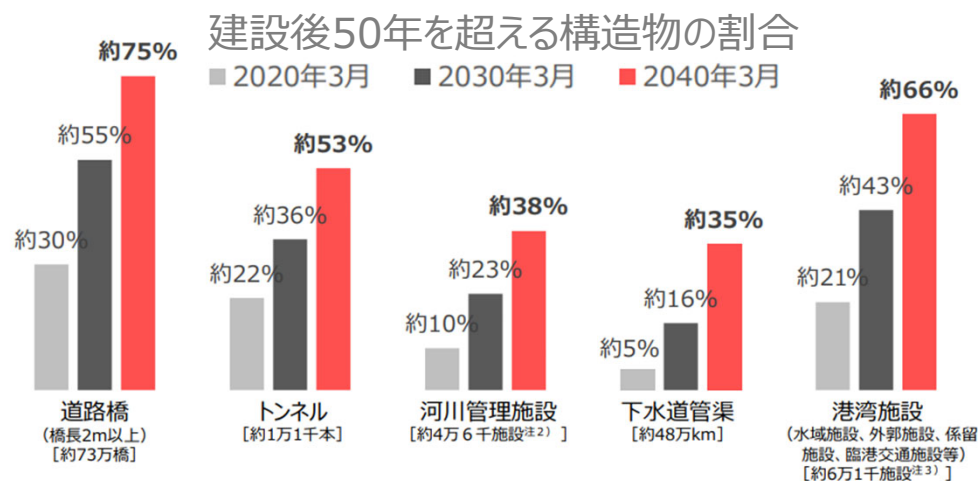
**SiP**

疲労・劣化解析デジタルツインを
活用したインフラメンテナンスサイクル

2025/11/4

東京大学 高橋佑弥

■主に高度経済成長期に整備した構造物群の劣化が進行



建設後50年以上経過する施設が
加速度的に増加

(国交省HPより。 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html)

■道路橋の床版の維持管理の状況



➡ 抜け落ち発生

アスファルト下で劣化が潜在的に進行
→ 上面で顕在化した時点では…

多くの管理主体で予算が足りず、劣化が顕在化した箇所
から 後手後手の補修を行っている現状にある。

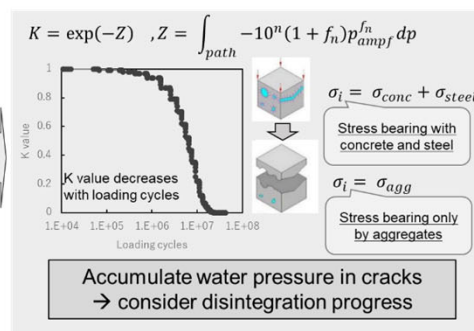
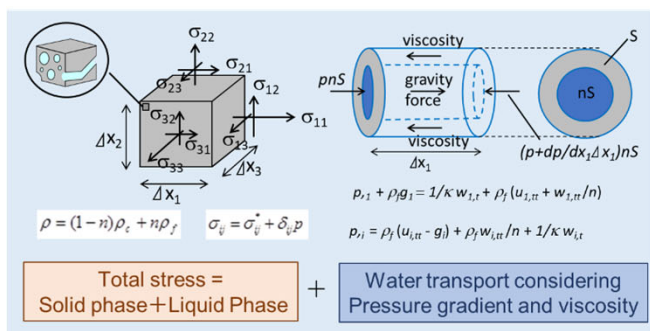
解析技術を用いた定量評価・予測の迅速化により、維持管理のDXの推進が可能となる

予防保全的維持管理への転換へ

疲労挙動を含む、コンクリートの圧縮・引張・せん断の力学構成則

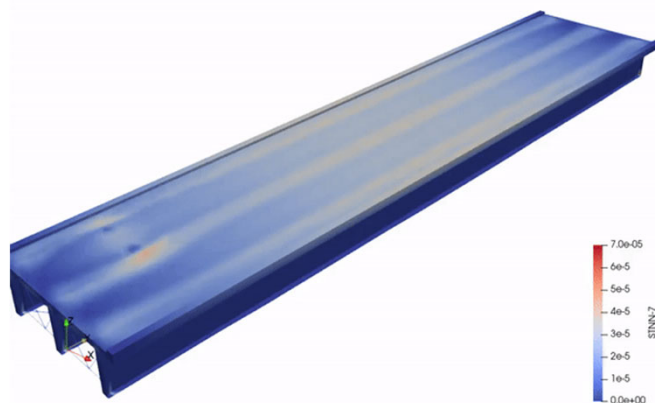
	Compression	Tension	Shear Transfer
Core-constitutive law	<p>Normal stress-strain</p> $\sigma = E_0 K_C \varepsilon_e$ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ <p>Elasto-plastic (Maekawa et al. 2003)</p>	<p>Normal stress-strain</p> $\sigma = E_0 K_C \varepsilon_e$ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ <p>Tension softening (Maekawa et al. 2003)</p>	<p>Shear stress-Slip</p> $\tau = \tau_0(\delta, \omega)$ <p>(Maekawa et al. 2003)</p>
Enhanced model for fatigue	$dK_C = \left(\frac{\partial K_C}{\partial t} \right) dt + \left(\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e} \right) d\varepsilon_e$ <p>Time dependency Cyclic fatigue (El-Kashif & Maekawa 2004)</p>	$dK_T = \frac{F dt}{G} + \frac{G d\varepsilon_e}{F}$ <p>Time dependency Cyclic fatigue (Maekawa et al. 2003)</p>	$\tau = X \cdot \tau_0(\delta, \omega)$ $X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int d(\delta/\omega) \right\}$ <p>(Maekawa et al. 2006)</p>

ひび割れや空隙中の水圧を考慮出来る固液二相モデル

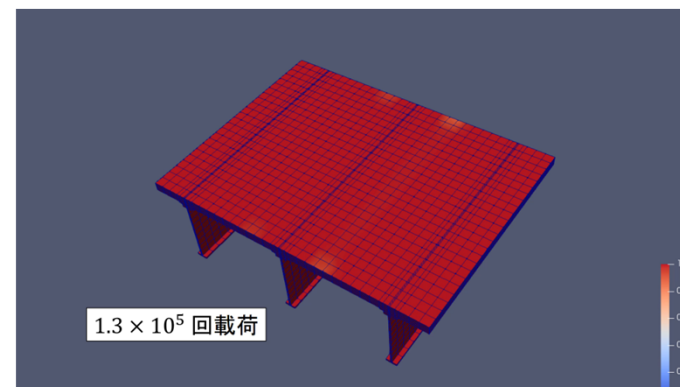


湿潤疲労や、
床版上層の土砂化進展も計算可

床版の輪荷重疲労解析



上層の土砂化進展の様子



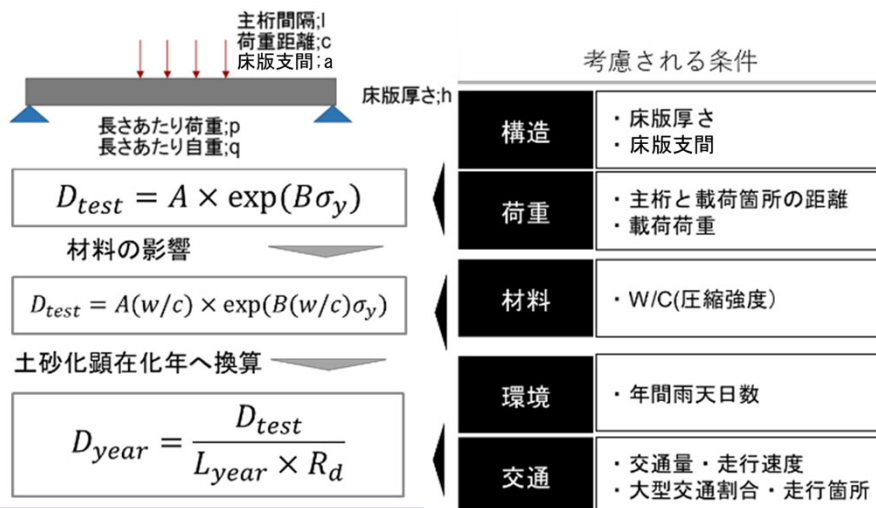
橋梁床版の余寿命評価が可能

土砂化(疲労)進展の簡易評価式



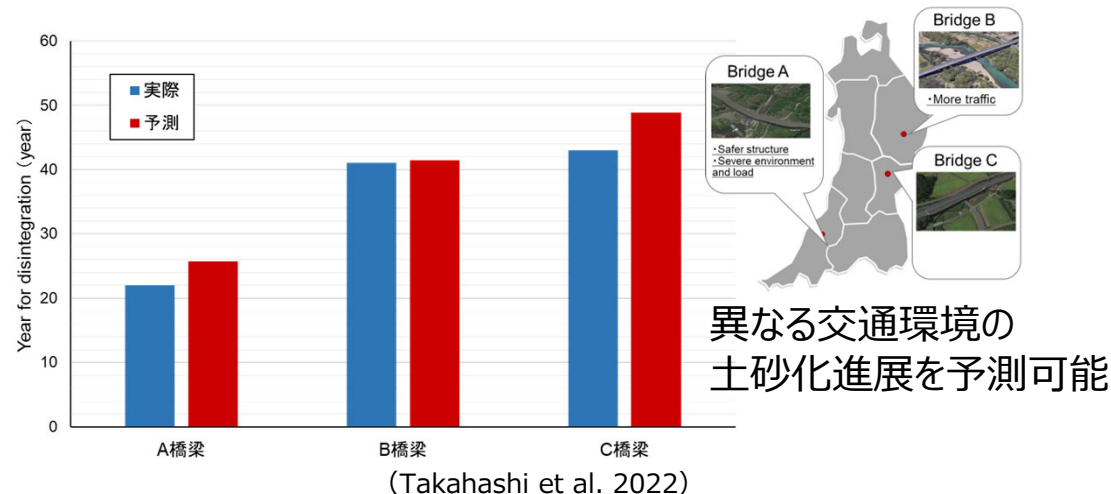
COM3による網羅的感度解析からパラメータの影響度を導出

○全国の橋梁床版の劣化ポテンシャル評価

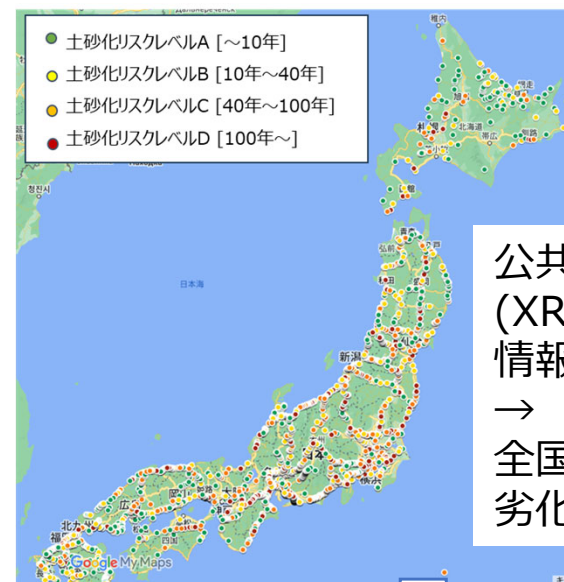


土砂化予測式

構造諸元や交通量等から劣化速度を迅速算出

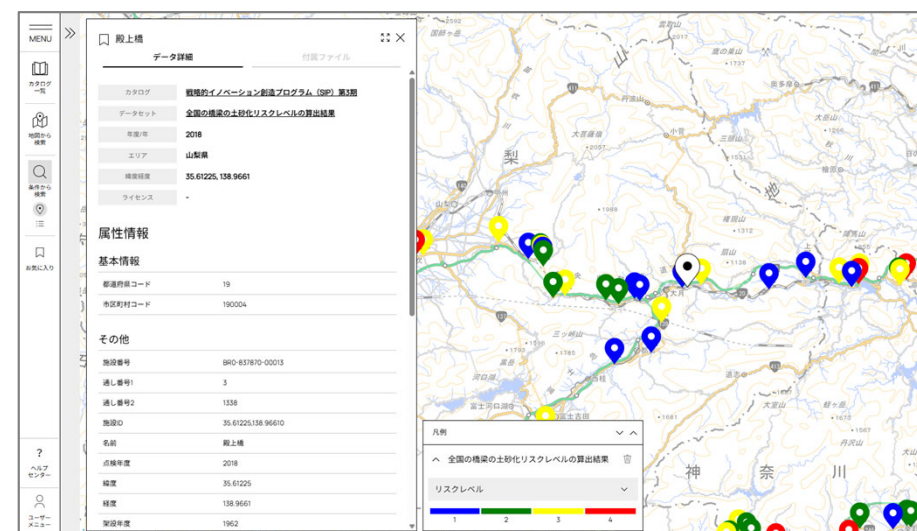


適用



公共データベース
(XROAD)から
情報自動抽出
→
全国3500橋の
劣化ポテンシャル比較

国交DPFへ掲載・公開の予定



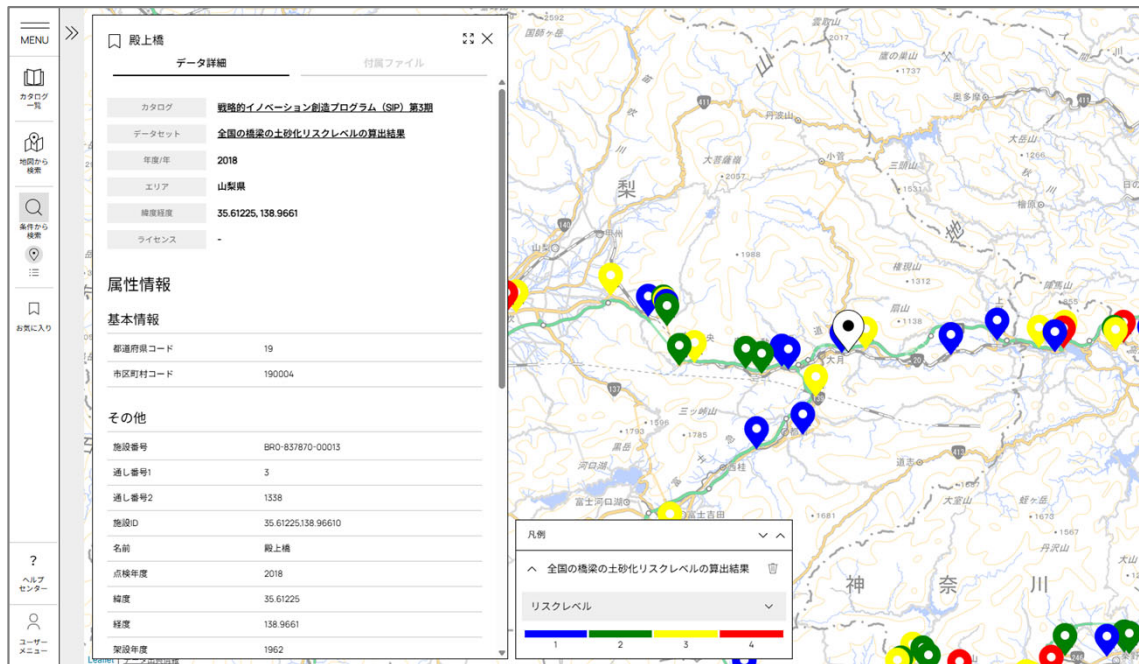
- ① 公共データベースを活用した橋梁群RC床版の
疲労・土砂化劣化速度の簡易評価
- ② フルスケール解析を活用した
床版余寿命評価と補修・補強の合理化

**① 公共データベースを活用した橋梁群RC床版の
疲労・土砂化劣化速度の簡易評価**

**② フルスケール解析を活用した
床版余寿命評価と補修・補強の合理化**

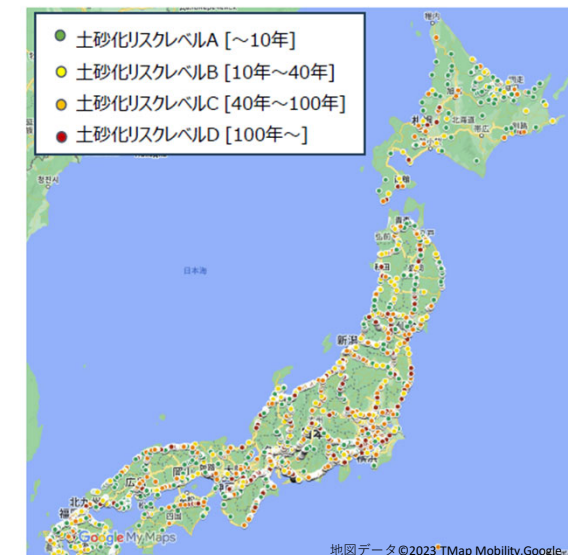
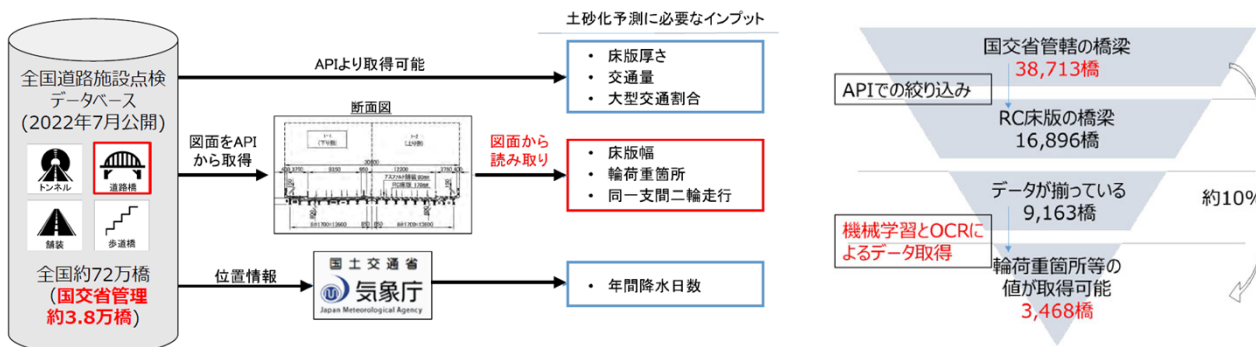
データ提供：全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果

- SIPインフラのサブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」の取組みの1つとして、公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の土砂化リスクレベルを算出。



カタログ	戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期
データセット	全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果
検索・閲覧	可能
ダウンロード	可能
データ提供者	SIPインフラ サブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」 東京大学大学院工学系研究科

XROADなどの公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の構造リスクを算出。



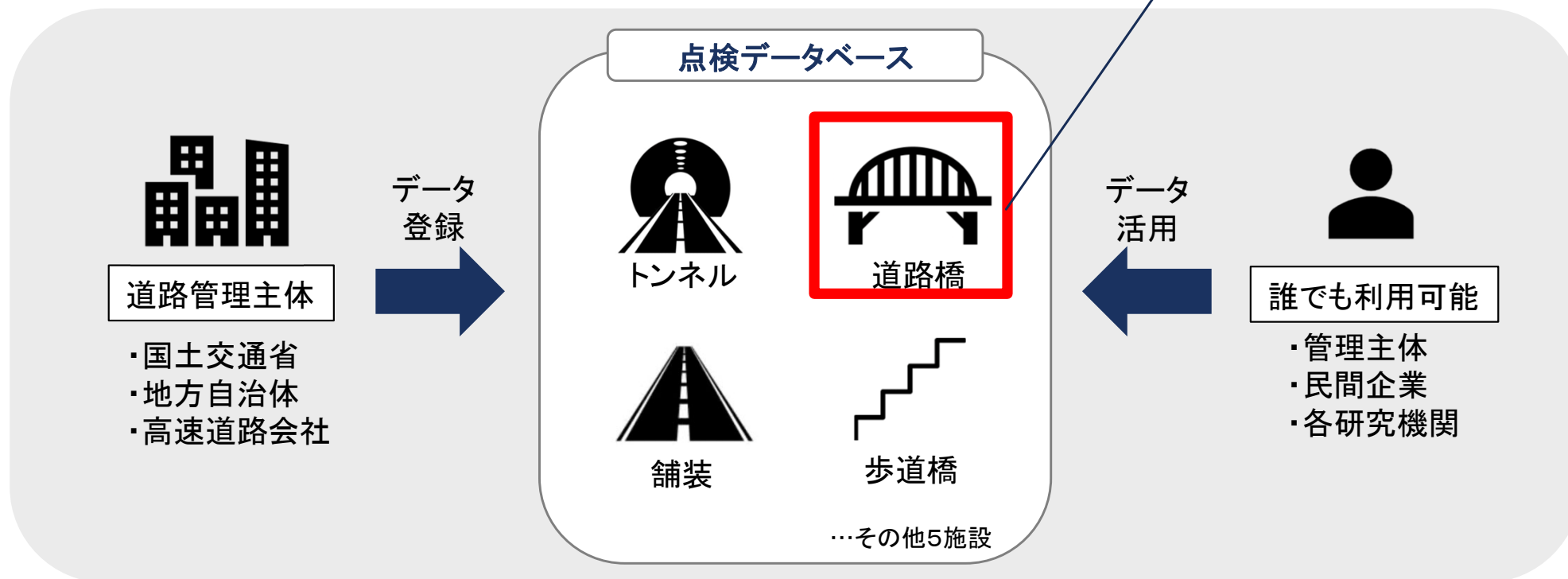
全国道路施設点検データベース(XROAD)について

4

データベースの概要

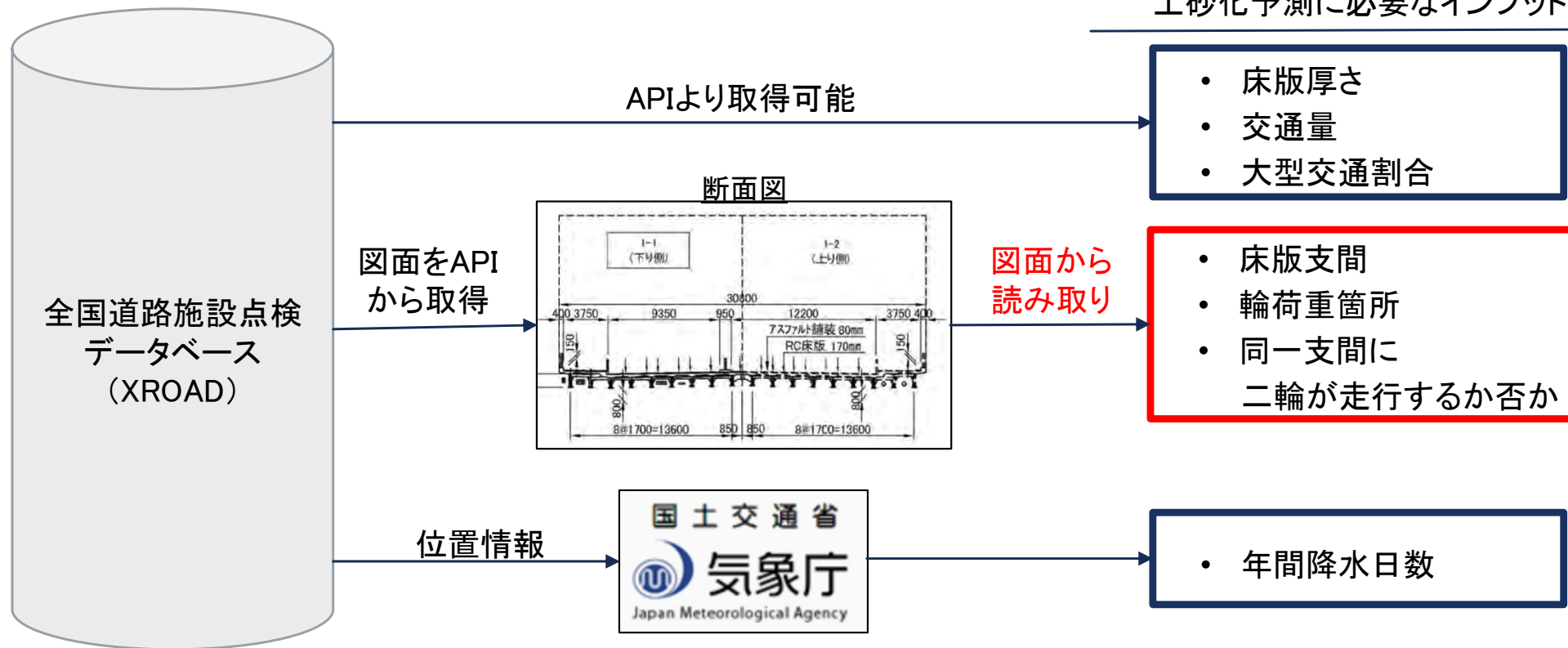
- 道路施設の様々な情報を集約したデータベース群
- 2022年7月に公開された
- APIが公開されており、データの活用・分析が可能

全国約72万橋
そのうち国交省管理 約3.8万 橋
→詳細データ約1400項目:構造諸元、点検結果、補修履歴等



点検データベースからデータの取得

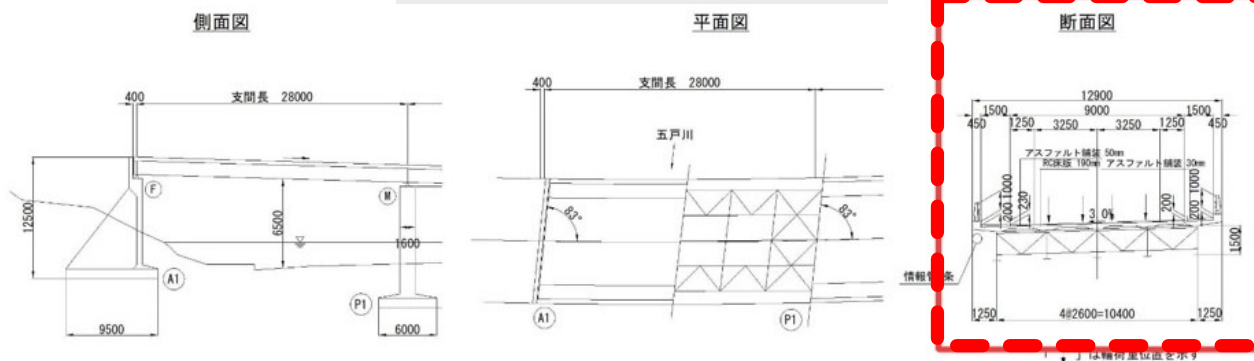
土砂化予測に必要な入力



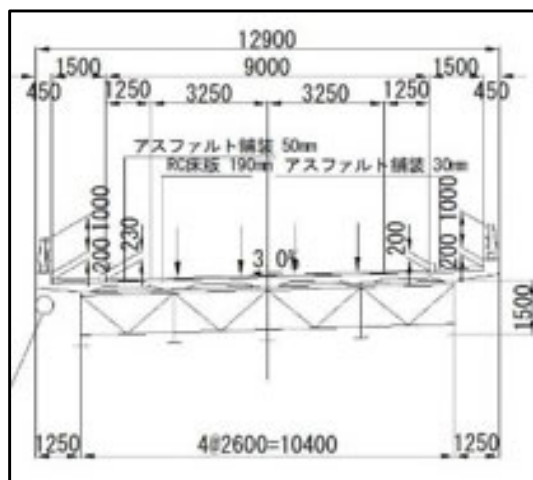
点検データベースから土砂化予測に必要な入力を揃えることが可能だが、
一部データは図面から読み取る必要がある

点検データベースからデータの取得

APIから取得可能な一般図



①



②

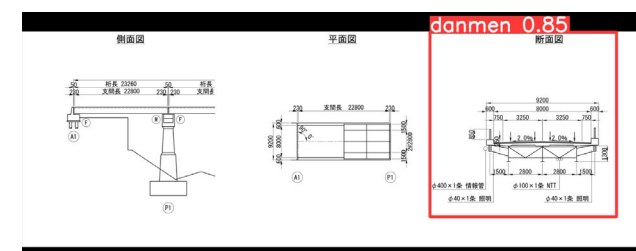
12900
1500
9000
1500
4@2600=10400
1250

輪荷重箇所等
の値を算出

※桁と車線の位置関係が重要

①

YOLOv8(物体検出アルゴリズム)を用いて断面図を抽出

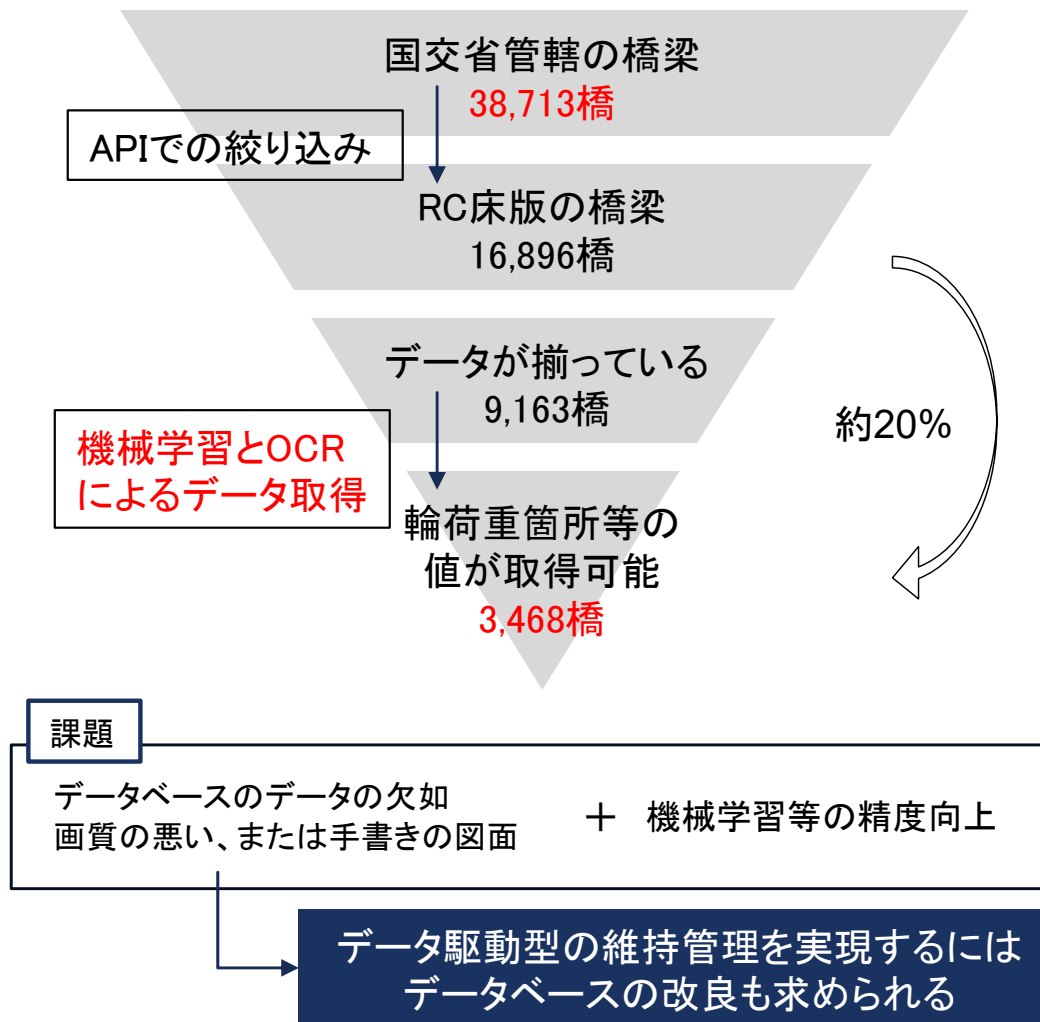


検出結果の例

②

Google Drive API のOCRを用いて
主桁間情報の抽出

点検データベースからデータの取得



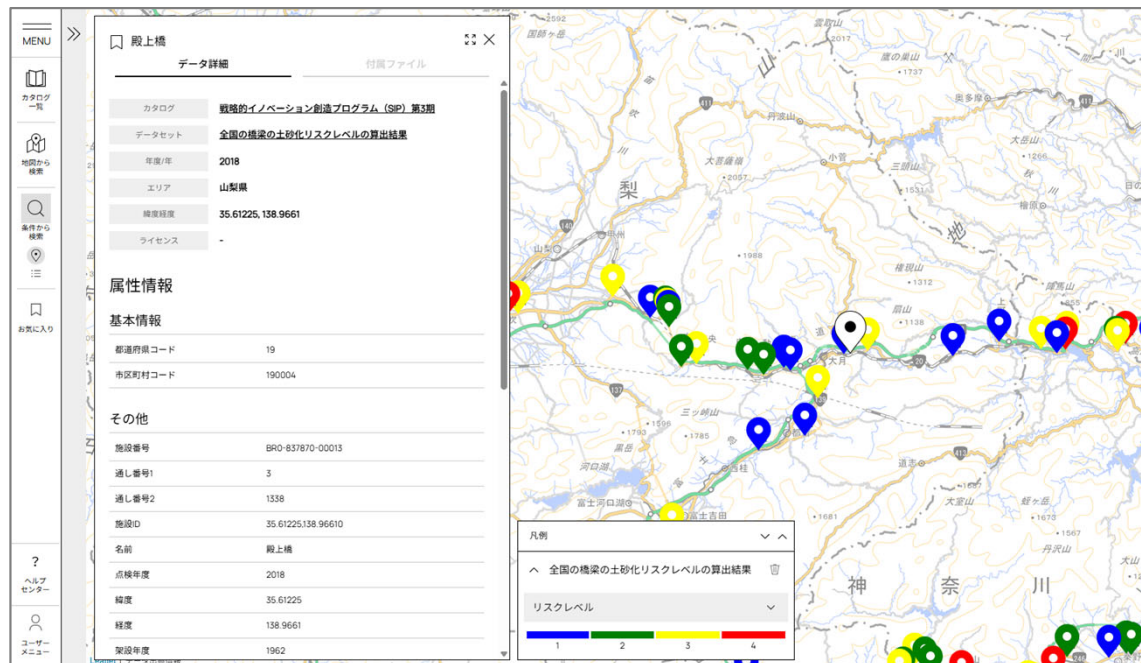
土砂化予測年の可視化マップ



国交省管轄のみならず、他の管理橋梁にも水平展開可能、維持管理への応用

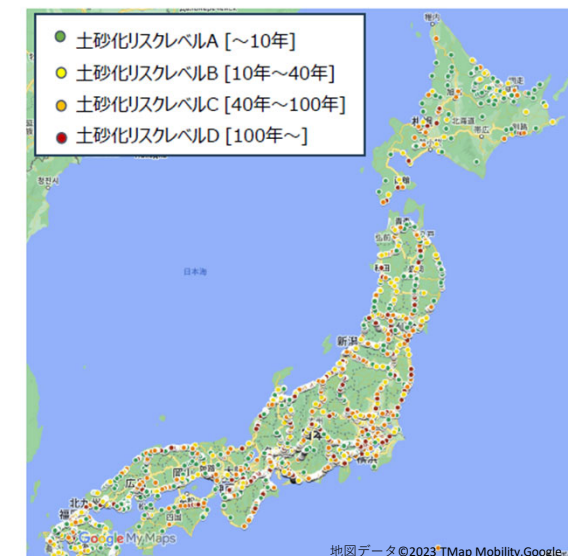
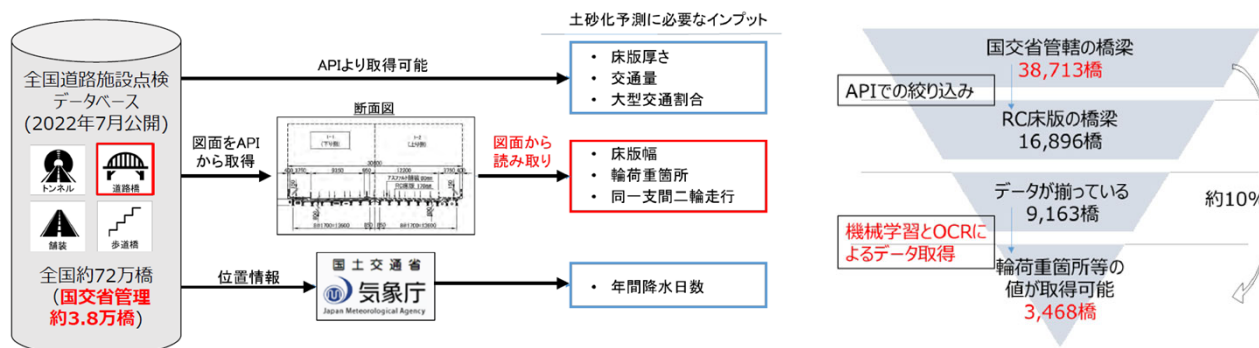
データ提供：全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果

- SIPインフラのサブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」の取組みの1つとして、公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の土砂化リスクレベルを算出。

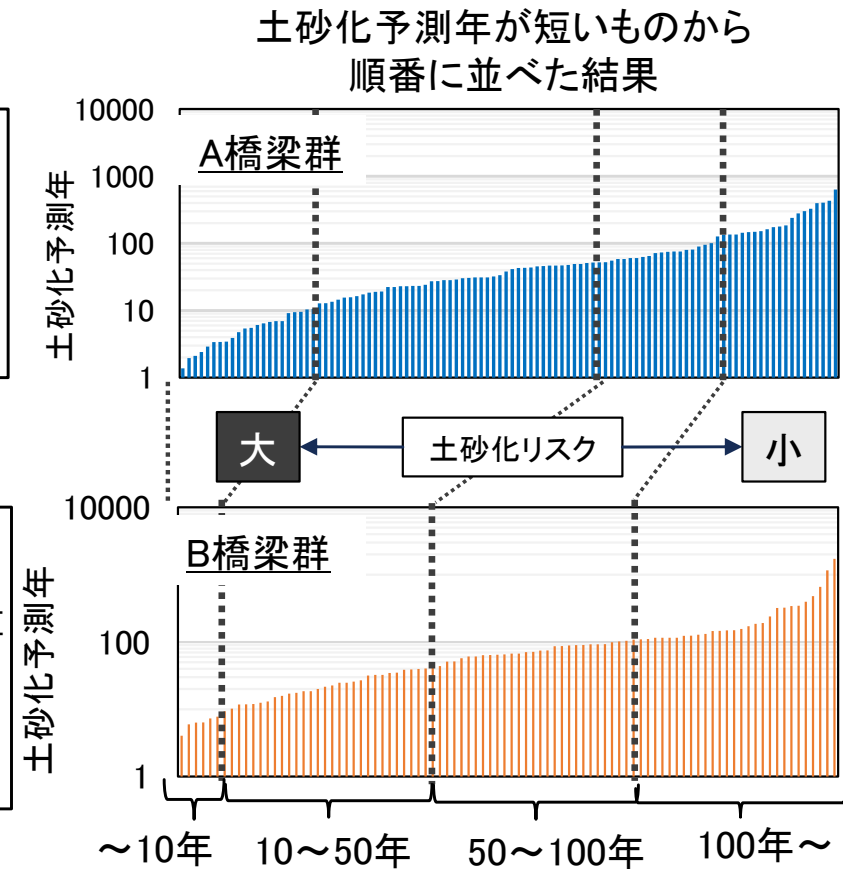
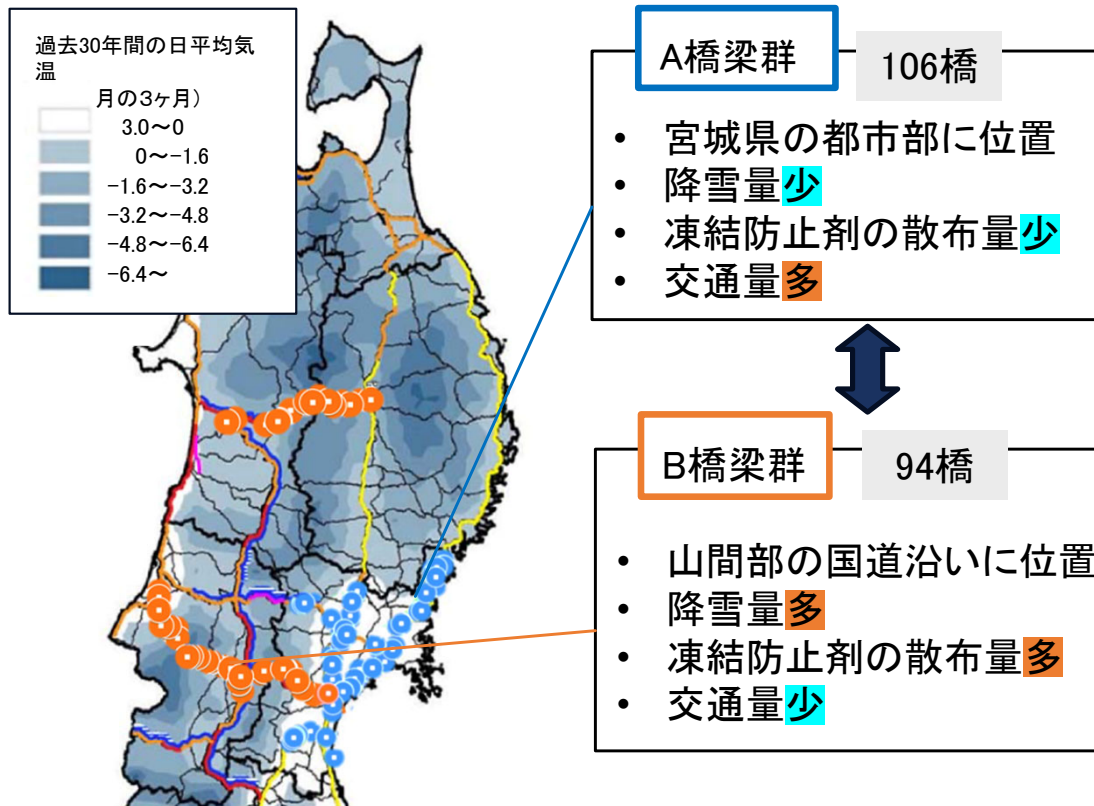


カタログ	戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期
データセット	全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果
検索・閲覧	可能
ダウンロード	可能
データ提供者	SIPインフラ サブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」 東京大学大学院工学系研究科

XROADなどの公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の構造リスクを算出。



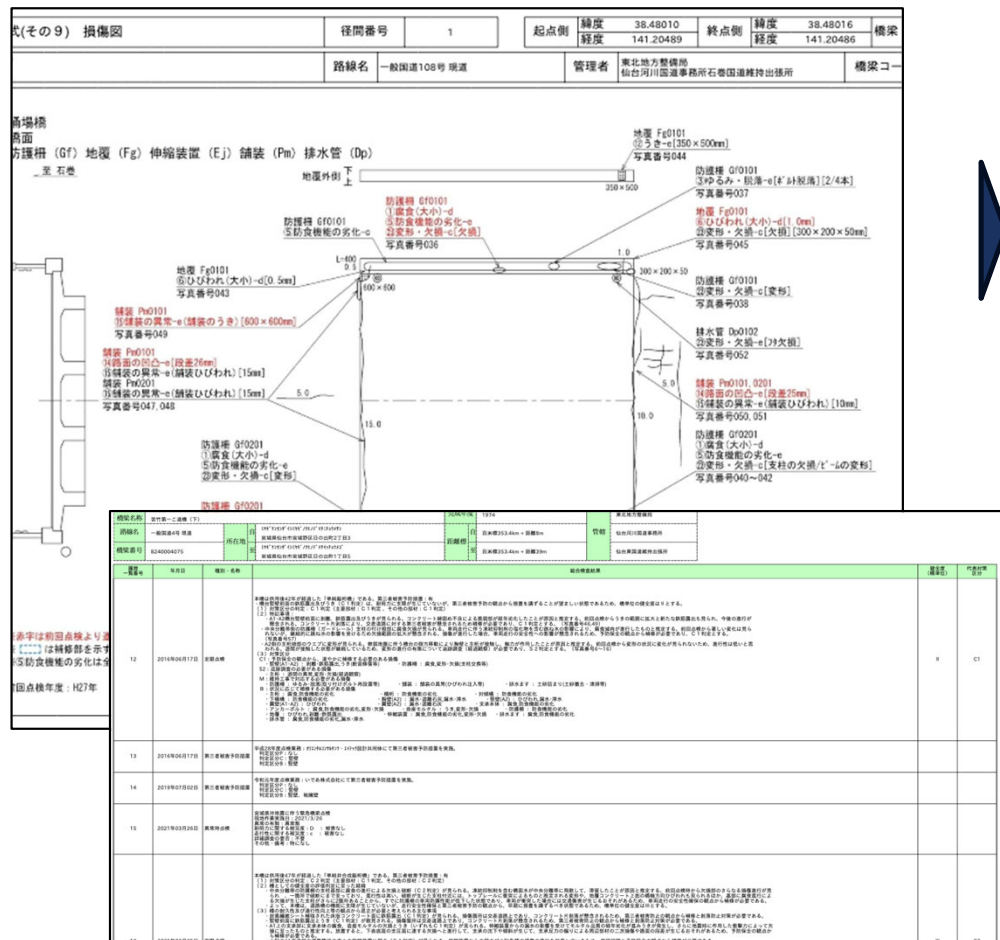
土砂化予測式による劣化速度評価—対称橋梁群の選定—



構造と交通の多様な状況から
多様な土砂化予測年が算出される

土砂化予測式による劣化速度評価ー損傷状況の確認ー

点検結果等を参考に実際の損傷状況の確認



4つのレベルに分類

損傷レベル① 比較的健全

(土砂化は未発生と推測)

損傷レベル② 深刻な損傷に発展する可能性のある床版

(土砂化の可能性が少しある)

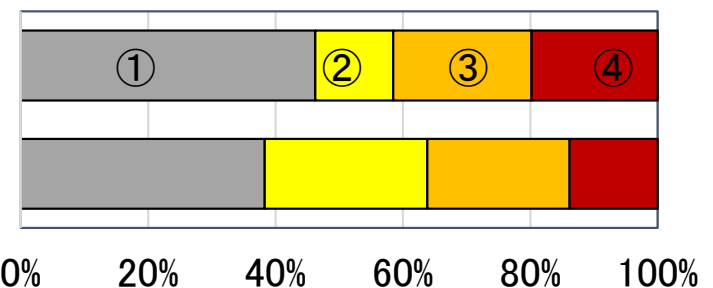
損傷レベル③ 深刻な床版損傷

(土砂化の可能性が高い)

損傷レベル④ 土砂化をすでに確認

A橋梁群

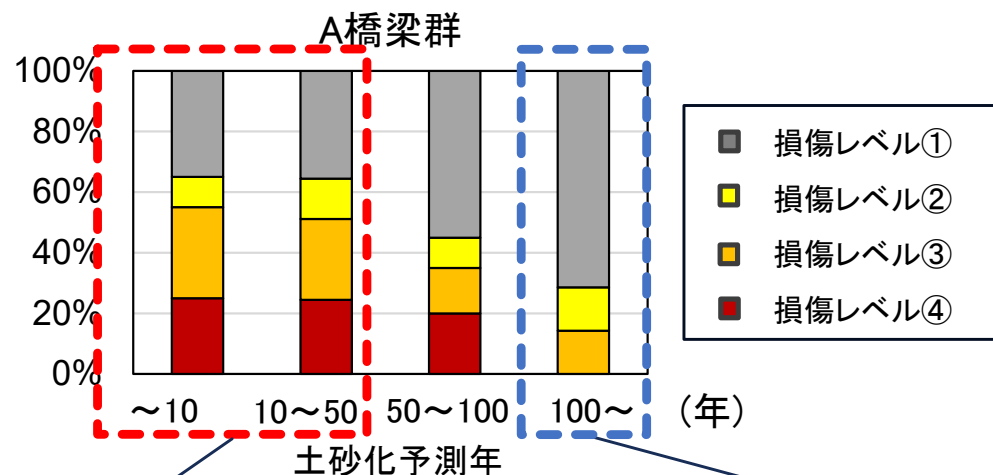
B橋梁群



→土砂化予測式の結果との比較を行う

土砂化予測式による劣化速度評価—妥当性の検証—

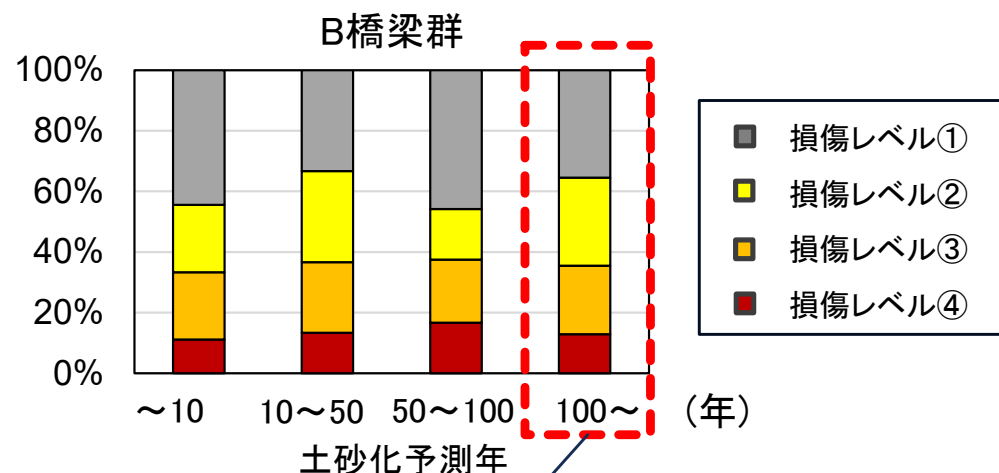
土砂化予測式による土砂化予測年と実際の損傷状況を比較



土砂化予測年が短いグループは
損傷が進行している橋梁が多い

予測年が長いと
比較的健全な橋梁が多い

土砂化予測式によるリスク評価のある程度の妥当性を確認



土砂化予測年は長いはずだが、
土砂化が発生している橋梁が多い

土砂化予測式では考慮できない
材料劣化や初期欠陥が大きく影響していると
考えられる

結果の活用にあたっての留意事項

- ・交通荷重による劣化が支配的な橋梁について、劣化速度の大小のスクリーニングに用いることが可能と考える。
- ・材料劣化や初期欠陥の状況については、評価の入力に入っていないため、当然ながら評価はできない。

本情報と、点検結果などの構造物の実情の情報を組み合わせることで、合理的な判断が可能と考える。

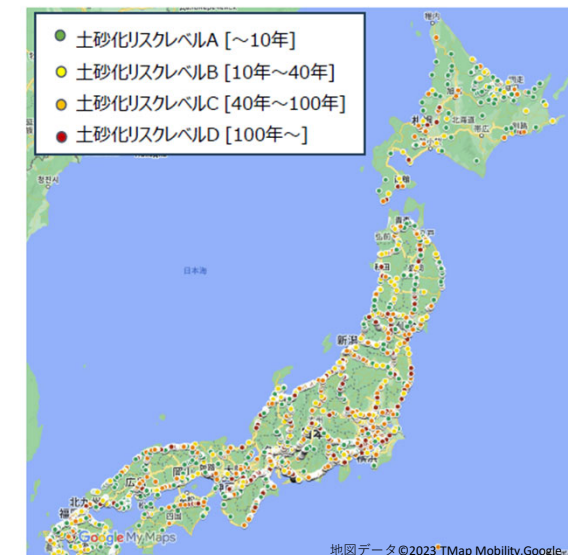
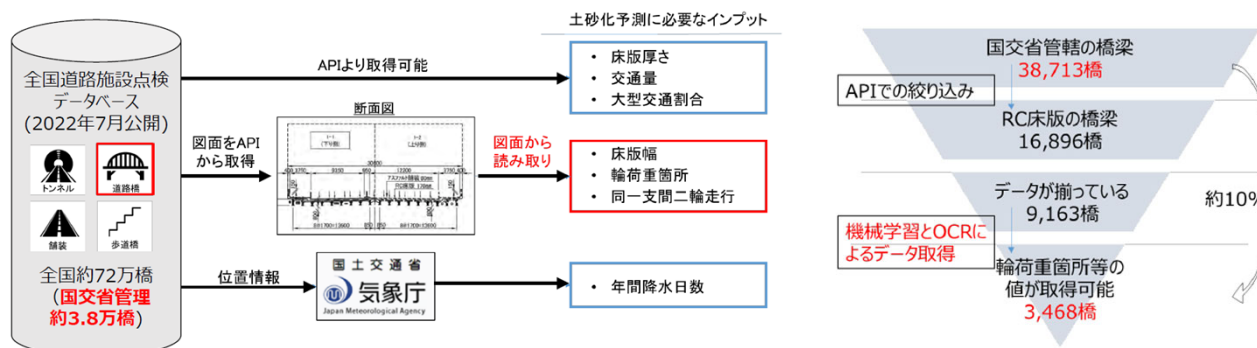
データ提供：全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果

- SIPインフラのサブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」の取組みの1つとして、公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の土砂化リスクレベルを算出。



カタログ	戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期		
データセット	全国の橋梁の土砂化リスクレベルの算出結果		
検索・閲覧	可能	ダウンロード	可能
データ提供者	SIPインフラ サブ課題D「サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用」 東京大学大学院工学系研究科		

XROADなどの公共データベースから構造的計算のための情報を取得し、全国の橋梁の鉄筋コンクリート床版の構造リスクを算出。



土砂化予測式のSaaS化（アプリ提供）



スマートインフラマネジメントシステムの構築



スマート防災ネットワークの構築

■ 操作の流れ

■ 橋梁の選択→計算条件入力→計算実行→可視化（地図上にプロット）

■ 橋梁の選択方法

■ 以下から該当橋梁を一括で選択

- ・ 橋梁名
- ・ 地整名
- ・ 事務所名
- ・ 道路名

■ 地図上から選択

- ・ 道路単位で指定
- ・ マウスで範囲指定、等

Key パラメータ

項目名	パラメータ	サンプル値	省略時
名称	bridge_name	〇〇橋（例：市ノ瀬橋）	すべての施設
路線番号	route_code	4桁数字（例：0007）	すべての路線
地整	area_value	北海道開発局，東北，関東，…，沖縄	すべての地整
事務所	office_value	北海道開発局は××開発建設部，…北海道開発局以外は〇〇河川国道，△△国道	すべての事務所
出張所	sub_office_value	□□国道維持	すべての出張所

項目名	パラメータ	サンプル値	省略時
起点側所在地	start_addr	〇〇県△△市…	全国
起点側北緯	latitude	38.57519	すべての範囲
起点側東経	longitude	139.55745	すべての範囲
健全度コード	soundly_code	I～IV（例：II）	すべての健全度

橋梁選択

土砂化予測計算

絞り込み条件

地方整備局
関東

事務所
首都国道

路線
国道14号

絞り込み

表示	橋梁名	路線ID	架設施工年	土砂化予測年	地方整備局	事務所	路線	橋梁形式	床版の厚さ	床版の幅	床版の長さ	床版の圧縮強度	年間降水量	載荷位置	12時間あたり交通量	大型車の交通量割合	高速道路であるかの指定	12時間あたり交通量
<input type="checkbox"/>			1974	5	東北		46号	PC桁橋	25	800	1500	350	120	10	3000	30	0	0
<input type="checkbox"/>			1973	20	東北		46号	PC桁橋	25	800	1500	350	120	10	3000	30	0	0
<input type="checkbox"/>			1961	55	東北		46号	PC桁橋	25	800	1500	350	120	10	3000	30	0	0
<input type="checkbox"/>			1968	155	東北		46号	PC桁橋	25	800	1500	350	120	10	3000	30	0	0
<input type="checkbox"/>			1970	3	東北		46号	PC桁橋	25	800	1500	350	120	10	3000	30	0	0

計算条件入力

計算条件入力

土砂化予測計算

計算条件を入力してください。

床版の厚さ(cm)
0.00

床版の幅(cm)
0.00

床版(RC)の圧縮強度(kgf/cm²)
30.00

年間降水量(日)
0

載荷位置(cm)
50

12時間あたり交通量(台)
0

大型車の交通量割合(%)
20.00

高速道路指数
☐ はい ☒ いいえ

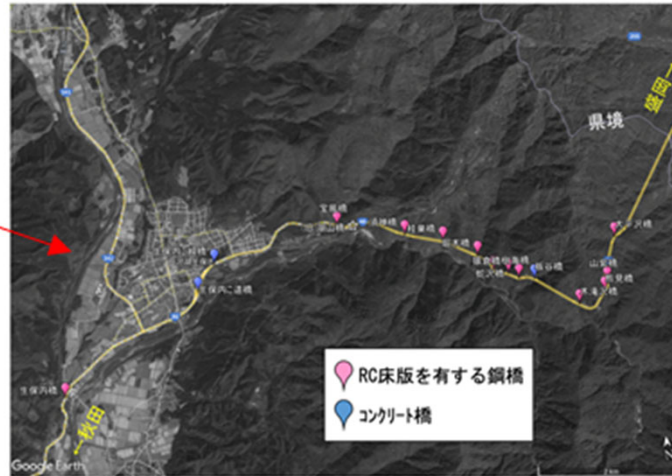
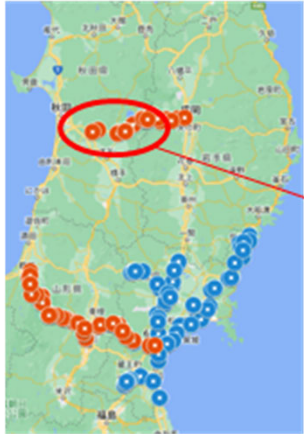
フルスケールモデルである
☐ はい ☒ いいえ

国交DPF連携公募にて提供予定

① 公共データベースを活用した橋梁群RC床版の
疲労・土砂化劣化速度の簡易評価

② フルスケール解析を活用した
床版余寿命評価と補修・補強の合理化

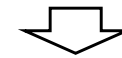
・岩手県境から秋田側へ約11kmの区間にRC床版を有する橋梁が12橋



寒冷地・凍結防止剤散布の厳しい
環境に置かれた12橋梁のRC床版



劣化が顕在化
深刻化



どの橋梁からどのように手立てをしていくべきか



①

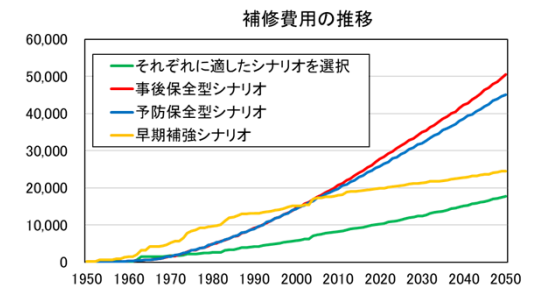
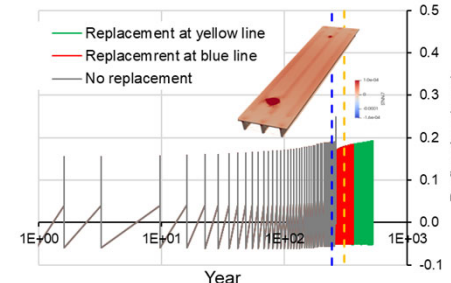
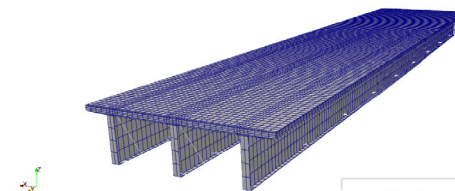
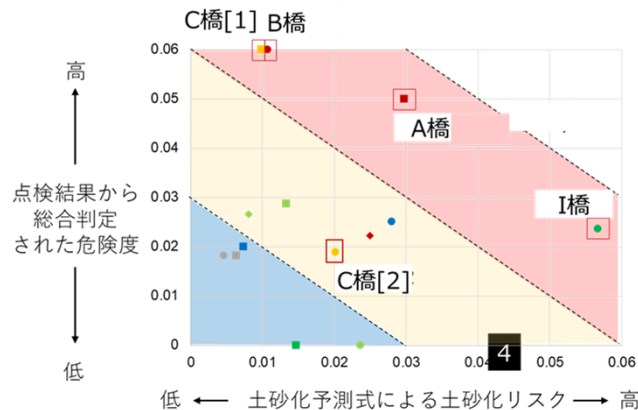
簡易式によるスクリーニング
(重点橋梁の抽出)

②

COM3(FEM)による
現状・補修/補強効果の評価

③

予防保全
に向けたLCC算定



土砂化予測式

$$D_{test} = A(w/c) \times \exp(B(w/c)\sigma_y)$$

土砂化顕在化年へ換算

$$D_{year} = \frac{D_{test}}{L_{year} \times R_d}$$

R_d ; 年間降水日数割合 L_{year} ; 換算年間交通量
土砂化パラメータへ換算

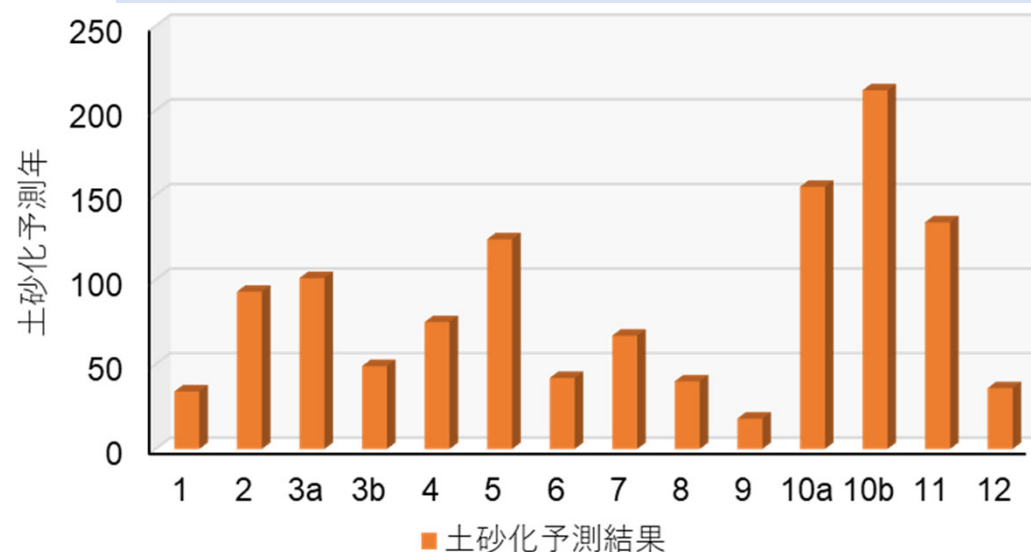
$$V = 1/D_{year}$$

$$D_p = 1.0 - V \times t$$

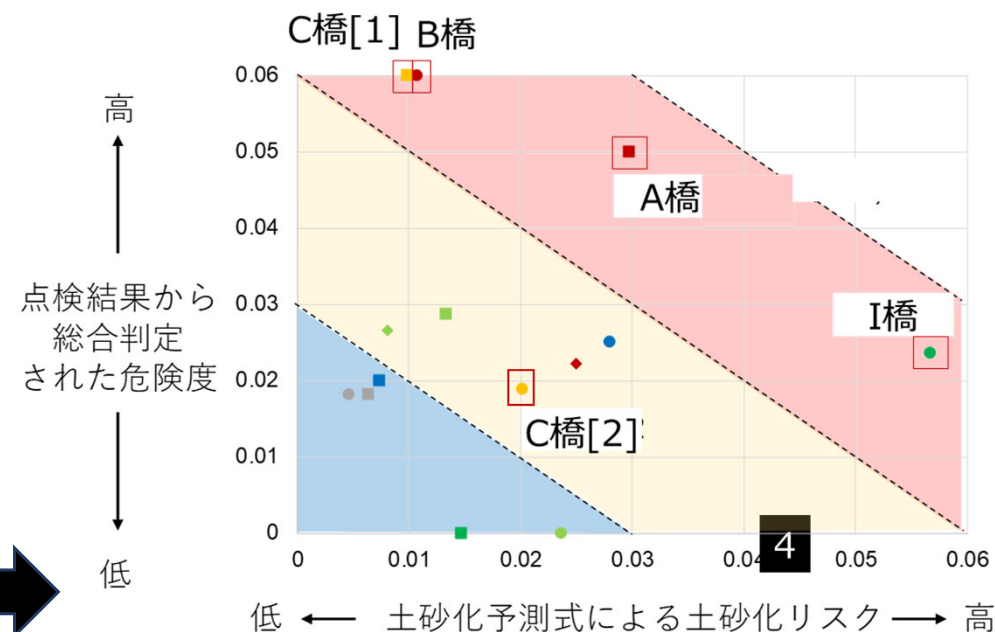
必要なインプット

構造	・床版厚さ ・床版幅
荷重	・主桁から載荷箇所の距離 ・載荷荷重
材料	・W/C
環境	・年間雨天日数
交通	・年間交通量 ・平均走行速度 ・大型交通割合・走行箇所の分散

対象橋梁の土砂化予測年算出結果



車線位置によって大きく土砂化の寿命は異なる

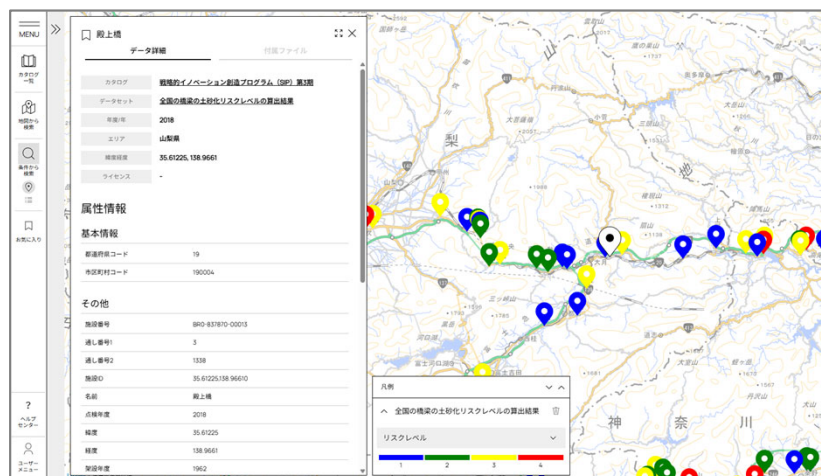


点検による劣化進展の度合いと組合せ
重点橋梁を抽出

土砂化進展速度の簡易評価

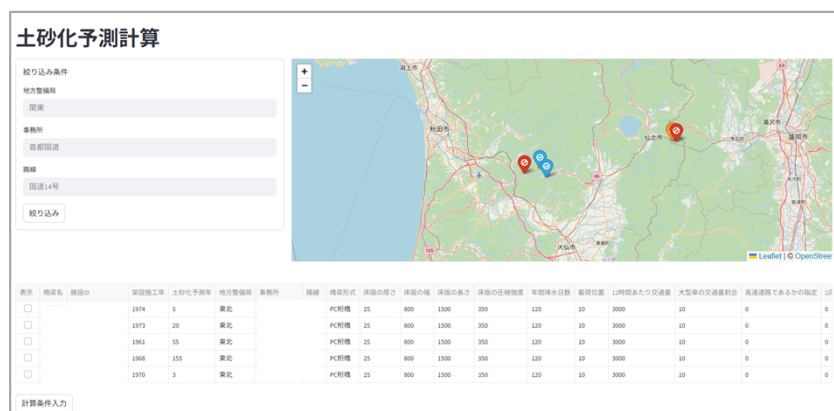
簡易評価を用いて、**橋梁群**に対して、一度に評価を可能

1. 公共データベースでの公開情報 (予め計算してある構造リスク結果の利用)



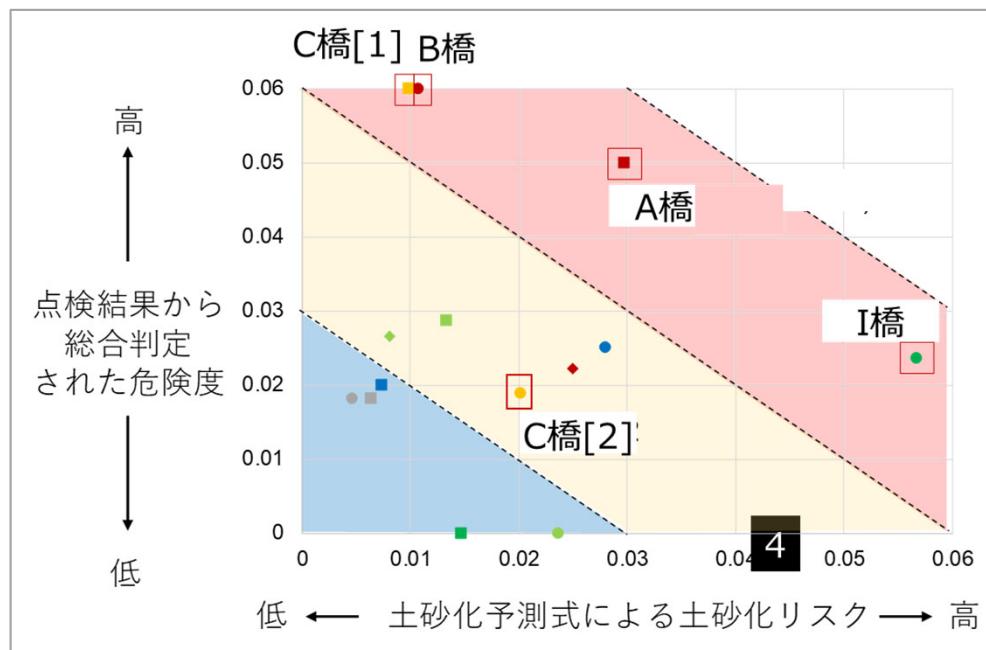
XROAD or 国交DPFの公開画面例

2. SaaS(Webアプリ)による 橋梁群の構造リスク簡易計算



現在開発中のWebアプリ画面

仙岩道路での適用例



点検結果の解釈の手助けに用いることが可能か

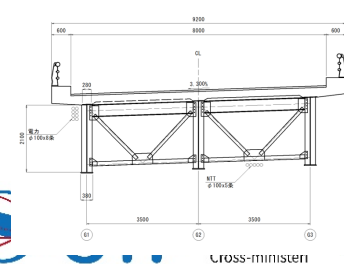
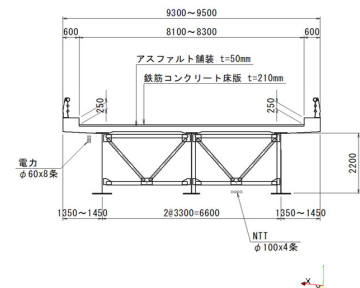
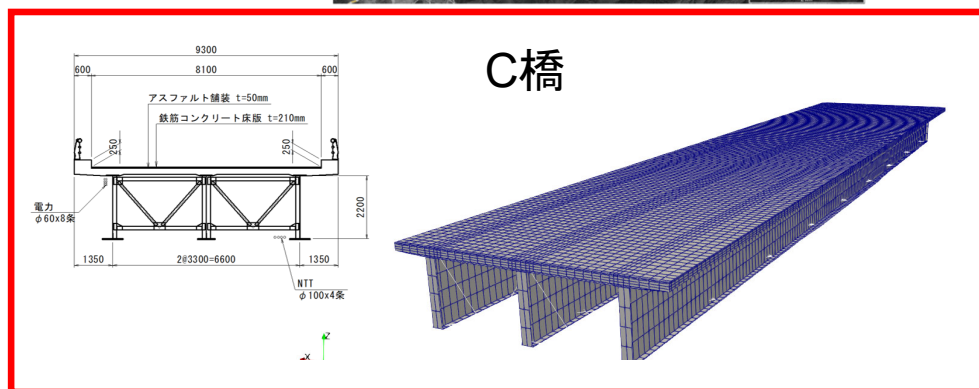
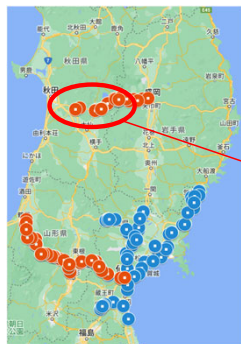
- 同じ損傷状態の場合に構造条件上どちらの床版が土砂化進展速度が早い判断可能
- 計算結果よりも実際の劣化が早い場合には、材料劣化の影響が大きいと判断可能

橋梁群のFEMモデル作成と解析条件



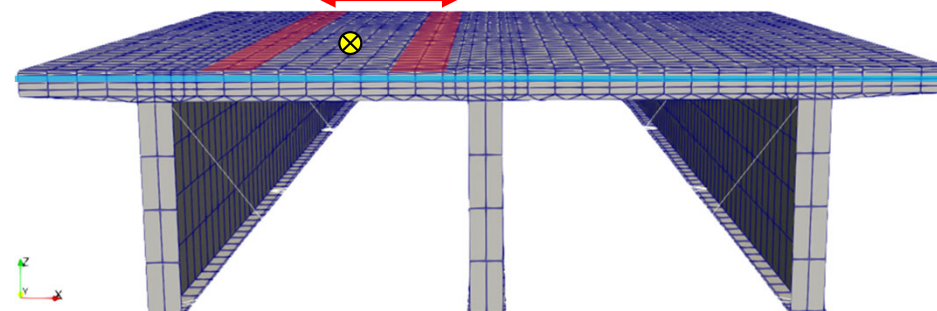
スマートインフラマネジメント
システムの構築

・岩手県境から秋田側へ約11kmの区間にRC床版を有する橋梁が12橋



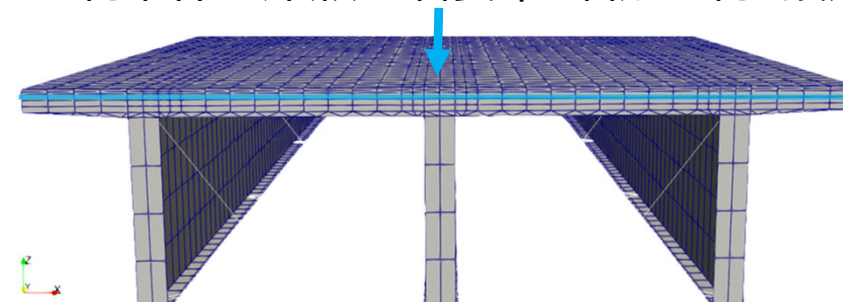
荷重条件

20t荷重を
2輪で載荷



湿潤条件設定

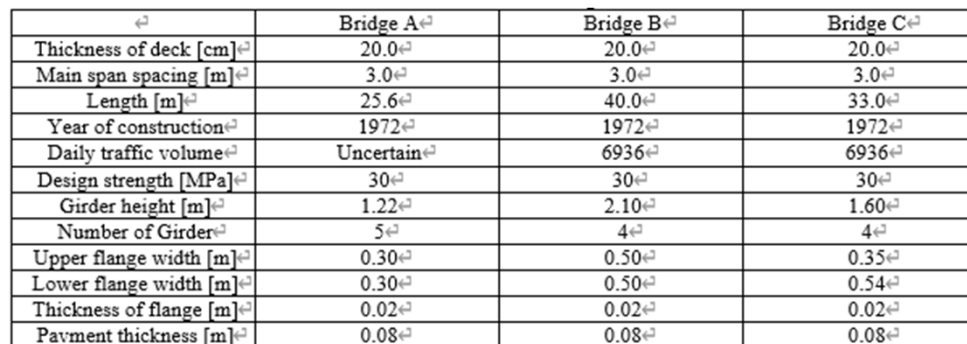
湿潤条件：床版上層要素1層が湿潤と設定



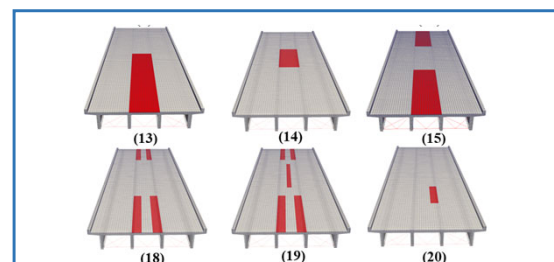
Cross-minister

スマートインフラマネジメント システムの構築

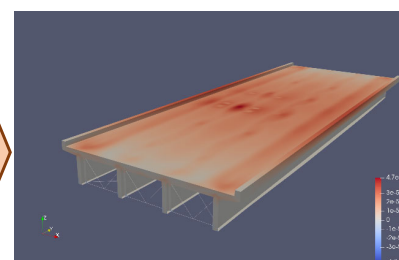
必要なパラメータを取得



↓ パラメトリックモデルでフルスケールモデル生成

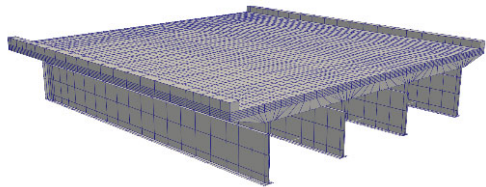
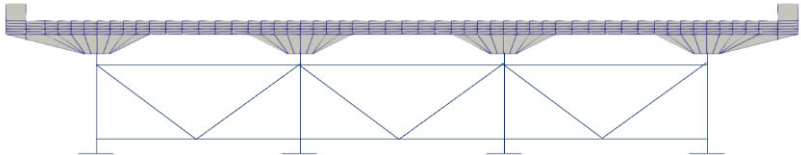
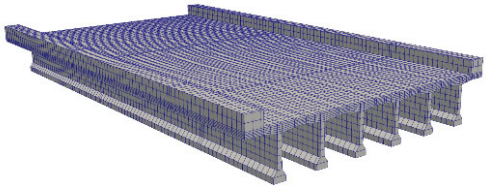
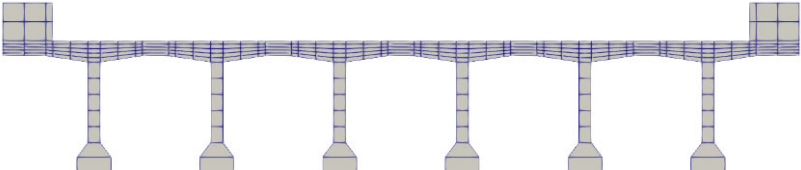
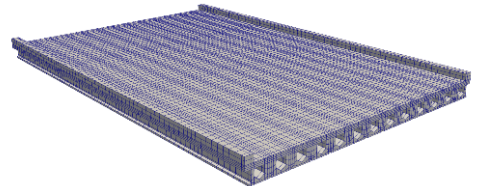
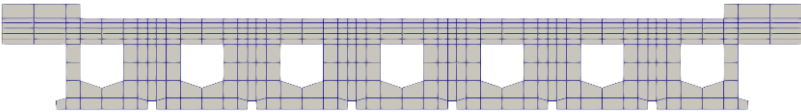
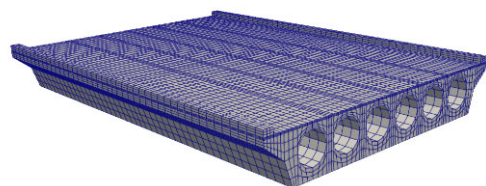
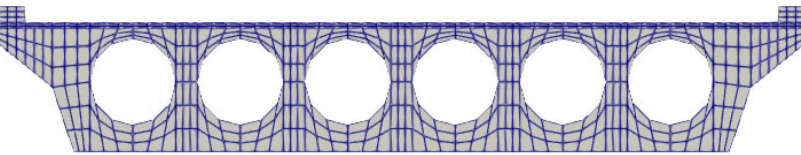


滞水分布パターンの自動付与



疲労シミュレーション実施

コストとしては30万/1橋などが現時点では現実的か

		鈑桁橋
		T桁橋
		ホロースラブ 橋
		ホロースラブ橋 (丸穴)

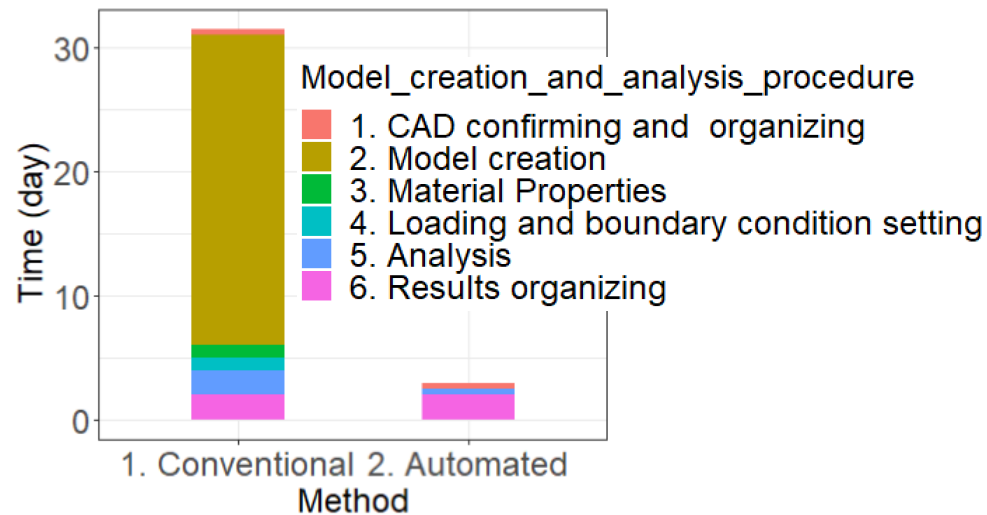
Steel girder bridge

Hollow slab bridge

Hollow slab bridge

T girder bridge

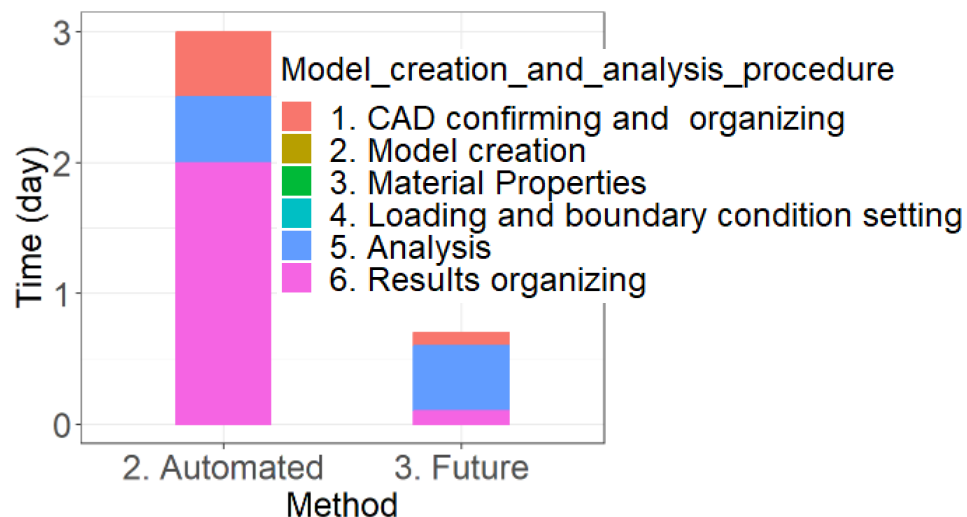
Current efficiency of model creation and analysis



- パラメトリックモデル作製により、モデルの作製時間が大幅短縮
- モデルの材料、荷重、拘束条件の設定が容易
- HPCの活用で、解析の時間が短縮

従来の手法と比べ、自動化により90%の時間の節約ができた

Future efficiency of model creation and analysis



- ChatGPT、FreeCADなどので更にモデルの作製時間を短縮
- 可視化の自動化
- Outputファイルの圧縮のにより、結果整理時間の効率化

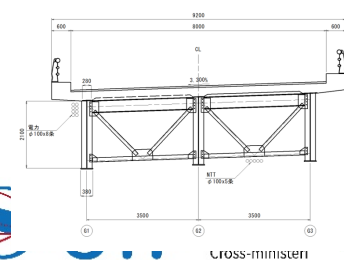
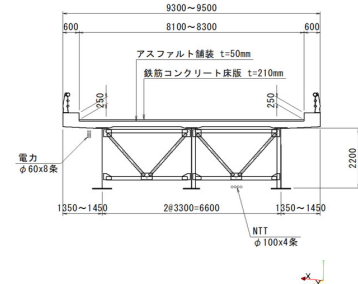
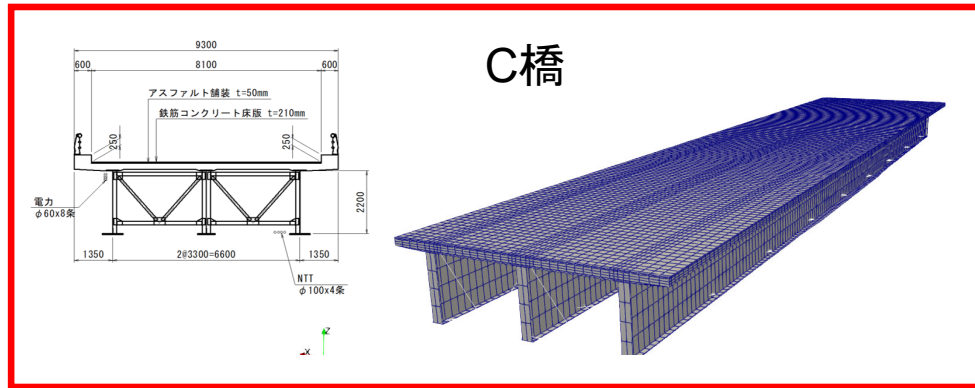
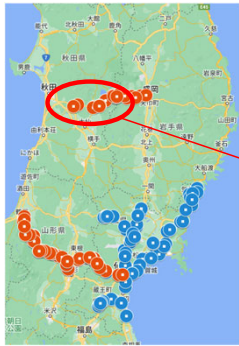
将来では更に時間を90%の節約を目指す

橋梁群のFEMモデル作成と解析条件



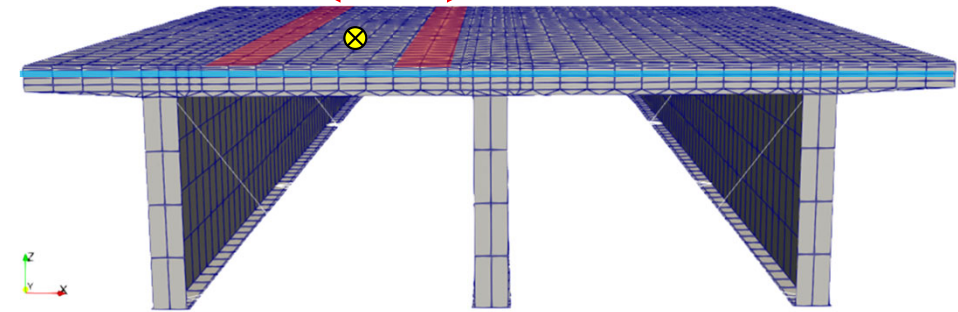
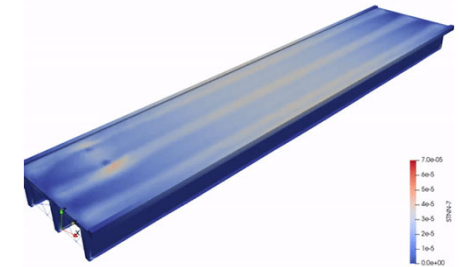
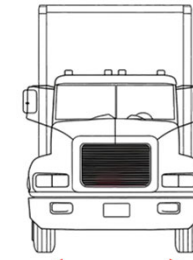
スマートインフラマネジメント
システムの構築

・岩手県境から秋田側へ約11kmの区間にRC床版を有する橋梁が12橋



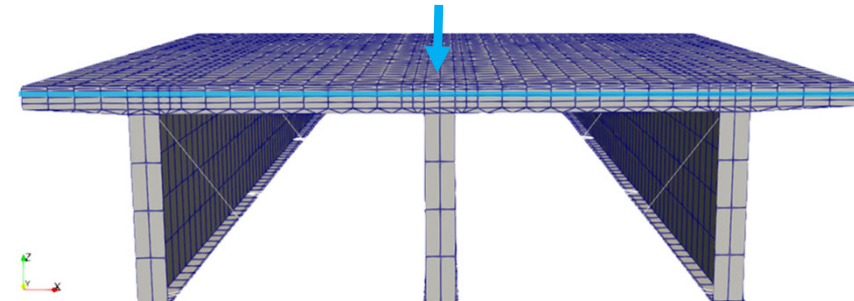
荷重条件

20t荷重を
2輪で載荷



湿潤条件設定

湿潤条件：床版上層要素1層が湿潤と設定



対象橋梁(C橋)の劣化状況の再現

床版上面の土砂化進展の様子

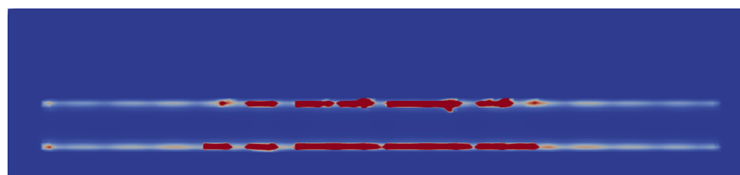
10 年
0.0e+00 0.5 1 1.5 2 2.5e+00
WATER-FWR
K<0.1



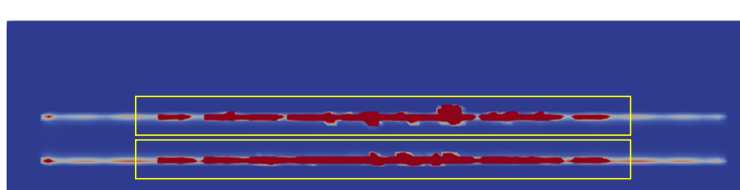
14 年



22 年



30 年

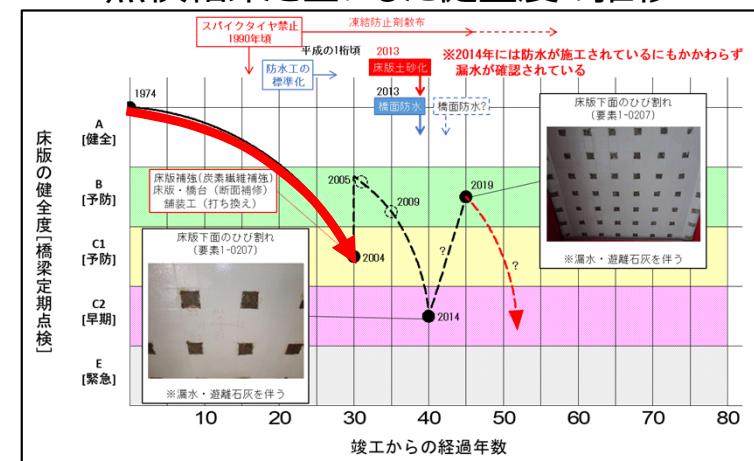


損傷進展

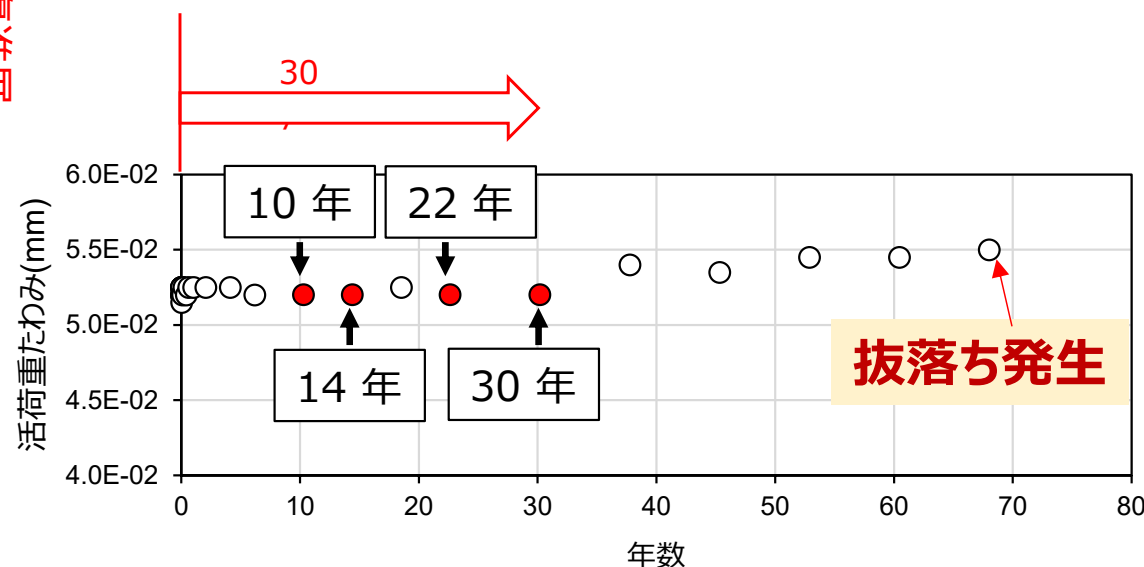
30年で広く土砂化進展 → 対処が必要な状況

30年での劣化顕在化を再現

点検結果を基にした健全度の推移



点検結果によると30年で一度劣化顕在化していた



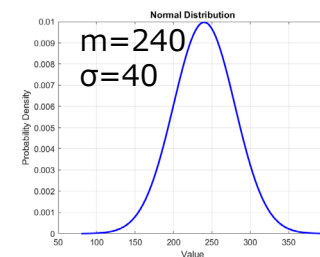
そのまま放置すると70年で抜け落ち発生か
(鋼材腐食が進展しているため更に早く抜け落ちる恐れ)

現状を再現した上で、将来の抜け落ち危険性を定量的に評価

床版で生じるランダムな土砂化の発現

実際には、橋梁の中で強度など材料物性や劣化の程度にバラつきがある。

262	253	383	269	235	267	260	252	197	253
313	188	351	237	300	192	281	209	208	210
150	223	186	269	296	269	269	276	122	295
274	254	361	232	297	305	228	194	298	172



＋ 加えて

滞水の状態も一様ではなく、
滞水しやすい箇所としにくい箇所がある。

東大生研・水谷研究室によるGPR測定結果

C橋第一径間 上り線

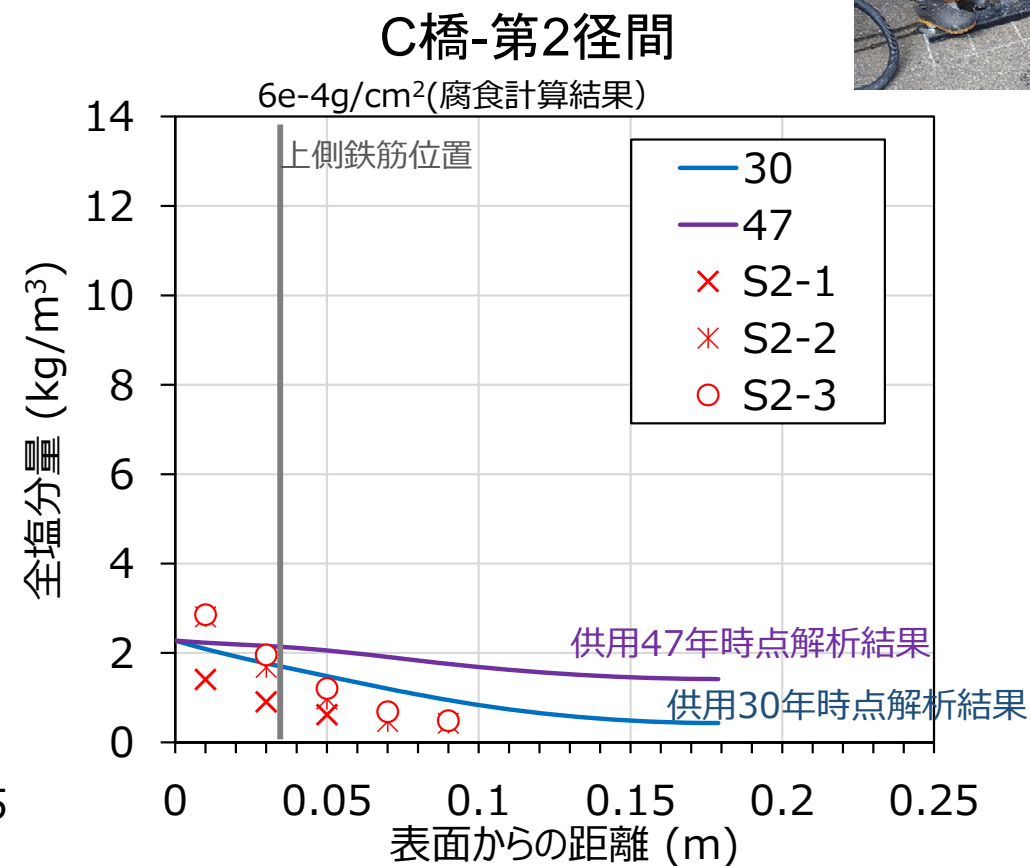
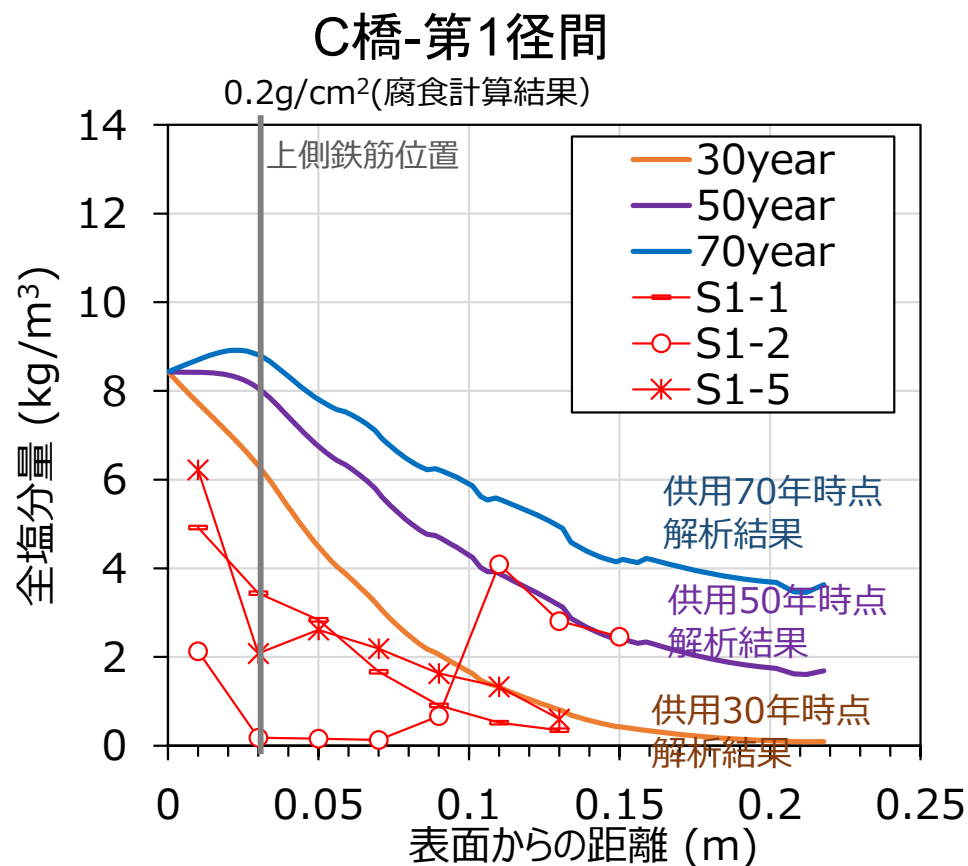


C橋第一径間 下り線



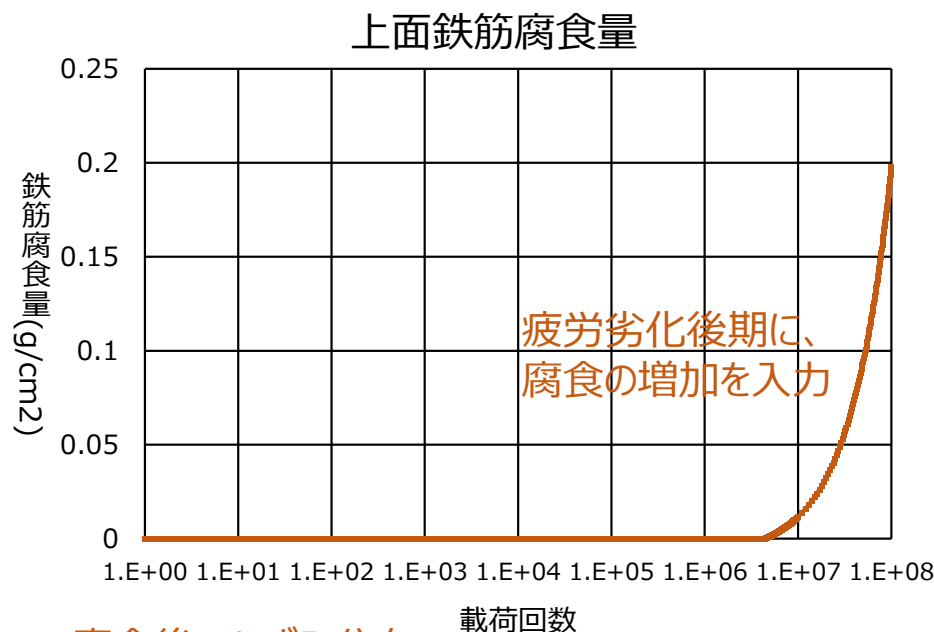
一部で土砂化が顕在化した時、
他の箇所も潜在的な土砂化進行が疑われる。

凍結防止剤散布(1991)から塩分供給が開始したとして、
現在の塩分分布を再現する条件(表面(供給)塩分濃度)を逆推定

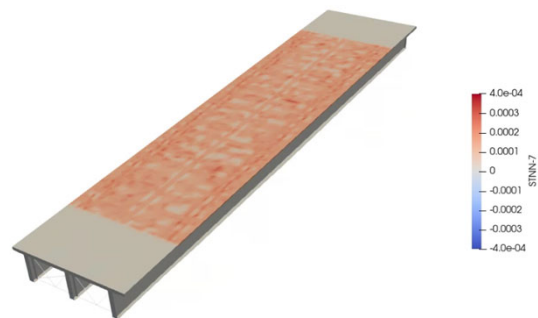


C橋第1径間は、下側鉄筋位置でも大きな塩分量を計測
(劣化箇所やひび割れ等を通じて、深部まで塩分が浸透している)
→全体的に大きな腐食量が発生していると考えられる。

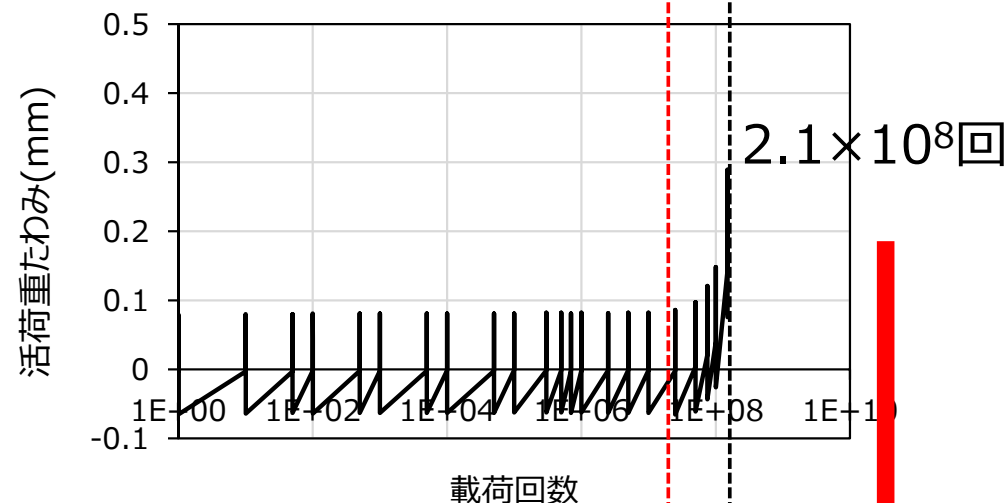
C橋 第一径間の塩分量を想定した場合



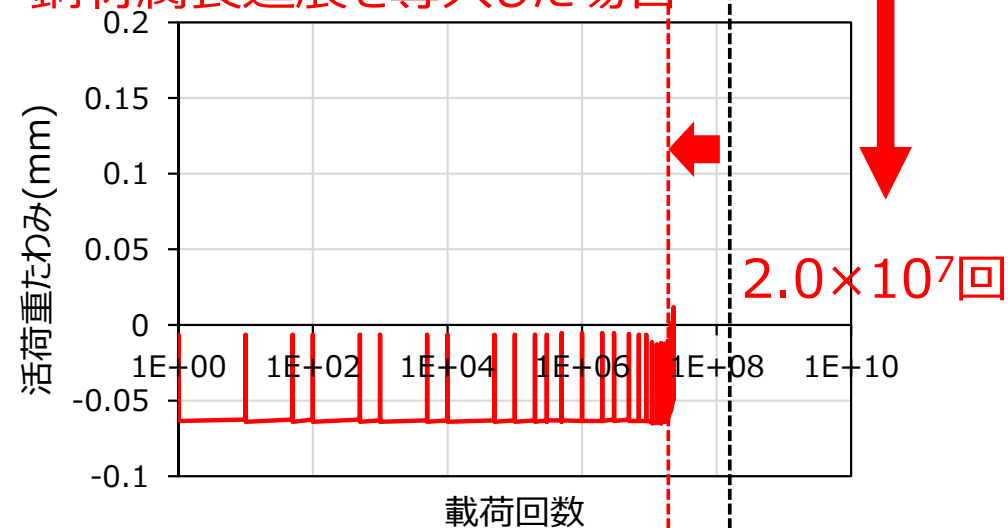
腐食後のひずみ分布
(ここでは、一様な腐食分布を仮定)



鋼材腐食を導入しない場合



鋼材腐食進展を導入した場合



(※圧縮強度は30MPaのままの解析結果)

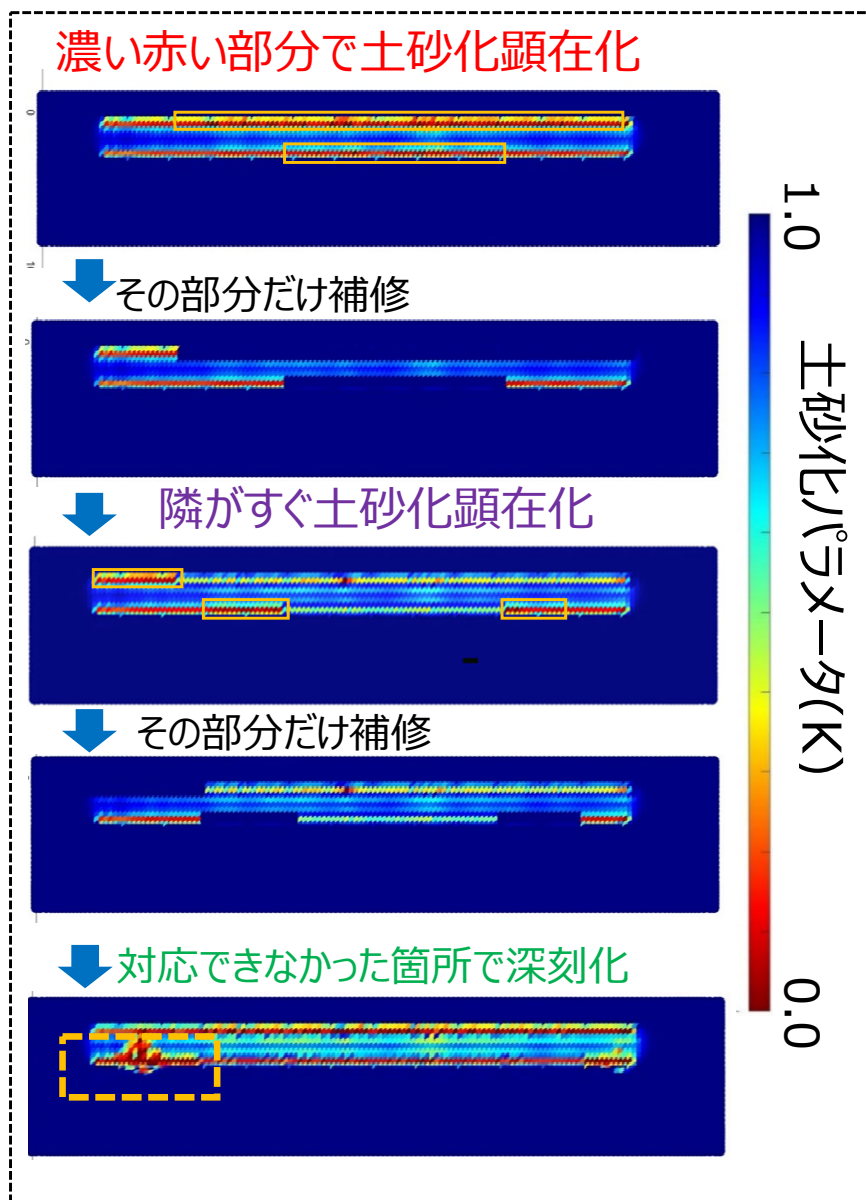
鋼材腐食の進展が同時に起きると、疲労劣化（たわみの進展、抜け落ち）を加速させる。
(腐食の開始時点にもよるが、場合によっては、1オーダー早くなる可能性も)

様々な維持管理シナリオの解析

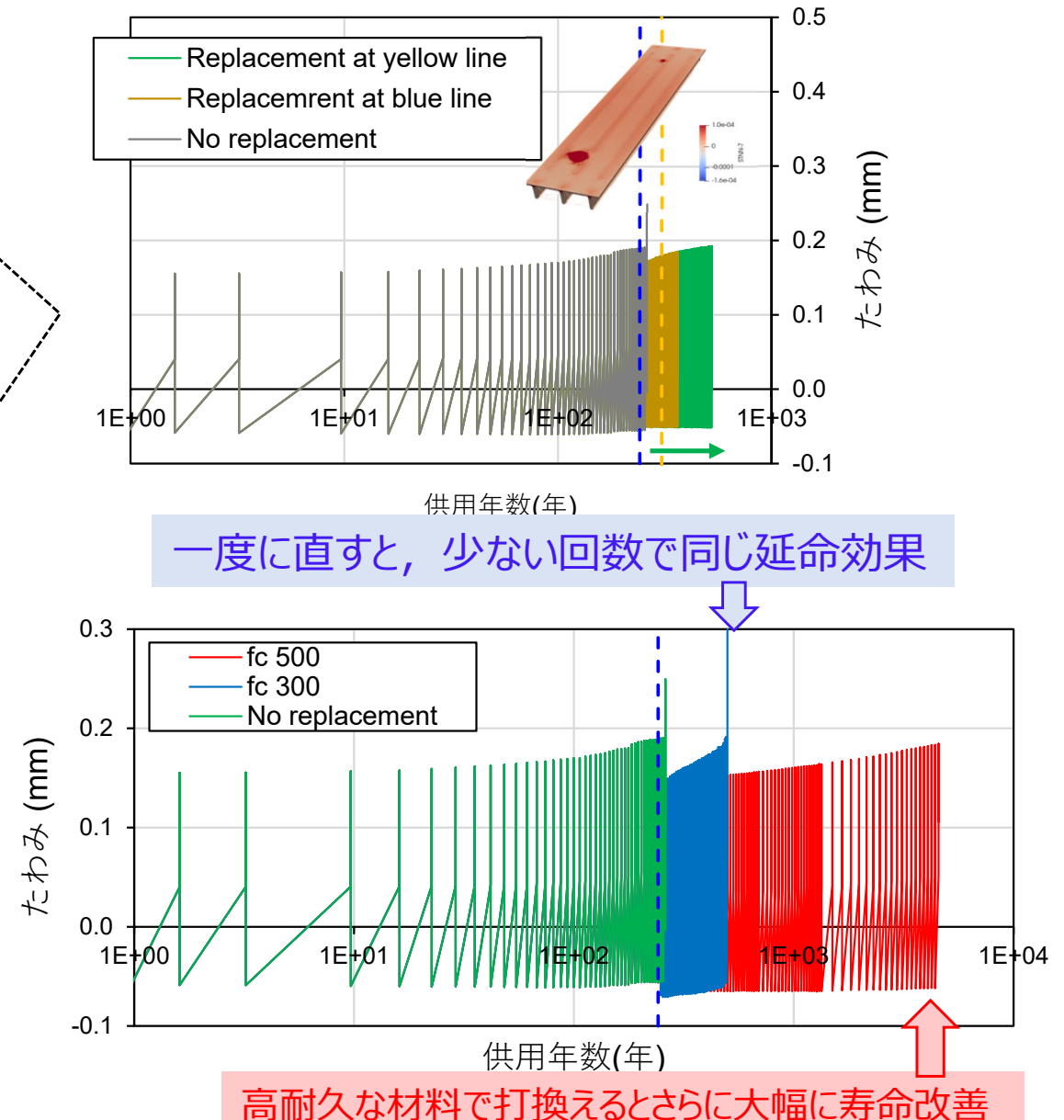


スマートインフラマネジメント
システムの構築

土砂化の事後補修の状況の可視化



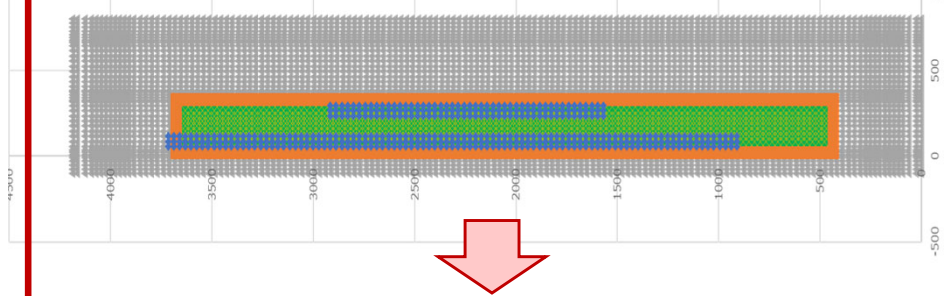
何度も事後補修を繰り返した場合のたわみ進展と寿命



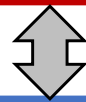
潜在的劣化進行の可視化などを用いて、合理的な修繕計画が可能

補修界面の影響

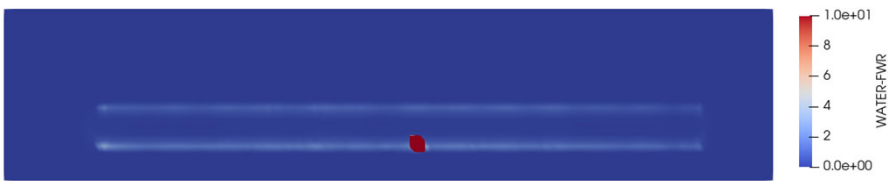
土砂化が顕在化して（**青の領域**）
補修をする際に（**緑の領域**）
界面（**オレンジの領域**）の処理が良くない場合



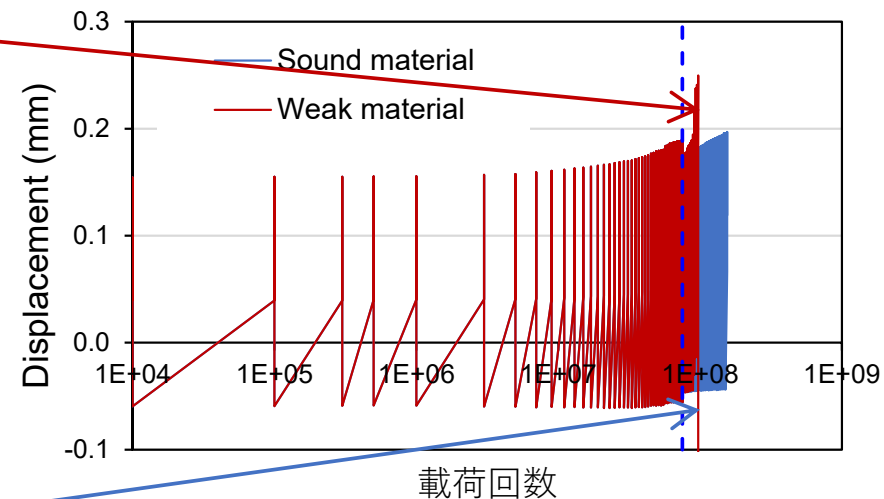
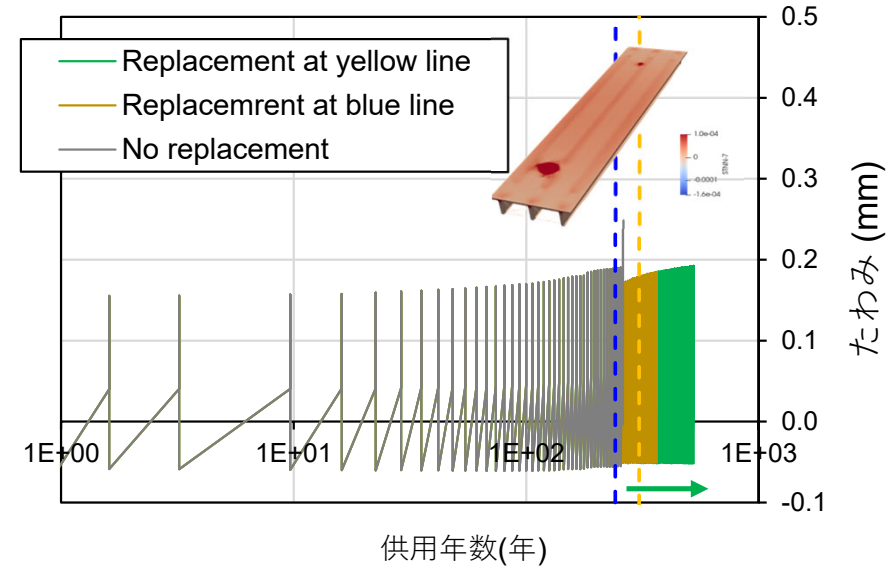
早期に再劣化が生じる



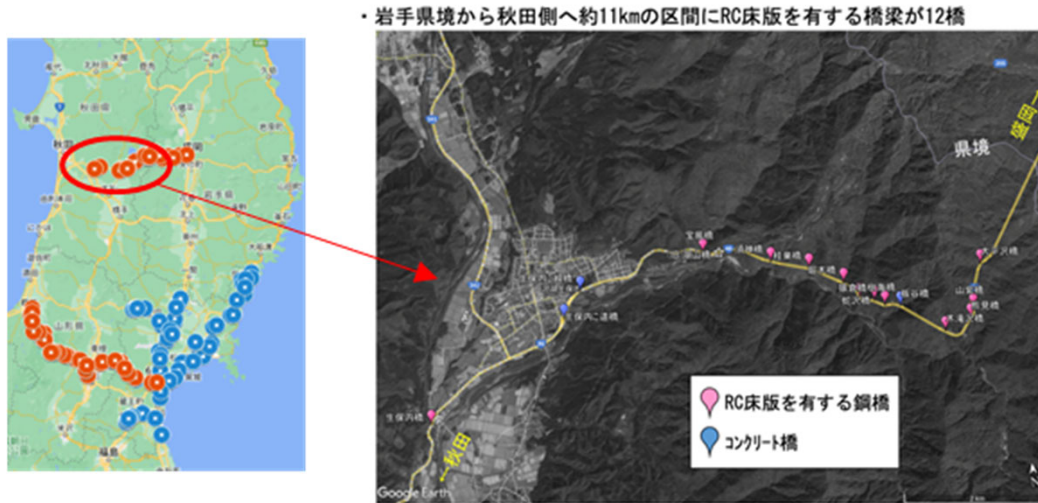
（比較）界面が健全な場合



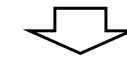
何度も事後補修を繰り返した場合のたわみ進展と寿命



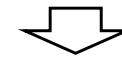
様々な維持管理シナリオの効果を定量的に評価



寒冷地・凍結防止剤散布の厳しい
環境に置かれた12橋梁のRC床版



劣化が顕在化
深刻化



どの橋梁からどのように手立てをしていくべきか

①

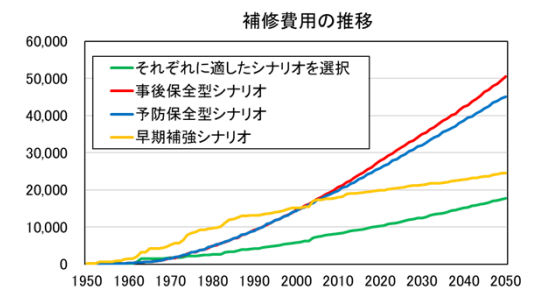
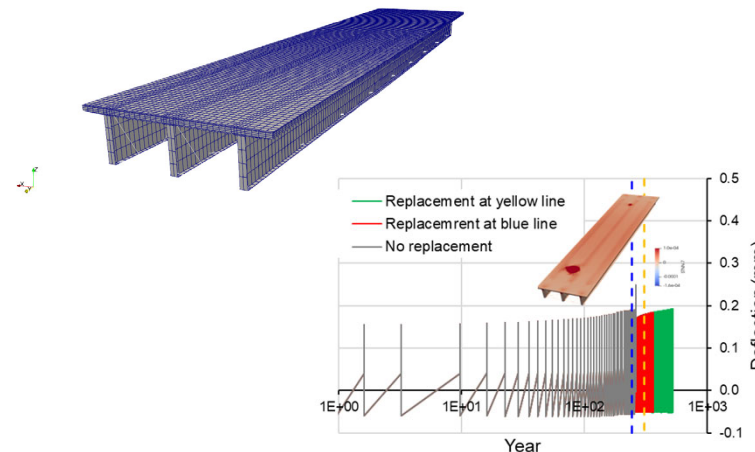
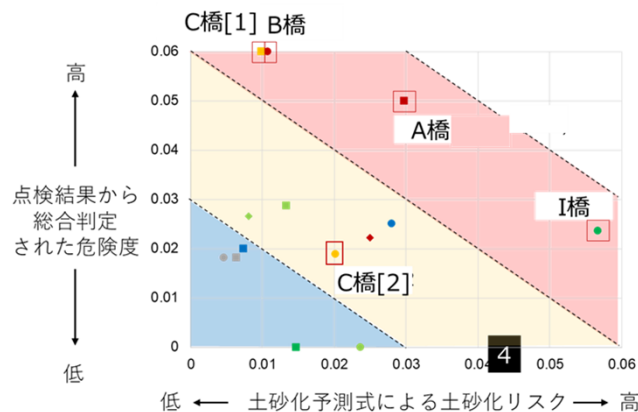
簡易式によるスクリーニング
(重点橋梁の抽出)

②

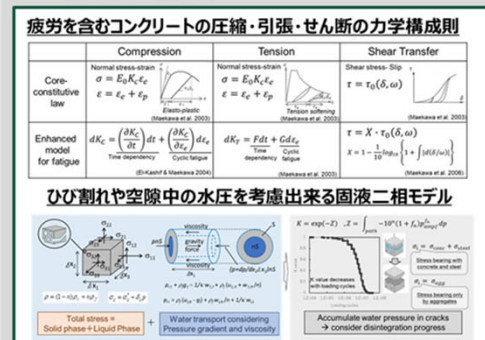
COM3(FEM)による
現状・補修/補強効果の評価

③

予防保全
に向けたLCC算定



基幹技術：COM3



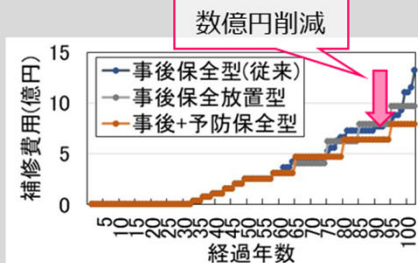
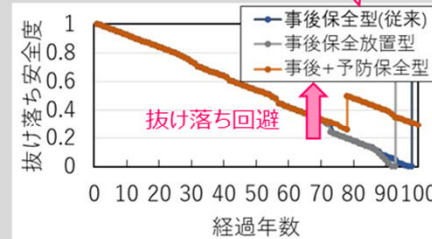
ライフスパン
疲労・土砂化解析

DuCOM-COM3の維持管理活用

様々な維持管理シナリオで
余寿命を年単位で算定

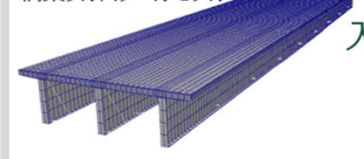
土砂化による抜落ちを予測し事前回避
疲労への補修・補強効果の定量評価

ガウス点毎の時系列損傷情報



これまで3month/1橋の
入力作成人工を90%低減

橋梁フルスケールモデル



数十cm解像度の
荷重・環境・損傷情報



他の技術も組み合わせながら

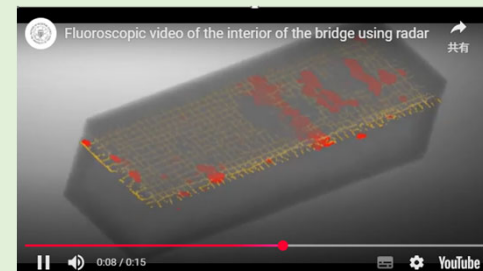
- ・物理モデルによる定量予測に基づく予防保全的維持管理への転換
- ・既存の方法(5年間隔、目視 etc..) に囚われない柔軟な点検

を実現

他の開発技術

GPRなど非破壊検査技術

(東大生研・土木管理総合試験所)

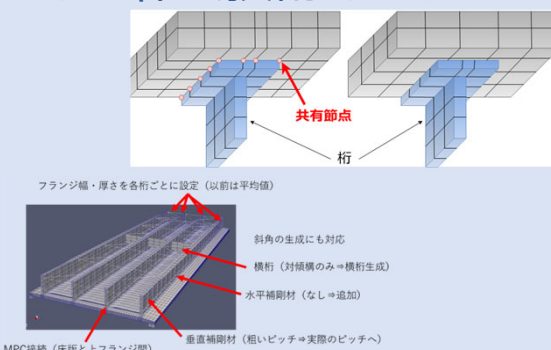


https://www.youtube.com/watch?v=2t_4iFUUDII&t=14s

社会的影響度評価技術

(日本大学・GEOTRA)

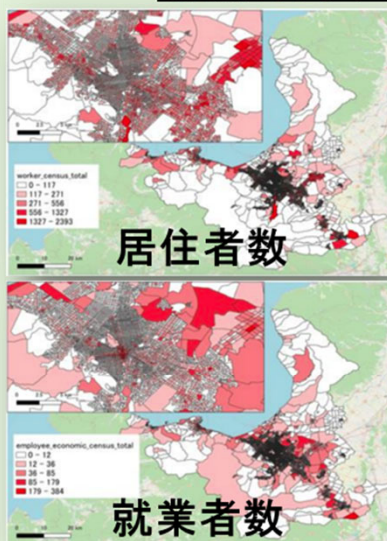
モデル作成技術・データ基盤



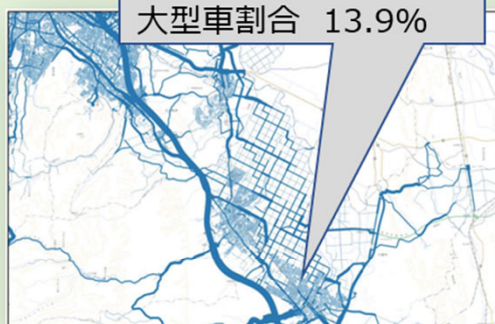
SIP サブ課題D(東大・前田建設・MRA)

維持管理を反映させた交通政策

都市交通シミュレーション (東京科学大学 高山先生のチーム)



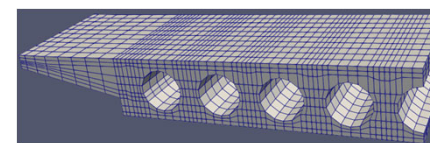
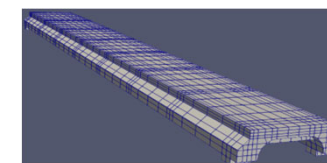
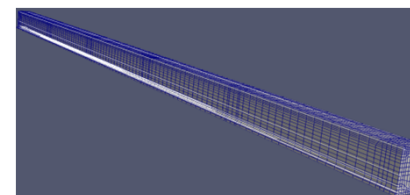
ex) 橋梁A
交通量 3,564台/12h
大型車割合 13.9%



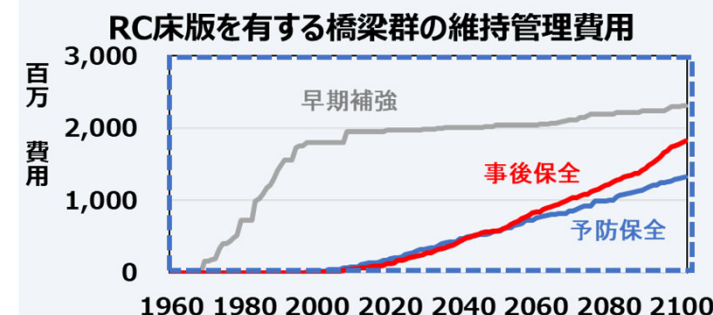
全道路の交通量を解析

人口分布・土地利用に基づく交通の
均衡配分から全道路の交通量を予測

今後の土地利用変化と交通量変化への対応可能

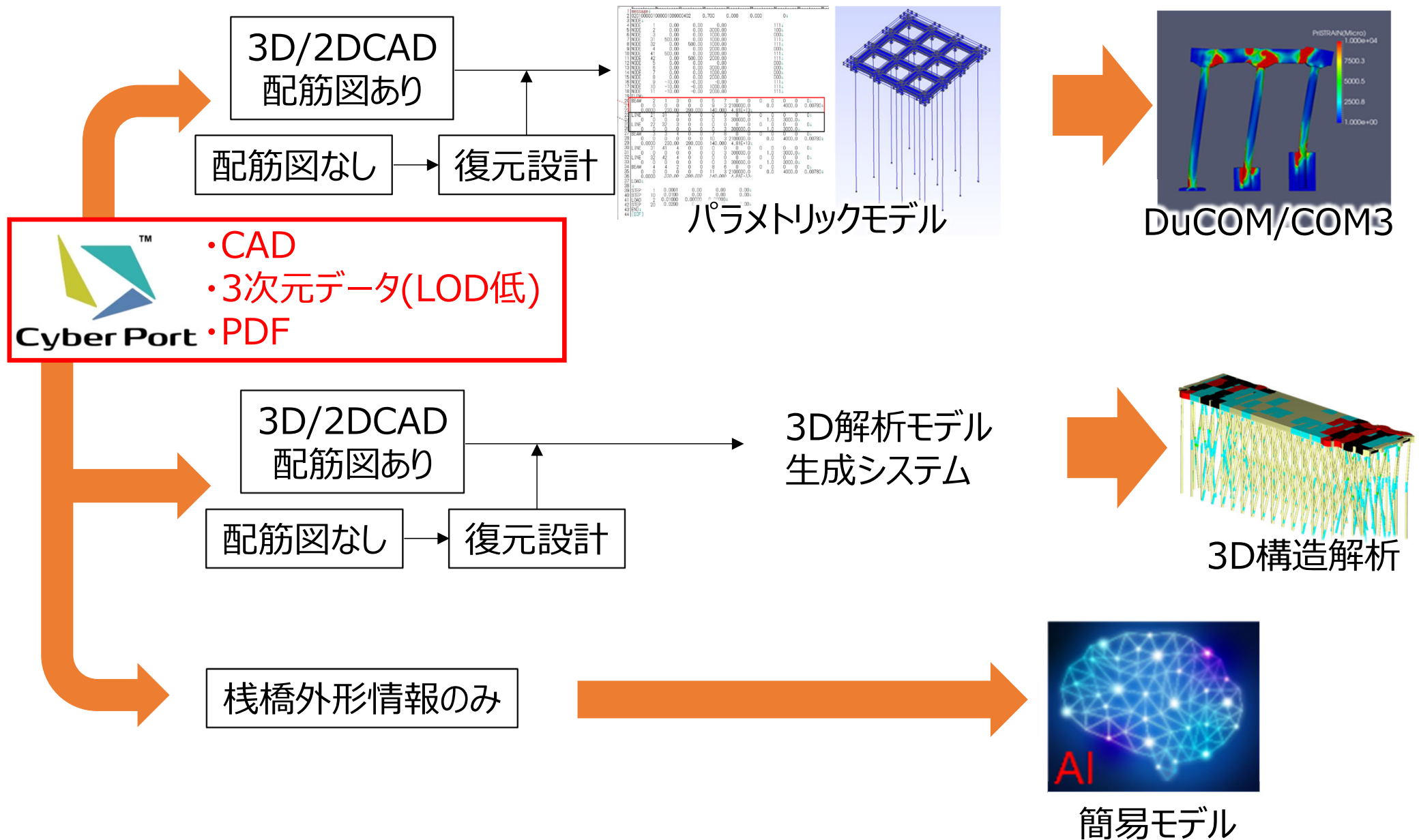


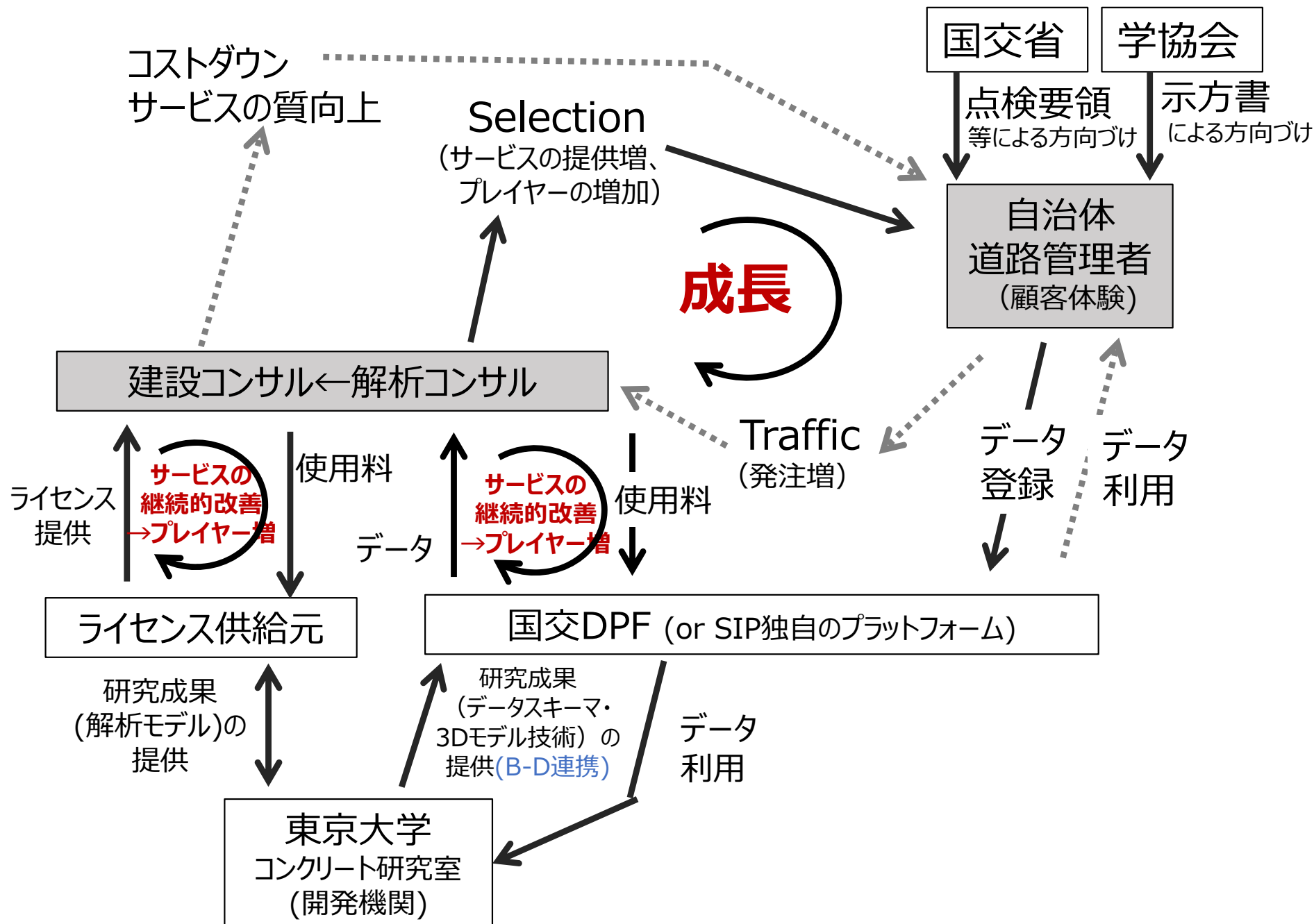
小規模橋梁も含めてモデル化
疲労性能・維持管理コストなどを検討



センサスデータで対応できない道路について
交通解析でないと有用な交通量が得られない

過去～未来の土地利用変化・交通量変化を考慮した
適切な長期的維持管理シナリオの設定を検討





- ① 公共データベースを活用した橋梁群RC床版の
疲労・土砂化劣化速度の簡易評価
- ② フルスケール解析を活用した
床版余寿命評価と補修・補強の合理化