公的資金の限界費用を考慮した 道路橋メンテナンスの財源調達手段の最適化 ～公債発行の影響分析～

河野　達仁[1]・祢津　知広[2]・水谷　大二郎[3]

[1]正会員　東北大学教授　大学院情報科学研究科 人間社会情報科学専攻
（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）
E-mail: kono@plan.civil.tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　東北大学大学院　大学院情報科学研究科 人間社会情報科学専攻
（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）
E-mail: nezu.tomohiro.q5@plan.civil.tohoku.ac.jp

[3]正会員　東北大学助教　大学院工学研究科 土木工学専攻（同上）
E-mail: daijiro.mizutani.a5@tohoku.ac.jp

各自治体には財政制約があり，社会基盤維持補修費が高くなると，他の支出を圧迫する影響や追加的財政収入により生じる死荷重といった公的資金の限界費用（MCF）を考慮する必要がある．また，社会基盤施設の長期の最適補修施策を検討するためには，効率性だけでなく世代間の公平性についても考慮する必要がある．本研究では，MCFを内生化した橋梁の最適長期補修施策を検討する動学的経済モデルに公債を考慮し，公債発行額を含めた長期補修施策の最適化を行う．その結果，公債の発行により社会厚生が改善され，将来世代が一部負担を行うことにより将来世代と現世代の厚生の平準化につながることを示す．

Key Words : *optimal maintenance & rehabilitation, preventive maintenance, corrective maintenance, marginal cost of funds, social welfare, public bond*

１．はじめに

我が国の橋梁などの道路インフラについては，高度経済成長期に建設されたものが多く，特に，橋梁については，全国約72万橋のうち，7割以上となる約51万橋が市町村道にあり，建設後50年を経過した橋梁の割合は，2032年には59%となる見込みである[1]．深刻化するインフラの老朽化への対応は喫緊の課題である．社会基盤施設の安全安心を維持したうえで，次世代へ効率的に継承する必要がある．

2013年の道路法改正を受け，2014年度から道路管理者は全ての橋梁等の道路構造物について，健全度の診断をするため，5年に1回の頻度で点検を実施することが省令，告示により義務付けられた．2014年度から2018年度の5年間で概ね全ての橋梁等の点検が完了し，2019年度から2巡目の点検が開始されている中，道路管理者はメンテナンスサイクル（点検・診断・措置・記録）の構築に取り組んでいる．

社会基盤施設の最適補修施策は，ライフサイクルコストの最小化の観点から一般に決定されている．例えば，小濱ら[2]は，劣化過程を考慮し単一の社会基盤施設に対して，ライフサイクルコストを最小にする補修・廃棄施策を提案している．また，小林ら[3]は複数の社会基盤施設に焦点を当ててライフサイクルコストの最小化を目的としている．

しかしながら，厳しい財政制約の下，国や地方自治体（以降，道路管理団体）の道路関係予算は減少する一方，維持補修費の予算に占める割合は年々高まっている．道路管理団体の予算に占める維持補修費の割合が高くなると，教育など他の公共支出を圧迫するため，財政制約を考慮の上，支出項目間に最適予算配分を行うことが重要になる．

Smilowits & Madanat [4]は財政制約を考慮したうえで複数橋梁について，橋梁の補修にかかる費用と補修によって

発生する利用者の費用の総和を最小化している．しかし，彼らの財政制約は橋梁の補修にかかる費用の上限値と下限値を外生的に与えるというものである．この方法では管理団体のすべての施設の管理方法の検討に拡張しても管理団体の支出対象すべての最適化にはならない．財政制約の影響をみるためには，すべての支出項目を対象とせざるを得ない．Uddin et al.[5]，Goodman & Hastak [6]，Adeli & Sarma [7]では，社会基盤施設のライフサイクルコストの最小化に加え，費用便益比について考えられているものの，費用の調達手段や財政制約については考えられていない．

道路管理団体の財政制約を考慮すると公的資金の限界費用（以降，MCF：Marginal Cost of Funds）が社会厚生に影響を与える．例えば，財政収入額が変わらない場合は，補修費用の増減に伴うその他の公共財への支出の増減で家計の効用が変化する．その時の公共財への支出額の変化に対する効用の変化の割合がMCFである．また，財源調達のために税率を上げる場合は，税金の死荷重による厚生損失と税収の割合によりMCFが定義される．例えば，所得税の限界費用については別所ら[8]によって1.0～1.2と推計されている．すなわち，例えば1億円の公的資金を所得税から得ようとすると1.0～1.2億円の社会的費用をかけていることになる．

MCFのような税の歪みは一括固定税あるいは価格非弾力的な財に対する税以外のすべての税で発生するため，税の歪みを与件として分析することは重要である．さらに税制や税率を変更せず，予算内で配分を変化させる場合，財政が厳しい地方自治体では，予算を減少させた支出の限界便益が1.2を超えることも考えられる．なお，本研究では，税制や税率の変更には一般に時間を要すると考えられるため，税制や税率を変更せずに最適補修施策を決定する状況を想定し，税率最適化については今後の課題とする．

本研究では，道路管理団体が国か地方自治体かは特定しない．地方自治体を考えるならば，国からの補助金を歳入に追加し，国を考えるのであれば，補助金を0にしたりすることで，国及び地方自治体のそれぞれの財政制約を表現可能である．

Harberger [9]以降，財政の最適化をするにあたってはMCFを考慮する必要があることが知られてきており，MCFを考慮した公共政策についての研究は既に多数行われている（e.g.，Bovenberg & Mooij [10]，Bovenberg & Goulder [11]）．Parry & Bento [12]では混雑税収入の使途によって社会厚生が大きく変わることが示されている．このように公共政策の最適化においてMCFの考慮は重要である．

社会基盤施設の整備やメンテナンス費用をMCFを考慮して社会厚生を最大にするように調達する研究も行われている．道路整備・メンテナンス財源の収支制約のもと税率や道路料金の最適化を行っている研究として森杉・河野[13]やKono et al. [14]が挙げられる．森杉・河野[13]ではMCFを考慮して高速道路料金の最適化を行っている．Kono et al. [14]ではMCFを考慮して自動車関連税と道路料金の同時最適化を行っている．財政支出がもとになる社会基盤施設の整備を考える場合において，最適補修施策の決定においてもMCFの考慮は不可欠である．

しかしながら，補修施策に関してMCFを考慮した研究は，橋梁の最適補修施策を決定した河野ら[15]に限られる．様々な健全度分布にある橋梁群全体の補修施策は，定常状態に至るまでの過程を分析することが重要であるため，動学的モデルで最適化を考える必要がある．この点がこれまでの多くのMCFを考慮した最適公共政策の研究と異なる．河野ら[15]では多数の橋梁を持つ都市を想定し，性質が異なる2種類の橋梁群の健全度分布が定常であるもとでの最適補修施策を決定した．それに対して，長期的には，今後の補修施策により橋梁の健全度分布が定常になることは考えられるものの，現在は劣化が進んでいる橋梁が多く，定常に至るまで一定の時間が必要と考えられる．

毎期，健全度分布が変わるような状態においてはMCFも毎期変動し，補修施策も変わりうる．劣化した橋梁が多いと補修費用が高くなり，MCFが上昇することが考えられる．一方，劣化した橋梁が少ないとMCFが大きく上昇しないと考えられる．このように，変動する健全度分布に対してMCFを考慮して長期的に最適補修施策を決定する必要がある．

健全度分布，MCF，補修施策に毎期の変動が生じる場合には，世代間の公平性の観点も重要になる．Barro [16]は世代重複モデルを用いて，公債が家計に与える影響を世代間で分析している．本研究でも非定常の補修費用が世代間に与える影響の違いを検討するため，世代重複モデルを用いて世代間の公平性を検討する．

本研究では，MCFを考慮して社会厚生を最大化する最適長期補修施策を橋梁を対象として検討する．家計のモデルに世代重複モデルを利用し，補修施策によって社会厚生が変化する動学的経済モデルを示す．

橋梁の健全度は道路橋定期点検要領[17]に基づき，4段階の離散的健全度で表す．健全な状態を健全度Iとし，予防保全段階を健全度II，早期措置段階を健全度III，緊急措置段階を健全度IVとする．健全度IIで措置を講ずることを予防保全，健全度III及びIVで措置を講ずることを事後保全と定義する．

河野ら[18]では，公債を考慮しない場合，数値分析の結果，最適長期補修施策は，時間割引率が高い時は，MCFの値によらず事後保全のみで行うことが最適となった．一方，時間割引率が低い時はMCFの値が低いと

予防保全と事後保全を組み合せて行うことが最適であり，MCFの値が高くなるにつれて予防保全に投資できる補修割合が減少し，やがて事後保全のみで行うことが最適となった．さらに，河野ら[18]で与えた橋梁の健全度分布の場合，初期状態において劣化した橋梁が比較的多く，初期において早期に補修を行う必要が高いため将来世代が現世代よりも効用が高いことが示された．

本研究では，公債を考慮して公債発行額を含めた長期補修施策の最適化を行うことにより，公債の最適発行流列は，各期のMCFを平準化するように決定され公債の発行により将来世代が一部負担を行うことにより将来世代と現世代の厚生の平準化につながることが示された．

以下，２．では本研究で用いたモデルを記述する．３．では２．のモデルを用いて数値分析を行い，補修対象とする橋梁群に依存する健全度分布の初期値や，健全度の遷移確率といった行政固有の条件が最適長期補修施策に与える影響を解析的および数値的に示す．

２．モデル

ある行政区画を対象に分析を行う．対象行政区画内には，橋梁が多数存在する．橋梁の分類については，橋梁の補修施策や補修費用が橋梁の規模や交通量，気候などの地域特性などによって変化することから様々なケースが考えられる．本研究における橋梁の分類については，橋梁の規模に着目して，補修費用や劣化過程が異なるため，幅員の大小により性質の異なる2種類（以降では $K \in \{A, B\}$ と示す）の橋梁を設定する．時点 t を離散として動学的経済モデルを設定し，社会厚生を考える．行政区画内には，政府と家計の2主体が存在する．政府は社会厚生最大化，家計は効用最大化を目的に行動を決定する．

⑴ 橋梁の劣化と補修

橋梁の劣化過程を表現する手法は数々研究されている．本研究では津田ら[19]を参考に個々の橋梁の劣化過程をマルコフ過程で表現する．なお，本研究では，道路管理団体が管理している多くの橋梁の劣化過程を表すマルコフ推移確率を橋梁の種類（A , B の2種類）別に統計的に推定し，健全度・種類別に動学的補修計画の最適化を行う．

橋梁の健全度を {I, II, III, IV} とし，t 期における $K \in \{A, B\}$ 橋の補修前の健全度の状態確率ベクトルを $\mathbf{W}_t^{K-}\left(\equiv\left[W_{m,t}^{K-}\right]\right)$ $m \in$ {I, II, III, IV}，t 期における K 橋の補修後の健全度の状態確率ベクトル（健全度シェア）を $\mathbf{W}_t^{K+}\left(\equiv\left[W_{m,t}^{K+}\right]\right)$ $m \in$ {I, II, III, IV}で表す．各要素は，0以上であり，各要素の和は1となる．この状態確率ベクトルの要素は各健全度の生起確率であり，健全度分布と言い換えられる．

t 期において $\mathbf{W}_t^{K-}\left(\equiv\left[W_{m,t}^{K-}\right]\right)$ を観測し K 橋に対する補修割合 $\delta_{m,t}^{K}$ $(0 \le \delta_{\mathrm{II},t}^{K} \le 1, 0 < \delta_{\mathrm{III},t}^{K} \le 1)$ を決定する．$\delta_{m,t}^{K}$ は健全度 m の K 橋を補修する割合を表す変数である．

全ての橋梁を毎期点検し，各橋梁群の健全度別に補修割合を決定する．健全度IVの橋梁は，構造物の機能に支障が生じている又は生じる可能性が著しく高く，緊急に措置を講ずべき状態であるため，全て補修するものとする．健全度II，健全度IIIの橋梁に対しては補修割合 $\delta_{m,t}^{K}$ に従い橋梁の補修が行われるため，橋梁の補修行列 $\boldsymbol{\pi}_t^{K+}$ は $\delta_{m,t}^{K}$ に依存し，式(1)で表される．

$$\boldsymbol{\pi}_t^{K+} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \delta_{\mathrm{II},t}^{K} & (1-\delta_{\mathrm{II},t}^{K}) & 0 & 0 \\ \delta_{\mathrm{III},t}^{K} & 0 & (1-\delta_{\mathrm{III},t}^{K}) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

なお，補修に要する時間は計画期間に対して相対的に微小であるとして，本研究では考慮しない．

補修を毎期行う一方で橋梁の劣化も進展していく．t 期から $t+1$ 期での劣化を表現する劣化行列（マルコフ推移確率行列）を $\boldsymbol{\pi}^{K-}$ とし，橋梁の種類ごとに異なるものの，時間的変化はなく橋梁群固有の値であるとする．毎期，補修行列と劣化行列に従い，健全度分布が推移し，劣化行列は式(2)のように表される．

$$\boldsymbol{\pi}^{K-} = \begin{pmatrix} \pi_{11}^{K} & \pi_{12}^{K} & \pi_{13}^{K} & 0 \\ 0 & \pi_{22}^{K} & \pi_{23}^{K} & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{33}^{K} & \pi_{34}^{K} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

ここで式(2)はマルコフ推移確率を要素とする行列であるので，各要素は0以上であり，各行の和は1となる．

道路メンテナンス年報[20]によると，1 巡目の 2014 年度～2016 年度の点検で健全度I又は健全度IIと判定された橋梁のうち，補修等の措置を講じないまま5 年後の 2019 年度～2021 年度の点検時に健全度IVへ劣化していた橋梁の割合は0.02%と微小であった．そこで，健全度I又は健全度IIから健全度IVに劣化する確率はゼロとした．

補修施策の決定については，まず t 期の初めに補修前健全度を観測し，K 橋に対する補修割合 $\delta_{m,t}^{K}$ を決定する．次に t 期中の迂回費用や補修費用を t 期の補修前健全度と補修割合 $\delta_{m,t}^{K}$ から計算する．補修行列と劣化行列から式(3)，式(4)の計算を行い，$t+1$ 期の補修前健全度を得る．

$$\mathbf{W}_t^{K+} = \mathbf{W}_t^{K-}\boldsymbol{\pi}_t^{K+} \tag{3}$$

$$\mathbf{W}_{t+1}^{K-} = \mathbf{W}_t^{K+}\boldsymbol{\pi}^{K-} \tag{4}$$

補修費用は補修前健全度分布を用いて表現される．健全度分布に補修割合 $\delta_{m,t}^K$ と補修単価をかけ，都市内に存在する K 橋の総数 N^K で乗じたものの総和が補修費用となり，式(5)で表される．

$$C_t^K = N^K\left(\delta_{II,t}^K c^K(II)W_{II,t}^K + \delta_{III,t}^K c^K(III)W_{III,t}^K + c^K(IV)W_{IV,t}^K\right) \tag{5}$$

$\forall t \in \{1,2,...,T\}$， $K \in \{A,B\}$

$c^K(m)$ ： K 橋が m のとき健全度Ⅰになるよう補修するのに必要な費用

⑵ 家計の設定と行動

行政区画内に居住する家計は自動車で2種類の橋梁を利用する．橋梁の交通量は非弾力的である．また，補修工事を行う際は，補修前の健全度に応じて迂回が発生する．そこで迂回費用を考慮した理論モデルを構築する．

家計のモデルでは世代重複モデルを利用する．本研究では5年を1期とし，7期ずつ若年期と高齢期を経験する． t 期に生まれた第 t 世代は $t+7$ 期に生まれる第 $t+7$ 世代を子として設け，高齢期の終わりに第 $t+7$ 世代の子に遺産をのこす．

直系血族の世帯をまとめて1つの家系とここでは呼ぶ．家系 $i \in \{1,2,3,...,I\}$ は異質であり，効用関数及び所得が異なる．各期においてひとつの家系に属する世帯は若年期の世帯が1世帯，高齢期の世帯が1世帯の2世帯である．

各世帯は若年期として26～60歳を過ごす．若年期には労働を行い，賃金を収入として高齢期に向けた貯蓄を行う．若年期に関するパラメータには添え字 y を付与している．高齢期としては61～95歳を過ごす．高齢期は労働せず，若年期に貯めた貯蓄と，若年期の終わりに受け取る親からの遺産を収入として，自身の子世代に遺産をのこす．高齢期に関するパラメータには添え字 o を付与している．

家計は所得制約と時間制約のもとで効用を最大化する行動を行う．効用関数はBarro[16]に基づき，交通による効用と余暇時間による効用，公共事業関係費以外の公共財（以降，他の公共財）への支出による効用，橋梁の補修費用以外の公共事業関係費（以降，他の公共事業関係費）の支出による効用，合成財消費による効用，さらに次世代の効用を考えた効用関数とした．この効用関数は，価格1の合成財消費について線形の準線形効用関数であるため，異質性を考えても同質な家計と同様に効用の集計が可能である．本研究では，社会厚生を計画期間内に家計が得る効用の総和と定義し，式(6)で表す．

$$\begin{aligned}U_t^i = &\sum_{t^g=t}^{t+6}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t}\left(u_y^i(\bar{x}_y^A,\bar{x}_y^B)+v_y^i(y_{y,t^g}^i)+q_y^i(Q_{t^g})+p_y^i(G_{t^g})+z_{y,t^g}^i\right)\\ &+\sum_{t^g=t+7}^{t+13}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t}\left(u_o^i(\bar{x}_o^A,\bar{x}_o^B)+v_o^i(y_{o,t^g}^i)+q_o^i(Q_{t^g})+p_o^i(G_{t^g})+z_{o,t^g}^i\right)\\ &+\gamma^7 U_{t+7}\end{aligned} \tag{6}$$

$\bar{r}$ ：粗利子率（=1+利子率）．逆数は時間割引率．

$\bar{x}_y^K, \bar{x}_o^K$ ：若年期/高齢期 に K 橋を利用する交通の回数（ ¯ は定数であることを表している．）

$u_y^i(\cdot), u_o^i(\cdot)$ ：家系 i の若年期/高齢期の交通回数に関する効用関数

$y_{y,t}^i, y_{o,t}^i$ ： t 期に若年期（高齢期）である家系 i の余暇時間

$v_y^i(\cdot), v_o^i(\cdot)$ ：家系 i の若年期/高齢期 余暇時間に関する効用関数

Q_t ： t 期での他の公共財への財政支出

G_t ： t 期での他の公共事業関係費の支出

$q_y^i(\cdot), q_o^i(\cdot)$ ：家系 i の若年期/高齢期 の他の公共財の支出に関する効用関数

$p_y^i(\cdot), p_o^i(\cdot)$ ：家系 i の若年期/高齢期 の他の公共事業関係費の支出に関する効用関数

$z_{y,t}^i, z_{o,t}^i$ ： t 期に 若年期/高齢期 である家系 i の合成財消費

γ^7 ：利他度．親が子の効用を考えるときの世代間の割引率（$0<\gamma<1$）

所得制約としては，収入に若年期の労働収入と親からの遺産，前期の貯蓄があり，支出として合成財消費，交通の費用，迂回費用，来期への貯蓄，子への遺産，労働所得税，個人住民税を考え，式(7)で表される．

$$\begin{aligned}&\sum_{t^g=t}^{t+6}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t}\left(\bar{w}^i-\bar{\tau}_l-\bar{\tau}_{c,y}\right)L_{t^g}^i+\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^6 h_{t+6}^i =\\ &\sum_{t^g=t}^{t+6}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t}\left(z_{y,t^g}^i+\bar{f}\sum_K\left\{\bar{l}^K\bar{x}_y^K\right.\right.\\ &\qquad\left.\left.+\bar{l}^D\left(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{y,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{y,IV}^K\right)\right\}\right)\\ &+\sum_{t^g=t+7}^{t+13}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t}\left(z_{o,t^g}^i+\bar{f}\sum_K\left\{\bar{l}^K\bar{x}_o^K\right.\right.\\ &\qquad\left.\left.+\bar{l}^D\left(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{o,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{o,IV}^K\right)\right\}+\bar{\tau}_{c,o}\right)\\ &+\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{13}h_{(t+13)}^i\end{aligned} \tag{7}$$

$\bar{w}^i$ ：賃金率

$\bar{\tau}_l$ ：労働所得税

L_t^i：家系 i の家計の t 期における労働時間

h_t^i：$t+1$ 期に家系 i の高齢期を迎える世帯が受け取る遺産

$\bar{f}$：燃料費

$\bar{l}^K$：K 橋を利用する交通にかかる距離

$\bar{l}^D$：迂回路 D を利用する際に追加的にかかる距離

$\bar{x}_{y,m}^K, \bar{x}_{o,m}^K$：若年期/高齢期に健全度 m の K 橋が補修された際に迂回しなければならない回数

$\bar{\tau}_{c,y}, \bar{\tau}_{c,o}$：若年期/高齢期にかかる住民税（若年期は労働所得に比例した税額，高齢期は定額）

時間制約としては，若年期と高齢期で異なった制約式を持ち，余暇時間と交通の時間，迂回の時間に若年期のみ労働時間を加えた時間の合計が利用可能時間に一致し，式(8)，式(9)で表される．

（若年期）

$$L_{t^g}^i + y_{y,t^g}^i + \sum_K \left\{ \bar{T}^K \bar{x}_y^K + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{y,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{y,IV}^K \right) \right\} = \bar{M}^i \tag{8}$$

（高齢期）

$$y_{o,t^g}^i + \sum_K \left\{ \bar{T}^K \bar{x}_o^K + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{o,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{o,IV}^K \right) \right\} = \bar{M}^i \tag{9}$$

$\bar{T}_K$：K 橋を利用する交通にかかる時間

$\bar{T}_D$：迂回路 D を利用する際に追加的にかかる時間

$\bar{M}^i$：利用可能時間

以上の式(6)から式(9)式より，家計の行動は以下の最適化問題として書き表せる．

$$\max_{h_t^i, z_{y,t}^i, z_{o,t}^i, L_t^i, S_{o,t}^i, S_{y,t}^i, y_{y,t}^i, y_{o,t}^i} \quad U_t^i \tag{10}$$

$$where\, U_t^i = \sum_{t^g=t}^{t+6} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(u_y^i(\bar{x}_y^A, \bar{x}_y^B) + v_y^i(y_{y,t^g}^i) + q_y^i(Q_{t^g}) + p_y^i(G_{t^g}) + z_{y,t^g}^i \right)$$
$$+ \sum_{t^g=t+7}^{t+13} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(u_o^i(\bar{x}_o^A, \bar{x}_o^B) + v_o^i(y_{o,t^g}^i) + q_o^i(Q_{t^g}) + p_o^i(G_{t^g}) + z_{o,t^g}^i \right)$$
$$+ \gamma^7 U_{t+7}$$

$s.t.$

$$\sum_{t^g=t}^{t+6} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(\bar{w}^i - \bar{\tau}_l - \bar{\tau}_{c,y} \right) L_{t^g}^i + \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^6 h_{t+6}^i =$$
$$\sum_{t^g=t}^{t+6} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(z_{y,t^g}^i + \bar{f} \sum_K \left\{ \bar{l}^K \bar{x}_y^K + \bar{l}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{y,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{y,IV}^K \right) \right\} \right)$$
$$+ \sum_{t^g=t+7}^{t+13} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(z_{o,t^g}^i + \bar{f} \sum_K \left\{ \bar{l}^K \bar{x}_o^K + \bar{l}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{o,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{o,IV}^K \right) \right\} + \bar{\tau}_{c,o} \right)$$
$$+ \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{13} h_{(t+13)}^i$$

$$L_{t^g}^i + y_{y,t^g}^i + \sum_K \left\{ \bar{T}^K \bar{x}_y^K + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{y,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{y,IV}^K \right) \right\} = \bar{M}^i$$

$$\forall t^g \in \{t, t+1, \ldots t+6\}$$

$$y_{o,t^g}^i + \sum_K \left\{ \bar{T}^K \bar{x}_o^K + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{o,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{o,IV}^K \right) \right\} = \bar{M}^i$$

$$\forall t^g \in \{t+7, t+8, \ldots t+13\}$$

式(10) の最適化問題から社会厚生関数を導出する．本研究では社会厚生を，計画期間内に家計が得る効用の総和とする．まず効用関数の次世代の効用の部分に効用関数を代入し，そのうえで所得制約式と時間制約式を代入することで間接効用関数である式(11)を得る．

$$V_t^i = \sum_{n=0} \gamma^{7n} \left[\sum_{t^g=t+7n}^{t+7(n+1)-1} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(u_y^i(\bar{x}_y^A, \bar{x}_y^B) + v_y^i \left(\bar{M}^i - L_{t^g}^i - \sum_K \left\{ \bar{T}^{K-K} x_y + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{y,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{y,IV}^K \right) \right\} \right) \right.$$
$$+ q_y^i(Q_{t^g}) + p_y^i(G_{t^g}) - \bar{f} \sum_K \left\{ \bar{l}^K \bar{x}_y^K + \bar{l}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{y,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{y,IV}^K \right) \right\}$$
$$\left. + \left(\bar{w}^i - \bar{\tau}_l - \bar{\tau}_{c,y} \right) L_{t^g}^i \right)$$
$$+ \sum_{t^g=t+7(n+1)}^{t+7(n+2)-1} \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t^g-t} \left(u_o^i(\bar{x}_o^A, \bar{x}_o^B) + v_o^i \left(\bar{M}^i - \sum_K \left\{ \bar{T}^K \bar{x}_o^K + \bar{T}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{o,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{o,IV}^K \right) \right\} \right) \right.$$
$$+ q_o^i(Q_{t^g}) + p_o^i(G_{t^g}) - \bar{f} \sum_K \left\{ \bar{l}^K \bar{x}_o^K + \bar{l}^D \left(\sum_{m=II,III} \delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K \bar{x}_{o,m}^K + W_{IV,t^g}^K \bar{x}_{o,IV}^K \right) \right\}$$
$$\left. - \bar{\tau}_{c,o} \right)$$
$$\left. + \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^6 h_{t+7(n+1)-1}^i - \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{13} h_{t+7(n+2)-1}^i \right] \tag{11}$$

式(11)は家系 i の第 t 世代が一生に得られる効用の総和である．式(11)について第 t 世代が次世代にのこす遺産に関する一階条件をとる．（*は最適化された変数であることを示す．）

$$\frac{\partial V_t^i}{\partial h_{t+13}^{i*}} = -\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{13} + \gamma^7 \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^6 = -\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^7 + \gamma^7 = 0 \tag{12}$$

$$\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^7 = \gamma^7 \tag{13}$$

式(13) により利子率は親が子の効用を考える時の世代間の割引率と一致する．そして，自身の将来の効用と同じ割引率で子の効用に対しても割り引くことになる．式(13) を利用して計画期間 T （$1 \le t \le T$ ）内の全家計の効用の総和を式(14)で示し，社会厚生関数と定義する．

この社会厚生関数において各家系内については子世代の効用に世代間の割引率をかけて計画期間分抜き出して総和したものになっている．しかし，世代間の割引率と時間割引率が一致することから，毎期発生する効用を時間割引率で割り引いて計画期間分足し合わせていることと同値である．

$$
\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{I}\tilde{V}_T^i = \\
&\sum_{i=1}^{I}\Bigg[7\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t-1}\Big[\Big(u_y^i(\bar{x}_y^A,\bar{x}_y^B) \\
&\quad +v_y^i(\bar{M}^i-L_t^i-\sum_K\Big\{\bar{T}^K\bar{x}_y^K+\bar{T}^D\Big(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{y,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{y,IV}^K\Big)\Big\}\Big) \\
&\quad +q_y^i(Q_t)+p_y^i(G_t)-\bar{f}\sum_K\Big\{\bar{l}^K\bar{x}_y^K+\bar{l}^D\Big(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{y,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{y,IV}^K\Big)\Big\} \\
&\quad +\left(\bar{w}^i-\bar{\tau}_l-\bar{\tau}_{c,y}\right)L_t^i\Big)\Big] \\
&\quad +7\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t-1}\Big[\Big(u_o^i(\bar{x}_o^A,\bar{x}_o^B) \\
&\quad +v_o^i(\bar{M}^i-\sum_K\Big\{\bar{T}^K\bar{x}_o^K+\bar{T}^D\Big(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{o,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{o,IV}^K\Big)\Big\}\Big) \\
&\quad +q_o^i(Q_t)+p_o^i(G_t)-\bar{f}\sum_K\Big\{\bar{l}^K\bar{x}_o^K+\bar{l}^D\Big(\sum_{m=II,III}\delta_{m,t^g}^K W_{m,t^g}^K\bar{x}_{o,m}^K+W_{IV,t^g}^K\bar{x}_{o,IV}^K\Big)\Big\} \\
&\quad -\bar{\tau}_{c,o}\Big)\Big] \\
&\quad +h_T^i-\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{T-1}h_T^i\Bigg]
\end{aligned}
\tag{14}
$$

⑶ 政府の設定と行動

政府の予算は，公共事業関係費（橋梁の補修費用を含む）と他の公共財で構成されるものとし予算全体のうち公共事業関係費の割合を α ，他の公共財の割合を $(1-\alpha)$ として配分されるものとする．また，公共事業関係費は，橋梁補修費用とその他の公共事業関係費で構成されるものとする．

政府は財政制約と橋梁の健全度の劣化がマルコフ過程に従うという制約のもとで社会厚生を最大化するように橋梁の補修割合と他の公共事業関係費への支出額（G_t）を決定する．

公債はBarro[16]に基づき，政府の t 期における公債残高を B_t ， $t-1$ 期の公債残高を B_{t-1} とし、利払い $\overline{r'}B_{t-1}$ を支払う．ただし，政府の公債残高の現在価値は極限において，負にならない(No-Ponti Game Condition)ものとし，公共事業関係費の財政制約は，式(15)で表される．また，他の公共財の財政制約は，式(16)で表される．

$$
G_t+\sum_K C_t^K+\overline{r'}B_{t-1}=\left\{\sum_{i=1}^{I}\left(\left(\bar{\tau}_l+\bar{\tau}_{c,y}\right)L_t^{i*}+\bar{\tau}_{c,o}\right)\right\}*\alpha+\bar{R}_t+(B_t-B_{t-1}) \tag{15}
$$

$$
Q_t=\left\{\sum_{i=1}^{I}\left(\left(\bar{\tau}_l+\bar{\tau}_{c,y}\right)L_t^{i*}+\bar{\tau}_{c,o}\right)\right\}*(1-\alpha) \tag{16}
$$

L_t^{i*} ： t 期における家系 i の1家計の最適化された労働時間

$\bar{R}_t$ ：t期の補助金

B_t ：t期に発行された公債

$\overline{r'}$ ：利子率（$1+\overline{r'}=\bar{r}$）

$\sum_K C_t^K$ ： t 期の補修費用総額

α ：予算全体に占める公共事業関係費の割合

財政制約を踏まえて，社会厚生最大化問題は式(17)のように書くことができる．

$$
\max_{\delta_{m,t}^K,G_t,B_t}\quad\sum_{i=1}^{I}\tilde{V}_T^i \tag{17}
$$

s.t.

$$
G_t+\sum_K C_t^K+\overline{r'}B_{t-1}=\left\{\sum_{i=1}^{I}\left(\left(\bar{\tau}_l+\bar{\tau}_{c,y}\right)L_t^{i*}+\bar{\tau}_{c,o}\right)\right\}*\alpha+\bar{R}_t+(B_t-B_{t-1})
$$

$$
W_{n,t}^{K+}=\sum_m\pi^{K+}[n\,|\,m,\delta_t^K]W_{m,t}^{K-*}\qquad\forall t\in\{1,2...T\}
$$

$$
W_{n,t+1}^{K-}=\sum_m\pi^{K-}[n\,|\,m]W_{m,t}^{K+*}\qquad\forall t\in\{1,2...T\},\ \forall K\in\{A,B\},\ \forall n\in\{I,\ II,\ III,IV\}
$$

$$
W_{m,t}^{K-}\geq 0\qquad\forall t\in\{1,2...T\}\quad\forall K\in\{A,B\}
$$

$$
\sum_m W_{m,t}^K=1\qquad\forall t\in\{1,2...T\}\quad\forall K\in\{A,B\}
$$

制約条件の1行目の式が財政制約，2行目の式は観測した補修前健全度分布が補修によって補修後健全度分布に推移することを表しており，3行目は橋梁の劣化によって補修後健全度分布が次期の補修前健全度分布に推移することを表している．4行目と5行目の式が健全度分布の要素が非負かつ各橋梁群で要素の和が1を満たすための制約である．この問題を解くことによって最適補修施策を求める．最適化問題のラグランジュ関数が式(18)である．ここで $\sum_i^I\tilde{V}_T^i$ は全家計の効用の総和である．ただし，Q_t はすべて外生変数によって決定されるため，Q_t から得られる効用は補修施策によって変化しない．このため式(18)では考慮しない．

$$\Phi=\sum_{i=1}^{I}\tilde{V}_T^i+\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^{t-1}\left[\sum_K\lambda_t^K\left(\sum_m W_{m,t}^{K-}-1\right)\right.$$
$$+\sum_K\sum_n\mu_{n,t}^K\left(W_{n,t+1}^{K-}-\sum_m\pi^{K-}[n\mid m]\pi^{K+}[n\mid m,\delta_{m,t}^K]W_{m,t}^{K-*}\right)$$
$$\left.+\varphi_t\left(\sum_{i=1}^{I}\left(\left(\bar{\tau}_l+\bar{\tau}_{c,y}\right)L_t^{i*}+\bar{\tau}_{c,o}\right)+\bar{R}_t-G_t-\sum_K C_t^K+(B_t-(1+\bar{r})B_{t-1})\right)\right] \tag{18}$$

$\lambda_t^K,\mu_{n,t}^K,\varphi_t$ ：社会厚生最大化の各制約式に関するラグランジュ乗数

公共財への支出について式(18)の一階条件をとると，式(19)および式(20)が得られる．

$$7I\left[\frac{\partial p_y^i(G_t)}{\partial G_t}+\frac{\partial p_o^i(G_t)}{\partial G_t}\right]=\varphi_t \tag{19}$$

$$\varphi_t=\varphi_{t-1} \tag{20}$$

$p_y^i(G_t),p_o^i(G_t)$ ：各家計での G_t についての効用関数（G_t に関して逓減）

式(19)の左辺は若年期及び高齢期各々の公共財への支出（G_t）の変化に対する各家計の効用の変化を，全家計数分（7I）総和したものである．右辺は財政制約の厳しさを表現するラグランジュ乗数である．すなわち φ_t は公共財への支出の社会的限界費用（MCF）を示す．

公債を考慮した最適長期補修施策においては，MCFが式(20)を満たすように平準化される．すなわち，公債の最適発行流列は各期のMCFを平準化するように決定される．

３．数値分析事例

(1) 数値分析の設定

本研究では，時間変数を含む数値計算であり，最適化する変数の数が膨大なため，Gurobi Optimizerを用いて，補修割合を連続変数として数値分析を行った．

本数値分析の目的は，厚生改善，補修割合の程度を概ね現実的な値として示すことが目的であり，そのスケールをみるため現実にある新潟県のデータを基本的に用いて分析を行った．人口などの家計行動に関するパラメータを**表-1**に，橋梁群の数や架設年度などの橋梁に関するパラメータを**表-2**に，初期健全度分布は**表-3**にまとめた．なお，燃料費及び燃費は，家計の所得制約である式(7)の交通費用の算出に用いるため**表-1**にまとめた．

橋梁の分類については，橋梁の補修施策や補修費用が橋梁の規模や交通量，気候などの地域特性などによって変化することから様々なケースが考えられる．そこで，本数値分析では，橋梁の規模に着目して，補修費用や劣化過程が異なるため，幅員の大小により性質の異なる2種類の橋梁を設定し，国土交通省道路局国道・技術課が提供する「全国道路施設点検データベース～損傷マップ～」[21]により，新潟県の管理橋梁のうち幅員が5m以上は *A* 橋（3,510橋），5m未満は *B* 橋（452橋）と設定した．*A* 橋は都市間交通を担う幹線道路に架橋されていることを想定し *B* 橋は都市内の生活道路に架橋されていることを想定している．また，帰着する便益の地域的範囲については財政制約を考慮した自治体範囲を想定した．

補修費用単価については，新潟県の長寿命化修繕計画には個別の補修費用が公表されていないため，補修費用が公表されている宮城県橋梁個別施設計画[22]をもとに橋面積あたりの補修費用単価を算出し，新潟県の *A* 橋，*B* 橋の平均橋面積に応じた橋ごとの補修費用単価を設定した．宮城県第3次橋梁長寿命化計画[23] によると，宮城県の管理橋梁は1,789橋で今後10年間の計画投資額は約250億円とされている．一方，新潟県道路施設維持管理計画書[24]によると，新潟県の管理橋梁は，4,015橋で10年間の投資規模額は約559億円とされており，1橋あたりの計画投資額は概ね同額であることから，本数値分析の結果のスケールに大きな影響を与えないと考えられる．迂回に要する時間や金銭的費用は，メンテナンス費用に比較して微小であると仮定し，考慮しないこととした．また，本数値分析では，厚生改善，補修割合の程度を概ね現実的な値として示すことを目的とし，そのスケールをみることに焦点をあてる観点から，補修に要する期間については考慮しないこととした．

道路メンテナンス年報[20]によると，2 巡目（2019～2021 年度）の点検で，健全度IVと判定された橋梁は，0.1%と微小であり，撤去・廃止は現状ではほぼ行われていない．そこで，本数値分析では，撤去・廃止がない状況に限り，補修割合の変化のみに着目することとした．すなわち，式(2)の $\boldsymbol{\pi}_{33}^K$ は1とし，$\boldsymbol{\pi}_{34}^K$ は省略した．

本研究は，様々な健全度分布にある橋梁群全体の補修施策が，定常状態に至るまでの過程を動学的に分析することが重要であるため，検討期間は，長期間設定する必要がある．このため，補修施策を決定する期間は50期間（250年間）とし50期分の社会厚生を計算した．マルコフ推移確率行列は津田ら[19]の手法を用いて，式(21)のとおり推定された．

$$\boldsymbol{\pi}^{K-}=\begin{pmatrix}0.6506 & 0.3061 & 0.0433\\ 0 & 0.7772 & 0.2228\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \tag{21}$$

表-1 家計行動に関するパラメータ

パラメータ	若年期 高齢期	情報源
利用可能時間	13時間32分/日	NHK国民生活時間調査2020[25]
交通時間※	1時間30分/日	NHK国民生活時間調査2020[25]
交通距離※	45 km/日	平均時速30kmとして設定
燃料費	160.4 円/L	給油所小売価格調査[26] 2021年10月11日ガソリン価格 一般社団法人 日本自動車販売協会連合会[27]
燃費	20 km/L	乗用車ブランド通称名別順位 1位ヤリス，2位ルーミー WLTC市街地モードの 平均燃費(2021年)
利子率	1.0%及び 2.0%	国債金利情報[28] 長期国債（10年）の平均金利 0.8% (2002.4.1～2022.3.31) 1.48%（1992.4.1～2022.3.31）
労働賃金（1期目）	3,218 千円/年	市町村民経済計算(2018)[29]
遺産額	1,250 万円	MCFG資産形成研究所 退職前後世代が経験した資産 承継に関する実態調査[30]
人口	2,201,272人	国勢調査[31]
個人住民税	労働賃金の 10.5％ 7,500円/年	新潟県の財政収入に 合わせて調整[32]
労働所得税	労働賃金の 14.8％ なし	新潟県の財政収入に 合わせて調整[32]

※交通に関するパラメータは若年期のものを記載．高齢期は若年期に行っている通勤が行われなくなるため，若年期の0.7倍とした．

表-2 橋梁に関するパラメータ

パラメータ		A 橋 B 橋
橋梁数		3,510 橋 452 橋
架設年度：1922年度～2016年度		
交通量		70 回/日/世帯 3.5 回/日/世帯
補修費用単価	II	12.97 百万円/橋 4.30 百万円/橋
	III	50.82 百万円/橋 16.83 百万円/橋

表-3 初期健全度分布

健全度	A 橋	B 橋
I	0.193	0.210
II	0.505	0.518
III	0.302	0.272

推定においては，2つの点検時点における観測健全度ペアを1つのサンプルとし，1,195サンプルを用いた．モデル推定時点のデータベースには，全ての橋梁のサンプルは含まれていなかったため，モデル推定のためのサンプル数は，新潟県の管理する橋梁数より少なくなっている．津田ら[19]の手法では，健全度ごとのハザード率の指数を推定し，その結果から式(21)のマルコフ推移確率が一意に導出される．ハザード率の指数の推定結果は，健全度Iで-2.4536（t値：-20.1179；ハザード率は，exp(-2.4536)= 0.0860），健全度IIで-2.9874（t値：-34.8677；ハザード率は，exp(-2.9874)=0.0504）であった．なお，A 橋，B 橋ごとにマルコフ推移確率を推定することも試行したが橋梁の種類ごとのサンプル数が少なくパラメータが収束しなかったため断念した．新潟県の橋梁の点検データから各々推定したマルコフ推移確率で計算を行った．

本研究のモデルにおいて内生変数であるMCFは公共財の限界効用と一致する．そのため，税収と公共財の効用関数がその値に大きな影響を及ぼす．税収は，経済成長に伴い増加する．その税収を公共財支出と橋梁の補修費用に最適に配分する．その結果，MCFの値が決定される．公共財の効用は，橋梁の補修費用以外の公共支出の効果である．これには教育をはじめ様々な項目が含まれる．これらの効果は対象とする道路管理団体によって大きく異なるため，本研究では公共財の効用関数のパラメータを感度分析的に変化させて，結果への影響をみる．具体的には以下のように設定した．

家系 i の若年期及び高齢期の政府の支出に関する効用関数形を，式(22)及び式(23) と2次関数で設定する．なお，$q_y^i(Q_{t^g}), q_o^i(Q_{t^g})$ は，補修施策の影響を受けないため関数の特定化も行わない．

$$p_y^i(G_{t^g}) = \beta G_{t^g} - \eta G_{t^g}^2 \tag{22}$$

$$p_o^i(G_{t^g}) = \beta G_{t^g} - \eta G_{t^g}^2 \tag{23}$$

G_{t^g} ： t^g 期での公共財への財政支出

$p_y^i(\cdot), p_o^i(\cdot)$ ：家系 i の若年期/高齢期 の政府の支出に関する効用関数

β, η ：政府の支出に関する効用関数のパラメータ

次に式(20)及び式(21)のパラメータ値として，初期時点の限界効用値がMCF=1，2および3になる3ケースを設定した．そのとき，公共財の効用関数与件のもとで経済成長による税収増加があるため，公共財の限界効用は時間とともに減少する．応じて，MCFの値も減少する．公共財の限界効用が1は公共支出の限界費用便益比が1であることを示すため，公共財への支出額が最適と言える．MCFが1を下回ると，最適投資額を超える公共支出を意味するため，シミュレーションの最終期（250年先）に1を下回らない効用関数のパラメータを設定した．なお，

若年期および高齢期のパラメータを同一とした.

本数値分析では，健全度IVを考慮しておらず，また，新たに健全度IVを生じさせない観点から健全度IIIの補修割合は，2 期（10 年）以内に全て補修されるものとし，50%を下限値とした．なお，道路メンテナンス年報[19]によると，1巡目（2014 年度～2018 年度）の点検で健全度III又は健全度IVと判定された橋梁のうち，補修等の措置が完了した地方自治体管理の橋梁は，2021年度末時点で46%である.

⑵ 数値分析の結果

(1)の設定により，数値分析を行い，公債の発行を考慮していない河野ら[18]の数値分析の結果と比較することにより，有用性を今後，検証していく.

河野ら [18]では，最適長期補修施策は，非定常状態においては，時間割引率が高い時は，MCF の値によらず事後保全のみで行うことが最適となった．一方，時間割引率が低い時は，MCF の値が低いと予防保全と事後保全を組合せて行うことが最適であり，MCF の値が高くなるにつれて予防保全に投資できる補修割合が減少し，やがて事後保全のみで行うことが最適となった．すなわち，道路管理団体が予防保全や事後保全の補修割合を決定するにあたっては，MCF を考慮した検討が必要である．社会厚生最大化の観点からは，最適補修施策が LCC 最小化施策の社会厚生を上回ることが示された．すなわち，この点からも LCC 最小化のみで道路管理団体が予防保全や事後保全の補修割合を検討することは十分ではなく，MCF を考慮した検討が必要である．世代間の公平性の観点からは，本研究で与えた橋梁の健全度分布の場合，初期状態において劣化した橋梁が比較的多く，初期に早期に補修を行う必要が高いため将来世代が現世代よりも効用が高いことが示された．公債を考慮すると世代間の効用が平準化に向かう．また，社会厚生の増加も生じる.

そこで，平準化の程度と社会厚生の増加の程度を分析するために河野ら[18]による公債を考慮しない場合と同様の設定で，公債を考慮した場合の数値分析を行った.

4．おわりに

本研究では，MCFを内生化した橋梁の最適長期補修施策を検討する動学的経済モデルに公債を考慮し，公債発行額を含めた長期補修施策の最適化を行う．公債の発行を考慮していない河野ら[18]の数値分析の結果と比較することにより，有用性を今後，検証していく.

謝辞：本研究はJSPS科研費 基盤研究B 20H01494の助成を受けたものである．なお，著者順は姓の頭文字の五十音順に従った．また，本研究の内容は所属する組織等の見解を示すものではない.

REFERENCES

1) 国土交通省道路局, 都市局：令和 5 年度道路関係予算概要, 2023.1, https://www.mlit.go.jp/page/content/001583490.pdf [Road Bureau and City Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan : Doro-Kankei FY2023 Budget Overview, 2023.1, https://www.mlit.go.jp/page/content/001583490.pdf]
2) 小濱健吾, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 福田泰樹：劣化過程を考慮した最適廃棄・補修モデル，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.68，No.3，pp.141-156，2012. [Kohama, K., Kaito, K., Aoki, K., Kobayashi, K. and Fukuda, Y. : The optimal scrapping and maintenance model of infrastructure considering deterioration process, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.68，No.3，pp.141-156，2012.]
3) 小林潔司，中谷昌一，大迫湧歩，安部倉完：橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略プロファイリング，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.73，No.4，pp.201-218，2017. [Kobayashi, K. Nakatani, S. Osako, Y. And Abekura, K. : Bridge management profiling with reference to heterogeneity in deterioration speeds, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.73，No.4，pp.201-218，2017.]
4) Smilowitz, K. and Madanat, S.: Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, Issue 1, pp. 5-13, 2000.
5) Uddin, W., Hudson, W. R. and Haas, R.: *Public Infrastructure Asset Management*, Second Edition, McGraw Hill Professional, 2013.
6) Goodman, A. S. and Hastak, M.: *Infrastructure Planning, Engineering, and Economics*, Second Edition, McGraw Hill Professional, 2015.
7) Adeli, H. and Sarma, K. C.: *Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing*, Wiley, 2006.
8) 別所俊一郎，赤井伸郎，林正義：公的資金の限界費用，日本経済研究，47 号，pp. 1-19, 2003. [Bessho, T. Akai, N. and Hayashi, M. : Marginal cost of public funds, *JCER Economic Journal,* 47, pp.1-19, 2003.]
9) Harberger, A. C.: Three basic postulates for applied welfare economics: An interpretive essay, *Journal of Economic Literature*, Vol. 5, No. 3, pp. 785-797, 1971.
10) Bovenberg, A. L. and de Mooij, R. A.: Environmental levies and distortionary taxation, *The American Economic Review*, Vol. 84, No. 4, pp. 1085-1089, 1994.
11) Bovenberg, A. L. and Goulder, L. H.: Optimal environmental taxation in the presence of other taxes: General-equilibrium analyses, *The American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, pp. 985-1000, 1996.
12) Parry, I. W. H. and Bento, A.: Revenue recycling and the welfare effects of road pricing, *The Scandinavian Journal of Economics*, Vol. 103, No. 4, pp. 645-671, 2001.
13) 森杉壽芳，河野達仁：道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経

済研究，67 号，pp. 1-20, 2012. [Morisugi, H. and Kono, T. : Effcient highway toll level with marginal cost of funding for road investment, *JCER Economic Journal*, 67, pp.1-20, 2012.]
14) Kono, T., Mitsuhiro, Y. and Yoshida, J.: Simultaneous optimization of multiple taxes on car use and tolls considering the marginal cost of public funds in Japan, *The Japanese Economic Review*, pp. 1-37, 2019.
15) 河野達仁，嶌万希音，水谷大二郎：公的資金の限界費用を内生的変化を考慮した最適補修施策，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 7, No. 4, pp.389-399, 2021. [Kono, T., Shima, M. and Mizutani, D. : Optimal maintenance policies considering the marginal cost of public funds, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 7, No. 4, pp.389-399, 2021.]
16) Barro, R. B.: Are Government Bonds Net Wealth? , *The Journal of Political Economy*, Vol. 82, Issue 6, pp. 1095-1117, 1974.
17) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領, 2019, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf [Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan: Dorokyo Teiki-Tenken Youryo, 2019, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf]
18) 河野達仁，嶌万希音，祢津知広，水谷大二郎：公的資金の限界費用を考慮した道路橋メンテナンスの最適長期補修施策，2023. Mimeo
19) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No. 801/I-73, pp. 69-82, 2005. [Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi, K. : Estimating Markovian transition probabilities for bridge deterioration forecasting, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 801/I-73, pp. 69-82, 2005.]
20) 国土交通省道路局: 道路メンテナンス年報, 2022, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r03/r03_09maint.pdf [Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan: Doro-Maintenance Nenpo, 2022, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r03/r03_09maint.pdf]
21) 国土交通省道路局国道・技術課：全国道路施設点検データベース～損傷マップ～，2022, https://road-structures-map.mlit.go.jp/Index.aspx?ReturnUrl=%2f [Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan: Zenkoku Doro Shisetsu Tenken database, 2022, https://road-structures-map.mlit.go.jp.Index.aspx?ReturnUrl=%2f]
22) 宮城県：宮城県橋梁個別施設計画, 2023, https://www.pref.miyagi.jp/documents/20930/1.pdf [Miyagi prefecture :Miyagi Prefecture Bridge Kobetsu Shisetsu Plan, 2023, https://www.pref.miyagi.jp/documents/20930/1.pdf]
23) 宮城県：宮城県第 3 次橋梁長寿命化計画, 2019, https://www.pref.miyagi.jp/documents/20930/728771.pdf [Miyagi prefecture : Miyagi Prefecture Bridge 3rd Longterm repair Plan, 2019, https://www.pref.miyagi.jp/documents/20930/728771.pdf]
24) 新潟県：新潟県道路施設維持管理計画書，2023, https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/3570575.pdf [Niigata prefecture : Niigata Prefecture Maintenance and management of road facilities Plan, 2023, https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/357075.pdf]
25) NHK 放送文化研究所：国民生活時間調査，2020, https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/ [NHK Broadcasting Culture Research Institute : Kokumin Seikatsu Jikan census, 2020, https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/]
26) 資源エネルギー庁：石油製品価格調査 1．給油所小売価格調査（ガソリン，軽油，灯油）, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/p1007/results.html [Agency for Natural Resources and Energy : sekiyu Seihin Kakaku census 1. Kyuyujo Kouri-Kakaku census, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/p1007/results.html]
27) 一般社団法人 日本自動車販売協会連合会：乗用車ブランド通称名別順位, 2021, http://www.jada.or.jp/data/month/m-brand-ranking/ [Federation of Japan Automobile Dealers Association : Mobile Brand-Ranking, 2021, http://www.jada.or.jp/data/month/m-brand-ranking/]
28) 財務省：国債金利情報, 2022, https://www.mof.go.jp/jgbs/reference/interest_rate/index.htm [Ministry of Finance : Government bond interest information, 2022, https://www.mof.go.jp/jgbs/reference/interest_rate/index.htm]
29) 新潟県：にいがた県統計ボックス 平成 30 年度市町村民経済計算（平成 18 年度～平成 30 年度）, 2021, https://www.pref.niigata.lg.jp/site/tokei/20200420sityousonminnenpou.html [Niigata prefecture: Niigata Prefecture Statistics-Box, Municipality economic calculation, 2018, https://www.pref.niigata.lg.jp/site/tokei/20200420sityousonminnenpou.html]
30) MUFG 資産形成研究所：退職前後世代が経験した資産承継に関する実態調査 第 1 章親子の居住地・地域による資産継承の傾向, 2020, https://www.tr.mufg.jp/shisanken/pdf/kinnyuu_literacy_11.pdf [MUFG Financial Education Institute: The Fact-finding survey related to the Asset inheritance of Pre- and post-retirement generation,1. The trend of Asset inheritance for parent and child residence 2020, https://www.tr.mufg.jp/shisanken/pdf/kinnyuu_literacy_11.pdf]
31) 総務省統計局 : e-Stat, 令和 2 年国勢調査, 2020, https://www.estat.go.jp/statsearch/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200521&tstat=000001136464&ccle=0&year=20200&month=24101210&tclass1=000001136466 [Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications: e-Stat, National census, 2020, https://www.estat.go.jp/statsearch/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200521&tstat=000001136464&ccle=0&year=20200&month=24101210&tclass1=000001136466]
32) 新潟県：新潟県報号外別冊 財政事情, 2020.12, http://kenpo.pref.niigata.lg.jp/bn/R02_12/1218_g1/ [Niigata prefecture : Niigata Kenpo-Gougai Zaisei-Jijyo, 2020.12, http://kenpo.pref.niigata.lg.jp/bn/R02_12/1218_g1/]

(Received ???????)
(Accepted??????)