

コンクリートの強度に及ぼす構成材料の分布の影響に関する検討

DB-11202 中村剛久

1. はじめに

コンクリート部材の中の強度は、一般的に上部が小さく、下部が大きいとされている。理由として、上部は密度の小さい水が上昇して水セメント比が大きくなり、下部には骨材が沈降することが考えられる。また、締固め時に再振動を行った場合には、骨材下面にブリーディングによって生じる空隙や空気泡の減少によっても強度が増加すると考えられる。このようにコンクリートの強度には「粗骨材の量の分布」「水セメント比の分布」「空隙の分布」が起因していると考えられるが、それぞれがどのような割合で影響しているのかは不明である。もし影響割合を把握できれば、施工による強度の低減を抑えることができる。本研究では各種分布を関数に持つ 3 元 1 次方程式を作成し、強度の低減を抑える施工方法を提案する。

2. 既往の試験体による検討

2.1 研究対象の概要

夏季(2012年8月7日)に作製された模擬試験体について検討した。この試験体は基礎の立ち上がり部分を模したものである(図1)。基礎の再振動の有効性を比較するため、直径50mmのバイブレータで再振動したもの・再振動しないもの・直径25mmのバイブレータで再振動しないものをそれぞれ2体ずつ作製し、材齢2日で脱型後、圧縮強度、動弾性係数、超音波伝播速度、密度を測定した。

2.2 使用材料と調査

試験体に用いた使用材料と計画調査表を表1と表2に示す。

2.3 諸性状の試験方法

試験体の諸性状の試験方法を表3に示す。

2.4 構成材料の分布の測定方法

試験体は1年以上室内に常温保存されていたが、本研究では諸性状の試験から構成材料の分布の測定のために、各種分布は変化しなかったと仮定した。また、水セメント比については、その値によって変化するとされている明度L*値を測定することにした。試験体の構成材料の分布の測定方法を表4に示す。

表1 使用材料

種類	粒の大きさの範囲	粗粒率および実積率	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	骨材混合比%(質量)	
						石灰
細骨材	陸砂	1.2mm	1.6	2.52	3.09	20
	砕砂	5mm以下	3	2.62	1.24	40
	砕石	20~5mm	60	2.64	0.58	50
粗骨材	砕石	20~5mm	60	2.66	0.61	50
練混ぜ	上澄水					
混和剤	AE減水剤					
セメント	普通ポルトランドセメント					

表2 計画調査表

骨材比	スランブ	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位水量(kg/m ³)	絶対容積(L/m ³)			質量(kg/m ³)			化学混和剤の使用量	単位骨材かさ容積(m ³ /m ³)
						セ	細	粗	セ	細	粗		
3	12	4.5	51	46	174	1	3	3	3	8	9	4.31	0.60
0	18					1	3	3	3	8	9		

表3 諸性状の試験方法

性状(測定項目)	測定方法
圧縮強度	JISA1107
動弾性係数	JISA1127
超音波伝播速度	CTM-15(飽和増幅方式、対称法)
密度	2日で脱型、研磨後

表4 試験体の構成材料の分布の測定方法

構成材料(測定項目)	片面測定時	測定方法
粗骨材量(粗骨材面積率(%)を測定)	1	図1-A部の断面にマスキングシート(トリコンマスキング SP フィルム 104250mm×10M)を貼り、その上から粗骨材にマジック(STABILOOHpenuniversal)で塗る(付録図1)。
	0.2	画像解析装置 LUZEX-AP(株式会社ニレコ)(付録図1)を用いて試験体上、中、下の粗骨材の面積率を算出。
水セメント比(L*を測定)	理由	表面の状態により得られる色が異なる為、表面を指で触って平滑が確認できるほど研磨する必要がある。
	0.2	試験体のマスキングシートをはがし表面を研磨する。
	理由	試験体から離れたカメラにより測定を行う測定機械では、光による誤差が生じることを考え、レンズによる歪みもなく、均一な測定を期待できるスキャナにて画像を取得。
	0.2	ビジネスプリンタで表面をスキャンする。解像度は350dpi、1200dpi、2400dpi、7200dpiを比較し、スキャン時間、精度を考慮して1200dpiを選択。後に本来の色に補正を行うため、グレーカードと一緒に写しこむ。機械による色の補正が行われないようにプロファイルは指定しない。保存形式は画像の圧縮がないTIFF形式を選択。
0.2	画像処理ソフト PhotoshopCS6 を用いて、グレーカードを基準に色補正を行う ¹⁾ 。図1の赤枠(800×1500)に切り取る。解像度の変更が行われないようPNG形式で保存する。	
理由	オープンソースのプログラム言語である Processing により画像解析を行うことで、原因不明な誤差を減らす。アルゴリズムはHSB表色系でセメントペーストと骨材を分けて測定できる色の範囲を決定、取得されたHSB値を、人の目の色の光を感じる3刺激値であるXYZ表色系に変換、XYZ値を人の心理や物理的感覚に近いLab表色系に変換。なお1200dpiの画像にProcessingにより作成したプログラムにより適当に設けたHSB値の範囲に当てはまるピクセルに色をつけ、その後目視でセメントペースト部分と骨材部分を分けられることを確認し、色の範囲は決定した(色相H:10~50、彩度S:0~30、明度B:50~80)。図4に色を塗る前後の画像を示す。	
0.1	図2の赤枠内のマトリクス部分のL*値を測定	
気泡	4.5	ASTMC457-71(直線法)に準じて図2の赤四角内を(150mm×15本=2250mm)測定

3. 測定結果と考察

諸性状の測定結果3)と構成材料の分布の測定結果を表5に示す。また、諸性状と各種分布の関係を図2に示す。

3.1 各種分布

3.1.1 粗骨材面積率

計画調査表より、粗骨材の絶対容積はスランプ1 2 cm・1 8 cm でそれぞれ3 6%・3 4. 5%であるが、面積率の平均は3 1. 4%・3 3. 7%と逆転している。しかしながら、切断面によって、高さ方向の面積率上下関係が変わることを考えると、切断位置による誤差であると考えられる。図3より、粗骨材の沈降から推定されるとおり面積率は下部ほど高く、粘性から推測されるとおりその上下方向の差はスランプが小さい程少なく、分布が均一になることが分かる。また図3中の1-1と2-1、3-1と4-2を比較すると、再振動を行うことで、不均一になることが分かる。これは再振動により粗骨材の沈降と圧密沈下が進行したためと考えられる。

3.1.2 空気量

目標空気量はスランプ1 2 cm、1 8 cm ともに4. 5%であったが、測定値の平均は5. 0%、5. 1%である。直径2 5 mm のバイブレータにより振動をかけた3-2と6-1の試験体は他と比べ、細かい気泡(50 μ m~100 μ m)の数が2倍以上であるため、3-2と6-1を除いて空気量を平均すると、3. 8%と4. 2%となった。ここから直径の細かいバイブレータの方が気泡数が増えることが考えられ、強度の低下の一つの要因となると考えられる。1-1と3-2の気泡数の比較を図4に示す。気泡は振動により上部に移動するため上部ほど空気量は多くなっている。上部の密度低減に影響していると考えられる。

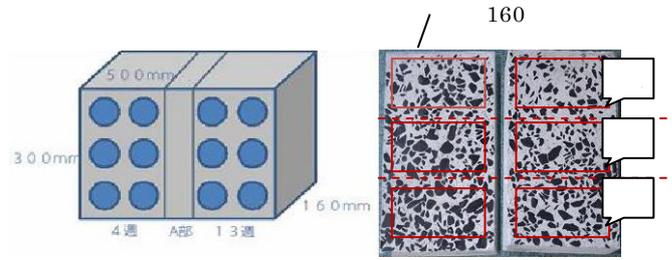


図1 模擬試験体 図2 4-2 (左4週/右13週)

表5 諸性状と構成材料の分布の測定結果

スランプ	材齢	名	構成材料の分布			諸性状				
			面積率	空気量	L*	圧縮強度	動弾性係数	超音波伝播速度	密度	
4	13	1-1-1	24.3	5.1	69.6	44.5	38.0	4.61	2.39	
		1-1-2	36.6	2.9	69.7	46.1	41.5	4.72	2.42	
		1-1-3	42.5	2.6	69.6	46.4	42.8	4.81	2.42	
13	4	1-1-4	22.5	5.1	69.8	44.6	37.5	4.69	2.37	
		1-1-5	34.6	2.9	70.1	46.3	41.2	4.78	2.40	
		1-1-6	33.0	2.6	70.0	48.7	42.7	4.92	2.43	
12	4	2-1-1	27.3	4.0	70.3	30.2	38.2	4.59	2.37	
		2-1-2	35.7	3.2	70.4	39.9	38.4	4.70	2.38	
	13	2-1-3	32.9	4.9	69.6	41.5	38.2	4.67	2.37	
		2-1-4	26.1	4.0	70.0	41.3	39.3	4.67	2.36	
	18	4	3-1-1	24.0	8.7	69.8	34.0	35.6	4.56	2.30
			3-1-2	31.2	7.5	69.7	37.4	35.9	4.63	2.31
13		3-1-3	33.7	6.8	69.4	38.4	35.7	4.57	2.30	
		3-1-4	24.6	8.7	70.4	40.6	35.2	4.48	2.28	
13		3-1-5	37.1	7.5	70.3	41.5	36.6	4.57	2.30	
		3-1-6	35.0	6.8	69.9	44.3	37.2	4.58	2.31	
18	4	4-2-1	17.6	3.0	70.2	37.0	35.8	4.55	2.33	
		4-2-2	35.0	3.0	70.2	41.0	40.7	4.72	2.41	
		4-2-3	38.5	4.4	69.6	41.0	40.3	4.75	2.42	
	13	4-2-4	22.4	3.0	70.0	43.5	34.8	4.49	2.31	
		4-2-5	38.6	3.0	70.0	48.2	40.0	4.81	2.39	
		4-2-6	47.9	4.4	69.5	48.9	42.2	4.86	2.41	
	4	5-2-1	30.8	4.5	70.5	34.6	35.8	4.40	2.33	
		5-2-2	41.4	4.7	70.3	34.0	36.4	4.57	2.34	
		5-2-3	49.0	5.3	69.8	36.0	37.6	4.43	2.36	
	13	5-2-4	19.9	4.5	69.9	37.1	35.8	4.66	2.33	
		5-2-5	33.8	4.7	70.1	40.6	39.2	4.79	2.37	
		5-2-6	38.8	5.3	69.6	37.4	39.9	4.68	2.38	
4	6-1-1	21.3	7.4	70.2	35.0	33.3	4.40	2.30		
	6-1-2	32.4	7.1	70.2	33.9	35.4	4.41	2.34		
	6-1-3	34.8	5.9	70.0	37.1	36.1	4.45	2.35		
13	6-1-4	27.6	7.4	70.5	38.3	35.2	4.80	2.30		
	6-1-5	35.4	7.1	70.4	40.1	37.1	5.00	2.33		
	6-1-6	41.8	5.9	70.0	41.4	36.6	4.83	2.34		

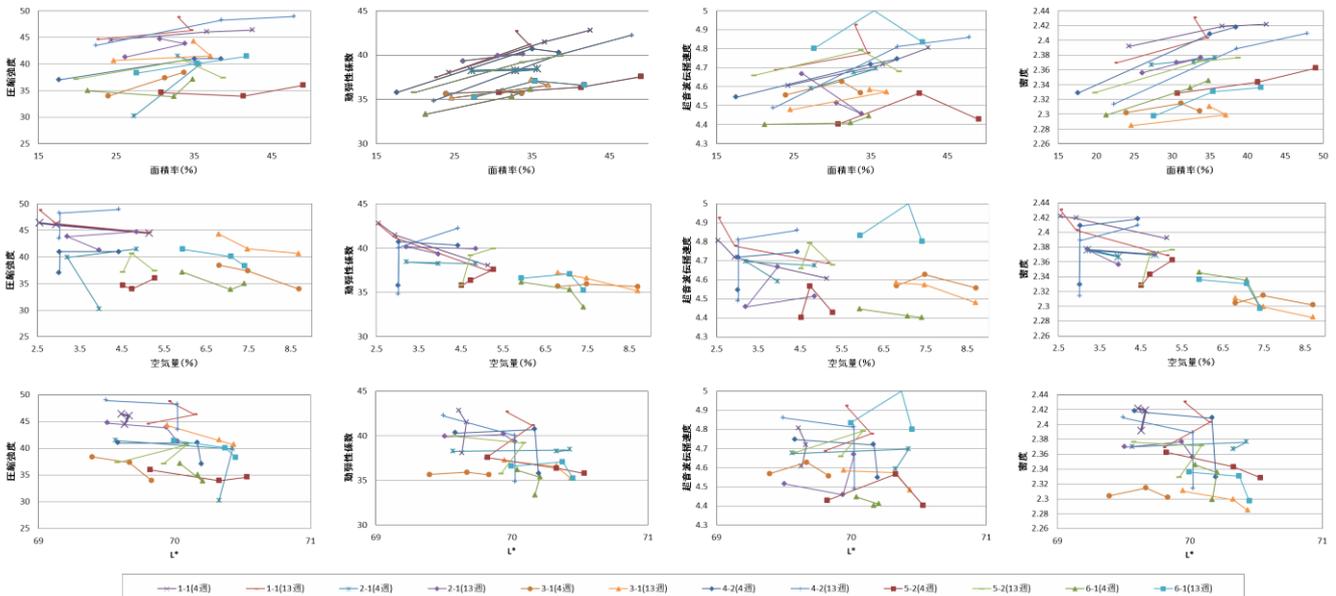


図3 諸性状と各種分布

3.1.3 明度 L*

L*は、人の目を物差しとして評価した色の心理・物理指標である Lab 表色系の明度を表す指標である。白いものほど、L*は高くなり（最大 100）、黒いものほど L*は低くなる（最小 0）。L*は試験体の保存期間が長かったためか差が殆ど見られない4)。色のみで骨材とセメントペーストを分けている為、十分に分けられていることは確認はした（図5）ものの、骨材の多い下側の試験体ほど L*が濃くなる（L*が濃くなる）ことが想定されたが、面積率と L*の値の相関係数は-0.2であった。また、L*の大小関係は大きい方から中下上の順になることが多かった。コンクリートに水をかけると黒くなることとブリーディングを考えると上部の試験体ほど L*が下がると考えられたが、本研究では上がっている。圧をかけることで L*の低いコンクリートができること4)を考慮すれば、そうならないことも考えられる。セメントペースト量は計画調合表からスランプ 12 cm・18 cm で 28.2%・30.3%である。これに対して測定したピクセル数をセメントペースト部とすると、それぞれ 22%、25%であり、大部分のセメントペーストは測定されているものと判断される。なお、以上3つの構成材料同士は、面積率・空気量は $r=-0.2$ 、面積率・L*は $r=-0.2$ 、空気量・L*は $r=-0.1$ であり、それぞれに相関性は見られなかった。

4. 影響割合

構成材料がそれぞれどのような割合で強度に影響しているのかを検討するため、各分布値を関数に持つ3元1次方程式を導く。

4.1 推定式の作成

推定式は以下のように作成する。なお、構成材料 i ii iiiを空気量、L*、面積率として強度を推定したものを表6に示す。

①構成材料 i と圧縮強度の値から、近似曲線（式 A）を作成。（図6上図）

②実測値と式 A に構成材料 i を代入して得られる値（代入値 A）の差（差 A）を計算。面積率のみでは説明のつかない分が計算される。

③差 A と構成材料 ii の値から、近似曲線（式 B）を作成。面積率で説明のつかない分が構成材料 ii とどのような関係にあるか分かる。（図6中図）

④式 B に構成材料 ii を代入した値（補正值 A）を代入値 A に足す（推定値 B）。代入値が実測値に近づく。

表 7 推定式による推定値の実測値との相関係数

構成材料 i	r	4			13			413			
		構成材料 ii	r	構成材料 iii	r	構成材料 i	r	構成材料 ii	r	構成材料 iii	r
面積率	0.304	空気量	0.537	L*	0.739	面積率	0.516	空気量	0.723	L*	0.724
		L*	0.531	空気量	0.739			L*	0.556	空気量	0.696
空気量	0.524	L*	0.789	面積率	0.789	空気量	0.519	L*	0.529	面積率	0.714
		面積率	0.548	L*	0.779			面積率	0.723	L*	0.724
L*	0.493	面積率	0.535	空気量	0.769	L*	0.340	面積率	0.548	空気量	0.659
		空気量	0.789	面積率	0.788			空気量	0.504	面積率	0.659

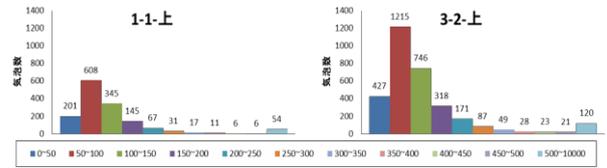


図 4 気泡数比較

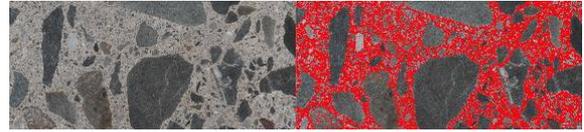


図 5 セメントペースト部分と骨材の分離

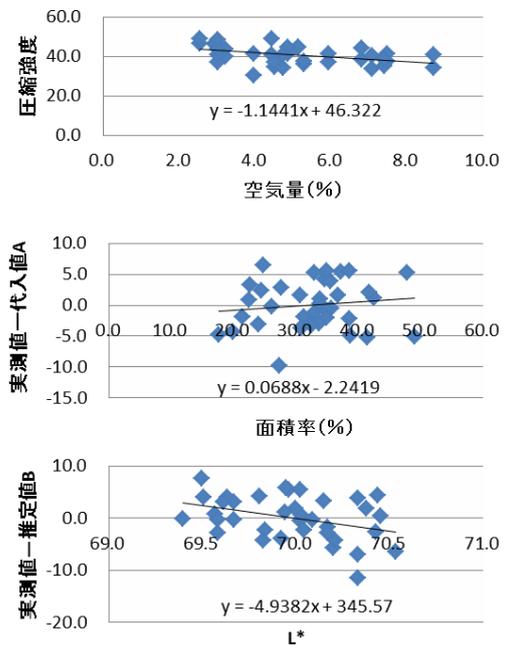


図 6 推定式作成の流れ（上から 4. 1 ①、③、⑥）

表 6 強度の推定例（i：空気量、ii L*、iii 面積率）

	②		③		④		⑤		⑥		⑦	
	代入値 A	実測値-代入	補正值 A	推定値	実測値-代入	補正值 C	推定値 C					
圧縮	$y = -1.1441x + 46.22$		$y = 0.0688x - 2.2419$	ii : L*		$y = 4.9382x + 345.57$	iii : 面積率					
	空気量を代入		L*を代入		面積率を代入							
1-1-	1.20	1.05	0.14	0.04	1.10	0.10	-0.03	1.07				
1-1-	1.24	1.12	0.12	0.04	1.16	0.08	0.01	1.17				
1-1-	1.25	1.13	0.12	0.05	1.18	0.07	0.03	1.21				
1-1-	1.03	1.05	-0.02	0.02	1.08	-0.04	-0.03	1.04				
1-1-	1.07	1.12	-0.05	-0.02	1.10	-0.03	0.01	1.11				
1-1-	1.13	1.13	0.00	0.00	1.13	-0.01	0.00	1.13				
2-1-	0.81	1.09	-0.28	-0.04	1.05	-0.23	-0.02	1.03				
2-1-	1.07	1.11	-0.04	-0.06	1.06	0.02	0.01	1.07				
~												
6-1-	1.00	0.99	0.01	-0.06	0.93	0.07	-0.02	0.91				
6-1-	1.04	1.00	0.05	-0.05	0.95	0.10	0.01	0.96				
6-1-	1.08	1.03	0.05	0.00	1.03	0.05	0.03	1.06				

⑤推定値 B と実測値の差 (差 B) を計算。構成材料 i ii で説明のつかない分が計算される。

⑥差 B と構成材料 iii の値から、近似曲線 (式 C) を作成。構成材料 i ii で説明のつかない分が構成材料 iii とどのような関係にあるか分かる。(図 6 下図)

⑦式 C に構成材料 iii 値を代入した値 (補正值 B) を推定値 B に足す (推定値 C)。推定値 B がさらに実測値に近づく。

以上より、本研究では下の式に代入することで、諸性状を推定する。

$$y = a \times \text{構成材料 i} + b \times \text{構成材料 ii} + d \times \text{構成材料 iii} + f$$

4.2 推定の結果と考察

構成材料と、推定式による推定値の実測値との相関係数 r を表 7 に示す。

4.2.1 4 週のみ の推定

相関係数が良いのは i : 空気量、ii L*、iii 面積率 (r=0.789) または i : L*、ii 空気量、iii 面積率 (r=0.788) 面積率を構成材料 iii にすると相関係数が下がる (r=0.7893→0.7889)。ここから、構成材料 i ii を空気量か L* にするのが良いと考えられる

4.2.2 1 3 週のみ の推定

相関係数が良いのは i : 面積率、ii 空気量、iii L* (r=0.724) または i : 空気量、ii 面積率、iii L* (r=0.724) L* を構成材料 iii にするとあまり相関係数に影響を与えない。ここから、構成材料 i ii を空気量か面積率にするのが良いと考えられるが、i : 空気量 ii : L* iii : 面積率が 3 番目に相関がある (r=0.714)。

4.2.3 4 週と 1 3 週を合わせた場合の推定

相関係数が良いのは i : 空気量、ii L*、iii 面積率 (r=0.684) または i : 空気量、ii 面積率、iii L* (r=0.683)

以上に加え、測定にかかった時間 (表 4) を考慮すれば、i : 空気量、ii : L* として式を作成するのが望ましいと考えられ、空気量・L* の順に強度に関係のあると考えられる。構成材料 i で相関係数の低い場合、推定値 C の相関が最も悪くなるのは、式から想定できる。つまり構成材料 i には強度と相関性の高いものを持ってくるのが望ましい。そこで、この方法を用いて他諸性状の推定式を導出したものを表 8 に示す。

5. まとめ

推定式から、空気量を抑え、L* 値を低減させ、面積率を上げることで強度を高めることができると分かった。そこで施工においてはパイププレートによる振動やスランプの選択に留意することが強度の確保につながると考えられる。

表 8 諸性状に対する推定式一覧

圧縮強度推定式														
	構成材料 i			構成材料 ii			構成材料 iii							
y =	-0.030	空気量	+	(1.208)	+	(-0.123)	L*	+	(8.619)	+	(0.003)	面積率	+	(-0.104)
y =						(0.004)	面積率	+	(-0.143)	+	(-0.099)	L*	+	(6.958)
動弾性係数推定式														
y =	-0.024	空気量	+	(1.114)	+	(-0.054)	L*	+	(3.771)	+	(0.004)	面積率	+	(-0.115)
y =						(0.004)	面積率	+	(-0.132)	+	(-0.032)	L*	+	(2.240)
超音波伝播速度推定式														
y =	0.001	面積率	+	(0.968)	+	(-0.004)	空気量	+	(0.022)	+	(0.013)	L*	+	(-0.888)
y =						(0.010)	L*	+	(-0.688)	+	(-0.005)	空気量	+	(0.023)
密度推定式														
y =	-0.007	空気量	+	(1.035)	+	(-0.013)	L*	+	(0.879)	+	(0.001)	面積率	+	(-0.023)
y =						(0.001)	面積率	+	(-0.027)	+	(-0.008)	L*	+	(0.569)

【参考文献】

- 1) 建築知識. 株式会社エクスマレッジ, 1996, pp.37-43.
- 2) 谷口泉. カメラマンのためのカラーマネジメント術. 翔泳社, 2011, pp.120-135.
- 3) 住宅基礎コンクリートの性状に及ぼす締固め方法の影響, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 佐藤顕太, 宮本真道他: 2) 住宅基礎コンクリートの性質に及ぼす再振動の影響, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.37-40, 2014.2 坂口拓也他: 4) モルタルの色彩地と力学特性の関係に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.17-24, 2002.5 藤森繁他: 谷尻かおり. Processing による画像処理とグラフィックス. 株式会社カットシステム, 2012, 301p. ダニエル・シフマン. NATUREOFCODE Processing ではじめる自然現象のシミュレーション. 株式会社ボーンデジタル, 2014, 420p. 田村秀行. コンピュータ画像処理. 株式会社オーム社, 2013, 337p. 高井信勝. 使い方の基本から、画像処理まで—MARLAB 画像処理入門. 株式会社工学社, 2014, 256p. 長尾智晴. C 言語による画像処理プログラミング入門サンプルプログラムから学ぶ. 阿井國昭, 2011, 239p. 伊藤裕介他. ビジュアル情報処理—CG・画像処理入門. 財団法人画像情報教育振興協会, 2008, 248p. technotype. "Image processing" (<http://www.technotype.net/tutorial/tutorial.php?fileId=%7BImage%20processing%7D§ionId=%7B-converting-between-rgb-and-hsv-color-space%7D>), (参照 2014-11-24). technotype. "Imageprocessing" (<http://www.technotype.net/tutorial/tutorial.php?fileId=%7BImage%20processing%7D§ionId=%7B-converting-between-rgb-and-hsv-color-space%7D>), (参照 2014-11-24).

謝辞) 本研究を進めるに当たり、毎日深夜まで貴重なお話しご指導を頂いた卒業論文指導教員の阿部道彦教授、プログラム作成の際にアドバイスを頂いた石田航星教授、また、本測定を実施するに当たり、協力して得た工学院大学阿部研究室セミナー生の皆さんに、記して感謝の意を表します。

