隆昌、伊藤一秀、深尾仁、樋渡潔：(その5)被験者実験による教室における学習効率に関する主観・客観評価の詳細分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005.9
- 金子隆昌、村上周三、伊藤一秀、深尾仁：(その6)現地実測による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、2005.8

参考文献

- 村上周三：空気調和・衛生工学会シンポジウム「オフィスの知的生産性研究の最前線」Productivity in Work place, pp1-9, 2005.4
- Pawel Wargocki, David P. Wyon and P. Ole Fanger: POLLUTION SOURCE CONTROL AND VENTILATION IMPROVE HEALTH, COMFORT AND PRODUCTIVITY, Proceedings of the Third International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning, pp445-450, 2000.11
- Pawel Wargocki: 空気調和・衛生工学会シンポジウム「オフィスの知的生産性研究の最前線」、INDOOR AIR QUALITY EFFECTS ON OFFICE WORK, pp39-65, 2005.4
- Olli Seppanen, and William J. Fisk: A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control, Proceedings of ASHRAE(Denver), 2005.8
- S Tanabe: PRODUCTIVITY AND INDOOR CLIMATE, Proceedings of Indoor Air 2005, pp56-64, 2005.9
- Guzzo, R.A. and Bondy J. S.: A guide to productivity experiments in the United States 1976-1981(Pergamon, New York), 1983
- Mayo, E: The social problems of an industrial civilization (Harvard University School of Business, Cambridge, MA), 1945
- 岩下剛、花田良彦、合原妙美：室温の違いが作業効率に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、No.585、pp55-60、2004.11
- 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 No.568、pp33-39、2003.06
- 秋元孝之、松田順平、西原直枝、田辺新一：日本建築学会環境系論文集、No.582 P.75-82、2004.8
- 橋本哲、寺野真明、杉浦敏浩、中村政治、川瀬貴晴、近藤靖史：室内環境の改善によるプロダクティビティ向上に関する調査研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.93、pp67-76、2004.4
- M. J. Mendell, and G. A. Heath: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, *Indoor Air*, Vol.15 (1), pp27-52, 2005.1
- Wyon, D.P. The mental performance of subjects clothed for comfort at two different air temperatures, *Ergonomics*, 18, 359-374, 1975
- Pawel Wargocki, David P. Wyon, B Matysiak and S Irgens: THE EFFECTS OF CLASSROOM AIR TEMPERATURE AND OUTDOOR AIR SUPPLY RATE ON THE PERFORMANCE OF SCHOOL WORK BY CHILDREN, Proceedings of Indoor Air 2005, pp368-372, 2005.9
- R Shaughnessy, U Haverinen-Shaughnessy, A Nevalainen, D Moschandreas: CARBON DIOXIDE CONCENTRATIONS IN CLASSROOMS AND ASSOCIATION WITH STUDENT PERFORMANCE: A PRELIMINARY STUDY, Proceedings of Indoor Air 2005, pp373-376, 2005.9
- 寺野真明、橋本哲、杉浦敏浩、増田弘子、中村政治、近藤靖史、川瀬貴晴：室内環境の改善によるプロダクティビティ向上に関する調査研究(第6報)標準的な主観評価票に関する提案、空気調和・衛生工学会学術講演大会論文集、pp637-640、2004.9
- 空気調和・衛生工学会規格-SHEASE-S 116-2003 トレーサーガスをを用いた単一空間の換気量測定方法、2004.4
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 2005: ASHRAE Fundamentals-Handbook (SI), 2005
- Pawel Wargocki, David P. Wyon, Yong K. Baik, Geo Clausen and P. Ole Fanger: Perceived Air Quality, Sick Building Syndrom(SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads, *Indoor Air*, 1999.9
- 小林弘造、北村規明、田辺新一、西原直枝、清田修、岡卓史：コールセンターの室内環境が知的生産性に与える影響、空気調和・衛生工学会学術講演大会論文集、pp2053-2056、2005.9
- K.W. Tham and H.C. Willem: Temperature and Ventilation Effects on Performance and Neurobehavioral-Related Symptoms of Tropically Acclimatized CallCenter Operators Near Thermal Neutrality, Proceedings of ASHRAE, 2005.8