

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00777

研究課題名（和文）社会便益を考慮した高速道路施設の維持管理高度化に関する研究

研究課題名（英文）Scientific Maintenance on Expressway Facilities considering Social Benefit

研究代表者

桑原 雅夫（KUWAHARA, Masao）

東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任教授

研究者番号：50183322

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,800,000円

研究成果の概要（和文）：道路施設の維持管理高度化を目的とし以下を明らかにした。故障過程の評価：設置や故障時期が不明のデータも考慮した生存確率の推定方法を提案するとともに、実管理データを用いて各種施設の生存確率を推定した。社会損失の評価：施設が故障した場合の利用者損失と管理者費用を、実際の故障、需要データを用いて定量評価した。特に、利用者損失の評価はこれまで行われておらず、本研究の独創的な点である。維持管理施策の提案：推定した故障過程、社会損失に基づき、社会的総余剰最大化問題を定式化し、維持管理施策（点検間隔、更新間隔、部品の備蓄管理など）を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、道路施設の維持管理の高度化を目的としてしている。インフラの老朽化が進む近年では、道路施設を含めたインフラの維持管理に対する社会的要請はきわめて大きい。しかし、道路施設の維持管理については、故障過程が定量化された事例は過去にはほとんどない上、施設故障が利用者側の社会損失に与える影響評価も行われていない。本研究は、施設管理に従事する研究協力者と連携しながら、データの科学的分析に基づいて故障過程と社会損失を明らかにするものであり、社会的総余剰の最大化による維持管理の最適化は、従来とは一線を画す優れたインフラマネジメントのための新たなフレームワークを提示するものである。

研究成果の概要（英文）：This study proposes following scientific approaches for the better road facility maintenance. (1) Failure Process: A method that estimates the survival probability considering censored data is proposed. Using real maintenance data, survival probabilities of several facilities are estimated. (2) Social Loss: Using observed failure data and traffic demand data, the user loss as well as the maintenance cost due to a facility failure are estimated. Evaluation of user loss due to a failure is a unique original outcomes of this study. (3) Optimum Maintenance Strategy: By formulating the optimization problem so as to maximize the social benefit, better maintenance strategies such as appropriate inspection intervals, repair frequency and stock management of repair materials are proposed.

研究分野：交通工学

キーワード：維持管理 利用者損失 道路施設 現場技術者アンケート 点検効率化 生存確率

1. 研究開始当初の背景

インフラの老朽化が進む近年では、道路施設を含めたインフラの維持管理に対する社会的要請はきわめて大きい。橋梁や舗装などある劣化状態に到達したら莫大な損失を招く構造物に対しては故障は一切許されず、リスク管理水準を設定した維持管理の研究が数多く存在する。一方、情報版や ETC 施設などの道路施設については、故障すると渋滞が発生するなどの損失を利用者は被るものの、一定レベルの故障は許される維持管理となる。しかし、道路施設については、故障過程が定量化された事例は過去にはほとんどない上、施設故障が利用者側の社会便益に与える影響評価も行われていない。本研究は、施設管理に従事する研究協力者と連携しながら、データの科学的分析に基づいて故障過程と社会便益を明らかにするものであり、社会的総余剰の最大化による維持管理の最適化は、従来とは一線を画す新たなフレームワークを提示するものである。

2. 研究の目的

本研究は、道路施設の維持管理の高度化を目的として、次の3つを実施する：

- (1) 施設の生存確率を推定し、故障過程を明らかにする、
- (2) 施設故障がもたらす遅れ時間、事故リスク増加による社会便益を定量化する、
- (3) 社会的総余剰を最大化するように施設の維持管理施策（点検・更新間隔、予備部品の備蓄計画）を最適化する方法を提案する。

なお、本研究では、ETC 施設や情報板といった施設の劣化・故障が、渋滞や事故を誘発して交通流に影響を与える高速道路施設を対象とする。

3. 研究の方法

目的 (1) については、施設の設置、故障に関する点検管理データを用いた統計的手法により、道路施設の故障過程を定量化する。具体的には、ノンパラメトリック統計分析、ワイブル劣化ハザードモデルなどの生存時間解析の手法を用いる。施設の点検管理データには、施設の設置や故障時期が不明のデータ（打ち切りデータ）もかなり存在しているため、これら打ち切りデータも考慮した生存確率の推定方法を提案する。

目的 (2) については、故障データ、交通量データなどの実データに基づいて、利用者側の損失と管理者側の管理費用を定量化する。例えば、ETC 施設や情報版の故障で引き起こされる旅行時間の増加による利用者損失、管理者側の維持管理費用（人的・物的費用）を定量化する。特に、故障による利用者損失の評価はこれまで行われておらず、本研究の独創的な点である。

目的 (3) については、(1)、(2)で定量化された施設の故障過程、社会便益に基づき、維持管理施策の最適化を行う。維持管理の方法には、故障してから更新を行う事後保全と故障前に更新を行う予防保全があるが、それぞれを社会的総余剰最大化問題として定式化し、維持管理施策（点検間隔、更新間隔、部品の備蓄管理など）の最適化を行う。また、膨大な種類の装置・機器の維持管理方策のスクリーニングを、現場技術者へのアンケート調査によって行う手法の提案も行う。

4. 研究成果

- (1) 生存確率の推定

道路施設の故障過程，すなわち生存確率を理解することは維持管理の基本となる．道路施設については，運用開始から故障までの補修や更新時期に関する履歴がデータベースに記録されており，これを用いて生存確率を推定する．ただし，設置から年数がかなり経過した装置については，データベース化が遅れているものもあり，設置から故障までの完全な履歴を知ることが難しい場合も少なからずある．そこで，不完全な履歴データも含めて，施設の生存関数を推定する手法を提案し，既往手法との比較を行った．

その結果，点検データの計測方法によって，3種類の推定方法を選択すべきこと，3つの手法による最尤法による生存確率の推定には，数学的にきれいな対応関係があることを明らかにした．この手法は，ノンパラメトリックな分析にもワイブル分布のような分布系を規定したパラメトリックな手法にも適用できるものである．

図1は，180のトンネル点検データを用いて，取付金具の生存確率をノンパラメトリックに推定した例，図2は392のICにおける故障データを用いて，ETC発進制御機の生存確率をワイブル劣化ハザードモデルで推定した例である．

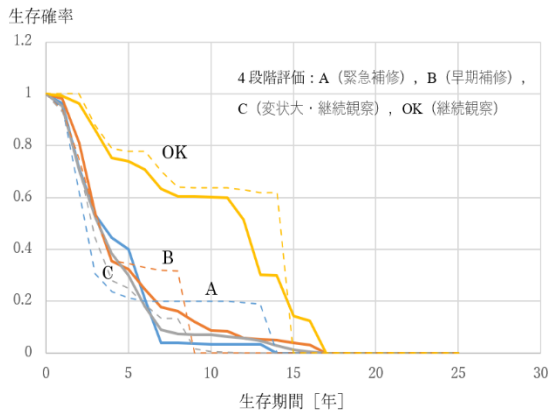


図1 トンネル照明取付金具の点検評価別のノンパラメトリックな生存確率
実線：全トンネル，破線：凍結防止剤の使用が多いトンネル

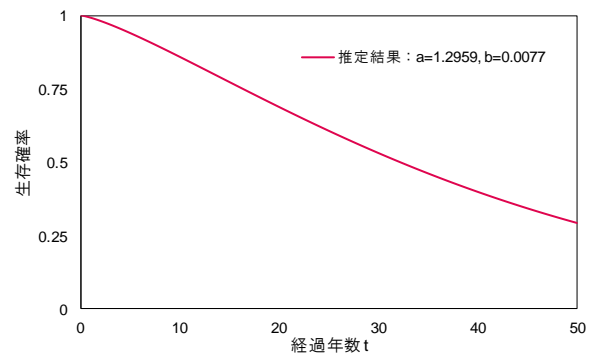


図2 ETC発進制御機の生存確率
(ワイブル劣化ハザードモデルによる推定)

(2) 社会便益の評価

社会的総余剰最大化のためには，故障に起因した利用者側の損失と，管理者側の管理費用の双方を定量化する必要がある．利用者損失の評価については，故障確率（生存確率），故障の継続時間，そして利用者の需要が必要となる．本報告ではETC施設の故障によってレーン閉鎖が発生した場合の損失評価について概説するが，入口情報版の故障についても同様の分析を行っている．

故障確率は生存確率から推定でき，故障の継続時間と需要は実データに基づいて推定した．

例えば，図3は，西日本管内のETCレーン閉鎖の継続時間の分布であり，利用者需要についても，ETCレーン別の通過台数の記録から需要の時間分布が推定した．次に，推定した生存確率，レーン閉鎖継続時間，需要を使って，レーン閉鎖が引き起こす旅行時間増大による利用者損失をICごとに評価した．また，管理者費用については更新費用を計上した．このような社会損失の

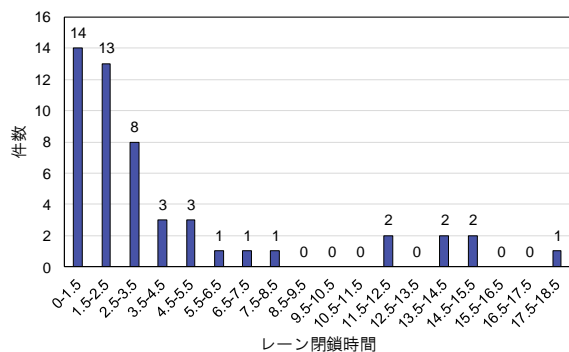


図3 レーン閉鎖時間の分布

定量化に基づいて、施設の更新タイミングが異なる予防保全と事後保全における社会損失の比較を行った。図4はETC発進制御機について、予防保全と事後保全の各費用の変化を示したものであるが、このような分析を利用者損失と更新費用の原単位を変化させて実施した。その結果、予防保全が有利となる条件は、①長時間のレーン閉鎖を引き起こす可能性が高い場合、②ICの需要が大きい場合、③利用者の時間価値が大きい場合、④更新費用が小さい場合、⑤ワイブル劣化ハザードモデルの加速度パラメータが大きい場合のように整理できた。

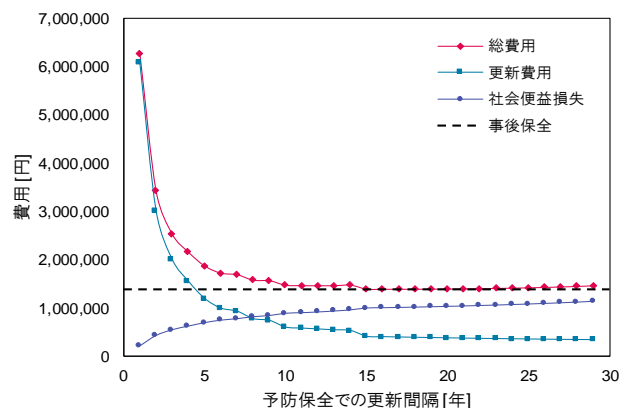


図4 費用と予防保全間隔（発進制御機）

(3) 維持管理施策の最適化

①現場技術者アンケートによる維持管理方策のスクリーニング

高速道路施設は、多様な機器や装置により構成されているため、物理的な経年劣化、経済的寿命、突発的な故障、陳腐化など、個々の機器や装置に対して補修が必要となる要因が多岐にわたり、その特性も異なる。また、個々の機器や装置が故障した際の交通流への影響や補修の緊急性も異なっている。このように多様な種類の設備に対して、個々の設備の特性を考慮せず一元的な維持管理施策を設定することは適切ではなく、設備ごとの故障過程や、利用者損失を踏まえ、維持管理施策をより細やかに設定することが必要である。しかし、ここで問題となるのが、維持管理施策を計画する主体と実施する主体（現場）とで、維持管理に関するノウハウが共有されておらず、適切な方針を構築するのが難しいという現状である。

そこで、膨大な種類の設備に関して、日常的に維持管理業務を行っている現場技術者の経験知を活かすべく、現場技術者へのアンケート調査により、設備の特性を把握し、設備の種類ごとに適切な維持管理施策を決定するための方法論を提案した。アンケートでは、故障時の利用者への影響、故障予兆の有無とともに、維持管理施策として①予知保全、②定期交換、③事後保全（即時補修）、④事後保全（順次補修）の4種類を定義し、現状の維持管理施策と改善可能性の高い施策の両者をヒアリングした。

このアンケートをNEXCO関西支社管内の41種類の装置機器に対して行い、個々の装置機器について、適切な維持管理施策が決定できることを確認した。また、これら41種類の装置機器に対して、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の比較を行い、定期交換への改善可能性がある装置機器、予知保全への改善可能性がある装置機器を特定した。特定結果に対して、装置機器ごとに具体的な考察を行うことにより、アンケート調査結果及びその他の装置機器特性を総合的に考慮した維持管理施策の改善のための考え方を例示するとともに、i) 高度な維持管理施策の必要性が相対的には高くないが、高度な維持管理施策の採用可能性がある設備も提案方法論により抽出できる点、ii) アンケート調査により現状の維持管理施策の改善可能性がある

表1 適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の組合せごとの装置機器の種類数

		適切な維持管理施策			
		故障時順次補修	故障時即時補修	定期交換	予知保全
現状の 維持管理施策	故障時順次補修	1	0*	1*	0*
	故障時即時補修	2**	5	13*	8*
	定期交換	0**	1**	3	1*
	予知保全	0**	0**	0**	6

と判断された装置機器の一部では、維持管理施策の改善のための検討が実務において開始されているものもあり、そのような検討の妥当性がアンケート調査結果によっても確認できる点、がそれぞれ示された。

表1に、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の組合せごとに装置機器の種類数を集計した結果を示す。同表において、右肩に記号「*」を付与した数字は、現状の維持管理施策に改善可能性がある装置機器の種類数、右肩に記号を付与していない数字は、現状の維持管理施策に妥当性がある装置機器の種類数、さらに右肩に記号「**」を付与した数字は、現状の維持管理施策が過度に高度である可能性がある装置機器の種類数である。

②点検戦略の最適化

推定した生存確率に基づけば、個々の装置機器がどのくらいの期間生存するのかをシミュレートすることができるので、点検間隔の違いによって、施設の故障を効率的に発見して更新を行えるかどうかを評価することができる。図5は、トンネル取付金具の点検について、現行の点検間隔の評価を行った例であるが、100個の取付金具に対して生存期間をシミュレートしながら、ある点検戦略（全数点検と抜き取り検査の間隔）を実施した場合の、故障前に更新できる件数、故障後に更新を行う件数、点検数を評価している。

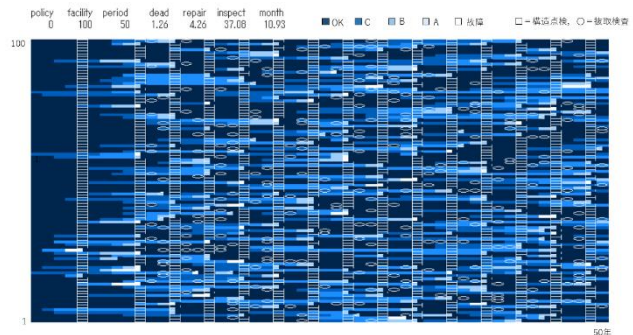


図5 点検戦略のシミュレーション評価例

③備蓄拠点と予備品の配置パターンの最適化

前述のように、高速道路施設の維持管理にあたっては、利用者損失と管理費用の双方を考慮した方策の構築が求められ、これらの費用には、故障した施設を修復するための予備品の購入・配置計画や、この予備品を保管する備蓄拠点の配置計画が大きく影響する。本研究では、故障時の利用者損失および予備品管理・拠点維持費用から構成される社会的損失を最小化するような備蓄拠点と予備品の配置パターンの最適化問題を定式化した。この問題では、拠点を集約し予備品備蓄を抑えることで維持管理費用を削減できる一方、施設故障時に迅速な復旧を行うことができず利用者損失がかさむ可能性がある、というトレードオフを表現している。その上で、複数期間から構成される計画期間において、各期に拠点・予備品配置パターンを変化させることができる、動的な最適化問題を定式化した。

さらに数値計算の結果からは、故障品の取替品を円滑に提供するためのロジスティクスが重要であることが見て取れた。配置を固定したケースからは、配置拠点数が少なくても適切に配置すれば、配置拠点数が多いときと同じ程度にまで利用者損失を抑えられることが示唆された。言い換えれば、単純に配置拠点数を増加させた場合維持管理費用が嵩むことになる。また、配置を変化させられるケースでは、拠点・予備品の空間的のみならず時間的な配置が重要となりうるということが示唆された。

謝辞：研究に際して、西日本高速道路ファシリティーズ株式会社、西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社から、多くの維持管理データの提供を受けたことに対し、謝意を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 佐津川 功季, 水谷 大二郎, 川崎 洋輔, 金田 威夫, 桑原 雅夫	4. 巻 73
2. 論文標題 故障時交通渋滞による経済損失を考慮したETC設備の最適補修施策に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 105 - 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.78.3_105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 生嶋理恵, 水谷大二郎, 佐津川功季, 川崎洋輔, 桑原雅夫	4. 巻 78
2. 論文標題 現場技術者へのアンケート調査に基づく高速道路設備の維持管理施策の改善可能性, 土木学会論文集F4 (建設マネジメント)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集F4 (建設マネジメント)	6. 最初と最後の頁 51 - 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejcm.78.1_51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 桑原 雅夫, 吉井 稔雄	4. 巻 9
2. 論文標題 道路施設の生存関数のノンパラメトリック推定: 生存期間の長さを考慮した生存開始時刻が不明の場合の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.9.1_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 生嶋理恵, 水谷大二郎, 佐津川功季, 川崎洋輔, 桑原雅夫	4. 巻 78巻1号
2. 論文標題 現場技術者へのアンケート調査に基づく高速道路設備の維持管理施策の改善可能性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集F4 (建設マネジメント)	6. 最初と最後の頁 51-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejcm.78.1_51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 水谷大二郎, 川崎洋輔, 佐津川功季, 中川岳士, 梅田祥吾, 生嶋理恵, 桑原雅夫	4. 巻 76巻5号
2. 論文標題 利用者の経済損失を考慮した高速道路情報板の維持管理施策の簡易的評価手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_127-I_139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Daijiro Mizutani, Yuto Nakazato, Jinwoo Lee	4. 巻 120
2. 論文標題 Network-level synchronized pavement repair and work zone policies: Optimal solution and rule-based approximation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 102797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2020.102797	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Guru Prakash, Xian-Xun Yuan, Budhaditya Hazra, Daijiro Mizutani	4. 巻 4(2)
2. 論文標題 Toward a big data based approach: A review on degradation models for prognosis of critical infrastructure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems	6. 最初と最後の頁 21005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4048787	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 水谷大二郎	4. 巻 76巻5号
2. 論文標題 アセットマネジメント研究の最先端: 統計的劣化予測と維持管理施策最適化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_1-I_19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中里悠人, 水谷大二郎, 奥村誠	4. 巻 76巻5号
2. 論文標題 小規模道路舗装の時空間的補修同期化施策	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_233-I_240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水谷大二郎, 上野渉	4. 巻 -
2. 論文標題 階層的隠れマルコフ劣化モデルの状態推移確率の解析解について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 生嶋理恵, 水谷大二郎, 佐津川功季, 川崎洋輔, 桑原雅夫
2. 発表標題 現場技術者の知見を活用した高速道路設備の維持管理施策の改善可能性
3. 学会等名 第5回JAAM研究・実践発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 生嶋理恵, 水谷大二郎, 佐津川功季, 川崎洋輔, 桑原雅夫
2. 発表標題 現場技術者へのアンケート調査に基づく高速道路設備の維持管理施策の改善可能性
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Nakazato, Daijiro Mizutani, Jinwoo Lee
2. 発表標題 Determination of repair and work zone policies for road sections by optimizing a simplified rule
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daijiro Mizutani
2. 発表標題 Optimal intervention policy of bridges considering earthquake occurrence probability increasing over time
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Ueno, Daijiro Mizutani, Makoto Okumura
2. 発表標題 Benefit of traffic control in maintenance /disposal decision of substitutable bridges
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐津川功季, 水谷大二郎, 川崎洋輔, 金田威夫, 桑原雅夫
2. 発表標題 高速道路施設を構成する部品備蓄の最適計画に関する研究
3. 学会等名 第62回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 岳士, 川崎洋輔, 梅田 祥吾, 水谷 大二郎, 生嶋 理恵, 桑原 雅夫
2. 発表標題 交通流への影響を考慮した高速道路情報板故障時の利用者の社会損失分析
3. 学会等名 第60回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daijiro Mizutani
2. 発表標題 Reduction of seismic risk of infrastructure via daily management works
3. 学会等名 International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷大二郎
2. 発表標題 アセットマネジメント研究の最先端：統計的劣化予測と維持管理施策最適化
3. 学会等名 第60回土木計画学研究発表会・講演集（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 渉, 水谷大二郎
2. 発表標題 状態推移確率の解析解を用いた階層的隠れマルコフ劣化モデルの効率的推定方法
3. 学会等名 第60回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中里悠人, 水谷大二郎
2. 発表標題 画一的ルールによる道路舗装の次善補修施策
3. 学会等名 第60回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daijiro Mizutani
2. 発表標題 Management of ITS facilities considering social benefit
3. 学会等名 The 26th ITS world congress in Singapore (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水谷 大二郎 (MIZUTANI Daijiro) (30813414)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	佐津川 功季 (SATSUKAWA Koki) (40867347)	東北大学・情報科学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	川崎 洋輔 (KAWASAKI Yosuke) (90751793)	日本大学・工学部・准教授 (32665)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	熊谷 靖彦 (KUMAGAI Yasuhiko) (10368855)	東北大学・未来科学技術共同研究センター・NiCheシニアリサーチ・フェロー (11301)	
研究分担者	岡 宏一 (OKA Koichi) (10160649)	高知工科大学・システム工学群・教授 (26402)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関