

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	屋外鉄骨避難階段の振動特性 その3 防災訓練避難歩行時の歩行振動加速度の分析
Title(English)	Dynamic Characteristics of an External Steel Emergency Staircase Part 3: Analyze Acceleration on Walking Vibration During Evacuation Drills
著者(和文)	鎌野隆貴, 佐藤大樹, 陳引力, SORIANO Razelle, 李ミンフェイ
Authors(English)	Ryuki Kamano, Daiki Sato, Yinli Chen, Razelle Dennise Agoba Soriano, Minfuei Ri
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, 1, , pp. 389-392
Citation(English)	, 1, , pp. 389-392
発行日 / Pub. date	2026, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

屋外鉄骨避難階段の振動特性

その3 防災訓練避難歩行時の歩行振動加速度の分析

構造一振動

正会員 ○ 鎌野 隆貴^{*1}

正会員 佐藤 大樹^{*2}

// 陳 引力^{*3}

// SORIANO Razelle^{*4}

// 李 ミンフエイ^{*5}

屋外鉄骨避難階段 防災訓練
避難歩行振動 最大加速度

1. はじめに

本報その1では防災訓練における避難階段歩行時の感覚量の調査としてアンケートの分析、その2では避難時の歩行振動数の調査結果を示した。本報その3では、これらに引き続き、防災訓練時の避難歩行振動の加速度計測について、センサの概要、データ処理の方法を説明する。また、避難歩行時の最大加速度、歩行時に感知している振動数について分析する。

2. 計測の概要

2.1. センサの取付け位置と位置の名称

図1にセンサの配置図、図2に2S3、4S1、2L2の取付け状況を示す。設置した段は最下の階段は下から5段目、それ以外が下から6段目にセンサを設置した。ただし、避難歩行時の歩行を妨げないように、踏面の裏面にセンサを設置した(図2(a))。また、設置位置の都合上、4S1は手すり下の溝に斜めに(図2(b))、2L2は柱の根本(図2(c))に設置した。なお、センサの位置の名称について、踏面をS(Stairs)、踊り場をL(Landing)とした。

2.2. 加速度センサと時刻の同期の概要

本報では、表1に示す4種類の無線式高精度3軸加速度センサを用いた。また、センサA、BとC、D(2L2)、D(3L2)はそれぞれ異なる4機のノートパソコン(以降、PC)を用いて加速度を計測した。このとき、センサの計測時刻はPCの内部時刻で同期されるが、それぞれのPCで数秒のずれがあるため、計測データも数秒のずれが生じる。そこで、AのPCを基準として、他の計測データを数秒オフセットして時刻を同期させた。この時刻は、PCから直接読み取り、BとCは5秒、D(2L2)は47秒、D(3L2)は25秒オフセットさせて同期させた。

表1 加速度センサの概要

加速度センサの名称	A	B	C	D
ノイズレベル[μG/√Hz]	0.2	0.2	0.02	0.2
分解能[μG]	0.59	0.06	0.06	0.06

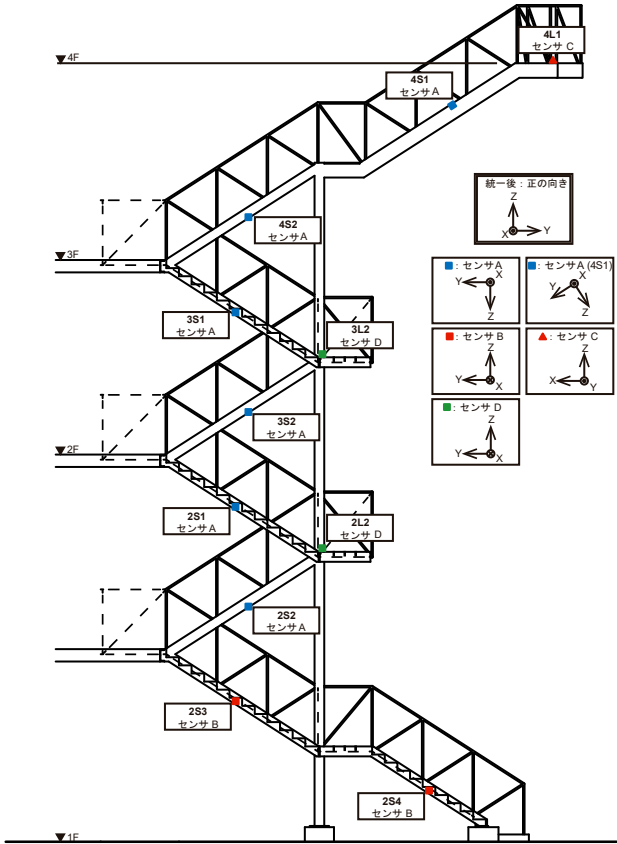


図1 センサの配置図

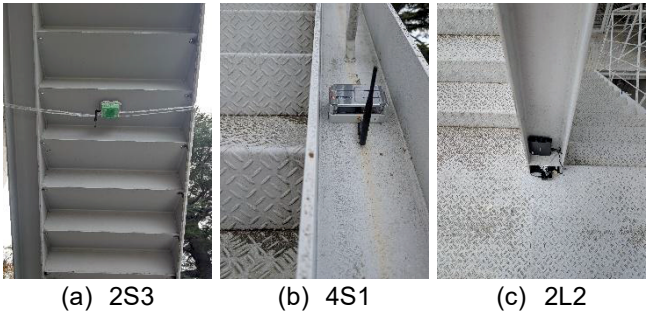


図2 センサの取付け状況

3. 計測データの概要

3.1. 計測データの諸情報

表 2 に避難歩行振動を計測した生データの諸情報示す。なお、表 2 はセンサごとに 2.2 節で前述した時刻の同期を行ったものを示す。サンプリング周波数は 500 Hz で統一した。また、計測開始時刻について、センサ A~C は A の PC の 12:27:20 を、センサ D は「計測開始」ボタンを押したときの時刻を計測開始時刻とする。そのため、センサ D(2L2)と D(3L2)は開始時刻が A~C から遅れていることに注意されたい。さらに、12:27:30 時点で避難訓練が開始されていたため、D(2L2)と D(3L2)は避難訓練開始直後の数秒間の歩行振動を計測できていないことにも注意されたい。

表 2 計測した生データの諸情報

センサ名	A, B, C	D(2L2)	D(3L2)
計測開始	12:27:20.000	12:27:43.002	12:28:01.002
計測終了	12:34:37.998	12:34:18.812	12:34:37.000
計測時間	437.998 s	395.810 s	395.998 s
時間刻み	0.002 s	0.002 s	0.002 s
データ数	219,000	197,906	198,000

3.2. データ処理

① 時刻の処理

表 3 に本報 4 章で使用するデータの諸情報を示す。使用するデータの開始時刻について、本来はすべてのセンサで開始時刻をそろえる必要がある。しかし、3.1 節で前述のとおり、12:27:30 時点で避難訓練は開始されていたため、本報では A~C、D(2L2)、D(3L2)の開始時刻を揃えないものとする。次に、計測開始時刻直後に非常に大きなノイズを観測したため、生データの最初 3 秒間を使用しないものとする。最後に、FFT による解析を行うためには、継続時間を揃えて周波数分解能を統一する必要がある。本報では、避難開始から大多数の人が避難するまでの継続時間を計測結果から読み取り 210 秒で統一した。

表 3 使用するデータの諸情報

センサ名	A, B, C	D(2L2)	D(3L2)
開始時刻	12:27:23.000	12:27:46.002	12:28:04.002
終了時刻	12:30:53.000	12:31:16.002	12:31:34.002
継続時間	210.000 s	210.000 s	210.000 s
時間刻み	0.002 s	0.002 s	0.002 s
データ数	105,001	105,001	105,001

② 4S1 の座標変換

2.1 節で前述したように、4S1 のセンサは斜めに設置しているため、回転行列 (式(1)) を用いて座標変換をした。なお、X 方向は座標変換が必要ないため行わない。

$$\begin{Bmatrix} a_Y(t) \\ a_Z(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{Y'}(t) \\ a_{Z'}(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $a_Y(t)$ 、 $a_Z(t)$: Y, Z 方向の加速度、 $a_{Y'}(t)$: 斜面に平行な方向の加速度、 $a_{Z'}(t)$: 斜面に垂直な方向の加速度、

θ : 斜面の傾斜角であり、本避難階段では 32.7°である。

③ 加速度のオフセット処理

センサは絶対加速度を測定するため、特に重力加速度の成分をオフセットにより除去する必要がある。本報では、使用するデータの開始時刻から最初 1 秒間の加速度の平均値が 0 になるようにデータをオフセットした。

④ ノイズ処理

本報では、次式で定義する矩形のローパスフィルタ $H(f)$ を用いてノイズ処理を行った。

$$H(f) = \begin{cases} 1, & f \leq f_c \\ 0, & f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 f : 周波数、 f_c : カットオフ周波数であり、本報ではカットオフ周波数を 30 Hz とする。

⑤ 4S1 における歩行振動時の最大加速度補正

4S1 は 2.1 節で前述したように踏面裏ではなく手すり下の溝に斜めに設置した。そのため、本報では回転行列による座標変換に加えて、設置位置の違いの影響を考慮して、4S1 における歩行振動の最大加速度に補正係数を乗ずることとする。X 方向は 1.062、Y 方向は 0.345、Z 方向は 2.956 を乗ずる。

上記の補正係数は、著者が 3 階-4 階の階段を 2 往復して得た歩行振動結果を使用した。そのときのセンサの取り付け状況を図 3 に、得られた歩行振動波形を図 4 に示す。図 4 中の最大値比とは、真値の最大値に対する座標変換の最大値の比である。なお、「真値」とは踏面中央、「座標変換」とは手すり下での測定結果を式(1)で座標変換したものである。ともに④で前述した 30 Hz のローパスフィルタでノイズ処理を行っている。



図 3 センサの取付け (4S1 の補正係数測定用)

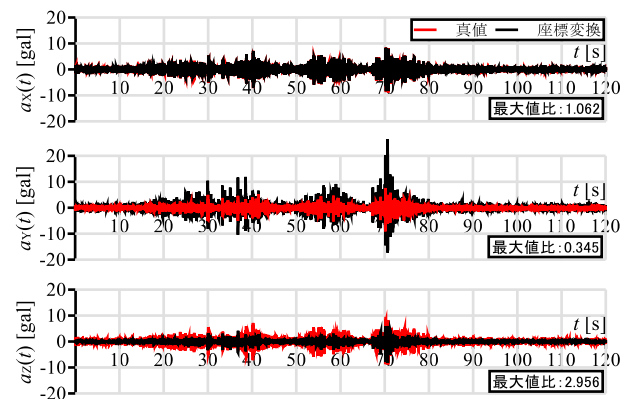


図 4 4S1 の加速度波形比較

4. 防災訓練時の避難歩行振動の分析

本章では、防災訓練における避難階段歩行時の歩行振動計測で得た加速度を分析する。なお、各方向の加速度の時刻歴波形は付録Aを参照されたい。

4.1. 最大加速度の鉛直分布

図5に3.2節①~④のデータ処理後、図6に4S1のみ3.2節⑤の補正係数を乗じた後の最大加速度の鉛直分布を示す。なお、3L2、2L2のZ方向の最大加速度が極端に小さいが、これは2.1節で前述のとおり、センサを階段の柱根本部分に設置しており、柱の鉛直方向の剛性が大きいことに起因して、加速度が小さくなっていると考えられる。図6より2L2と3L2以外、Z方向の最大加速度が最も大きく、XおよびY方向の最大加速度はZ方向と比較して小さい。ここから、歩行振動時の感覚量はZ方向が最も支配的になると考えられる。これは、踏面にはほぼ垂直に踏み込んで歩行していることを意味していると考えられ、想定通りの結果である。また、図6より下階ほど最大加速度が大きくなる傾向があった。しかし、この原因については解明できておらず今後の検討課題とする。

4.2. 歩行振動の振幅スペクトル

図7に歩行振動のZ方向の振幅スペクトルを示す。振幅スペクトルは移動平均を用いて平滑化する。本報ではFFTにより得る周波数刻みが0.0048 Hzであり、0.4 Hz区間の移動平均をとるために区間数を85とした。図7より、概ね15~25 Hzに加速度のピークを持つことが確認できる。また、2~3 Hzの部分にもわずかながらピークを持っており、その2の結果と概ね一致する。

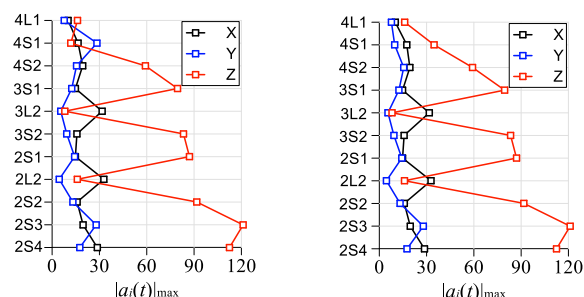


図5 最大加速度鉛直分布 (①~④のデータ処理) 図6 最大加速度鉛直分布 (4S1に⑤の補正)

しかし、この区間のピークは20 Hz周辺のピークと比較して小さい。つまり、歩行者は歩行振動の2 Hz周辺の加速度ではなく、避難階段が持つ固有振動数周辺の振動を感知していると考えられる。なお、避難階段の固有振動数については、本報その4で後述する。

5. まとめ

本報その3では、センサの概要、データ処理の方法、避難歩行時の最大加速度、歩行時に感知している振動数について分析した。得た知見を以下に示す。

- (1) 避難歩行振動の感覚量はZ方向が最も支配的になる。
- (2) 下層ほどZ方向の最大加速度が大きい傾向がある。
- (3) 歩行時に感じる感覚量は、避難階段が持つ固有振動数周辺の振動を感じていると考えられる。

付録A. 避難歩行時の加速度の時刻歴波形

図A-1, 2, 3に順にX, Y, Z方向の防災訓練における避難階段歩行時の加速度波形をセンサごとに示す。

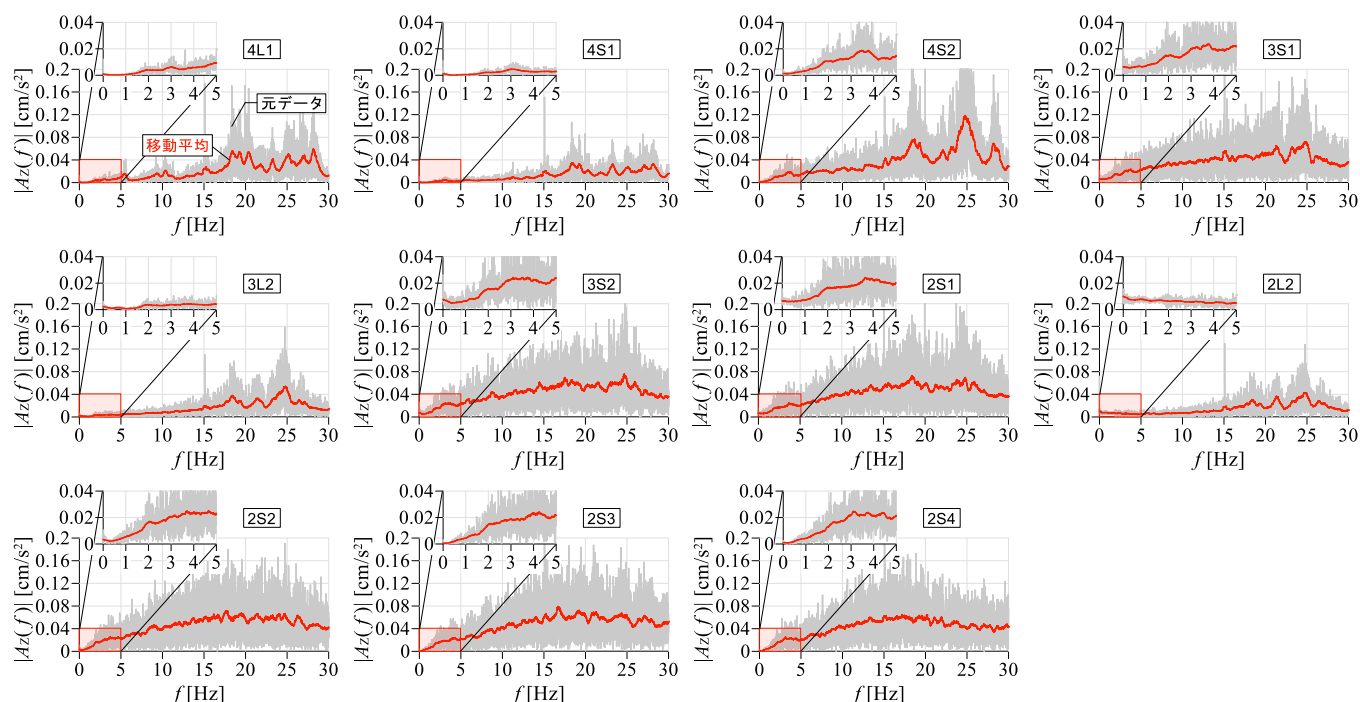


図7 Z方向の加速度振幅スペクトル (移動平均窓: 0.4 Hz)

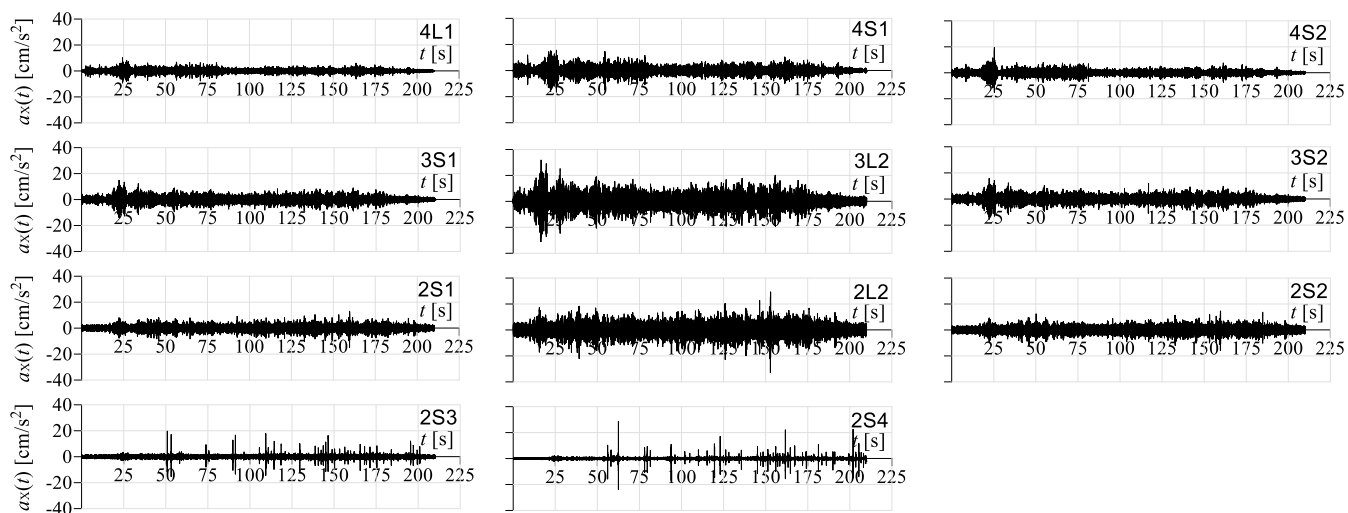


図 A-1 歩行振動時の加速度時刻歴波形 (X 方向)

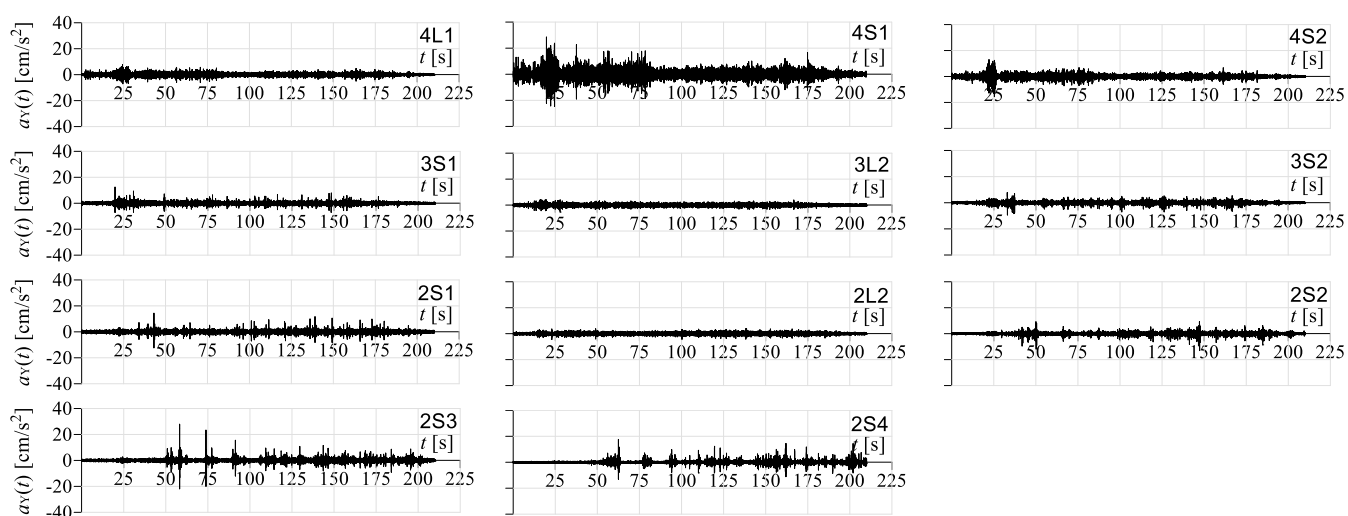


図 A-2 歩行振動時の加速度時刻歴波形 (Y 方向)

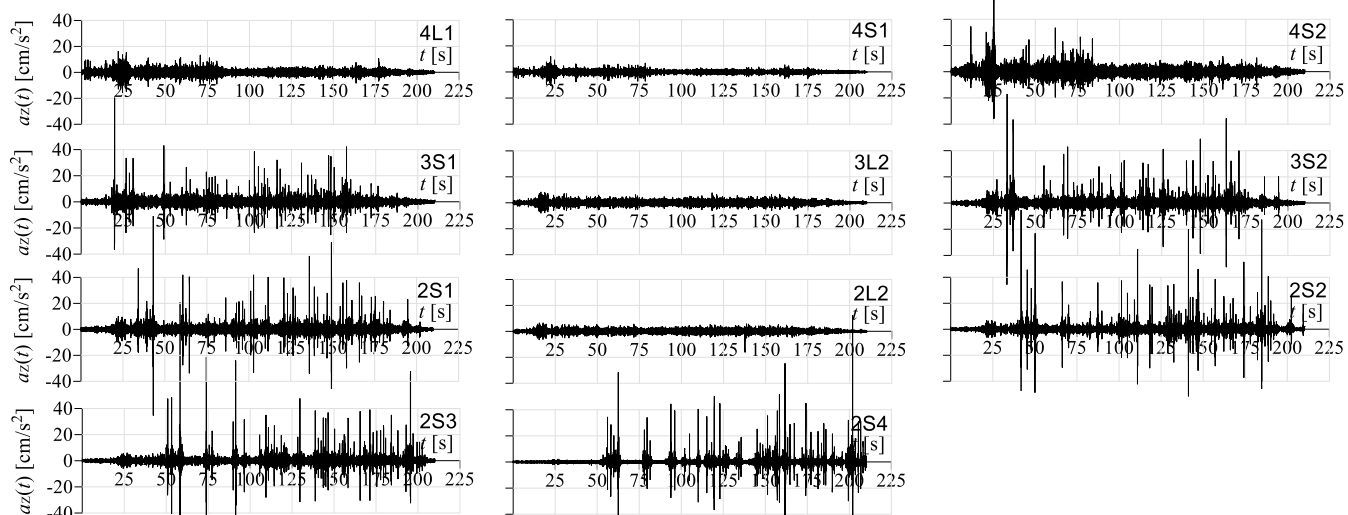


図 A-3 歩行振動時の加速度時刻歴波形 (Z 方向)

*1 東京科学大学 環境・社会理工学院 修士課程

*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 研究員・博士 (学術)

*5 東京科学大学 環境・社会理工学院 博士課程

Master's Course, School of Environment and Society, Institute of Science Tokyo *1

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

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

Post-doc. Researcher, IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D. *4

Doctor's Course, School of Environment and Society, Institute of Science Tokyo *5