

2023年6月2日（金）
JICE成果報告会

大阪大学大学院 工学研究科
社会基盤マネジメント学領域
Osaka University Infrastructure Management Lab.



道路利用条件の変化や長寿命化技術の導入が 舗装寿命に与える影響の定量的評価に関する研究

大阪大学大学院 貝戸清之
社会基盤マネジメント学領域

<http://www.infra-assetmetrics.com/>
kaito@civil.eng.osaka-u.ac.jp

道路利用に対するニーズは、その時々**の社会的情勢**によって多様に変化する

例) 国際海上コンテナ車等が増加する中、道路構造上の制約による通行の支障が物流生産性の向上を阻害

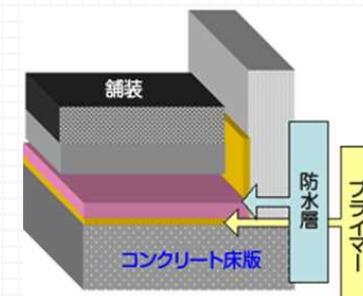


道路法の改正により「重要物流道路制度」が創設され最大重量44tの国際海上コンテナ車が特殊車両通行許可なしに通行可能に

一方で、道路管理者らは対策に長寿命化技術(*)を導入

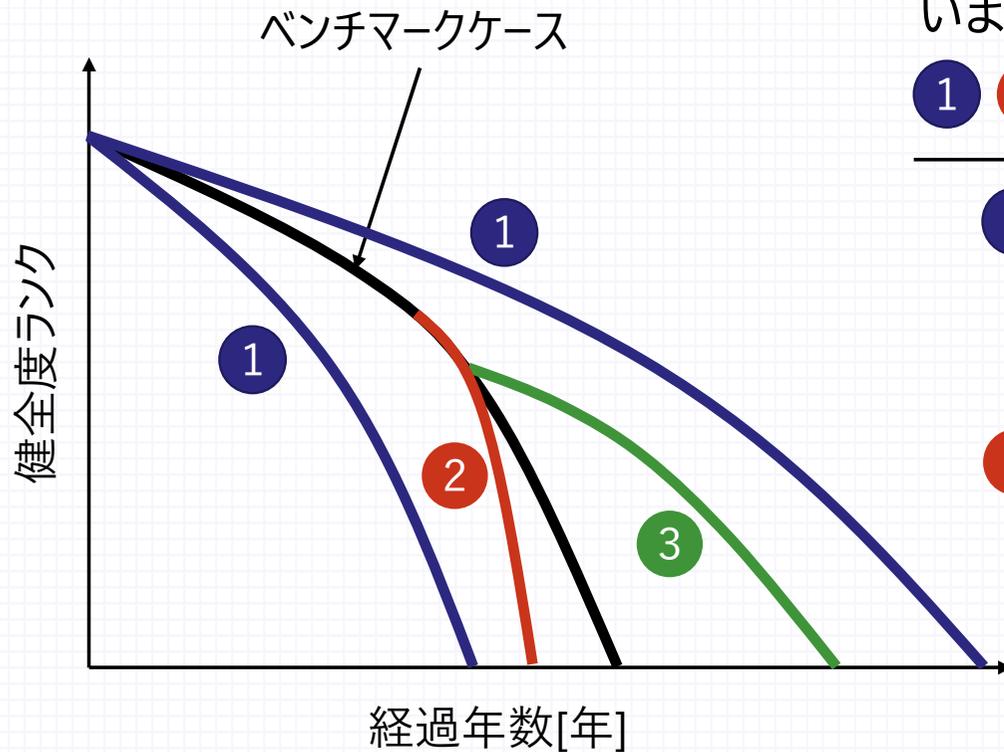


(*) 例) 道路橋の床版防水層の施工



条件の変化やその対策として導入される**長寿命化技術**が舗装の寿命や劣化速度にもたらす影響を定量的に評価する必要がある

既往研究の課題と本研究の目的



いま、ベンチマークケースに加えて

① ② ③ の3つの劣化パスを考える

① : いずれの健全度でも同比率で劣化が速い/遅い

▶ 既往研究（混合マルコフ劣化ハザードモデル）
が仮定する劣化パスの不確実性

② ③ : 劣化途中段階から劣化速度が変化

② の例：超重量交通の通行

③ の例：長寿命化技術の導入

▶ 既往研究で推定不可能
本研究の主題

1 長寿命化技術の導入が舗装寿命に与える影響の評価手法の構築

本日の発表内容

- 連続量を用いた劣化ハザードモデルによるベンチマークケース寿命推定
- 段階的異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデル
- 経時変化を考慮した動的劣化ハザードモデル
- 長寿命化技術の導入に対するライフサイクル費用分析

2 道路利用条件の変化が舗装寿命に与える影響の評価手法の構築

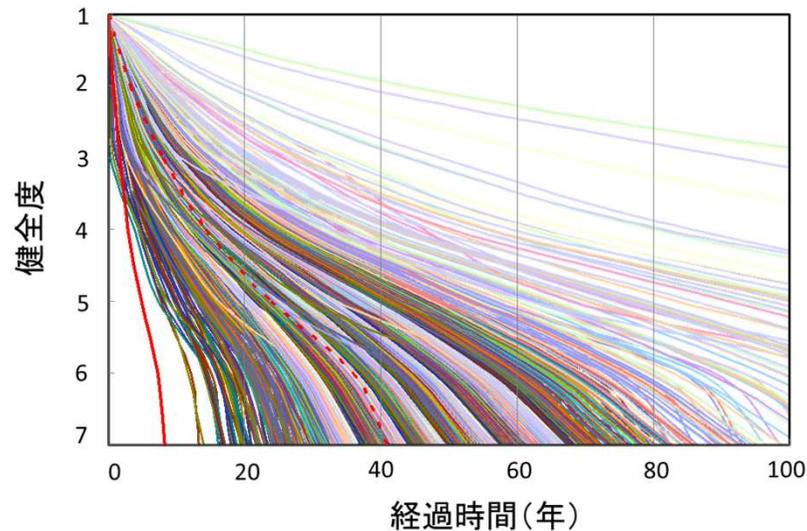
本日の発表内容

- 自動軸重系データの高速道路舗装マネジメントへの適用
- 軸重データを用いたマルコフ劣化ハザードモデル
- 通行車両による累積損傷度を導入したマルコフ劣化ハザードモデル
- 損傷度の経時変化を考慮した寿命推定

段階的異質性を考慮した 混合マルコフ劣化ハザードモデル

既往研究

混合マルコフ劣化ハザードモデル¹⁾では、グループ間の劣化の速さがいずれの健全度ランクにおいても同じ比率で異なることが仮定されている。



長寿命化技術のモデル化

技術導入なしの場合
劣化速度: θ_i

健全度ごとに異質性を設定したモデルが必要

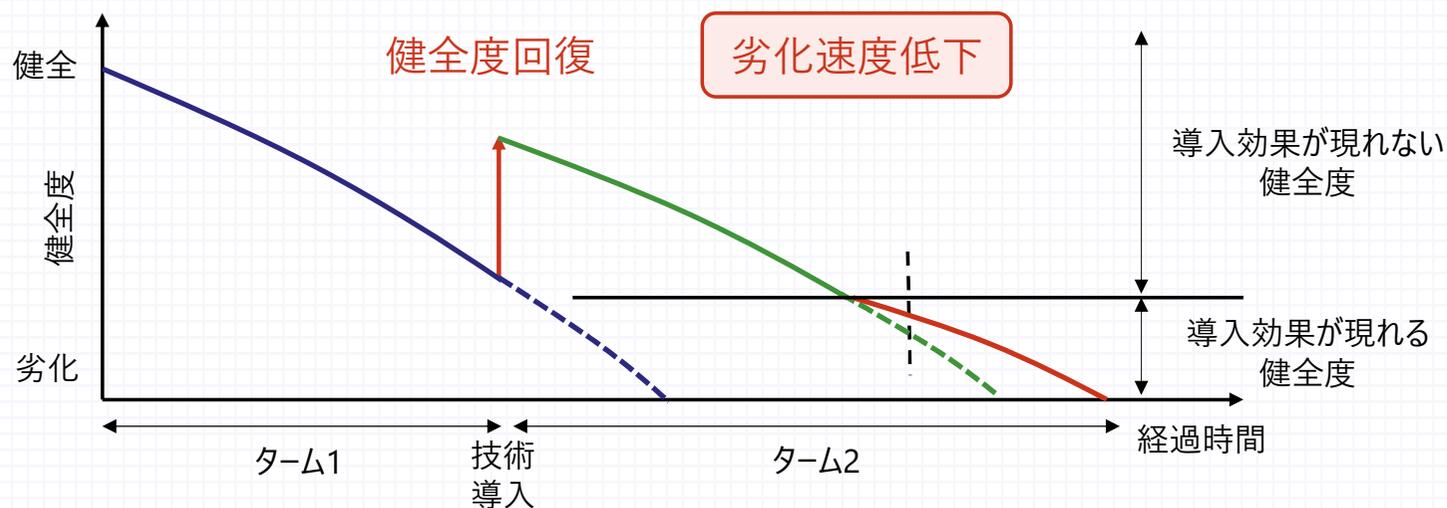
従来のモデル
劣化速度: $\varepsilon\theta_i$

本研究のモデル
劣化速度: $\varepsilon_i\theta_i$

導入時点

1) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.11

本研究における長寿命化技術の考え方



本研究では、長寿命化技術=劣化速度の低下が見込める技術とする

- ・ 導入直後には効果は現れず，劣化が進展しある健全度に達したところで発現
- ・ 上図では健全度が回復しているが，回復しない場合であっても適用可能な方法論を構築する

施設グループ k の施設 l_k の特性を表すベクトル \mathbf{x}_{k,l_k} と未知パラメータ β_i を用いることで標準ハザード率を表現.

$$\tilde{\lambda}_{i,k,l_k} = \exp(\beta_i \mathbf{x}'_{k,l_k})$$

特性だけでは考慮しきれない様々な要因が存在するため、それらの影響を表現するため異質性パラメータを導入する。

従来の
混合マルコフ
劣化ハザード
モデルと同様

	従来モデル	提案モデル
施設グループ k の施設 l_k の健全度 i における劣化ハザード率	$\lambda_{i,k,l_k} = \tilde{\lambda}_{i,k,l_k} \varepsilon_k$	$\lambda_{i,k,l_k} = \tilde{\lambda}_{i,k,l_k} \varepsilon_{i,k}$

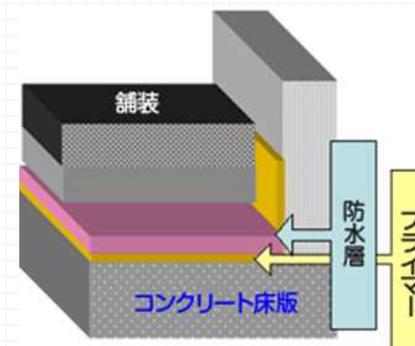
従来モデルでは健全度によらず一定としている異質性パラメータを健全度毎に定義することで健全度毎の段階的な劣化ハザード率の異質性を考慮することが可能.

本研究対象は舗装であるが、分析に用いるための適切なデータが存在していなかったため、高速道路橋のRC床版に発生しているひび割れデータに適用

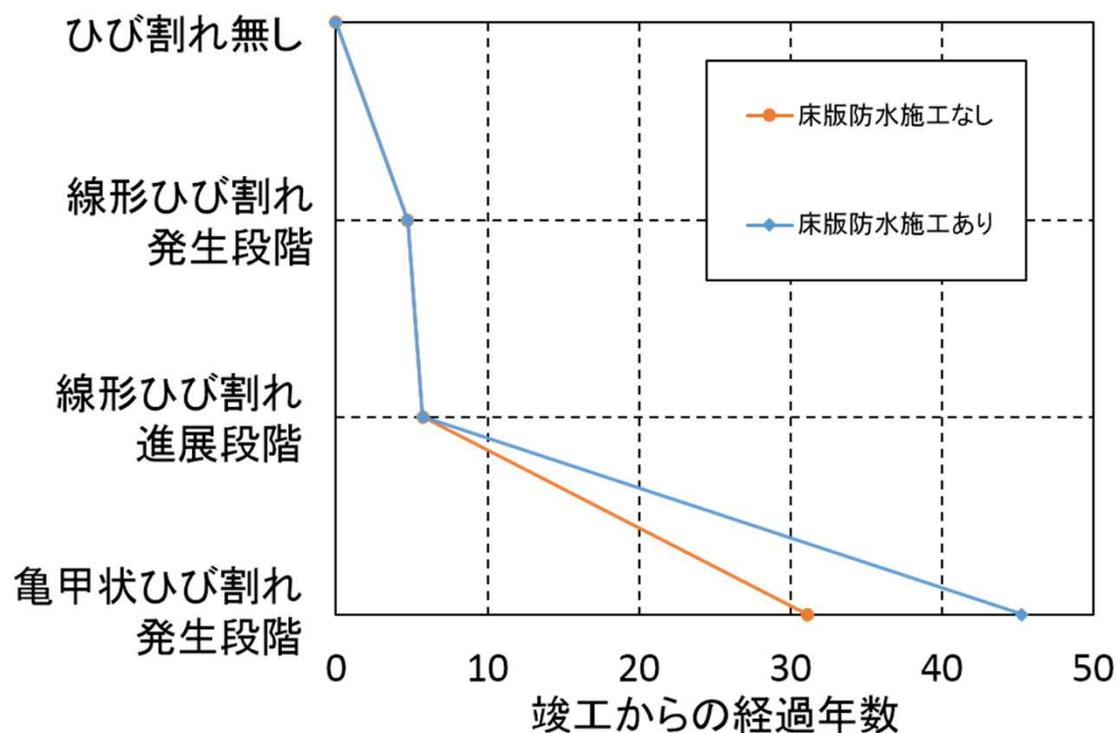
データ諸元	
適用対象	高速道路橋のRC床版に発生するひび割れ
径間数	754
パネル数	16,726
点検年度	1968~2015

		獲得サンプル			
		事後健全度			
		1	2	3	4
事前健全度	1	67,467	1,273	869	94
	2	-	757	1	0
	3	-	-	2,088	75
	4	-	-	-	46

対象とする長寿命化技術
=床版防水層の施工



異質性パラメータの数		
健全度	施工前	施工後
1	688	100
2	307	45
3	411	18



- ・ ひび割れ未発生～線形ひび割れの発生，進展段階（潜伏期）：
乾燥収縮もしくは輪荷重が要因となるため，劣化パスの差異はない
- ・ 線状から亀甲状ひび割れの発生段階（進展期）：
輪荷重走行の繰り返しが要因となり雨水等が影響を及ぼすため，劣化パスに差異が生じる

線形ひび割れが亀甲状ひび割れへと進展する段階で床版防水施工による劣化速度の低減効果が大きく現れている。

導入効果の事後評価

評価手法：Wilcoxonの符号付順位検定

対応のある2群間のデータの中央値の差異に関する検定

長寿命化技術導入前後の異質性パラメータ集合間の中央値の差異を検定し、劣化速度の変化が有意であるかを分析する

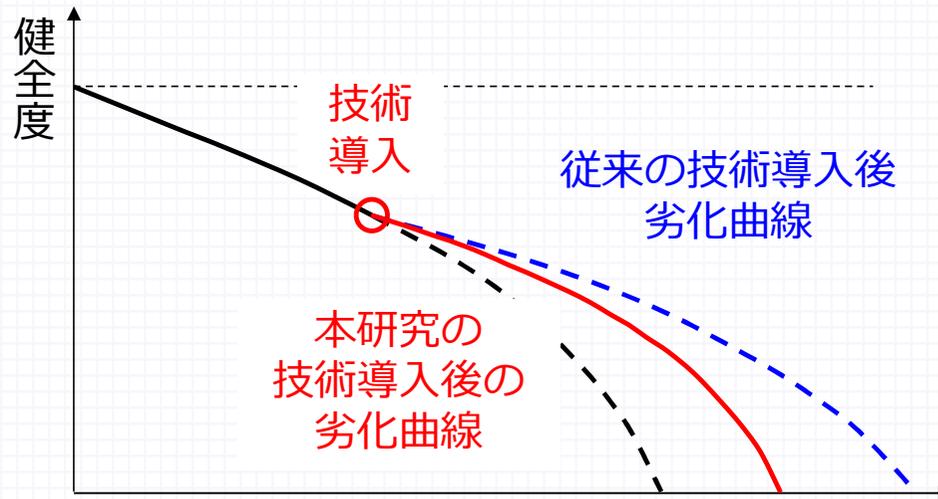
※ Hodges-Lehmann-Sen推定量：2群間の差の推定量

状態	検定統計量	片側検定	床版防水施工による劣化速度の変化	Hodges-Lehmann-Sen推定量
線形ひび割れ発生段階 (健全度1→2)	2.27	棄却されず	-	-
線形ひび割れの進展段階 (健全度2→3)	-2.44	棄却	劣化速度減少	-0.006
亀甲状ひび割れの発生段階 (健全度3→4)	36	棄却	劣化速度減少	-0.358

長寿命化技術の導入効果が健全度によって変化することが示された



導入効果の経時的変化を考慮した 動的劣化ハザードモデル



従来のモデルでは導入効果は導入後の経過時間によらず一定の値をとる.



導入効果が時間とともに変化する可能性を検証する必要がある.

導入効果が経時変化を考慮した動的劣化ハザードモデルの提案

施設 k の竣工からの経過時間を t_k , 長寿命化技術導入からの経過時間を τ_k と表す.
施設 k の特性を表すベクトル x_k と未知パラメータ β を用いることで,
導入前の劣化ハザード率を表現.

$$\lambda_1(t_k) = \exp(\beta x_k')$$

導入効果を表す規定関数 $\eta(\)$ を用いることで
導入後の劣化ハザード率を定義.

$$\lambda_2(t_k) = \eta(\tau_k)\lambda_1(t_k)$$

規定関数を時間変化する関数で定義することで,
長寿命化技術導入効果の経時変化を表現できる.

変化率規定関数の候補

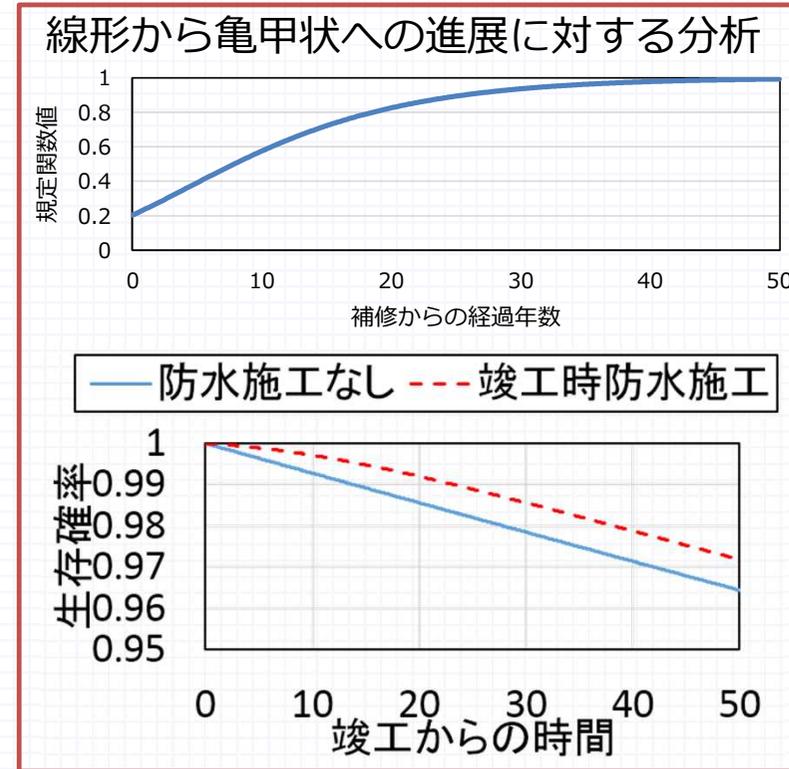
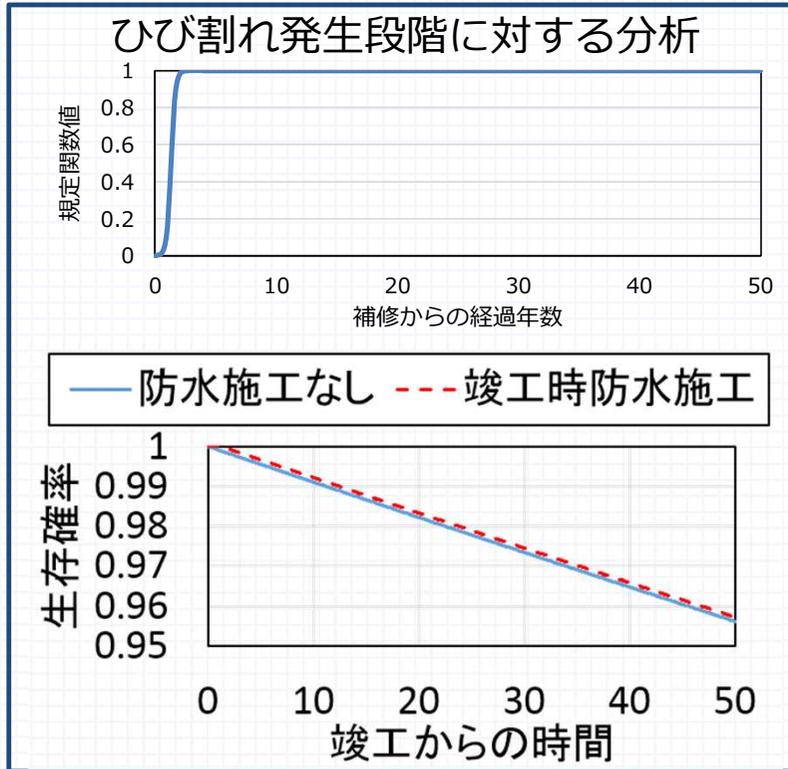
a) Brody関数, b) Von Bertalanffy関数, c) Logistic関数, d) Gompertz関数

情報量基準を用いることで最も適した規定関数を選定.

ひび割れ発生段階に対する分析		
データ諸元		
適用対象	高速道路橋のRC床版に発生する <u>ひび割れ</u>	
予防保全	床版防水	
点検年度	1986~2015	
獲得サンプル		
	事後点検時	
	損傷未発生	損傷発生
事前点検前に防水施工	62,506	1,770
点検間に防水施工	14,185	150
事後点検まで防水未施工	92,661	2,515

線形から亀甲状への進展に対する分析		
データ諸元		
適用対象	高速道路橋のRC床版に発生する <u>亀甲状ひび割れ</u>	
予防保全	床版防水	
点検年度	1986~2015	
獲得サンプル		
	事後点検時	
	損傷未発生	損傷発生
事前点検前に防水施工	1036	4
点検間に防水施工	186	0
事後点検まで防水未施工	4,861	109

変化率規定関数の推定結果



長寿命化技術導入効果の経時変化を定量的に評価

自動軸重計データを用いた マルコフ劣化ハザードモデル

現状

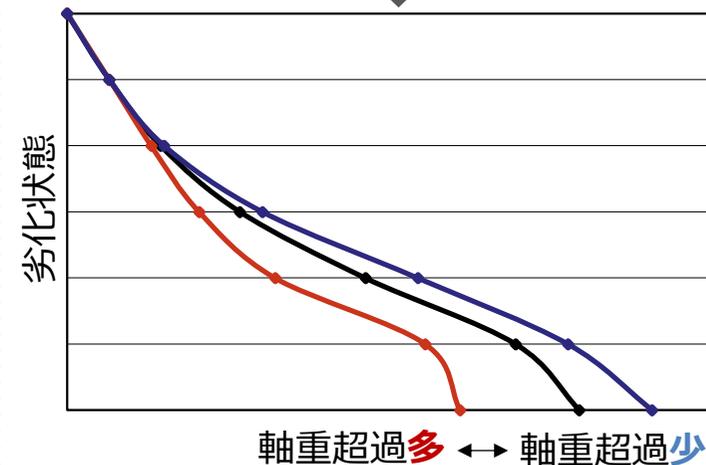
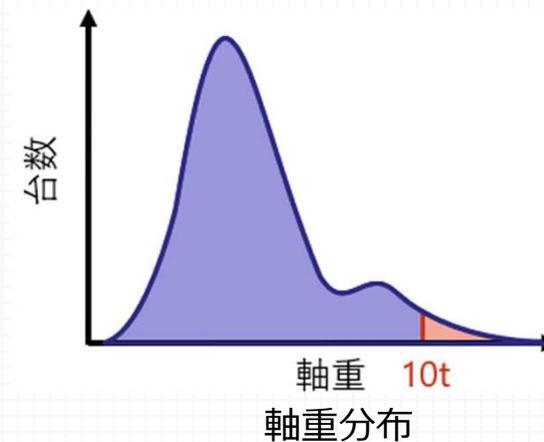
- 道路法に基づき通行車両の軸重に対して制限
- 各高速道路会社により車両の軸重計測を実施



- 現行モデルでは大型車交通量等へ数値化，説明変数として劣化予測モデルに導入し劣化予測を実施
- 交通量が同じである場合でも軸重分布が異なると劣化速度に差異が生じる可能性



獲得されている軸重分布を用いた劣化予測モデルの構築による劣化予測モデルの精緻化が必要



統計的劣化予測手法：多段階指数ハザードモデル

$$\theta_i = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2 + \beta_{i,3}x_3 + \dots + \beta_{i,n}x_n)$$

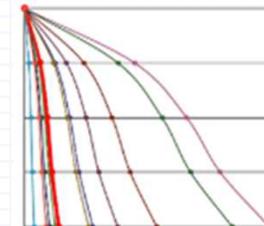
θ ：軸通過毎のハザード

β ：未知パラメータ

X ：説明変数



点検データ



劣化予測結果

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k z)$$

π_{ij} ： i から j に健全度が推移する確率

i ：事前健全度

j ：事後健全度

z ：2時点間の通過軸数

- ハザードは連続的に定義されるため、通過軸数についても連続的に表現可能であると仮定



多段階指数ハザードモデルにおいて従来、時間で評価していたモデルを軸数として評価

■ 分析対象路線

高速道路会社が管理する2路線

➡ 交通量，舗装厚は概ね同じ

■ 分析対象とする指標

2005~2021年にかけて当該路線に対して実施された路面性状調査結果を利用
特にIRIを対象とし，共に上り線，土工部に限定

➡ モデルの特徴上，測定された連続値を離散的な指標に再構成

■ 自動軸重計データ

2021/10月~2022/9月にかけて，各路線内の料金所で自動軸重計により測定されたデータ

➡ 10t軸に換算し，各路線で10t軸換算係数が一定と仮定
軸重分布，および交通量に経年変化はないものと仮定

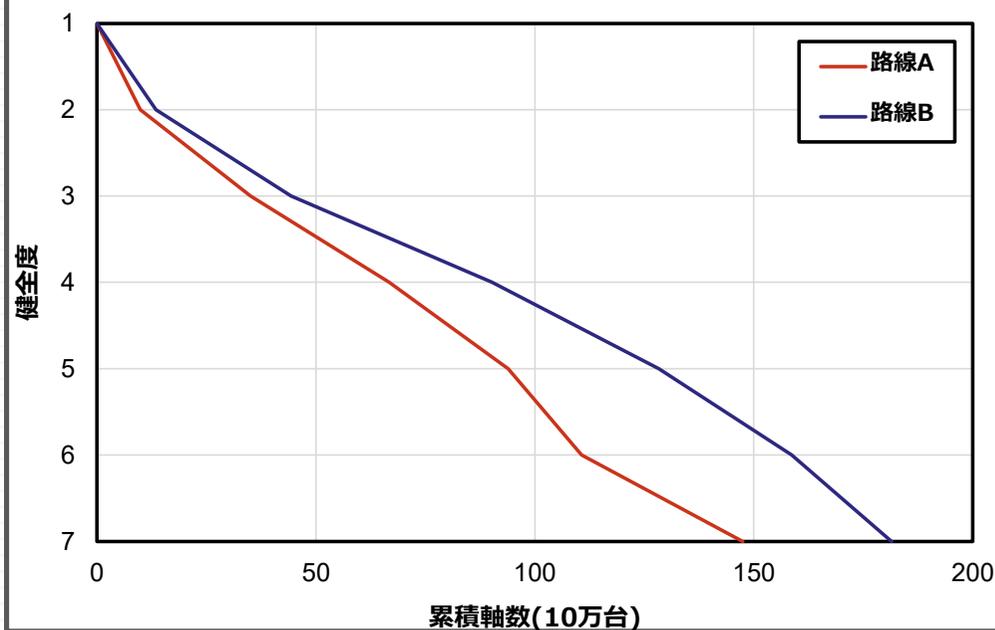
IRIの健全度への変換

IRI(mm/m)	Rank
$IRI = 1.0$	1
$1.0 < IRI \leq 1.5$	2
$1.5 < IRI \leq 2.0$	3
$2.0 < IRI \leq 2.5$	4
$2.5 < IRI \leq 3.0$	5
$3.0 < IRI \leq 3.5$	6
$3.5 < IRI$	7

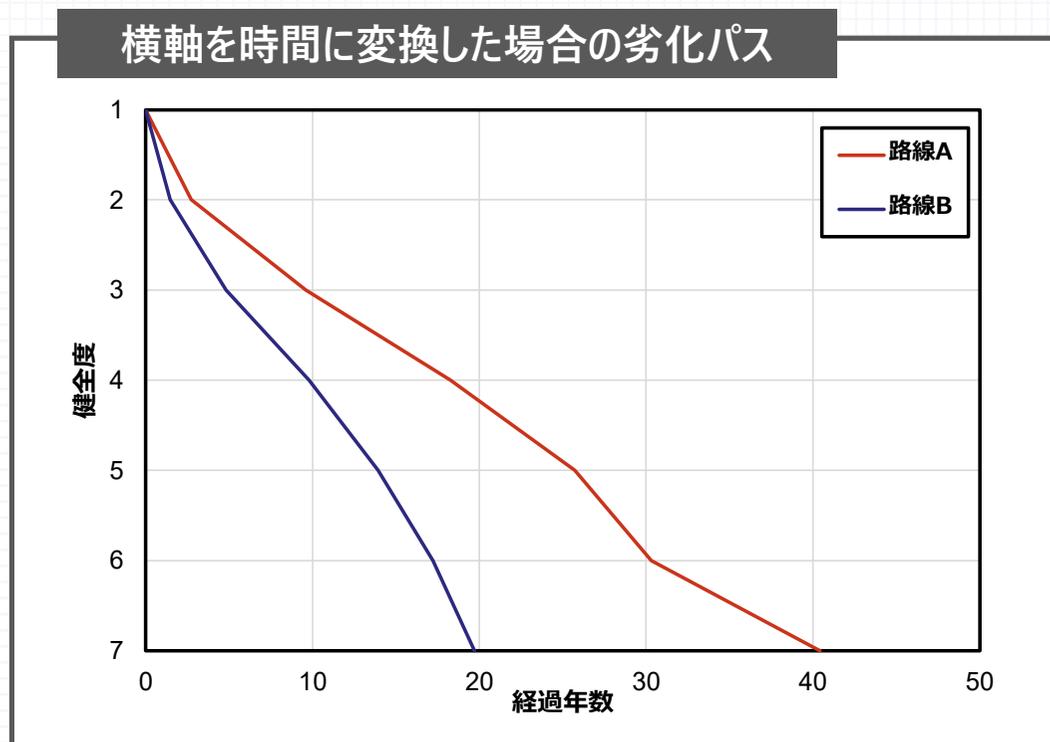
パラメータ推定結果

Rank	定数項	説明変数 (路線A = 1, B=0)
1	-2.600	0.302
2	-3.429	0.205
3	-3.825	0.371
4	-3.642	0.339
5	-3.413	0.594
6	-3.127	-0.480

劣化予測結果

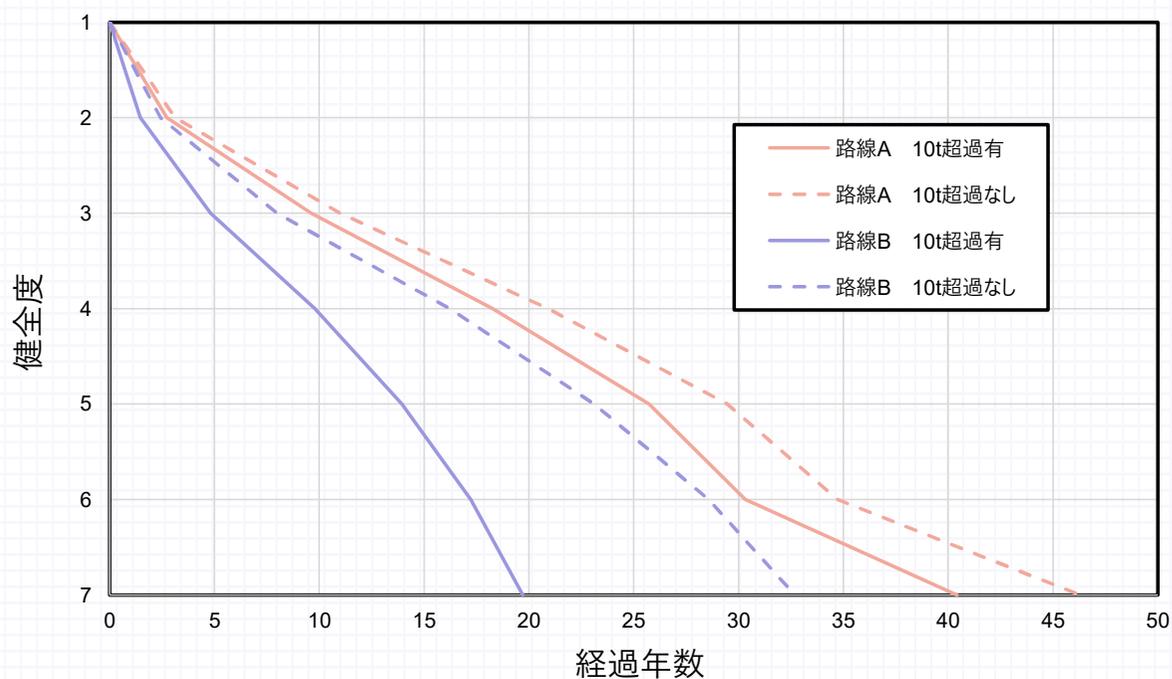


- 通過軸数の増加に伴う各路面指標の劣化予測を実施
 - 6 → 7推移を除いた全てのRankにおいて、路線Aのダミー変数が正
- ➡ 累積軸数が同じ場合は路線Aの方が劣化が速い可能性が示唆



- 10t軸超過の観測数は路線A < 路線B
- 10t軸換算係数についても路線A < 路線Bであり、より軸重が大きい車両の通行が多い
- 各健全度への到達寿命で比較する場合、路線A > 路線B

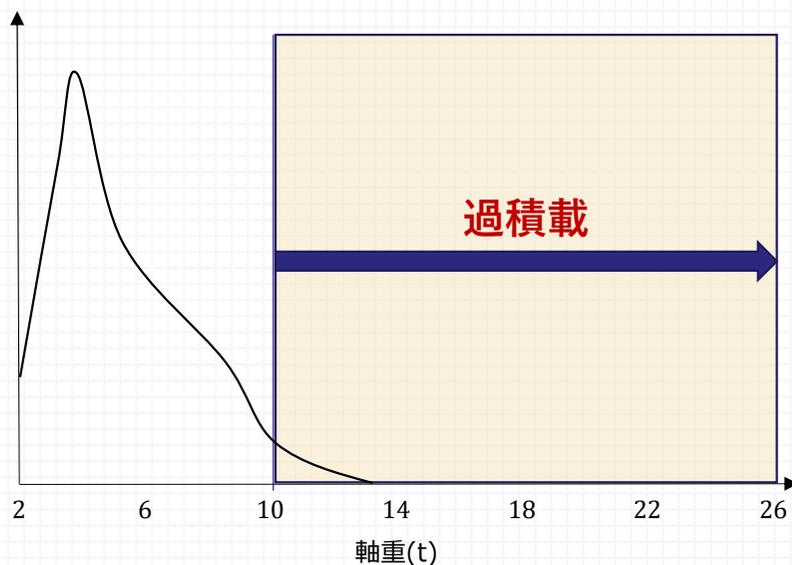
10t軸超過車両が存在しない場合の劣化曲線



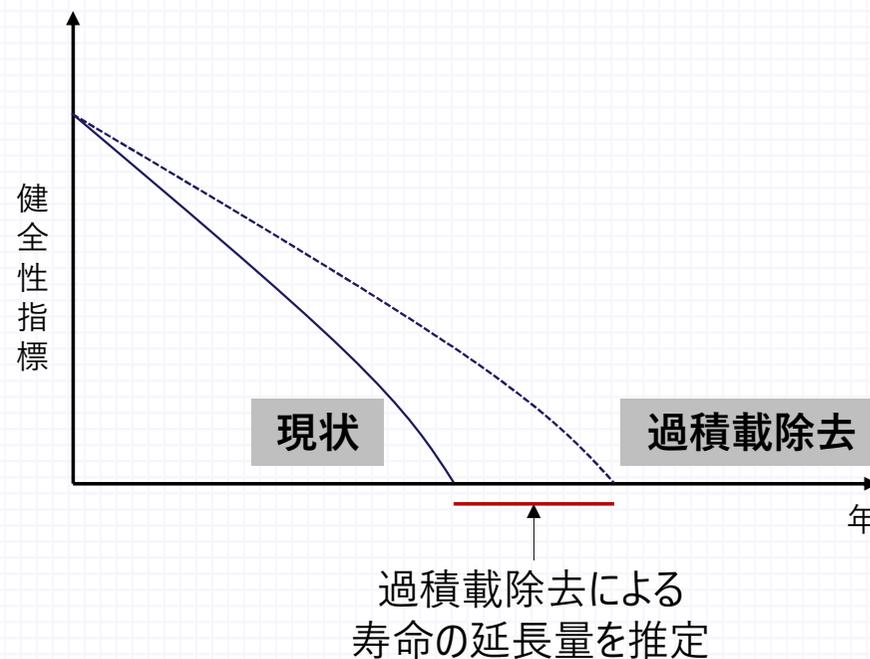
- 超過軸重の影響で寿命が大きく変化することが示唆される
- ただし、超過車両が法定軸重を満たすよう転換することは想定しておらず、交通量それ自体も減少していることに注意

今後の展望 自動軸重計データの利用

軸重分布



イメージ図



過積載車両の通行、および法改正に伴う通行車両の重量変化による
高速道路資産への影響を定量的に評価

参考資料



■ 国内学会

- 川本熙鷹, 中村和博, 小濱健吾, 貝戸清之: 連続量劣化ハザードモデルを用いた高速道路舗装の平たん性に対する劣化予測, 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会, 土木学会, DVD-ROM, V-8, 関西大学, 2022.5
- 川本熙鷹, 中村和博, 小濱健吾, 貝戸清之: 連続量を用いた劣化ハザードモデルによる高速道路舗装に対する統計的劣化予測, 2022年度 第27回 舗装工学講演会, 土木学会, 講演NO.034, 北海道科学大学, 2022.8
- 川本熙鷹, 中村和博, 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.3005, 琉球大学, 2022.11
- 四方滉也, 中村和博, 笹井晃太郎, 小濱健吾, 貝戸清之: 自動軸重計データの高速道路舗装マネジメントへの適用に関する一考察, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, 2023.8 (予定)

■ 論文

- 貝戸清之, 慈道充, 水谷大二郎, 小林潔司, 宇野裕亮: 段階的劣化異質性に基づく長寿命化技術導入効果の事後評価, 土木学会論文集F4, Vol.78, No.1, pp.99-117, 2022.5
- 中村和博, 松本大二郎, 小濱健吾, 川本熙鷹, 貝戸清之: 路面性状調査と日常点検のデータ連携に基づく 高速道路舗装の新たな修繕施策, 土木学会論文集E1, Vol.78, No.2, pp.I_200-I_210, 2023. 2