

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 12) 現地実測ならびに実験室実験の学習効率に関する整合性の検討  
 Study on the Productivity in Classroom

**Part 12. Consistency in Productivity Evolution between the Field Test and Experiment  
 and the Climate Chamber Experiment**

学生会員 ○内田 匠子 (慶応義塾大学)      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)  
 学生会員    亀田 健一 (慶応義塾大学)      正会員    深尾 仁 (大成建設)  
 正会員    樋渡 潔 (大成建設)

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

Kenichi KAMEDA\*<sup>1</sup> Hitoshi FUKAO\*<sup>4</sup> Kiyoshi HIWATASHI\*<sup>4</sup>

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

This paper (Part 12) reports on the consistency of the climate chamber experiment and the field test. In the result of the 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 field test and the experiment is used, the correlation analysis shows that there is a correlation between the academic performance and air change rate ( $R^2 = 0.82$ ,  $p = 0.002$ ).

**1. はじめに**

前報(その 11)<sup>1)</sup>に続き、本報では温熱・空気環境と学習効率の実験室実験に関して詳細な分析結果を報告する。また、現地実測と実験室実験によるプロダクティビティの評価結果に関する整合性検討結果ならびに現地実測と実験室実験の両手法による総合的な学習効率に関する検討結果の報告を行う。

**2. 学習効率の成績群別検討**

被験者群を既報<sup>2)</sup>と同様にテスト点数の中央値により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。

**2.1 客観的な学習効率の成績群別結果**

表 1 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。第 1 被験者実験(暗記系 I)では、成績上位群で環境条件間における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 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(暗記系 II)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(暗記系 II(+))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(暗記系 II(+))は第 1 被験者実

**表 1. 客観的な学習効率(テスト平均点)の成績群別結果**

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

**表 2. ロスしたと思う時間(分)の成績群別結果**

	成績上位群		成績下位群	
	小	大	小	大
換気量				
暗記系科目 I	34.0(±29.1)	27.0(±31.4)	45.3(±32.4)	24.7(±36.4)
	n.s.		<b>p&lt;0.05</b>	
暗記系科目 II	47.9(±32.8)	17.3(±17.9)	60.0(±26.3)	20.6(±22.1)
	<b>p&lt;0.003</b>		<b>p&lt;0.0005</b>	
暗記系科目 II(+)	43.4(±20.5)	18.4(±23.6)	43.0(±47.8)	14.7(±22.2)
	<b>p&lt;0.003</b>		p<0.06	

**表 3. 予想向上率(%)の成績群別結果**

	成績上位群		成績下位群	
	小	大	小	大
換気量				
暗記系科目 I	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 II	47.3(±28.4)	24.0(±19.5)	51.7(±15.1)	28.1(±17.3)
	<b>p&lt;0.006</b>		<b>p&lt;0.0005</b>	
暗記系科目 II(+)	35.9(±23.9)	23.9(±23.0)	29.0(±21.2)	25.5(±20.9)
	<b>p&lt;0.03</b>		n.s.	

験(暗記系 I・II)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被験者実験に関しては、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( $p<0.02$ )。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。

## 2.2 主観的な学習効率の成績群別結果

### 2.2.1 室内環境が原因でロスした時間

表2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(暗記系 I)では成績上位群で換気量(小)から換気量(大)に環境を变化することで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(=学習効率が向上)した( $p<0.05$ )。第1被験者実験(暗記系 II)では、同様に成績上位群で有意に30.7分減少(=学習効率が向上)し( $p<0.003$ )、成績下位群では有意に39.4分減少(=学習効率が向上)した( $p<0.0005$ )。第2被験者実験(暗記系目 II(+))では、成績上位群で有意に25.0分減少(=学習効率が向上)した( $p<0.003$ )。成績下位群では28.3分減少(=学習効率が向上)した( $p<0.06$ )。

### 2.2.2 環境改善による学習効率の予想向上率

表3に「現状の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(暗記系 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。第1被験者実験(暗記系 II)では成績上位群で換気量(小)から換気量(大)に環境を变化することで有意に23.3%減少(=学習効率が向上)した( $p<0.006$ )。成績下位群では同様に有意に23.6%減少(=学習効率が向上)した( $p<0.0005$ )。第2被験者実験(暗記系 II(+))では成績上位群で有意に12.1%減少(=学習効率が向上)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、現地実測と同様に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。

## 3. 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(I、II並びにII(+))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 I の興味度が暗記系科目 II・II(+ )と比較して有意に低い( $p<2\cdot 10^{-10}$ )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(I・II)で学習効率に関する比例補正係数を算出し、暗記系科目 I の点数に補正を施した。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。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1(右)に示す。線形近似により

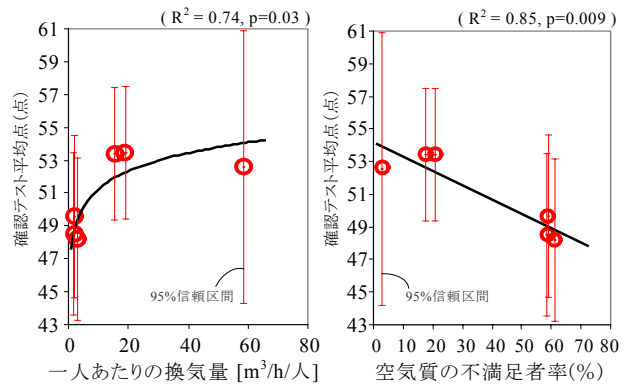


図1. 学習効率に関する相関分析

$R^2=0.85$  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。

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図1(左)に示す。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( $p=0.03$ )。

この他、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( $p=0.05$ )。今後さらに測定データ数を増やすことが必要である。

## 4. 室内環境の質と学習効率に関する考察

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<sup>3)</sup>と一致している。

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10.8m³/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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。Seppänenらのモデルに合せて室温が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(暗記系科目Ⅱ)。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(1.7×3)%、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。今回の検討では、温熱・空気環境の複合影響は加算により説明される可能性があることが推察される。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。

## 5. 現地実測と実験室実験の整合性の検討

### (1) 不満足者率

表4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被験者実験の同一の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( $p<0.07$ )。温熱環境に対する不満足者率では現地実測が実験室実験よりもやや高い傾向となった。さらにデータを蓄積する必要がある。

### (2) 学習効率

#### 1) 環境間の一対比較結果に基づく検討

現地実測と実験室実験により得られた各ケースの学習効率向上率を表5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。ただし得られた向上率の平均値に関しては括弧内に併記した。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) 相関分析の結果に基づく検討

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

表4. 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Ⅰ	換気(小)	18.1	59.0	54.2	33.3
	換気(大)	8.0	17.9	38.7	30.8
暗記Ⅱ	換気(小)	11.3	59.0	54.2	87.2
	換気(大)	9.3	21.1	45.8	28.9
有意差検定の結果		$p<0.07$		n.s.	

表5. 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	Ⅰ	8.7	0(10.0)	-2.3
		Ⅱ	5.8	0(7.7)	-5.8
主観評価	講義有効時間の向上率	Ⅰ	2.2	9.7	+7.5
		Ⅱ	2.8	27.5	+24.7
	学習効率の予想向上率	Ⅰ	5.3	0(1.6)	-5.3
		Ⅱ	6.6	23.4	+16.8

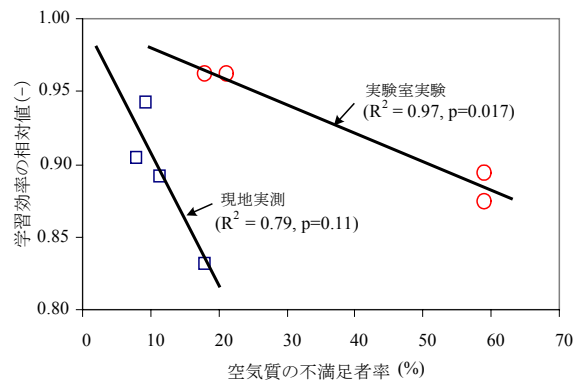


図2. 不満足者率と相対学習効率の対応関係

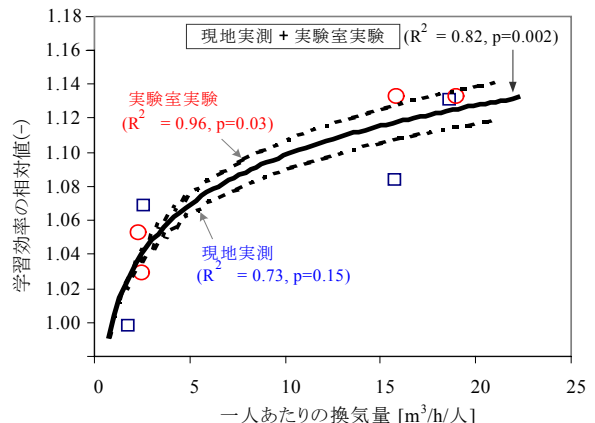


図3. 現地実測ならびに実験室実験の学習効率の相関分析結果

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(暗記系ⅠⅡ)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2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(点線)。共に不満足者率

が 0%の時に学習効率が 100%となるように設定した学習効率の相対値を示している。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。次に一人当たりの換気量と学習効率の相関分析結果に関して現地実測ならびに実験室実験の結果を図 3 に併せて示す(点線)。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<sup>3</sup>/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。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.)。

現地実測では環境間の一対比較で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。

## 6. 現地実測・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ン効果が現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占めし、不満足者率と相対学習効率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結果を合せて学習効率に関する分析を行う。現地実測と実験室実験それぞれ 4 つのデータ(暗記系科目 I II)を合せた計 8 つのデータに関して、換気量と相対的な学習効率に関する相関分析の結果を図 3 に示す(実線)。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( $p=0.002$ )。従って換気量を 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( $p=0.002$ )。

## 7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)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、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。
- (2)空気質の不満足者率、換気量や室内空気温度と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。
- (3)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、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。
- (4)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 倍増加する毎に学習効率が 3.0%有意に向上する結果を得た( $p=0.002$ )。
- (5)今回の検討では換気量を主課題としたが、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、今後詳細に検討する予定である。次報(その 13)で温熱環境が学習効率に及ぼす影響に関する現地実測の結果を報告する。

## 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、実験にご協力いただいた大成建設㈱ 森川泰成氏、庄司研氏、島崎祐輔氏、東急建設㈱ 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 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、空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、2006.8(投稿中)
- 2)原ら: (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
- 3)Pawel Wargocki et al: 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
- 4)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