

論文 高流動コンクリートからウエットスクリーニングしたモルタルに関する実験的検討

五味 信治*1・岡本 将昭*2・榊田 佳寛*3・宮野 和樹*4

要旨:高流動コンクリートの流動性を粗骨材量とモルタルの流動性とを指標として評価する場合,モルタルとして粗骨材を混入する前のモルタルとウエットスクリーニングモルタルとが考えられる。この両者のうちウエットスクリーニングモルタルの方がコンクリートの流動性をよく表現できていた¹⁾が,そのままでは調合設計に反映できない。そこで,本論文では,粗骨材を混入する前のモルタルとウエットスクリーニングモルタルとの流動性の違いに及ぼす調合要因の影響を実験的に検討し,その結果,モルタルのレオロジーの比と細骨材/水および粗骨材絶対容積で両者の関係を表現することが示され,近似式が得られた。

キーワード:高流動コンクリート,ウエットスクリーニングモルタル,降伏値,塑性粘度

1. はじめに

高流動コンクリートのフレッシュ時における流動性評価の指標は,スランプフローとスランプフロー速度で表される。これらの指標はフレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定した時の降伏値と塑性粘度に大きく関連する。コンクリートをモルタルマトリックスと粗骨材とで構成される二相系材料と考えた場合,高流動コンクリートの流動性を評価するためには,モルタルのレオロジーを把握することが重要である。コンクリートを構成するモルタルには,粗骨材を混入する前のモルタル(以下,調合モルタルと称す)とコンクリートからウエットスクリーニングして採取したモルタル(以下,スクリーニングモルタルと称す)とがある。筆者らは,コンクリートを構成するモルタルのレオロジー的性質と粗骨材の絶対容積が高流動コンクリートの流動性に影響を及ぼすと考え検討を重ねてきた。その結果,スクリーニングモルタルと評価指標には相関関係が成立することがわかった¹⁾。しかし,事前評価を可能にするためには,調合モルタルのレオロジーを測定することでスクリーニングモルタルの予測ができること

が必要である。これにより,事前に調合モルタルを調べることで流動性評価の指標を推定することができる。本研究は,分離低減剤を用いた高流動コンクリートを対象に,調合モルタルとスクリーニングモルタルの関係に及ぼす各種調合要因の影響を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合条件

本研究で対象とした高流動コンクリートは,普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を質量比で1:1に混合したものを結合材とし,細骨材は川砂を使用し,さらに分離低減剤によって材料分離抵抗性を付与するタイプである。水結合材比は40%から50%まで5%刻みで,モルタル中の細骨材容積比(以下,細骨材容積比と称す)を49%から55%

表-1 実験要因と水準

要因	水準
水結合材比(%)	40, 45, 50
細骨材容積比(%)	49, 52, 55
粗骨材絶対容積(l/m^3)	260,300,340

*1 日産建設(株) 技術研究所 所長(正会員)

*2 日産建設(株) 技術研究所 工修

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博(正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科 工修(正会員)

表-2 使用材料

材料名	種類	特性・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	比表面積 3310cm ² /g, 密度 3.15g/cm ³
水	水道水	
細骨材	川砂	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.27%
粗骨材	硬質砂岩	表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 1.42%, 実積率 60.1%
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.88 g/cm ³ , 比表面積 4340cm ² /g
混和剤	高性能 AE 減水剤 分離低減剤	ポリカルボン酸系 メチルセルロース系

表-3 調合例（水結合材比 40%の場合）

水結合材比 (%)	細骨材容積比 (%)	粗骨材絶対容積 (l/m ³)	単位量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤 (%)	分離低減剤 (%)	空気量 (%)
			水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材			
40	49	260	200	251	251	910	689	0.80	0.14	2.0
		300	189	237	237	860	795			
		340	178	223	223	809	901			
	52	260	189	236	236	966	689	0.92	0.09	
		300	178	223	223	912	795			
		340	168	210	210	859	901			
	55	260	177	221	221	1022	689	1.10	0.04	
		300	167	209	209	965	795			
		340	157	197	197	908	901			

注) 高性能 AE 減水剤の添加率はセメント量に対する百分率, 分離低減剤の添加率は水量に対する百分率を示す。

まで 3%刻みで, 粗骨材絶対容積を 260l/m³ から 340l/m³ まで 40l/m³ 刻みで変化させた。分離低減剤および高性能 AE 減水剤の添加率は, 粗骨材絶対容積が 300l/m³ の時, スランプフローが 650 ± 50mm, 500mm フロー到達時間が 5~8 秒となる添加量とした。尚, 空気量は 2.0 ± 0.5%とした。実験の要因と水準を表-1 に, 使用した材料を表-2 に, 調合例を表-3 に示す。

2.2 試験項目および試験方法

高流動コンクリートから得られるモルタルを評価する試験項目は, 降伏値と塑性粘度とし, 降伏値および塑性粘度は内円盤型回転粘度計 (ロータ一部の直径は 34.7mm, 厚さは 1.65mm) を用いて試験した。高流動コンクリートの練混ぜは, 温度 20 ± 1 の室内で, 容量 50l のパン型強制練ミキサを用いて行い, 1 回の練り混ぜ量は 40l とした。練り混ぜ手順は, 細骨材, セメントおよび高炉スラグを 15 秒空練りし, 水と混和剤を入れてモルタルを 90 秒練混ぜ後, 粗骨材を投入し 90 秒練混ぜた。練混ぜ後の約 15 分に高流動コンクリートから 5mm のふるいをを用いてウェットスクリーニングで

採取したモルタルの降伏値と塑性粘度を測定した。ウェットスクリーニングは, 人為的な要素を避け一定の条件となるようにするため機械の振動によるテーブル式バイブレーターを使用し, 振動時間を決めて行った。降伏値および塑性粘度の測定は, 2.5rpm 5rpm 10rpm 20rpm 50rpm 20rpm 10rpm 5rpm 2.5rpm の順序で, それぞれ 60 秒間回転し, 下降域のせん断速度 (ずり速度) およびせん断応力度 (ずり応力度) を直線回帰し, その切片を降伏値, 勾配を塑性粘度とした。

調合モルタルとスクリーニングモルタルの性状の違いを, 5mm ふるいに残留した粗骨材に付着するモルタル分で分析した。分析方法は粗骨材に付着したモルタル分を電子レンジで恒量まで乾燥して, 細骨材と粗骨材の吸水分を引いた後の水量を 5mm ふるいに残留した単位水量とした。乾燥後のモルタル分は 5mm ふるいを使い粗骨材を洗い出し, ウエスなどで表面の水をふき取り, 表乾重量を計る。次に, 0.074mm ふるいをを用い, 細骨材とセメントを分け, 乾燥させた細骨材の吸水量を補正し, 表乾状態の細骨材とする。各単位量は分析

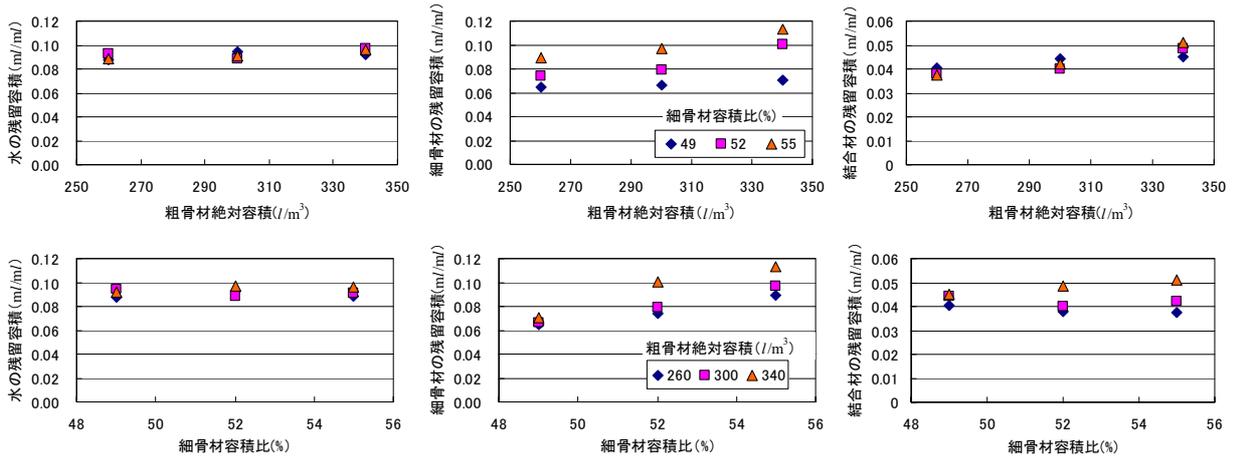


図-1 粗骨材に付着したモルタル分の分析結果例 (W/B=45%)

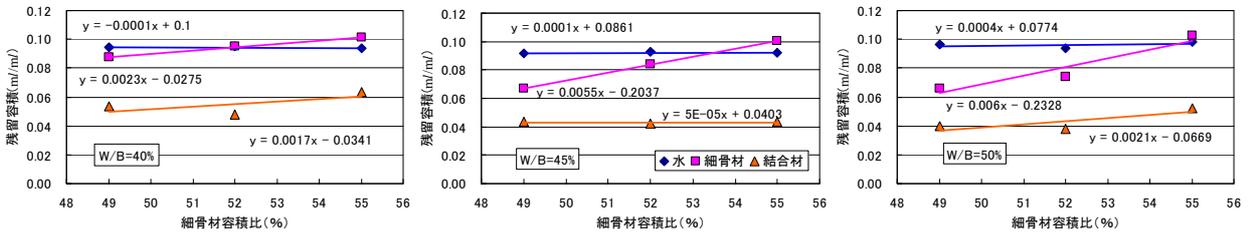


図-2 細骨材容積比に対する残留容積の変化

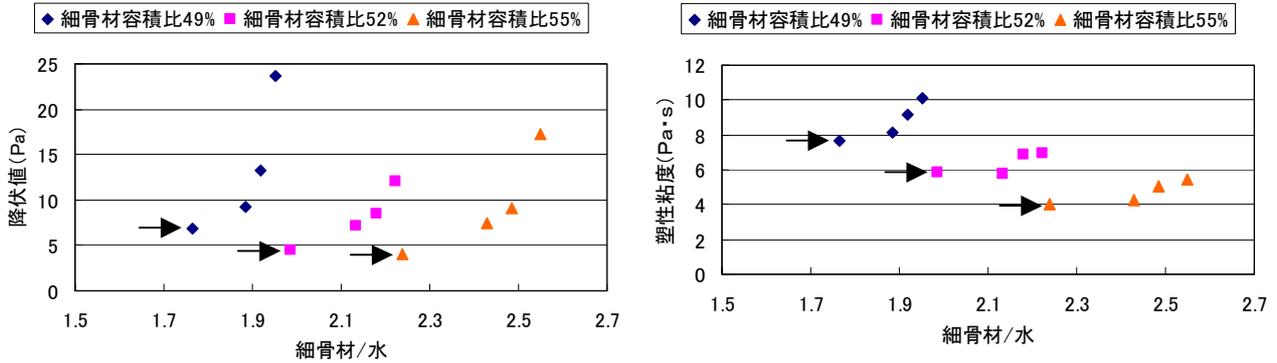


図-3 モルタルのレオロジーと細骨材/水の関係例(→は調合モルタル, W/B=40%)

結果質量を各材料密度で除して、容積を算出し、この容積で分析結果質量を除して求めた。

3. 実験結果

5mmふるいに残留した粗骨材に付着しているモルタル分について、これらを構成する水、細骨材、結合材の容積を粗骨材絶対容積で除して粗骨材に付着した各容積を算出した。粗骨材絶対容積が 260 l/m^3 から 360 l/m^3 まで増加すると、水と結合材はほぼ一定であるが、細骨材については細骨材容積比が高いもの以外は一定の傾向がある。また、細骨材容積比が 49% から 55% へ増加すると細骨

材は増加するが水と結合材はほぼ一定である。この結果から、粗骨材に付着する水、結合材の容積はほぼ一定であり、細骨材の容積は特に細骨材容積比と共に増加することが分った。5mmふるいに残留した粗骨材に付着するモルタル分の分析結果例を図-1に、残留したモルタル分の中の水、細骨材、結合材の細骨材容積比に対する変化を図-2に示す。この結果から粗骨材に付着する水、細骨材、結合材の容積は図の近似式で求めることができる。付着したモルタル分の中で、細骨材が最も大きく影響を受け、水と結合材はほぼ一定であった。

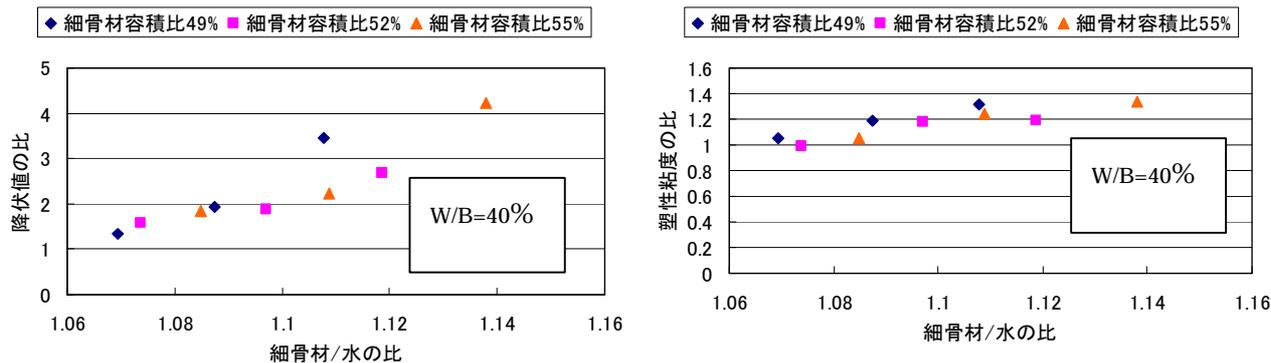


図-4 モルタルのレオロジーの比と細骨材/水の比の例

表-4 降伏値の比相関分析結果

相関行列	水結合材比	細骨材容積比	粗骨材絶対容積	細骨材/水の比	降伏値の比
水結合材比	1.0000				
細骨材容積比	0.0000	1.0000			
粗骨材絶対容積	0.0000	0.0000	1.0000		
細骨材/水の比	0.0560	0.2022	0.9194	1.0000	
降伏値の比	-0.4190	0.2318	0.7206	0.7684	1.0000

表-5 塑性粘度の比相関分析結果

相関行列	水結合材比	細骨材容積比	粗骨材絶対容積	細骨材/水の比	塑性粘度の比
水結合材比	1.0000				
細骨材容積比	0.0000	1.0000			
粗骨材絶対容積	0.0000	0.0000	1.0000		
細骨材/水の比	0.0560	0.9194	0.2022	1.0000	
塑性粘度の比	-0.1485	0.6081	0.5575	0.6514	1.0000

4. 考察

4.1 実験結果の考察

調合モルタルの初期容積から粗骨材に付着したモルタル分を近似式で求めて減じ、スクリーニングモルタルの容積を算出し、水、細骨材、結合材の量的変化がモルタルのレオロジーにどのような影響を与えているかを各細骨材容積比について調べた。その結果、調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーと細骨材/水とは良い相関があることがわかった。結果の例を図-3 に示す。

次に、モルタルのレオロジーと細骨材/水について(調合モルタル/スクリーニングモルタル)の比を求め、調合モルタルとスクリーニングモルタルの関係を調べた。結果の例を図-4 に示す。降伏値と塑性粘度共に細骨材/水と良い相関関係にある。ほぼ一次比例と仮定すれば、調合モルタルのレオロジーと細骨材/水を知ることでスクリーニングモルタルのレオロジーを推定することができる。

4.2 影響因子の抽出

(1) 相関分析による影響因子の抽出

実験から得られたデータから各種要因の相関分析を行い各項目の相関関係を確認した。表-4、表-5に降伏値と塑性粘度の比についての相関分析の結果を示す。この結果は、降伏値の比・塑性粘度の比・粗骨材絶対容積との間には強い相関があることを示している。

(2) 因子分析によるレオロジーへの影響因子の抽出

因子分析²⁾は心理学者C.スピアマンの発想³⁾によるもので、様々な現象に潜む潜在的な因子を発見する手法である。この手法を高流動コンクリートの流動性現象に適用し、潜在的な因子を求め、各因子について因子負荷量を見ることで、それぞれの項目がどの要因と密接な関係があるのか推定する。降伏値に関係する因子について、表-6に因子No.3までの因子負荷量を示す。降伏値の因子負

表-6 降伏値の比に関する因子負荷量

変数名	因子 1	変数名	因子 2	変数名	因子 3
水結合材比	-0.144	降伏値の比	-0.362	粗骨材絶対容積	-0.229
細骨材容積比	0.169	細骨材容積比	-0.089	降伏値の比	0.050
降伏値の比	0.850	粗骨材絶対容積	0.221	細骨材/水の比	0.114
粗骨材絶対容積	0.924	細骨材/水の比	0.224	水結合材比	0.130
細骨材/水の比	0.950	水結合材比	0.657	細骨材容積比	0.470

表-7 塑性粘度の比に関する因子負荷量

変数名	因子 1	変数名	因子 2	変数名	因子 3
水結合材比	-0.027	粗骨材絶対容積	-0.375	塑性粘度の比	-0.123
細骨材容積比	0.336	細骨材/水の比	-0.186	粗骨材絶対容積	-0.065
塑性粘度の比	0.771	水結合材比	-0.099	細骨材容積比	0.121
粗骨材絶対容積	0.899	塑性粘度の比	0.360	細骨材/水の比	0.131
細骨材/水の比	0.941	細骨材容積比	0.692	水結合材比	0.401

荷量を見ると, 因子の意味づけとして第1因子は降伏応力, 第2因子は水分量, 第3因子はモルタルの粘性抵抗と考えられる。因子分析では各因子の因子得点による分類等からそれまでになかった新たなパターン等を発見していくのであるが, ここでは降伏値を表現している因子 No.1 の因子負荷量をみることで, 影響を与えている要素を抽出すると, 細骨材/水, 粗骨材絶対容積, 降伏値の比となる。同様に, 塑性粘度の因子負荷量を表-7 に示すが, 細骨材/水, 粗骨材絶対容積, 塑性粘度の比の序列となる。この結果は相関分析の結果と一致している。以上の結果より調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーの比は細骨材/水, 粗骨材絶対容積, 降伏値・塑性粘度の比と強い相関関係にあるので, 調合モルタルのレオロジーはスクリーニングモルタルのレオロジーで表現することが可能であると考えられる。

4.3 モルタルのレオロジーと各種要因についての基本概念

因子分析した結果では調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーの比に影響を及ぼす各種要因として細骨材/水の比と粗骨材絶対容積が考えられる。これらの結果から, 調合モルタルのレオロジーをスクリーニングモルタルのレオロジーで表現した近似式として式(1)を示す。

$$\gamma_w / \gamma_s = f(S/W, V_G) \quad (1)$$

ここに,

γ_w : スクリーニングモルタルの降伏値(Pa)

γ_s : 調合モルタルの降伏値(Pa)

$f(S/W, V_G)$: 細骨材/水, 粗骨材絶対容積の関数

S/W: 調合モルタルの細骨材/水とスクリーニングモルタルの細骨材/水の比

V_G : 粗骨材絶対容積(l/m^3)

$$\gamma_w / \gamma_s = g(S/W, V_G) \quad (2)$$

ここに,

γ_w : スクリーニングモルタルの塑性粘度(Pa・s)

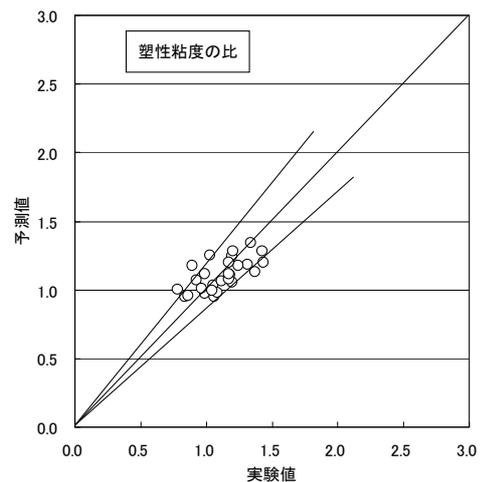
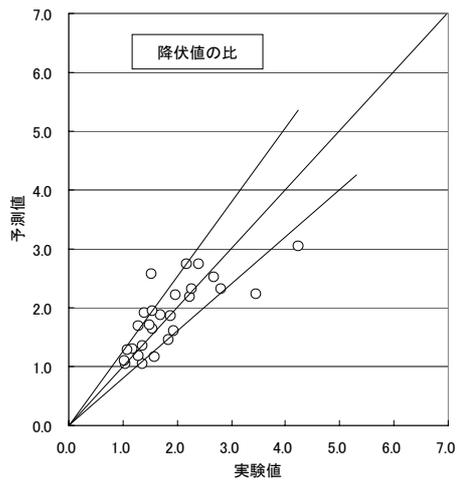
γ_s : 調合モルタルの塑性粘度(Pa・s)

$g(S/W, V_G)$: 細骨材/水, 粗骨材絶対容積の関数

モルタルのレオロジーの比と細骨材/水の比および粗骨材絶対容積との関係を明らかにすることで, 調合モルタルのレオロジーをスクリーニングモルタルのレオロジーで表すことができると考えられる。

4.4 解析検討

因子分析の結果から, 調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーの比は細骨材/水, 粗骨材絶対容積と一次比例の関係があることがわかった。式(1),(2)の考え方で全て一次の関数で表すことにした。調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーの比が細骨材/水, 粗骨材絶対容積で説明できるとすれば, 以下の重回帰分析式で表される。



(降伏値の比については傾き ±20%，塑性粘度の比については傾き ±15%の範囲を示す線を併示した)

図-5 モルタルのレオロジーの比に関する実験値と予測値の関係

表-8 分析式における重回帰分析結果

比	重相関係数	偏回帰係数 a_i, b_i		
		1	2	3
降伏値	0.77	2.67E+01	2.08E-03	-2.80E+01
塑性粘度	0.65	5.44E+00	3.17E-04	-4.95E+00

$$f(S/W, V_G) = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3 \quad (3)$$

$$g(S/W, V_G) = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3 \quad (4)$$

ここに、 $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3$ ：偏回帰係数， X_1 ：細骨材/水， X_2 ：粗骨材絶対容積，

調合モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値および塑性粘度の比を回帰分析における非説明変数，細骨材/水，粗骨材絶対容積を説明変数として重回帰分析を行なった。表-8に分析結果を示す。また、実験した各 Case について計算した予測値と実験結果の実験値との関係を図-5に示す。この結果では、データが正規分布に従うと仮定した場合、予測値は確率密度関数上で 1.5（標準偏差）で 86%の確率で、降伏値の比は傾き ±20%，塑性粘度の比は傾き ±15%以内に入る結果となった。

5. まとめ

分離低減剤を用いたタイプで水結合材比 40～50%，コンクリートのスランプフローは $650 \pm 100\text{mm}$ の高流動コンクリートを使用して、調合モルタルとスクリーニングモルタルのレオロジーに及ぼす各種要因の影響について、本実験の範囲内では以下の知見を得た。

- (1) 粗骨材に付着したモルタル分の容積を粗骨材絶対容積で除した値は、細骨材容積比が増加するに伴って細骨材は増加するが水と結合材はほぼ一定である。
- (2) 粗骨材に付着したモルタル分の容積を粗骨材絶対容積で除した値は、粗骨材絶対容積が増加しても水と結合材はほぼ一定である。
- (3) スクリーニングモルタルは、調合モルタルよりも降伏値と塑性粘度は共に大きくなる。
- (4) 調合モルタルのレオロジーはスクリーニングモルタルのレオロジーと細骨材/水および粗骨材絶対容積の関係式で表される。

参考文献

- 1) 五味信治，梶田佳寛他：分離低減剤を用いた高流動コンクリートの調合に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23, No.2, pp.1003-1008, 2001.7
- 2) 清水功次：マーケティングのための多変量解析，産能大学出版部，pp.170-208, 2000.1
- 3) C.Spearman：The abilities of man，NEW YORK:Macmillan，1927