

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  
実測と実験による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討

Study on the Productivity in Classroom  
Field Survey and Realistic Simulation Experiment on Effects of Air Quality/Thermal Environment on School Work

正会員 金子 隆昌(久米設計) 正会員 村上 周三(慶応義塾大学)

正会員 伊藤 一秀(東京工芸大学) 正会員 深尾 仁(大成建設)

Takamasa KANEKO\*<sup>1</sup> Shuzo MURAKAMI\*<sup>2</sup> Kazuhide ITO\*<sup>3</sup> Hitoshi FUKAO\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> KUME SEKKEI Co. Ltd. \*<sup>2</sup> Keio University \*<sup>3</sup> Tokyo Polytechnic University \*<sup>4</sup> TAISEI CORPORATION

This paper gives the summary of study on the productivity in classroom, focusing on the effect of the air quality and thermal environments on academic performance. Especially, study on consistency in productivity evaluation between the field test and experiment is a feature of this study. It also evaluates the consistency between objective and subjective evaluations of academic performance. This multilateral study indicates that improving indoor environment conditions in classrooms can substantially improve academic performance.

### 1. はじめに

近年、室内空気質問題から地球温暖化問題に至る広範なスケールにおいて様々な環境問題が顕在化しており、環境性能を含めた建築物の質の向上が強く意識されている。室内環境に着目した場合、特にオフィスや学校等において室内環境質の潜在的価値ならびにその向上に関する評価指標としてプロダクティビティ(作業効率・学習効率)といった概念に注目が集まっている。質の高い室内環境の提供に伴うライフサイクルコストと比較してプロダクティビティ向上による利潤は圧倒的に大きいという試算結果も報告されており、室内環境質とプロダクティビティの定量的な関係性の評価、さらにプロダクティビティ向上に供する科学的な環境設計・制御法の確立が強く求められている<sup>1)</sup>。

室内環境の質と作業効率の関係に関する検討は、特に実験室実験という手法により行われてきおり、近年ではコールセンター等で、作業効率の定量評価が可能な実際の業務成績を用いた現地実測が行われている<sup>2,3)</sup>。

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、またその評価方法が十分に確立されていないことも相まって、その定量的な効果に関して統一した見解が得られているとは言い難い。したがって、プロダクティビティ評価を行うためのデータベースを充実させ、各種既往研究の横断的な比較を行い、統計的な検討により室内環境の質とプロダクティビティの定量的な関係に関して、統計的信頼性をより向上させる必要がある。

プロダクティビティ分野の検討課題を列挙すると、各種研究成果を横断的に比較・検討するために現地実測



図1. 研究の概要

並びに実験室実験という2つ手法の整合性を確認する必要がある。プロダクティビティ評価の標準化の1手法として、アンケートによる評価方法が期待されており<sup>4)</sup>、得られる結果の信頼性に関して十分に検討する必要がある。既往研究では、主にタイピング作業などのコンポーネントスキルに着目したアウトプット側のプロダクティビティが評価されてきており、今後、学習効率に代表されるインプット側のプロダクティビティも評価していく必要がある。その他、プロダクティビティの評価方法の確立や室内環境がプロダクティビティに影響を及ぼすメカニズムの検討なども必要不可欠である。

本報告では、からの3つの要件に主眼を置き、著者らが実施してきた温熱・空気環境とプロダクティビティ(特に学習効率)に関する研究成果の概略を報告する。

### 2. 学習効率向上に関する検討方法の概要(図1)

本研究は室内環境の質として換気量の多寡に伴う温熱・空気環境の質に着目する。また、学習効率評価に関して現地実測と実験室実験の2つのアプローチにより多角的な検討を行う<sup>3)</sup>(図1)。特に現地における調査ならびに実験室実験において、全く同一の学習効率評価方法

表1. 主観的な学習効率評価の概要

<b>ロスしたと思う時間</b>
教室内の環境が原因で授業の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(□分)
<b>予想向上率</b>
現状の室内環境の要因が改善すれば、講義内容の理解のし易さはどの程度向上すると考えられますか?(□%)
主観的な学習効率の評価指標は空気調和・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が検討しているものを用いた

表2. 被験者実験の物理環境条件

設定項目	現地実測				実験室実験				
	暗記科目(小)		暗記科目(大)		暗記科目(小)		暗記科目(大)		
環境条件	(小)	(大)	(小)	(大)	(小)	(大)	(小)	(大)	
空気環境	換気量[m <sup>3</sup> /h]	1.8	15.8	2.6	18.6	2.5	19.0	2.4	19.0
	二酸化炭素濃度、粉塵濃度、化学物質濃度、真菌濃度も測定								
温熱環境	空気温度[℃]	27.3	25.2	28.1	24.5	27.7	25.5	28.7	25.8
	相対湿度[%]	44	43	63	42	42	42	57	38
	着衣量[clo]	0.70	0.70	0.50	0.70	0.70	0.70	0.50	0.70
	PMV	0.82	0.04	0.86	-0.10	0.74	-0.03	1.00	0.10
風速[m/s]、放射温度[℃]も測定。代謝量 1.0[met] その他机上上面照度、等価騒音レベル測定									
被験者[人]	50	50	57	57	56	56	56	56	

(DVD による映像講義+統一確認テスト)を採用することにより、今まで厳密な比較が困難であった、現地と実験室による学習効率評価の整合性の検討を行う。本研究では統一確認テストによる客観的な学習効率評価に加え、アンケートによる主観評価も同時に実施するが、この方法は比較的容易にデータを収集できる特性があるものの、評価結果に関しては十分な統計的信頼性の検討と、客観評価との整合性検討が行われていない。本研究では客観評価と併せて主観評価を行うことでアンケートをベースとした主観評価の信頼性の検討も行う。

また、プロダクティビティを検討する際に最も重要なパラメータの一つでありながら十分に検討が行われていないモチベーションの定量的な評価も試み、室内環境が学習効率に及ぼす影響のメカニズムに関して検討する。

### 2.3 学習効率等の評価方法

(1) 客観評価(確認テスト点数) インput側のプロダクティビティとして学習効率に着目し、講義内容の吸収度(理解の程度)を評価するために講義受講後の内容確認テストの点数を用いる。一級建築士試験対策用の講義内容(建築系計画、施工分野)を対象としており、統一確認テストは五者択一形式で全20問である。

(2) 学習効率の主観評価(アンケート形式)(表1) 学習効率の定量的な主観評価として「ロスしたと思う時間」ならびに「学習効率の予想向上率」を評価する<sup>2)</sup>。表1に質問項目を示す。また、空気環境に関する満足度調査を行い、不満足者率を算出する。満足度は5スケール(1.不満足~5.満足)とし、全回答者数に占める不満側(1、2)の申告数の割合を算出し、不満足者率とする。

2.4 被験者実験手順(図2) 現地並びに実験室における被験者実験のスケジュールは日建学院における現地での講義進行に準拠する。180分間の講義(途中5分程度の休憩3回)の後、30分間の確認テストを行い、その後、引き続きアンケートの記入を行う。被験者のサーカディアンリズムに配慮し、同一曜日・時間帯に実施する。

2.5 統計解析方法 学習効率(客観・主観)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。等分散を仮定できない学習

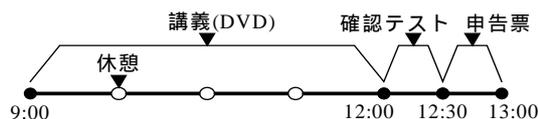


図2. 実測手順

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、Wilcoxonの符号付順位和検定を用いる。

### 3. 現地実測の概要と結果

3.1 学習効率に関する現地実測の概要(表2) 換気量の多寡をパラメータとして、学習効率に及ぼす影響を検討する(そのため環境条件名を換気量(大)、換気量(小)と呼ぶ(表2))。定風量吹出方式の空調システムを対象としたため、換気量の変化に伴い温熱環境ならびに空気環境の両者が変化する結果となっている。換気量(小)では、教室に設置された換気扇を常時OFF、換気量(大)では換気扇を常時ONとした(図2)。暗記系科目の各々において換気量(大)、(小)の室内環境条件における学習効率を比較・検討する。被験者は一般受講生60名程度である。また、一般に被験者群のモチベーションを統一させることは困難であるが、対象集団は資格取得の必要性が特に高い人の集団であり、現地のモチベーションが再現されるとともにそのレベルが統一されているメリットは大きい。

3.2 現地実測による学習効率の評価結果(図3) 換気量(小)から換気量(大)に環境条件が変化することで客観評価(統一確認テスト)(図3-(o))では、暗記系科目(計画並びに施工)で有意に6.4点向上し(p<0.002)、暗記系科目(計画)で同様に有意に4.6点向上した(p<0.0007)。一方、主観評価(アンケート形式)(図3-(s))ではロスした時間並びに予想向上率が有意に減少する結果となった(p<0.04)。つまり、室内環境が学習効率に悪影響を及ぼす程度が減少し、学習効率の向上と判断できる。

### 4. 実験室実験の概要と結果

4.1 学習効率に関する実験室実験の概要(表1) 現地実測と同様に温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響を検討する。現地実測との整合性を検討するために、現地実測の物理環境、特に温熱・空気環境を厳密に再現し、現地実測で用いた科目により学習効率を評価する。実験は大成建設空調システム実験室にて行った(図6)。被験者

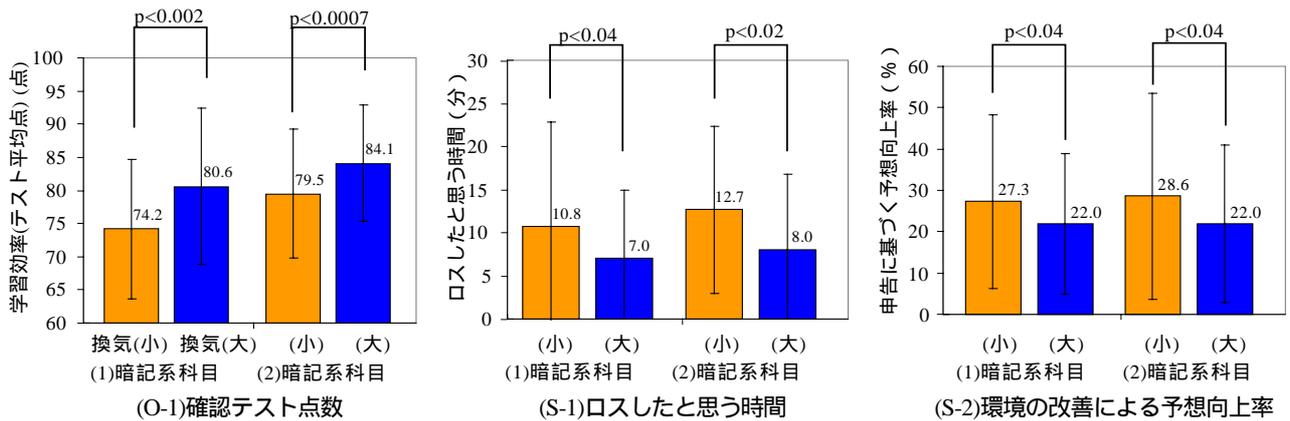


図3. 現地実測による学習効率の評価結果

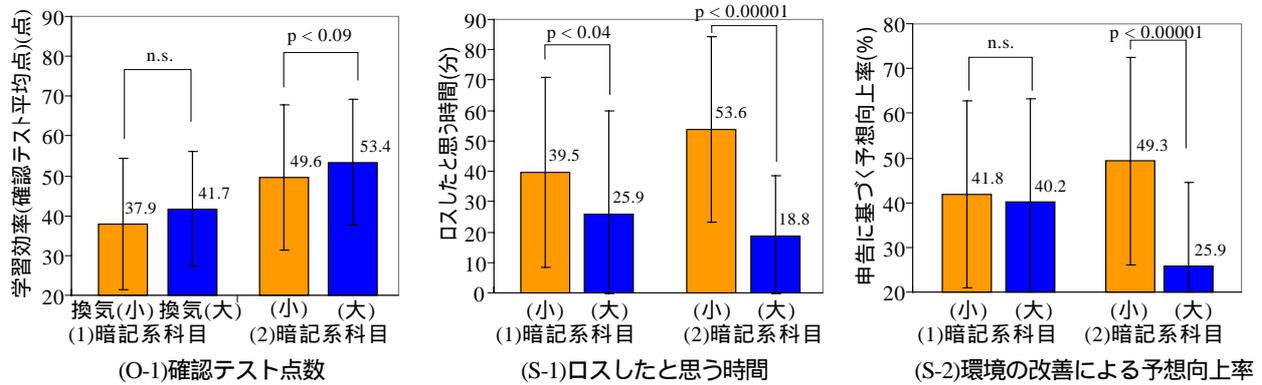


図4. 実験室実験による学習効率の評価結果

は建築系学科に通う大学生・大学院生で、56名(男性34名、女性22名)である。

4.2 実験室実験による学習効率の評価結果 換気量(小)から換気量(大)に環境条件を変化することで客観評価(統一確認テスト)(図4-(o))では、暗記系科目で3.8点向上し(n.s.)、暗記系科目では3.8点向上した(p<0.09)。一方、主観評価(アンケート形式)(図4-(s))でもロスした時間並びに予想向上率が有意に減少する(p<0.04)傾向となり学習効率が向上する結果となった。

#### 5. 学習効率に関する詳細な分析・考察

5.1. 学習効率に関する相関分析(図5) 現地実測では、空気質の不満足者率と学習効率の相対値の間に、線形近似により $R^2=0.79$ の相関が認められた(p=0.11)(図5-a)。また、一人当たりの換気量と学習効率の相対値の間に、対数近似で $R^2=0.73$ の相関が認められた(p=0.15)(図5-b)。また、実験室実験では空気質に関する不満足者率と学習効率の相対値の間に、線形近似により $R^2=0.97$ の相関が認められた(p=0.02)(図5-a)。また、一人当たりの換気量と学習効率の相対値の間に、対数近似により $R^2=0.96$ の相関が認められた(p=0.03)(図5-b)。

#### 5.2. 現地実測と実験室実験の整合性

(1) 主観評価 学習効率の主観評価(ロスした時間ならびに予想向上率)は現地実測を基準とすると、実験室実験で過大評価される傾向となった(表3)。

(2) 客観評価 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。一定の不満足者率の増加に対し、現地実測より実験室実験の方で学習効率の低下が少なかった。また、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したが、現地実測による学習効率測定の方が低めに評価する傾向となり、今回設定した換気量条件の範囲において差異は2~3%となった(n.s.)。

5.3. 学習効率の主観評価の信頼性に関する検討 現地実測では主観評価が過少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平均値±標準偏差で $-3.0 \pm 3.0$ となった。実験室実験では主観評価が過大評価する傾向となり、客観評価との差異は $+6.7 \pm 13.3$ となった。

5.4. 実験室実験による学習意欲に関する相関分析(図5) 図5-cに示す設問により学習意欲を主観的に定量評価した。学習意欲は講義開始を含めて4つの時間帯に関して質問票による調査を行い、各時間帯における換気量(小)を基準とした換気量(大)における学習意欲の相対値の平均を示している。時間経過に伴い、質の低い温熱・空気環境が学習意欲に及ぼす負の影響が指数関数的に大きくなる結果となった( $R^2=0.97$ , p=0.05)。

5.5. 現地実測ならびに実験室実験による総合的な検討 現地実測では被験者心理(特にモチベーション)の再現

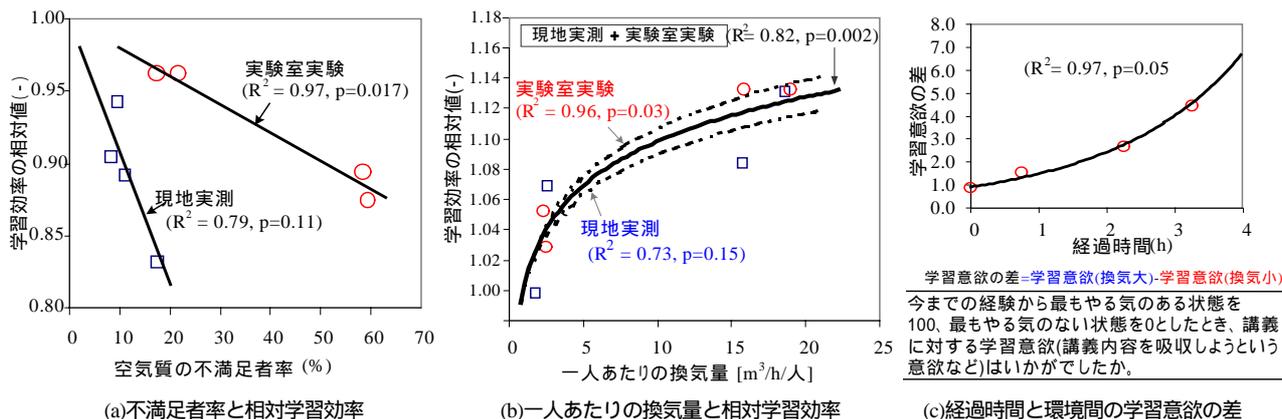


図5. 相関分析の結果

性が高いメリットがあり、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。そこで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い、現地実測と実験室実験それぞれ4つのデータを合せた計8つのデータを活用し、一人あたりの換気量と相対的な学習効率に関して相関分析を行った(図5b)。一人あたりの換気量と学習効率の間に、対数近似により  $R^2=0.82$  の相関関係が有意に認められた( $p = 0.002$ )。対数近似の式より、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となった。

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

現地実測では、換気量に関する環境条件を変化させたことで、客観的な学習効率が有意に4.6点~6.4点向上した( $p < 0.03$ )。また、空気質の不満足者率、換気量と学習効率の間に相関傾向が確認された(各  $R^2=0.79(p = 0.11)$ ,  $R^2=0.74(p = 0.15)$ )。一方実験室実験では、客観的な学習効率が3.8~4.4点向上した(n.s.)。空気質の不満足者率、換気量と学習効率の間に有意な相関関係が確認された(各  $R^2=0.85(p = 0.009)$ ,  $R^2=0.77(p = 0.03)$ )。現地実測と実験室実験の学習効率に関する整合性を検討した結果、差異は概ね2-3%と、両手法は大変良く整合する結果となった。

主観評価の信頼性の検討を行った結果、現地実測では主観評価が過少評価する傾向にあり、実験室実験では過大評価する傾向となった。

質の低い室内環境が時間経過に伴い、指数関数的に学習意欲を低下させる傾向が確認された( $R^2=0.97, p=0.05$ )。総合的に分析した結果、換気量を2倍増加すると学習効率が3.0%向上する結果となった( $R^2=0.82, p=0.002$ )。今回の検討では換気量(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、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

表3 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
	学習意欲の向上率		2.8	27.5	+24.7
	学習意欲の予想向上率		5.3	0 (1.6)	-5.3
主観評価の差異			-3.0 ± 3.0	6.7 ± 13.3	

かに関して、今後検討していく必要がある。さらに学習効率に大きな影響を及ぼす環境要素の抽出ならびに最適な制御方法の検討・提案が最終的な目標となる。

## 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、樋渡潔氏、庄司研氏、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)、工芸大(当時) 笹原典明氏、富岡晋也氏、梅宮才佳氏、櫻井修司氏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きました。ここに記して深甚なる謝意を表する次第であります。

## 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) Pawel Wargocki, David P. Wyon and P. Ole Fanger: The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates, Proceedings of Indoor Air 2004, pp. 7-16, 2004.12
- 3) S. Tanabe: PRODUCTIVITY AND INDOOR CLIMATE, Proceedings of Indoor Air 2005, pp56-64, 2005.9
- 4) 寺野ら: 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
- 5) 金子ら: 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