

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		貝戸 清之（かいと きよゆき）		大阪大学大学院工学研究科		准教授	
②研究 テーマ	名称	統計的アセットマネジメント手法に基づくバックキャスト型道路政策の深化についての技術研究開発					
	政策テーマ	[主テーマ] インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション (DX)		公募 タイプ	タイプIV（ハード分野）		
③研究経費（単位：万円） ※R4は受託額、R5以降は計画額を記入。端数切捨。		令和4年度	令和5年度	令和6年度	総合計		
		3,100	1,950		5,050		
④研究者氏名		（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
		氏名		所属・役職			
		小林潔司		京都大学 名誉教授 京都大学経営管理大学院 特任教授			
		松島格也		京都大学大学院工学研究科 准教授			
		小濱健吾		大阪大学大学院工学研究科 特任准教授			
		水谷大二郎		東北大学大学院工学研究科 助教			
		笹井晃太郎		大阪大学大学院工学研究科 特任研究員			

⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）

研究代表者が実施してきた従来のアセットマネジメントにおいては、補修を経験した道路インフラが少数であったために、補修の実施に伴う健全度の回復によって、（補修が実施されていなければ観測されていたであろう）それ以降の劣化状態が観測できなくなるというサンプル欠損バイアスの影響を無視することができた。しかし、近年補修を経験した道路インフラの数が増加している

（増加し続ける）こと、補修が実施される道路インフラは相対的に劣化の進展速度が速い傾向にあることを勘案すると、令和6年の点検3巡目以降の劣化予測精度にサンプル欠損バイアスが及ぼす影響が無視できなくなる可能性は想像に難くない。そのために、本プロジェクトではリサーチクエス

ション (RQ) 1-1「サンプル欠損バイアスの影響下において、その影響を考慮した統計的劣化予測は可能か」という問いを課し、課題解決のための方法論を開発する。また従来のアセットマネジメントでは、補修によって道路インフラの健全度は想定した健全度まで回復し、補修後の道路インフラは補修前と同様の劣化過程を進むものと考え、それが永続的に繰り返されるという前提のもと、ライフサイクル費用最小化を達成するような最適補修計画の立案に主眼が置かれてきた。補修を経験した道路インフラが増え、それらの点検データがある程度蓄積されてきたことから、**RQ1-2**

「補修による健全度回復量と、補修後の劣化速度を定量的に評価できるか」を設定し、これらを同時推定可能な劣化モデルと推定手法を開発する。RQ1-1とRQ1-2によって二期目以降（補修後）のライフサイクルを迎える道路インフラのアセットマネジメントの体系化を図る。

このアセットマネジメント手法を基幹技術として、これまでのアセットマネジメントでは用いられてこなかった詳細な劣化属性情報や、アセットマネジメント以外の道路政策との融合を視野に入れて、**RQ2「アセットマネジメントと劣化属性情報との融合による意思決定の高度化は可能か**

（アセットマネジメント×属性情報）」、**RQ3「科学的根拠に基づくEBPMの道路政策への適用は可能か（アセットマネジメント×EBPM）」**、**RQ4「道路ネットワークとしてのリスク評価は可能か（アセットマネジメント×リスクマネジメント）」**を設定して、従来分権的に検討されることが多かった道路政策に対して、DX時代を見据えた意思決定の高度化と政策の深化を図る。

RQ1-1 「サンプル欠損バイアスを考慮した統計的劣化予測手法の精緻化」

補修が実施された損傷に対して、サンプル欠損バイアスを考慮した劣化予測モデルを用いて補修の劣化抑制効果を定量的に評価する方法を開発した。同モデルは、多段階指数ハザードモデルの尤度に補正係数を乗じることにより定義される（補正係数は、実績データより算出される健全度分布と、事前健全度のデータより算出される補修が実施されなかった場合に観測される頻度分布との比として定義できる）。これによって、補修実施部材と補修未実施部材との劣化速度の相違により推計結果にバイアスが生じている（例えば、劣化速度が大きい部材に対して補修が実施され、劣化速度が小さい部材に対しては補修が実施されない場合、それぞれデータの性質が異なるため、補修実施データと、補修未実施データを用いた劣化予測結果を単純比較することができない）場合においても、劣化抑制効果を評価することが可能となる。

図-1-1-1に、開発した手法（サンプル欠損バイアスを考慮したマルコフ劣化ハザードモデル）による補修措置（簡易補修）による劣化抑制効果の評価結果を示す。補修が実施されていない、すなわち相対的に劣化の進行が遅い（劣化速度が小さい）データをもとに劣化予測を行うことにより劣化パス②を推定できる。このとき用いたデータにおいては劣化の進行が相対的に大きいデータが欠損している。そのため、本来の劣化過程と比較して、劣化速度が過小評価されている可能性がある。このような推計バイアスに対してサンプル欠損を考慮した劣化予測モデルを用いて補正することにより劣化パス⑥が推定できる。これにより、劣化速度の差異に起因する推計結果のバイアスを除去することができる。さらに、サンプル欠損を除去した、すなわち劣化速度の差異を補正した場合における推計結果を用いて劣化シミュレーションを行うことにより、補修が実施されておらず、かつ劣化速度が相対的に大きい劣化パス④を推定することができる。この結果を劣化パス①（補修が実施されており、劣化速度が相対的に大きい劣化過程）と比較することによって、補修効果を評価することが可能となる。また、これらの推定結果を用いて、法定点検間隔である5年間に対する劣化シミュレーションを行うことにより、補修の実施、および補修の実施施策を現状から変更した場合に、将来時点の各健全度に該当する健全度の損傷数に与える評価を行う。

今後は、蓄積が進みつつある目視点検結果を用いて様々な補修効果の評価や、供用環境が補修の実施効果に与える影響について評価を行う。また、本劣化予測手法を含め、目視点検データに基づく統計的劣化予測手法を用いる際の技術マニュアル【点検データの量と質に応じた統計的劣化予測の適用マニュアル】を成果物として作成する予定である。

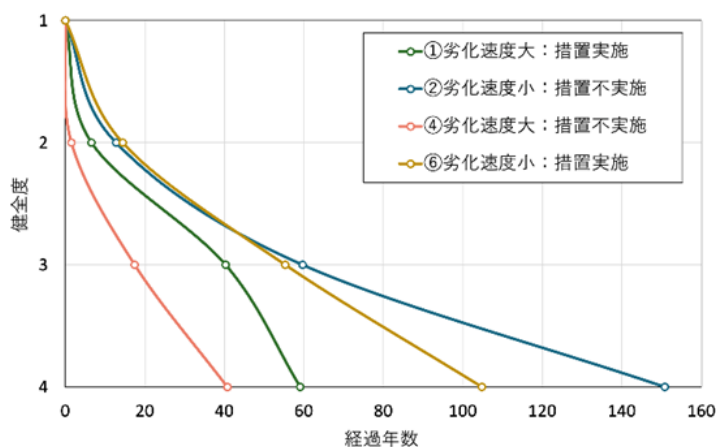


図-1-1-1 劣化過程の分類

RQ1-2 「劣化速度に着目した補修効果の定量的評価」

補修を経験した道路インフラを対象としてその補修効果を定量的に評価するために、補修前後の健全度を潜在変数として捉えることにより、1) 補修時の健全度回復量と、2) 補修前後の劣化速度の異質性（相対的な差異）を推定することが可能な劣化・回復予測手法を開発した。これにより、道路インフラの補修直前・直後の健全度が確定的には判明していない（例えば、多層構造を有する高速道路舗装は、層別の補修が実施されるために健全度が完全に回復するとは限らず、補修前後に時間をおいて健全度調査が実施される場合はあるものの、補修直前・直後の調査データは十分には蓄積されていない）場合にも補修効果の定量的評価が可能となる。本年度の研究においては以下に説明するように舗装を具体的な研究対象としているが、補修直前・直後に点検が実施されないことはいずれの道路インフラであっても同様であることから、方法論は普遍的に使用可能である。

開発したモデルを実際の高速道路舗装において獲得されたFWD調査データに適用し、その有用性を検証した。FWD調査により連続値で獲得されるたわみ量をもとに舗装構造の健全度として5段階の耐荷力ランクを定めた。各ランクから次のランクに推移するまでの推定年数を繋いだ曲線を図-1-2-1に示す。表層と下層路盤種別による劣化速度の差異が見て取れる。図-1-2-2には、回復予測結果として、横軸の補修前ランクから色分けされた補修後ランクへの推移確率を帯の面積で示す。おおむね深い層を補修の対象とすることにより回復量が大きくなる傾向を表現できていることがわかる。図-1-2-3には、異質性の推定結果を示す。着目する地点・時点において補修履歴が存在するか、また、存在する場合、その補修対象がどの層であったかによりグループ分けを行い、グループ間の劣化速度の相対評価を行った。異質性が大きいほど相対的に劣化が速いことを意味するが、上層路盤補修後など深い層を補修しても劣化速度は大きいという推定結果である。これは、地域的・構造的に元々劣化が速い地点に対して上層路盤補修が実施されていた可能性がある。次年度は、補修履歴による適切なグループ分けに関する検討を進める。

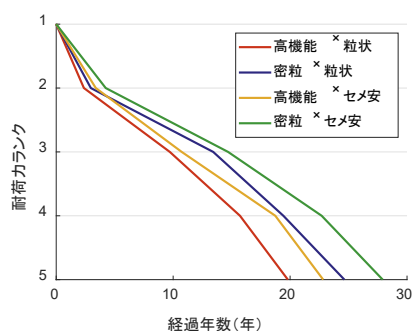


図-1-2-1 劣化予測結果

0.5 0.7 0.9 1.1 1.3 1.5

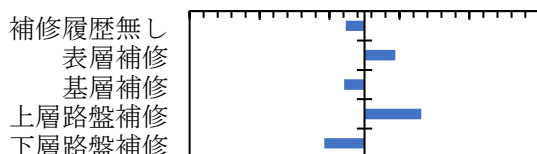


図-1-2-3 異質性推定結果

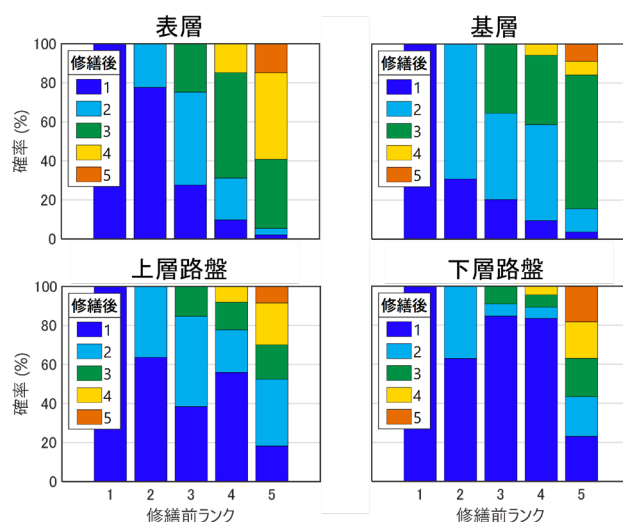


図-1-2-2 回復予測結果

RQ2 「補修優先順位および補修工法選定のための方法論の開発」

高速道路舗装を対象として、補修優先順位および補修工法選定に利用可能な、連続量を用いた多元的劣化過程モデルを開発した。これにより、複数の劣化管理指標に対して、連続量劣化ハザードモデルを用いて相対的な劣化速度を表す異質性パラメータを推定すると同時に、多変量周辺分布間の依存構造を表現可能なコピュラにより、個別の劣化事象に関する劣化速度を踏まえた補修に関する評価が可能となった。

図-2-1は、高速道路の劣化状態を路面指標A，耐荷力指標Bを用いて評価する場合を想定し、コピュラ，異質性パラメータの周辺分布，同時分布の関係を模式的に示している。同図(a)と(d)は各異質性パラメータの周辺分布関数であり，それぞれの劣化事象の劣化速度に関する相対評価を行うことができる。(c)は，横軸に路面指標の異質性パラメータ ε_A ，縦軸に耐荷力指標の異質性パラメータ ε_B を用いて，異質性パラメータの組 $(\varepsilon_A, \varepsilon_B)$ を2次元空間上にプロットした同時分布である。このような異質性パラメータの空間的分布状態に関する情報を用いることにより，異質性パラメータ間の相関関係による傾向把握に加えて，個別の劣化事象に関する劣化速度を踏まえた総合評価を行うことが可能になる。例えば，2種類の劣化事象を対象とする2次元空間上においては，構造物の劣化特性を各象限の4つのカテゴリに分類でき，第1象限は2つの劣化事象がともにベンチマークケースより劣化速度が相対的に早いカテゴリ，第2象限と第4象限はそれぞれ路面指標A，耐荷力指標Bの進行が卓越しているカテゴリ，第3象限はベンチマークケースより劣化の進展が遅いカテゴリとして評価できる。さらに，(b)に表される異質性パラメータの同時確率密度関数から，一方の異質性パラメータが既知である場合の，他方の異質性パラメータが生起する条件付き確率密度を算出できる。

次年度は，開発したモデルを実際の高速道路舗装における点検データ（例えば，IRIとFWD調査結果）に適用し，その有用性を検証する。なお，舗装に関する調査データや台帳データについてはすでに高速道路会社から提供されている。

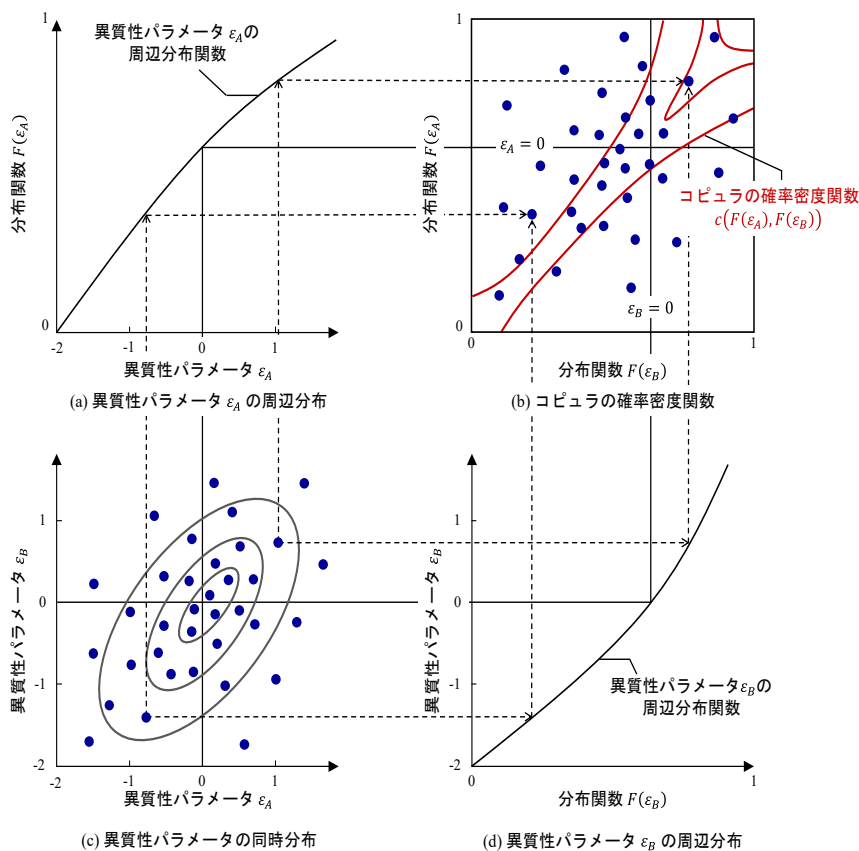


図-2-1 異質性パラメータの同時分布とコピュラ

RQ3 「個別施設計画を事例とするEBPMの開発」

EBPMの検討内容として、橋梁の長寿命化計画（個別施設計画）の立案を考える。橋梁を対象に、統計的劣化予測結果とフォルト・ツリー分析（部材から橋梁全体系へ至るリスク経路の可視化とリスクの定量的評価）に基づく、補修優先順位の決定フローを開発した。2022年時点において、近接目視点検は2巡目に入っている。1巡目（2014～2018年）においては、早期あるいは緊急に措置を講ずべき橋梁（すなわちIII判定とIV判定の橋梁）を抽出し、それらに対する具体的な補修・更新計画を作成すればそれが個別施設計画となった。1巡目は対処療法的な事後保全段階であり、全ての橋梁を対象として目視点検データを収集するという事に主眼が置かれていた。一方で、2巡目の近接目視点検においては、（新たにIII判定、IV判定となる橋梁の抽出はもちろんのこと、）いわゆる計画的な予防保全にシフトすることが求められる。具体的には大量のII判定橋梁（点検時点では損傷が顕在化していない補修予備軍）の中から次期点検時までIII判定、IV判定に進行する可能性のある橋梁を抽出して補修優先順位を決定することが必要であり、これまでに蓄積された膨大な点検データの本格的な分析が不可欠である。

図-3-1に、対象橋梁群の補修優先順位の決定フローを示す。部材健全度データ、橋梁健全度データ、損傷の種類、点検間隔のデータを用いる。同図中1)では、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて、ある損傷が発生した部材の劣化速度を推計する。これにより、部材毎の劣化速度の違いを加味した予測を行うことができる。2)では、ツリーアルゴリズムを用いて、部材の健全度評価から橋梁全体の健全度評価の推論する決定木を構築し、構築した木に対する

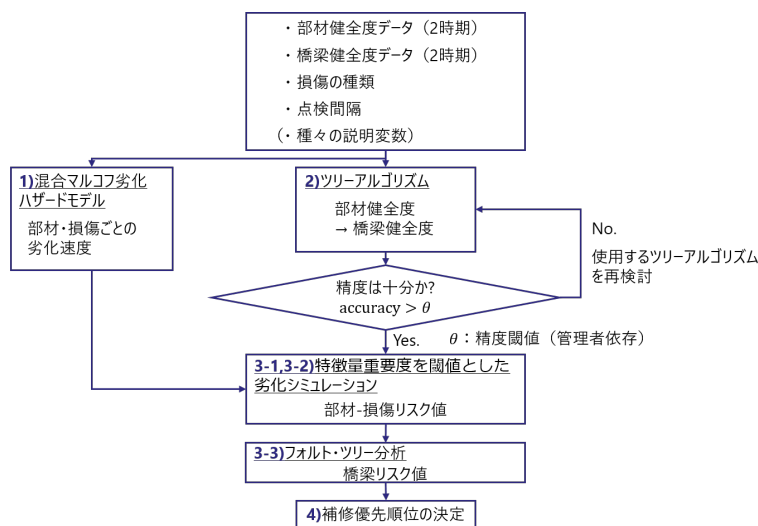


図-3-1 補修優先順位の決定フロー

する特徴量重要度を算出する。特徴量重要度は、管理者が橋梁全体の健全度を決定する際の部材の重要度を示す。同図中3-1)、3-2)では、1)で推計した劣化速度と2)で推計した特徴量重要度を用いて、橋梁のある損傷が発生した部材の劣化シミュレーションを行い、リスク値を算出する。3-3)では、3-1)、3-2)で算出したリスク値（健全度IIからIII、IVに到達する確率）を末端事象とし、橋梁全体のリスク値を頂上事象としたフォルト・ツリー分析を行い、橋梁全体のリスク値を算出する。4)では、対象橋梁群でリスク値を比較し、各橋梁の補修優先順位を決定する。

開発した決定フローを、近畿地方整備局が管理する橋梁群のうち、健全度がII判定と評価された実際の橋梁群に適用し、具体的な補修優先順位を提案した。次年度は、目視点検データを用いた予測結果を科学的根拠として長寿命化計画を立案可能なEBPMの体系化を図る。この成果を具体的に、業務執行マニュアルや支援情報作成マニュアルとして取りまとめる。

RQ4 「経年劣化を考慮した道路ネットワークのリスク評価手法の開発」

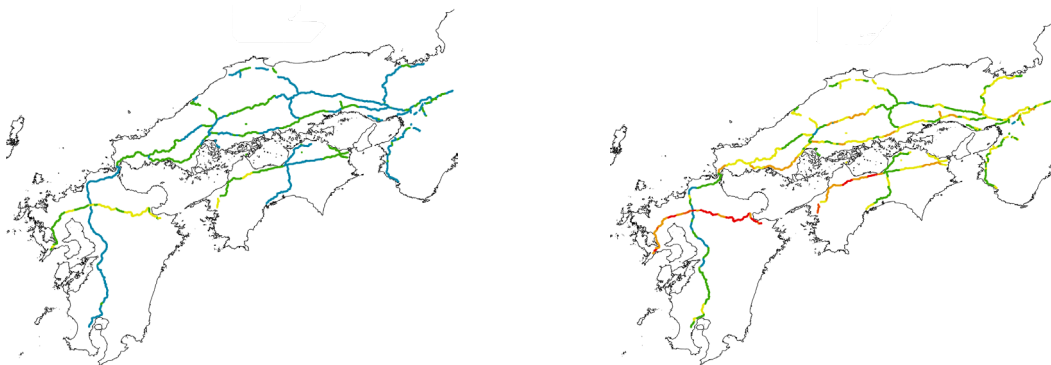
高速道路舗装を対象とした路面性状調査データを用いて、劣化速度の相対評価を可能にする混合マルコフ劣化ハザードモデルを援用し、IC区間ごとに劣化速度の評価を行った。これにより、将来時点の健全度をミクロなレベルで精緻に評価することが可能となった。図-4-1は、舗装健全度の将来時点での予想される推移を示している。同図 (a) と (b) の比較により、一部区間の劣化が比較的早く進行することが予想されることが分かる。高速道路管理者との協議では、これらの区間で実際に比較的高い頻度で補修が行われている感覚があるという意見があり、研究結果と実務者が持つ暗黙知が整合していることを確認した。

また、航空レーザー測量によるLP点群データに対して、グラフニューラルネットを用いることにより、点群データの隣接関係を考慮した危険斜面スクリーニング手法を開発した。これにより、都市間高速道路で延長の大部分を占める土工区間において、局所的かつ突発的な集中豪雨を受けて斜面が崩壊する危険度を予測することが可能となる。図-4-2は、斜面に対して得られた点群データをグラフ内のノードとして、それらの特徴量からニューラルネットを用いて斜面が崩壊する危険性を予測するモデルを表す。

今後は、上記のような種別間のリスク評価を融合させることによって、道路ネットワークとしてのリスク評価を行う。

(a) 供用開始～5年後

(b) 供用開始～10年後



健全度1：■ 健全度2：■ 健全度3：■ 健全度4：■ 健全度5：■ 健全度6：■ 健全度7：■

図-4-1 供用開始後の健全度の推移シミュレーション

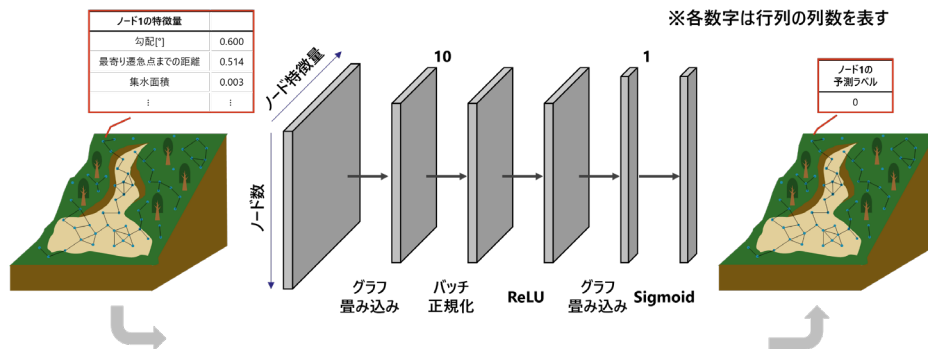


図-4-2 危険斜面スクリーニングモデル

⑦特記事項

令和4年11月11日～11月13日に琉球大学で開催された第66回土木計画学研究発表会・秋大会（企画提案型）において、以下に列挙する研究発表を行い、いずれも高い評価を得た。

RQ1-2においては、補修時の健全度回復量を定量的に評価する手法を提案した論文を土木学会論文集に投稿し、掲載が決定した。なお、RQ1-2では、補修前後の劣化速度の異質性（相対的な差異）を推定する手法と合わせることで、補修効果を定量的に評価する手法を提案する論文を国際ジャーナルに投稿し、海外にも研究成果の公表を行っていく予定である。

【学会発表】

- 1) 安藤翠，四方滉也，貝戸清之：点検時措置の要補修損傷発生抑制効果，第66回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.30-07，琉球大学，2022.11
- 2) 石川大智，貝戸清之：グラフニューラルネットに基づくLP点群データを用いた危険斜面スクリーニング手法の高度化，第66回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.30-15，琉球大学，2022.11
- 3) 川本熙鷹，中村和弘，小濱健吾，貝戸清之：混合マルコフ劣化ハザードモデルによる舗装劣化特性の地域間比較，第66回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.30-05，琉球大学，2022.11
- 4) 新雄成，貝戸清之，小林潔司，神谷恵三：修繕前後のデータ欠損を考慮した舗装構造の耐荷力推移予測，第66回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.30-02，琉球大学，2022.11
- 5) 吉田伊織，貝戸清之：連続量を用いた多元的劣化過程モデルによる高速道路の予防保全に向けた提案，第66回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.30-01，琉球大学，2022.11
- 6) 新雄成，貝戸清之，小林潔司，神谷恵三：層別修繕効果の定量的な評価に向けた隠れマルコフ劣化モデル，第6回JAAM研究・実践発表会論文集，（一社）日本アセットマネジメント協会，pp.61-67，オンライン開催，2022.11【第6回JAAM賞受賞】

【査読付き論文】

- 1) 貝戸清之，小林潔司，神谷恵三，新雄成：隠れマルコフ劣化モデルを用いた層別修繕によるたわみ回復量の評価，土木学会論文集（掲載決定）
- 2) 貝戸清之，安藤翠，水谷大二郎，小林潔司，山岸拓歩：橋梁部材に対する点検時措置による劣化抑制効果の事後評価，土木学会論文集（投稿中）