

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04392

研究課題名（和文）点検情報の価値を考慮したロバスト最適点検・補修計画モデルの開発と適用

研究課題名（英文）Developing a Robust Optimal Maintenance Planning Model Considering the Inspected Information

研究代表者

大窪 和明（Okubo, Kazuaki）

東北大学・国際文化研究科・准教授

研究者番号：50546744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：社会インフラの定期的な点検が義務付けられ、大量の点検情報が蓄積されていることを背景に、本研究では点検情報を考慮したロバスト最適維持管理計画モデルを開発した。具体的には、計画期間中の劣化速度に生じる予測誤差に対してロバストな最適解を求める手法を開発し、費用が最小となるように補修工事の実施時期等を決める最適維持管理計画モデルを提案した。その結果、提案手法によってロバストな計画が求められること、点検回数を増やすことによる費用低減効果が確認された。また、実際の点検調書から社会インフラの劣化要因の把握および予測に関する実証分析を行い、期待ライフサイクルコストの観点からの点検間隔等について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した手法は、近年、盛んに研究されているデータ駆動型ロバスト最適化手法の一つとして位置づけられ、その中でも新規な手法を提案している点に学術的意義がある。また、本研究では時間経過とともに蓄積されていく大量の点検情報を活用していくための体系的な一つの方法を提案しており、実務において点検調書の情報を維持管理などの計画策定に活用していく方法を検討する上での一つの参考資料を提供していることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Periodic inspections of social infrastructures are mandatory and a large amount of inspection information has been accumulated. We developed a robust optimal maintenance planning model that takes into account the inspected information. We provide a robust optimal solution to the prediction error in the deterioration rate during the planning period and proposed a maintenance planning model to determine the timing of repair so that the cost is minimized. As a result, it was confirmed that the proposed method can provide a robust plan and revealed that increasing the number of inspections can reduce the cost. In addition, an empirical analysis was conducted to grasp deterioration factors of social infrastructures based on actual inspection reports, for example, the inspection intervals from the viewpoint of expected life cycle costs were discussed.

研究分野：土木計画学

キーワード：ロバスト最適化 社会インフラ 維持管理計画

## 1. 研究開始当初の背景

社会インフラの老朽化が深刻な社会問題になっている。例えば、2016年時点における日本の橋梁は全体の約2割が橋齢50年を超えており、その10年後には4割以上が橋齢50年を超える。こうした中、2014年に国土交通省は5年に1度の近接目視点検を橋梁の管理者（国、県、市町村等）に義務付けるなど、老朽化による重大な事故を未然に防ぐための取り組みが続けられている。点検対象となる社会インフラは、橋梁だけでも日本全国に約730,000橋と膨大であり、時間経過とともに蓄積されていく大量の点検情報を、補修の必要性を判断するための現状把握に加えて、効率的な維持管理計画の策定にも積極的に役立てていく必要がある。

土木計画学の分野においても社会インフラの効率的な維持管理計画策定のため、点検情報から劣化要因を把握するための研究や将来の健全度を予測するための劣化予測モデルの開発が精力的に行われてきた。その中で、同じ時期に建設された同じ橋種の橋梁でも、供用開始後、長年にわたって健全な状態を保っているものから、早期の補修を必要とするものまで様々であり、劣化しやすさ（劣化速度）には個体差があることが明らかになってきた。そのため、劣化予測を維持管理計画に活用していくためには、予測値と観測値との間に生じる予測誤差に対してロバスト最適な維持管理計画の策定方法が必要とされている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、点検情報の価値を考慮したロバスト最適維持管理計画モデルを開発することである。また、点検調書に記載された実際のデータから社会インフラの健全度に影響をもたらす劣化要因に関する実証分析を行い、劣化速度の予測に生じる不確実性について検討する。

## 3. 研究の方法

不確実性のある現象に対して最も悲観的な状況を想定して最適解を求めるロバスト最適化モデルの過度なロバスト性が2000年代に指摘され、それ以降は計画の中で想定する悲観的な状況の程度を、計画策定者が決めることが出来る柔軟な枠組みが開発されてきた。例えば、動的なロバスト最適化モデルの中では、悲観的な状況の程度をBudget of Uncertaintyとして制約条件に考慮したサブ問題(Robust Counterpart)から悲観的将来シナリオを求める方法が提案されている。本研究でも、劣化速度の不確実性に対してロバストな維持管理計画を策定するために考慮すべき悲観的将来シナリオを、Robust Counterpartから求める方法を考える。定式化には、計画策定時まで利用可能な点検情報の数（点検回数）や観測された健全度に応じてRobust Counterpartから導出される悲観的将来シナリオが変化する一連のプロセスを考慮した。その上で、数値シミュレーションを行い、本研究で提案するロバスト最適化手法の適用によって得られる維持管理計画の費用やリスクに関する感度分析を行った。

また、本研究で提案するモデルの適用可能性を明らかにするため、橋梁に限らない舗装、公共建築物の点検情報を収集し、健全度に影響を与える要因を把握した。特に、橋梁については愛媛県が管理する橋梁について、平成18年度から平成26年度までに報告された点検調書を収集し、

部材の健全度のデータを用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて劣化予測を行った。さらに、推定した健全度の劣化予測結果を基に、橋梁ごとの期待劣化パスを作成し、数値シミュレーションによって点検回数に関する感度分析を行い、期待ライフサイクルコストを最小化するという観点から望ましい点検間隔を検討した。

#### 4. 研究成果

本研究では、社会インフラの維持管理計画策定段階において利用可能な点検情報から劣化速度を推定する場合を想定し、計画期間内の観測値と予測値との差異（予測誤差）の確率分布を求めた。ここでは、異常検知の分野において観測値の異常度を計測するために用いられるホテリング統計量の考え方を援用し、予測誤差の大きさとその発生頻度との関係を、予測期間および点検回数を自由度を持つF分布として導出した。この確率分布を用いて、計画期間内に $(1-\alpha)$ の確率で発生する予測誤差の中で最も悲観的な予測誤差の生じ方を求める Robust Counterpart を二次錘計画問題として定式化した。これにより、例えば、 $\alpha=0.05$ とした場合には、0.95の確率で生じる予測誤差の中から、最も悲観的な劣化速度の将来シナリオを設定することができる。すなわち、 $\alpha$ を小さくするほど、より大きな予測誤差まで考慮するため、より悲観的な将来シナリオを設定することができる枠組みを提案している。

上述の手法を用いて、橋梁が配置された交通ネットワーク上を多起点多終点の交通が移動するという設定の下、計画期間中の交通費用および橋梁の補修費用を最小化するように補修工事を実施する時期や工事の規模を決めるロバスト最適維持管理計画モデルを定式化した。図1は、点検時および計画期間内の劣化速度をランダムに発生させるシミュレーションを行い、総費用（計画期間中の交通費用、維持管理費用、予期していない補修によるペナルティ費用の期待割引現在価値を計画期間中で合計した値）を比較したものである。ただし、図中の各曲線は $(1-\alpha)=0.1$ のときの値をそれぞれ基準とし、各 $(1-\alpha)$ の設定での値との比率を示している。図1から $(1-\alpha)$ を大きくし、計画期間内で考慮する予測誤差を大きくとるほど、計画策定時の総費用(Cost(Planned))は増加していくことがわかる。その一方で、策定した計画を実施した時の総費用(Cost(Conducted))、そのときの95%水準でのVaR(Value at Risk)は減少しており、予測誤差に対して、よりロバストな維持管理補修計画が求められていることが確認できる。

本研究で求めた予測誤差の確率分布は、点検回数が多い、または短期間の予測であるほど予測値の分散が小さく、より正確な予測値が得られていることを表現できている点に特徴がある。図2には、計画策定時に利用できる点検回数を2回から8回にまで増やしたときの総費用を示している。図2から、計画策定段階で得られる点検回数を増やすことによって、計画策定時の総費用(Cost(Planned))は小さくなることを確認できる。しかし、点検回数が多いほど、より楽観的な将来シナリオでの最適化となるため、計画実施時の総費用(Cost(Conducted))は増加しているこ

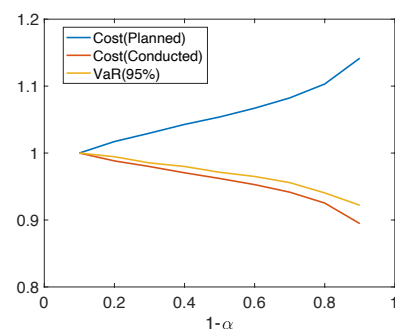


図1  $(1-\alpha)$ と総費用の期待割引現在価値との関係 ( $1-\alpha=0.1$ のときの値を1とする)

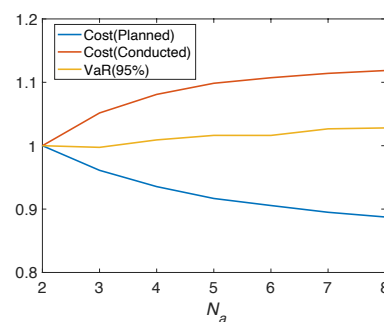


図2  $N_a$ と総費用の期待割引現在価値との関係 ( $N_a=1$ のときの値を1とする)

とが確認できる。しかし、計画実施時の総費用の増加に比べて、VaR の増加は小さく、劣化速度の予測誤差に伴う総費用増大のリスクは低く抑えられていることが確認できた。

点検情報を考慮したロバスト最適な維持管理計画モデルを開発する一貫として、限られた予算の中で優先的に点検・補修を実施すべき橋梁を特定するための一つの方法として、橋梁連関表および橋梁の代替重要度による評価手法を提案した。これは、道路ネットワークのリダンダンシーを高めるために、多くの OD ペアに利用されている橋梁だけではなく、他の橋梁が廃止または通行止めになったときに代替路として利用される可能性を定量的に評価する手法である。この手法を愛媛県宇和島市の橋梁に適用した結果、道路ネットワーク上の同一最短経路上で使用されている補完的な橋梁群および、途絶による通行止めが起きた場合に代替利用される可能性のある橋梁群を整理することができた。橋梁連関表は、橋梁管理者を超えて、道路ネットワーク上の橋梁の重要度を把握する上で有用な評価手法であると考えられる。また、劣化に関する調査結果から橋梁など構造物の健全度を判断する際に、「健全でない」施設を、分類木上「健全である」と判断してしまうような重大な誤判別を回避することができる分類木の作成プロセスを最適化モデルとして定式化し、その有効性を確認した。これにより、本研究で開発したロバスト最適化手法の適用対象を維持管理計画の策定だけでなく、複数の部材の健全度から構造物全体の健全度を判断するプロセスにも適用を広げることが可能であることが明らかになったといえる。

さらに、愛媛県が管理する橋梁の中でも、平成 18 年度から 26 年度までの間に少なくとも二回の点検が行われている橋梁について主桁・横桁のひびわれを対象として、橋種ごとの異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを推定した。その結果、RC 橋とボックスカルバートのハザード率が低く、各健全度での期待継続時間は長いことから、比較的、劣化しにくいことが確認された。また、推定結果から求めた期待劣化パスを用いて、実施回数に応じた点検費用、補修費用、緊急補修費用の 3 種類のコストをふまえた期待ライフサイクルコストを算出し、点検間隔に関する感度分析を実施した。その結果、点検間隔を長くする(点検回数を少なくする)ほど、点検費用は小さくなる一方で、予期しない補修が生じやすく、緊急補修費用は増加することが確認できた。また、点検間隔を 10 年程度にとったときに、期待ライフサイクルコストが最小になっている橋梁があることが確認された。

また、構造物の劣化は海岸からの距離など地理的な影響を受けやすいことを考慮し、地理的な位置関係を明示的に考慮した探索的空間データ分析を行った。四国地方の高速道路の舗装に適用した結果、ひび割れ率やわだち掘れ量などで評価された路面性状値について、劣化速度の速い舗装が地理的に集中しているようなホットスポットが存在しており、累積降水量や凍結防止剤散布量といった変数に加えて、盛土や切土といった構造条件が劣化に影響していることが明らかになった。一方で、こうした構造条件をふまえても、劣化速度には予測モデルから説明できない部分があり、予測誤差に対するロバスト性を考慮したロバスト最適化手法の重要性が確認された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大窪和明	4. 巻 Vol.60
2. 論文標題 社会インフラの劣化異常度を考慮した最適維持管理計画モデル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 無
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 大窪和明，全邦釘	4. 巻 Vol.75, No.3
2. 論文標題 重み付き最適分類木の提案と公共施設マネジメントへの適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3	6. 最初と最後の頁 158-171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejipm.75.158	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 Chun, P., Tsukada, K., Kusumoto, M., Okubo, K.	4. 巻 Vol.172, Issue 1
2. 論文標題 Investigation and repair plan for abraded steel bridge piers: case study from Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Forensic Engineering	6. 最初と最後の頁 11-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jfoen.18.00019	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 大窪和明，全邦釘	4. 巻 74
2. 論文標題 橋梁間の代替構造把握のための橋梁連関表と代替重要度の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集F(建設マネジメント)	6. 最初と最後の頁 I_119-I129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejcm.74.I_119	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 大窪和明, 全邦釘, 橋爪謙治, 藤田尚	4. 巻 74
2. 論文標題 道路舗装の劣化速度に関する探索的空間データ分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集E(舗装工学)	6. 最初と最後の頁 95-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.74.l_95	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 岡崎百合子, 岡崎慎一郎, 全邦釘, 浅本晋吾, 大窪和明	4. 巻 74
2. 論文標題 データ駆動型アプローチによる四国内コンクリート橋梁のひびわれ回帰モデルの構築	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集F(建設マネジメント)	6. 最初と最後の頁 I_107-I_118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejcm.74.l_107	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 伊坂早織, 大窪和明	4. 巻 74
2. 論文標題 災害時における緊急支援物資の最適輸送計画モデルの提案と適用	5. 発行年 2018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_259-I_268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.74.l_259	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 大窪和明, 全邦釘, 矢ヶ崎美香	4. 巻 74
2. 論文標題 廃PETボトルの落札額データを用いた市町村とリサイクル事業者の組合せ最適化問題	5. 発行年 2018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_239-I_301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.74.l_293	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 大窪和明, 全邦釘	4. 巻 57
2. 論文標題 検出力を考慮した最適分類木の提案と適用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 無
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 大窪和明, 全邦釘, 三島和紀	4. 巻 58
2. 論文標題 混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いた最適点検間隔の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 無
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 内生蔵達也, 中居楓子, 大窪和明	4. 巻 63
2. 論文標題 津波リスクと平常時の費用を考慮した最適土地利用モデルによるトレードオフの分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第63回土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 無
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 Okazaki, Y., Okazaki, S., Asamoto, S., Chun, P.	4. 巻 18
2. 論文標題 Undersampling Strategy for Machine-learned Deterioration Regression Model in Concrete Bridges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 753-766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.18.753	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 Chun, P. J., Ujike, I., Mishima, K., Kusumoto, M., Okazaki, S.	4. 巻 253
2. 論文標題 Random Forest-based evaluation technique for internal damage in reinforced concrete featuring multiple nondestructive testing results.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 119238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2020.119238	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 Okubo, K., Yu, J., Osanai, S., Kevin, R., B. S.	4. 巻 10
2. 論文標題 resent issues and efforts to integrate sustainable development goals in a local senior high school in Japan: A case study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Urban Management	6. 最初と最後の頁 57-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jum.2021.02.002	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 Liu, X., 劉 庭秀, 大窪 和明, 佐藤 正弘, 青木 俊明	4. 巻 31
2. 論文標題 古紙回収量変化の要因分析 -宮城県における資源回収ステーションを事例に-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 99-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14912/jsmcwm.31.0_99	査読の有無 無
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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大窪和明
2. 発表標題 社会インフラの劣化異常度を考慮した最適維持管理計画モデル
3. 学会等名 第60回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 大窪和明
2. 発表標題 異常検知を考慮した社会インフラの最適補修計画
3. 学会等名 第10回インフラ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大窪和明, 全邦釘
2. 発表標題 検出力を考慮した最適分類木の提案と適用
3. 学会等名 第57回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大窪和明, 全邦釘, 三島和紀
2. 発表標題 混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いた最適点検間隔の検討
3. 学会等名 第58回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大窪和明, 全邦釘
2. 発表標題 橋梁間の代替構造把握のための橋梁連関表と代替重要度の提案
3. 学会等名 第36回建設マネジメント研究発表・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大窪和明, 全邦釘, 橋爪謙治, 藤田尚
2. 発表標題 道路舗装の劣化速度に関する探索的空間データ分析
3. 学会等名 第23回舗装工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuaki Okubo, Pang-jo, Chun
2. 発表標題 A Cell-based Transportation Planning Model of Humanitarian Logistics and its Application
3. 学会等名 INFORMS annual meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuaki Okubo, Pang-jo Chun
2. 発表標題 Optimal classification tree for soundness evaluation with asymmetric misclassification costs
3. 学会等名 The Infrastructure planning and management association -the 9th forum-, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内生蔵達也, 中居楓子, 大窪和明, 秀島栄三
2. 発表標題 災害リスクと平常時のコストを考慮した最適土地利用モデルの提案と適用
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liu, X., 劉 庭秀, 大窪 和明, 佐藤 正弘, 青木 俊明
2. 発表標題 古紙回収量変化の要因分析 -宮城県における資源回収ステーションを事例に-
3. 学会等名 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2020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	全 邦釘  (Chun Pang-jo)  (60605955)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任准教授    (12601)	

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
---------	---------