

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249063

研究課題名(和文) 苛酷な疲労環境下にある鋼道路橋のモニタリングを活用した統合管理システム

研究課題名(英文) Development of integrated maintenance system with utilization of monitoring for steel bridges under severe traffic conditions

研究代表者

三木 千壽 (MIKI, Chitoshi)

東京都市大学・総合研究所・教授

研究者番号：20016645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,000,000円

研究成果の概要(和文)：鋼道路橋の疲労安全性について、最新のセンシングおよびモニタリング技術を点検と診断に統合した維持管理システムを構築することを目的としている。主な項目は次の4つである。(1)疲労損傷の点検と評価のための情報プラットフォームの構築では、疲労損傷データベースの開発および点検者養成のためのソフト開発である。(2)モニタリングとそこで必要なセンサ類の開発では、十分な精度を確保することのできる加速度センサの主に雑音に関する仕様や試験方法を提案した。(3)モニタリングデータの処理では加速度データから橋梁の変位を精度よく求める手法を提案した。(4)疲労度診断に必要な要素技術開発では渦流探傷の高精度化を行った。

研究成果の概要(英文)：This study aims at developing maintenance system combining inspection and diagnosis with the latest sensing and monitoring technologies for the safety of steel bridges from the fatigue damage. The results of investigations are as follows:

(1) In the development of consultation system supporting inspection and evaluation for fatigue crack, database of fatigue damage cases was exploited and virtual reality software for inspection was developed. (2) In the investigation on sensors for accurate monitoring, specifications of noise levels and frequency band of an acceleration sensor and methodology for performance evaluation were proposed. (3) In the processing sensor data, accurate numerical integration scheme was developed, and three dimensional behavior of bridge under traffic load could be visualized from the sensing data. (4) In the enhancement of nondestructive technology together with diagnosis for fatigue damage, three dimensional presentation by the eddy current test was developed.

研究分野：維持管理工学，構造工学

キーワード：鋼橋 疲労 モニタリング センサ 診断

### 1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする「苛酷な疲労環境にある鋼道路橋」とは1960-1970年代に建設された溶接構造の橋梁で、しかも厳しい交通荷重にさらされている橋梁を指している。鋼道路橋の疲労を考える上で最も重要な事実は、2002年まで、設計において疲労を考慮してこなかったことである。疲労設計を行わないことは、それまでに建設されてきた橋梁には極めて低い疲労抵抗度の構造ディテールが採用されている可能性があることや、溶接の品質管理のレベルが低いことにつながる。さらに疲労の可能性を高めている原因はトラックの過積載にあり、その実態は世界で最も酷い状況と言える。

### 2. 研究の目的

苛酷な疲労環境にさらされ、疲労損傷が発生しはじめている鋼道路橋を対象とし、橋梁構造にセンサを組込むことによりスマート化し、維持管理における安全性水準を高めるとともに、経済性も高めようとするものである。

本研究は、橋梁点検の重点項目、疲労の兆候がある場合の調査方法、モニタリングの必要性とその項目などに関するコンサルテーションプラットフォームや、橋梁の維持管理に有効なモニタリングシステムの構築、さらにはそこで使用するセンサの開発から構成されている。センサについては高耐久性、環境適合性、自己電源、自己診断、自己発信、非破壊検査とのカップリング等が研究・開発のポイントとなる。センサとそれを用いたモニタリングについては、実橋梁での適合性や有効性の検証までを含む。

### 3. 研究の方法

鋼道路橋の疲労安全性確保について、最新のセンシング技術、それを応用したモニタリングを点検と診断に統合した維持管理システムを構築するものである。すなわち、高精度かつ効率的な維持管理を目的としての、既設橋梁のスマート化が本研究の目指すところである。具体的な内容は以下の通りである。

(1) 疲労損傷の点検と評価のための情報プラットフォームの構築：鋼橋の疲労の外的要因とメカニズム、原因究明の手順と判断基準、構造物の活荷重に対する応答と疲労損傷の発生、疲労亀裂を対象とした点検の手順、応力測定とそれを用いた疲労度の照査などを、web上の情報プラットフォームとして整理する。点検支援、診断支援コンサルテーションのコアとなる。

(2) モニタリングとそこで必要なセンサ類の開発：疲労損傷の発生、疲労亀裂の進展、最終的な脆性破壊や全体崩壊の検知や予知を可能とするためのセンサの仕様やその評価方法を確立する。

(3) モニタリングデータの処理：モニタリングデータは膨大な量となる。そのようなビッグデータから、橋梁の特定の箇所に影響を与える荷重データの抽出が重要となってくる。解析で得られるデータは主に変位であるが、センサで得られるデータとしては加速度が比較的容易に取得可能である。両者をつなぐ技術、つまり、加速度から変位を求めるアルゴリズムを構築することも含まれる。

(4) 疲労度診断に必要な要素技術：上記には含まれない要素技術の精度向上あるいは簡易化により診断の信頼性を向上させる。具体的には、非破壊検査の精度向上、車両の重量を計測する Weigh in motion を簡易に実施できるシステムの構築などがあげられる。

### 4. 研究成果

(1) 疲労損傷の点検と評価のための情報プラットフォームの構築

国内・国外の公表されている資料から鋼橋の疲労損傷と補修事例を約200事例集め、インターネット上のデータベースとして構築し、公開した。データベースはインターネット上のフリー百科事典である wikipedia のように利用者がその構築に積極的に参加できるようにすることを目標とし、プラットフォームとして PukiWiki を利用している。すべてのページについて利用者が自由に編集できるように設定すると、情報の正確さが損なわれる可能性がある。そこで、データベースを管理している専門家のみが編集可能なページに分けることとした。

図-1はデータベースのフロントページ、図-2は専門家による内容確認のフローを示している。専門家が管理しているページは投稿ページを通じて投稿された記事である。

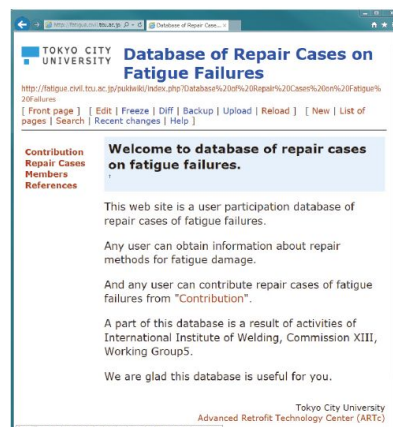


図-1 データベースのフロントページ  
http://fatigue.civil.tcu.ac.jp/pukiwiki

データベースは検索機能があり、キーワードを入力することで、必要としているデータを抽出することが可能である。

疲労損傷の理由4項目と補修方法8項目の組み合わせで示されており、道路管理者に対

して、補修方法の参考になる情報を提供している。

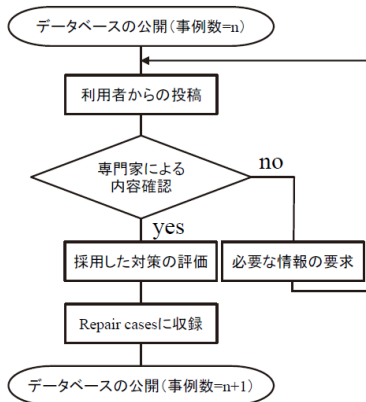


図-2 事例の投稿から専門家による確認，公開までの流れ

(2) モニタリングとそこで必要なセンサ類の開発

橋梁の活荷重により生じる変位応答が疲労損傷の支配的要因となっており、変位応答を把握することが重要である。外力に対する応答を計測する手法として、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)加速度センサを利用した方法が提案され、検討されている。MEMS 加速度センサは塗膜の上からマグネット等での設置が可能のため、設置が非常に容易であり、小型であることから構造物のヘルスマニタリングへの活用が期待されている。

都市内、都市間、高速道路あるいは一般道などで、ばらつきはあるが、鋼桁橋は径間長が30~60mが多いこと、橋梁を通過する車両については、時速50~80kmであることが多いことがわかっていて、このような状況下では、車両の静的たわみ成分は0.4~1Hzの範囲で変化することとなる。橋梁の固有振動数についても1~5Hzが多く、比較的低周波領域での計測が重要となってくる。

9種類の加速度センサに対して同一条件下における静置試験を行い、それぞれのノイズレベルを計測した。センサとしては、計測可能な加速度レンジ、AD変換ビット数、ノイズ密度、加速度モジュール内のフィルタがパラメータとなる。静置試験の実施状況を図-3に示す。

図-4に静置試験結果を示す。図-4のグラフはフーリエ変換結果が周波数分解能に依存しないように、単位周波数幅当たりのパワー値を示すパワースペクトル密度 [ $\mu\text{G}/\text{Hz}$ ] を単位として縦軸に示している。

BおよびFの加速度センサのノイズが低いことがわかるが、いずれもノイズ密度が  $1\mu\text{G}/\text{Hz}$  であることが仕様書にも記載されていた。

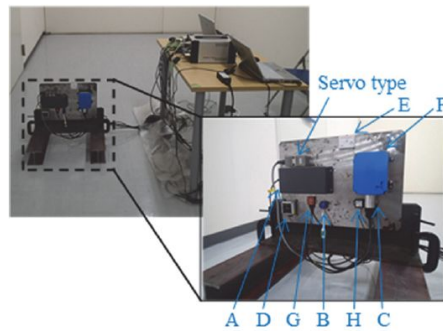


図-3 静置試験実施状況

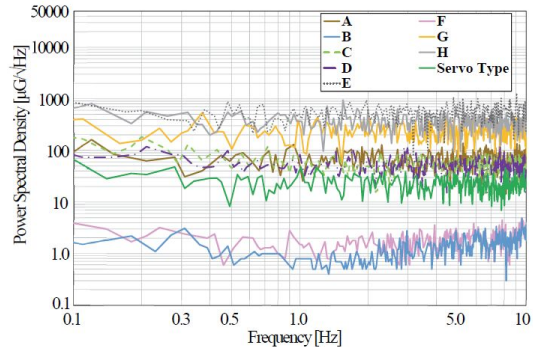


図-4 静置試験結果

(3) モニタリングデータの処理

疲労損傷の把握には、橋梁の変位応答が重要である。センサで計測した加速度を2階積分することで変位が得られることになるが、実際は、橋梁は振動しており、境界条件もあいまいであるため、単純な積分では精度が不十分であることは認識されていた。橋梁の自由振動に着目することによって、数値積分時の境界条件を算出する変位応答算出手法を開発した。この方法は、車両侵入前および通過後の橋梁は自由振動していることを利用して、初期条件を決定することが特徴である。具体的な手順を、図-5に示す。

- 車両の進入および退出を判断し、自由振動区間と強制振動区間に分割する。
- 自由振動区間において、フーリエ変換で時間域から周波数域にする。その際、Tukeyの窓関数を用いる。
- 1.0Hz以下の成分を取り除く。
- 加速度の一階積分を行い、速度を算出する。(周波数域)
- 速度の一階積分を行い、変位を算出(周波数域)
- d)およびe)で得られた波形をフーリエ変換して、時間域波形を得る。
- 強制振動区間において、加速度波形を数値積分して速度波形を計算する。
- 数値積分によりドリフト成分が残るので、除去処理を行う。
- さらに積分して、変位波形を計算する。
- 変位波形についてもドリフト成分を除去する。

図-3に示した9種類の加速度センサによる計測および図-5に示した変位算出法により、



実橋梁で実証試験を行った。対象となる橋梁は支間長約 35m の単純支持桁，主桁が 6 本からなるプレートガーダー橋である。

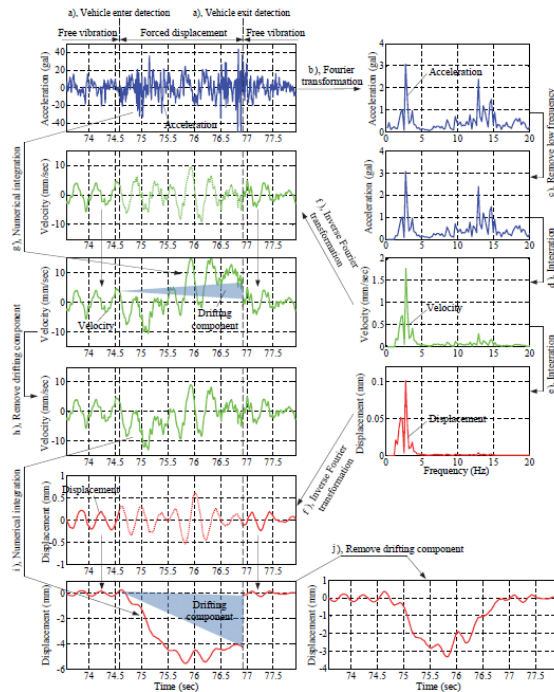


図-5 自由振動仮定法を用いた変位応答算出

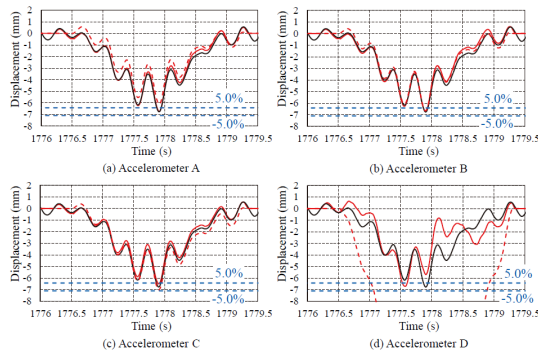


図-6 変位応答算出結果(センサ A~D)

図-6 に変位算出の結果を示す。センサ A から D の 4 つの例である。計測には、比較のために接触式の変位計も用いており、その結果も示されている。センサ A, B, C は分解能が比較的高く 1[ $\mu\text{G}$ ]であること、さらには、図-4 に示す結果より、ノイズレベルが 200[ $\mu\text{G}/\text{Hz}$ ]以下であり、これらの条件下、変位の誤差で 5%以内となることが示された。

#### (4) 疲労度診断に必要な要素技術

疲労き裂検出の精度向上も重要な要素である。ここでは、渦流探傷試験の高精度化を試みた。渦流探傷試験は、橋梁の検査において塗膜の除去の工程が必要とならず、作業性やコストの面で優れている。

プレートガーダーの横構接合部の主桁ウェブに取り付けられる面外ガセットは桁の

引張応力が作用する場合が多く、早期のき裂検出が望ましい。図-7 に示す面外ガセットのまわし溶接に生じる疲労き裂を対象とした検討を行った。



図-7 まわし溶接部に生じる疲労き裂

渦流探傷ではコイルを 1 つあるいは複数個内部に配置したプローブを用い、交流電流を印加した励磁コイルの磁界によって誘導された渦電流が、健全部とき裂部で変化することを検出コイルのインピーダンス変化で検出する原理である。しかし、電圧信号の変化からき裂の有無を判定する検査結果のわかりにくさ、点検員及び使用機器により差が生じることから、記録性、再現性が低いと捉えられている。

記録性向上のために、図-8 に示すようなプローブ先端に接続したエンコーダによって取得した平面的な探傷位置情報に対し、電圧、位相それぞれの変化を反映させる C スコープ画像化することで汎用性のある渦流探傷装置及びプローブを用いての疲労き裂検出性能向上を図る。

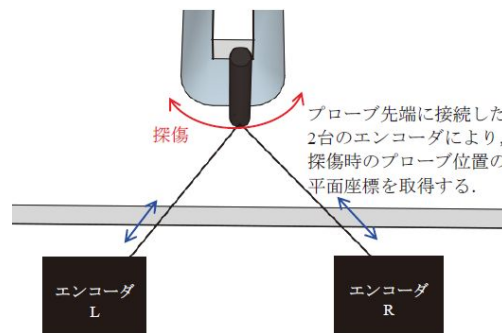


図-8 エンコーダによる位置情報の取得

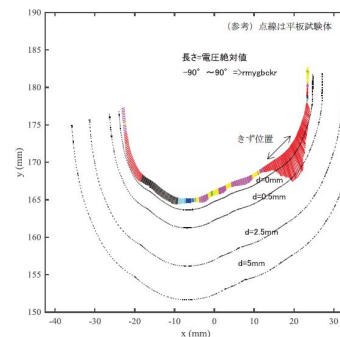


図-9 溶接試験体の画像化(深さ 0.5mm)

まわし溶接の溶接ビード曲線部止端部に放電加工した試験体による実験を行った。探傷結果のCスコープ表示を図-9に示す。試験体のスリットは深さ0.5mmであるが、電圧信号が得られている。位相についてもきずの端部でのずれが確認でき、きず検知の有効な手がかりとなっている。

#### (5) Portable Weigh-In-Motion の開発

Weigh-In-Motion(WIM)とは橋梁上通過車両の重量を部材の応答より逆解析的に求める手法である。MEMS 加速度センサを用いたWIM システムを開発した。これまではひずみゲージにより変位を計算していた部分だが、図-5に示した加速度から変位を計算する手法に変わったことになる。

単純支持の支間長38mの橋梁においてWIMを実施した。図-10に変位計とMEMSセンサにより得られた荷重載荷時の影響線を求めた。MEMSセンサによる結果がよく一致していることがわかる。

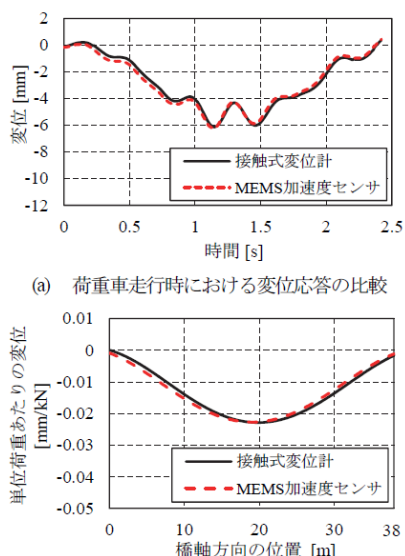


図-10 接触式変位計と MEMS 加速度センサにより算出した影響線の比較

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Yokoyama K and Miki C: Participatory database of repair cases on fatigue damaged welded structures, International Journal of Fatigue 査読有, 2017

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.01.010

横山薫, 小西拓洋, 三木千壽: 鋼橋の疲労損傷と補修事例のユーザー参加型データベースの構築とその分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 査読有, Vol.73, No.1, 126-145, 2017.

Hidehiko Sekiya, Osamu Maruyama, Chitoshi Miki; Identification of Cause of Displacement-Induced Fatigue in Steel

Bridge Based on Displacement Measurements Using High-Performance Microelectromechanical Systems Sensor, Sensors and Materials 査読有, Vol.29, No.2, pp.117-140, 2017.

Eiichi Sasaki, Takashi Ueda, Koichi Takeya, and Hiroshi Yamaguchi: Vibration Sensors Using Power Generation with Electret for Bridge Monitoring, Sensors and Materials, 査読有, Vol.29, No.2, pp.187-204, 2017.

古東佑介, 小西拓洋, 三木千壽, 関屋英彦; 渦流探傷試験結果のC-スコープ画像化による疲労き裂検出性能向上への試み, 鋼構造論文集 査読有, Vol.23, No.92, p21-p30, 2016.

Hidehiko Sekiya, Takeshi Kinomoto, Chitoshi Miki; Determination Method of Bridge Rotation Angle Response Using MEMS IMU, Sensors 査読有, Vol.16, No.11, p1-p13, 2016.

関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽; MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 査読有, Vol.72, No.3, p364~p379, 2016.

関屋英彦, 木村健太郎, 丸山収, 三木千壽; 橋梁の活荷重応答計測に必要な S/N 比に関する研究, 構造工学論文集 査読有, Vol.62, No.A, p174-p184, 2016.

Hidehiko Sekiya, Kentaro Kimura, Chitoshi Miki; Technique for determining bridge displacement response using MEMS accelerometers, Sensors 査読有, Vol.16, No.2, p1-p15, 2016.

関屋英彦, 横関耕一, 木村健太郎, 小西拓洋, 三木千壽; 橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 査読有, Vol.72, No.1, p61-p74, 2016.

Cao Vu Dung, Eiichi Sasaki: Numerical Simulation of Output Response of PVDF Sensor Attached on a Cantilever Beam Subjected to Impact Loading, Sensors 査読有, Vol.16, No.5, doi:10.3390/s16050601, 2016.

[学会発表](計17件)

関屋英彦, 三木千壽; MEMSセンサによる支承の変位応答計測に基づいた橋梁の異常検知システム, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年9月7日 東北大学(宮城)

野坂翔, 関屋英彦, 丸山収, 三木千壽; ウェーブレット変換を用いた構造物の損傷検知の試み, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年9月7日 東北大学(宮城)

森近翔伍, 関屋英彦, 丸山収, 三木千壽; 変位誘起型疲労損傷の原因究明を目的とした橋梁変形の可視化の試み, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年9月9日 東北大学(宮城)

Hidehiko Sekiya, Chitoshi Miki, Osamu Maruyama, Takeshi Kinomoto; System for evaluating fatigue environment of steel girder bridge based on acceleration measurements, International Conference on Smart Infrastructure and Construction (ICSIC), 2016年6月28日 ケンブリッジ(イギリス)

Cao Vu Dung, Eiichi Sasaki: Fundamental Investigation on Applicability of Piezofilm Sensor in Sensing Low-Frequency Structural Response of Bridges, ICSIC 2016, 2016年6月28日 ケンブリッジ(イギリス)

関屋英彦, 木村健太郎, 三木千壽; 橋梁の加速度記録から変位応答算出を行う一方法, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月17日 岡山大学(岡山)

横山薫, 三木千壽, 小西拓洋, 高森博之: 損傷事例に基づく鋼橋の疲労損傷点検シミュレータの開発, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月16日 岡山大学(岡山)

関屋英彦, 木村健太郎, 三木千壽: 橋梁の加速度記録から変位応答算出を行う一方法, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月17日, 岡山大学(岡山)

岡本翔太, 三木千壽, 関屋英彦, 横山薫: ひずみゲージによる板厚方向に進展する疲労き裂のセンシング, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月16日, 岡山大学(岡山)

Kaoru Yokoyama, Chitoshi Miki, Takuyo Konishi, Masayuki Tai: Development of Inspection Simulator by Applying Fatigue Repairing Database, 68th IIW Annual Assembly & International Conference, 2015年7月4日 ヘルシンキ(フィンランド)

Shirahata, Ueda: Development of Low Cost Bridge Monitoring System for Collapse Detection with Solar Cell and Proof Test, 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 2014年11月18日 早稲田大学(東京)

関屋英彦, 三木千壽, 白旗弘実; 橋梁用ヘルスマニタリングシステムに用いる加速度センサの性能確認, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月10日 大阪大学(大阪)

横山薫, 三木千壽, 関屋英彦, 白旗弘実: 疲労損傷に対する補修事例のユーザー参加型データベースの構築, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月11日, 大阪大学(大阪)

関屋英彦, 三木千壽, 白旗弘実: 橋梁用ヘルスマニタリングシステムに用いる加速度センサの性能確認, 土木学科第69回年次学術講演会, 2014年9月10日, 大阪大学(大阪)

古東佑介, 三木千壽: 鋼桁橋の局部損傷把握モニタリングの可能性検討, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月10日, 大阪大学(大阪)

Yokoyama, K. and Miki, C. User participation data base of repair cases on fatigue failures, 67th IIW Annual Assembly & International Conference, 2014年7月15日 ソウル(韓国)

Shirahata, Kishida, Ueda: Development of Monitoring System for Bridge Collapse Detection by Energy Harvest with Solar Cell, 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2014. 2014年7月10日 上海(中国)

#### 〔産業財産権〕

出願状況(計3件)

名称: 計測装置、計測方法、および計測システム

発明者: 関屋英彦、三木千壽

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2016-146016

出願年月日: 2016年7月12日

国内外の別: 国内

名称: 加速度記録を用いた変位応答算出法

発明者: 関屋英彦、三木千壽

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2015-119617

出願年月日: 2015年8月20日

国内外の別: 国内

名称: 構造物の変位解析装置、および構造物変位解析プログラム

発明者: 佐々木栄一, 梅川雄太郎, 田島文彦, 小林裕介, 菅沼久忠, 峰沢ジョージヴルペ, 田辺篤史

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2015-024381

出願年月日: 2015年2月10日

国内外の別: 国内

#### 〔その他〕

ホームページ等

<http://fatigue.civil.tcu.ac.jp/artc/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

三木千壽(MIKI, Chitoshi)

東京都市大学・工学部・総合研究所・教授  
研究者番号: 20016645

##### (2) 研究分担者

佐々木 栄一(SASAKI, Eiichi)

東京工業大学大学院・理工学研究科・環境・社会理工学院・准教授  
研究者番号: 40311659

白旗 弘実(SHIRAHATA, Hiromi)

東京都市大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40298013