

コンクリート構造物の維持管理におけるDX

東京大学大学院工学系研究科
社会基盤学専攻 石田哲也
2023年7月18日

建設分野におけるDX（デジタルトランスフォーメーション）

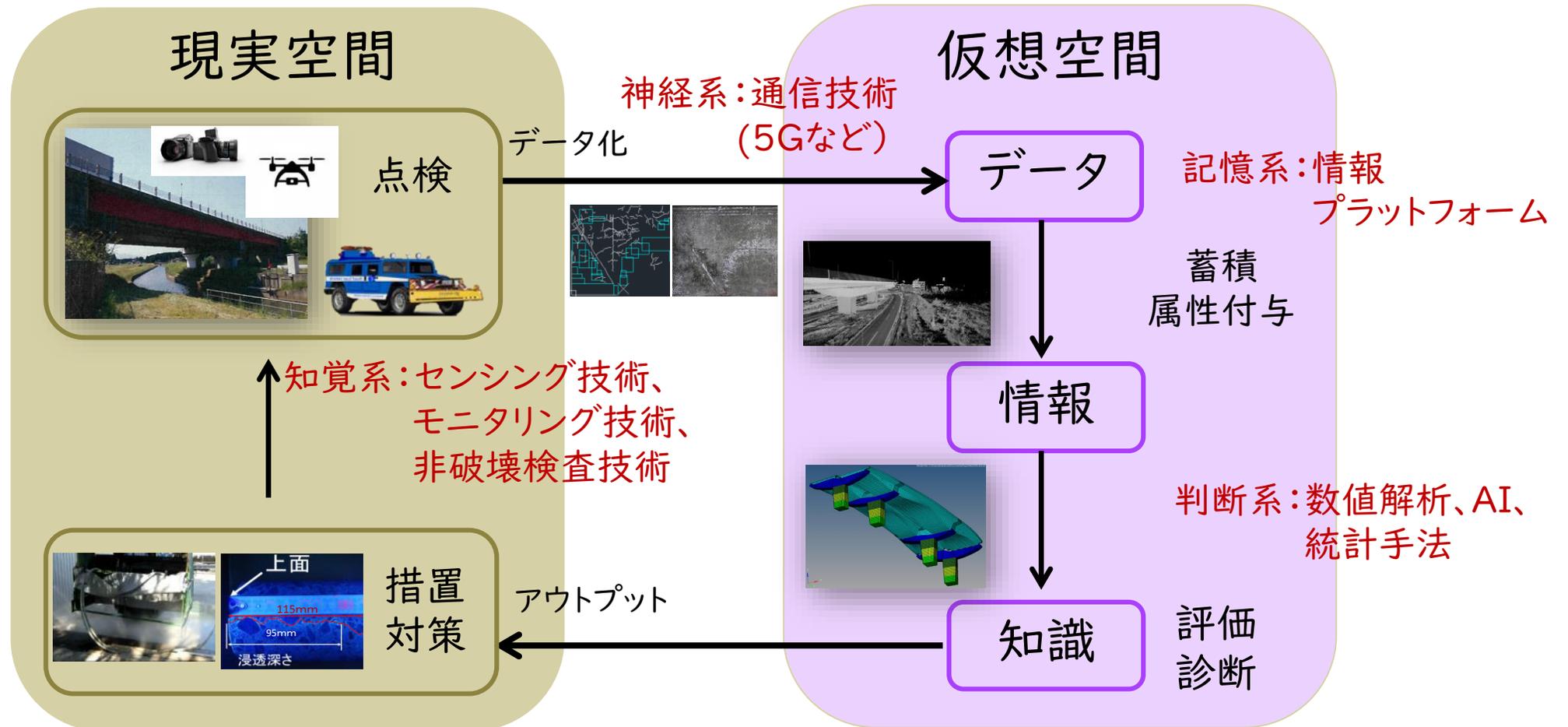
「計画」→「設計」→「施工」→「維持管理」の流れにおいて、
現実空間と仮想空間を行き来する「情報」を中核とした、
大きなパラダイムの変化が起こることが予想される。

ここで、情報の「取得」、「伝達」、「蓄積」、「分析」と相互の接続が鍵。

| | |
|-------|-----------------------------------|
| 情報の取得 | → 知覚系: センシング技術, モニタリング技術, 非破壊検査技術 |
| 情報の伝達 | → 神経系: 5G, Beyond5G(6G)などの次世代通信技術 |
| 情報の蓄積 | → 記憶系: 大量の情報をセキュアに取り扱う情報基盤技術 |
| 情報の分析 | → 判断系: 大規模/高速な計算基盤, 数値解析技術, AI |

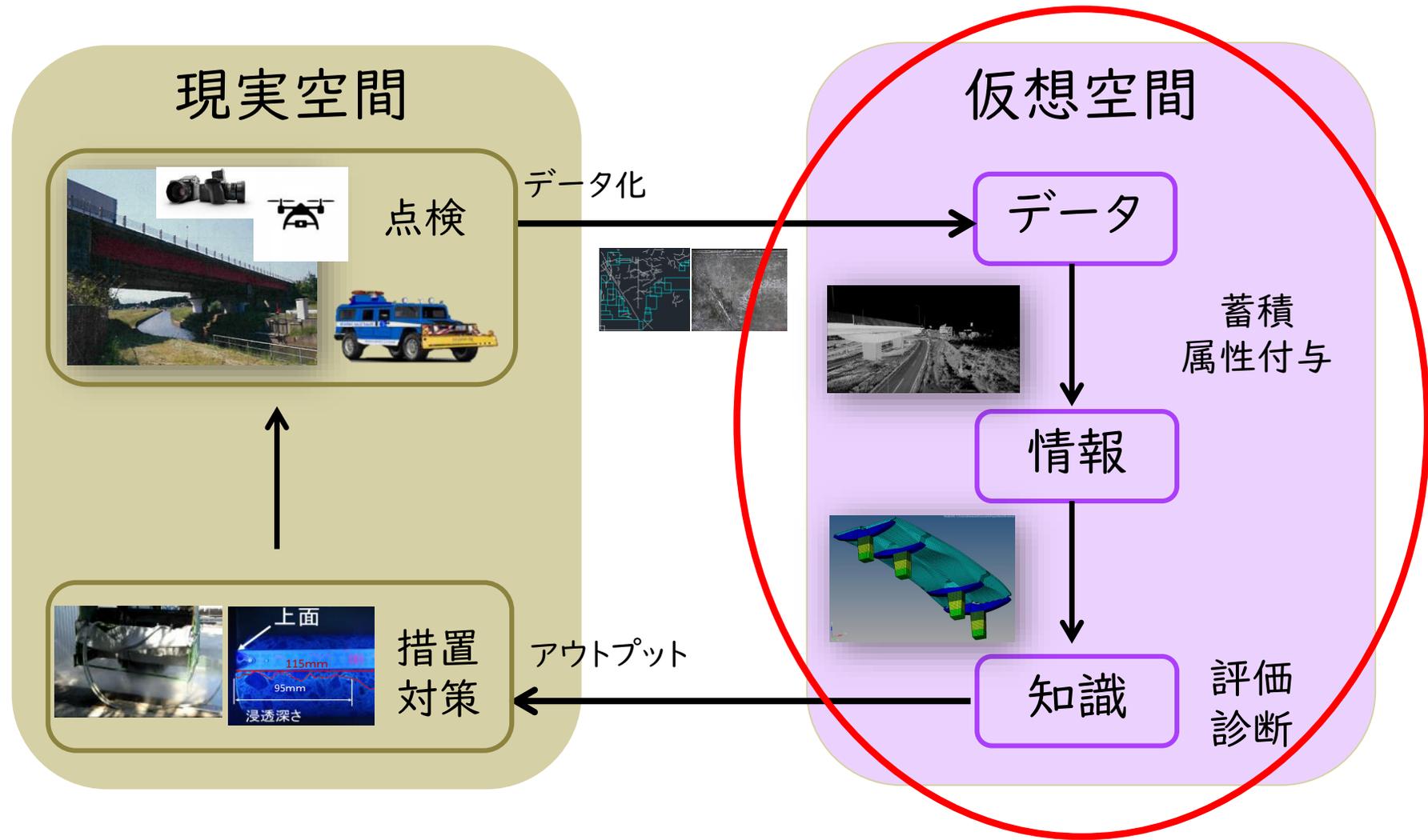
情報技術が急速に日常生活に浸透している背景には、これらデジタル技術の著しい発展がある。

まずは、インフラメンテナンスを例に、DXを考える



デジタル技術で新たに可能になることは何か？ デジタル化することのメリットは何か？
デジタルトランスフォーメーションとは何か？

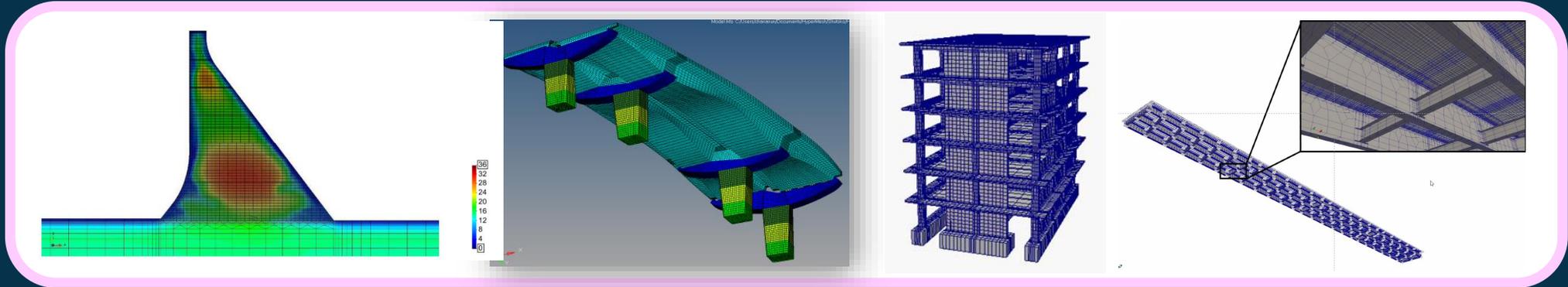
デジタルツインの活用によりサイクルを速く回す(ハイサイクル)



- ✓ 時定数の長いインフラ(土木構造物、建築物)の場合には、シミュレーションが威力を発揮
- ✓ デジタルツイン→双子(現実を複写)するだけではダメ。まだ見ぬ未来を予測、予見。

材料と構造のマルチスケール・マルチフィジックスモデル

あらゆる外力・環境作用下におけるインフラ材料・構造の実挙動を写像したサイバーモデルの構築(4次元世界)



製造・施工

養生

初期欠陥

供用

劣化進行・性能低下

時間

分

日

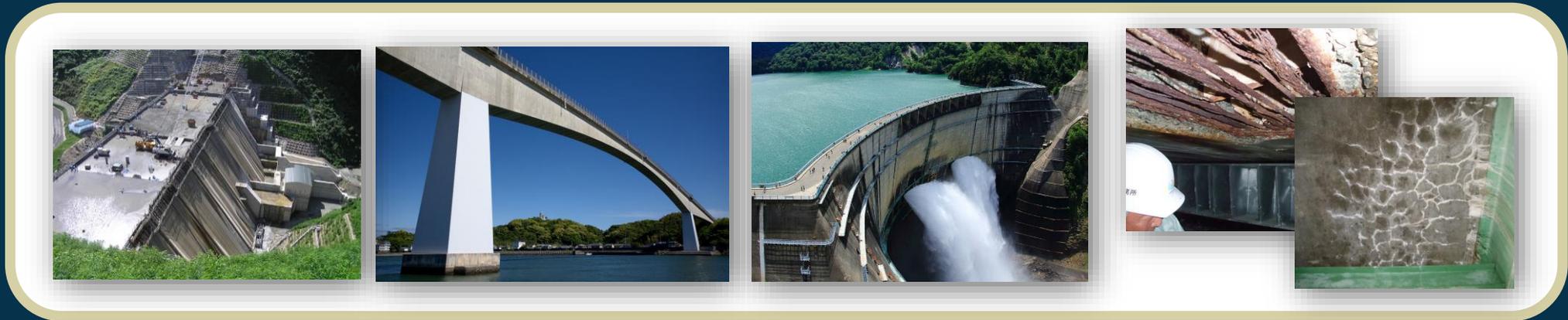
月

1年

10年

100年

1000年



10⁻⁹メートルから10²メートルスケールをカバーする20の支配方程式、500超のグローバル共有変数、数十の材料化学、熱力学、地球化学、力学モデルの実装/連成解析 (Maekawa, Ishida, Kishi 2008)

予算のかかる道路橋床版のメンテナンス

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(平成26年1月)

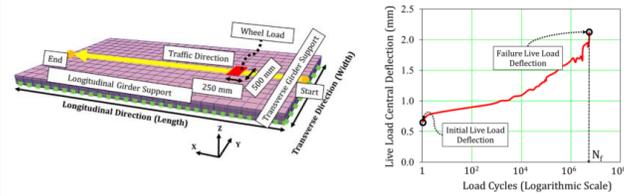


大規模更新・修繕 (NEXCO系のみ) **総額3兆200億円**
トンネル 3600億円 土構造物 4800億円
橋梁 2兆1800億円 内**RC床版関係 1兆8100億円**

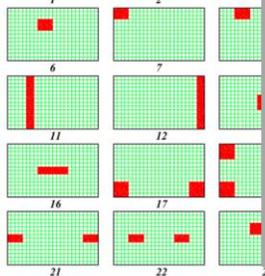


これまでの一連の研究成果の概要

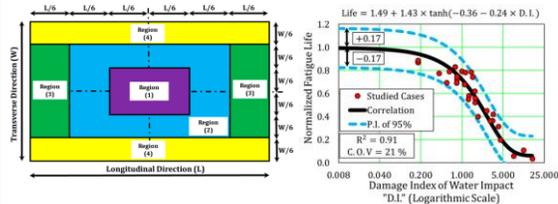
単純版の疲労解析(-2019)



終局状態の判定について検討



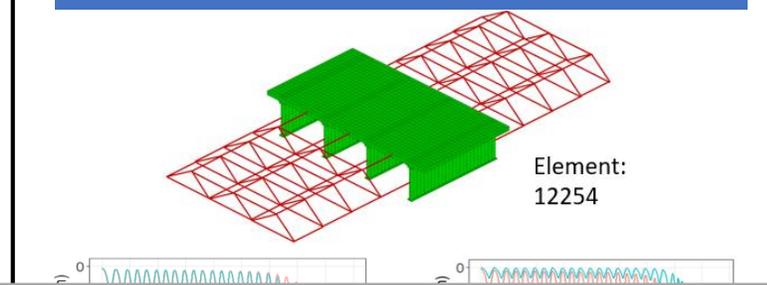
疲労に与える滞水範囲の影響



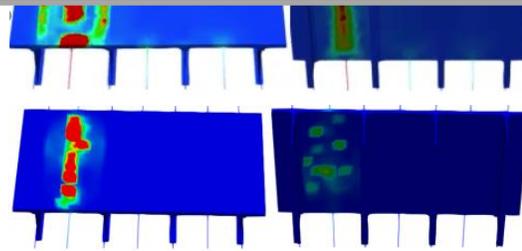
床版の滞水損傷INDEXと予測式
Fathalla et al. (2018, 2019)

- ✓ 疲労終局状態の判定手法
- ✓ 疲労に与える滞水の定量評価
- ✓ AIを用いた余寿命予測式の作成

桁-床版フルスケール解析(2020-2021)



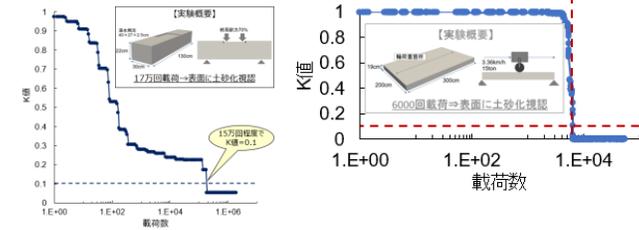
✓ ここでの大きなポイント→単純版(RC床版一枚)と鋼桁-RC床版フルスケールモデルでは、定量的のみならず定性的な結果が異なる。
 ✓ 実構造物の余寿命を精度良く追跡するためには、フルスケールモデルを用いて、実際の条件(境界条件、荷重条件)を与えた解析が必要不可欠。
 ✓ ただし、三次元フルスケール解析にあたっての解析コストは多大。効率化できないか?



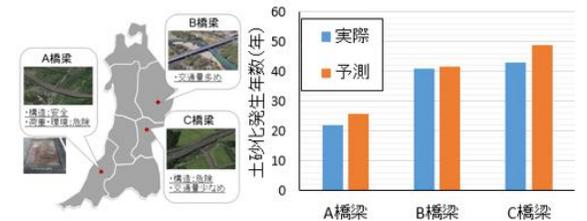
乾燥と水張り条件の劣化機構
Jie.F et al. (2021)

- ✓ 単純版とフルスケール解析で異なる疲労寿命(定性的・定量的の両面)
- ✓ 乾燥/水張りの疲労損傷機構説明

土砂化予測手法の実橋検証(2021-2022)



工砂化予測式



土砂化予測式の検証
Takahashi et al. (2021, 2022)

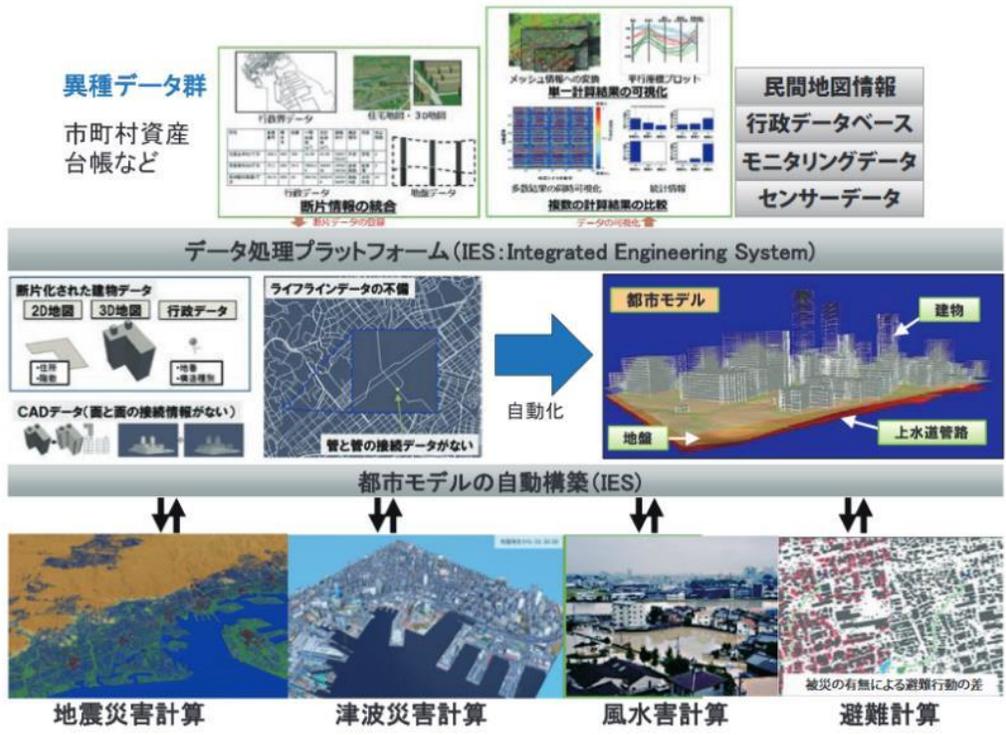
- 土砂化発生パラメータK値の検証
- 土砂化予測式の作成
- 土砂化予測式の検証

DPP(Data Processing Platform)を用いた3次元モデル自動生成技術

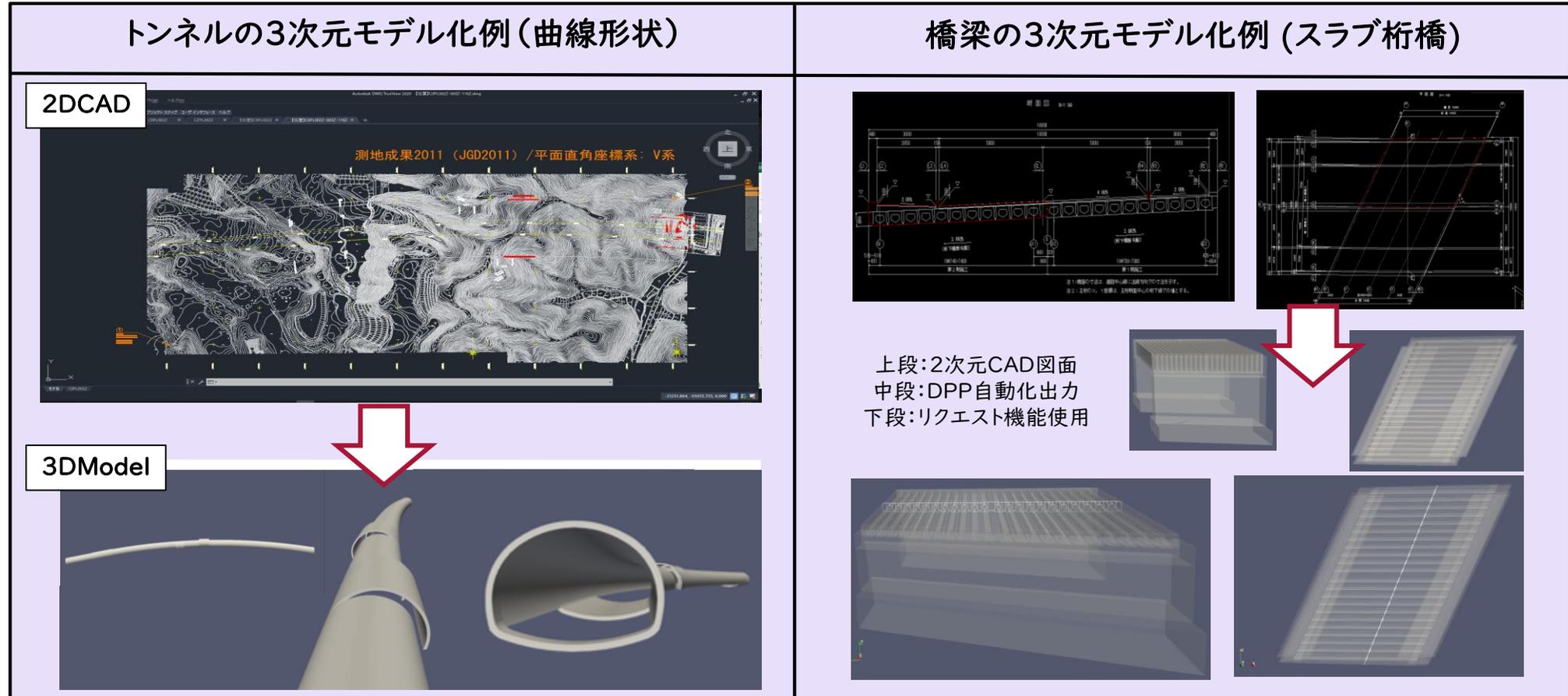
—非デジタル2次元図面をデジタル3次元モデルへと変換— (神戸大・大石教授との共同研究)

DPPとは(堀、大石、大谷ら)、

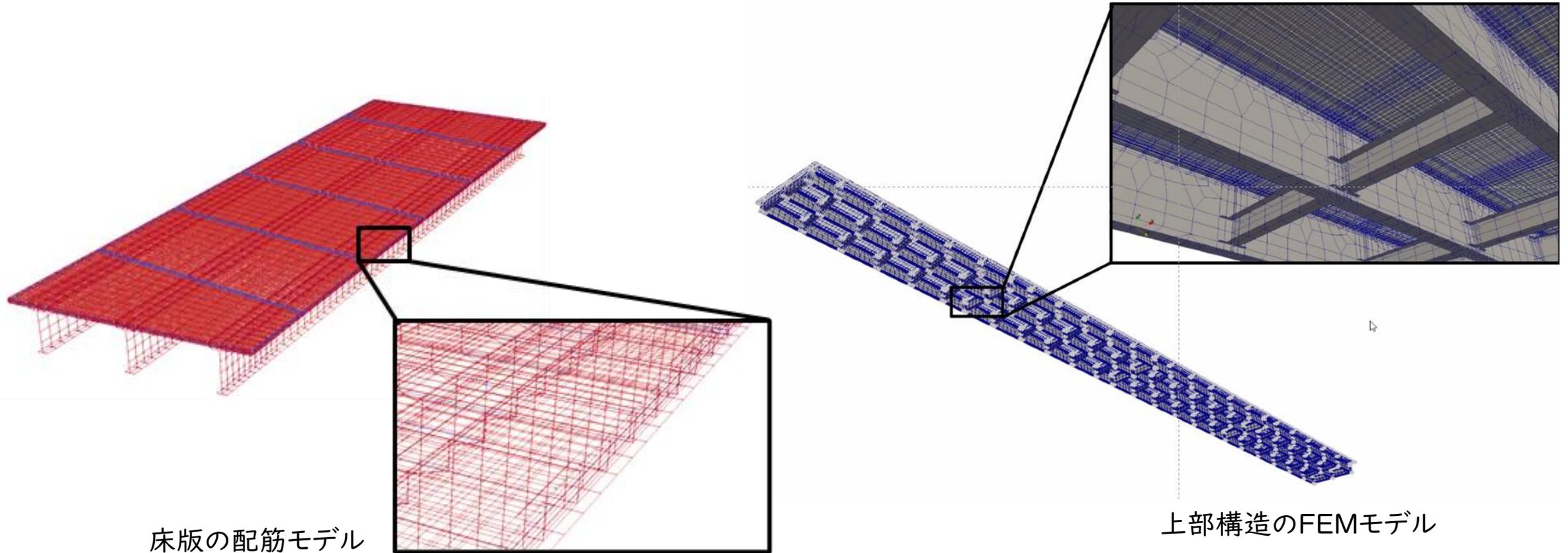
- 理化学研究所で開発されたData Processing Platformの略
- 神戸丸ごとシミュレーションなど、スーパーコンピュータを活用した複雑な大規模計算の基盤技術
- 異種データ群をグラフ構造で紐づけることで、様々なデータ処理を可能にしている
- 図面3D化は、DPPの応用利用の1つ。



2次元図面から3次元モデル生成の流れ



効率的な3次元モデル生成は、ハイサイクルシミュレーションにとって必要不可欠

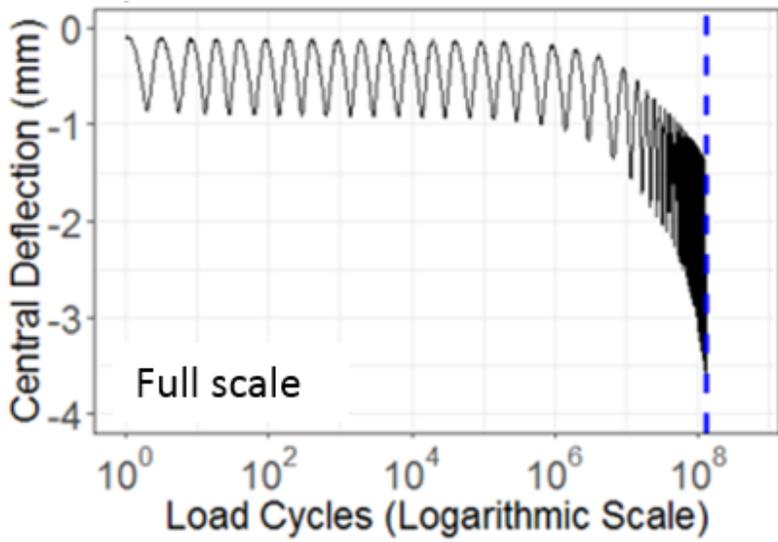


DPPを活用して作成された上部工のFEMメッシュ
外部構造、内部構造の両者を含む

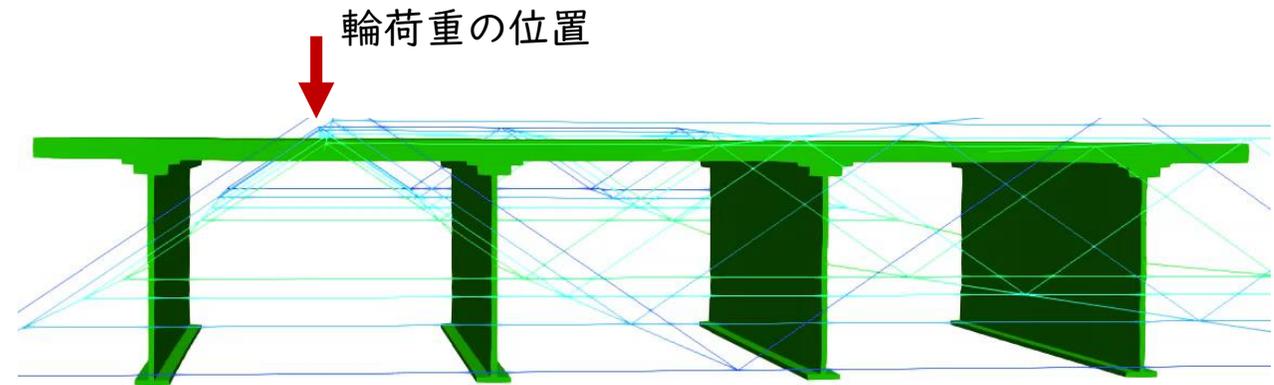
単純版 (RC床版一枚) と鋼桁-RC床版フルスケールモデルでは、定量的のみならず定性的な結果が異なることもあるため、フルスケールモデルを用いた実際の条件に即した解析が必要。

フルスケールモデルを用いた輪荷重作用下での変位とひずみ分布

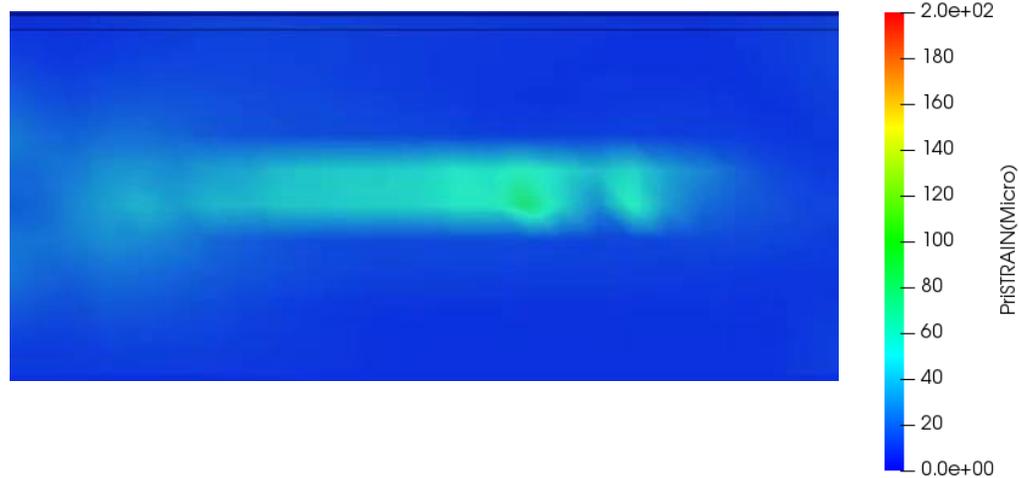
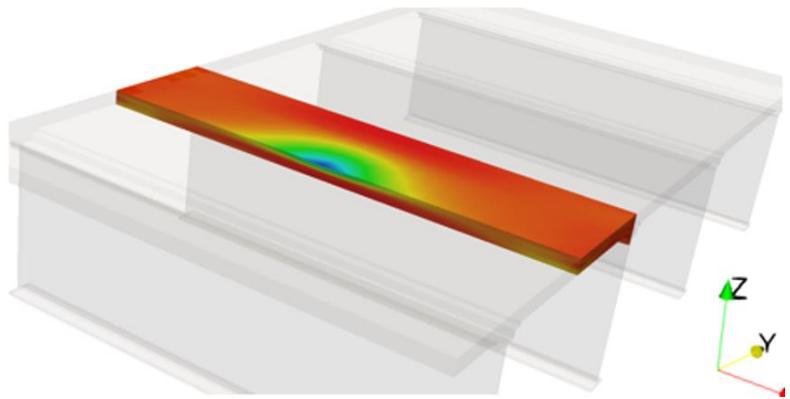
輪荷重サイクル数一床版中央のたわみ



桁と床版の変位

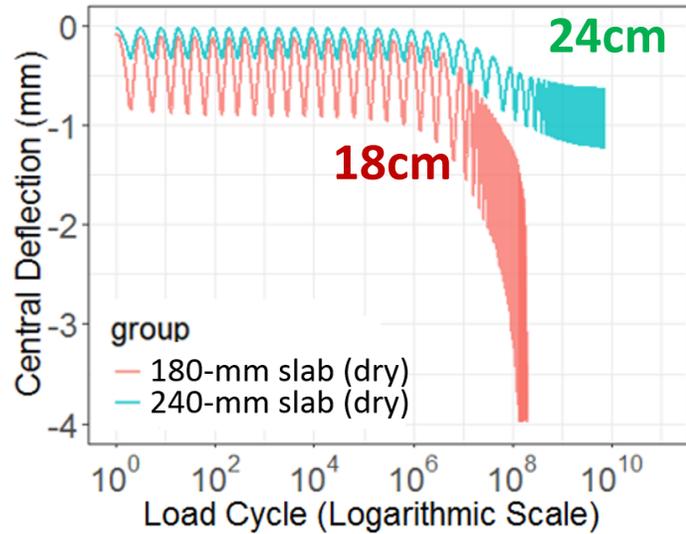


最大主ひずみ分布

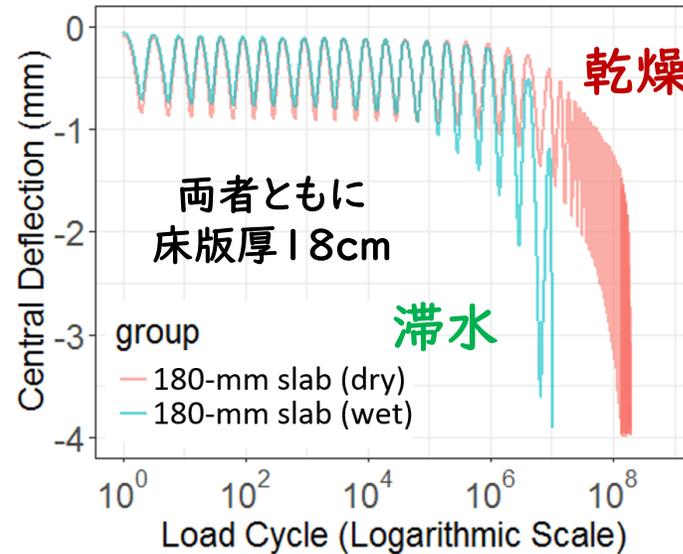


フルスケールモデルを用いたRC床版疲労解析: 床版厚と乾燥・湿潤の影響

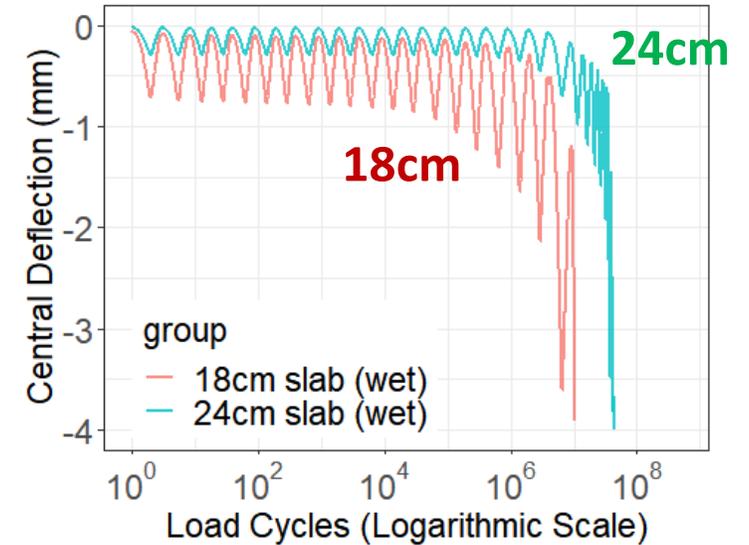
床版厚の影響 (乾燥状態)



乾燥と湿潤の影響



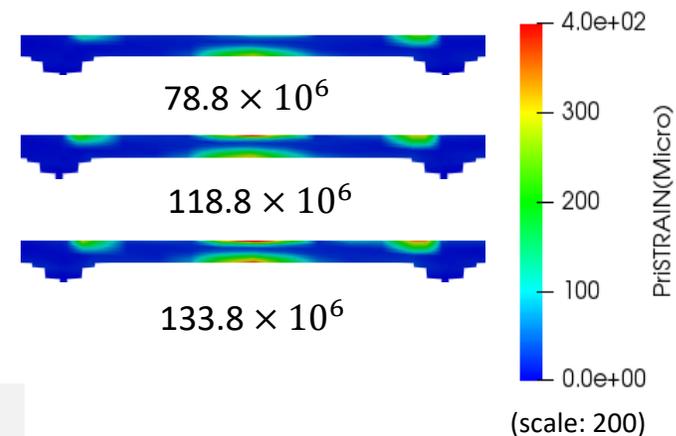
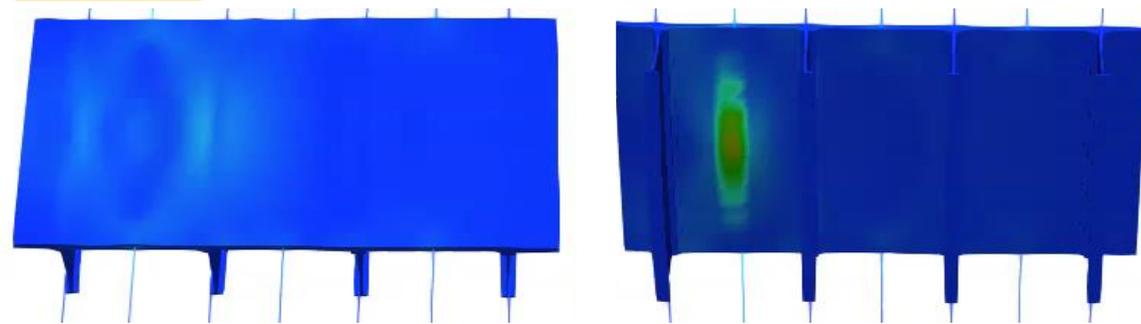
床版厚の影響 (湿潤状態)



解析結果のサマリー

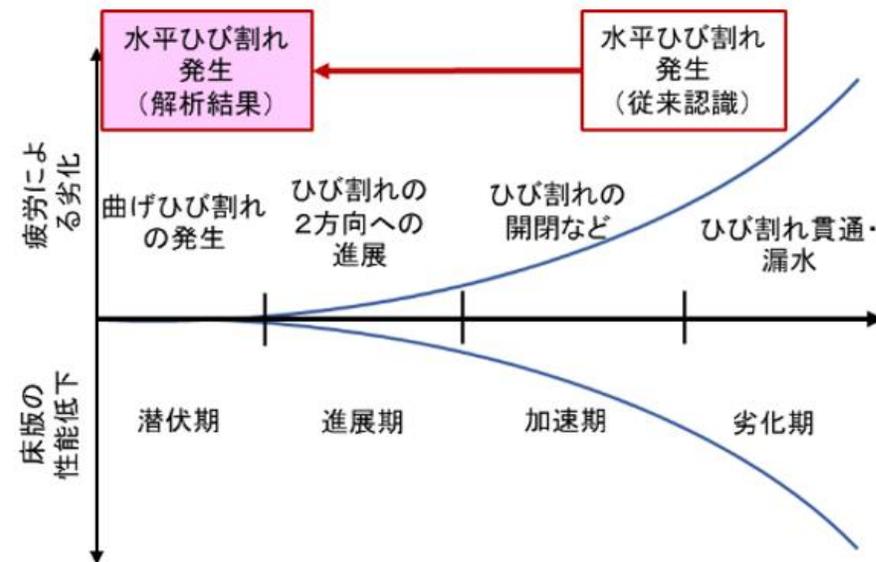
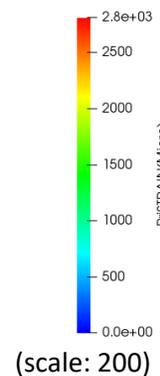
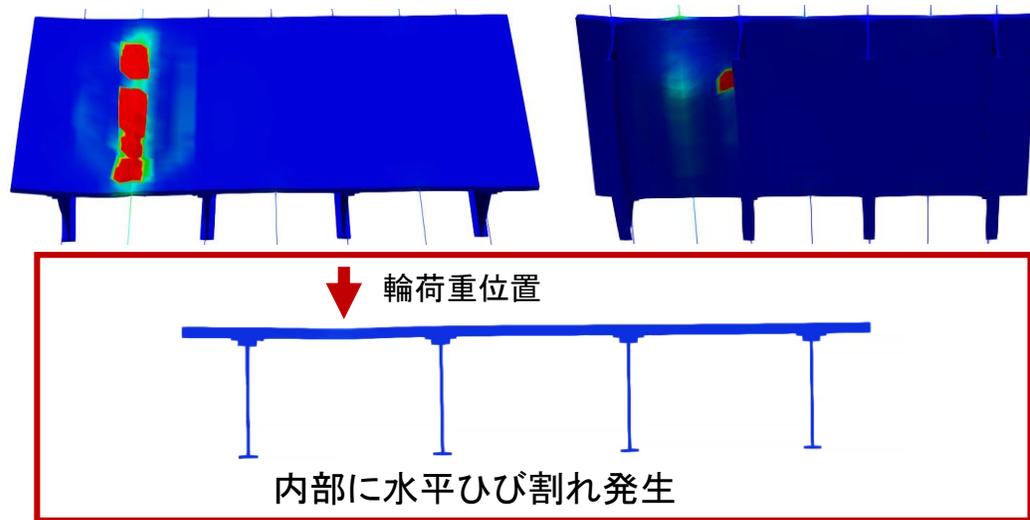
- ✓ 乾燥状態では、床版厚の増加により、疲労サイクルも大幅に増加 (24cmでは損傷が進まない)
- ✓ 乾燥状態に比べ、滞水状態では疲労損傷速度が著しく速くなる
- ✓ 滞水している状態では、床版増厚を行っても疲労耐久性向上への寄与が少ない

乾燥状態



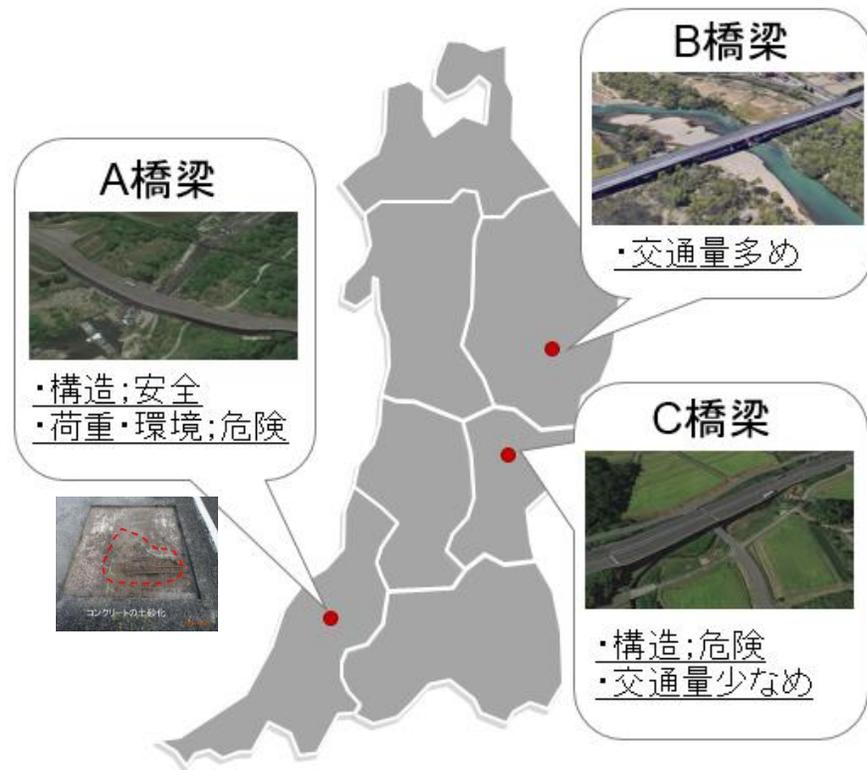
床版下面に、疲労損傷によるひび割れが徐々に進展（外から容易に検知）

滞水状態

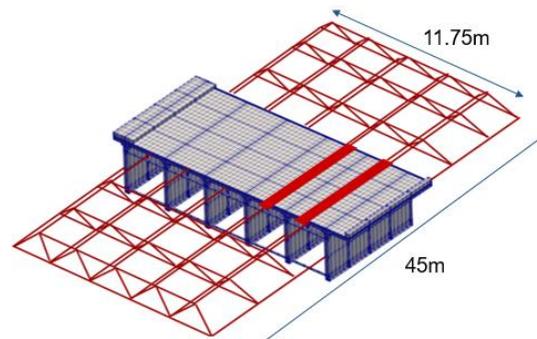


- 床版上面に、損傷が集中（土砂化）。床版下面からは損傷が検知されない。→予兆なく抜け落ちに至ることも。
- 床版内部に、疲労損傷による水平ひび割れが比較的初期の段階から発生。

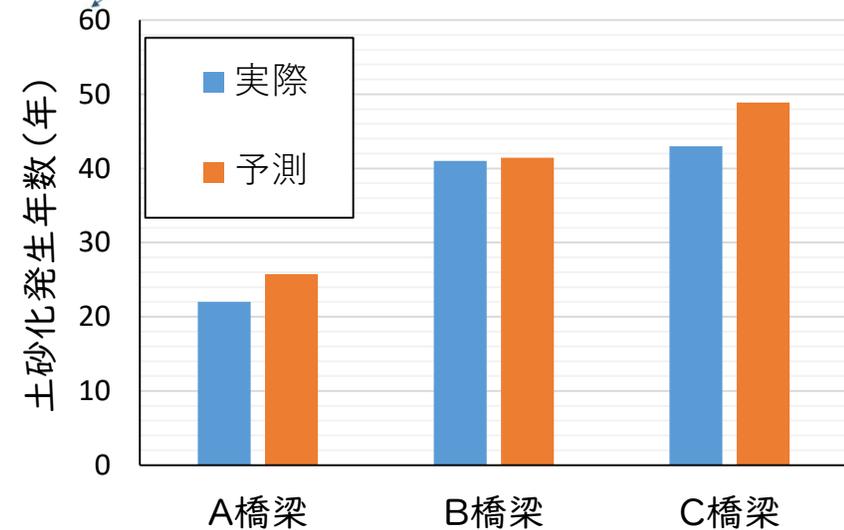
対象橋梁の特徴



構造諸元、環境条件、交通量が異なる3橋梁を選択



各橋梁の構造諸元、環境条件、荷重条件を入力し、解析により土砂化再現

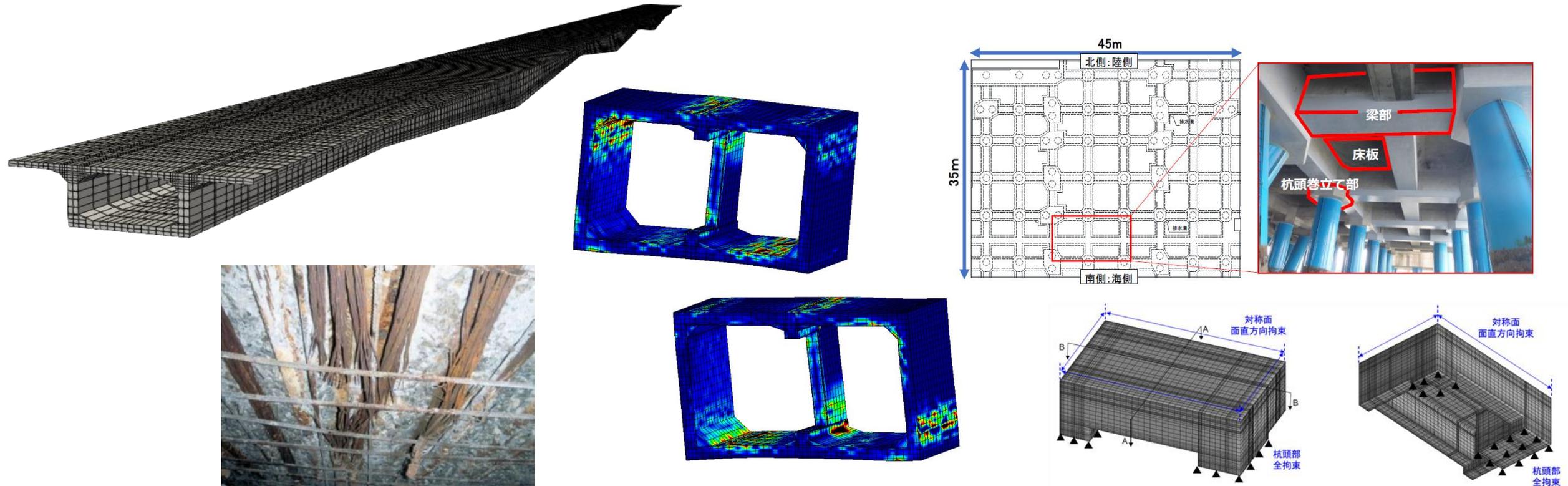


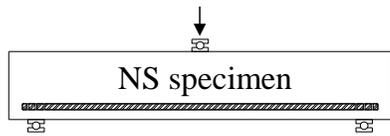
実際の土砂化発生年と予測年がおおむね一致

K値=0.1を土砂化発生判断基準と考えることで、現実橋梁の損傷再現が可能であることを確認
→既往の土砂化再現モデルの妥当性を確認

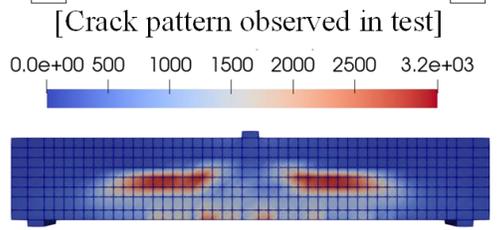
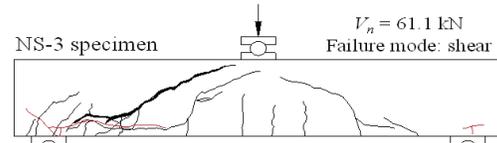
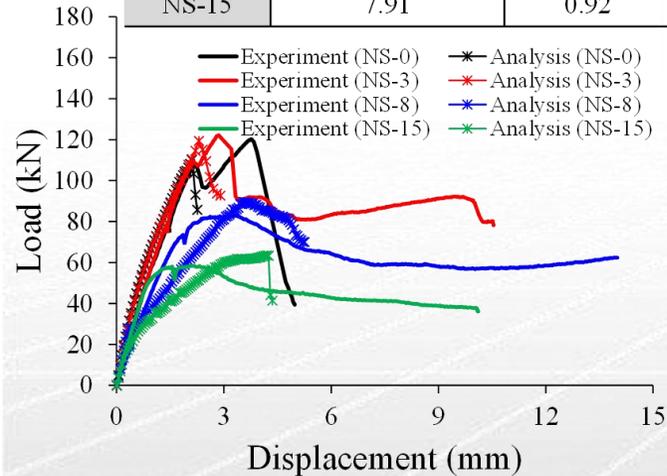
数値解析による劣化した構造物の性能評価

単純梁、栈橋上部工の事例、PC長大橋の事例

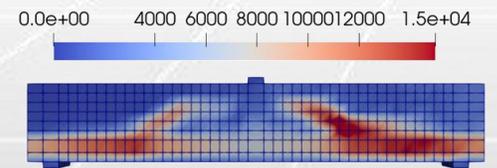
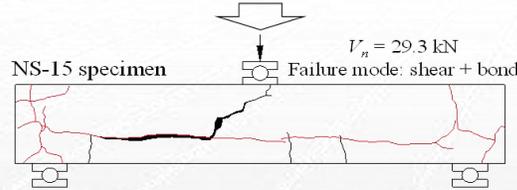




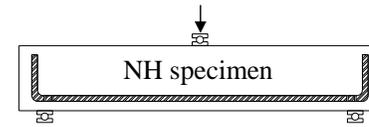
| Specimen | Corrosion degree | $V_{n,test}/V_{n,FEM}$ |
|----------|------------------|------------------------|
| NS-0 | 0 | 1.10 |
| NS-3 | 1.03 | 1.03 |
| NS-8 | 4.35 | 0.93 |
| NS-15 | 7.91 | 0.92 |



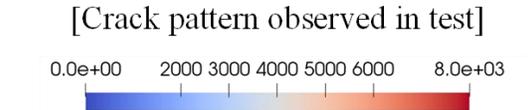
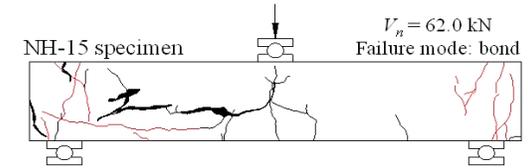
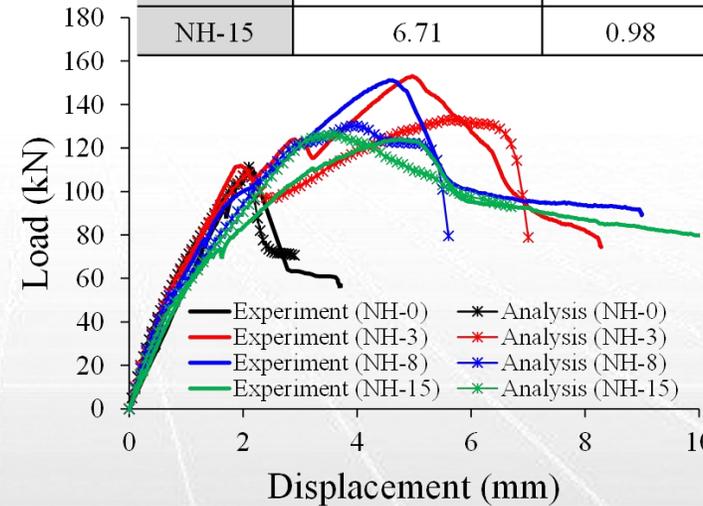
NS-3 specimen
[Principal strain distribution – at failure]



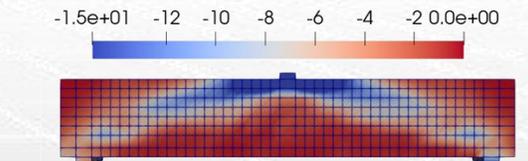
NS-15 specimen
[Principal strain distribution – at failure]



| Specimen | Corrosion degree | $V_{n,test}/V_{n,FEM}$ |
|----------|------------------|------------------------|
| NH-0 | 0 | 0.99 |
| NH-3 | 1.38 | 1.15 |
| NH-8 | 3.88 | 1.16 |
| NH-15 | 6.71 | 0.98 |



NH-15 specimen
[Principal strain distribution – at failure]

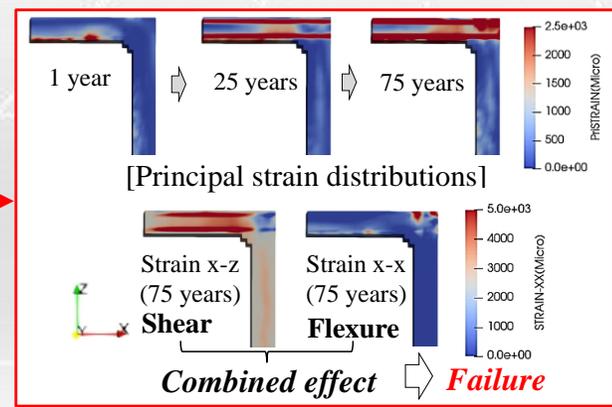
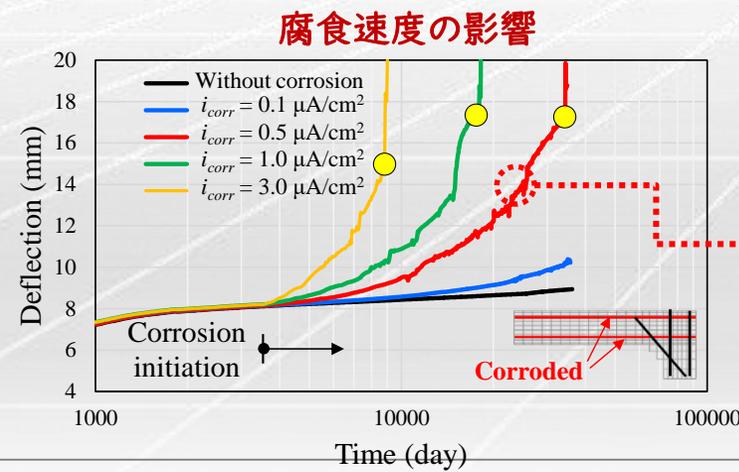
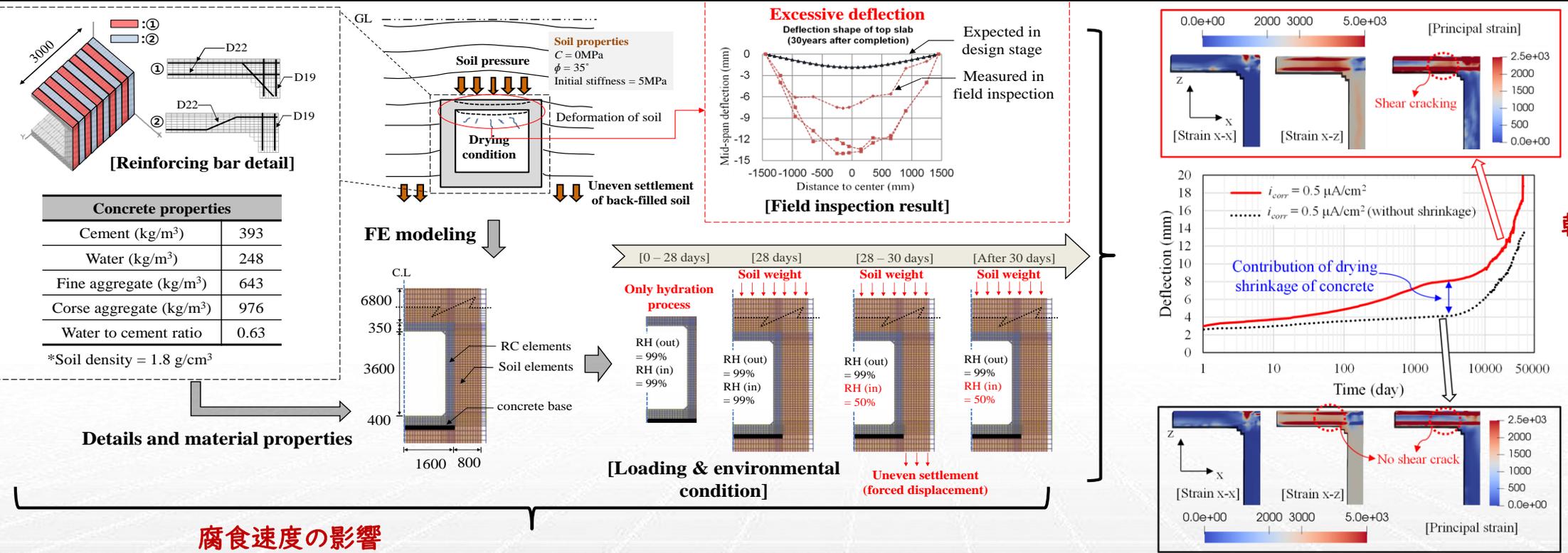


NH-15 specimen
[Principal compressive stress – at failure]

- ✓ 定着が十分で無い場合 (NS)、腐食ひび割れを起点としたせん断ひび割れの進展によりせん断耐力が低下。解析は良好に再現可能。
- ✓ 定着が十分な場合 (NH)、腐食したRC梁は、アーチアクションの形成によりせん断耐力が上昇。解析は良好に再現可能。
- ✓ 健全な構造物 (腐食の無い構造物) の解析と同様の要素分割で、鋼材腐食が与える耐力への影響を良好に追跡可能

持続荷重と鋼材腐食の進行による地中構造物の遅れせん断破壊

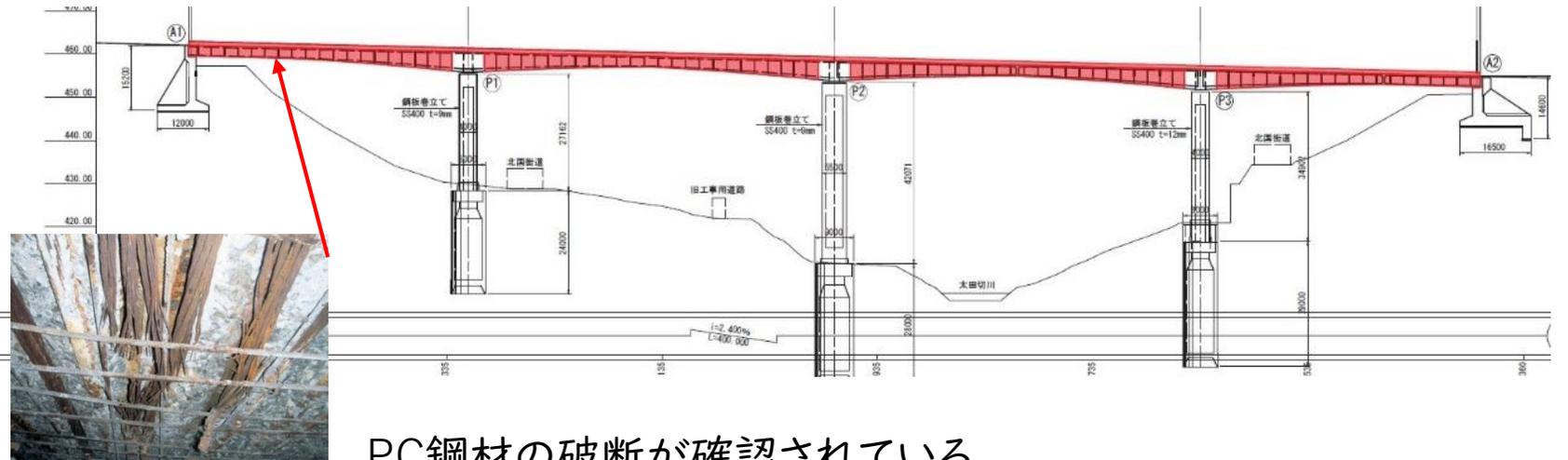
土圧-収縮-クリープ-鋼材腐食の複合による様々なシナリオと維持管理戦略



- ✓ 土圧の持続作用、内空の乾燥収縮、クリープ、腐食進展の複合作用の影響を受け、地中ボックスカルバートの長期変形がもたらされ、条件によってはせん断破壊に至る。
- ✓ 遅れせん断破壊のタイミングは、腐食速度に強く影響を受ける。
- ✓ メンテナンスにおける点検のポイントや、シナリオに応じた適切な対策を取ることが可能に。

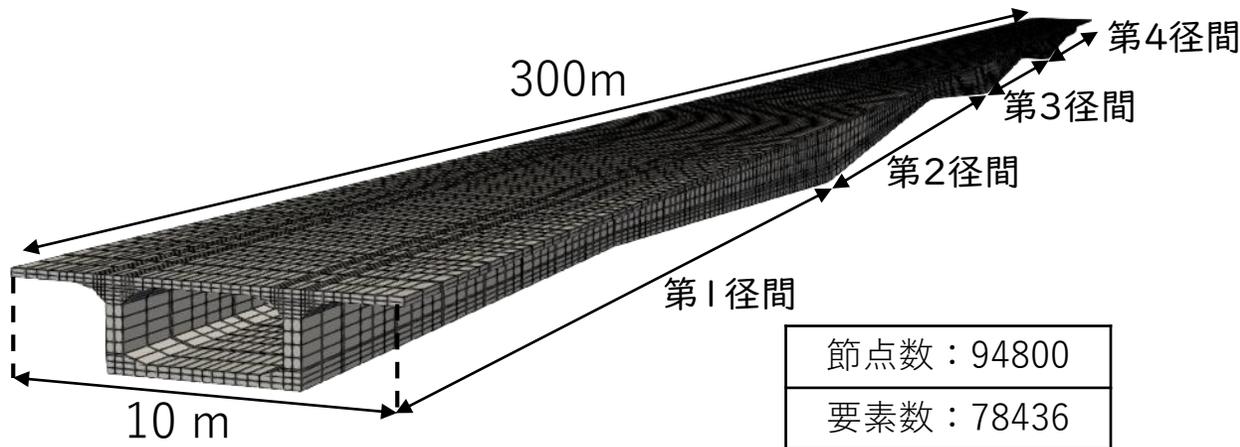
劣化したPC構造物の構造的な性能評価 (房、栗原、土屋、田中、石田 2022-)

PCストランドが腐食・破断した箱桁橋梁を3Dフルスケール有限要素モデルにより再現

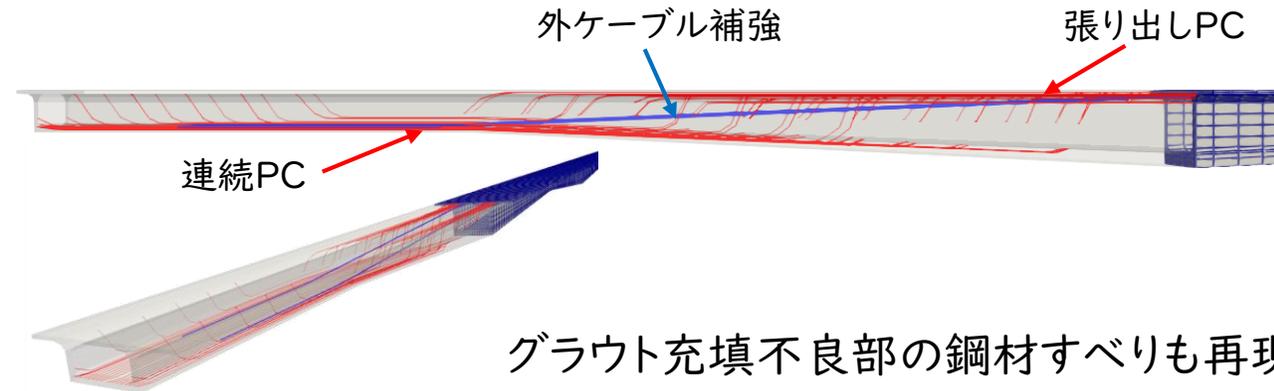


PC鋼材の破断が確認されている

フルスケールFEモデル



PCケーブルもモデル化 (第一径間部)

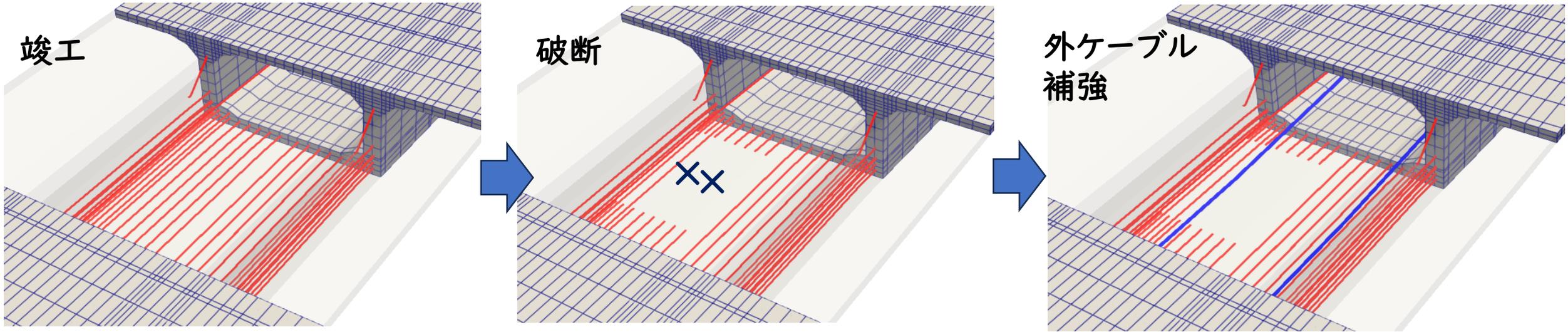


グラウト充填不良部の鋼材すべりも再現

高出力X線および磁気計測によるPC橋梁の腐食状況の検出と構造安全性評価に関する技術開発 (代表: 金沢工大田中泰司教授)、道路政策の質の向上に資する技術研究開発、令和3年度~4年度

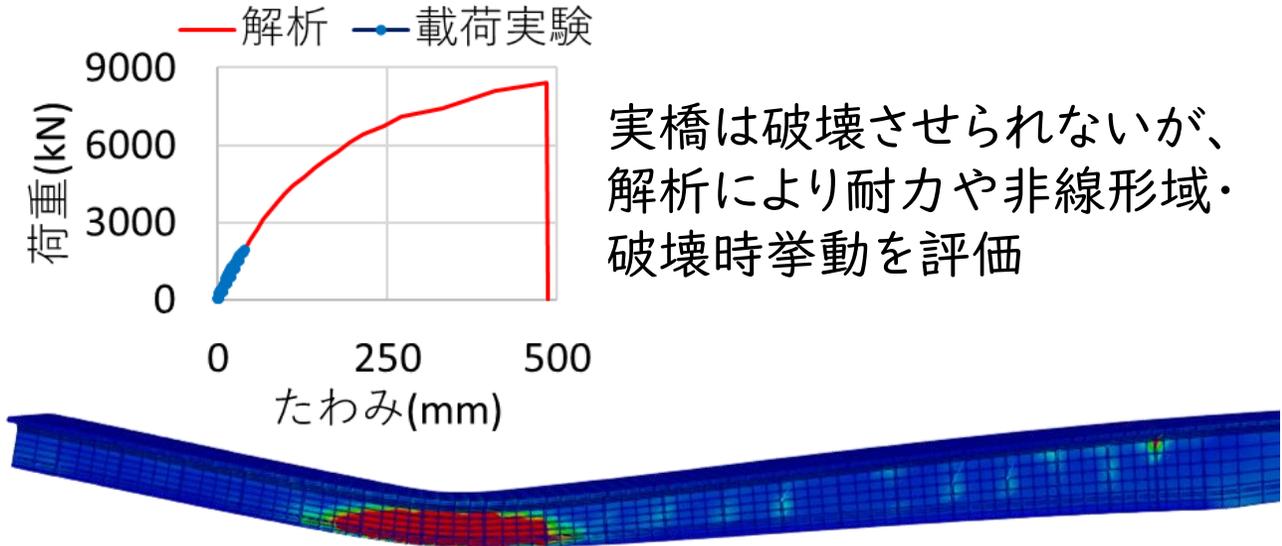
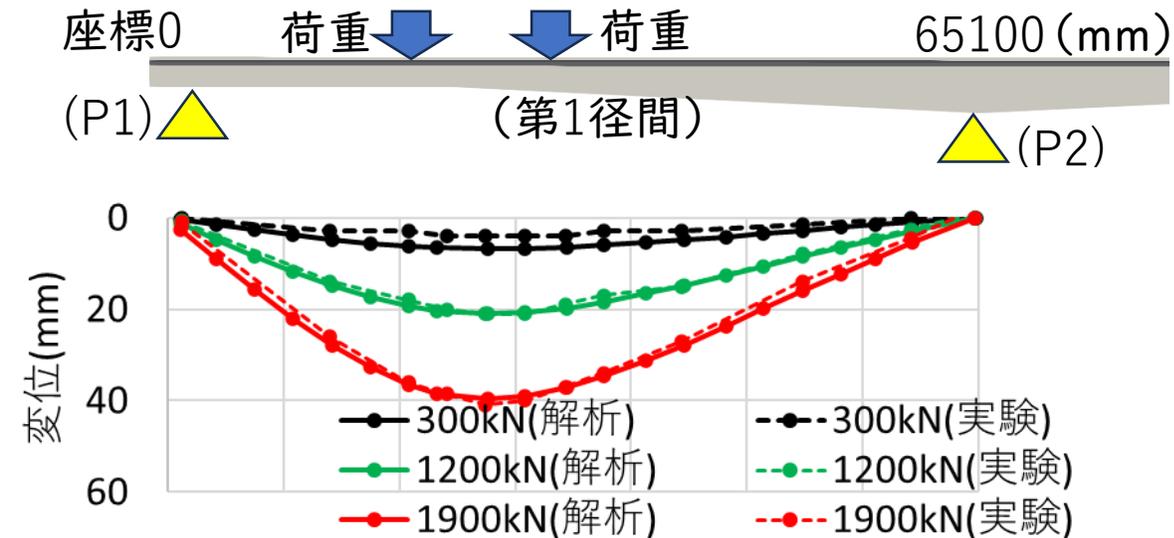
劣化したPC構造物の構造性能評価

竣工、腐食劣化、補強、性能評価(載荷)の順に再現



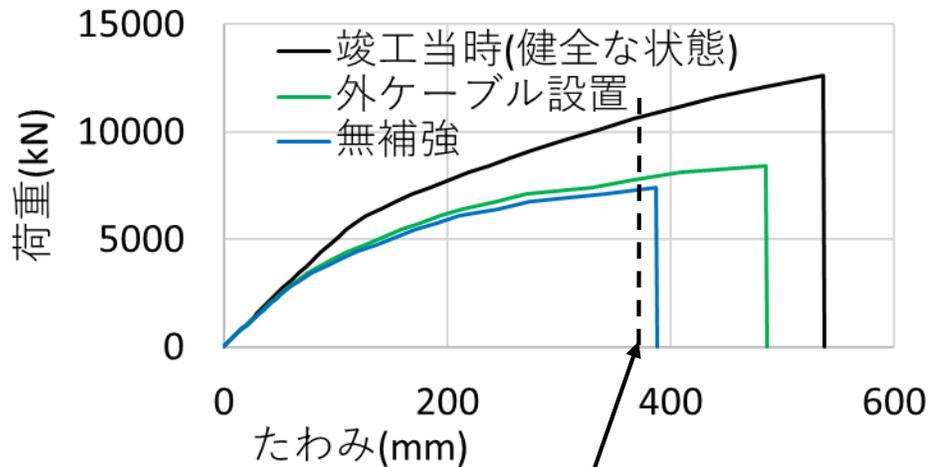
実橋に対する載荷試験の結果との比較

解析による耐力評価

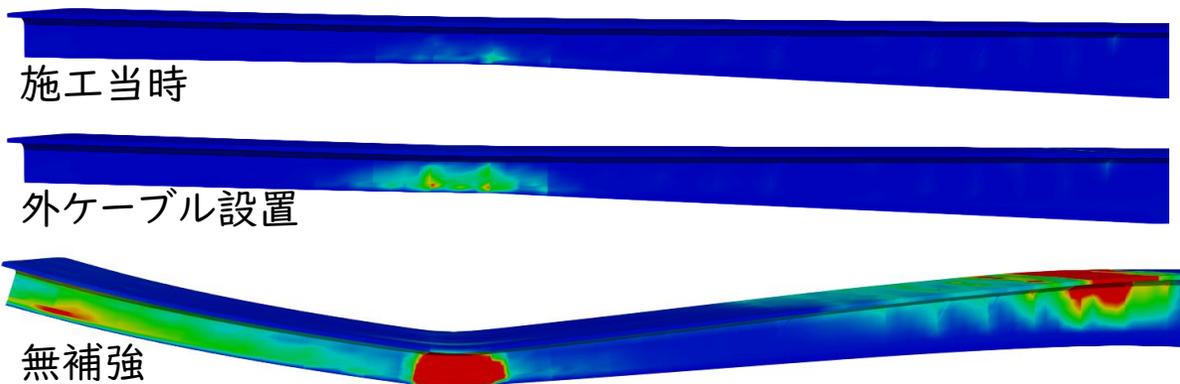


様々なシナリオを想定した解析例

シナリオ① 補強効果の確認



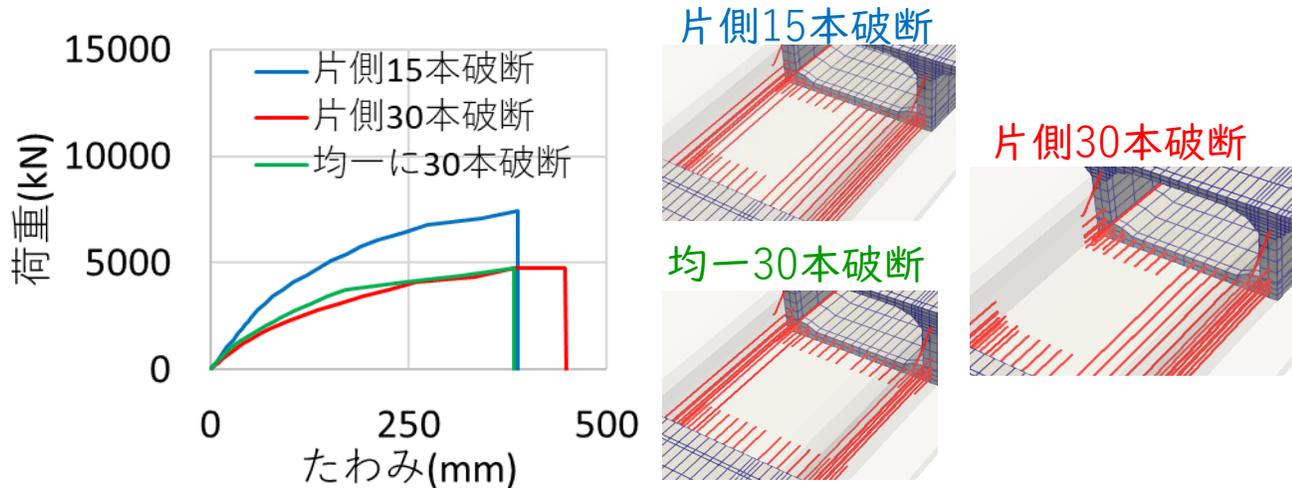
たわみ380mm時の主ひずみ分布・変形 (変形倍率5倍)



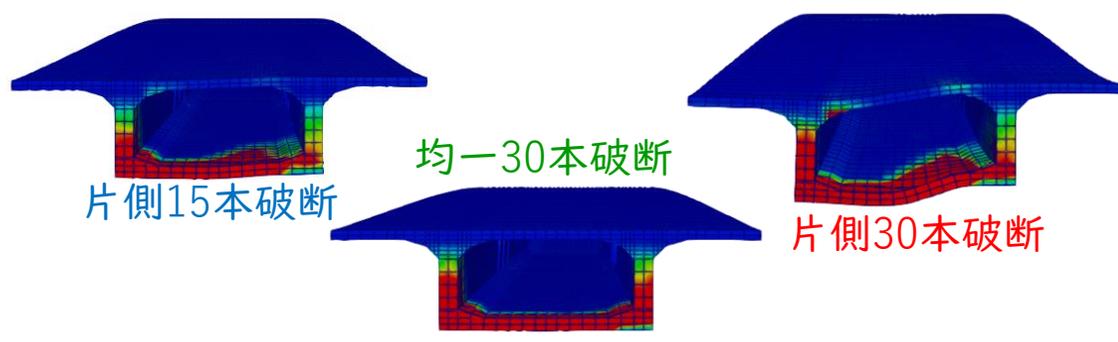
緊急措置として設置した外ケーブルにより靱性が向上

適切な補修・補強設計のためフィードバック

シナリオ② 破断位置や本数の耐力低下への影響



載荷位置断面の主ひずみ分布・変形図(破壊直前・変形倍率5倍)



破断箇所により3次元での変形性状が異なる

重点点検箇所・点検方法へのフィードバック

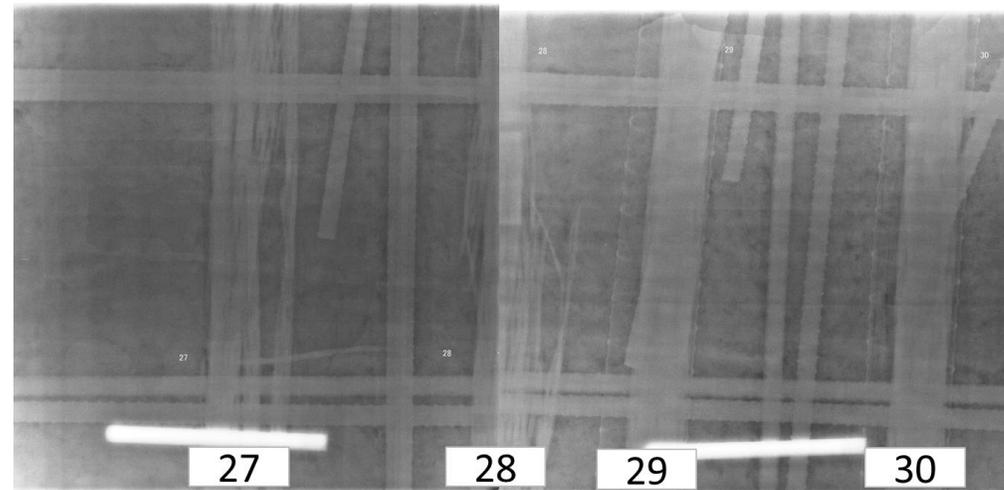
高出力X線による鋼材腐食・破断の検出

可搬型X線照射装置



(妙高大橋桁内, 2015年)

妙高大橋第8ブロックでのX線撮影画像



(コンクリート厚200mm)

上坂充先生提供

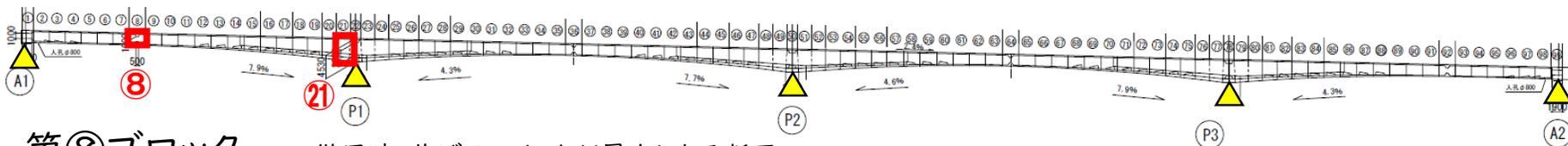
- ・近年、X線照射装置の小型化が実現。現場へ運搬可能に
- ・フィルムのデジタル化、高精細化が進展
- ・CT技術の発達により、3D画像が取得可能
- ・4MeV未満の出力であれば橋梁検査に使用可能(放射線障害防止法)

【高出力X線装置の開発】妙高大橋旧橋での計測

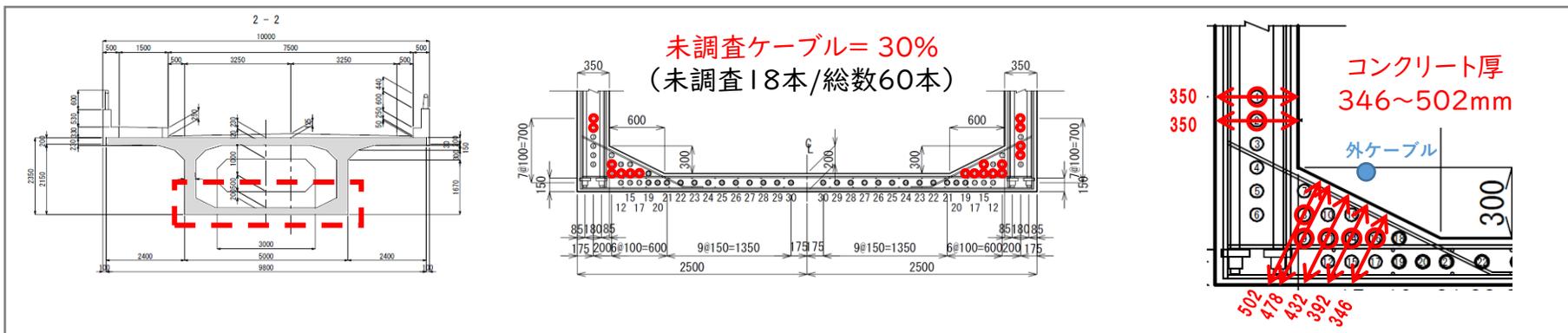
(令和3年度 計画・準備, 令和4年度 実施)

撮影箇所 正負の曲げモーメントが最大となる2断面に着目

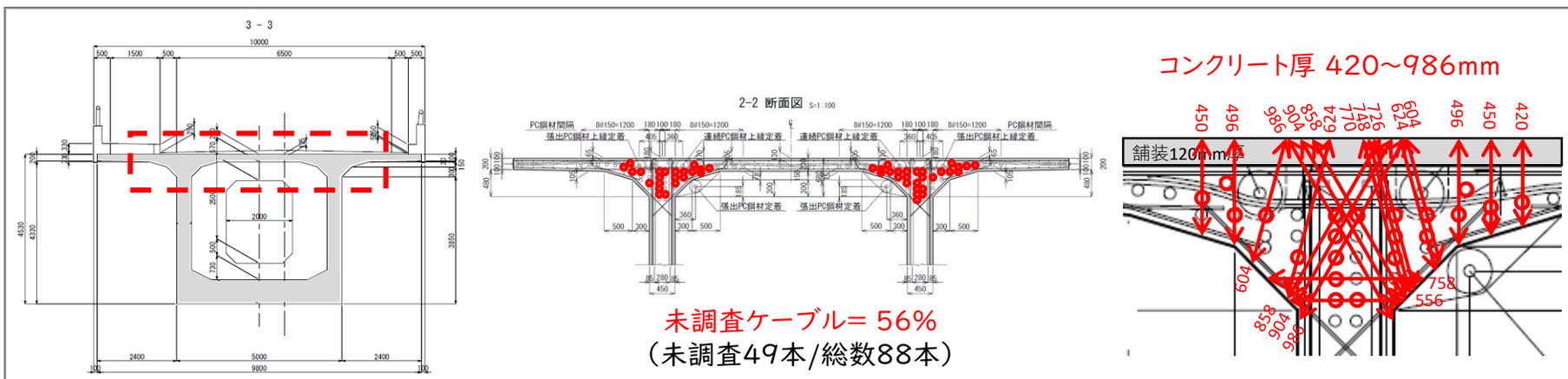
高出力X線および磁気計測によるPC橋梁の腐食状況の検出と構造安全性評価に関する技術開発 (代表: 金沢工大田中泰司教授)、道路政策の質の向上に資する技術研究開発、令和3年度~4年度



第⑧ブロック 供用時、曲げモーメントが最大となる断面



第②①ブロック 施工時、解体時、曲げモーメントが最大となる断面



- ・従来の検査法では検査不可能な場所を高出力X線で検査する(3.95MeV)。
- ・500~1000mm厚のコンクリートを透過する必要がある。

② 放射線解析 (妙高大橋でのX線計測における安全管理)

妙高大橋での検査対象箇所については、下床版(⑧ブロック)、上床版(②ブロック)共に隅角部へのX線照射が必要。

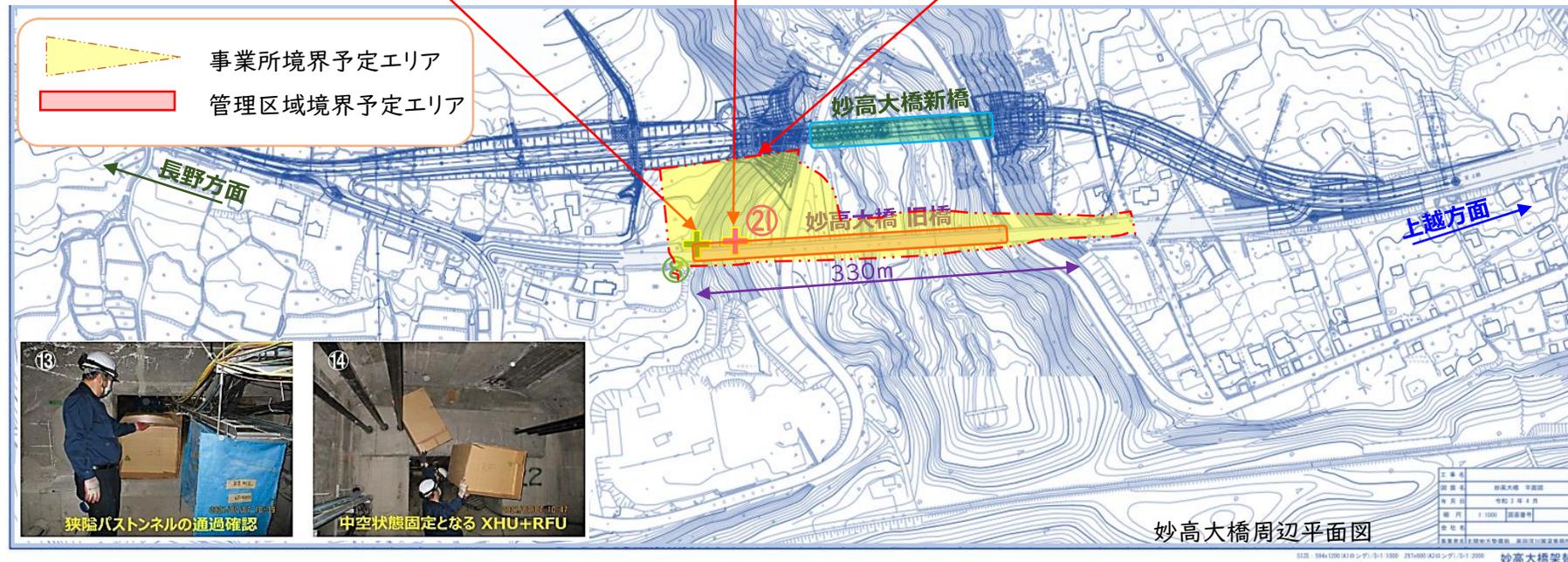
X線検査に使用予定の東大3.95MeV加速器型X線源は水平～下向き照射のみの許可条件⇒新たに上向き照射の許可申請手続き。

箱桁トンネル内にX線源を配置した条件で、照射方向に最も薄いコンクリートスラブについての透過X線線量率の評価を実施。

上床版側では垂直上空側の透過X線によるスカイシャインの線量率の評価を行った。その後、橋梁周辺的环境線量評価を進めた

橋梁まわりに限定する管理区域以外では新妙高大橋側が高線量率となる推計。

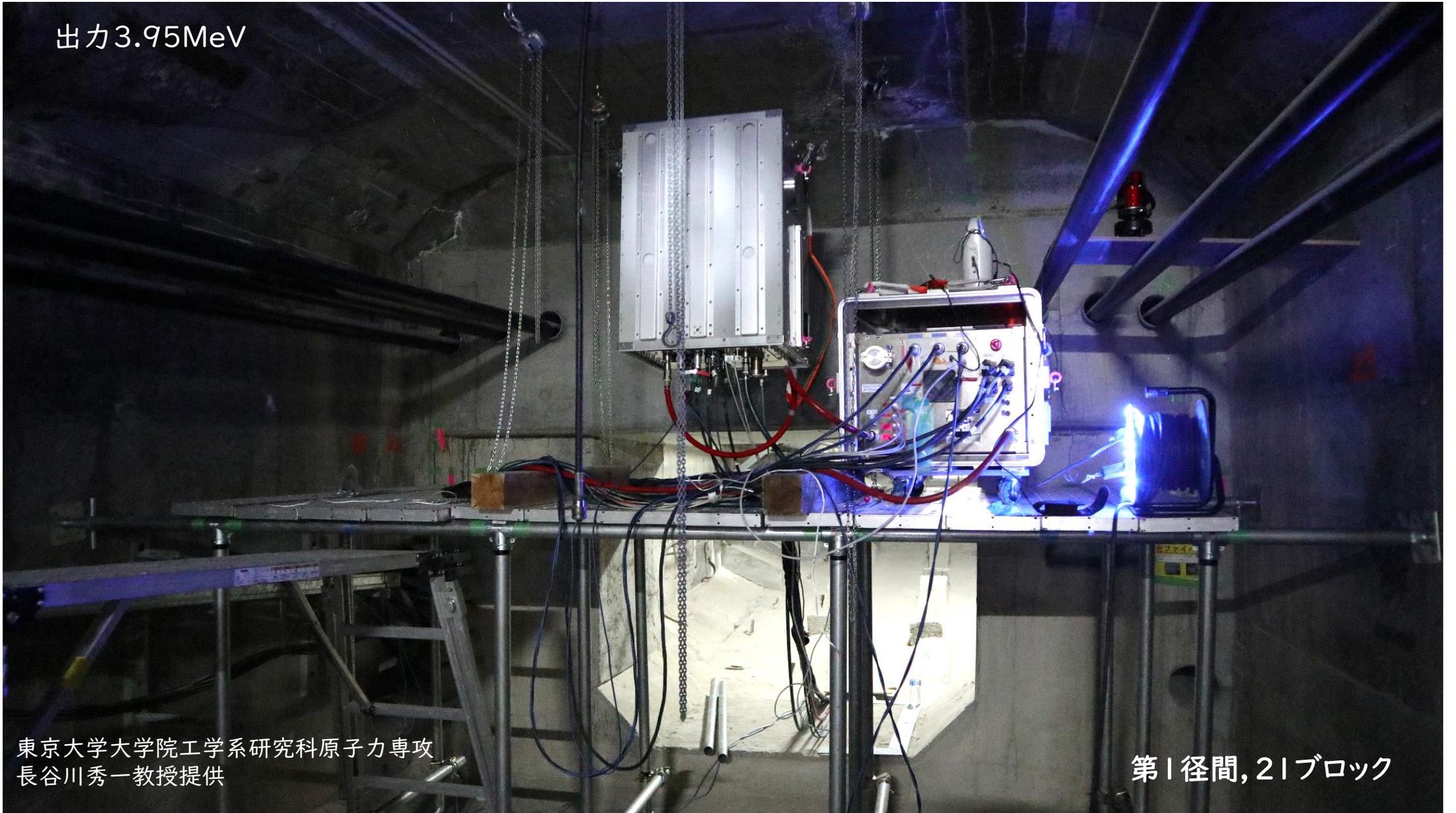
この直近を事業所境界位置としての仮定し、新橋側境界位置までの一般人立入の可能性を検討、現状は山林・崖地であり、周辺に立入規制線を設けて対応する方針。



X線検査時の対応

- ・ 事業所境界予定エリア : 立入禁止区域設定・管理、評価点の環境放射線線量率計測・記録
- ・ 管理区域境界予定エリア : 有資格者業務、X線照射時立入禁止、評価点線量率計測記録、管理区域出入者の入出記録、個人被ばく線量記録、X線照射時間記録

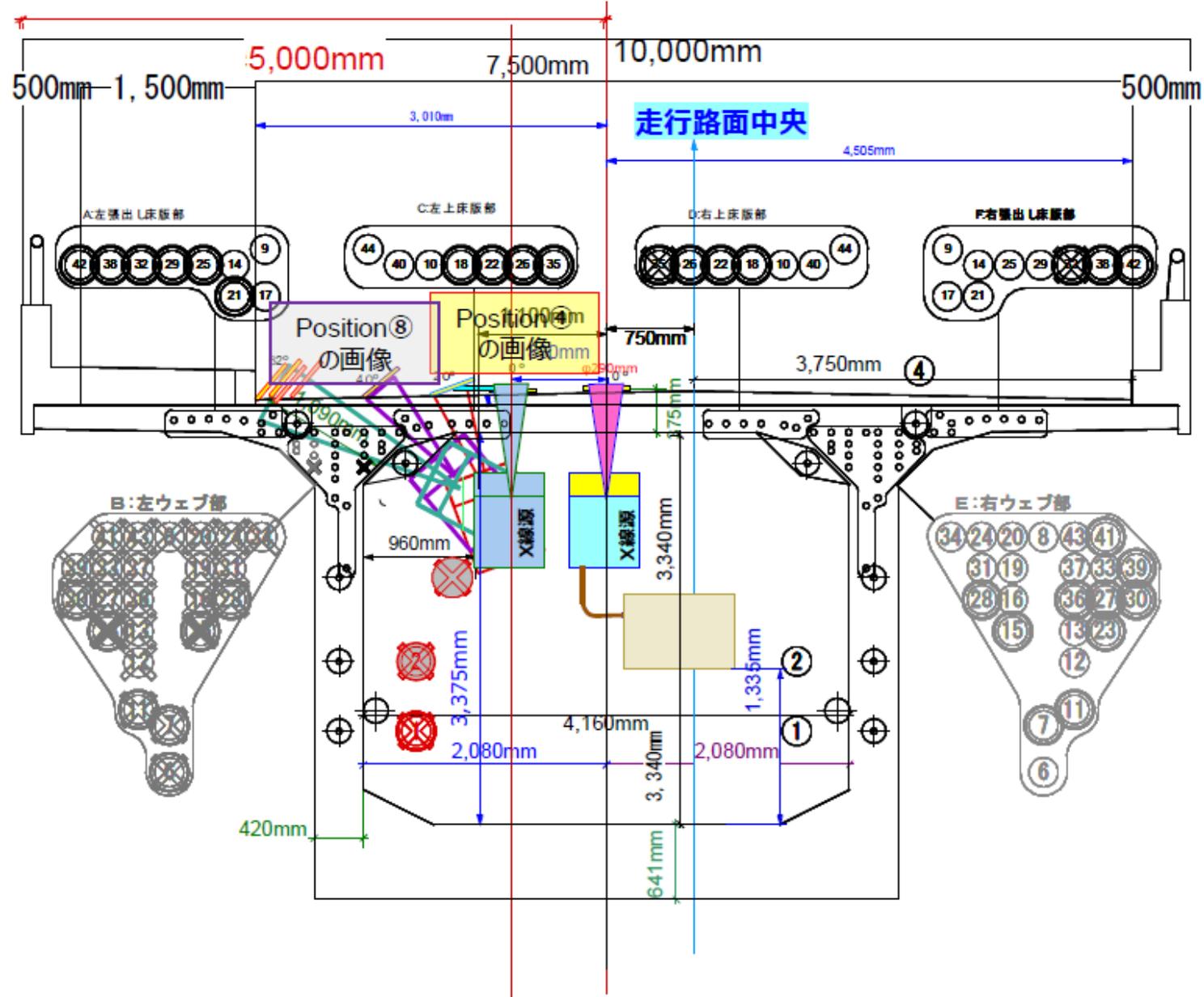
出力3.95MeV



東京大学大学院工学系研究科原子力専攻
長谷川秀一教授提供

第1径間, 21ブロック

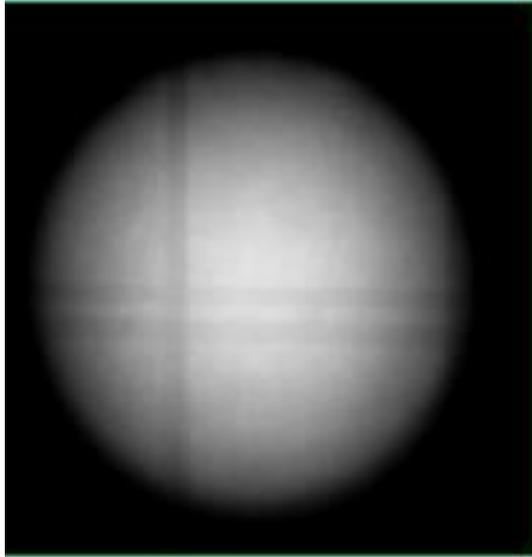
第21ブロックの照射位置



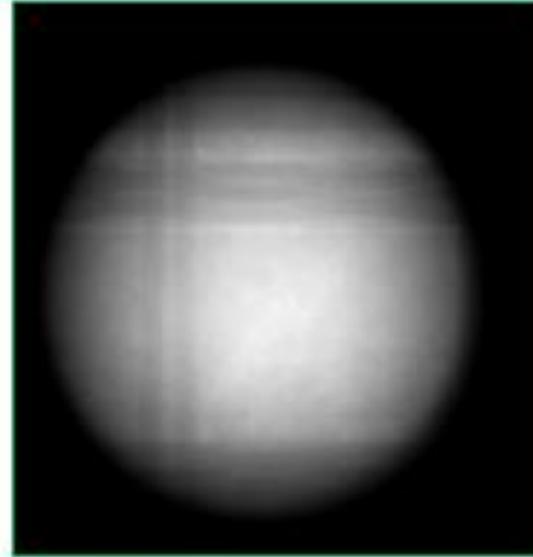
第2ブロックの撮影画像

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻
長谷川秀一教授提供

元画像



Position 3

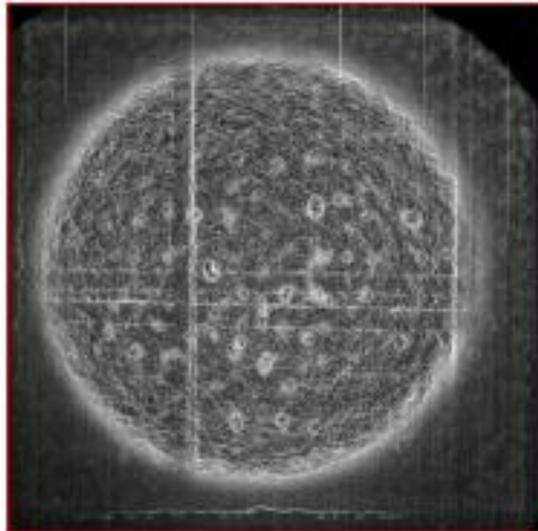


Position 4

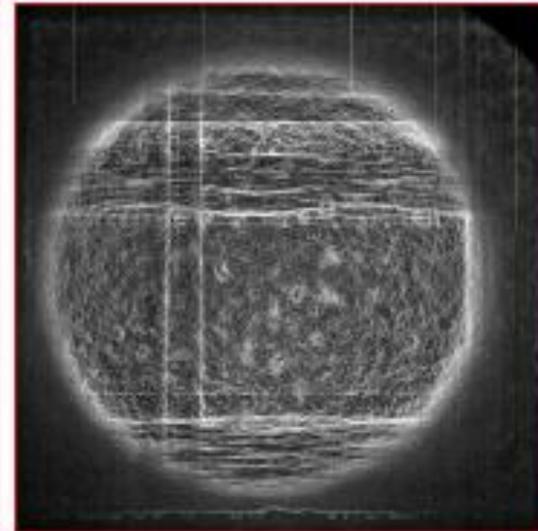


Position 5

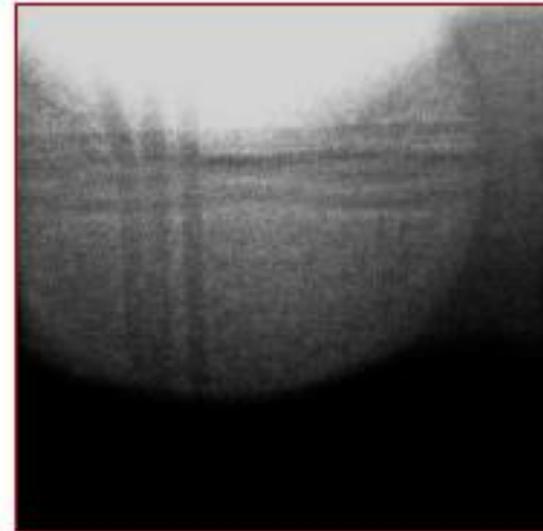
画像処理後



0° (420mm厚)

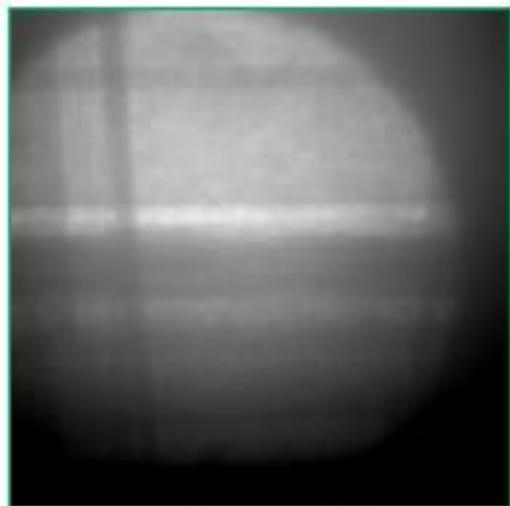


20° (500mm厚)

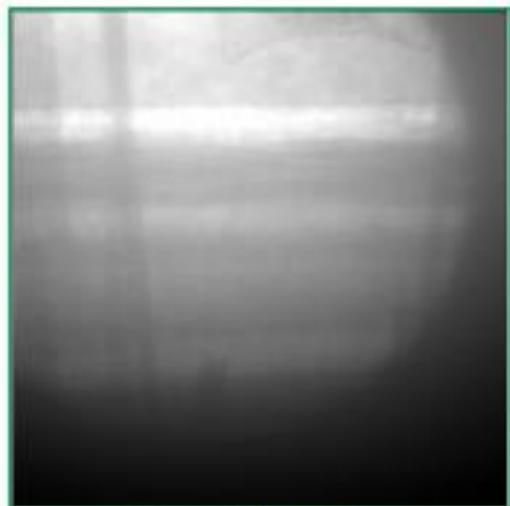


第21ブロックの撮影画像

元画像



Position 7

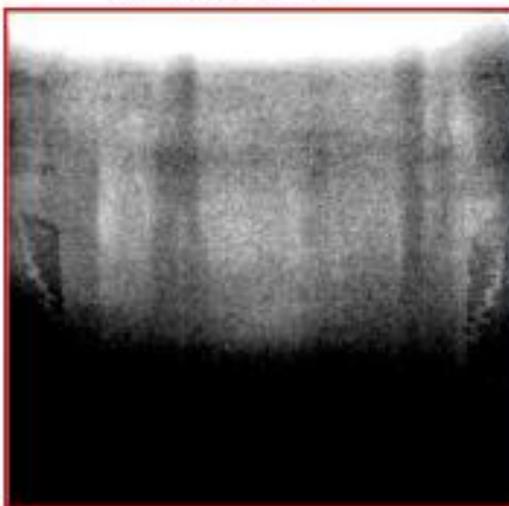
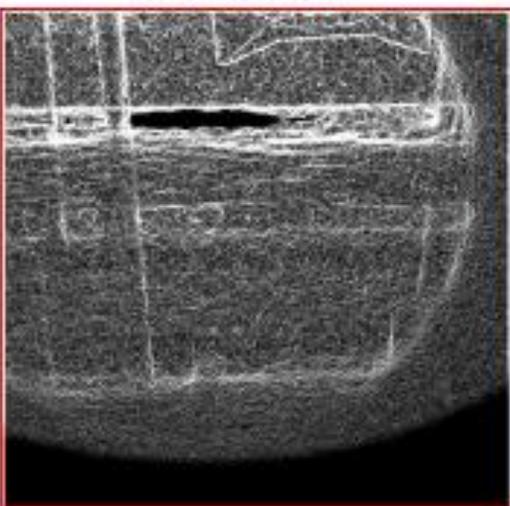
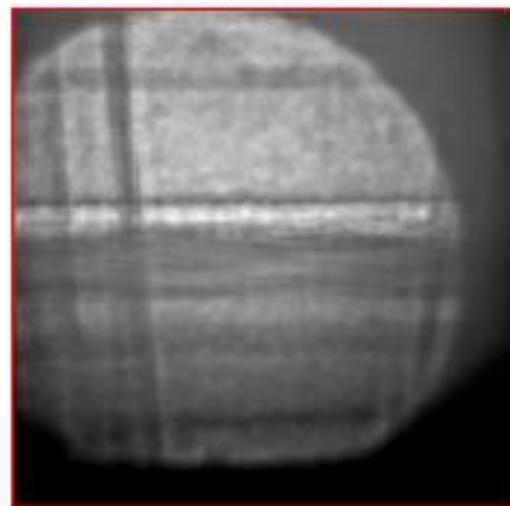


Position 8



Position 9

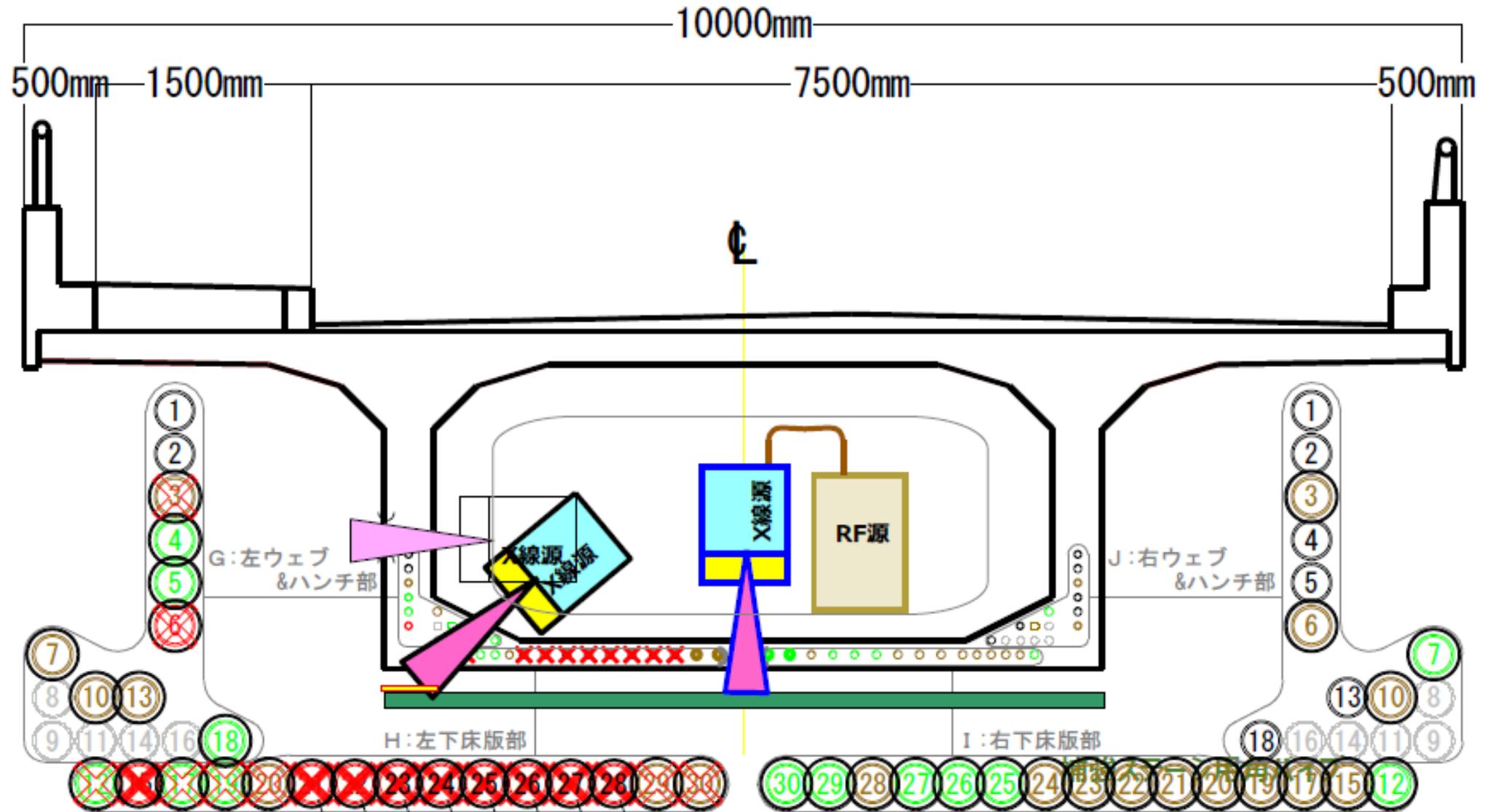
画像処理後



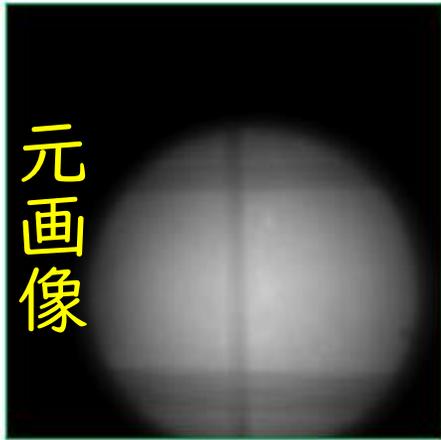
40° (600mm厚)

60° (1100mm厚)

第8ブロックの照射位置



第8ブロックの撮影画像

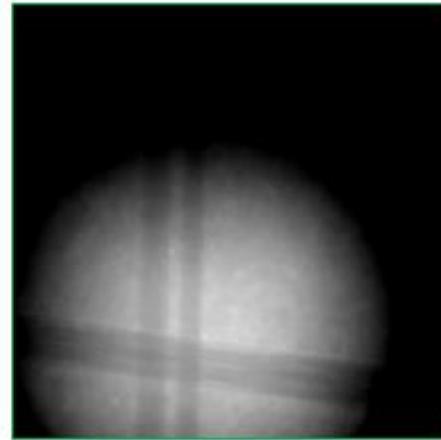


元画像

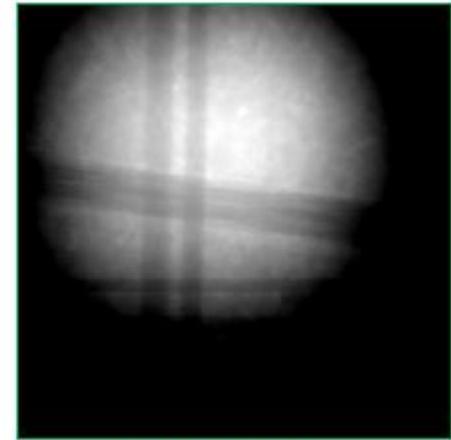
Position 17



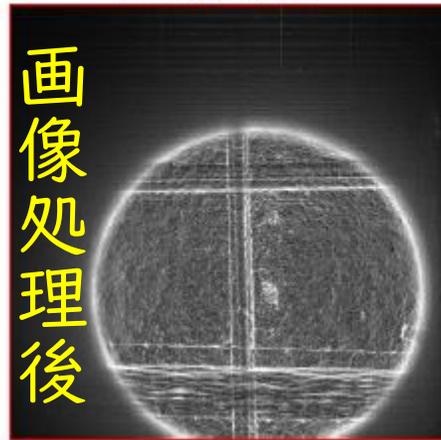
Position 18



Position 19

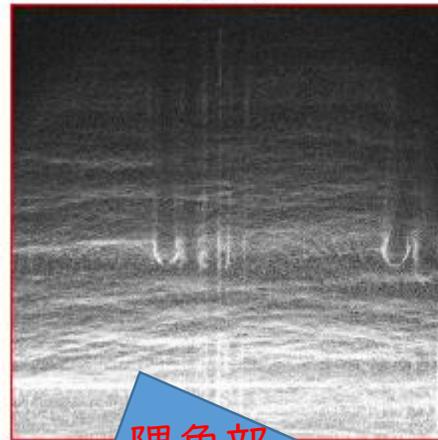


Position 20

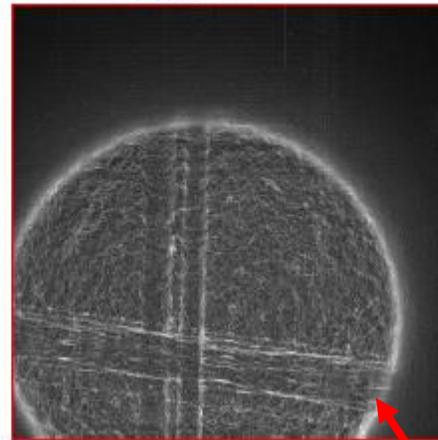


画像処理後

下床版中央
200mm厚



隅角部



ウェブ

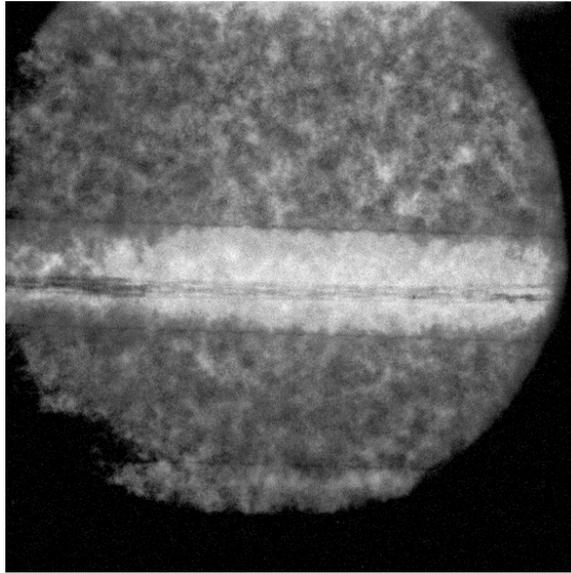


350mm厚

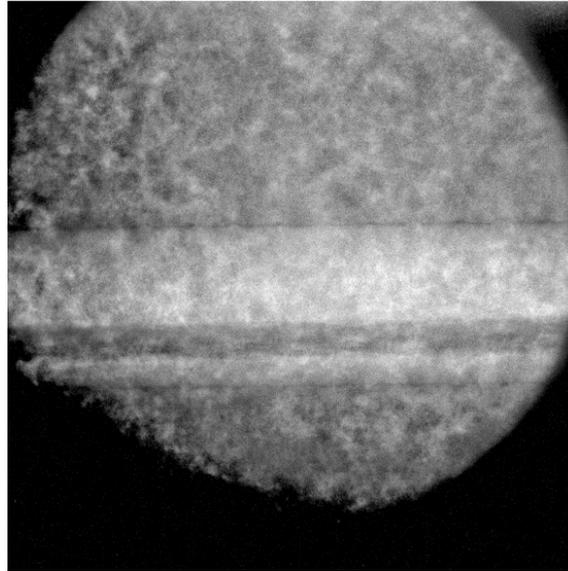


高出力X線 室内試験

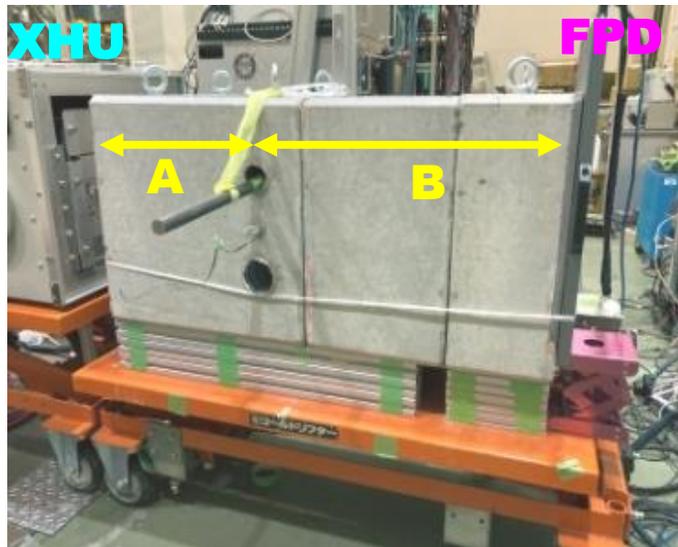
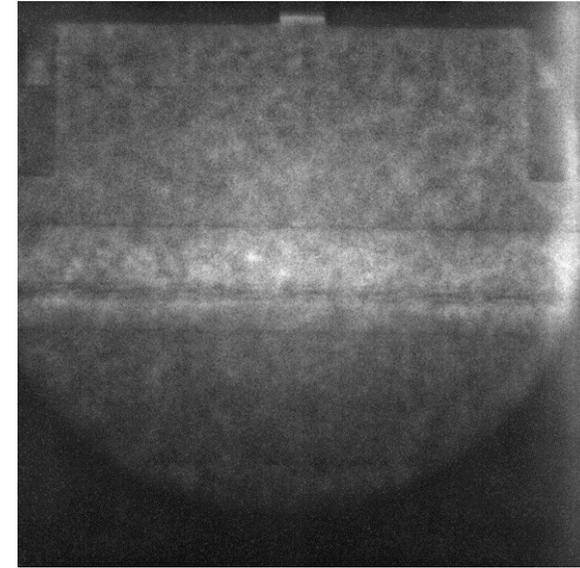
体系1



体系2



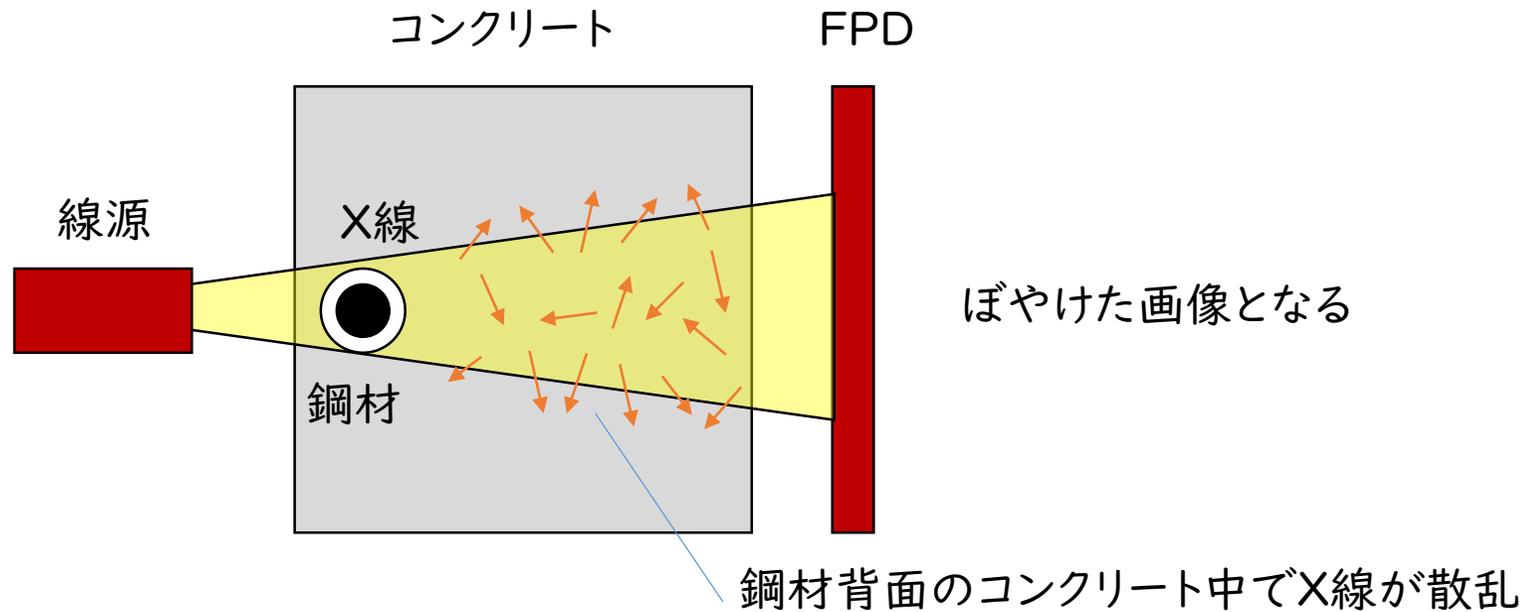
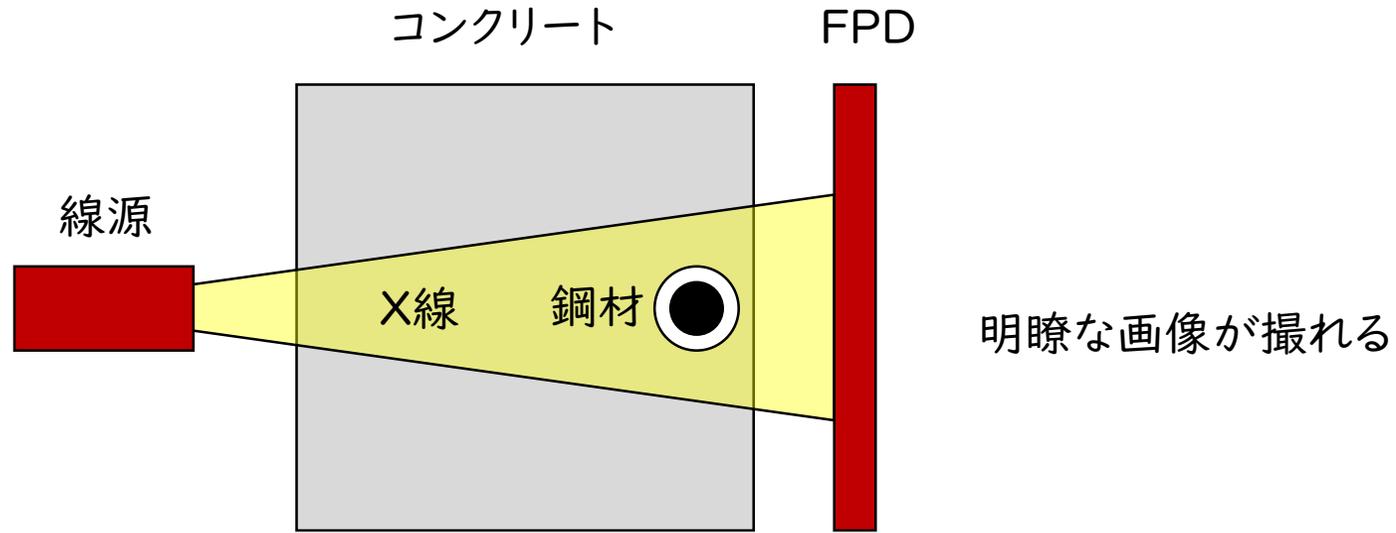
体系3



| | A | B | 計 |
|-----|------|------|------|
| 体系1 | 40cm | 10cm | 50cm |
| 体系2 | 10cm | 40cm | 50cm |
| 体系3 | 40cm | 30cm | 70cm |

全体の厚さが大きいほど、後側が厚いほどシース・鋼材がぼやける

高出力X線 室内試験



- DXの本質の1つは「ハイサイクル化」。少なくとも、現時点で回っていないサイクルを回すことに活用する。
- 将来を予見する(外挿する)数値シミュレーション技術と組み合わせることが出来れば、設計や維持管理技術の更なる高度化が期待される。
- 土木構造物の供用期間は長期にわたるため、現実空間で結果が出る(サイクルを回す)のに時間がかかるが、数値シミュレーションであれば様々なシナリオを検討する(サイクルを回す)ことができる。効率的な点検や最適な補修・補強プランを探ることも可能となる。
- 構造物内部の水分と鋼材の腐食状態を知ることが、精度の高い解析を行ううえで必要不可欠。高出力X線は深い場所を調査可能となるため、精度の高い解析シミュレーションを行ううえで有望な手法。