

実験室実験による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討

- 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2) -

Experiment on Thermal / Air Environment Effects on Academic Performance Study on the Productivity in Classroom (Part 2)

金子隆昌^{*}, 村上周三^{**}, 伊藤一秀^{***}, 深尾仁^{****} 樋渡潔^{*****}, 亀田健一^{*****}

Takamasa KANEKO, Shuzo MURAKAMI, Kazuhide ITO, Hitoshi FUKAO Kiyoshi HIWATASHI, Kenichi KAMEDA

This paper (Part 2) reports on the realistic simulation experiment using climate chamber, focusing on varying air change rate as in the field test, and the consistency of the climate chamber experiment and the field test. Physical environment and academic performance evaluation methods of the climate chamber experiment are quite the same as those of the field test. In the result of the climate chamber experiment, correlation analyses show that lower air change rates link to reduced academic performance ($R^2 = 0.74$, $p = 0.03$). In this study, the consistency of the climate chamber experiment and the field test was confirmed. Therefore, when the result of the test and the climate chamber experiment is used, the correlation analysis shows that there is a correlation between the academic performance and air change rate ($R^2 = 0.82$, $p = 0.002$).

Keywords: Productivity, Academic performance, Schools, Laboratory experiment, Air environment, Thermal environment

プロダクティビティ, 学習効率, 学校, 実験室実験, 空気環境, 温熱環境

1. はじめに

近年、オフィスや学校等の室内環境の質とプロダクティビティ(作業効率や学習効率)の関係に注目が集まっており、特にプロダクティビティ向上と室内環境質の定量的な関係性、ならびにその潜在的価値の評価が強く求められている^{1, 2)}。学校を中心とした学習環境を対象とした場合、室内環境に曝露される対象が子どもとなる。一般に子どもは大人よりも環境の影響を大きく受ける³⁾ことや、さらには教室の温熱・空気環境がオフィス環境よりも劣る場合が多い⁴⁾ため、これらの環境による健康被害や学習効率の低下は、多大な不利益をもたらすことが懸念されている。

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、人間の心理量の影響が相対的に大きく^{5, 6, 7)}、またその評価方法が十分に確立されていない^{8, 9)}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¹⁰⁾。学校の資金不足に加えて、上述のように室内環境の質と学習効率に関する科学的な根拠の不足が原因となり、学習効率向上を目指した学校の室内環境質の改善に関する取り組みは殆ど行われていないのが現状である³⁾。

このような背景のもと、本研究は学習環境を対象として学習効率^注に着眼したプロダクティビティの総合的な検討を行うもので、現地

実測と実験室実験の2つのアプローチにより学習効率の評価を試みる^{注2)}。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り、現地実測において環境条件が曖昧になりがちな点や測定・評価項目が制限されがちな点に関して実験室実験のデータにより補うことが可能である。現地実測と実験室実験の2つのアプローチで研究を進めることで、室内環境の質と学習効率の関係に関して多角的な考察を可能とする。既報(その1)¹⁾では、本研究の全体概要と現地実測の結果に関して報告した。本報(その2)では現地実測条件とほぼ同一の教室空間を再現し、かつ全く同一の学習効率評価方法を採用した実験室実験により、換気量(外気導入量)の多寡が学習効率に及ぼす影響を定量的に検討する。特に、限りなく同一条件で実施した現地実測と実験室実験の結果から、両手法によるプロダクティビティ評価に関して整合性の検討を行うとともに、得られた知見から室内環境の質が学習効率に及ぼす影響を総合的に考察・検討する。

本研究で示す現地実測と実験室実験の整合性に関する知見はプロダクティビティ研究の分野において有用なデータとなると考えられる。

* (株)久米設計(当時慶應義塾大学大学院)

修士(工学)

KUME SEKKEI Co., Ltd., M. Eng.

** 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(株) 技術センター

部長・博士(工学)

General Manager, Tech. center, TAISEI CORPORATION, Dr. Eng.

***** 大成建設(株) 技術センター

主任研究員・博士(工学)

Chief Researcher, Tech. center, TAISEI CORPORATION, Dr. Eng.

***** 慶應義塾大学

大学院生

Graduate student, Keio Univ.

2. 学習効率に関する実験室実験の概要

既報(その1)で報告した、現地実測¹¹⁾にて対象とした資格受験対策予備校(日建学院)の教室環境、授業システムならびに学習効率評価方法を厳密に再現した実験室実験を行う。現地実測と同様に換気量の差異に着目し、現地実測の際の物理環境を再現して温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響を実験室実験にて追試する。実測では詳細な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の詳細な検討(第1被験者実験)に加え、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(第2被験者実験)を行う。また実施が容易であり、プロダクティビティデータの収集性などに優れた学習効率の主観評価(アンケート形式)の信頼性の検討も行う¹⁰⁾。実験室実験の様子を図1(1)に示す。

2.1 現地実測期間・場所

第1被験者実験は2005年10月3日～11月9日、第2被験者実験は2004年11月8日～17日にかけて大成建設空調システム実験室にて行った。恒温実験室の概要(レイアウト)を図1(2)に示す^{注3)}。空調方式は定風量の天井吹出、天井吸込であり、吹出風量に含まれるレターンエアーの割合を変えて換気量(外気導入量)の変更を行う。

2.2 実験室実験の設定条件

実験室内の環境条件を表1に示す。現地実測と同様に温熱・空気環境の質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たことを想定した実験室実験を行う^{注4)}。現地実測の教室内環境を再現するため、換気量に加えて温熱環境も変化させる。全被験者を被験者群A・Bの2群に分け、実験経回数ならびに環境曝露順序の影響を相殺することを目的として、被験者群Aと被験者群Bで対になるように実験ケースを設定する。現地実測による学習効率の評価との整合性を検討するための第1被験者実験では現地実測の物理環境、特に温熱・空気環境を厳密に再現する設定とする。現地実測において実測対象日の外気条件や在室者数が毎回異なっていたために一人当たりの換気量ならびに室内温熱環境条件も実測対象日毎に異なる。第1被験者実験ではそのような現地実測の室内温熱・空気環境ならびに人員密度(0.46人/m³)を厳密に再現する。また第2被験者実験は換気量の増加率を第1被験者実験より大きく変化させる設定とする^{注5)}。また、講義として提供する科目は、第1被験者実験では現地実測の2005年度の暗記系科目(建築計画、建築施工分野)を採用し、とに分類した。第2被験者実験は2004年度の講義ならびに確認テスト(建築計画分野)を採用し、換気量の増加率が大きいことから、暗記系科目(+)とした。暗記系科目ならびに(+)では、講義内容ならびに確認テストの問題の内容はほぼ同一である。また、被験者のサーカディアンリズムに配慮し、実験は同一曜日・時間帯に行う。

2.3 被験者

被験者は建築系学科に通う大学生ならびに大学院生であり、第1被験者実験では56名(男性34名、女性22名)、第2被験者実験では39名(男性20名、女性19名)である。対象とする学生は第1被験者実験ならびに第2被験者実験ともに同じ母集団(基本的に特定の大学)から無作為に抽出する。建築系学科の学生を採用し、現地実測の被験者(一般受講生)の動機付けを再現するよう配慮した。ブラインド試験を前提として、被験者には換気量変化を含め、室内の物理環境条件を変化させることは告知しない^{注6)}。

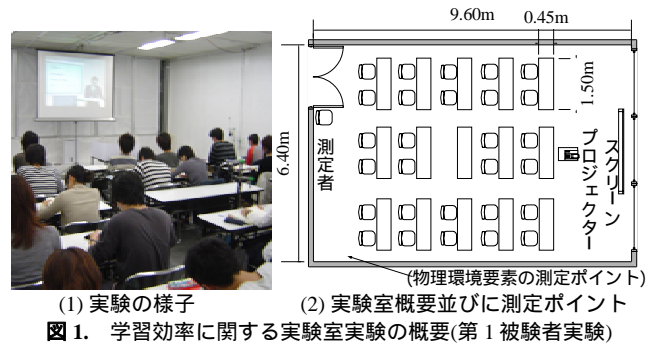


図1. 学習効率に関する実験室実験の概要(第1被験者実験)

表1. 実験室実験の環境設定条件

講義科目		被験者群 A 月曜	被験者群 B 水曜
第1被験者実験 (暗記系科目)	計画	換気量(小)	換気量(大)
	施工	換気量(大)	換気量(小)
第1被験者実験 (暗記系科目)	計画	換気量(大)	換気量(小)
	計画	換気量(小)	換気量(大)
第2被験者実験 (暗記系科目 (+))	計画	換気量(小)	換気量(大+)
	計画	換気量(大+)	換気量(小)

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
(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	机上面照度
(4)音環境要素	等価騒音レベル

2.4 測定項目

2.4.1 教室内物理環境の測定

(1) 空気環境要素の測定

表2に示す空気環境要素に関して測定を行う。測定方法に関しては既報(その1)¹¹⁾を参照のこと。

(2) 温熱環境要素の測定

実験室実験の期間中に室内の9地点(図1(2)中の位置)において空気温度、風速、相対湿度、放射温度を連続測定する。測定手順ならびに測定器具は現地実測と同様である。その他、音環境、光環境の測定も行う。表2に物理環境測定項目を併せて示す。

2.4.2 学習効率の評価

(1) 客観的な学習効率の評価

現地実測の暗記系科目と全く同一の映像講義(DVD)と講義内容の理解度を問う統一確認テストを用い、確認テストの点数により客観的な学習効率を評価する^{注7)}。対象とする映像講義の科目は第1被験者実験では現地実測と全く同一の暗記系科目4科目を採用、第2被験者実験では暗記系科目と同等の科目を採用(暗記系科目(+))。

(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3に示す。申告票の項目¹²⁾は、既報(その1)に加えて、表4に示すように各環境要因の構成要素に関して詳細に検討する。また、学習効率に大きな影響を及ぼすと考えられる体調、興味度、既習率なども併せて評価する^{注8)}。

2.5 実験室実験の手順

図2に1回の講義進行と実験手順を示す。実験室実験は日建学院に

表3. 学習効率の主観評価に関する申告票の一部

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。

室内の空気の汚れが気になりますか？

： 気になる やや気になる あまり気にならない 気にならない 感じられない

上記のように感じているこの教室の空気環境は全体としていかがですか？

： 不満 やや不満 どちらともいえない やや満足 満足

上記のように感じているこの教室の空気環境はあなたの授業理解のしやすさにどのような影響を与えていると思いますか？

： 低下させている やや低下させている 影響しない やや高めてくれる 高めてくれる

表4. 申告票の評価項目の概要と評価スケール〔()内〕

2. 個人的要因	体調(0~100) 最後に食事を取ってからの時間()分 など
3. 光・視環境	余計なものや動きの気になる程度(5) 満足度(5) 講義内容の理解度への影響(5)
4. 温熱環境	温冷感(7) 湿度感(7) 気流感(5) 放射熱の感覚(5) 上下温度差(5) 快適感(5) 満足度(5) 講義内容の理解度への影響(5)
5. 空気環境	空気の汚れ(5) 空気の淀み(5) におい(5) ほこりっぱさ(5) 満足度(5) 講義内容の理解度への影響(5)
6. 音環境	満足度(5) 講義内容の理解度への影響(5)
7. 空間環境	満足度(5) 講義内容の理解度への影響(5)
8. 受講状態等	確認テストに対する既習率(0~100) 講義内容の興味度(5) 室内環境が原因で講義内容の理解に対して口しまったと思う時間()分 現状の室内環境が改善された場合の講義内容の理解度の予想向上率()% など

おける現地での講義進行スケジュールに準拠した。講義開始時刻を14:00からとし、180分間の講義後(17:10)、30分の確認テストを行い、引き続き、申告表の記入を行う。180分の講義中、5分程度の休憩を3回設定した。なお13:30から30分間を環境順化時間とした。

2.6 統計解析方法

既報(その1)と同様に、学習効率(テスト点数と主観申告)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関しては対応のある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。

3. 学習効率に関する実験室実験結果

3.1 物理環境測定結果

(1)空気環境要素

1) 第1被験者実験の結果 暗記系科目 の換気量(大)のケースでは、外気導入量が458m³/h (=換気回数2.7回/h)、換気量(小)のケースでは78m³/h (=換気回数0.5回/h)となった。また暗記系科目 における換気量(大)のケースでは外気導入量が539m³/h (=3.1回/h)、換気量(小)のケースは78m³/h (=0.5回/h)となった。図3にひとり当たりの換気量m³/h/人の測定結果を示す。暗記系科目 では、換気量(大)のケースで19.0m³/h/人、換気量(小)のケースで2.5m³/h/人、暗記系科目 では、換気量(大)のケースで19.0m³/h/人、換気量(小)のケースで2.4m³/h/人となった。ここで現地実測における換気量測定結果と比較すると、一人当たりの換気量は暗記系科目 の換気量(小)で0.7m³/h程度多くなったものの、暗記系科目 でよく再現されている。二酸化炭素濃度は暗記系科目 の換気量(大)で平均値±標準偏差は980±23ppmとなり1000ppm弱で一定となった。換気量(小)では環境順化時間において人体起因の二酸化炭素発生により室内濃度が上昇し、初期濃度(講義開始時)が2500ppmとなり、その後も徐々に上昇し、最大で3500ppmを超える結果となった。平均値±標準偏差は2940±670ppmとなった。暗記系科目 の換気量(大)では1000ppm弱で一定(930±20ppm)となった。換気量(小)でも暗記系科目 と同様に初期濃度2500ppmから徐々に室内濃度が上昇し、最大で3700ppmを超える結果となった。平均値±標準偏差は2800±280ppmとなった。現地実測の二酸化炭素濃度の

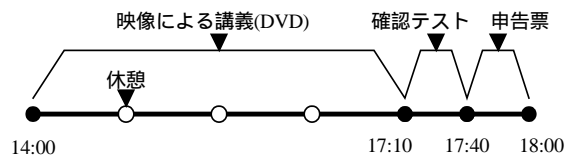


図2. 実験室実験の手順

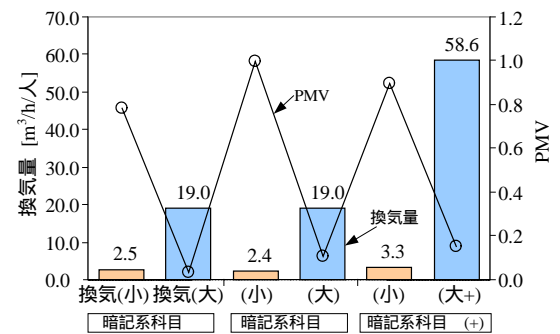


図3. ひとり当たりの換気量ならびにPMV

測定結果と平均値はよく対応している。濃度の時系列変化では換気量(小)条件において、講義開始時における初期濃度が現地実測より高く、最高濃度は現地実測より低い結果となった。

2) 第2被験者実験の結果 暗記系科目 (+)の換気量(大+)のケースでは外気導入量が1230m³/h (=7.2回/h)、換気量(小)のケースでは69m³/h (=0.4回/h)となった。また、一人あたりの換気量は換気量(大+)のケースで58.6m³/h/人、換気量(小)のケースで3.3m³/h/人となった。二酸化炭素濃度測定結果は換気量(大+)で785±15ppm、換気量(小)で1700±370ppmとなった。初期濃度1500ppmから徐々に増加し、最大で2800ppmを超えた。

その他、換気量を変化させた場合においても、粉塵濃度は0.012mg/m³程度で変化しない結果となった。また、被験者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64μg/m³以下、アセトアルデヒド26μg/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。

(2) 温熱環境要素

表5に代表して被験者群Aにおける温熱環境要素測定結果をまとめ

て示す⁹⁾。なお被験者群 B の測定結果もほぼ同様である¹¹⁾。現地実測における温熱環境を厳密に再現できていることが確認された。また、図 3 に PMV 算出結果を示す。PMV は代謝量 1.0met、被験者の着衣量は現地実測を再現し、0.7 及び 0.5clo とした。換気量(小)で PMV が 1.0 程度、換気量(大)で PMV が 0.0 程度となった。現地実測における空調システムを模擬し、換気量(大)・(小)で温熱環境を変化させたが、この制御も現地実測を十分に再現できていることを確認した¹¹⁾。

(3) 光・音環境

在室者無しの条件で行った机上面照度は 611(±19.1) 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 44.1 dB であった。現地実測と比較すると机上面照度は 200 lx 程度低く、等価騒音レベルはほぼ同等となった。

3.2 学習効率評価結果

3.2.1 客観的な学習効率の結果

図 4 に客観的な学習効率(統一確認テスト)の結果を示す^{注 10)}。第 1 被験者実験(暗記系科目 : 計画並びに施工分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化することで、3.8 点向上する結果になった(n.s.)。換気量(小)の条件のテスト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 10.0% 向上となる。また、第 1 被験者実験(暗記系科目 : 計画分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境が変化することで 3.8 点向上した(p<0.09)。学習効率の向上率を百分率換算すると 7.7% の向上となる。また、第 2 被験者実験(暗記系科目(+) : 計画分野)では、換気量(小)から換気量(大)に環境が変化することで、4.4 点向上した(p<0.06)。学習効率の向上率を百分率換算すると 9.1% の向上となる。また、暗記系科目 が暗記系科目 ・ (+) よりテスト平均点が低い結果となった。原因の一つとして、暗記系科目 (施工 , 計画) の興味度が暗記系科目 ・ (+)(計画) と比較して有意に小さかったことが挙げられる(p<0.01)。暗記系科目 と ・ (+) の間で体調や既習率に有意な差はなかったことから暗記系科目 の学習効率が低かった主な要因は興味度が低かったことと推察される。

3.2.2 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 5(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。第 1 被験者実験()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 13.6 分減少した(p<0.04)。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。

第 1 被験者実験()では換気量(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、9.7% 向上となる。第 1 被験者実験()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 34.8 分減少した(p<0.00001)。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 27.5% の向上となる。第 2 被験者実験(+)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 26.6 分減少した(p<0.0003)。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 19.4% の向上となる。

(2) 現状の室内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 5(2)に示す。

表 5. 温熱環境要素の測定結果(室中央 FL+1.1m・被験者群 A)

環境条件	空気温度 []	放射温度 []	相対湿度 [%]	風速 [m/s]	着衣 [clo]
(小)	27.7 ± 0.1	27.8 ± 0.1	42 ± 1	0.12 ± 0.05	0.7
(大)	25.5 ± 0.1	25.7 ± 0.1	42 ± 1	0.17 ± 0.05	0.7
(小)	28.7 ± 0.1	28.8 ± 0.1	57 ± 1	0.13 ± 0.04	0.5
(大)	25.8 ± 0.2	25.9 ± 0.2	38 ± 1	0.14 ± 0.07	0.7
(小)	27.1 ± 0.1	27.6 ± 0.1	60 ± 1	0.01 ± 0.01	0.7
(大+)	25.1 ± 0.2	25.1 ± 0.2	48 ± 1	0.07 ± 0.05	0.7

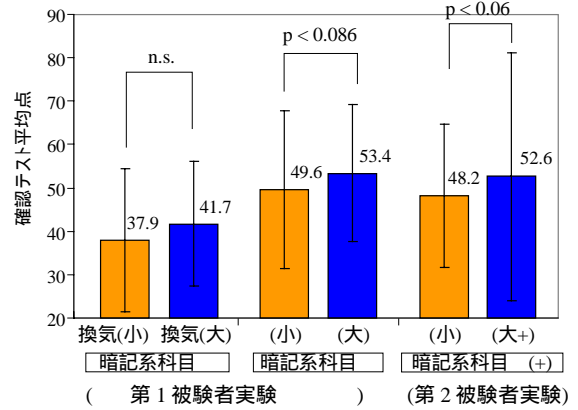
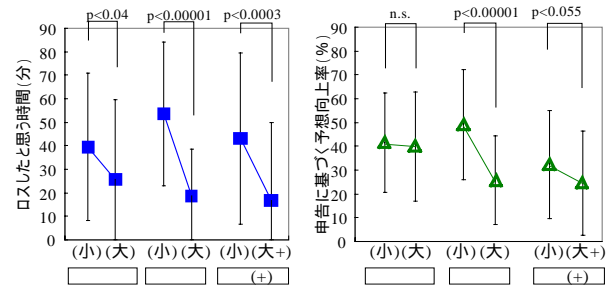


図 4. 客観的な学習効率(確認テスト)結果



(1) ロスしたと思う時間 (2) 学習効率の予想向上率
図 5. 主観的な学習効率の結果

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
暗記系科目	59.0	17.9	33.3	30.8
	p<0.00001		n.s.	
暗記系科目	59.0	21.1	87.2	28.9
	p<0.00001		p<0.00001	
暗記系科目(+)	61.3	3.2	80.6	12.9
	p<0.00001		p<0.00001	

第 1 被験者実験()において換気量(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 1.6% 低下する結果となった(n.s.)。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 1.6% 向上した(n.s.)と判断することができる。第 1 被験者実験()では換気量(小)から換気量(大)の環境条件の変化により、予想向上率が有意に 23.4% 低下する結果となった(p<0.00001)。すなわち学習効率が 23.4% 向上した(p<0.00001)。第 2 被験者実験(+)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 7.9% 低下した(p<0.055)。すなわち学習効率が 7.9% 向上した(p<0.055)。

(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の結果を表 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)に環境条件を変化することで第1被験者実験()では有意に41.0%減少し(p<0.00001)、第1被験者実験()では有意に37.9%減少した(p<0.00001)。第2被験者実験(+)では有意に58.1%減少した(p<0.00001)。温熱環境の不満足者率は換気量(小)から換気量(大)に変化することで第1被験者実験()では2.6%減少し(n.s.)、第1被験者実験()では有意に58.2%減少し(p<0.00001)した。また、第2被験者実験(+)では有意に67.7%減少した(p<0.00001)。

3.2.3 学習効率の客観評価と主観評価の整合性の検討

第1被験者実験()、第1被験者実験()ならびに第2被験者実験(+)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6にまとめて示す。今回の測定では客観評価を基準とした、主観評価(講義有効時間と予想向上率)との差異は、平均値(±標準偏差)で+6.0%(±10.1)となった^{注1)}。換気量に関する環境条件の対比較における学習効率の向上率は「予想向上率」による評価では平均で11.0%、「講義有効時間」による評価では平均で18.9%となり、「予想向上率」を用いた方が客観評価(平均8.9%)とより対応する結果となった。

4. 学習効率に関する成績群別の検討

被験者群を既報¹⁾と同様に成績上位群と成績下位群の2群に分けて^{注2)}、温熱・空気環境が学習効率に及ぼす影響を分析する。

4.1 客観的な学習効率の成績群別結果

表7に客観的な学習効率(確認テスト)の成績群別結果を示す。第1被験者実験()では、成績上位群で換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化することでテストの点数に有意差は認められず、成績下位群では環境条件間で有意に17.8点(68.2%)向上する結果となった(p<0.00001)。また第1被験者実験()では成績上位群でテストの点数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)に環境条件を変化することで有意に12.0点(35.8%)向上した(p<0.02)。第2被験者実験(+)では成績上位群・下位群ともに環境条件間におけるテスト点数に有意差は認められなかった。第2被験者実験(+)は第1被験者実験()よりも被験者数が少なかったことが十分な統計的信頼性得られなかった一つの要因であると考えられる。

以上の結果より第1被験者実験()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)に環境条件が変化することで学習効率に有意に向上する結果となった(p<0.02)。今回の被験者実験による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。

4.2 主観的な学習効率の成績群別結果

4.2.1 室内環境が原因でロスした時間

表8に「室内環境が原因でロスしたと思う時間」の成績群別結果を示す。第1被験者実験()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7.0分減少した(n.s.)。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20.5分減少した(p<0.05)。第1被験者実験()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30.7分減少した(p<0.003)。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39.4分減少した(p<0.0005)。第2被験者実験(+)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25.0分減少した(p<0.003)。

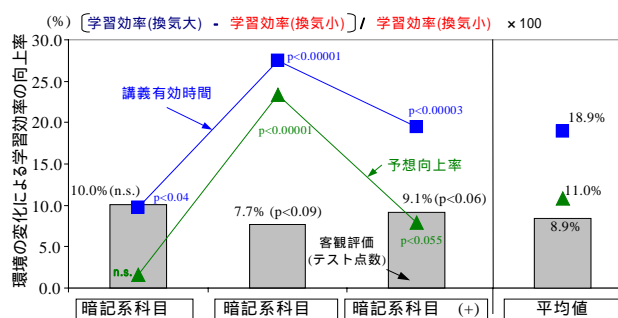


図6. 客観評価と主観評価の対応関係(向上率%)

表7. 客観的な学習効率(テスト平均点)の成績群別結果

換気量	成績上位群		成績下位群	
	小	大	小	大
暗記系科目	49.1(±14.7)	39.7(±14.5)	26.0(±7.1)	43.8(±15.0)
	n.s.		p<0.00001	
暗記系科目	65.0(±8.2)	61.0(±10.5)	33.4(±9.7)	45.4(±16.4)
	n.s.		p<0.02	
暗記系科目(+)	60.2(±9.1)	65.1(±8.5)	35.3(±7.7)	39.3(±14.1)
	n.s.		n.s.	

表8. 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
暗記系科目	34.0(±29.1)	27.0(±31.4)	45.3(±32.4)	24.7(±36.4)
	n.s.		p<0.05	
暗記系科目	47.9(±32.8)	17.3(±17.9)	60.0(±26.3)	20.6(±22.1)
	p<0.003		p<0.0005	
暗記系科目(+)	43.4(±20.5)	18.4(±23.6)	43.0(±47.8)	14.7(±22.2)
	p<0.003		p<0.06(n.s.)	

表9. 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
暗記系科目	40.8(±19.9)	37.0(±20.1)	39.4(±16.1)	45.3(±19.5)
	n.s.		n.s.	
暗記系科目	47.3(±28.4)	24.0(±19.5)	51.7(±15.1)	28.1(±17.3)
	p<0.006		p<0.0005	
暗記系科目(+)	35.9(±23.9)	23.9(±23.0)	29.0(±21.2)	25.5(±20.9)
	p<0.03		n.s.	

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28.3分減少した(p<0.06)。

4.2.2 環境改善による学習効率の予想向上率

表9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。第1被験者実験()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。第1被験者実験()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23.3%向上した(p<0.006)。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23.6%向上した(p<0.0005)。第2被験者実験(+)では成績上位群で換気量(小)から換気量(大+)に改善することで有意に12.1%向上した(p<0.03)。成績下位群では環境条件間における有意差は認められなかった。

以上より、今回の成績群別検討では、明確な結論を導くことができなかった。原因の一つとして統計的に明確な傾向を得るためには被験者数がやや少ない可能性が考えられる。

5. 室内環境の質と学習効率に関する相関分析

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物理環境要因、従属変数を学習効率として相関分析を行った。その際、暗記系科目の興味度が暗記系科目ならびに(+)と比較して有意に低い($p < 0.01$)ことに配慮し、興味度に関する補正として暗記系科目のケース間(・)で補正係数を算出し、暗記系科目の点数に補正を施した¹³⁾。両者の間に比較的明確な相関傾向が得られたものを以下に示す¹⁴⁾。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7に示す。線形近似により $R^2=0.85$ の相関関係($Y = -0.088X + 54.19$ (式1))が有意に認められた($p = 0.009$)。空気質の不満足者率を10%削減するとテストの点数が0.88点向上する結果となった。また不満足者率が0%のときに学習効率が100%となるように設定した、学習効率の相対値¹⁵⁾、と不満足者率に関して相関分析を行うと近似直線の式は $Y = -0.16X + 100$ となり、空気質の不満足者率を10%削減すると学習効率が1.6%向上する結果となる。また、図7に一人当たりの換気量と確認テスト平均点の相関分析結果を示す。対数近似により $R^2=0.77$ の相関関係($Y = 2.18 \ln(X) + 47.14$ (式2))が有意に認められた($p = 0.03$)。また室内空気温度と確認テスト平均点の間にも対数近似により $R^2=0.66$ の相関関係が有意に認められた($p = 0.05$)。また線形近似でも $R^2=0.65$ の有意な相関関係が認められた($p = 0.05$)。

6. 学習効率に関する既往研究の比較と考察

本実験で得られた結果を既往研究の実験結果を中心として比較する。不満足者率と学習効率の関係ならびに室内空気温度と学習効率の関係は線形近似、換気量と学習効率(プロダクティビティ)の関係は対数近似でよく近似できる点は既往研究^{13,14)}と一致している。Wargockiらの室内空気汚染物質濃度と作業効率に関する実験では、空気質の不満足者率10%削減で1.1%の作業効率向上という結果を得ている¹³⁾。本実験では1.6%の向上となっている。またWargockiらの換気量と作業効率に関する実験室実験では一人当たりの換気量を $10.8\text{m}^3/\text{h}$ から2倍にする毎に1.7%の作業効率向上が得られたと報告している¹⁵⁾。本実験で得られた換気量に関する近似曲線(式2)では、一人当たりの換気量を2倍する毎に学習効率が2.1%向上すると算出できる。また、室温に関してはSeppänenらが種々の実験室実験や現地実測の結果を参考に室温25以上において1の室温上昇が2%の作業効率低下という線形モデルを報告している¹⁴⁾。Seppänenらのモデルに合わせて室温が25のときに学習効率(53.18点)が100%となるように設定した相対的な学習効率を用いて、室温と回帰分析を行うと、回帰直線の傾きが-2.6となる。したがって、25度以上の室温1上昇により2.6%の学習効率低下となる。換気量条件、室温条件ともに既往研究の結果と良く一致するが、向上率はやや大きくなった。要因の一つとして温熱・空気環境単独の影響に関する結果と複合影響による条件の差を挙げることができる。そこで上述の温熱・空気環境単独の影響に関する既往研究の結果を利用して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。本実験の結果では換気量8倍、温度2低下で約8%の学習効率向上となった(第1被験者実験())。上述の既往研究の結果においてそれぞれ単独の影響は換気量8倍で $5.1(1.7 \times 3)\%$ 、温度2低下で4%の作業効率向上で温熱・空気環境の影響を加算すると約9%となり、本実験の結果約8%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、加算

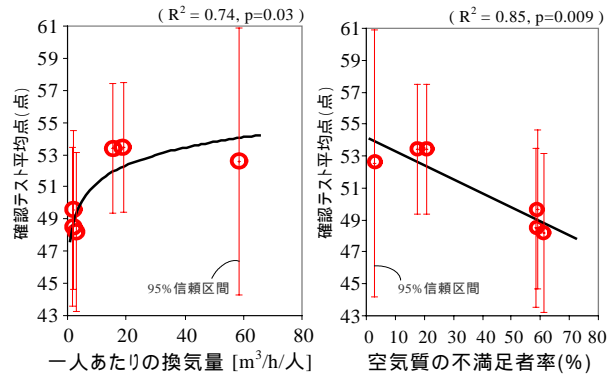


図7. 学習効率に関する相関分析

表10. 現地ならびに実験室における不満足者率[%]の比較

		空気環境不満足者率		温熱環境不満足者率	
		現地	実験室	現地	実験室
暗記	換気(小)	18.1	59.0	54.2	33.3
	換気(大)	8.0	17.9	38.7	30.8
暗記	換気(小)	11.3	59.0	54.2	87.2
	換気(大)	9.3	21.1	45.8	28.9
有意差検定		p<0.07		n.s.	

表11. 現地実測と実験室実験の学習効率向上率[%]

		暗記系科目	現地実測(F)	実験室実験(C)	(C) - (F)
客観評価	テスト点数の向上率		8.7	0 (10.0)	-2.3
			5.8	0 (7.7)	-5.8
主観評価	講義有効時間の向上率		2.2	9.7	+7.5
			2.8	27.5	+24.7
	学習効率の予想向上率		5.3	0 (1.6)	-5.3
			6.6	23.4	+16.8

により説明される可能性があることが推察され、現地実測の結果を基に環境要因の単独影響と複合影響を予備的に検討した結果¹¹⁾と同様の傾向となった。

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推定される¹⁶⁾。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可能性が高いと推察される。

7. 現地実測と実験室実験の整合性

7.1 空気質の不満足者率

表10に現地実測ならびに実験室実験の不満足者率の比較結果を示す。空気質の不満足者率は、第1被験者実験の同一4条件に関して、現地実測よりも実験室実験の方が高い結果となった($p < 0.07$)。

7.2 学習効率

1) 環境間の一対比較結果による検討

現地実測と実験室実験(第1被験者実験)により得られた各ケースの学習効率向上率を表11に示す。客観評価(テスト点数)においては実験室実験で有意な差が得られていないため環境の変化による学習効率の向上率は統計的には0%となる。従って環境間における一対比較では実験室実験が、現地実測と比較して過小評価する結果となった。主観評価に関しては実験室実験の方が相対的に過大評価される傾向と

なった。現地実測を基準とした場合の差異は「ロスした時間」で+7.5~+24.7%、「予想向上率」で-3.7~+16.8%となった。平均的には+9.9(±9.4%)となる。主観評価と客観評価の整合性に関しては、現地実測では主観評価が過小評価する傾向に、実験室実験では主観評価が過大評価する傾向となり、両手法で逆の傾向となった。

2) 相関分析結果による検討

現地実測ならびに実験室実験により得られた相関分析結果を用いて、それぞれの手法による学習効率評価結果の傾向を検討する。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)により現地実測と実験室実験の整合性を検討するために、実験室実験の結果は第1被験者実験(・)のみを採用する。そこで改めて対象科目のみに着目して相関分析を行った。その結果空気質に関する不満足者率と学習効率の間に線形近似で $R^2=0.97$ の相関関係が有意に認められた($p=0.02$)。また換気量と学習効率の間に対数近似により $R^2=0.96$ の相関関係が有意に認められた($p=0.03$)。図8に空気質の不満足者率と学習効率の関係に関して、現地実測ならびに実験室実験の結果を併せて示す。共に不満足者率が0%の時に学習効率の相対値が1.00となるように設定した学習効率の相対値を示している^{注15)}。一定の不満足者率の増加に対する学習効率の低下は、現地実測より実験室実験で少ない結果となった。従って実験室実験により得られる不満足者率とプロダクティビティに関するモデルは現地実測で評価された結果よりも過小傾向であるモデルの可能性が高い。要因の一つとして全く同一の物理環境に対して実験室実験で不満足者率が高かったことが挙げられる。次に現地実測ならびに実験室実験に関して、一人当たりの換気量と学習効率の相関分析結果を図9に併せて示す。現地実測により得られた換気量と学習効率の近似曲線($y = 2.90 \ln(X) + 74.37$)ならびに実験室実験により得られた近似曲線(式2)から、一人当たりの換気量が $1.0[m^3/h]$ の時の学習効率を基準とした学習効率の相対値を定義した^{注16)}。換気量の増加に対する学習効率の変化は現地実測と実験室実験で大変良く整合する結果となった。ただし現地実測による学習効率測定の方が2~3%低めに評価する傾向となった(n.s.)。

現地実測では、換気量の多寡に着目して設定した室内環境条件における一対比較において学習効率に有意な差が認められ、実験室実験では認められなかった。一方相関分析では現地実測で有意な相関が認められなかったが、実験室実験では有意な相関が認められた。現地実測で有意な相関が得られなかった一つの要因に現地実測では既習率が徐々に上昇していた($p<0.001$)ことが挙げられる^{注17)}。

8. 現地実測ならびに実験室実験による総合的な学習効率の検討

現地実測では被験者の心理量が再現されておりホーソン効果が見れにくいメリットがあり、一方で実験室実験では物理環境を厳密に制御可能なメリットがあるため両者による多角的なプロダクティビティの検討が望まれている。今回得られた結果は、換気量と相対学習効率の関係は現地と実験室で同様の傾向を示し、不満足者率と学習効率の相対値の関係はやや異なる結果となっているが、客観データのみで構成される換気量と学習効率の関係を採用し、実測と実験のデータを統合して分析する。そこで現地実測と実験室実験の両者の各4つのデータを合わせた計8つのデータに関して、換気量と学習効率の相対値に関する相関分析の結果を図9に示す。対数近似により $R^2=0.82$ の相関関係($Y = 0.04 \ln(X) + 1.00$)が有意に認められた($p = 0.002$)。この相関関係

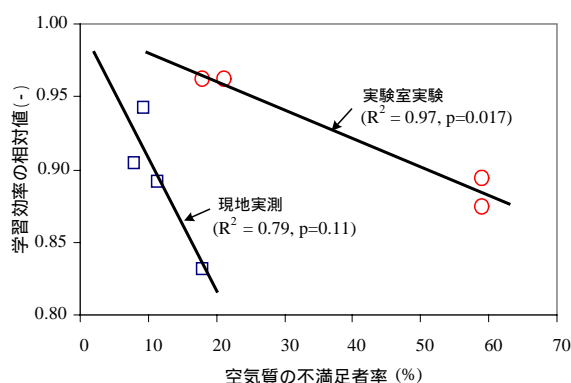


図8. 不満足者率と相対学習効率の対応関係

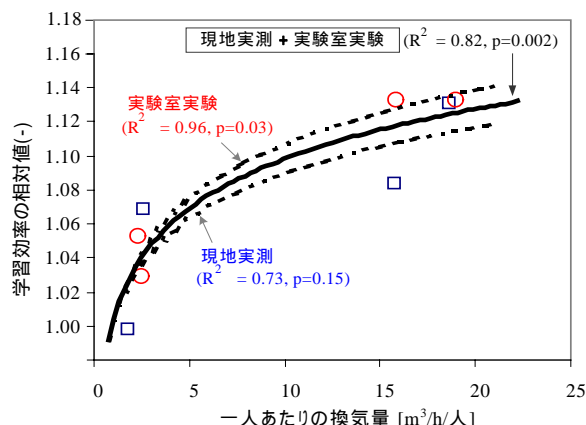


図9. 現地実測ならびに実験室実験の学習効率の相関分析結果

より、換気量を2倍増加する毎に学習効率が3.0%有意に向上する結果を得た。両手法により総合的に検討した結果、換気量の増加とそれに伴う室温低下により学習効率が向上することが有意に認められた($p = 0.002$)。

9. 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)が第1被験者実験()で3.8点(10.0%)向上し(n.s.)、暗記系科目で3.8点(7.7%)向上し($p<0.09$)、暗記系科目(+)で4.4点(9.1%)向上した($p<0.06$)。
- (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(「予想向上率」ならびに「ロスしたと思う時間」に基づく「講義有効時間」)が1.6%~27.5%有意に向上した($p<0.05$)。
- (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、主観評価がやや過大評価する傾向となった。2つの指標による主観的な学習効率をまとめて分析すると、客観評価を基準としたときの差異が+6.0%(±10.1)となった。
- (4) 成績別に2群に分けて学習効率を分析した結果、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、成績下位群では35.8%~68.2%有意に向上した($p<0.02$)。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、換気量や室内空気温度と客観的な学習効率の間に有意な相関関係が確認された(それぞれ $R^2=0.85$ ($p = 0.009$),

$R^2=0.77$ ($p=0.03$), $R^2=0.66$ ($p=0.05$)). 今後さらにデータの蓄積が必要である。

- (6) 現地実測と実験室実験の客観的な学習効率に関する整合性を検討した結果、両手法は大変良く整合する結果となった。現地実測と実験室実験の差異は概ね 2-3% となった。
- (7) 現地実測ならびに実験室実験の両手法により多角的に検討し、換気量を 2 倍増加する毎に客観的な学習効率の相対値が 3.0% 有意に向上する結果を得た ($p=0.002$)。
- (8) 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 仙田満名誉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、実験にご協力いただいた大成建設(株) 森川泰成氏、庄司研氏、島崎祐輔氏、東急建設(株) 原祥子氏(当時慶大)、笹原典明氏、富岡晋也氏、梅宮才佳氏、櫻井修司氏(当時工芸大)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授業理解度を問う確認テストの回答に及ぼす影響を検討することに主眼がある。そのため、本報では「学習効率」を、本質的には授業理解度(程度)の効率を示す用語として使用する。
- 注2)成人を対象としたプロダクティビティに関する既往研究はワークプレイスにおける作業効率、すなわち与えられた作業をこなす時間(Throughput Time)に着目した効率の追求、といった側面で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殆ど無い。本研究では成人を対象としてインプット側の効率である学習効率に着目した。
- 注3)第2被験者実験の実験室内の配置はほぼ同様だが、机は2人掛け2列とした。
- 注4)操作要因として換気量に着目したことから便宜的に環境条件は換気量(大)、(小)とした。既報(その1)¹¹⁾の現地実測で、換気量の変化により空気環境に加えて温熱環境も変化したことから、実験室実験でも同様に再現した。
- 注5)第2被験者実験の人員密度は0.34人/m²である。
- 注6)被験者ならびに実験データの取り扱いには学会の倫理規定に準じて行った。
- 注7)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(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した)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8)設問文と評価スケールを示す。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
既習率：今日のテスト設問のうち、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
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)
特に興味度の平均値は、暗記系科目 が3.1で、暗記系科目 が3.8、暗記系科目 (+)は3.5であり、暗記系科目 は有意に小さかった($p<0.01$)。
- 注9)空間分布は空気温度ならびに放射温度で ± 0.3 、相対湿度は $\pm 5\%$ 。
- 注10)現地実測と同様に、学習効率に大きな影響を及ぼすと考えられる 体調(%) 既習率(%) 講義に対する興味度に関して申告票データより1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。採用データ数は暗記系科目 、 、 (+)の順に39、39、31人。
- 注11)具体的な算出方法は、「主観評価(講義有効時間ならびに予想向上率)による換気量に関する環境間の学習効率の向上率(%)」から、「各々に対応する客観評価(テスト点数)による学習効率の向上率(%)」を減じることにより、「客観評価を基準としたときの、主観評価による学習効率の向上率の差異(%)」を算出し、これらの平均値ならびに標準偏差を算出した。

注12)設定科目(、 、 (+))毎に換気量(小)条件において確認テスト点数の中央値により2群に分類。設定科目ごとにおいて、2つの群の中受講者は必ずしも同一ではない。

注13)暗記系科目 ・ (+)の4つのテスト点数データの平均点(50.95点)と暗記系科目 の2つのテスト点数データの平均点(39.80点)から比例補正係数1.28を算出し、暗記系科目 のそれぞれ点数に乘じた。

注14)不満足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。一方物理量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¹³⁾。

注15)不満足率に関する学習効率の相対値 = 各換気量時におけるテスト点数 / 近似直線式のY切片の値(定数は実験室実験: 54.19点、現地実測: 89.21点)

注16)換気量に関する学習効率の相対値 = 各換気量時におけるテスト点数 / 近似曲線の定数(定数は実験室実験: 47.14点、現地実測: 74.37点)

注17)現地実測における暗記系科目の既習率は、実測順に53.1、56.1、64.6、67.5(%)と上昇し、分散分析により有意に上昇した($p<0.001$)ことが確認された。

本研究に関する既発表論文

本報で報告する内容は下記の既発表論文を代表として、その内容に加えて新たな実測結果、分析結果を加えてまとめたものである。その他の既発表論文についても下記の既発表論文を参照されたい。

- 1)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

- 1)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
- 2)S Tanabe: PRODUCTIVITY AND INDOOR CLIMATE, Proceedings of Indoor Air 2005, pp56-64, 2005.9
- 3)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
- 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
- 5)Guzzo, R.A. and Bondy J. S.: A guide to productivity experiments in the United States 1976-1981(Pergamon, New York), 1983
- 6)Mayo, E: The social problems of an industrial civilization (Harvard University School of Business, Cambridge, MA), 1945
- 7)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
- 8)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
- 9)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
- 10)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
- 11)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) 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、日本建築学会環境系論文集、No.606, 2006.08
- 12)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
- 13)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
- 14)O. Seppänen, W.J. Fisk, D. Faulkner : Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building, Proceedings of Healthy Building 2003, pp.394-399, 2003
- 15)Pawel Wargocki, David P. Wyon, Yan Sundell, Geo Clausen and P. Ole Fanger: The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity, *Indoor Air*, pp222-236, 2000.10
- 16)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