

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	カーブフィット法を用いたLGS間仕切り壁の振動数および減衰定数の同定
Title(English)	Evaluation of natural frequency and damping of LGS partition walls based by using curve-fit method
著者(和文)	萩原宙, 佐藤大樹, 陳引力, 吉敷祥一, 石原直, HUANG Yuzi
Authors(English)	Sora Hagiwara, Daiki Sato, Yinli Chen, Shoichi Kishiki, Tadashi Ishihara, Yuzi Huang
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 457-460
Citation(English)	, , , pp. 457-460
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

# カーブフィット法を用いた LGS 間仕切り壁の振動数および減衰定数の同定

構造—振動

軽量鉄骨下地 固有振動数 減衰定数

地震観測記録 非構造部材

準会員	○ 萩原 宙 <sup>*1</sup>	正会員	佐藤大樹 <sup>*2</sup>
正会員	陳 引力 <sup>*3</sup>	〃	吉敷祥一 <sup>*4</sup>
〃	石原 直 <sup>*4</sup>	〃	黄 鈺紫 <sup>*5</sup>

## 1. はじめに

近年、大規模な地震が発生した際は、柱や梁などの構造部材の損傷が生じていないにも関わらず、非構造部材の落下や損傷による直接的な人的被害や、避難経路の通行妨害による二次災害などの問題が発生する事例が報告されている<sup>1)</sup>。これらの被害を軽減するために、非構造部材の動的挙動を解明する必要がある。非構造部材の既往研究として、間仕切り壁の振動台実験の報告<sup>2)5)</sup>が挙げられるが、これらは間仕切り壁のみを対象として部分的な動的挙動を再現しているものの、実験では考慮されていない周辺部材を含めた現実的な条件での動的挙動の把握も必要である。しかし、実際の建物の非構造部材の観測や分析を行った報告例は少なく、間仕切り壁の動的挙動は不明な点が多いのが現状である。

本報では、実際の建物に設置された非構造部材、特に間仕切り壁の観測記録を用いて、間仕切り壁の地震時の応答性状を分析する。具体的には、東京科学大学すずかけ台キャンパスの J2-3 棟での観測記録に基づく振動数と減衰の同定により、間仕切り壁の動的応答性状を分析する。

## 2. 対象建物および観測システムの概要

対象建物は、Fig. 1 に示す東京科学大学すずかけ台キャンパスの J2-3 棟である<sup>6)</sup>。J2-3 棟は 20 階建ての高さ 91.4 m の超高層免震建物であり、免震層は 1 階と 2 階の間にある。構造部材の加速度計について、J2 棟は 1 階、免震層、2 階、7 階、14 階、20 階に合計 27ch の加速度計が、J3 棟は免震層の床と天井、7 階、14 階、19 階、20 階に合計 32ch の加速度計が設置されている。本報では、J3 棟 7 階の床および間仕切り壁の観測データの記録を扱う<sup>7)</sup>。加速度計の設置場所を Fig. 2 に、設置状況を Fig. 3 に示す。加速度計 P0 は床に、加速度計 P1 と P2 は間仕切り壁の壁面に設置されている。加速度計 P1 と P2 は Fig. 3 のように床からそれぞれ 1960 mm、1280 mm の高さに設置され、加速度計 P0 は床に設置されており、P0 と P1、P2 は平面的には約 5 m 離れている。加速度計のサンプリング周波数は 100 Hz、カットオフ周波数は 31.25 Hz である。

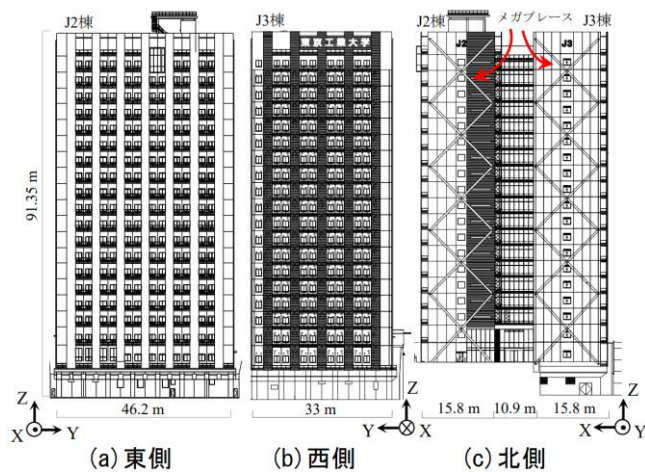


Fig. 1 J2-3 棟立面図

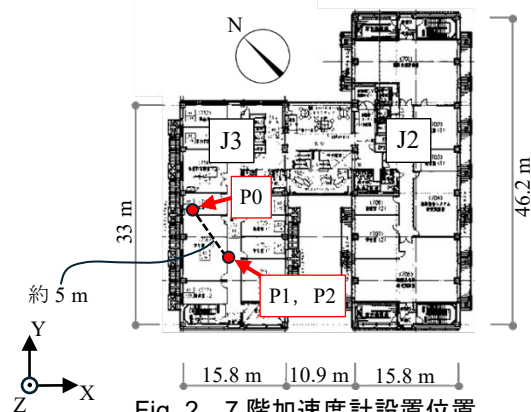


Fig. 2 7階加速度計設置位置

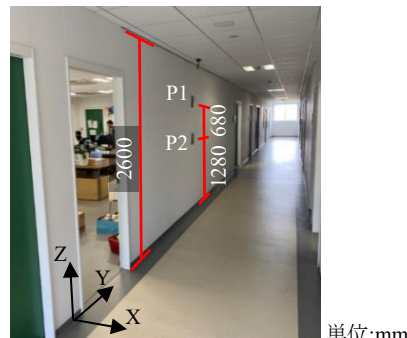


Fig. 3 加速度計 P1, P2 設置状況

対象の間仕切り壁は、下地が C65 形@303、仕上げが 12.5 mm の強化せつこうボードと 9.5 mm の硬質せつこうボードの両面 2 枚張の仕様である<sup>7)</sup>。

### 3. 地震動の概要

Table 1 に、本報で扱う地震の一覧と、それぞれの地震において免震層の床と 7 階で計測された最大加速度を示す。ここでは、Fig. 2 での X と Y の 2 方向の最大加速度を示す。

Table 1 対象の地震と最大加速度

No.	地震発生時刻	免震層[cm/s <sup>2</sup> ]		7階[cm/s <sup>2</sup> ]	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
①	2022/03/16 23:36	13.87	10.85	13.67	16.23
②	2022/07/09 19:10	4.62	3.19	1.04	2.19
③	2022/09/03 11:54	1.82	1.10	1.04	1.66
④	2022/09/23 09:53	1.91	1.68	1.18	1.98
⑤	2022/09/30 14:58	1.49	1.48	1.27	1.41
⑥	2022/11/09 17:40	1.45	1.70	1.11	1.90
⑦	2022/11/14 17:08	2.48	2.74	2.31	2.52
⑧	2022/12/16 09:25	1.28	1.19	1.24	1.55
⑨	2022/12/27 09:09	2.31	1.31	1.11	1.37
⑩	2023/01/29 21:19	1.63	1.19	1.38	1.35
⑪	2023/05/10 11:20	2.62	2.40	1.37	1.51
⑫	2023/05/11 04:16	5.45	4.41	3.52	3.30
⑬	2023/05/26 19:03	2.41	2.82	2.37	4.04
⑭	2024/01/01 16:10	3.21	5.27	6.31	12.82

### 4. 加速度計の観測記録の分析

加速度計 P0 にて観測された加速度を Fig. 4 に、加速度計 P1 にて観測された加速度を Fig. 5 に示す。

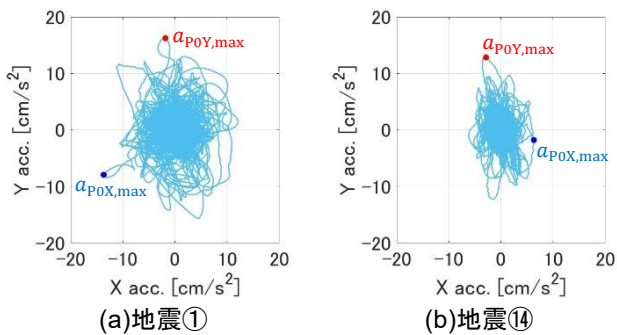


Fig. 4 J3 棟 7 階床 (P0) の加速度オービット

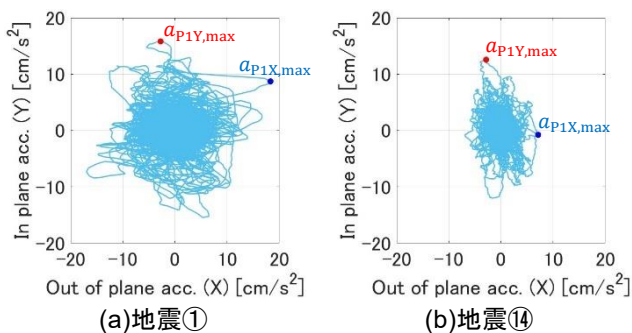


Fig. 5 J3 棟 7 階間仕切り壁 (P1) の加速度オービット

これらは、X 方向を横軸に、Y 方向を縦軸にとった加速度オービットであり、X 方向の最大加速度を青色で、Y 方向の最大加速度を赤色でプロットしている。なお、X 方向が間仕切り壁の面外方向であり、Y 方向が面内方向である (Fig. 3)。ここでは例として、Table 1 の地震①と地震⑭の加速度を示している。

Fig. 4 と Fig. 5 より、どちらの地震でも 7 階床に対して間仕切り壁は近い応答となっているが、床の最大加速度に対する間仕切り壁の最大加速度の割合は、方向や地震によって異なることがわかる。

### 5. 面内方向と面外方向の比較

#### 5.1 床の最大加速度と増幅率の関係

Fig. 4 と Fig. 5 のプロットで示した、7 階床の最大加速度と間仕切り壁の最大加速度の比を増幅率  $Amp_X$ ,  $Amp_Y$  とし、式(1)にて定義する。

$$Amp_X = \left| \frac{a_{PiX,max}}{a_{PoX,max}} \right|, \quad Amp_Y = \left| \frac{a_{PiY,max}}{a_{PoY,max}} \right| \quad (1)$$

$a_{PiX,max}$ : 加速度計 P1,P2 の X 方向最大加速度 (間仕切り壁)

$a_{PoX,max}$ : 加速度計 P0 の X 方向最大加速度 (床)

$a_{PiY,max}$ : 加速度計 P1,P2 の Y 方向最大加速度 (間仕切り壁)

$a_{PoY,max}$ : 加速度計 P0 の Y 方向最大加速度 (床)

7 階床の最大加速度  $a_{PoX,max}$ ,  $a_{PoY,max}$  と増幅率  $Amp_X$ ,  $Amp_Y$  の関係を Fig. 6 に示す。青色が面外方向 (X), 赤色が面内方向 (Y) であり、●が加速度計 P1, ▲が加速度計 P2 である。

Fig. 6 より、面内では増幅率  $Amp_Y$  が地震によらずおよそ 1 で一定である一方、面外方向では、 $a_{PoX,max}$  が大きくなるにつれて増幅率  $Amp_X$  が小さくなる。 $a_{PoX,max}$  が 6 cm/s<sup>2</sup> 以下では、 $a_{PoX,max}$  が増加すると増幅率  $Amp_X$  が低下し、 $a_{PoX,max}$  が 6 cm/s<sup>2</sup> 以上では増幅率  $Amp_X$

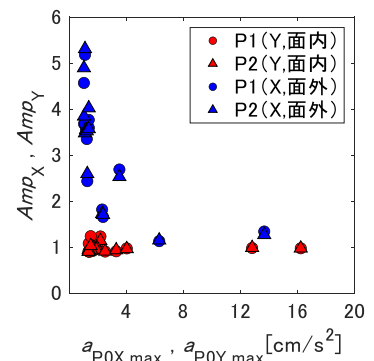


Fig. 6 床の最大加速度と増幅率の関係

がおよそ 1 で一定である。また、面内と面外ともに、加速度計 P1 と P2 で増幅率に差はみられない。

#### 5.2 面内方向と面外方向の伝達関数

観測記録から得られる伝達関数  $|H_{obs}|$  を式(2)に示す。

$$|H_{obs}| = \frac{|F_{Pi}|}{|F_{Po}|} \quad (2)$$

$|F_{Pi}|$ : 加速度計 P1,P2 の加速度フーリエ振幅スペクトル

$|F_{Po}|$ : 加速度計 P0 の加速度フーリエ振幅スペクトル

式(2)の  $|H_{obs}|$  は、バンド幅 0.3 Hz の移動平均処理を施した。

Fig. 7に、地震①の加速度計 P1 での伝達関数を示す。赤色が面内方向であり、青色が面外方向である。面外方向は明瞭なピークが存在するのに対し、面内方向はピークが不明瞭であることがわかる。他の地震でも同様の結果であったため、次章以降は面外方向の伝達関数を扱う。

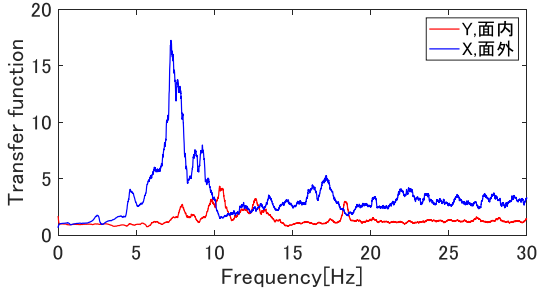


Fig. 7 地震①の伝達関数

## 6. 固有振動数と減衰定数の同定

### 6.1 同定手法

間仕切り壁の面外方向の伝達関数にカーブフィット法を用いることで、減衰定数と固有振動数を同定する。同定する伝達関数 $|H_{est}|$ を式(3)に示す。式(3)の $|H_{est}|$ は、合計9つの未知数からなっており、これらの未知数の同定を行う。式(3)の第二項は、3次よりも高次のモードを近似的に導入したものである<sup>8)</sup>。本報では、最小二乗法を用いて同定を行う。具体的には、0 Hz から 30 Hz までの残差二乗和 $S$  (式(4)) が最小となる9つの未知数を求める。

$$|H_{est}| = \left| \sum_{s=1}^3 b_s \left( \frac{1 + 2h_s \left(\frac{p}{f_s}\right) i}{1 - \left(\frac{p}{f_s}\right)^2 + 2h_s \left(\frac{p}{f_s}\right) i} \right) + \left( 1 - \sum_{s=1}^3 b_s \right) \right| \quad (3)$$

$b_s$ :  $s$  次刺激係数,  $h_s$ :  $s$  次減衰定数,  $f_s$ :  $s$  次固有振動数  
 $p$ : 振動数

$$S = \int_0^{30} (|H_{obs}| - |H_{est}|)^2 dp \quad (4)$$

最小二乗法を行う際の初期値のパターンを Table 2 に示す。これら4パターンから得られる同定結果のうち、どの結果が適切かを判断する方法として、以下の条件1から条件3のすべてを満たすものを適切な結果とした。

Table 2 初期値

	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
I	1	1	1						
II	1	-1	1	0.01	0.01	0.01	7.5	15	25
III	1	1	-1						
IV	1	-1	-1						

条件1:  $h_1, h_2, h_3$ がともに正である

条件2:  $f_1$ が7 Hz以上8.5 Hz以下で、かつ $f_2$ と $f_3$ がともに13 Hz以上30 Hz以下である

条件3: 条件1と条件2を満たすもののうち、 $f_1 - 0.3$  Hzから $f_1 + 0.3$  Hzまでの残差二乗和 $S'$  (式(5))が最も小さい

$$S' = \int_{f_1 - 0.3}^{f_1 + 0.3} (|H_{obs}| - |H_{est}|)^2 dp \quad (5)$$

### 6.2 同定結果

Fig. 8に、地震①の加速度計 P1 において、観測による伝達関数と同定された伝達関数の比較を示す。Fig. 8より、同定された値を用いた伝達関数の理論値(式(3))は観測値より得られた伝達関数(式(2))の特徴を捉え、良く一致していることがわかる。なお、他の地震動でも同様の精度で同定できていることを確認している。

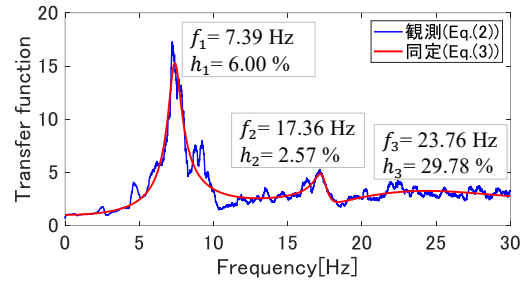


Fig. 8 地震①の伝達関数同定 (加速度計 P1)

次に、7階床のX方向最大加速度 $a_{p0X,max}$ と、同定した固有振動数と減衰定数の関係を、Fig. 9(a)と(b)にそれぞれ示す。

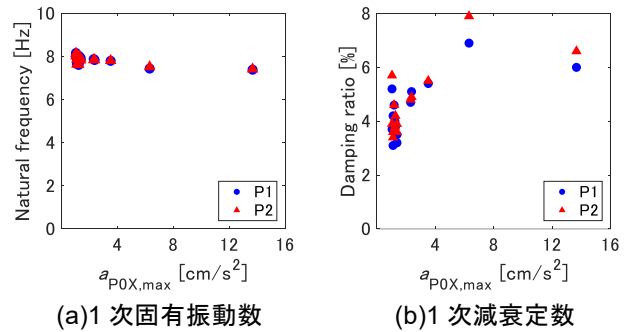


Fig. 9 振動数および減衰定数の同定結果

Fig. 9(a)より、1次固有振動数は $a_{p0X,max}$ の大きさや加速度計 P1, P2 によらず 7.5 ~ 8.0 Hz 程度で一定であり、平均値は 7.82 Hz である。一方で、Fig. 9(b)において1次減衰定数は地震によって一定ではなく、 $a_{p0X,max}$ が大きくなるにつれて減衰定数も大きくなる傾向が確認できる。

次に、同定された1次減衰定数と、増幅率 $Amp_X$ の関係を Fig. 10 に示す。Fig. 10より、減衰定数が6%以下では増幅率に幅があるものの、減衰定数が大きくなるほど $Amp_X$ が小さくなる傾向が全体的に確認できる。よって、Fig. 6で床の最大加速度が大きくなるほど $Amp_X$ が低下するのは、Fig. 9(b)より減衰に振幅依存性があり、かつFig. 10より減衰が大きくなるほど増幅率が小さくなるためであると考えられる。

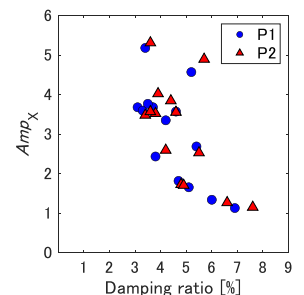


Fig. 10 減衰定数と増幅率の関係

7. 既往研究との関係

間仕切り壁の振動台実験に関する既往研究<sup>2)-5)</sup>と、J3棟の間仕切り壁とで固有振動数の比較を行う。既往研究とJ3棟の間仕切り壁の仕様と固有振動数をTable 3に示す。本報では、間仕切り壁の高さと固有振動数の関係に注目し、その関係をFig. 11に示す。Fig. 11には実験<sup>2)-5)</sup>の固有振動数 $f$ [Hz]を間仕切り壁の高さ $H$ [m]の関数で近似した曲線(式(6))も併せて示す。式(6)の $\alpha$ と $\beta$ は最小二乗法で決定し、 $\alpha = 18.4$ ,  $\beta = 0.784$ となった。

$$f = \alpha \cdot \beta^H \tag{6}$$

Fig. 11より、幅、下地および仕上が異なる場合においても高さとの固有振動数には相関がみられる。実験<sup>2)-5)</sup>で得られた固有振動数は、限定された境界条件であるが、観測記録から得られた固有振動数と良い対応を示していることが確認できる。また、本報で対象としたJ3棟の間仕切り壁と、振動台実験の間仕切り壁<sup>2)-5)</sup>は、式(6)によって固有振動数を間仕切り壁の高さで近似できる可能性が確認できる。ただし、限定された境界条件であるため、更なる検討が必要である。

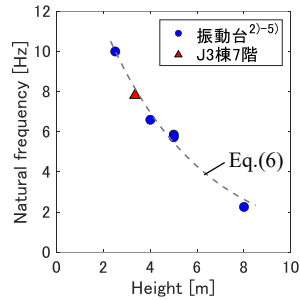


Fig. 11 間仕切り壁の高さと固有振動数の関係

8.まとめ

本報では、実際の超高層免震建物の間仕切り壁の観測記録を用いて、間仕切り壁の地震時の動的応答性状を分析した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 間仕切り壁の面外方向の固有振動数と減衰定数の同定を行った結果、1次固有振動数については、床の面外方向最大加速度の大きさによらず一定であることが確認できた。1次減衰定数については、床の面外方向最大加速度が大きくなるにつれて大きくなる傾向があることが確認できた。床の最大加速度に対する間仕切り壁の最大加速度の面外方向の増幅率に振幅依

存性がみられたのはこのためだと考えられる。

- (2) 同定されたJ3棟の間仕切り壁の固有振動数と、既往研究の振動台実験の間仕切り壁の固有振動数は、どちらも間仕切り壁の高さによって近似できる可能性が確認できた。

今後は、建物内の他の間仕切り壁での観測結果を用いて、境界条件の違いが応答特性に与える影響について検討する予定である。

謝辞

本計測システムは、JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JPMJOP1723:代表 吉敷祥一)により設置されたものです。本報を作成するにあたり、東京科学大学吉敷祥一教授、石原直教授にはご助力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 文部科学省：学校施設の非構造部材の耐震化ガイドブック(改訂版), 2015.3
- 2) 原山賢, 櫻庭記彦, 鈴木健司, 清家剛：軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その4 鉛直に設置した軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の面外振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1079-1080, 2018.9
- 3) 鈴木健司, 原山賢, 櫻庭記彦：軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その5 高さ5mの間仕切り壁の振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1079-1080, 2018.9
- 4) 鈴木健司, 山里和久, 清家剛, 平澤徹也：軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その38 高さ8mの軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の動的加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.853-854, 2022.9
- 5) 沖佑典：鋼製下地天井に上端を支持される間仕切り壁の面外応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.837-838, 2023.9
- 6) 菊地岳史, 藤森智, 竹内徹, 和田章：メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集 第22号, pp.217-222, 2005.12
- 7) 柳屋早延, 佐藤大樹, Alex Shegay, 吉敷祥一, 石原直, 元結正次郎：超高層免震建物の複数地震観測に基づくLGS間仕切り壁の振動数の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.687-688, 2024.9
- 8) 長松昭男：モード解析, 培風館, 1985.7

Table 3 間仕切り壁の仕様と固有振動数

	高さ[m]	幅[m]	下地仕様	仕上仕様	固有振動数[Hz]
J3棟7階	3.35	7.40	C65形@303	GB-R 12.5mm + 9.5mm 両面2枚張	7.82
文献2)	4.00	3.64	C65形@455	GB-F 21.0 mm 片面2枚張	6.60
文献3)	5.00	3.64	C100形@455	GB-F 21.0 mm 片面2枚張	5.86
	5.00	3.64	C100形@455	GB-F 12.5 mm 両面2枚張	5.73
文献4)	8.00	1.82	C100形@455	GB-F 21.0 mm 片面2枚張	2.26
文献5)	2.50	1.82	C65形@454.5	GB-F 12.5 mm 両面2枚張	10.0

\*1 東京科学大学 学生

\*2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士(工学)

\*3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士(学術)

\*4 東京科学大学 総合研究院 教授・博士(工学)

\*5 東京科学大学 大学院生

Undergraduate Student, Institute of Science Tokyo\*1

Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng\*2

Assistant Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.\*3

Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng\*4

Graduate Student, Institute of Science Tokyo\*5