

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21710172

研究課題名(和文) 層間変位センサによる建造物の多点センシングに関する研究

研究課題名(英文) Study on multi-point sensing for building structures  
utilizing the relative story displacement sensors

研究代表者

松谷 巖 (MATSUYA IWAO)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：00514465

研究成果の概要(和文)：建築物の耐震性能の判定を目的として、層間変位センサの開発に取り組んだ。最初に実建物加振実験における層間変位の多点センシングを実施した。その結果、正確な層間変位計測を達成するためには、2方向の層間変位だけでなく、2方向のセンサ設置部の傾斜角および鉛直方向のねじれ角も同時計測できる5自由度の計測が必要であるという課題を抽出した。この課題に対して新規に5自由度層間変位センサを開発し、計測精度の面から検証を行い、防災科研 E-Defense での実大建物破壊実験を通して本センサの有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Monitoring the relative story displacement in real time makes it possible to identify the damaged elements. First, we developed lateral displacement sensor composed of a LED array, a lens with a fixed focal length, and a position sensitive detector (PSD). Next, we discussed the feasibility of the LDS implemented in an actual building. Finally, we developed and evaluated a novel five-degree-of-freedom (5-DOF) sensor system which can simultaneously measure the relative-story displacement, the local inclination angle, and the torsion angle was developed using three pairs of LED arrays and PSD units.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：センサ、計測工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学／社会システム工学・安全システム

キーワード：構造ヘルスマonitoring、層間変位、多点センシング、局所変形、5自由度計測

## 1. 研究開始当初の背景

建築構造物の維持管理および地震による損傷の定量化の観点から、実用的な構造ヘルスマonitoringの構築が急務となっている。センサによる健全性の定量評価については加速度センサによるシステム同定が主流であるが、この方法では具体的な損傷箇所まで判定できない問題がある。一方、建築基準法

では層間変形角(規格化した層間変位)によって建築物の健全度が定義されているが、層間変位を高精度かつリアルタイムに測定する手段は実質的に存在していない。また、製造業における機械部品の信頼性評価では、「破壊実験」「応力解析」「変位計測」を複合的に実施しているが、建設業では、建物の「破壊実験」と「変位計測」の技術が未発達であ

ったため、応力解析のみによる信頼性評価が主流となっていることが問題である。このような背景から、正確な層間変位計測を実現するための新たな計測技術とそれに基づく損傷評価の枠組みを求める気運が高まっている。

## 2. 研究の目的

建物の損傷程度を定量的に評価するためには正確な層間変位の履歴が必要だが、建物の中では計測基準点を作れないうえにセンサ設置部ですらたわんでしまうので、従来方法では誤差が多いことが問題であった。本研究の目的は、建物の中に設置しても正確な層間変位計測ができる光学式の変位計を開発し、実建物の多点センシングを通じて問題点を検証することにより、実建物における層間変位センサの適応性および有用性の検証を行うことである。申請時における当初の研究目的では、実建物加振実験から抽出した課題を解決した新型センサ開発までは含まれなかったが、検討により開発を可能にした。また、計画していた実建物破壊実験は(独)防災科研のE-ディフェンスにおいて実施した。

## 3. 研究の方法

### ①光学式相対変位センサの開発と検証

非接触な層間変位計測を実現するために、LED光源と光位置検出素子(PSD)を利用した光学式の相対変位センサ(LDS)を開発し計測制度の検証を行う(図1)。

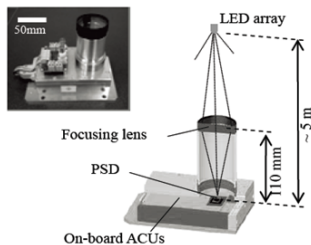


図1 光学式相対変位センサ(LDS)



図2 可変剛性(AVS)建物と大型加振機

### ②実建物の強制加振実験における多点・層間変位計測

複数のLDSを、図2に示す鹿島建設が保有する可変剛性(AVS)建物に設置して強制加振し、層間変位の多点センシングによって、実

建物における層間変位の挙動や開発した計測手法の課題を抽出する。最初に、建物の損傷検知の可能性について検討するために、加振中にAVSを制御して損傷を模擬した1.3Hz定常波加振試験を実施した。ここでは、全層のAVSをロック→アンロック→ロックと制御し、2回目の切り換え時にそのタイミングを意図的に振動平衡点からずらすことで残留層間変位を与えた。

### ③新型センサの開発と検証

実験②で抽出した課題を元に新型センサの測定原理を考案し、実験により実行可能性を評価する。

### ④実大4層建物の破壊実験と5自由度層間変位センサによる正確な変位計測

新型層間変位センサを用いて、(独)防災科研のE-ディフェンスにおいて、実大4層建物の破壊実験に参画し、正確な層間変位計測に基づく建物の破壊過程のモニタリングを実施する。



図3 防災科研E-Defenseと新型センサ

## 4. 研究成果

### ①光学式相対変位センサの開発と検証

位置データ計測による静的特性並びに動的応答性について実験的に確認し、以下の知見を得た。測定範囲 $\pm 30$  mmにおける位置データの誤差は、測定領域で0.1 mm以下を満足した(表1)。動的特性評価において、地震応答波並びに20Hz微小振幅加振時でも参照からの乖離は0.1 mm以下であり、十分な追従性を有していた。以上から、ここで示したPSD層間変位センサは設定した仕様をほぼ満足しており、実用可能であることを確認した。

表1 位置出力の最大誤差

領域 [mm]	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$	$\pm 40$	$\pm 50$
誤差 [mm]	0.02	0.05	0.10	0.19	0.29

### ②実建物の強制加振実験における多点・層間変位計測

計測結果を図4に示す。1回目のAVS切り換え時においては、LDS、速度センサとも、層剛性の切り換えによる層間応答の変化を精度よく検出できている。一方、2回目の切り換え時に生じさせた微小な残留層間変位については、速度センサでは検出できなかった

が、LDS は確実に検出しており、平衡点に収束するまでの振動状況も計測できている。本結果は、特に弾塑性域の層間変位を直接計測する層間変位センサの有効性を示している。図5に実建物の5自由度の挙動を示す。実測の結果、震度4相当の加振時にセンサ設置部の局所変形による変位計測誤差は約20%、角度 $\theta_x$ は約2mradであった。またホワイトノイズ波形を入力したときのねじれ角度 $\psi$ は数mradオーダーであった。

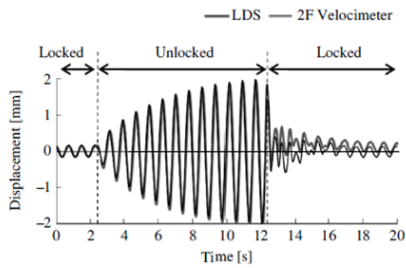


図4 LDSによる建物残留変位の実測

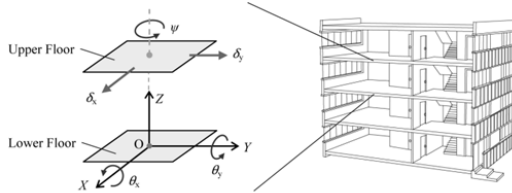


図5 実建物の5自由度の挙動

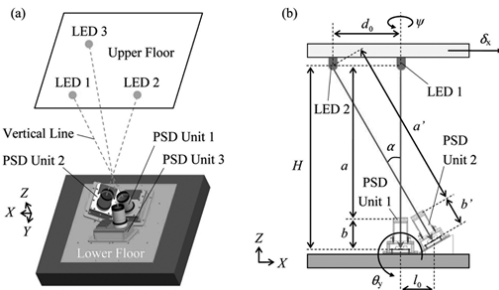


図6 5自由度層間変位センサの構成

### ③新型センサの開発と検証

図5に示す建築物の層間変位と傾斜角度、ねじれ角度を同時計測可能な、5自由度層間変位センサの構成および動作検証の結果について述べる。図6に5自由度層間変位センサの概要図を示す。半導体位置検出素子(PSD)とレンズを組み合わせたセンサユニットを構造物一方に固定し、計測ターゲットとしての赤外線LED光源を対向面に固定することで水平方向の層間変位を計測する。センサユニット自身の回転角度成分を変位成分から除去するために、2台のPSDはそれぞれX方向およびY方向に角度 $\alpha$ で傾斜配置される。これら3台のPSD変位計で同時計測したデータを演算することによって、2方向の層間変位

( $\delta_x, \delta_y$ )、2方向のセンサ設置部の傾斜角( $\theta_x, \theta_y$ )、および鉛直方向のねじれ角 $\psi$ を導出する。層間距離 $H$ は2.7m、センサ間角度 $\alpha$ は $30^\circ$ 、センサ間距離 $l_0$ は120mmに設定した。 $\pm 5\text{mm} \cdot 0.6\text{Hz}$ の変位 $\delta_x$ 、 $\pm 2\text{mrad} \cdot 0.4\text{Hz}$ の傾斜角度 $\theta_y$ 、 $\pm 1.7\text{mrad} \cdot 0.6\text{Hz}$ のねじれ角度 $\psi$ を同時にセンサに与え、演算によって各パラメータを導出する。図7に変位・角度分離実験の結果を示す。(a)は各PSDからの電圧出力であり、脈絡の無い波形が示されている。(b), (c), (d)は、演算による変位 $\delta_x$ 、傾斜角度 $\theta_y$ 、ねじれ角度 $\psi$ と、参照との比較を示している。参照からの乖離は、それぞれ0.2mm, 0.12mrad, 0.09mradである。これらの結果は、実建物にセンサを設置し、局所的なたわみが発生しても、正確な層間変位計測が可能であることを示している。

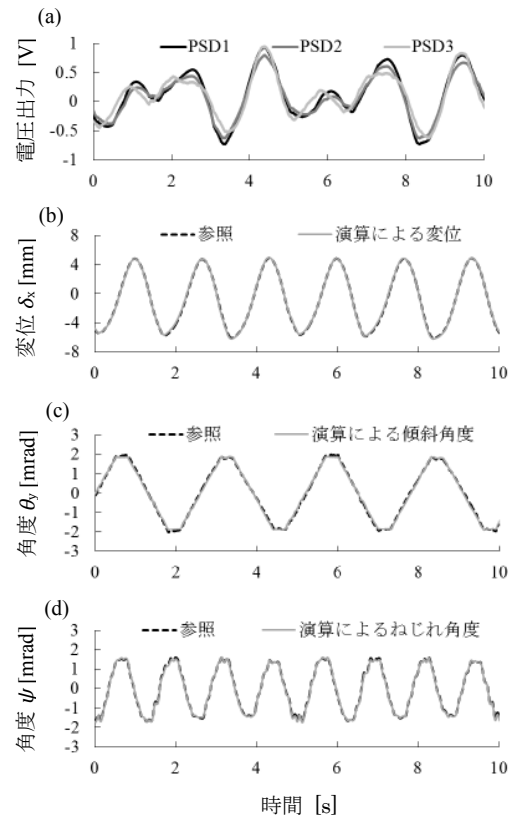


図7 変位・角度分離実験の結果

### ④実大4層建物の破壊実験と5自由度層間変位センサによる正確な変位計測

防災科研のE-ディフェンスにおいて、実大4層建物の破壊実験に参画し、5自由度層間変位計測による実建物の破壊過程の実測を成功させた。図8に神戸地震の波形を建物に入力したときの、2階中央部における層間変位計測結果を示す。最大振幅は約50mm、残留層間変位は約2mmであった。5自由度層間変位センサによる計測結果は、将来的にプッシュオーバー解析等と融合させることにより、

建物の構成部材レベルでの損傷部位の特定および構造健全性のリアルタイムな定量評価が実現できるものと考えられる。本成果により、建築構造物の信頼性評価のために必須と考えられる、建物の「破壊実験」と「変位計測」を両方達成できた。

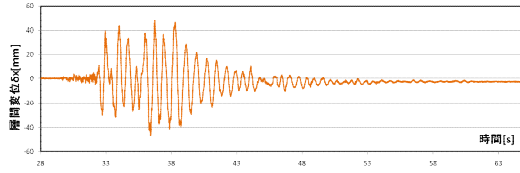


図8 実大建物破壊実験における層間変位

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① 松谷 巖、片村立太、佐藤摩弥、近藤秀昭、伊庭美麓、金川 清、仁田佳宏、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、局所変形角と相対変位を測定可能な構造ヘルスマニタリング用層間変位センサの開発、日本機械学会論文集 A編、Vol. 77, No. 777, (2011年5月25日掲載)、査読有
- ② I. Matsuya, R. Tomishi, M. Sato, K. Kanekawa, Y. Nitta, M. Takahashi, S. Miura, Y. Suzuki, T. Hatada, R. Katamura, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani and I. Ohdomari, “Development of Lateral Displacement Sensor for Real-Time Detection of Structural Damage”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 266-272 (2011) 査読有
- ③ I. Matsuya, R. Katamura, M. Sato, M. Iba, H. Kondo, K. Kanekawa, M. Takahashi, T. Hatada, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani and I. Ohdomari, “Measuring Relative-Story Displacement and Local Inclination Angle Using Multiple Position-Sensitive Detectors”, Sensors, Vol. 10, No. 11, pp. 9687-9697 (2010) 査読有
- ④ 松谷 巖、大塩 真、富士良太、佐藤摩弥、金川 清、高橋元一、三浦 悟、鈴木康嗣、畑田朋彦、片村立太、仁田佳宏、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、光位置検出素子を利用した非接触型相対変位計測システム、日本建築学会技術報告集、Vol. 16, No. 33, p.

p. 469-472 (2010) 査読有

⑤ 畑田朋彦、高橋元一、鈴木康嗣、松谷 巖、金川 清、仁田佳宏、西谷 章、起震機加振実験による非接触型センサを利用した実建物の層間変位計測、日本建築学会構造系論文集、Vol. 75, No. 653, pp. 1257-1264 (2010) 査読有

⑥ K. Kanekawa, I. Matsuya, M. Sato, R. Tomishi, M. Takahashi, S. Miura, Y. Suzuki, T. Hatada, R. Katamura, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani, and I. Ohdomari, “An Experimental Study on Relative Displacement Sensing Using Phototransistor Array for Building Structures”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 251-255 (2010) 査読有

〔学会発表〕(計22件)

- ① 松谷 巖、佐藤摩弥、近藤秀昭、伊庭美麓、金川 清、仁田佳宏、高橋元一、畑田朋彦、片村立太、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、建築物の耐震性能評価のための5自由度計測法、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、2011年3月24日
- ② I. Matsuya, R. Katamura, M. Sato, M. Iba, H. Kondo, K. Kanekawa, M. Takahashi, T. Hatada, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani and I. Ohdomari, “Relative-Story Displacement Sensor for Measuring Five-Degree-of-Freedom Movement of Building Layers”, Proceedings of SPIE Smart Structures / NDE 2011, Vol. 7981, pp. 79810C, San Diego, California, USA, March 7, 2011.
- ③ I. Matsuya, R. Katamura, M. Sato, H. Kondo, M. Iba, K. Kanekawa, T. Tanii, A. Nishitani and I. Ohdomari, “A Relative-Story Displacement Sensor Resolving the Angular Error Problem”, Proceedings of IEEE SENSORS 2010, pp. 1441-1444, Hawaii, USA, November 3, 2010. 査読有
- ④ 松谷 巖、片村立太、佐藤摩弥、近藤秀昭、伊庭美麓、金川 清、仁田佳宏、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、局所変形角と相対変位を測定可能な構造ヘルスマニタリング用層間変位センサの開発、日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス、長岡技術科学大学、新潟、2010年10月9日



④ 片村立太、松谷 巖、金川 清、畑田朋彦、仁田佳宏、高橋元一、鈴木康嗣、西谷 章、光学式変位計を用いた建物の層間変位計測、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010、同志社大学、京都府、2010 年 9 月 17 日

⑤ 佐藤摩弥、伊庭美麓、近藤秀昭、松谷 巖、金川 清、仁田佳宏、畑田朋彦、片村立太、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、建築構造物の層間変位と局所傾斜角の同時計測システムの開発、秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、長崎、2010 年 9 月 15 日

⑥ 松谷 巖、佐藤摩弥、伊庭美麓、近藤秀昭、金川 清、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、仁田佳宏、片村立太、高橋元一、三浦 悟、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、局所回転角度と層間変位の同時計測を可能にする非接触式センサの検討、電気学会 基礎・材料・共通部門大会、琉球大学、沖縄、2010 年 9 月 13 日

⑦ 高橋元一、畑田朋彦、鈴木康嗣、松谷 巖、金川 清、仁田佳宏、西谷 章、非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システム その 1 システムの概要、日本建築学会大会、構造 II、富山大学、富山、2010 年 9 月 11 日

⑧ 松谷 巖、金川 清、畑田朋彦、高橋元一、仁田佳宏、西谷 章、非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システム その 2 P SD 層間変位センサの基本特性”、日本建築学会大会、構造 II、富山大学、富山、2010 年 9 月 11 日

⑨ 金川 清、松谷 巖、畑田朋彦、高橋元一、仁田佳宏、西谷 章、非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システム その 3 フォトトランジスタアレイを用いた層間変位センサの基本特性、日本建築学会大会、構造 II、富山大学、富山、2010 年 9 月 11 日

⑩ 畑田朋彦、高橋元一、鈴木康嗣、松谷 巖、金川 清、仁田佳宏、西谷 章、非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システム その 4 実建物の起振機加振試験による計測特性の検討、日本建築学会大会、構造 II、富山大学、富山、2010 年 9 月 11 日

⑪ K. Kanekawa, I. Matsuya, M. Sato, Y. Nitta, T. Tanii, A. Nishitani, S. Shoji, I. Ohdomari, T. Hatada and M. Takahashi, “An Experimental Study on Relative Displacement Direct Sensing in Real-Time using Phototransistor Array for Building Structures”, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, July 13, 2010.

⑫ T. Hatada, M. Takahashi, R. Katamura, Y. Suzuki, I. Matsuya, K. Kanekawa, Y. Nitta and A. Nishitani, “Measurement of Actual Building Motions on Forced Vibration Test by Noncontact-Type Relative Story Displacement Sensors”, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, July 13, 2010.

⑬ I. Matsuya, R. Tomishi, M. Sato, K. Kanekawa, T. Hatada, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani and I. Ohdomari, “An Optical Lateral-Displacement Sensor for Measuring the Inter-Story of a Building”, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, July 12, 2010.

⑭ 松谷 巖、佐藤摩弥、富士良太、金川 清、仁田佳宏、畑田朋彦、片村立太、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、角度の分離を可能とする相対変位センサの開発、第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、神奈川、2010 年 3 月 19 日

⑮ 金川 清、松谷 巖、富士良太、佐藤摩弥、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、仁田佳宏、高橋元一、三浦悟、鈴木康嗣、畑田朋彦、片村立太、フォトランジスタと半導体レーザを用いた建築物の層間変位センサの開発、電気学会全国大会、明治大学、東京、2010 年 3 月 19 日

⑯ 富士良太、松谷 巖、佐藤摩弥、金川 清、仁田佳宏、畑田朋彦、片村立太、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、ボールレンズを利用した小型高分解能傾斜計の開発(Ⅱ)、第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、神奈川、2010 年 3 月 19 日

⑰ 松谷 巖、富士良太、佐藤摩弥、金川 清、谷井孝至、庄子習一、西谷 章、大泊 巖、仁田佳宏、高橋元一、三浦 悟、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、片村立太、層間変位センサ(LDS)の開発と実建物加振実験による残留変位の実測、電気学会全国大会、明治大学、東京、2010 年 3 月 17 日

⑱ 大塩 真、松谷 巖、高橋元一、三浦 悟、鈴木康嗣、畑田朋彦、片村立太、西谷 章、

仁田佳宏、金川 清、谷井孝至、庄子習一、大泊 巖、PSD相対変位計による免震建物のリアルタイムモニタリングシステム、日本地震工学会大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、東京、2009年11月12日

⑱ K. Kanekawa, I. Matsuya, M. Sato, R. Tomishi, M. Takahashi, S. Miura, Y. Suzuki, T. Hatada, R. Katamura, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani and I. Ohdomari, "An Experimental Study on Interstory Displacement Measurement Using Phototransistor Array", Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST) pp.550-555, July 31, 2009.

⑳ I. Matsuya, R. Tomishi, M. Sato, K. Kanekawa, M. Takahashi, S. Miura, Y. Suzuki, T. Hatada, M. Oshio, R. Katamura, Y. Nitta, T. Tanii, S. Shoji, A. Nishitani, and I. Ohdomari, "Development of Noncontact-Type Relative Story Displacement Monitoring System", Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST), pp.161-166, Boston, USA, July 30, 2009.

㉑ 松谷 巖、半導体技術と建築、日本学術振興会 制震(振)構造技術第157委員会、弘済会館、東京、2009年5月13日

㉒ 富士良太、松谷 巖、佐藤摩弥、金川 清、大泊 巖、ボールレンズを利用した小型高分解能傾斜計の開発、第56回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、茨城、2009年3月31日

[産業財産権]

○出願状況(計5件)

① 名称：変位計測装置  
発明者：大泊 巖、西谷 章、庄子習一、谷井孝至、松谷 巖、仁田佳宏、金川 清、三浦 悟、高橋元一、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、片村立太  
権利者：早稲田大学、鹿島建設  
種類：特許  
番号：特願2010-101740号  
出願年月日：平成22年4月27日  
国内外の別：国内

② 名称：変位計測装置  
発明者：大泊 巖、西谷 章、庄子習一、谷井孝至、松谷 巖、仁田佳宏、金川 清、三浦 悟、

高橋元一、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、片村立太

権利者：早稲田大学、鹿島建設

種類：特許

番号：特願2010-071368号

出願年月日：平成22年3月26日

国内外の別：国内

③ 名称：傾斜角度測定器  
発明者：大泊 巖、西谷 章、庄子習一、谷井孝至、松谷 巖、仁田佳宏、金川 清、富士良太、三浦 悟、高橋元一、鈴木康嗣、畑田朋彦、片村立太

権利者：早稲田大学、鹿島建設

種類：特許

番号：特願2009-223380号

出願年月日：平成21年9月28日

国内外の別：国内

④ 名称：変位計測装置、及び変位計測方法  
発明者：大泊 巖、西谷 章、庄子習一、谷井孝至、松谷 巖、仁田佳宏、金川 清、三浦 悟、高橋元一、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、片村立太

権利者：早稲田大学、鹿島建設

種類：特許

番号：特願2009-157380号

出願年月日：平成21年7月2日

国内外の別：国内

⑤ 名称：変位計測装置、及び変位計測システム

発明者：大泊 巖、西谷 章、庄子習一、谷井孝至、松谷 巖、仁田佳宏、金川 清、三浦 悟、高橋元一、鈴木康嗣、畑田朋彦、大塩 真、片村立太

権利者：早稲田大学、鹿島建設

種類：特許

番号：特願2009-043798号

出願年月日：平成21年2月26日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ

<http://www.tanii.nano.waseda.ac.jp/about.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松谷 巖 (MATSUYA IWAO)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：00514465