

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ギャップブレースを取り付けた架構の静的載荷実験における事前解析
Title(English)	Preliminary analysis in static loading test of frame with Gap brase
著者(和文)	美濃地 正樹, 佐藤大樹, 笠井和彦, 上野史也, 渡井一樹, 佐分利和宏, 増田寛之, 前田達彦
Authors(English)	Masaki Minoji, Daiki Sato, Kazuhiko Kasai, Fumiya Ueno, Kazuki Watai, Kazuhiro Saburi, Hiroyuki Masuda, Tatuhiro Maeda
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 477-480
Citation(English)	, , , pp. 477-480
発行日 / Pub. date	2020, 3

ギャップブレースを取り付けた架構の静的載荷実験における事前解析

構造—振動

既存超高層建物 制振改修 長周期地震動
変形制御機構 ギャップブレース正会員 ○ 美濃地 正樹*1 正会員 佐藤 大樹*2
正会員 笠井 和彦*3 正会員 上野 史也*1
正会員 渡井 一樹*4 正会員 佐分利 和宏*5
正会員 増田 寛之*5 正会員 前田 達彦*5

1. はじめに

近年、南海トラフ地震による長周期地震動が三大都市圏（関東、中京、大阪）等で発生することが予想されており、超高層建物への被害が懸念されている。これに対し、国土交通省は、2016年技術的助言を通知し、設計用長周期地震動として基整促波を策定したり、基整促波は、これまでの設計レベルを大きく上回る値を示しているため、既存超高層建物においても、基整促波に対する耐震性を検証することが望ましく、場合によっては改修が必要となる。そして、建物の固有周期を変えることのない制振ダンパーと大振幅地震動のときにのみフェイルセーフとして作用する変形制御機構を併用した制振改修が幾つか提案されている^{2)~5)}。その中でも著者ら⁵⁾は、オイルダンパーと、層間変形があるレベルを超えたときのみ、層剛性を高めて、変形増加を防ぐ機構を設けたブレース（以降、ギャップブレースと呼ぶ）を取り付ける制振改修設計例を示した。しかし、ギャップブレースの主架構への実際の取り付け方を具体的に示した検討は未だ行われていない。そこで、ギャップブレースを設置した縮小1層1スパンの主架構を設計し、静的繰返し載荷実験を実施することで上梁の挙動を確認することにした。本報では、設計した試験体を基に解析モデルを作成し、静的載荷実験を想定した事前解析を実施することで、実験に先立って、ギャップブレースが作用した際の主架構の挙動について検討する。

2. フレームモデル

2.1 設計概要

本報では、試験体を想定した既存超高層建物の0.25倍となるよう作成した。本章では、図1に示す、柱と梁部材のみで構成された、高さ962.5mm幅1800mmの架構（以降、フレームモデル）を設計し、解析モデルを作成することで、架構の剛性および挙動を検討する。

柱梁耐力比が1.2となるように、試験体の柱および梁断面を決定した。当初、柱断面をSTKR490角型鋼150×150×12にし、梁断面をSN490 H形鋼200×100×5.5×8で設計をしていたが、この梁断面ではSN490材がなく、かつビルド材での製作が困難であったため、SS400材にお

いて同等の断面性能を有するH形鋼194×150×6×9に決定した。柱梁接合部はPL-16の通しダイアフラム形式とし、柱脚はピン支持とした。

2.2 解析モデル概要

図1にフレームモデルにおける解析モデルを示す。節点を黒丸で示し、柱、梁部材を赤線で、剛域を黒太線で示す。架構の支持条件はピン支持とし、全ての節点を面外方向（Z方向）に拘束した。また、加力点は上梁左端の節点とした。梁および柱を、非線形梁柱要素（以降、梁要素）でモデル化し、柱、上梁と下梁は前節で記載した部材の断面性能を設定した。柱梁接合部のパネルゾーンのフェイスまでを剛域と設定し、柱脚部はピン支持治具のピン中心までを剛域と設定した。

静的載荷実験において、試験体の柱、梁は曲げモーメントMと軸力Nを同時に受けることが考えられる。事前解析検討においても、上記を踏まえた部材耐力評価を実施するため、梁要素のM-N相関を図2に示すように設定した。

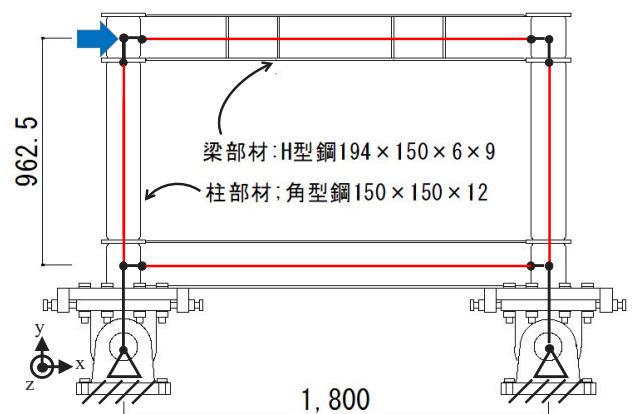


図1. フレームモデル（単位：mm）

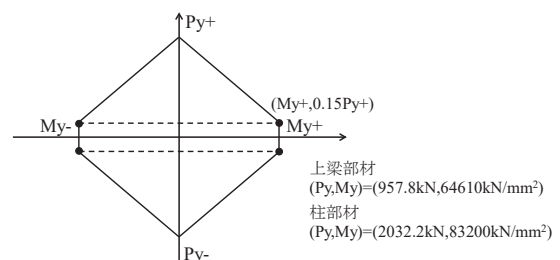


図2. 梁要素 M-N 相関

Preliminary analysis in static loading test of frame with Gap brase

MINOJI Masaki, SATO Daiki, KASAI Kazuhiko
UENO Fumiya, WATAI Kazuki, SABURI Kazuhiro
MASUDA Hiroyuki, MAEDA Tatuhiro

2.3 解析結果

本節では、フレーム剛性およびフレーム降伏時の層間変位を検討するために、変位制御により加力点変位を 5000 ステップ刻みで 20 mm に達するまで漸増単調載荷解析を実施した。図 3 にフレームのせん断力 Q とフレームの層間変形 Δu の関係を示す。なお、フレームのせん断力 Q は柱のせん断力の総和とし、層間変形 Δu は上梁の左端と下梁の左端の x 方向変位の差とする。図 3 より、フレーム剛性 K_f の値は、 49.1 kN/mm^2 となることがわかる。また、① $\Delta u = 4.51 \text{ mm}$ (層間変形角 $R = 1/213$) で下梁両端に降伏が生じたことで、フレーム剛性は 0.3 倍程度に低下し、② $\Delta u = 5.09 \text{ mm}$ ($R = 1/189$) で上梁両端に降伏が生じたことで、フレーム剛性は 0.2 倍程度に低下した。このことから、下梁を上梁の断面と等しい SS400 H 形鋼 $194 \times 150 \times 6 \times 9$ を使用した場合、下梁が上梁よりも先に降伏するという結果が得られた。

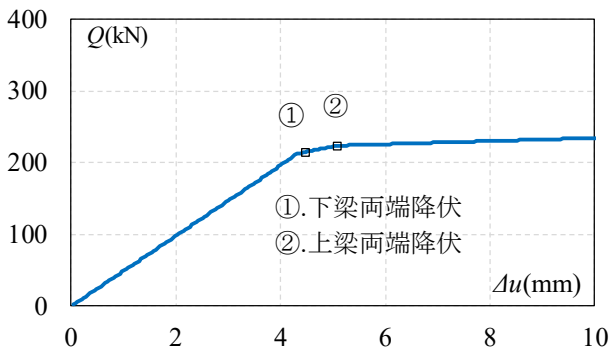


図 3. 層せん断力-層間変形関係 (フレームモデル)

3. 付加フレームモデル

3.1 設計概要

前章より、下梁を上梁断面と等しくすると、下梁が上梁よりも先に降伏するという結果が得られた。しかし、実験では、上梁の挙動を確認することを目的としており、下梁が降伏することは望ましくない。そこで下梁を弾性に保つため、H 形鋼 $200 \times 100 \times 9 \times 22$ を使用し、長さ 355 mm のカバープレート PL-9 を下梁に接合した。

試験体に、ブレースを取り付けるためのガセットプレートと、主架構の変形が進んだ際、ブレースと接触させる部材 (以降、ビームヘッジ) を取り付けることで、フレーム剛性 K_f の値は上昇すると考えられる。本章では、下梁断面を変更し、ガセットプレートおよびビームヘッジを接合した架構 (以降、付加フレームモデル、図 4) の剛性および挙動を検討する

3.2 解析モデル概要

図 4 に付加フレームモデルにおける解析モデルを示す。下梁はガセットプレート接合部の端部までを剛域とし、柱下部はガセットプレート接合長さの 0.25 倍剛域を延長した。下梁のカバープレートを接合した箇所および上梁のビ

ームヘッジを取り付けた箇所は、耐力及び剛性の上昇を考慮した断面性能を有する梁要素で新たに部材を設定した。

3.3 解析結果

本節では、フレーム剛性およびフレーム降伏時の層間変位を知ることを目的とし、変位制御により加力点変位を 5000 ステップ刻みで 20 mm に達するまで漸増単調載荷解析を実施した。図 5 にフレームのせん断力 Q とフレームの層間変形 Δu の関係を示す。図 5 より、フレーム剛性 K_f の値は、 73.6 kN/mm^2 となることがわかる。また、① $\Delta u = 4.28 \text{ mm}$ ($R = 1/225$) で上梁両端に降伏が生じたことで、フレーム剛性は 0.6 倍程度に低下し、② $\Delta u = 5.90 \text{ mm}$ ($R = 1/163$) で左柱下側に降伏が生じたことで、フレーム剛性は 0.2 倍程度に低下し、③ $\Delta u = 6.31 \text{ mm}$ ($R = 1/153$) で右柱下側に降伏が生じたことで、フレーム剛性は 0.05 倍程度に低下した。

フレームモデルの解析結果と比較すると、下梁の断面を大きくし、下梁にカバープレートとガセットプレート、上梁にビームヘッジを接合したことにより、 K_f の値はフレームモデルの約 1.5 倍に上昇したため、上梁の降伏が早く生じた。また、柱下部に降伏が生じたが、下梁の断面を SN490B の BH- $200 \times 100 \times 9 \times 22$ にし、長さ 355 mm の PL-9 を端部に接合したため、下梁に降伏は生じなかった。

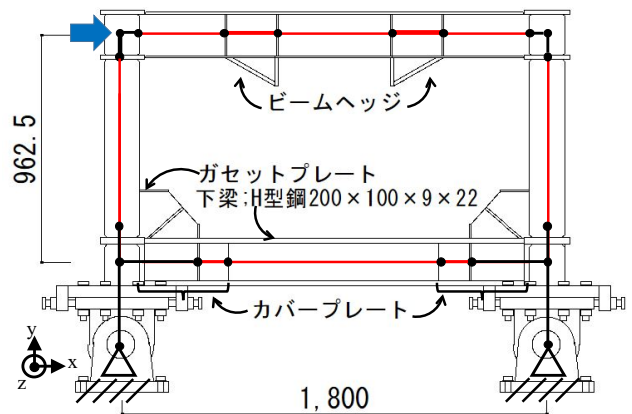


図 4. 付加フレームモデル (単位: mm)

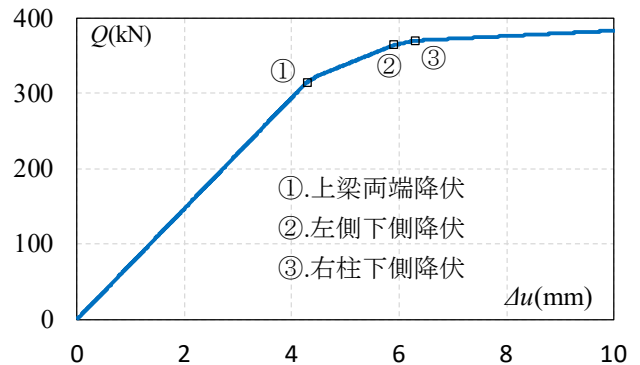


図 5. 層せん断力-層間変形関係 (付加フレームモデル)

4. ギャップブレースモデル

4.1 設計概要

本節では、付加フレームモデルにブレースを取り付け、実験を想定したギャップブレース付き主架構(以降、ギャップブレースモデル、図6)について検討する。本検討のギャップブレースは想定外の地震が発生した際、架構にある程度の損傷が生じることは許容するが、建物の崩壊は防ぐという設計コンセプトである。そのため、上梁の降伏が生じた後、ギャップブレースが作動する機構となるよう、ビームヘッジと接触させるための部材(以降、ブレースヘッド)をブレースの上部に取り付け、ビームヘッジとの間隔(以降、ギャップ間隔)を設けた。なお、本検討では、上記の設計コンセプトを考慮し、3.3節よりギャップ間隔を5.5mmとした。ブレース材は、フレームモデル解析結果より得られたフレーム剛性 K_f と、ブレース剛性 K_b の比が1:6となるように断面を算定し、STKR 400角型鋼80×80×4.5に決定した。ブレースヘッドの面外方向の挙動を抑えるため、ブレースヘッドの面外両方向にビームヘッジとボルト接合した溝形鋼75×90×6×9(以降、面外拘束部材)を設けた。

4.2 解析モデル概要

図6に、ギャップブレースモデルにおける解析モデルを示す。柱、梁部材に加え、ブレース、面外拘束部材を赤線で示す。表1に、解析モデルで設定した部材の諸元を示す。試験体のブレース材は、ボルト接合ではなく、溶接でガセットプレートに接合されているため、本解析モデルでは、端部を剛接合の梁要素でモデル化した。また、梁要素の端点と、ブレースと接合されているガセットプレートの端点の長さの半分までを剛域とした。面外拘束部材は、ビームヘッジの先端を端点にし、梁要素でモデル化した。ギャップは、ギャップ要素を用いて剛性を極めて高い値とし、間隔を5.5mmに設定した。

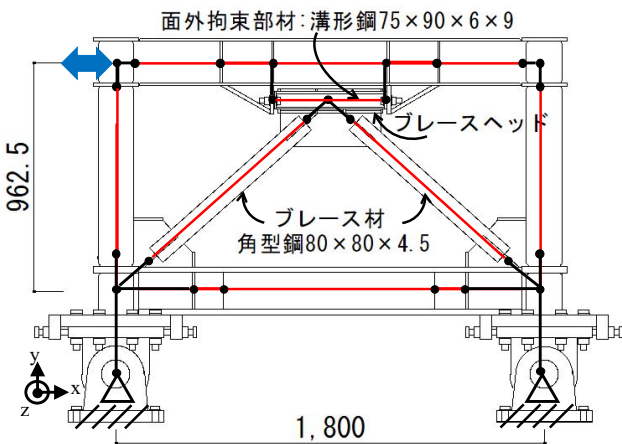


図6. ギャップブレースモデル (単位: mm)

4.3 解析結果

図7に示すように、目標とする層間変位 Δu を3mm, 5mm, 7mmおよびブレース材の軸力降伏時とした、正負4

サイクルの漸増繰返し解析を実施する。図8に、ギャップブレースモデルにおけるシステムのせん断力 Q 、フレームのせん断力 Q_f 及びギャップブレースのせん断力 Q_g とフレームの層間変形 Δu の関係を示す。ギャップブレースのせん断力 Q_g は左右のブレースに生じる軸力のx方向成分の総和とし、システムのせん断力 Q はフレームのせん断力 Q_f およびブレースのせん断力 Q_g の総和とする。図8より、フレーム剛性 K_f の値は、面外拘束部材をモデル化したことで、74.3 kN/mm²に上昇し、ギャップブレースが剛性を発揮後のブレース剛性である、等価ブレース剛性 K_{ga} の値は、243.0 kN/mm²で、 K_f と K_{ga} の比は1:3.27となった。また、① $\Delta u = 4.28$ mm ($R = 1/225$)で上梁左端に降伏が生じたことで、フレーム剛性は0.6倍程度に低下し、② $\Delta u = 4.35$ mm ($R = 1/221$)で上梁右端に降伏が生じたことで、フレーム剛性は0.4倍程度に低下した。 $\Delta u = 5.5$ mm ($R = 1/175$)でギャップブレースが剛性を発揮した後、フレームのせん断力 Q_f は低下し、③ $\Delta u = 6.92$ mm ($R = 1/139$)で左右ブレース下端に、④ $\Delta u = 7.51$ mm ($R = 1/128$)で左右ブレース上端に降伏が生じた。なお、⑤ $\Delta u = 7.53$ mm ($R = 1/127$)でブレースの軸降伏力に相当する軸力が作用した。

図9に上梁左端降伏時①の応力を、図10に左右ブレース下端降伏時③の応力を示す。部材の降伏位置を○で、モーメントを実線で、ブレースに生じる軸力を矢印で示す。図9より、上梁のモーメントは、面外拘束部材の影響により若干のずれはあるものの、概ね連続的であることが確認されたが、図10より、ギャップブレースが剛性を発揮した後、上梁に偏心曲げモーメントが作用し、上梁のモーメントは不連続となることが確認された。なお、柱のせん断力と曲げモーメントが低下したことにより、柱の降伏は抑えられた。図9, 10より、ブレース端部を剛接合として、モデル化したため、ブレース下端部は、主架構の変形により曲げモーメントが生じた。

図11に上梁左端のM-N相関を示す。図11より、上梁左端は曲げによる降伏が生じ、ギャップブレースが剛性を発揮後、曲げは減少し、軸力が増加した。図12にブレース材のM-N相関を示す。図12より、ブレース材は架構の変形が進むにつれ、軸力の値が増大し続け、ブレース上端上端の降伏時は軸力の影響が大きくなった。

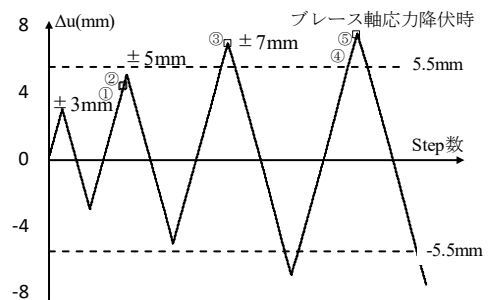


図7. 载荷プログラム

表 1. ギャップブレスモデルの諸元

部材名	E(kN/mm ²)	E _t /E	A(mm ²)	I(mm ⁴)	せん断面積(mm ²)	ポアソン比	M _{y+} (kN・mm)	M _{y-} (kN・mm)	N _{p+} (kN)	N _{p-} (kN)
上梁	205.8	0.03	3811	2.65.E+07	1111	0.3	63615	-63615	896	-896
上梁(ビームヘッジ取り付け部)	205.8	0.03	6908	1.06.E+08	1814	0.3	155024	-155024	1624	-1624
下梁	205.8	0.03	5804	3.79.E+07	1404	0.3	123110	123110	1886	1886
下梁(カバープレート取り付け部)	205.8	0.03	9404	4.99.E+07	4212	0.3	162100	162100	3056	3056
面外拘束部材	205.8	0.03	1962	1.87.E+06	342	0.3	16188	-16188	638	-638
柱部材	205.8	0.03	6253	1.92.E+07	3600	0.3	83200	83200	2032	-2032
ブレース材	205.8	0.03	1307	1.22.E+06	720	0.3	7448	-7448	320	320
剛域	205.8	0.03	1.00E+08	1.00.E+08	-	-	1.00E+08	1.00E+08	1.00E+08	1.00E+08

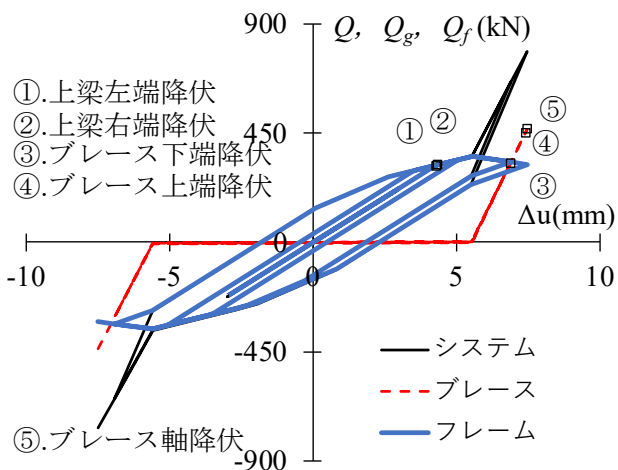


図 8. 層せん断力-層間変形関係(ギャップブレスモデル)

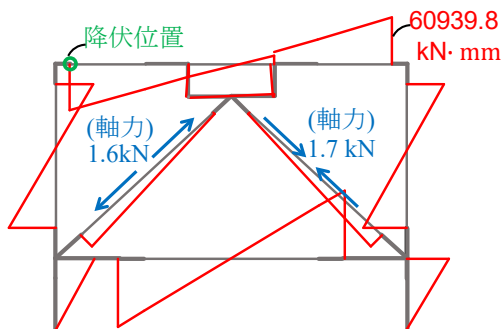


図 9. 上梁左端降伏時応力(①)

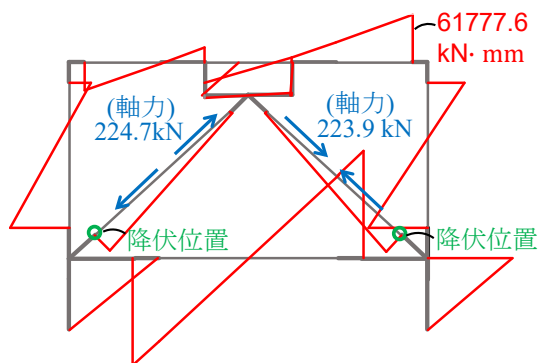


図 10. ブレース下端降伏時応力(③)

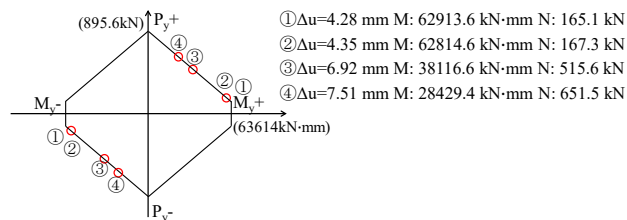


図 11. 上梁左端の M-N 相関

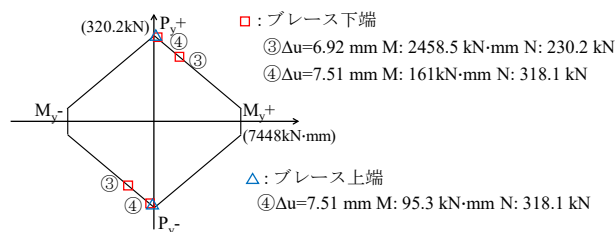


図 12. ブレース材の M-N 相関

5. まとめ

本報では、0.25 倍スケールにおける 1 層 1 スパンの試験体に基づき解析モデルを作成し、ギャップブレスが作用した際の主架構の挙動の検討を目的とした静的載荷実験の事前解析を実施した。本検討結果は事前解析結果より得られたものであり、今後予定する実験によって、モデル化の精度を検討していく予定である。

謝辞

本研究は東京工業大学と(株)竹中工務店との共同研究であり、一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 国土交通省:超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言), 2016.06
- 佐藤大樹, 船木尚己, 川股重也: 硬化型非線形復元力をもつ制振架構の振動応答, 日本地震工学シンポジウム論文集, 第 11 号, pp.1649-1654, 2002,11
- 野村尚史, 佐藤大樹, 北村春幸, 植木卓也, 宮川和明: 高強度鋼と制振部材及び変形制御機構を組合わせた高耐震性能構造の部材レベルモデルによる検討, 日本建築学会大会関東支部研究報告集, 2013.03
- 南博之, 鈴木恭平, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕: パルス性地震動に対する変形制御機構の効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 39 号, 471-476, 2012.06
- 増田寛之, 上野史也, 渡井一樹, 佐藤大樹, 笠井和彦, 佐分利和宏, 前田達彦: 既存超高層建物の大振幅地震動に対する制振改修, その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 21433, 2019, 09

*1 学生会員 東京工業大学 大学院生
 *2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)
 *3 東京工業大学 科学技術研究創成院 特任教授・Ph.D
 *4 東京工業大学 科学技術研究創成院 特任助教・博士(工学)
 *5 株式会社 竹中工務店

*1 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology
 *2 Associate Professor, FIRSI, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng
 *3 Specially Appointed Prof, Tokyo of Technology
 *4 Specially Appointed Assist.Prof, Tokyo of Technology, Dr. Eng
 *5 Takenaka Corporation