高速道路舗装に対する通過車両の軸重を考慮した劣化予測

四方 滉也 [1]・中村 和博 [2]・小濱 健吾 [3]・笹井 晃太郎 [4]・貝戸 清之 [5]

[1]学生会員　大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻（〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1）
E-mail: k.shikata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

[2]正会員　西日本高速道路株式会社　関西支社　総務企画部　企画調整課（〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1）
E-mail: k.nakamura.aj@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

[3]正会員　大阪大学特任准教授　大学院工学研究科 NEXCO 西日本高速道路学共同研究講座
（〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1）
E-mail: k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

[4]正会員　大阪大学特任研究員　大学院工学研究科 地球総合工学専攻（〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1）
E-mail: k.sasai@civil.eng.osaka-u.ac.jp

[5]正会員　大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻（〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1）
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

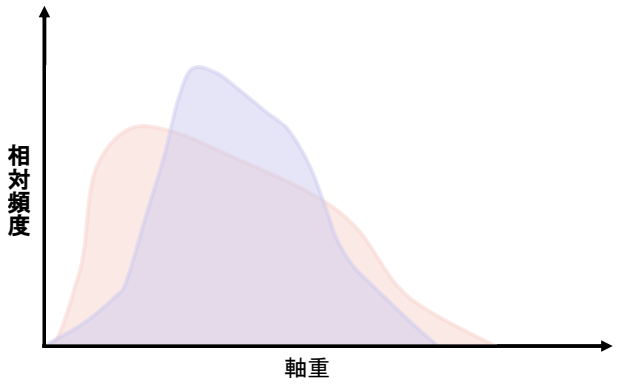
近年，高速道路舗装の老朽化が問題となっており，舗装構造の深い層に達する損傷も確認されている．高速道路の安全，安心，快適な利用に資する路面を持続的に供給していくために高速道路舗装マネジメントの高度化が求められている．現在，舗装の構造設計には TA 法が適用され，その際，交通条件として当該路線における大型車交通量に 10t 軸換算係数を乗じて算出される 10t 換算軸数が用いられている．一方で，従来の舗装マネジメントにおいては，交通条件として大型車交通量を用いた劣化予測が行われており，通過車両の軸重の大小に対する考慮が十分に行えていない可能性がある．本研究では，高速道路の入口付近に設置が進む自動軸重計により測定された軸重データと，定期的な路面性状調査により獲得される舗装の路面性状データを用いて，軸重と舗装の劣化との関係について着目し，軸重の大小を考慮した舗装マネジメント手法に関する提案を行う．

Key Words : *deterioration hazard model, equivalent 10t axle load , Axle load, IRI, pavement management*

1. はじめに

近年，我が国においては高速道路の老朽化が進行しており，各地で問題となりつつある．NEXCO3 会社が管理している高速道路に関しては，2022 年 3 月時点で総延長の約 3 割が供用開始から 40 年以上経過しており，2032 年には約 6 割に達することから老朽化の進行が懸念されている．高速道路は国民生活や社会経済活動に必要不可欠なインフラであるため，持続的な維持管理の実施が求められる．中でも高速道路のアスファルト舗装については舗装構造の深層まで達する損傷が確認されており，高速道路舗装の要求性能である安全・安心・快適な路面を間断なく提供していくための高速道路舗装マネジメントの高度化の必要性が高まっている．現在，高速道路舗装の構造設計では，TA 法によることを原則としている．この設計法では，交通条件として 10t 換算軸数を用いている．10t 換算軸数は大型車交通量に 10t 軸換算係数 (0.85) を乗ずることにより算定され道路の利用状況を表す指標として用いられている．一方でこれまで提案されてきた舗装マネジメント手法においては，その多くで交通条件を表す説明変数として大型車交通量が用いられている．したがって現在の舗装の構造設計においては考慮されている通過車両の軸重の大小に対する考慮が不十分となっている可能性が存在する．

また，近年，車両の重量に関する情報の利活用が進みつつある．高速道路の IC(入口) では自動軸重計の整備が進められており，軸重計を通過する車両の軸重等の情報が測定，記録されている．車両の重量は道路構造物の損傷に影響を与えるとされており，特に軸重超過車両の通行が構造物に与える影響は大きく，各地で国や道路管理者による指導取締りが実施されている．令和 5 年には自動軸重計により測定された軸重を基にした取締りも開始され，車両の重量に関する情報の重要性が高まっている．本研究では近年，このように利活用が広がっている自動軸重計により取得された軸重デー



図–1 同一交通量に対する軸重分布概念図

タと，道路管理者により獲得されている路面性状調査結果を用いて，これまでの舗装マネジメントにおいて数多く利用されてきた交通量に代わって通過車両の重量と舗装の劣化状態の関係に着目し分析を行う．その際，車両の通行が道路舗装の劣化に大きく影響すると考え，累積軸数を基にした劣化予測を実施する．以下，2. で本研究の基本的な考え方について述べる．3. で分析に用いる劣化予測モデルの概要について述べ，4. で軸重データを基にした劣化シミュレーション方法について述べる．

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 軸重測定結果の利用

国内陸上貨物輸送量における分担率の約 7 割は高速道路が占めており，国内物流における重要な役割を担っている [1]．高速道路を利用した貨物輸送では大型車が多く利用されているが，高速道路の保存や危険防止の観点から，通行する車両の大きさや重量について，道路令及び車両制限令により制限が課されている．特に定められた重量を超過している大型車両の通行は橋梁構造物や舗装路面等の道路構造物の疲労蓄積・損傷発生に大きく影響すると考えられており，道路管理者にとって深刻な問題となっている．そのため，規制に加え国や高速道路会社は重量・寸法等の測定を行い，違反車両の指導取締りを実施している．さらに令和 5 年 4 月には従来の料金所で実施される軸重測定による取締とあわせて，自動軸重計によって測定された通行車両の軸重を基にした取締りが開始されるなど，違反車両に対する指導取締りが強化されている．また，自動軸重計では軸重計を通過した車両の軸重や軸数などの情報が測定，記録されている [1] ことから違反車両の取締りに加え自動軸重計により獲得される情報の利活用への期待が高まっている．そこで，本研究では車両の荷重が舗装表面の劣化進行に大きく影響を及ぼしていると考え，自動軸重計により獲得されたデータを基に算出される累積通過軸数を用いた劣化予測を実施し管理手法の提案を行う．これにより通過車両の荷重の実態を踏まえた舗装マネジメントが可能となる．また，軸重超過車両が通行していなかった場合の 10t 通過軸数の算出を行い，劣化予測結果と合わせることにより軸重超過車両の有無が舗装の劣化に及ぼす影響について分析を行う．

(2) 既往研究の概要

社会基盤施設の劣化過程は不確実性を有し，将来生起する事象を確定的に予測することは困難である．そのため，社会基盤施設に対して実施された点検データを蓄積し，統計的に劣化予測を実施するための手法が多数開発されている [2)3)4)]．統計的劣化予測モデルの一つに津田ら [2] により開発されたマルコフ劣化ハザードモデルがある．本モデルは離散的に獲得された施設の健全度を対象として，各健全度間の劣化生起を指数ハザードを用いて定義し，モデル化を行っている．本モデルでは劣化に影響していると考えられる環境条件などを説明変数としてモデルに導入することができ，さらに施設毎の不可観測的な劣化要因を異質性パラメータとして導入し劣化予測を実施することができるといった利点が存在する．また，他にも多数の拡張モデルが存在することなどからこれまでに数多くの適用事例が存在し，高速道路舗装を対象とした劣化予測も実施されている．例えば，宮崎ら [5] は，路面性状調査結果を対象として，舗装種別や構造形式の違いによる舗装の劣化速度の差異に着目し劣化予測を実施している．その際，交通量を表す指標として大型車交通量を説明変数として導入しモデル推定を実施している．また，パラメータ推定結果より大型車交通量が多い路線ほど劣化の進行が加速されるという考察が為されている．しかし，道路の利用状況を表す指標として大型車交通量として導入した場合，路線を通過した車両台数を定量的指標として扱っており，その際通過車両の重量に関する情報は考慮されていない．一般的に車両区分と車両重量には一定の比例関係が成立すると考えられるものの，同一の交通量であっても路線により輸送される貨物や積載率は異なると考えられるため劣化予測結果に影響する可能性が考えられる．そのため，自動軸重計により測定される車両毎の重量を考慮することによって，劣化予測モデルを精緻化できる可能性が存在する．

これまで道路を通行する車両の軸重測定結果を劣化予測に適用した事例としては，He[6] によるものが存在する．He は中国湖南省の高速道路に設置された WIM（Weigh-in-motion）を用いて，ある 1 か月間に獲得された軸重データを基に過積載車両の通行が舗装の寿命

に与える影響について分析を行っている．その際，新たに舗装寿命成長係数を定義し寿命の延長効果について評価を行っている．しかし，あくまで軸重超過車両の通行の制限による寿命の延命効果を把握することが目的であり，寿命の延命効果は比率として算出し，具体的な舗装の寿命そのものに着目した分析はなされていない．また，Celso ら [7] はブラジルの有料道路の道路舗装を対象に軸重規制の有無が道路舗装の LCC に及ぼす影響を分析している．具体的には有料道路において 1 週間の間に測定された軸重を利用し，道路諸元を仮想的に与え寿命の推定を行い，推定結果より車両の重量規制が舗装の LCC を低減する効果があることを示している．しかしながら，路面設計における重量規制の効果を把握することが目的であるため，実際の舗装の路面性能に関しての延命効果は分析されていない．また，日本国内において軸重計によって測定されたデータを基に社会基盤施設の劣化状態の評価を行った事例もいくつか存在する [8][9] もののいずれも道路舗装を対象としているものではない．そこで本研究では，道路管理者によって実施されている道路舗装の路面性状調査の調査結果および対応する路線の車両軸重測定結果を用いて，軸重測定結果を用いた道路舗装の劣化予測を行うこととする．

3. マルコフ劣化ハザードモデル

(1) モデルの前提条件

本研究で用いる劣化予測モデルでは，劣化過程がマルコフ過程に従うと仮定し社会基盤施設の劣化過程を表現している．対象とする社会基盤施設の劣化状態は，離散的な I 段階のレーティング $1,2,\ldots,I$ として評価されるものとする．ただし，その値が大きいほど施設の劣化が進行していることを表す．つまり健全度 1 は新設直後の状態，健全度 I は施設の使用限界を意味する．更に本研究では通行車両の影響についてより明示的に考慮するため，通過軸数を基準とした劣化予測を行う．ある通過軸数 τ において施設の健全度が $h(\tau)$ と評価されたとする．以下，$z(z>0)$ に対して，2 点間 $\tau_A,\tau_B(\tau_B=\tau_A+z)$ における健全度の推移確率について考える．τ_A,τ_B は施設の点検が実施された際の累積通過軸数を表し，これらの点検においてのみ施設の劣化状態が点検を通じて確認できる．2 回の点検間の健全度の推移確率はマルコフ推移確率 π として表すことができる．τ_A において健全度 $h(\tau_A)=i$ と評価され，τ_B において健全度 $h(\tau_B)=j$ と評価される確率 $\pi_{ij}(z)$ は，$h(\tau_A)=i$ を与件として $h(\tau_B)=j$ が生起する条件付き確率として定義され，

$$\pi_{ij}(z)=[h(\tau_B)=j|h(\tau_A)=i] \tag{1}$$

と表される．なお，マルコフ推移確率が τ_A 以前の健全度推移の履歴に依存しないという点においてマルコフ性を有している．通常，補修が実施されない限り施設の健全度が回復することはないため，$\pi_{ij}=0(i>j)$ が成立する．また，推移確率の定義から $\sum_{j=i}^{I}\pi_{ij}=1$ が成立する．$\pi_{ij}(z)$ をまとめた行列 $\Pi(z)$ をマルコフ推移確率行列といい，

$$\Pi(z)=\begin{pmatrix}\pi_{11} & \cdots & \pi_{iI}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \pi_{II}\end{pmatrix} \tag{2}$$

と表される．また，チャップマン・コルモゴロフ方程式より $\Pi(z)^n=\Pi(nz)$ が成立する．

(2) ハザードモデルの構築

本手法ではマルコフ劣化ハザードモデルを用いた劣化予測を実施する．読者の便宜を図るため概要を述べるが，詳細については文献 [2] を参考にされたい．健全度 $i(i\leq I-1)$ を維持する累積通過軸数の確率変数を $y_i(y_i>0)$ とする．y_i の従う確率密度関数を $f_i(y_i)$，分布関数を $F_i(y_i)$ とする．このとき，ある累積通過軸数 y_i まで健全度 i を維持している条件の下で，微小経過点 $y_i+\Delta y_i$ において健全度が $i+1$ へと推移する条件付き確率は，

$$\lambda_i(y_i)=\frac{f_i(y_i+\Delta y_i)}{F_i(y_i)} \tag{3}$$

で与えられる．λ_i はハザード関数であり，瞬間的な劣化確率を表す．マルコフ劣化ハザードモデルでは，定数 θ_i をハザードとして与える．このときハザード関数 $\lambda_i(y_i)=\theta_i$ は指数ハザードとなり，表現される劣化過程はマルコフ性を満たす．累積通過軸数 y_A で健全度 i が観測された下で，累積通過軸数 $y_B(y_B=y_A+z)$ においても健全度 i が観測される条件付き確率は，

$$\mathrm{Prob}[h(y_B)=i|h(y_A)=i]=\exp(-\theta_i z) \tag{4}$$

と求めることができる．これは，$Y_i\sim EX(\theta_i)$ であることを表す．また，累積通過軸数 y_A で健全度 i が観測された下で，累積通過軸数 y_B との間に健全度が $i\to i+1$ に推移する条件付き確率 $\pi_{i,i+1}(z)$ は，

$$\begin{aligned}\pi_{i,i+1}(z)&=\mathrm{Prob}[h(y_B)=i+1|h(y_A)=i]\\&=\frac{\theta_i}{\theta_i-\theta_{i+1}}\{-\exp(-\theta_i z)+\exp(-\theta_{i+1}z)\}\end{aligned} \tag{5}$$

以上の議論を拡張することにより，推移確率 $\pi_{ij}(z)$ は，以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned}&\pi_{ij}(z)\\&=\sum_{l=i}^{j}\prod_{m=i}^{l-1}\frac{\theta_m}{\theta_m-\theta_l}\prod_{m=l}^{j-1}\frac{\theta_m}{\theta_{m+1}-\theta_i}\exp(-\theta_i z)\end{aligned} \tag{6}$$

で表される．ただし，表記上の規則として，

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{l-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_l} = 1 & (l = i) \\ \prod_{m=l}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_l} = 1 & (l = j) \end{cases} \tag{7}$$

が成り立つものとする．

(3) 点検データと劣化ハザード率

施設の劣化状態が観測され，各施設に対して 2 回の定期検査データが獲得されたとする．施設 k に対して点検が実施された際の累積通過軸数をそれぞれ τ_A^k, τ_B^k とする．τ_A^k は 1 回目の点検を，τ_B^k は 2 回目の点検時の累積通過軸数をそれぞれ表す．また，それぞれの点検で劣化状態を表すレーティング $\bar{h}(\tau_A^k), \bar{h}(\tau_B^k)$ が獲得されている．記号「¯」は実測値であることを意味する．さらにダミー変数 $\delta_{ij}^{\bar{k}} (i = 1, \ldots, I-1, j = i, \ldots, I, k = 1, \ldots, K)$ を

$$\delta_{ij}^{\bar{k}} = \begin{cases} 1 & \bar{h}(\tau_A^k) = i, \bar{h}(\tau_B^k) = j \text{ のとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{8}$$

と定義する．さらに施設 k の 2 回の点検間の通過軸数を $z^k = \tau_B^k - \tau_A^k$ と定義する．施設 k の点検サンプルの通過軸数 $[\tau_A^k . \tau_B^k]$ における劣化過程をハザード率を用いて定義する．健全度 i は劣化の最終状態であるため必然的に $\theta_I = 0$ が成り立つ．施設の劣化過程を特徴づけるハザード率を説明変数ベクトル x^k を用いて，

$$\theta_i^k = \exp(x^k \beta_i') \tag{9}$$

と表す．$\beta_i = (\beta_{i,1}, \cdots, \beta_{I,w})$ は未知パラメータ $\beta_{I,w} (w = 1, \cdots, W)$ による行ベクトル，記号「′」は転置操作を表す．また，x_i^k は恒等的に 1 であり，$\beta_{i,1}$ は定数項を表す．K 個の施設の劣化が互いに独立であると仮定すると，全サンプルの同時生起確率密度を表す尤度関数 $\mathcal{L}$ は，

$$\mathcal{L}(\beta) = \prod_{i=1}^{I-1} \prod_{j=i}^{I} \prod_{k=1}^{K} \left\{ \pi_{ij}(\bar{z^k}, \bar{\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{k}}} : \boldsymbol{\beta}) \right\}^{\delta_{ij}^{\bar{k}}} \tag{10}$$

となる．尤度関数は未知パラメータ β の関数である．未知パラメータの推定方法については文献 [10] を参考にされたい．

(4) 寿命の算出方法

さらに，推定された未知パラメータを基に，あるレーティングに達した通過軸数から，劣化が進行し次のレーティングに達するまでの期待値 r_i を算出することができる．レーティング i の生存関数を $F_i(y_i)$ とすると，

$$r_i = \int_0^\infty F_i(y_i) dy_i \tag{11}$$

と表される．ここで本研究ではハザードとして指数ハザード関数を採用していることから，r_i は，

$$r_i = \int_0^\infty \exp(-\theta_i y_i) dy_i = \frac{1}{\theta_i} \tag{12}$$

となる．また，供用の開始（または直近の補修実施）から，健全度 i に劣化が進行するまでに要するまでの通過軸数 $R(i)$ は，

$$R(i) = \sum_{j=1}^{i} \frac{1}{\theta_j} \tag{13}$$

で算出することができる．さらに，一単位期間 T あたりの通過軸数 A_i が得られている場合においては，あるレーティングが次のレーティングに推移するまでに要する時間 u_i を算出することも可能であり，

$$u_i = \frac{r_i}{A_i} T \tag{14}$$

と算出できる．また，供用の開始（または直近の補修実施）から，健全度 i に劣化が進行するまでに要する時間 $U(i)$ は，

$$U(i) = \frac{R(i)}{A_i} T \tag{15}$$

で算出することができる．

4. 劣化シミュレーション

(1) 10t を基準とした軸数への換算方法

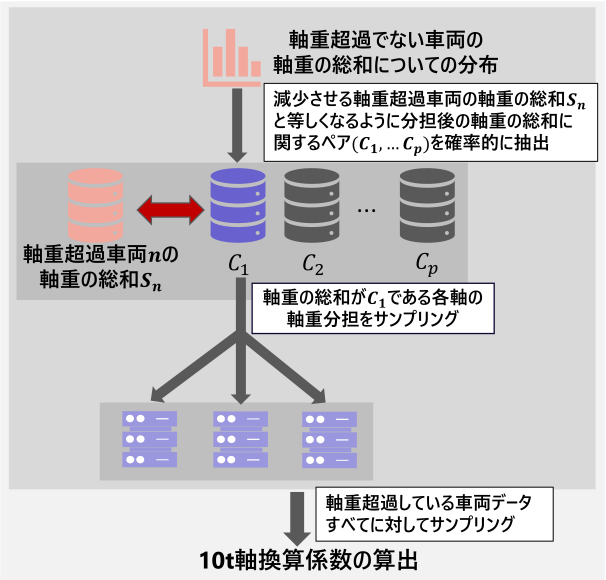
高速道路は多様な車両が通行しており，観測される車両の軸重も様々である．そのため，軸重測定結果を利用する際は，何らかの軸重を基準とした指標に統一されることが多い．本研究では測定されている軸重測定結果を分析に適用する際に，任意の軸重をその軸重が舗装に与える破壊作用と等しい 10t を基準とする軸重に変換を行う．換算式は次式で与えられる．

$$P_r = (P/10)^n \tag{16}$$

ここに，P_r は 10t を基準として換算した後の軸重，P は測定された軸重を表す．また，本研究では $n = 4$ とし，これは車両が舗装に与えるダメージは軸重の 4 乗に比例するという 4 乗則 [11)12)13)] を適用した式である．なお，式 (16) に示すように同一車両における各軸の影響は独立であるとし，シングル軸，タンデム軸の区別は行わない．式 (16) を用いて 10t を基準とする軸重に換算することにより各区間を通行する車両の軸重を相対比較することが可能となる．更に，本研究では 10t 軸換算係数の算出も行う．10t 軸換算係数は次式で与えられる．

$$\alpha = \frac{\sum \left\{ (P/10)^4 \times N \right\}}{M} \tag{17}$$

なお，α は大型車 1 台あたりの 10t 軸数（軸/台）10t 軸換算係数，N は軸重が P である通過軸数，M は通過した大型車台数である．式 (17) を用いることにより，各路線を利用する車両の重量に関する情報を明確に把握することができる．



図–2 軸重超過車両の法定以下の軸重車両への転換方法

(2) 過積載車両の影響についてのシミュレーション方法

本研究では，軸重規制の実施が舗装の劣化状態に及ぼす影響について分析を行う．特に本研究では法定軸重である 10t を超過している車両の有無が舗装の劣化に与える影響をシミュレーションによって分析する．具体的には，自動軸重計によって獲得された各車両の軸重測定結果を用いて，軸重超過車両の交通量を変化させた場合の通過軸数をシミュレーションにより算出し，舗装の劣化に与える影響を評価する．軸重超過車両が存在しなかった場合の通過軸数を算出するためには軸重測定結果から軸重超過車両のデータを取り除く必要がある．その方法として，記録されている軸重測定結果から軸重が超過しているすべての車両データを取り除き 10t 通過軸数を算出する方法や，軸重超過車両の積載物を法定の軸重を持つ車両に分配することを考え，ある基準の下で法定以下の軸重を有する車両へと変換を行い，新たに 10t 通過軸数を算出する方法などが考えられる．前者の方法を採用した場合，車両の通行を考慮しないため，軸重規制による軸重超過車両の減少による効果と交通量そのものの減少による効果の 2 つを分離して評価することができない．本研究においては，軸重規制による軸重超過車両の減少が及ぼす影響について着目するため，後者に示した方法を用いることとする．なお，後者の手法は，超過している軸重を法定内の軸重に転換する際に，積載物の重量が保存すると考え，軸重の総和が保存されることを仮定している．実際の車両においては積載物以外の重量も軸重に影響するため，軸重の総和の保存と積載物の重量の保存に若干の差異が生じている可能性もあるが，本研究では軸重測定結果から積載物のみの重量を推定することが困難であるため無視できるものとし，軸重超過車両の法定以下の軸重を有する車両への転換を軸重の総和を保存することにより表現している．また，分割し運搬することが困難な積載物が存在する可能性もあるが，積載物の詳細についてはデータから判別不可能であるため本研究では考慮していない．

シミュレーション方法について述べる．シミュレーションは**図–2** に示す方法に基づき行う．記録された軸重データのうち，車両の最大軸重が法定軸重である 10t を超過している N 個の車両データを抽出し，各車両の軸重測定結果を $D_n(n = 1, \ldots, N)$ と表す．各車両について各軸に対する軸重の測定結果が記録されており，車両 n について l 軸分の軸重測定結果が記録されているとする．このとき，D_n は，$D_n = (d_1, \ldots, d_l)$ と表される． さらに車両 n に関して測定された各軸の軸重の総和を S_n とすると $S_n = \sum_{m=1}^{l} d_m$ と表すことができる．いま，軸重超過車両について，その軸重の総和を保存したまま法定以下の軸重のみを有する車両に転換することを考える．軸重超過車両の積載物が複数の車両に分担されることを考え，軸重の総和について $S_n = \sum_p C_p$ を満たす条件の下，各 C_p のサンプリングを実施する．なお，C_p は軸重測定結果を基に作成した法定以下の軸重のみを有する各車両における軸重の総和についての経験分布から抽出されるサンプルである．C_p は経験分布より抽出された車両毎の軸重の総和を表しているため，各車両における軸毎の軸重は不明であり，C_p に関する情報のみでは 10t 通過軸数を算出できない．そのため，10t 通過軸数を算出するためには C_p を満たす条件の下で軸毎の軸重についてサンプリングを行う必要がある．軸重の総和が C_p である車両データの集合を Ω_{C_p} とする．各軸についての軸重のサンプリングは．Ω_{C_p} から抽出することができる．本手法を軸重が超過している全ての車両データに対して適用することにより，軸重超過車両が存在しなかった場合に観測されると考えられる軸重測定結果のサンプリングを行うことができる．さらにサンプリング結果を基に式 (16) を用いることにより 10t 換算軸数を算出することができる．

5. おわりに

本研究では，路面性状調査により獲得された高速道路舗装の路面調査結果を対象として，自動軸重計により獲得された通行車両の軸重に関するデータを基にした劣化予測手法を提案した．具体的には，道路管理者により同一区間に対して複数回実施された路面性状調査結果を用いて，マルコフ劣化ハザードモデルの推定を行う．その際，通行する車両の軸重が路面の劣化に

影響すると考え，累積通過軸数を基にした劣化予測を行い車両の通行が劣化に及ぼす影響を評価する．通過軸数を算出する際には自動軸重計によって測定された軸重測定結果に対して，4 乗則を適用することにより，10t を基準とする 10t 軸を算出しモデル推定に用いることで軸重の影響を考慮する．さらに推定された劣化予測モデルを用いて，任意の軸重を有する車両に対する規制が路面の寿命に与える影響を評価する手法を提案した．なお，本研究で提案した方法論を用いて高速道路の実際の点検データを対象とした実証分析を行っている．その結果および考察に関しては研究発表会にて提示する．

REFERENCES

1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：中間とりまとめ，2023.[*kousokudouroshisan no choukihozen oyobi koushin no arikatanikansuru gizyutsu kentou iinkai*：*chuukan torimatome*, 2023.]
2) 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，pp68-82，2005.[Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi K.: Estimating Markov transition probabilities for bridge deterioration forecasting,*Journal of JSCE*, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.]
3) 山崎崇央，石田哲也：生存時間解析を用いた東北地方に置ける橋梁コンクリート部材の劣化定量分析，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，Vol.71，No.4，I11-I22，2015.[Yamazaki, T., Ishida, T.:Application of survival analysis to deteriorated concrete bridges in east Japan,*Journal of JSCE* F4, Vol.71, No.4, I11-I22, 2015.]
4) 吉田郁政，本城勇介，大竹雄：EM アルゴリズムを用いた劣化曲線群の同定法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.2，174-185，2013. [Yoshida, I., Honjo, Y.and Otake,Y.:An identification metohd of a group deterioration curve by EM algorithm, *Journal of JSCE* A1, Vol.69, No.2, pp.174-185, 2013.]
5) 宮崎文平，加藤寛之，小濱健吾，貝戸清之，風戸崇之，田中克則：膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，Vol.71，No.3，142-161，2015.[Miyazaki, B., Kato, H., Obama, K., Kaito, K., Kazato, T. and Tanaka, K.: A proposal for evaluation method of pavement repair policy based on enormous data of road surface conditions, *Journal of JSCE F*4, Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.]
6) Yulong He, Jing Li, Xiao Xu, Ao Li, Hua Liu, Tianlin Jiang and Kaixin Shi：Influence of overloaded vihicles on pavement life based WIM data，6th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering．2020
7) Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior, Lélio Antônio Teixeira Brito, Lucas Fraporti Heller, Gabriel Grassioli Schreinert, Washington Peres Núñez, Jorge Augusto Pereira Ceratti and Cecília Merighi ：Impact on pavement deterioration due to overload vehicle regulation in Brazil, *Transportation Research Procedia*, Volume45，pp.842-849，2020
8) 田畑晶子，高田佳彦：既設鋼床版の疲労亀裂損傷の要因分析，技報第 25 号，2010.[Tabata,A., Takada, Y.:Factor analysis on fatigue cracks in orthotropic steel decks macro analysis on damage in existing bridge, *Giho dai25gou*, 2010.]
9) 時田英夫，永井政伸，三木千壽：交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価，土木学会論文集，No.794/I-72，55-65，2005.[Tokida,H., Nagai, M.and Miki, C.:Evaluation of fatigue environment based onn traffic data for the metropolitan expressway, *Journal of JSCE*, No.794/I-72,pp.55-65, 2005.]
10) 貝戸清之，小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.336-355，2007.[Kaito,K., Kobayashi,K.:Bayesian estiation of markov deterioration hazard model, *Journal of JSCE* A, Vol.63, No.2,pp.336-355,2007.]
11) 竹下春見：アスファルト舗装に関する対数グラフの応用，道路，No.295，pp.726-730，1965.[Takeshita,H.:Application of Logarithmic in Asphalt Pavement, *Road engineering & management review*, No.295, pp.726-730,1965.]
12) HRB：The AASHO Road Test，Proc.Conference Held May 16-18，1962，HRB Special Report 73，1962
13) HRB：The AASHO Road Test，HRB Special Report 61A-61G，1961-1962