

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226011

研究課題名（和文） 高密度モニタリングによる社会基盤施設の極限性能評価法

研究課題名（英文） Evaluation of ultimate performance of civil infrastructure using dense monitoring

研究代表者

藤野 陽三 (FUJINO YOZO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20111560

研究成果の概要（和文）：本研究は、社会基盤施設に関わる災害事故の未然防止、保全の効率化のためには振動モニタリング法が有効であることを、いくつかの実構造物におけるモニタリングデータの分析例から具体的に明らかにした。また、「想定外」事態の未然検出に対しても、その有効性を示すとともに、社会基盤施設の終局性能の推定の立場からモニタリングデータからのモデル化を具体的な例を通じて示した。なお、ワイヤレスセンサーによるマルチホップデータ通信などのミドルウェア技術や損傷検出技術についても高い成果を挙げた。

研究成果の概要（英文）：Importance and effectiveness of vibration-based monitoring of infrastructure in order to prevent accidents and disasters are strongly demonstrated from the analysis of actual monitoring response data in Yokohama Bay Bridge(seismic) and Hakucho Bridge(wind). Emphasis is placed on finding facts which are unexpected in design. Aiming at prediction of ultimate performance of structures, rational procedures of modeling of structures from monitoring data is also studied using examples. Middleware technology of wireless sensors such as multi-hop transmission of measured data in a number of wireless sensors is developed from various points of view.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	26,600,000	7,980,000	34,580,000
2009 年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2010 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2011 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2012 年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
総計	75,100,000	22,530,000	97,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学

### 1. 研究開始当初の背景

橋梁などの社会基盤施設の災害事故を減らし、その安全を確保する維持管理を行うためには、莫大なストックの状態を把握する必要がある。これまで行われてきた目視による点検だけで

は不十分なことが、2007.8 ミネソタの橋梁の崩壊事故の例が示すように明らかになっている中で、センサを用いた状態把握技術の確立が世界的に望まれている。

## 2. 研究の目的

常時作用荷重あるいは中小地震、強風等の外乱による構造物の挙動から、設計では想定されていない挙動、設計で考えているのとは有意な差のある挙動がないかをセンシングの上から明らかにし、極限性能評価への有意な情報につなげようとするのが本研究の目的である。そのために

- 1) この分野の社会からより強いサポートを得るための社会基盤施設のセンシング事例の成功事例の蓄積（実測データの獲得とデータ分析研究）
- 2) それを技術的にサポートするためのワイヤレスセンシング技術の進展（ワイヤレスセンシング研究）
- 3) 実際に社会基盤施設をセンシングする際に得られる情報のプロセス、処理、判断などの情報マネジメント技術の発展（センシング情報プロセズ・マネジメント研究）

を行う。

## 3. 研究の方法

### 1. 実測データの獲得とその分析

ここでは

- ・東海道新幹線高架橋での構造上での個体差を把握するためのアンサンブル計測や3次元挙動高密度センシングとその再現解析（論文 22,31）
  - ・首都高速道路高架橋 6 スパンでのアンサンブル高密度加速度・ひずみ計測大規模センシングとそのシミュレーション解析
- などを実施するとともに、
- ・オーストリアでの実橋梁での部材破断と振動・構造特性の変化測定プロジェクト
  - ・アメリカ NJ 州高速道路橋梁での健全度評価国際プロジェクト（論文 1,11）

などにも現地参加した。また、土木研究所が行った鋼 I 桁の長期計測データのシミュレーションの FE モデル化の検討を実施した。

モニタリングの有効性を示す目的で、既往のセンシングデータの分析を行った。具体的には**横浜ベイブリッジ**の地震応答観測と**白鳥大橋**（室蘭市）の強風応答観測を対象に研究を行い、大きな成果を出すことができた。

**横浜ベイブリッジ**（論文 2,7,26,27,38,39）

世界でも例のない高密度構造物地震計測が1990年以來行われてきており、当研究グループで開発してきた多点入力出力時間領域構造特性同定法により分析し、高次モードまでの振動特性を明らかとするとともに、設計時点では想定されていない、桁端リンクの剛結モードが地震時に発生していることを明らかにした。これは、桁端部と端部橋脚とをつ

なぐエンドリンクが設計ではヒンジで繋がっているはずであるのに対し、実際には摩擦の影響のためか、回転せず、剛結になり、端橋脚に想定していない曲げモーメントが作用することに繋がり、大地震時に損傷を与える可能性が生じる。端橋脚の大きな損傷はリンク構造の破断に繋がり、桁端部のアップリフト力を地盤基礎に伝えられなくなると、桁の全体崩壊につながる。この分析結果を考慮して、同橋の耐震補強設計が行われた。すなわち、桁端部とフーティングを PC ワイヤで結ぶ、ファイルセーフ設計が実施された。これもモニタリング記録のならではの成果と言える。

また、20110311 東北太平洋大地震による横浜ベイブリッジの高密度地震計測データが幸運にも得られた。桁が軸直角水平に最大 60cm、軸方向に 25cm、スパン中央で鉛直方向に 15cm も動いている。大型橋梁でこれまでに取れた地震応答記録としては最大で世界的にも大変貴重なものである。

本震時における桁と端橋脚の橋軸方向の応答に着目したところ端橋脚の動きは桁の橋軸方向の動きに伝達されず桁は免震的に挙動していることが記録の上から明らかになった。すなわち中小地震で認められたエンドリンクのスティック現象は大きな地震の場合には摩擦が切れてヒンジ的にふるまうことが確認されたことになる。これも地震モニタリングによって初めてわかったことである。

また、小振幅時には見られない、桁の水平横振動と鉛直振動が大振幅時には同じ振動数に引き込まれるという極めて興味深い現象も本震時に発見された。

さらに、ウインドウ集の橋軸直角方での衝突（pounding）が 311 の本震ならびに最大余震時に認められた。このことは、現場現地調査においても確認している。設計時には考慮されていない衝突がさらに大きな地震において発生することは必然であり、レベル 2 の地震に対し衝突によるタワーリンクの損傷が懸念された。（タワーリンクの損傷は塔の損傷につながり橋全体の崩落にもつながる現象である）。そこで衝突を考慮した非線形モデルを構築し、今回の衝突現象を説明するパラメータを同定し、その同定モデルによる衝突を含めた地震応答の再現性を確認した。そのモデルを用い 311 地震の倍程度の大きさになる L2 設計地震動に対する応答を求め、タワーリンクへの衝突力を求めたところ、タワーリンクの耐力よりもかなり下回り、設計地震動クラスでは衝突により壊滅的な損傷が発生しないことが予想された。これらのことはモニタリングによって初めて明らかにできたことであり、その価値は極めて高い。

**白鳥大橋**（論文 9） 開通の 1998 年から

地震や強風による応答を計測する動態観測がおこなわれてきている。本研究では過去15年にわたる強風時の風速風向、桁や塔の応答（12成分）のデータを収集し、様々な角度から解析を行った。その結果、冬期の湾口から来る橋軸直角方向に近い、風速が15m/sから25m/sにおいて、塔が面内（橋軸直角方向）に大きな振動を示すことが検出された（図1）。その振動波形は図2に示すように極めて調和的である。このような風方向の振動が完成形の実吊橋で見出されたのは世界初である。これを踏まえ風洞実験ならびに数値流体解析により振動の特性発生原因などを検討し、振動のメカニズム等が明らかにされた。この振動も継続的なモニタリングによ

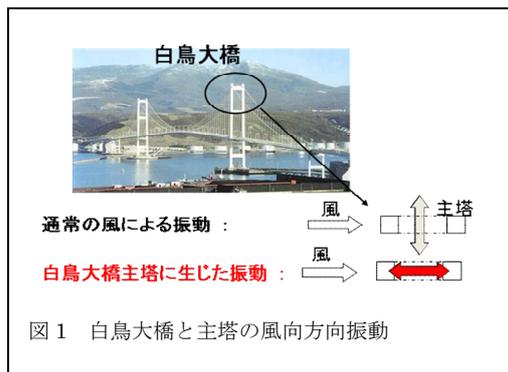


図1 白鳥大橋と主塔の風向方向振動

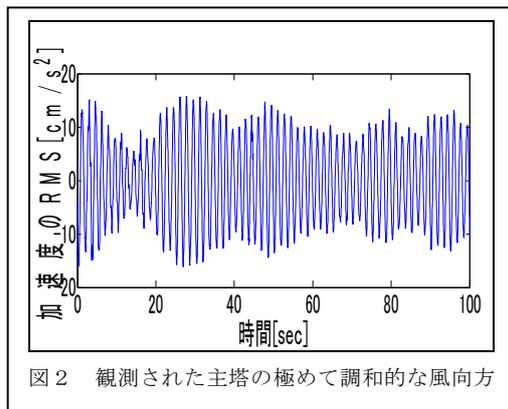


図2 観測された主塔の極めて調和的な風向方

り初めて検出されたことであり、工学的のみならずサイエンスの立場からも高く評価された。

**首都高速道路**（論文 5,14,15） 同一構造を有する鋼I桁高架橋6スパン（首都高速・用賀線・三軒茶屋付近）において個体差を見る目的も併せて高密度振動、ひずみ計測を2回にわたって実施した（2回目は1スパンのみ）。路面凹凸も事前に計測し、自由交通流の応答だけでなく、25トン重トラックによる走行応答も計測した。このような大規模な、複数のスパンにわたる計測は世界的にも例を見ないものであり、極めて有用なデータセットが得られた。

路面凹凸による違いを除くと応答において個体差は大きくないこと、ゴム支承付近の応答の特性から見て、支承のモデル化には注意が必要なこと が計測から明らかとなった。走行荷重と橋梁との連成を考慮した応答予測プログラムを汎用ソフト Abaqus を用いて開発し、パラメトリックな検討を行い、FEモデルを適度なものにすれば、主部材のひずみ応答だけでなく、2次部材の局所ひずみも十分な精度で予測できることを明らかにした。

## 2. ワイヤレスセンシングのミドルウェアに関する研究（論文 6,21,23,24,37）

わが国の土木系では唯一、長山とワイヤレスセンシングの基礎的研究をおこなってきた。新しく複数の通信チャンネルを利用することで混信を制御したマルチホップデータ転送を提案し、ホップ数やノード数の増加に関わらず、一定の速度でデータ転送が可能なシステムを構築した。世界的に見ても、また他分野を見てもユニークなアプローチで、ワイヤレスセンサネットワークに固有のスケラビリティの問題を解決したといえる。ワイヤレスセンサ端末として Imote2 を採用し、50個のセンサ端末を用いてプログラム開発と検証実験、改良を繰り返しながらシステムを実現し、マルチホップ通信が高速に行えることを屋内実験とレインボーブリッジ、韓国 Jindo 橋などに屋外においても確認した。この研究では長山氏の貢献が大きい。先駆的研究のゆえに、論文の引用回数も非常に多い。

また、マルチホップデータ転送の通信時間最適化の理論構築を行い、無線センサネットワークへの実装、室内実験による性能評価、地震モニタリングに向けた長期連続計測システムの開発した。

## 3. センシング情報のプロセス・マネジメント研究

1) Output 情報のみからのシステムのモデル化（論文 36）：東大生産技術研究所 合原教授との共同研究として、フランスからの博士課程留学生 Monroig 君と、出力としてのセンシングデータのみを用いて構造モデルを作成し、損傷の有無を同定する研究は高い成果を挙げ、それをまとめた論文は、アメリカ物理学会の Physical Review に掲載された。

2) 質量付加方式による橋梁の新しい状態把握方式（論文 18）：損傷前後でのセンシング結果の差から損傷同定を行う、従来のとは異なり、付加する質量の場所をいろいろと変えて振動状態をセンシングし、そこから構造パラメータを同定し、損傷推定につなげる新しい方式を提案した。理論構築、室内テストベットを用いた実験的検証、千

千葉県小型橋梁を用いたフィールドでの実証を行い、その有効性を実証的に明らかにした。

- 3) モデルの Validation & Verification (論文 12) : パラメータの感度解析と組み合わせたベイズ推定を用いた、ばらつきのあるセンシングデータからの構造モデルのパラメータの効率的な最尤値推定法を提案した。これによると、さまざまな構造モデルの尤度を比較できることになる。千葉県小スパン RC 橋の衝撃自由振動データに適用し、その有効性、有用性を明らかにした。
- 4) 損傷検出 (論文 16.28) : 構造物の加速度波形から、構造系の損傷発生 (非弾性域に入ったのか) の有無をウェーブレットを使ったリアルタイム推定アルゴリズムの研究へと研究を展開させた。

#### 4. 研究成果

計画した、実測データの獲得とデータ分析研究、ワイヤレスセンシング研究、センシング情報プロセス・マネジメント研究という3つの研究それぞれにつき、前述のように活発な研究を行い、高い成果を挙げ、その成果を内外に発表することができたと考えている。

#### 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 80 件) (すべて査読あり)  
代表的なものを以下にあげる

1. D. M. Siringoringo, Y. Fujino and T. Nagayama, Dynamic Characteristics of an Overpass Bridge in a Full-Scale Destructive Test, Jour. of Engineering Mechanics ASCE Vol.139, pp.691-701,2013 (査読あり)
2. 藤野陽三, シリゴリンゴ ディオンシウス, 並川賢治, 矢部正明:2011 年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答, 土木学会論文集 (印刷中 May 2013) (査読あり)
3. Y. Fujino, D. M. Siringoringo, Vibratio Mechanisms and Controls of Long-Span Bridges: A Review, Structural Engineering International, Vol.3, August 2013 (in press) (査読あり)
4. 紺野克昭, 西川貴文, 藤野陽三: 2011 年東北地方太平洋沖地震における不整形な立面・平面を持つ免震構造物の免震層における並進, 回転成分の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.3, pp.14-29, 2013.5 (査読あり)

5. 蘇迪, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則: 首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析, 構造工学論文集, vol. 59, pp. 281-289, 2013 (査読あり)
6. Zou, Z., Nagayama, T., and Fujino, Y.: Efficient multi-hop communication for static wireless sensor networks in the application to civil infrastructure monitoring. Structural Control and Health Monitoring (in print 2013) (査読あり)
7. D. M. Siringoringo, Y. Fujino and K. Namikawa, and M. Yabe: Seismic Responses Analyses of the Yokohama-Bay Cable-Stayed Bridge in the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake. J. Bridge Eng. ASCE, (In press) DOI: 10. 1061/ (ASCE) BE.1943-5592.0000508 (May. 11, 2013) (査読あり)
8. 西川貴文, 紺野克昭, 藤野陽三, 中山俊哉: NTP による高精度時刻同期を利用した高層免震建物の高密度振動観測システム, 日本地震工学会論文集 (2013.3,掲載決定) (査読あり)
9. D. M. Siringoringo and Y. Fujino, Along-wind Vibration of a Suspension Bridge Tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.103, pp.107-121, 2012 (査読あり)
10. 朝川皓之, 長山智則, 藤野陽三, 西川貴文, 秋本隆, 和泉公比古: 一般車両の走行時動的応答を利用した舗装路面の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集 E1, 68(1) pp.20-31, 2012 (査読あり)
11. D. M. Siringoringo and Y. Fujino, Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle: Analytical and Experimental Study, Advances in Structural Engineering, Vol. 15 (3), pp.417-433, 2012 (査読あり)
12. Nishio M, Marin J, Fujino Y: Uncertainty quantification of the finite element model of existing bridges for dynamic analysis, Jour. of Civil Structural Health Monitoring, 2: 163-173, Springer, 2012. 11 (査読あり)
13. T. Nishikawa, J. Yoshida, T. Sugiyama, Y. Fujino: Concrete Crack Detection By Multiple Sequential Image Filtering, Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng., Vol. 27, pp. 29-47, 2012.1 (査読あり)
14. Jean-Charles Wyss, Di Su, and Y. Fujino: Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge, Engineering Structures, vol. 33, pp. 1088-1097, Apr 2011 (査読あり)

15. 蘇迪, 藤野陽三, Jean-Charles Wyss : 汎用有限要素コードを利用した車両-橋梁連成系の動的応答予測と鋼I桁斜橋への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), vol. 67, pp. 374-385, 2011 (査読あり)
16. 阿部雅人, 藤野陽三; 加速度記録からの地震時最大応答変位推定の非弾性応答への拡張, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 1, pp.63-72,2011 (査読あり)
17. Y. Fujino, D. M. Siringoringo, Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies, Structure and Infrastructure Engrg., Vol.7, pp. 597-611, 2011 (査読あり)
18. Dinh, H.M., Nagayama, T., and Fujino, Y. Structural parameter identification by use of additional known masses and its experimental application. Structural Control and Health Monitoring, 19(3), pp436-450, 2011 (査読あり)
19. 藤野陽三: 構造工学の発展の変遷と今後の展開(招待論文), 第57回構造工学論文集, 57-A, CD-ROM, 2011 (査読あり)
20. Xia, Y., Wu, Q. X., Xu, Y. L., Fujino, Y. and Zhou, X. Q.: Verification of a Cable Element for Auto-Parametric Vibration of Stay Cables Subject to Harmonic Excitation and Random Excitation, Advances in Structural Engineering, Vol.14, No.3, pp.589-595, 2011 (査読あり)
21. T. Nagayama, P. Moinzadeh, K. Mechitov, M. Ushita, N. Makihata, M. Ieiri, G. Agha, B. F. Spencer, Jr., Y. Fujino and J. Seo: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring, J. Smart Struct. and Systems, 6, 481-504,2010 (査読あり)
22. D. Su, Y. Fujino, T. Nagayama, Jaime Hernandez, and Masaki Seki: Vibration of reinforced concrete viaducts under high-speed train passage: measurement and prediction including train-viaduct interaction, Structure & Infrastructure Engineering, 6, 621-633, 2010 (査読あり)
23. Rice, J., Mechitov, K., Sim, S.-H., Nagayama, T., Jang, S., Kim, R., Spencer, Jr., B. F., Agha, G., and Fujino, Y.: Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring. Smart Struct. and Systems, Vol. 6 No. 5, 2010 (査読あり)
24. Nagayama, T., Moinzadeh, P., Mechitov, K., Ushita, M., Makihata, N., Ieiri, M., Agha, G., Spencer, Jr., B. F., Fujino, Y., and Seo, J.-W.: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring. Smart Struct. and Systems, Vol. 6 No. 5, 2010 (査読あり)
25. 藤野陽三: 土木構造物の寿命, 日本建築学会, 総合論文誌, No.3, pp.19-22, 2011.1 (査読あり)
26. 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明; “横浜ベイブリッジの耐震補強設計における鋼上部構造を対象とした性能照査”, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp.13-30, 2010 (査読あり)
27. 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明; “横浜ベイブリッジの耐震補強設計に用いた非線形地震応答値の設計検証”, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp.31-36, 2010 (査読あり)
28. 阿部雅人, 藤野陽三: 不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定, 土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp77-490, 2010.8 (査読あり)
29. 阿部雅人, 藤野陽三: 移動体上の風センシングによる竜巻検知の試み, 土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.637-642, 2010 (査読あり)
30. 稲垣博信, 水野裕介, 藤野陽三, 河村圭; 地方自治体における橋梁の維持管理の状況と投資効果にに対する調査検討, 土木学会論文集F, Vol.66, No.3, pp.351-359, 2010 (査読あり)
31. 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三; “走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用”, 土木学会論文集F, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010 (査読あり)
32. 水野裕介, 片岡慶太, 松本好弘, 長山智則, 藤野陽三; 鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変状の検出, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.3, pp.360-365, 2010 (査読あり)
33. 宮本崇・本田利器: 地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.13, pp.577-584, 2010 (査読あり)
34. D. M. Siringoringo, Y. Fujino, Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engrg, Vol.24 (4), pp.249-265, May 2009 (査読あり)
35. Y. Fujino, D. M. Siringoringo, M. Abe, The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure, Smart Structure and System, Vol.5, pp.173-191, 2009 (査読あり)
36. E. Monroig, K. Aihara, and Y. Fujino: Modeling dynamics from only output data, The American Physical Society (アメリカ

- 物理学会), Physical Review E 79, 056208, 1-12, 2009 (査読あり)
37. 長山智則, B.F. Spencer, Jr, 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集 A,65,523-535, 2009 (査読あり)
  38. D.M.Siringoringo, and Y. Fujino: System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37,361-386, 2008 (査読あり)
  39. D. M. Siringoringo, Y. Fujino, System identification of suspension bridge from ambient response measurement. Engineering structures, Vol.30 (2),pp.462-477, 2008 (査読あり)

[学会発表] (計 225 件)

国内 120 編, 国外 105 編, うち招待講演が国内 39 回, 国外 47 回に及ぶ.

1. 藤野陽三: 社会インフラマネジメントにおけるセンシングの役割, 自動制御学会関西支部総会(基調講演), 2013 年 2 月.
2. 藤野陽三: インフラ維持管理の今後のあり方, 構造計画研究会講演会, 2013 年 2 月 (基調講演)
3. Yozo FUJINO: Great East Japan M9.0 Earthquake and its Disaster, Transportation Research Board (アメリカ交通研究機構) 会議基調講演, Washington DC, 2012 年 1 月
4. Yozo FUJINO: Infrastructure in Japan - preparing the unexpected towards a more resilient society-, 日本学術振興会 80 周年記念パブリックセミナー, ロンドン 日本大使館, JSPS ロンドン事務所主催, 2012 年 11 月 14 日 など

学会等の発表に加えて, 以下のような社会向けの情報発信も数多く積極的に行った.

藤野陽三: 安全に向けての高速道路インフラストラクチャーのマネージメント, 高速道路と自動車, 第 56 巻, 第 3 号, 高速道路調査会, PP. 7-11, 2011. 3

藤野陽三: インフラストラクチャーの事故を防ぐために, 学士会会報, 2013 年 7 月号, (印刷中)

[図書] (計 5 件)

1. Y.Fujino, K. Kimura, H. Tanaka: Wind Resistant Design of Bridges in Japan - developments and practices -, Springer, pp.1-256, 2012
2. 藤野陽三 (監修): 橋の構造と建設, ナツメ社, pp.1-222, 2012.
3. Boller, C. Chang, F-C, Fujino, Y.:

Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, 1-2700 (2009) (機械, 航空, 船舶, 鉄道, プラント, 土木, 建築などを対象に構造ヘルスマモニタリングを体系的に述べた世界初の百科事典 2700 ページを超える大著)

4. 藤野陽三: 橋梁マネジメント (ヤネフ原著) (訳), 技報堂, pp.696, 2009.9 刊行
5. Y. Fujino, H. Noguchi: Management of urban stock, Springer, 2008

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.bridge.t.u-tokyo.ac.jp/>

受賞

土木学会田中賞(2009)  
 アメリカ土木学会 R. H. Scanlan Medal (2011)  
 Kwang - Hwa Master Lecture at AIT (Bangkok) and NTU (Taiwan) (2011)  
 世界橋梁管理学会 T. Y. Lin Medal (2012)  
 土木学会国際貢献賞(2012)  
 土木学会田中賞(2012)  
 日本風工学会出版賞 (2013)  
 日本風工学会ベストペーパー賞(2013)

## 5. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤野 陽三 (Yozo FUJINO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号: 20111560

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

長山智則 (Tomonori NAGAYAMA)  
 東京大学・大学院工学系研究科・講師  
 研究者番号: 80451798

本田利器 (Riki HONDA)  
 東京大学・新領域創成科学研究科・教授  
 研究者番号: 60301248