

(その11) 温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響に関する実験室実験

Study on the Productivity in Classroom

Part 11. Experiment on Effects of Thermal / Air Environment on Productivity

正会員 金子 隆昌(久米設計) 正会員 村上 周三(慶応義塾大学)  
 学生会員 亀田 健一(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) 正会員 樋渡 潔(大成建設)

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

Kenichi KAMEDA\*<sup>2</sup> Hitoshi FUKAO\*<sup>4</sup> Kiyoshi HIWATASHI\*<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 (Part 11) presents the results of climate chamber experiment on productivity in classroom. Here, we focused our attention on the effects of air change rate and studied the effects of thermal / air environment on productivity in classroom as in the previous paper which dealt with the field test reported as part 8. When air change rate is increased, productivity in classroom is improved by 9.1% on average ( $p < 0.06$ ).

1. はじめに

本報を含む一連の学習効率向上に関する研究<sup>1)</sup>は、換気量の多寡に着目し、教室の温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響を検討するものである。特に現地の教室と実験室で全く同一の学習効率評価方法(DVD による映像講義+統一テスト)を用いることにより、現地実測と被験者実験の整合性について厳密な検討を試みるとともに、2つの手法によるアプローチから温熱・空気環境と学習効率に関して多角的に検討を行うものである。本報(その11)では、既報の現地実測(その8)<sup>2)</sup>を再現した実験室実験の結果に関して報告する。また、次報(その12)で現地実測と実験室実験の整合性に関する報告を行う。

2. 学習効率に関する実験室実験の概要

実験室実験は現地実測<sup>2)</sup>で対象とした資格受験対策予備校(日建学院)の教室環境、授業システム並びに学習効率評価方法を再現して行う。実験は現地実測と同様に換気量の差異に着目するとともに現地実測の際の物理環境を再現し、温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響を検討する。実測では詳細な制御が困難な室内環境を実験室では厳密に制御し、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完・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、プロダクティビティデータの収集性等に優れる学習効率の主観評価(アンケート形式)の信頼性の検討を行う。図1(1)に実験の様子を示す。

2.1 実験室実験の期間・場所(図1)

第1被験者実験は2005年10月3日~11月9日、第2

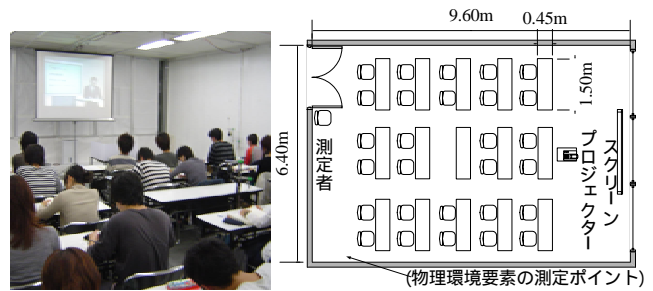


図1. 学習効率に関する実験室実験の概要(第1被験者実験)

表1. 実験室実験の環境設定条件

第1被験者実験：現地実測条件を再現した確認実験			
第2被験者実験：換気量の増加率を増やした設定とし、測定データの追加を目的とした実験			
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)

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。実験室の概要(レイアウト)を図1(2)に示す。吹出風量に含まれるレターンエアの割合を変えることで換気量(外気導入量)の変更を行う。

2.2 実験室実験の設定条件(表1)

実験室内の環境条件を表1に示す。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、被験者の実験の経験回数ならびに環境暴露順序の影響を相殺す

表3. 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ロスしたと思う時間( )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

ることを目的として、被験者群 A・B で対になるように実験ケースを設定する。第1被験者実験では現地実測による学習効率評価との整合性を検討するため、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した。また第2被験者実験は換気量の増加率を第1被験者実験より多く変化させる設定とする。講義として提供の内容は一級建築士受験対策で、建築系計画、施工であり、第1被験者実験では現地実測と同様に暗記系科目、に分類する。第2被験者実験のケース名は暗記系科目 を用い、換気量の増加率を大きくした設定であることから暗記系科目 (+)とする。暗記系科目、ならびに (+)において換気量(大)、換気量(小)における学習効率を比較・検討する。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並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39名(男性20名、女性19名)で、第1・2被験者実験では被験者が異なる。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。被験者に換気量変化を含め室内の物理的環境を変化させることは告知しない(ブラインド試験)。

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)

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)<sup>1)</sup>を参照のこと。

(2) 温熱環境要素の測定(図1)

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。物理環境の測定手順ならびに測定器具は現地実測<sup>2)</sup>と同様である。

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)ならびに講義内容の理解度を問う確認テストを用い、確認テスト点数により客観的な学習効率を評価する。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

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 <sub>2</sub> 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

暗記系科目 と同等の科目を採用(暗記系科目 (+))した。

(2) 主観的な学習効率の評価(表3)

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。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。

2.5 実験室実験の手順(図2)

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(17:00)、30分間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分程度の休憩を3回設定した。

2.6 統計解析方法

既報(その8)<sup>2)</sup>と同様に、学習効率(テスト点数並びに主観申告)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(図3)

図3に一人当たりの換気量の測定結果を示す。第1被験者実験(暗記系)では、換気量(大)のケースでは、一人当たりの換気量は19.0m<sup>3</sup>/h/人(=外気導入量458m<sup>3</sup>/h、換気回数2.7回/h)、換気量(小)のケースで2.5m<sup>3</sup>/h/人(=78m<sup>3</sup>/h、0.5回/h)となった。第1被験者実験(暗記系)では、換気量(大)で19.0m<sup>3</sup>/h/人(=539m<sup>3</sup>/h、3.1回/h)、換気量(小)で2.4m<sup>3</sup>/h/人(=78m<sup>3</sup>/h、0.5回/h)となった。第1被験者実験の一人あたりの換気量測定結果と現地実測の測定結果を比較すると、暗記系科目の換気量(小)で0.7m<sup>3</sup>/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。二酸化炭素濃度は第一被験者実験(暗記系)の換気量(大)では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、講義開始時に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。第1被験者実験(暗記系)でもほぼ同様の結果となった。現地実測の二酸化炭素濃度の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、講義開始時の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。

第2被験者実験(暗記系(+))では、換気量(大+)のケースでは、一人あたりの換気量は58.6m<sup>3</sup>/h/人(=1230m<sup>3</sup>/h、7.2回/h)、換気量(小)のケースで3.3m<sup>3</sup>/h/人(=69m<sup>3</sup>/h、0.4回/h)となった。二酸化炭素濃度は換気量(大+)で785±15ppmとなった。換気量(小)では、初期濃度1500ppmから徐々に増加し、最大で2800ppmを超えた(1700±370ppm)。

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/m<sup>3</sup>程度で変化しない結果となった。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/m<sup>3</sup>以下、アセトアルデヒド26μg/m<sup>3</sup>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4)

表4に代表して被験者群Aの測定結果をまとめて示す。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0.7clo並びに0.5cloとした。換気量(小)でPMVが1.0程度、換気量(大)では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た<sup>2)</sup>。

## 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)

図4に客観的な学習効率(統一確認テスト)の結果を示す。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2被験者実験(暗記系科目=計画分野)では、同様に3.8点(7.7%)向上した(p<0.09)。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(9.1%)向上した(p<0.06)。また、暗記系科目におけるテスト平均点が暗記系科目・(+ )より低い結果となった。原因の一つとして、暗記系科目の講義内容の興味度が暗記系科目・(+ )の講義内容と比較して有意に小さかったことが挙げられる(p<2<sup>-10</sup>)。暗記系科目と・(+ )の間で体調や既習率に有意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

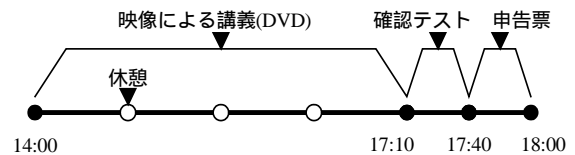


図2. 実験室実験の手順

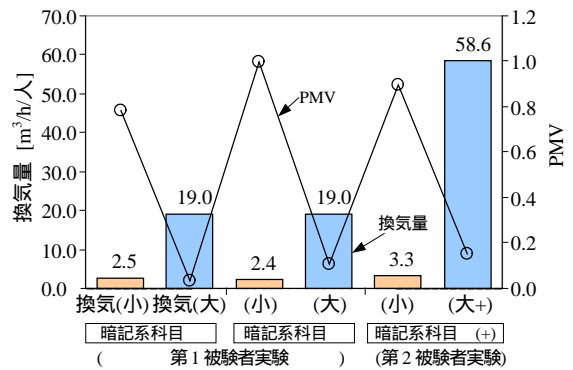


図3. 一人当たりの換気量ならびにPMV

表4. 温熱環境要素の測定結果(床面より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

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(図5、6)

#### (1) 室内環境が原因でロスした時間(設問=表3-8.)

図5(1)に申告結果を示す。ここで、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(申告値)」を減じたものである。

第1被験者実験(暗記系)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)。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。同様に第1被験者実験(暗記系)では有意にロスした時間が34.8分減少し(p<0.00001)、講義有効時間は27.5%の向上となった。第2被験者実験(暗記系(+))では同様にロスした時間が有意に26.6分減少し(p<0.0003)、講義有効時間は19.4%の向上となった。

#### (2) 学習効率の予想向上率(設問=表3-8.)

申告結果を図5(2)に示す。第1被験者実験(暗記系)ならびに暗記系)では換気量(小)から(大)に環境条件を変化させたことにより、予想向上率がそれぞれ1.6%(n.s.)、23.4%(p<0.00001)低下する結果となった。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



率がそれぞれ 1.6%(n.s.)、23.4%( $p < 0.00001$ )向上したと判断することができる。同様に第 2 被験者実験(+)では予想向上率に基づく主観的な学習効率がそれぞれ、7.9%( $p < 0.055$ )向上する結果となった。

### (3) 空気環境並びに温熱環境に関する不満足者率(表 6)

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(暗記系 ならびに暗記系 )ではそれぞれ有意に 41.0% ( $p < 0.00001$ )、37.9%減少( $p < 0.00001$ )し、第 2 被験者実験(暗記系 (+))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(暗記系 ならびに暗記系 )ではそれぞれ 2.6%(n.s.)、58.2%( $p < 0.00001$ )減少し、第 2 被験者実験(暗記系 (+))では有意に 67.7%減少した( $p < 0.00001$ )。

#### 3.2.3 学習効率の主観評価の信頼性に関する検討(図 6)

第 1 被験者実験ならびに第 2 被験者実験の 3 ケースについて、確認テスト(客観評価)ならびに申告票(主観評価)に基づく学習効率の向上率(%)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(講義有効時間ならびに予想向上率)との差異は、平均値(±標準偏差)で+6.0%(±10.1)となった。「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。

#### 4. まとめ

- (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)が暗記系科目で 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、2 種類の指標による主観的な学習効率が 7.9% ~ 27.5%有意に向上した( $p < 0.04$ ) (ただし暗記系科目の予想向上率の結果以外の 5 ケースにおいて)。
- (3)学習効率の客観評価と主観評価はよく対応するが、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)次報(その 12)にて学習効率に関して詳細に分析するとともに学習効率の評価に関して現地実測と実験室実験の整合性の検討を行う。

#### 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

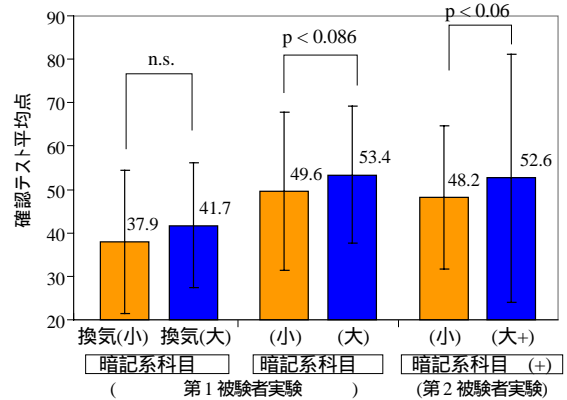


図 4. 客観的な学習効率(確認テスト)結果

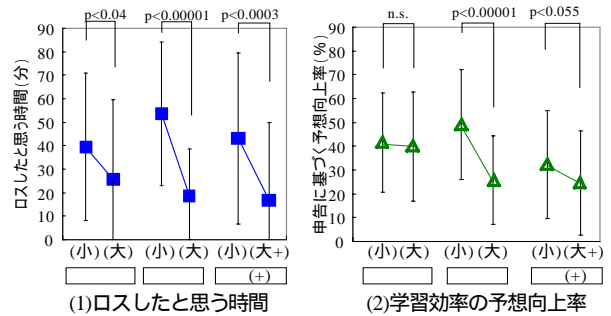


図 5. 主観的な学習効率の結果

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
	$p < 0.00001$		$p < 0.00001$	

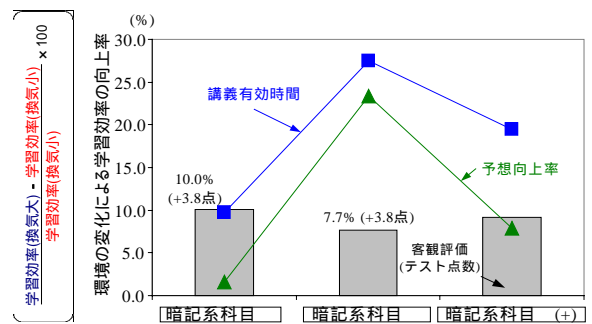


図 6. 客観評価と主観評価の対応関係(向上率%)

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) 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)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
- 2) 金子ら：(その 8)温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響に関する現地実測、日本建築学会大会学術講演集、2006.8(投稿中)