

柱梁接合部のせん断余裕度が異なる CES 造建物の地震応答値に関する研究

CES 構造 仕口パネル せん断余裕度
時刻歴応答解析 地震応答値

准会員 ○蒲生智*1 正会員 高橋一希*2
正会員 秋田知芳*3 正会員 稲井栄一*4

1.はじめに

CES(Concrete Encased Steel)構造とは、鉄骨に繊維補強コンクリート(FRC)を打設して構成される新しい構造形式で、近年では次世代の合成構造システムとして開発がなされており、CES 構造の耐震性能評価法の提案に向けて活動が行われている²⁾。既往の研究³⁾⁻⁵⁾では、CES の試設計建物について、提案されている評価法に基づいて評価を行い、評価法の適用性を検討すると共に、柱梁接合部のモデル化が耐震性能に及ぼす影響について検討した。また、接合部せん断余裕度を变化させたモデルの等価 1 自由度系の応答値を算定し、接合部せん断余裕度との関係について検討した。一方で、時刻歴応答解析による検討はまだなされていない。そこで、本研究では時刻歴応答解析による地震応答値を算定し接合部せん断余裕度との関係について検討した。

2.耐震性能評価法

CES 構造性能評価法の作成に当たって、柱および梁、柱梁接合部、耐震壁、架構の構造実験結果⁶⁾⁻⁸⁾に基づいて限界耐力計算による構造性能評価に資する技術資料の整備が行われている。本研究の柱梁接合部に関する評価法は CES 柱梁接合部における性能評価²⁾に沿うものとする。柱梁接合部の復元力特性を図 1 に示す。ここで、 Q_{jc} はせん断ひび割れ耐力、 Q_{ju} は終局せん断耐力、 γ_{jc} はせん断ひび割れ時のせん断変形、 γ_{ju} は終局せん断耐力時のせん断変形、 GA は初期剛性である。なお、柱梁接合部は、せん断ひび割れ点、せん断降伏点を有するトリリニアの復元力特性でモデル化することを原則とするが、柱梁接合部が十分剛であるとみなせる場合は剛域と仮定してよいものとする。

3.解析用建物

解析用建物は、文献 5) で用いられた直接基礎の CES 造の地上 13 階建て事務所ビルを使用した。建築面積は 775 m²、延べ床面積は 10,075 m²、最高高さは 52.5m、基準階高さは 3.90m である。基準階略伏図を図 2、略軸組図を図 3、各部材(柱、梁、耐震壁)の断面を表 1~3 にそれぞれ示す。X 方向は純フレーム構造で 5 スパン(スパン長 6m)、Y 方向は連層耐震壁が X2、X5 通りの Y3-Y4 間に 2 か所配してある壁フレーム構造で 3 スパン(スパン長 8m) である。柱、梁は CES 造、壁は鉄筋コンクリート造で、スラブはコンクリートスラブである。表 4 には剛性率の最小値及び偏心率の最大値を示す。偏心はなく接合部せん断余裕度($cQ_{pu}/cQ_{bu} : cQ_{pu}$ および cQ_{bu} は接合部パネルせん断

終局強度および梁曲げ終局強度を柱せん断力に換算した値)は全て 1 以上であり、梁降伏型の建物となっている。

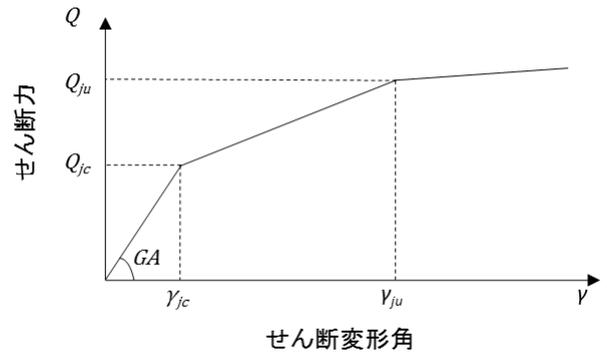


図 1 柱梁接合部の復元力特性

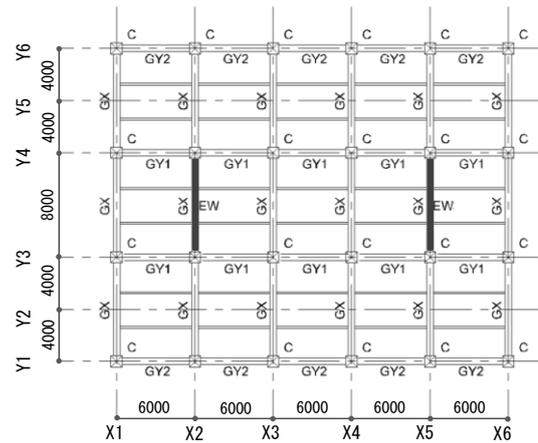


図 2 基準階略伏図(単位:mm)

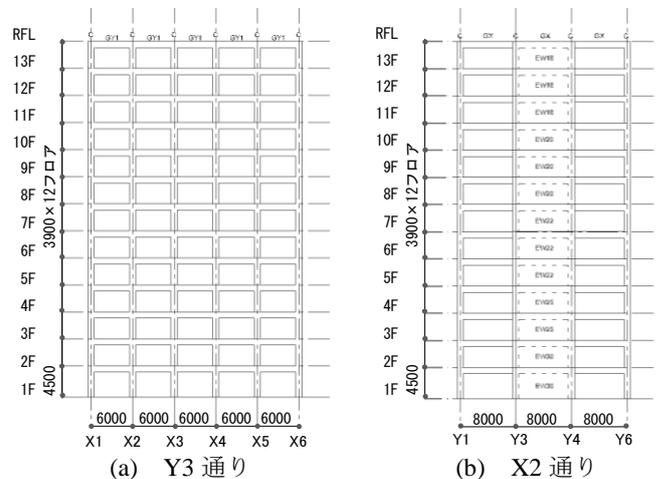


図 3 略軸組図(単位:mm)

表 1 柱及び梁の断面表

階	Fc	柱		梁	
		B×D	鉄骨	B×D	鉄骨
RF	-	-	-	-	-
13	30	800×800	H-600×300×9×22	500×900	H-700×300×9×16
12					H-700×300×9×19
11					H-700×300×12×19
10					H-700×300×12×19
9	33	850×850	H-650×350×9×19	500×900	H-700×300×12×22
8					H-700×300×12×22
7					H-700×300×12×22
6					H-700×300×12×22
5	36	900×900	H-700×400×9×22	500×1000	H-800×300×12×22
4					H-800×300×12×22
3					H-800×300×12×22
2					H-800×300×12×22
1	-	-	-	-	-

表 2 梁の断面表

階	梁			
	B×D	鉄骨	B×D	鉄骨
RF	-	-	-	-
13	500×900	H-700×300×9×16	500×900	H-700×300×9×16
12		H-700×300×9×19		H-700×300×9×19
11		H-700×300×12×22		H-700×300×9×19
10		H-700×300×12×22		H-700×300×12×22
9		H-700×300×12×25		H-700×300×12×22
8		H-700×300×12×25		H-700×300×12×22
7		H-700×300×12×25		H-700×300×12×22
6		H-700×300×12×18		H-700×300×12×25
5		H-700×300×12×18		H-700×300×12×25
4		H-700×300×12×18		H-700×300×12×25
3	500×1000	H-800×300×12×22	500×1000	H-800×300×12×22
2	-	-	-	-
1	-	-	-	-

表 3 耐震壁の断面表

符号	EW18	EW20	EW22	EW25	EW30
壁厚	180	200	220	250	300
配筋	D13@200 ダブル	D13@150 ダブル	D13@100 ダブル	D16@150 ダブル	D19@175 ダブル
備考	11~13階	8~10階	5~7階	3~4階	1~2階

表 4 剛性率及び偏心率

	X方向	Y方向
剛性率	0.742(5階)	0.766(8階)
偏心率	0	0

4. 解析概要

4.1 モデル

解析モデルには、部材を線材置換し剛床を仮定した立体骨組モデルを用いた。立体骨組モデルの梁は単軸バネで曲げとせん断をモデル化し、軸方向に関して剛床仮定により変形しないものとしている。柱および耐震壁のモデルについては MS(Multi Spring)モデルで軸方向と曲げのモデル化を行い、単軸せん断バネでせん断のモデル化を行った。なお、MSモデルの抵抗ヒンジ長さは柱せいDの1/2とした。履歴モデルは梁の曲げは Takeda-Model、せん断は弾性モデルを用いた。また、減衰定数は瞬間剛性比例型とし、1次固有周期に対して3%とした。

4.2 解析ケース

剛域モデルを Model-R、仕口パネルモデルを Model-PT(X方向における十字形接合部のせん断余裕度の最小値1.1に相当する)とする。さらに、接合部せん断余裕度の影響を検討するため、Model-PTのX方向における十字形接合部のせん断余裕度の最小値が1.0、1.2、1.3、1.4、1.5程

表 5 接合部せん断余裕度

方向	形状	Model-m10			Model-PT(m11)			Model-m12		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
X方向	十字形	1.46	1.02	1.22	1.49	1.11	1.31	1.64	1.21	1.42
	ト形	2.21	1.43	1.76	2.28	1.60	1.92	2.57	1.81	2.14
Y方向	十字形	1.52	1.10	1.27	1.52	1.19	1.36	1.58	1.31	1.47
	ト形	2.30	1.55	1.81	2.30	1.73	1.98	2.37	1.96	2.21
方向	形状	Model-m13			Model-m14			Model-m15		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
X方向	十字形	1.79	1.32	1.54	1.91	1.40	1.63	2.05	1.51	1.75
	ト形	2.86	2.02	2.39	3.10	2.19	2.57	3.39	2.40	2.81
Y方向	十字形	1.72	1.42	1.60	1.83	1.52	1.69	1.98	1.82	1.63
	ト形	2.65	2.19	2.47	2.88	2.38	2.66	3.17	2.91	2.61

表 6 固有周期

次数	Model-R		Model-PT	
	X	Y	X	Y
1	1.045	0.859	1.129	0.889
2	0.354	0.257	0.381	0.263
3	0.205	0.132	0.220	0.134

度になるように全接合部の耐力及び剛性を一律に変更したモデルを作成し、それぞれ Model-m10、Model-m12、Model-m13、Model-m14、Model-m15 とした。各モデルの接合部せん断余裕度を表 5 に示す。解析モデルの固有周期を表 6 に示す。X方向については1次固有周期で8%程度 model-R よりも Model-PT の方が長くなっている。また2次固有周期、3次固有周期も共に、1次固有周期と同程度長くなっている。Y方向については Model-R と Model-PT とで大きな違いはなかった。

4.3 地震波について

本解析で使用した地震波は EL Centro NS(1940)、Hachinohe EW(1968)、Taft EW(1952)波の3波である。それらの地震波の強さを50、75cm/sに基準化し、計6種類の地震波で解析を行った。

5. 解析結果と考察

5.1 最大層せん断力及び最大層間変形角

時刻歴応答解析によって得られた層せん断力の分布を図4に、層間変形角の分布を図5にそれぞれ示す。

(1) X方向とY方向の違い

X方向では接合部せん断余裕度が大きくなるほど最大層せん断力は大きくなり、最大層間変形角は小さくなったが、Y方向では最大層せん断力及び最大層間変形角の違いはほとんどなかった。Model-Rの最大層せん断力は、X方向、Y方向共に Model-m15の最大層せん断力よりも大きくなっている。Model-Rの最大層間変形角は、地震波や階数により例外(Hachinohe波50cm/s、Hachinohe波75cm/sの1階~3階及び6階~13階、Taft波50cm/sの6階以上、Taft波75cm/sの7階~10階)はあるものの、一般的に Model-m10よりも小さかった。

(2) 50cm/s と 75cm/s の違い

速度50cm/sにおける最大層せん断力、最大層間変形角のX方向は、接合部せん断余裕度により多少の差は生じていた。速度75cm/sにおける最大層せん断力、最大層間変形角のX方向は、接合部せん断余裕度の違いにより50cm/sと比べてより大きくなっていた。

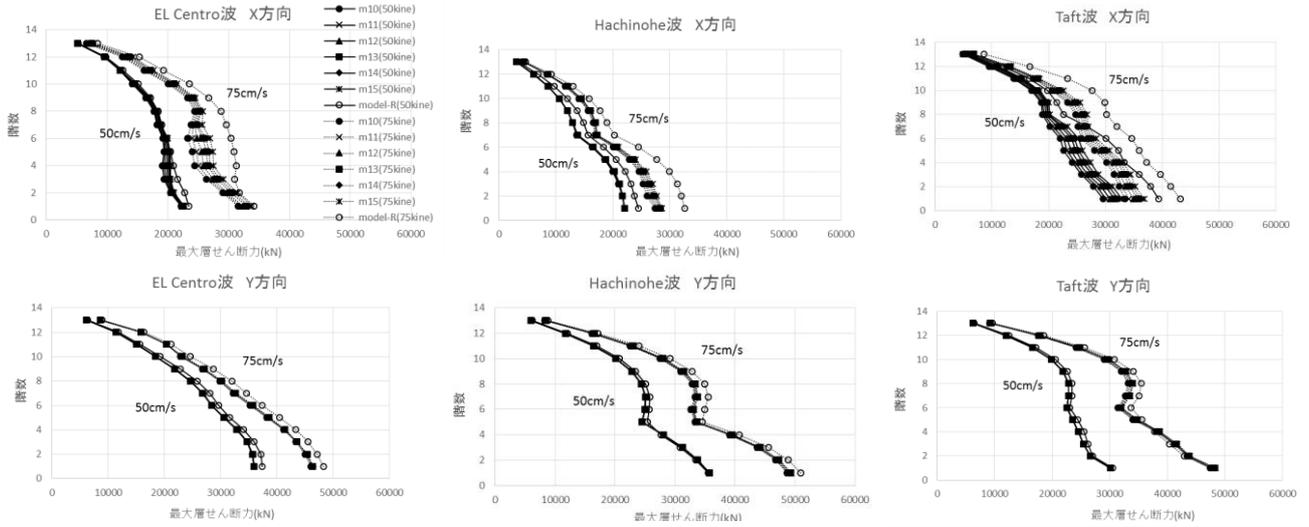


図4 最大層せん断力の分布

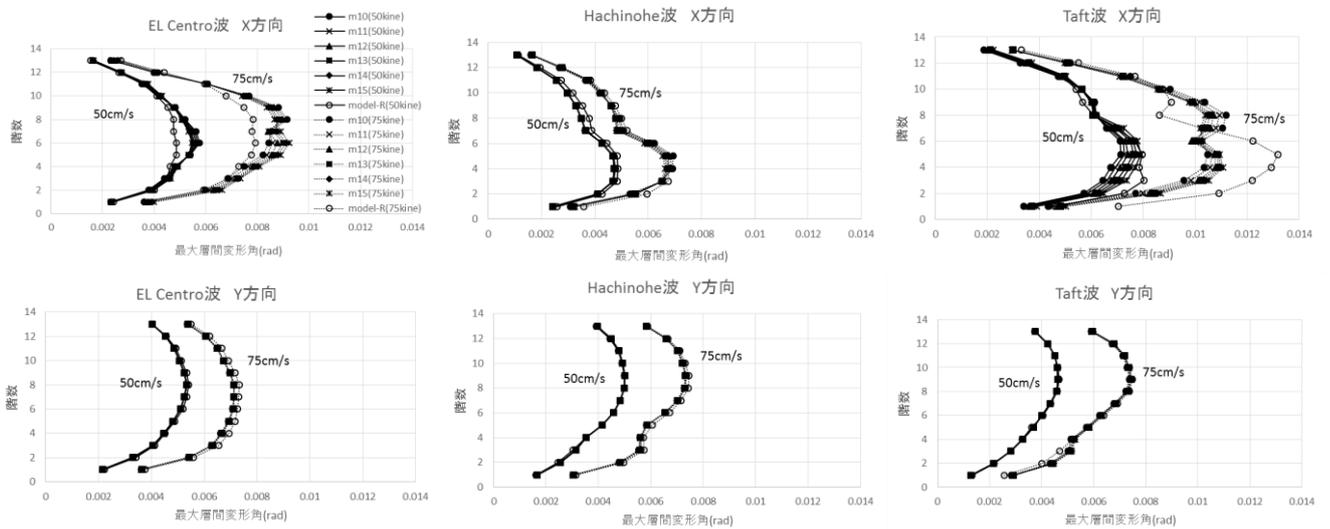


図5 最大層間変形角の分布

(3)地震波の違い

最大層せん断力、最大層間変形角共に EL Centro 波及び Taft 波は接合部せん断余裕度による違いが、Hachinohe 波と比べて大きく出ている。

5.2 接合部せん断余裕度と最大層間変形角の関係

仕口パネルモデルの最大層間変形角を Model-R の最大層間変形角でそれぞれ除したもの(応答比率)と接合部せん断余裕度との関係を図6に示す。応答比率が1.0より大きいと、仕口パネルモデルの最大層間変形角の方が Model-R よりも大きいことを表す。X 方向の応答比率は、0.8~1.2 となり、仕口パネルモデルの最大層間変形角は剛域モデルに比べて約 20%の増減が見られた。

EL Centro 波 50cm/s、Hachinohe 波 75cm/s は接合部せん断余裕度が大きくなると、応答比率が小さくなった。EL Centro 波 75cm/s、Taft 波 75cm/s は接合部せん断余裕度 1.2 までは、応答比率が小さくなっているが、接合部せん断余裕度が 1.2 を超えると、応答比率が大きくなっている。

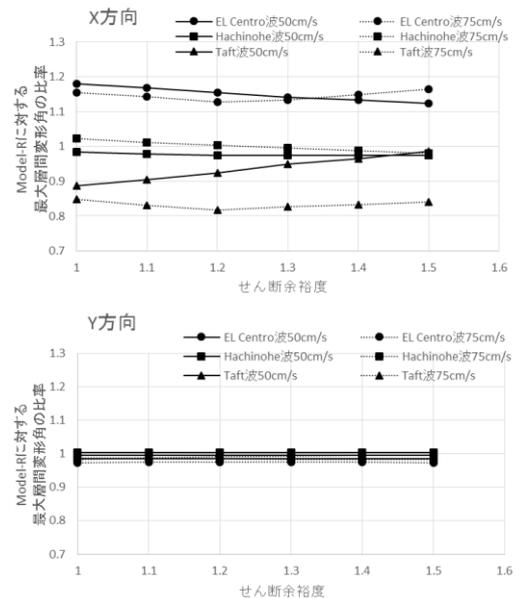


図6 Model-R に対する最大層間変形角の比較

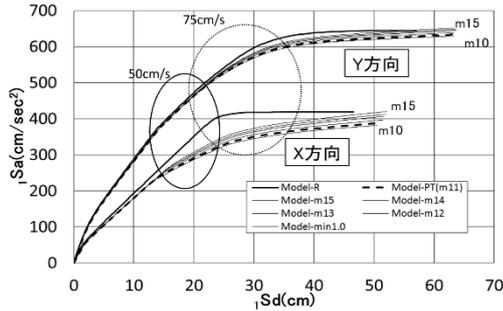


図7 iSa - iSd グラフ

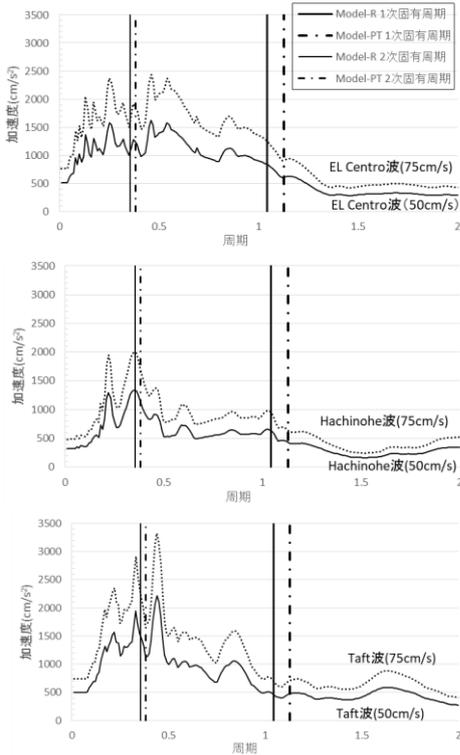


図8 加速度応答スペクトル

Hachinohe 波 50cm/s は接合部せん断余裕度が大きくなることによる、応答比率の変化はほとんどなかった。Taft 波 50cm/s は接合部せん断余裕度が大きくなると、応答比率が大きくなった。Y 方向では接合部せん断余裕度の違いによる、応答比率の違いはほとんど見られなかった。

5.3 地震応答値の変動要因

各モデルの代表荷重(iSa)と代表変位(iSd)の関係を図7に示す。 iSa と iSd は文献5)から引用した。図7には、時刻歴応答解析から求まる、9階位置の水平変位を代表荷重と仮定してその範囲を示す。X方向では iSa - iSd 関係に違いがあり、モデルによる応答の差が出ることを表すが、Y方向では違いが余りない。また、50cm/sに比べて75cm/sの方がその違いが顕著に表れることが分かる。

EL Centro 波、Hachinohe 波、Taft 波それぞれの加速度応答スペクトルを図8に示す。図8には、表6で示した1

次固有周期及び2次固有周期を示している。EL Centro 波およびHachinohe 波では1次固有周期における応答加速度はModel-Rに比べてModel-PTの方が小さくなるが、Taft 波では両者に差はない。Model-PTの方がModel-Rに比べて応答加速度が小さくなる傾向があり、Model-RよりもModel-PTの層間変形角が小さくなる要因となると考えられる。EL Centro 波でModel-Rの方が大きくなるのは、1次固有周期付近の応答加速度がHachinohe 波よりも大きく図7で示した iSa - iSd 関係の違い(Model-Rの剛性に比べModel-PTの剛性が低く変形しやすい)が顕著に表れるためと考えられる。

一方、2次固有周期を見ると、Taft 波はEL Centro 波やHachinohe 波に比べて2次固有周期付近の応答加速度が非常に大きく2次モードの影響を受けやすいと考えられる。Taft 波で他の2波に比べて応答が大きいのは、2次モードの影響が顕著に出ているためである。

6.まとめ

接合部せん断余裕度を変化させたモデルの時刻歴応答解析を行い、地震応答値を算定し接合部せん断余裕度に着目して検討した。

- 1) X方向では最大層間変形角、最大層せん断力共に接合部せん断余裕度による違いが見られたが、Y方向では接合部せん断余裕度による違いは余り見られなかった。
- 2) X方向では最大層間変形角及び最大層せん断力共に、Hachinohe 波に比べてEL Centro 波、Taft 波の方が、接合部せん断余裕度による違いが顕著であった。
- 3) X方向では時刻歴応答解析による仕口パネルモデルの最大層間変形角は剛域モデルの最大層間変形角に比べて、約20%増減した。

参考文献

- 1) 倉本洋：今伝えたいトピックス CES 合成構造システム、建築雑誌、Vol.120、No.1535、pp.34-35、2005.7
- 2) 日本建築学会：2013年度日本建築学会大会（北海道）構造部門（SCCS）PD資料「CES造建築物の構造性能評価指針（案）の制定に向けて」、67pp、2013.8
- 3) 井上翔、秋田知芳、稲井栄一：試設計建物を用いたCES構造性能評価法の適用性に関する研究、日本建築中国支部研究報告集、第38巻、pp.249-252、2015.3
- 4) 仲野叶子、秋田知芳、稲井栄一：柱梁接合部のモデル化がCES造建築物の耐震性能に及ぼす影響に関する研究、日本建築中国支部研究報告集、第39巻、pp.213-216、2016.3
- 5) 高橋一希、秋田知芳、稲井栄一：柱梁接合部のせん断余裕度が異なるCES造建築物の等価1自由度系応答値に関する研究、日本建築中国支部研究報告集、第41巻、pp.281-284、2018.3
- 6) 松井智哉、倉本洋：CES柱梁接合部の構造性能に及ぼす作用軸力の影響、日本建築学会構造系論文集、第663号、pp.1025-1031、2011.5
- 7) 鈴木卓、松井智哉、倉本洋：壁縦筋の定着方法の異なるCES造連層耐震壁の非線形FEM解析、日本建築学会構造系論文集、第666号、pp.1533-1540、2011.8
- 8) 石釣吉、牧元祐太、Juan Jose CASTRO、松井智哉、倉本洋：H型鉄骨内蔵CES柱の変形能力評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第682号、pp.1977-1982、2012.12
- 9) 倉本洋：多層建築物における等価1自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測、日本建築学会構造系論文集、第580号、pp.61-68、2004.6

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.

*2 山口大学大学院創成科学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*3 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士（工学）

Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.

*4 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士（工学）

Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.