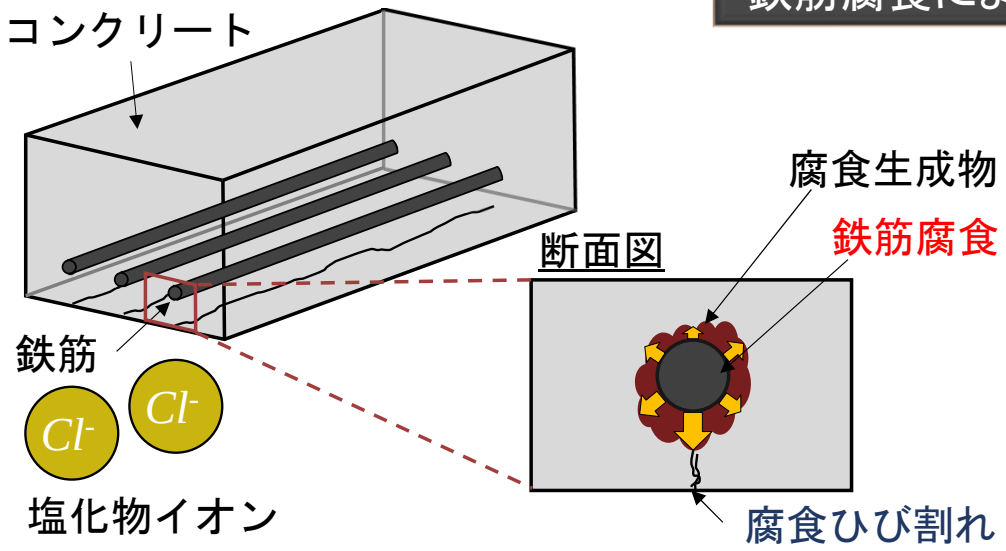
第21回JACIC研究助成事業成果報告会

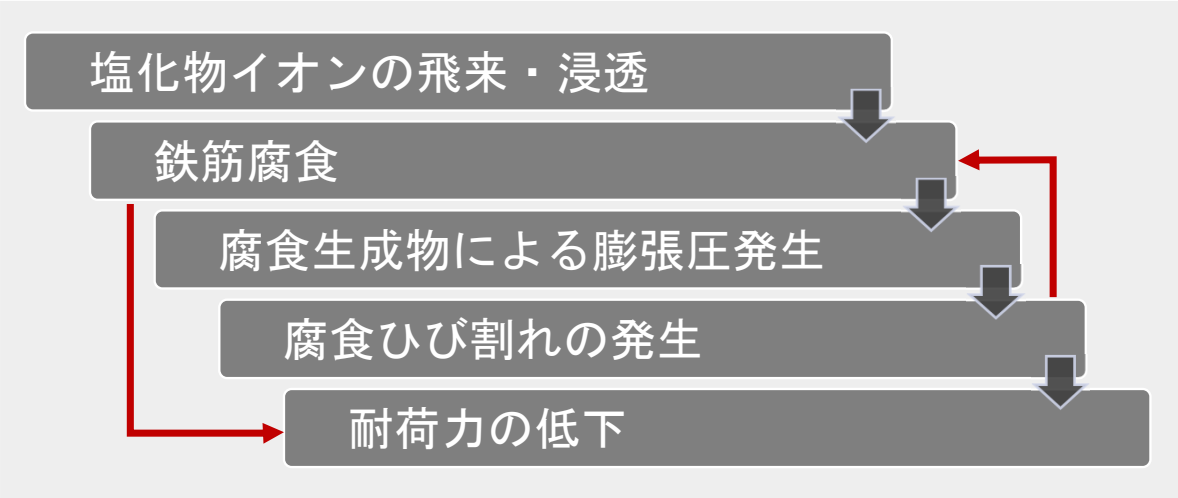
ドローン・機械学習・3次元構造解析・信頼性理論の融合による劣化RC橋梁の健全度の自動判定

早稲田大学理工学術院
教授　秋山充良

研究の背景・目的

鉄筋腐食によるRC部材の耐荷力低下



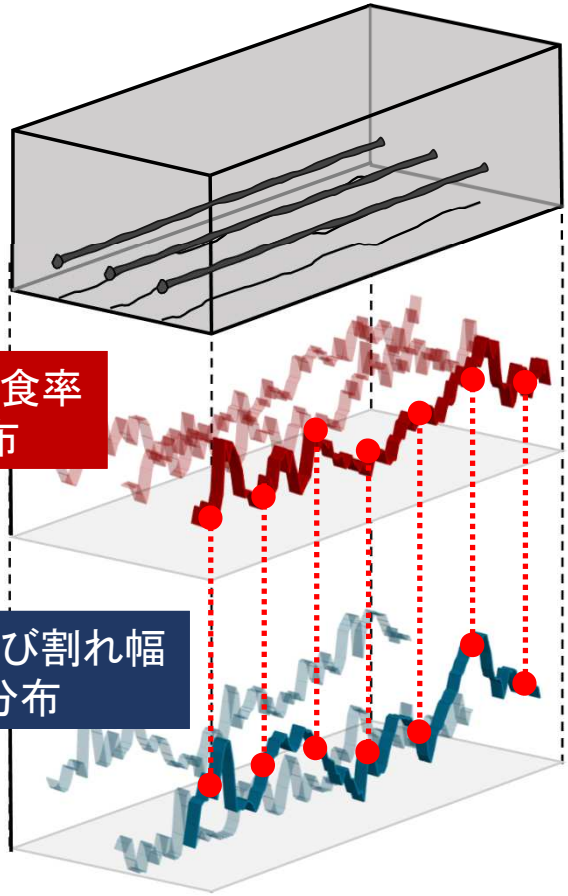


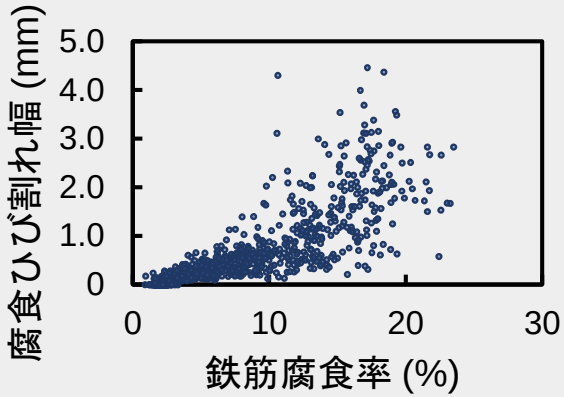
- ✓ 鉄筋腐食が耐荷力低下の要因となる
- ✓ 観測可能な腐食ひび割れ幅は，鉄筋腐食率を予測する上で有力な指標

腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測し，耐荷力を推定したい

研究の背景・目的

鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係



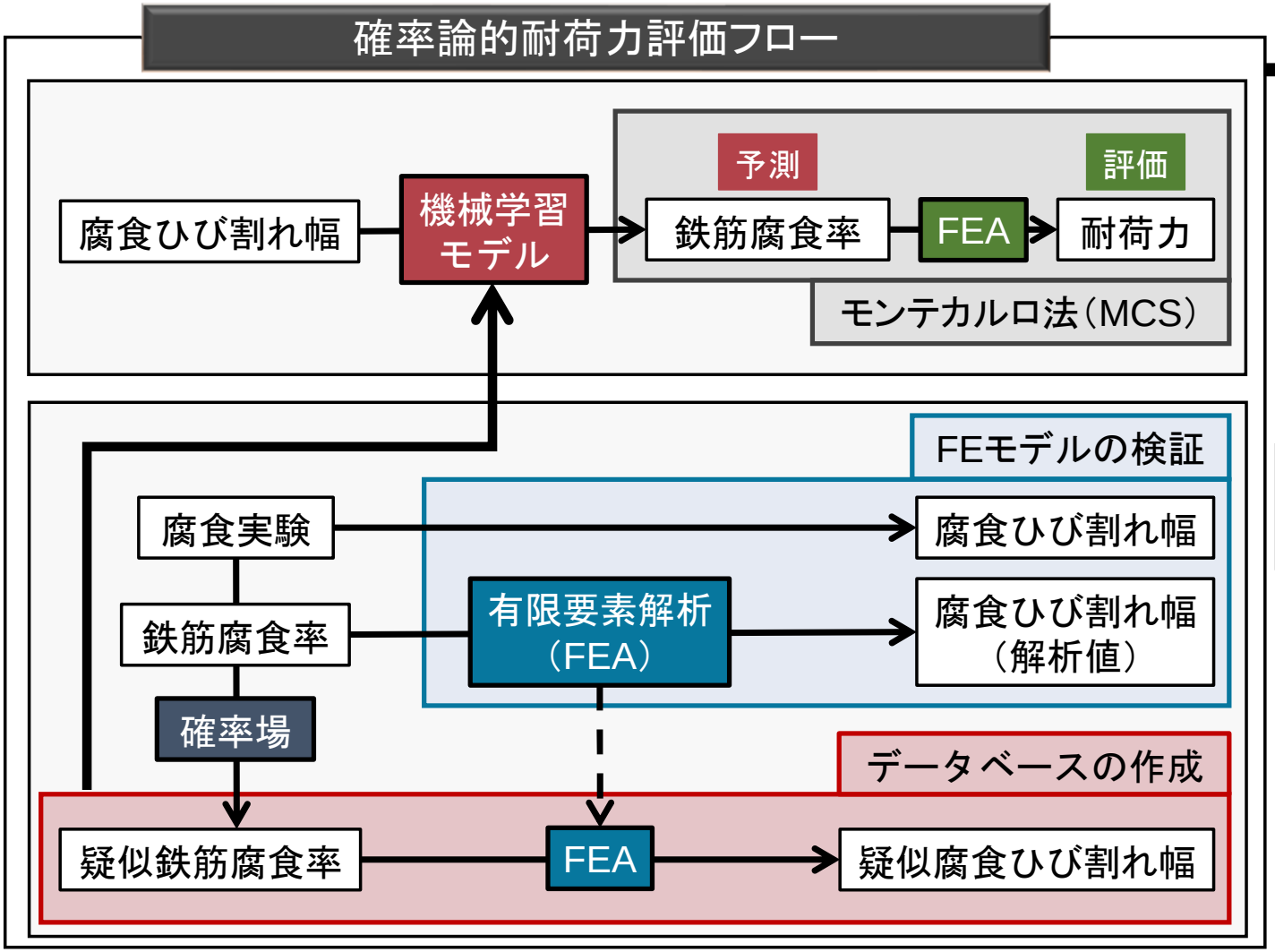


鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係には
多くのパラメータが介在し，ばらつきがある
→ 構造諸元（細目）・材料強度・腐食環境等

引用：Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M., Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method, Eng. Struct. 192 (2019) 30–52.

腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を
予測することは困難

研究の背景・目的



入力と出力が非線形な問題を解くのに有用な機械学習により，腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測し，有限要素解析（FEA）により耐荷力を推定した．

（Srivaranun, S., Akiyama, M., Taiki, Y., Frangopol, D.M., and Xin, J.: A novel combined experimental-machine learning approach to estimate the probabilistic capacity of RC beams with spatially correlated rebar corrosion in transverse and longitudinal directions, *Engineering Structures*, 279: 115588, 2023.）

実構造物への適用に向けて，実用的なフローに拡張する

研究の背景・目的

インフラ構造物の点検におけるドローンの活用

実構造物に適用するためには，腐食ひび割れ幅を取得する技術について検討が必要

- ✓ 近接目視以外の点検技術の活用が認められ，点検コストの削減を期待し，ドローンによる画像撮影がインフラの点検に活用されつつある.
- ✓ ひび割れ幅の自動取得などが試みられているが，その結果に基づいて構造物の耐荷力を予測し，補修・補強の要否や，経過観察などの「診断」に活用できていない.

➠ 効率的な維持管理のため，ドローンによるひび割れ幅の測定から構造物の「診断」までを一貫して行なっていく必要がある.

写真：岐阜大学

ドローンによる撮影

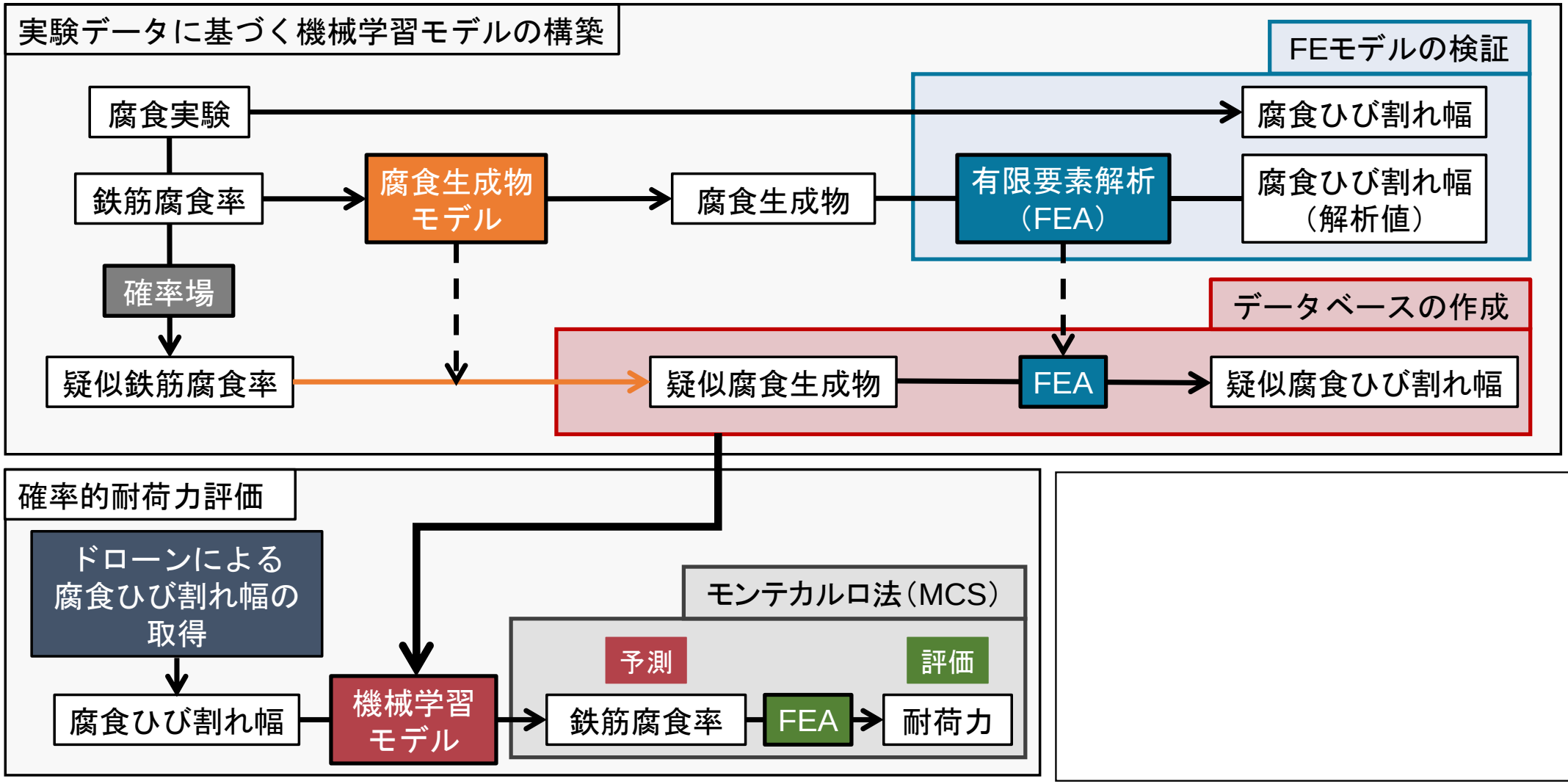
ひびわれ幅，錆汁，鉄筋露出等の測定や検出

本研究の目的

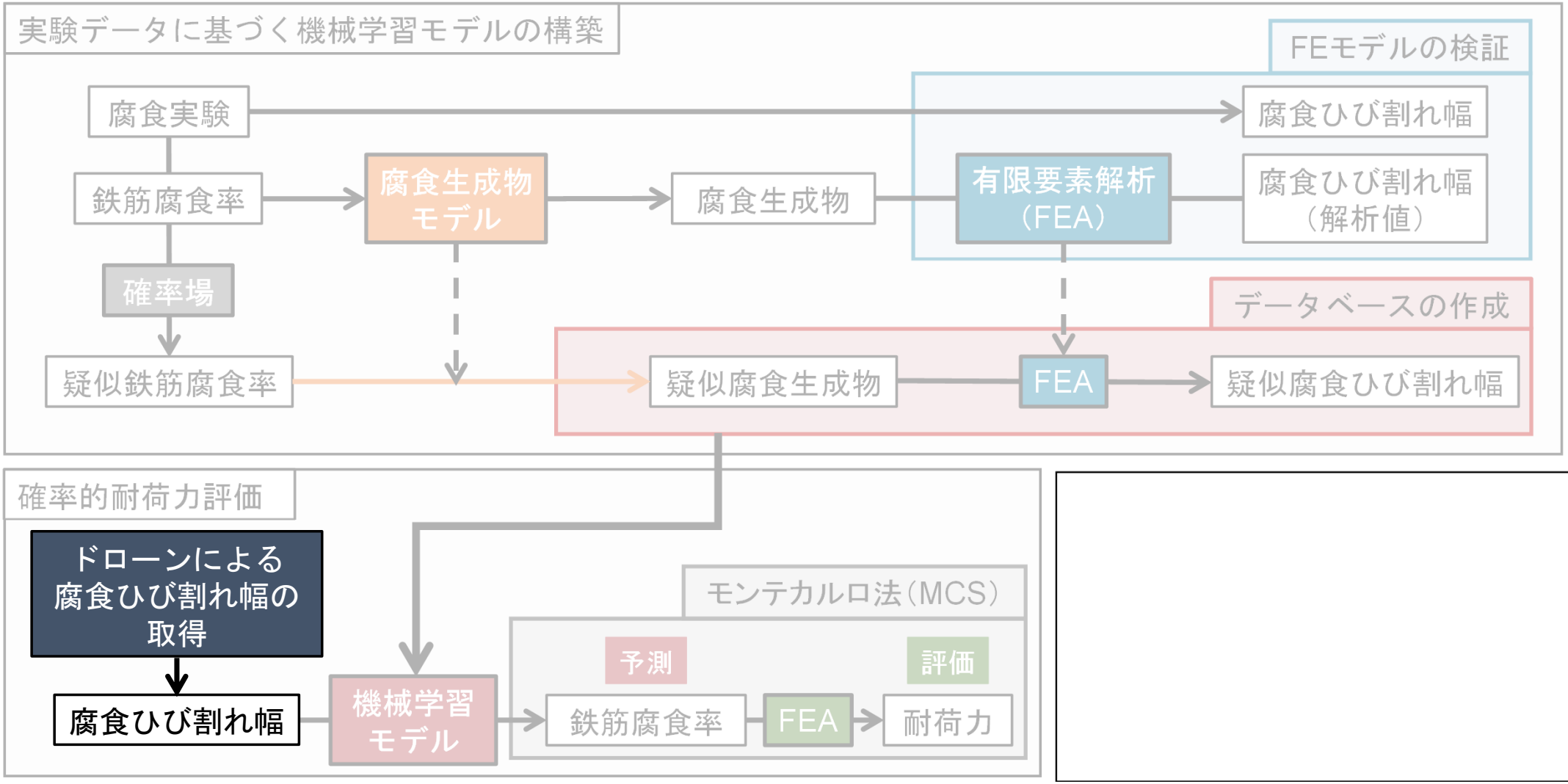
ドローンによる点検と耐荷力評価フローの一体化

ドローンによる撮影画像から得られる腐食ひび割れ幅分布と機械学習を用いて，RC部材内の鉄筋腐食率を予測し，推定された鉄筋腐食率から耐荷力評価を行う.

耐荷力評価フロー


実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

耐荷力評価フロー

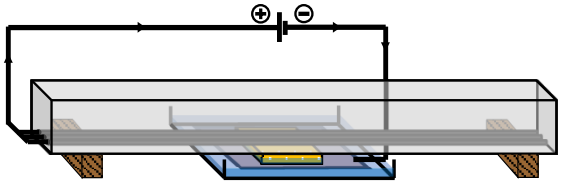

実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

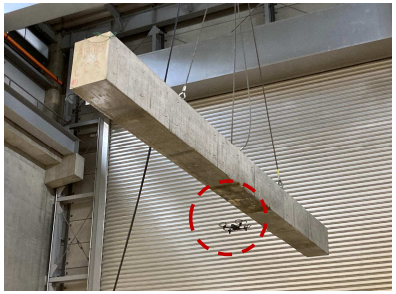
腐食ひび割れ幅の取得

ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得

実構造物を想定した大型RCはりを電食実験により腐食させた後，RCはりをクレーンで吊上げ，
底面に生じた腐食ひび割れをドローンにより撮影

大型RCはり寸法
370×450×6000
(単位：mm)





←ドローンにより
腐食ひび割れを
撮影している様子

➢ 本研究で使用したドローン

ドローン名称		Skydio	ANAFI
イメージ			
画像解像度		1230万画素	1590万画素
ひび割れ計測精度	0.20mm未満	0.12mm	-
	0.20mm以上	0.06mm	

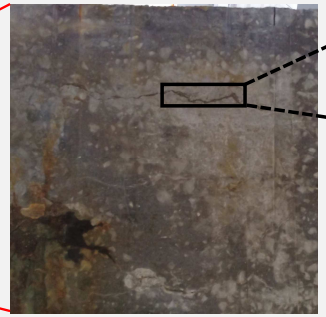
Skydio：
現場での使用実績があり，
ひび割れの計測精度が
示されている

ANAFI：
市販のドローン

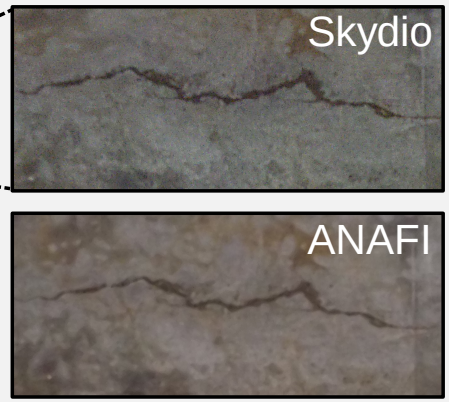
腐食ひび割れ幅の取得

ドローンとディジタル画像処理による腐食ひび割れ幅分布の取得

①RC部材底面に生じた腐食ひび割れ画像の撮影



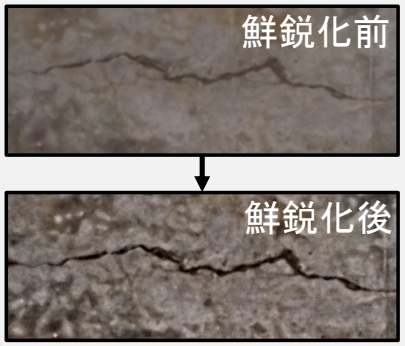
腐食ひび割れ画像



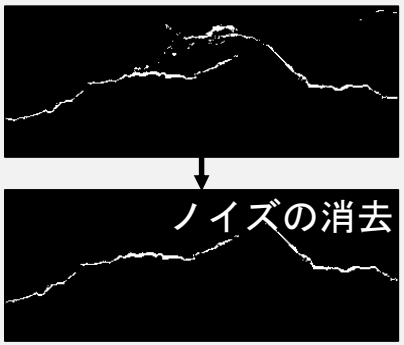
ドローンの種類に関わらず焦点が合っていない画像

- RCはりの下部から撮影するため，影になり暗くなる
- 機体が振動や風によって揺れる

②鮮鋭化処理

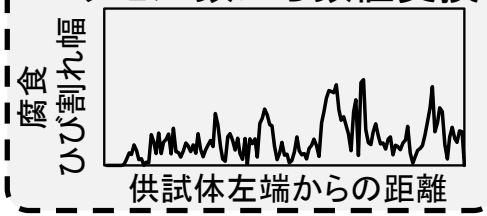


③二値化



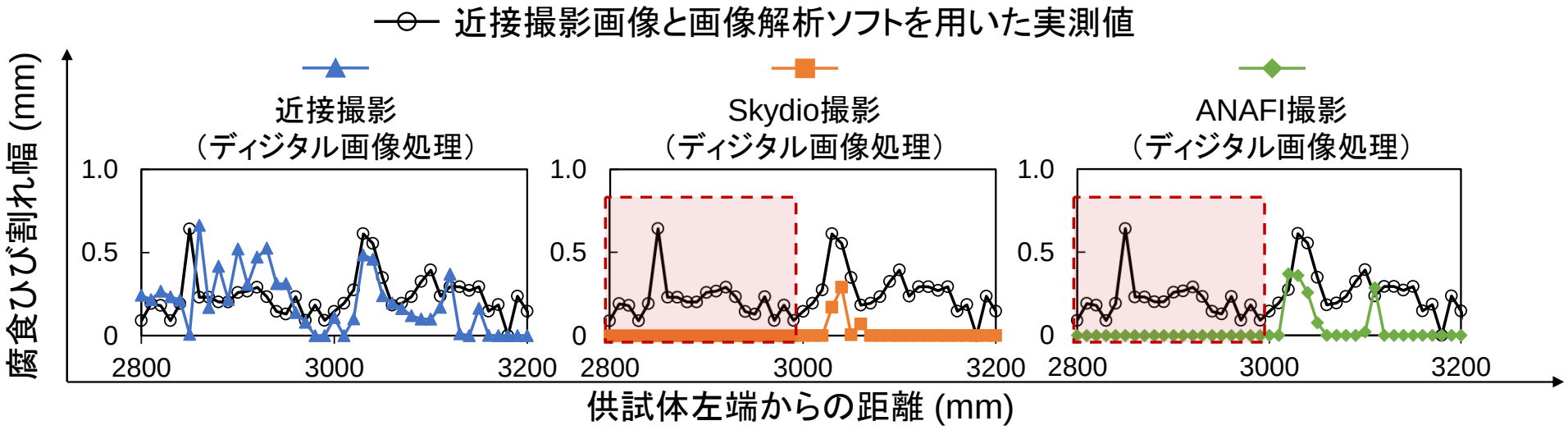
④数値変換

・白ピクセル数のカウント
・供試体幅あたりのピクセル数から数値変換



腐食ひび割れ幅の取得

腐食ひび割れ幅分布の取得精度の検証



比較結果

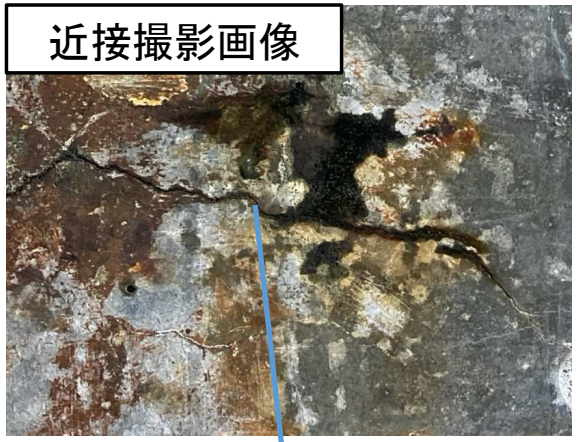
近接撮影で得られた画像から画像解析ソフトを用いて実測した値と比較する

- 近接撮影では，実測値とディジタル画像処理により計測される値は概ね等しい
- ドローン撮影では，腐食ひび割れ幅が計測されない領域が多い
- 2つのドローンでは，腐食ひび割れ幅の取得精度は同程度である

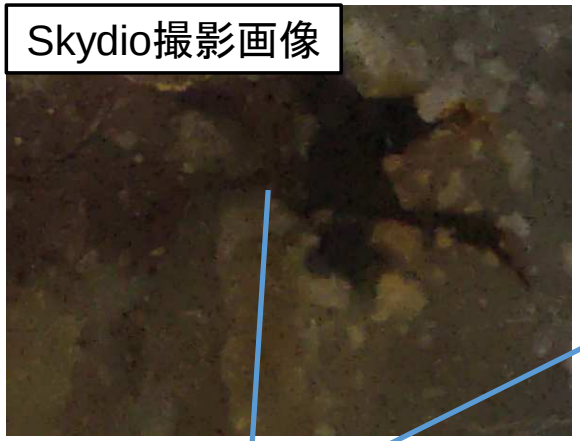
腐食ひび割れ幅の取得

腐食ひび割れ画像の違い

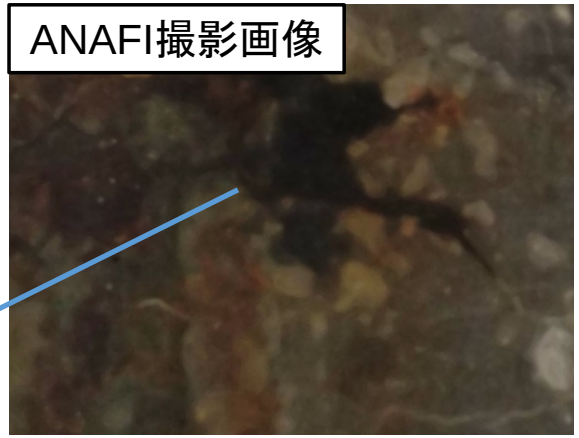
近接撮影画像



Skydio撮影画像



ANAFI撮影画像



腐食ひび割れが確認できる

→近接撮影では，腐食ひび割れを検出するのに十分な画質

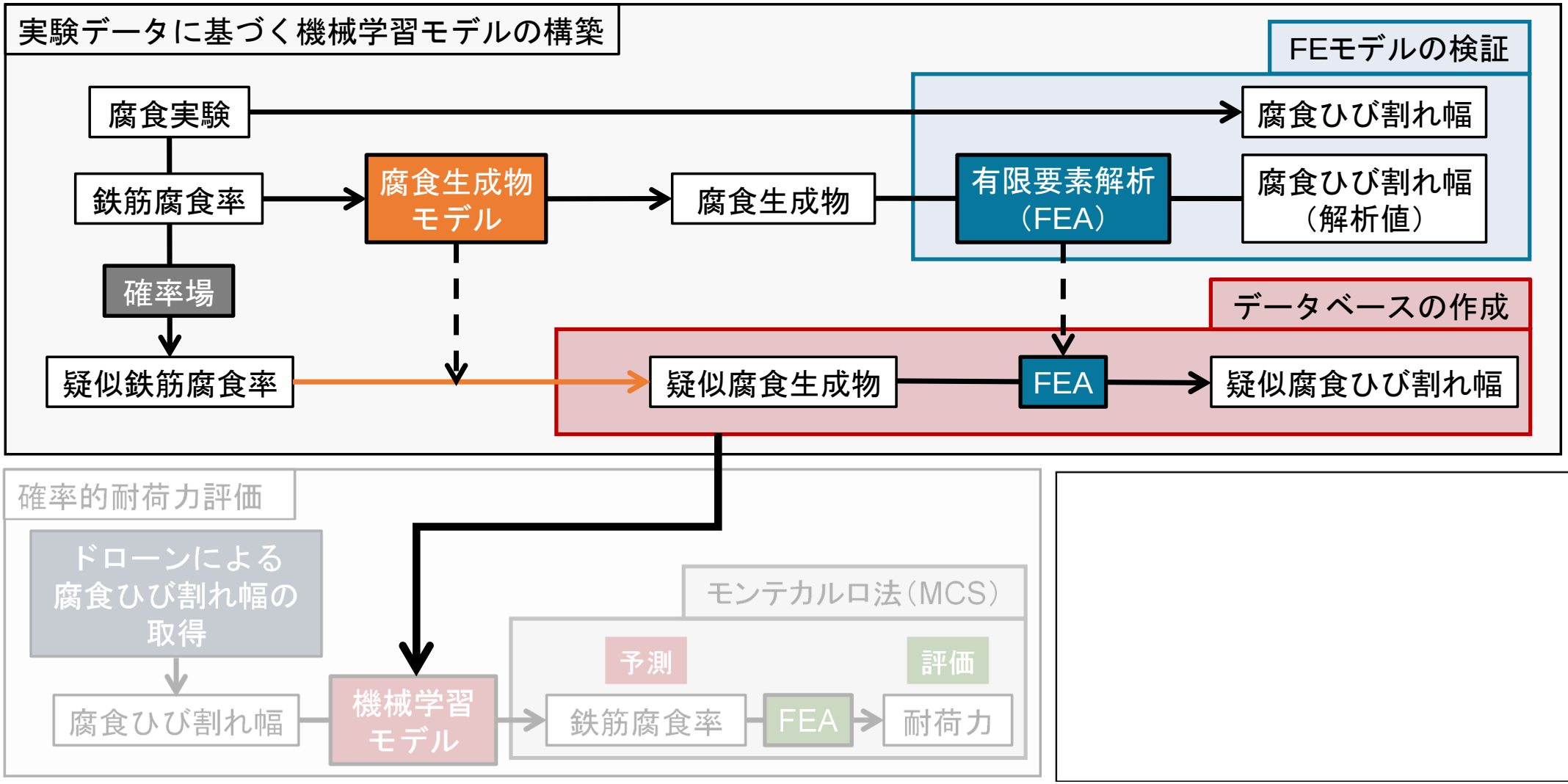
腐食ひび割れの検出が困難

→錆汁による表面の汚れと腐食ひび割れの判別が困難

ドローン撮影では，特に錆汁が伴う腐食ひび割れを正確に検出できていない

この取得精度が耐荷力推定に及ぼす影響を調査する

耐荷力評価フロー

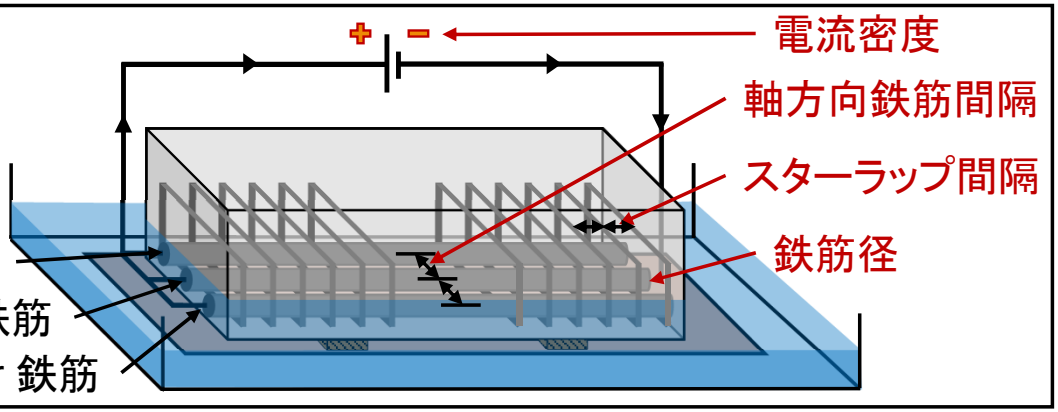

実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

データベースの作成：電食実験

電食実験

構造諸元（細目），電流密度，目標腐食率の異なる供試体を作成

小型RCはり寸法
160×300×1460
(単位：mm)



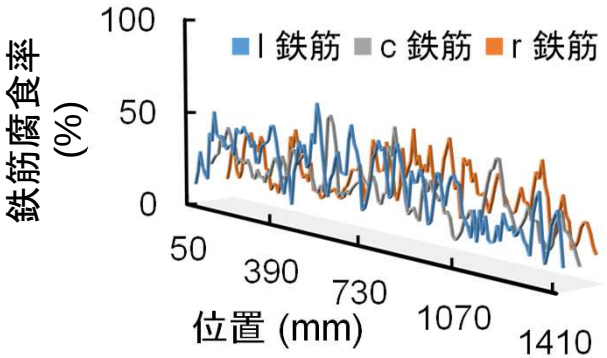
データベースの作成：電食実験

電食実験

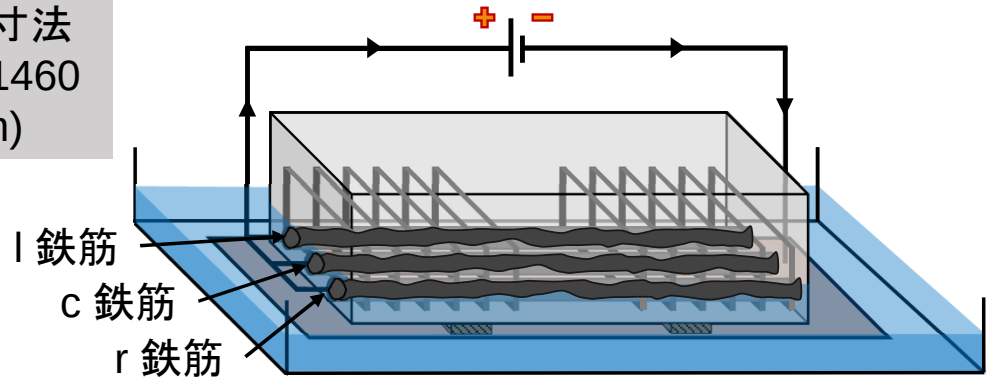
構造諸元（細目），電流密度，目標腐食率の異なる供試体を作成

ノギスによる
測定

鉄筋腐食率分布



小型RCはり寸法
160×300×1460
(単位:mm)

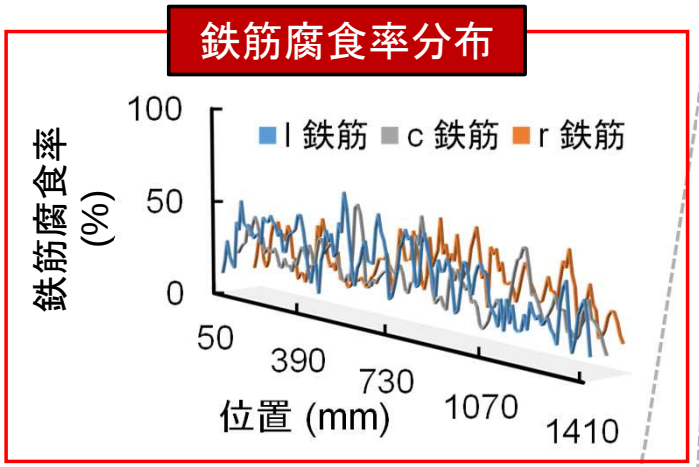


データベースの作成：電食実験

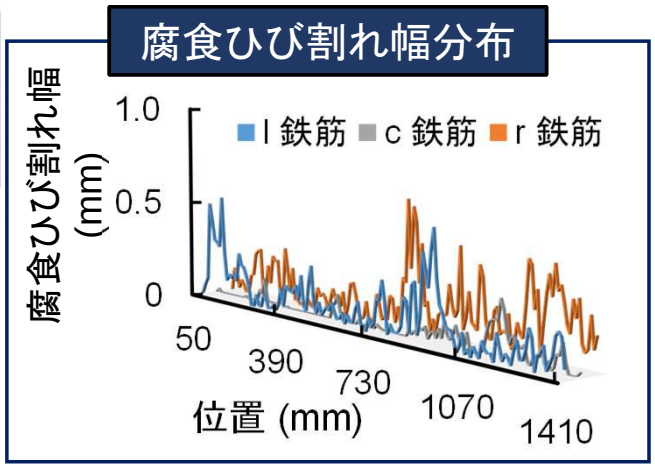
電食実験

構造諸元（細目），電流密度，目標腐食率の異なる供試体を作成

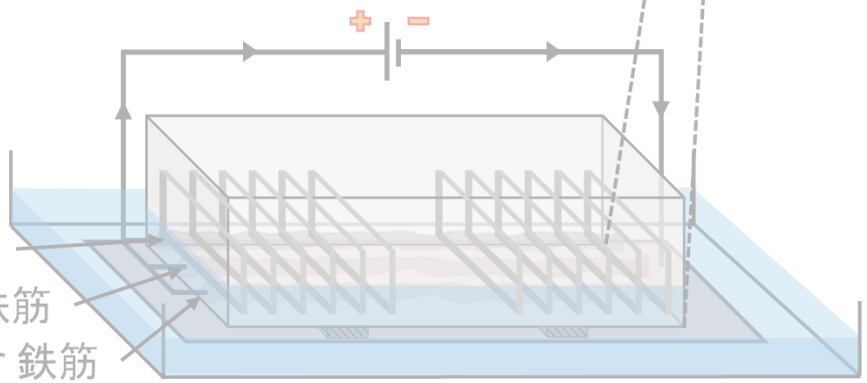
ノギスによる
測定



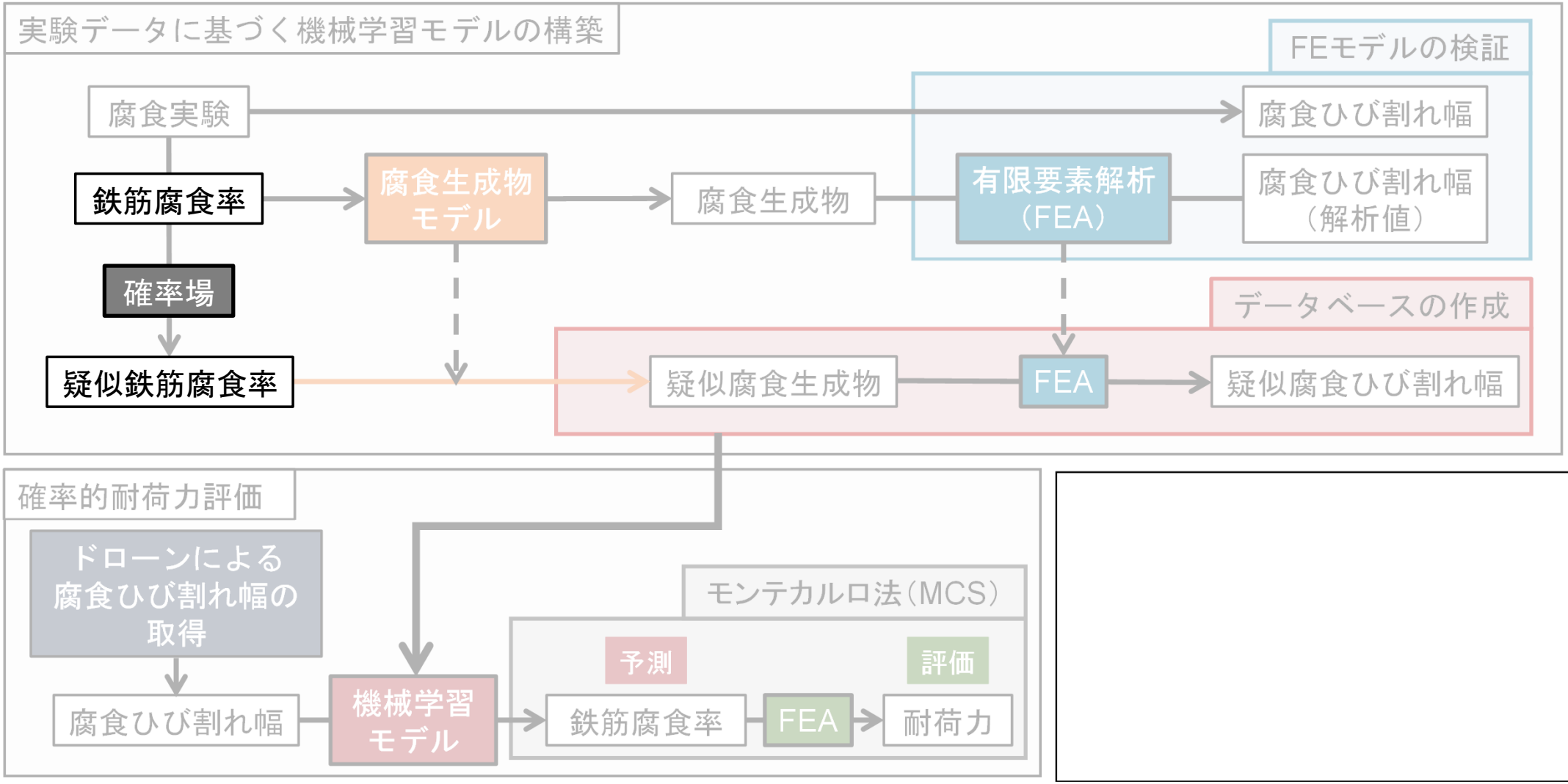
ディジタル画像処理
（二値化）による測定



小型RCはり寸法
160×300×1460
(単位:mm)



耐荷力評価フロー

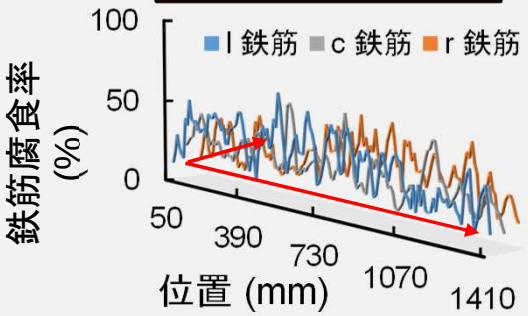

実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

データベースの作成：解析

疑似鉄筋腐食率分布の作成

実験

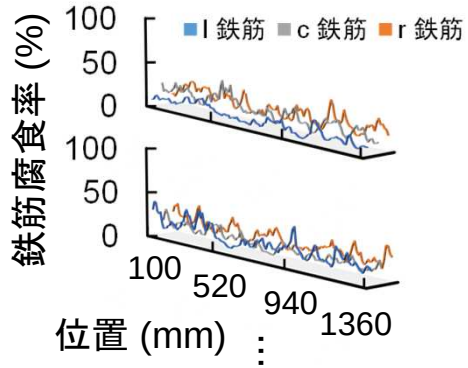
鉄筋腐食率分布



軸方向・軸直角方向に相関がある

解析

疑似鉄筋腐食率分布



- Spectral Representation Method（SRM）を用いて
  2次元疑似鉄筋腐食率分布を発生

(参考：Srivaranun, S., Akiyama, M., Bocchini, P., Christou, V., Frangopol, D.M., Fukushima, H. and Masuda, K.: Effect of the interaction of corrosion pits among multiple tensile rebars on the reliability of RC structures: Experimental and numerical investigation, Structural Safety, 2021)

軸方向の相関性を表すオートスペクトル密度関数の近似式

軸方向の相関を表すパラメータ　$C_1 = 0.003$　$C_2 = 10.05$

$$S_{FG}(\kappa) = \frac{\left[1 + 40000C_2^2(\kappa/C_1)^2\right](\kappa/C_1)^4}{\left[(1-|\kappa|/C_1)^4 + 4C_2(\kappa/C_1)^2\right]\left[(1-10|\kappa|/C_1)^4 + 400C_2(\kappa/C_1)^2\right]}$$

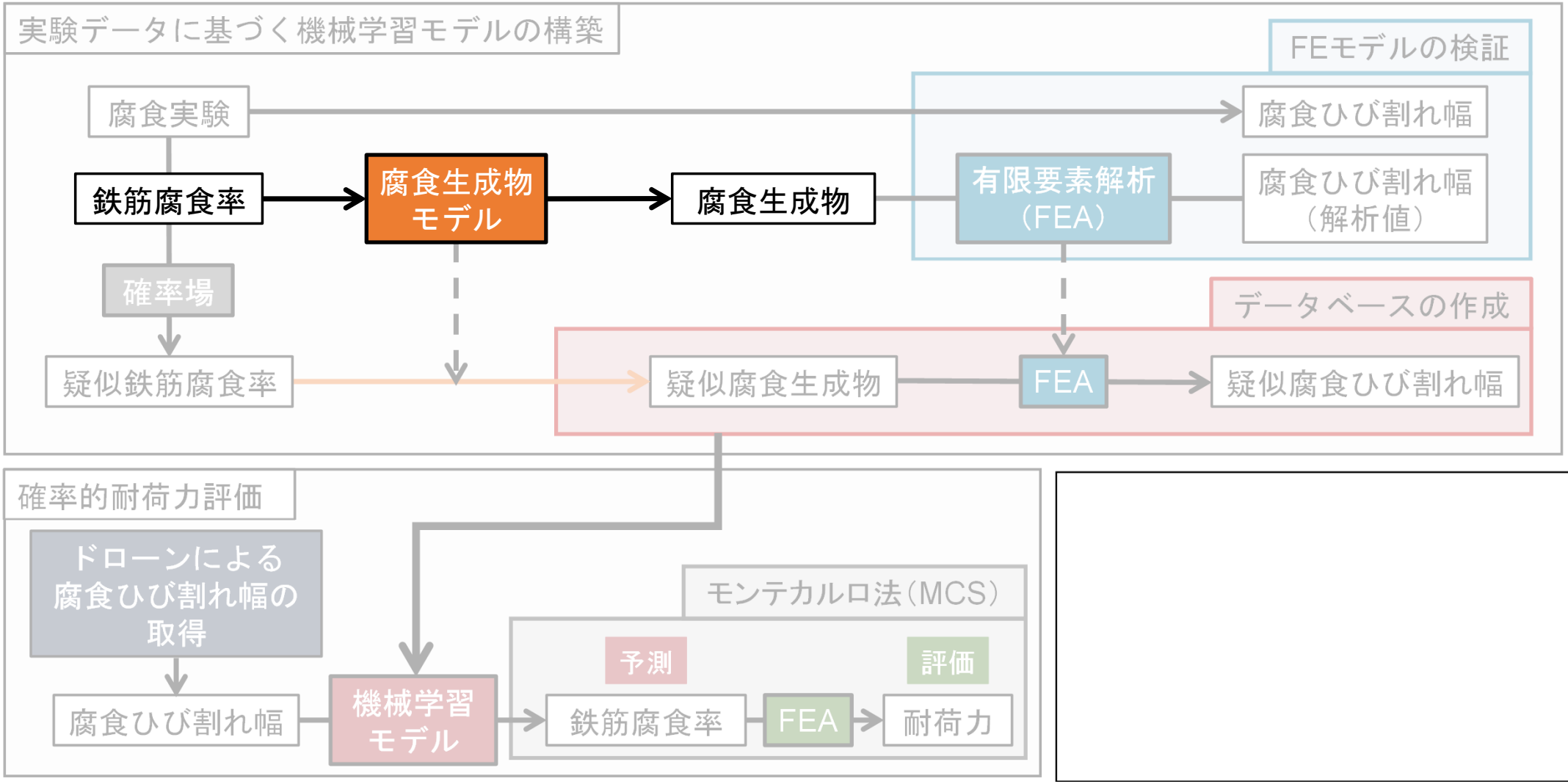
軸直角方向の相関性を表すコヒーレンス関数の近似式

軸直角方向の相関を表すパラメータ　$C_3 = 0.031$

$$\gamma_{FG,ij}(\kappa) = \exp\left(-\frac{\kappa\sqrt{d_{ij}}}{2\pi C_3}\right)$$

d_{ij}：鉄筋の間隔

耐荷力評価フロー

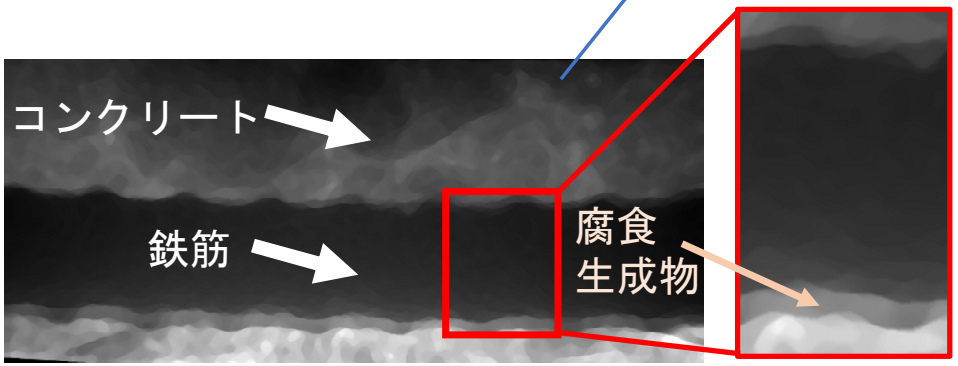

実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

データベースの作成：解析

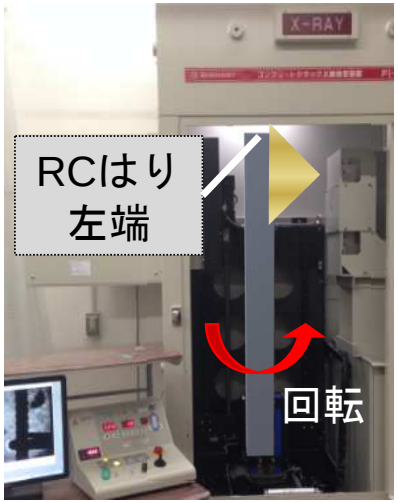
X線画像とディジタル画像処理を用いた腐食生成物の可視化

腐食生成物による膨張圧が腐食ひび割れを発生させる

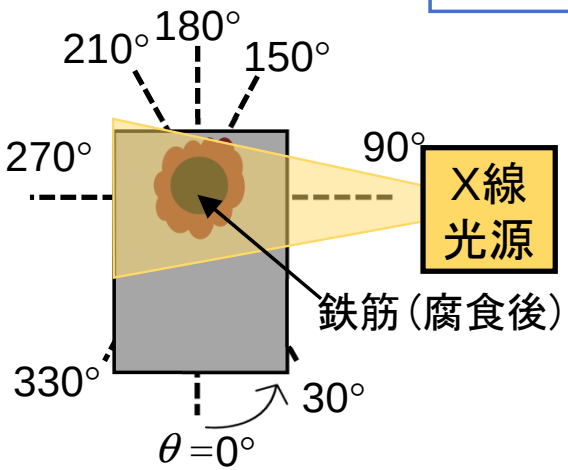
エッジ強調したX線画像



撮影

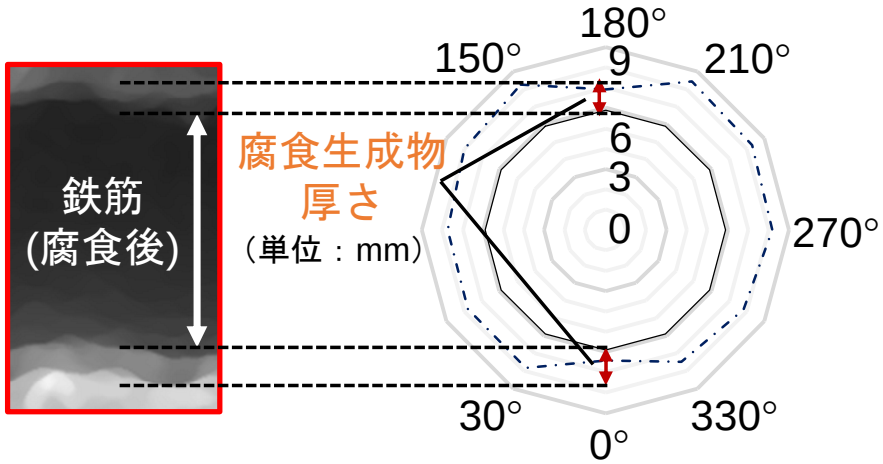


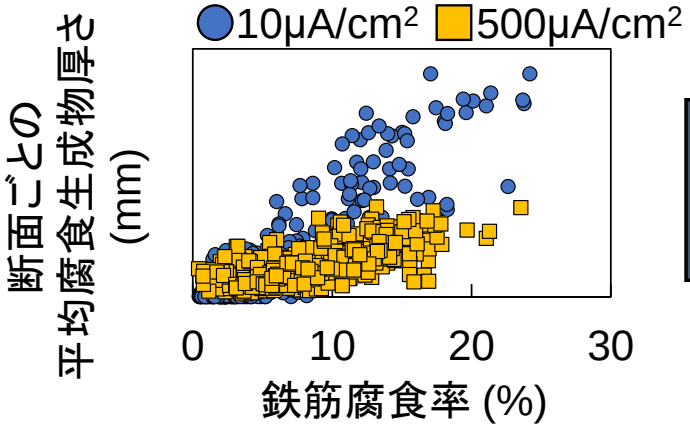
【RCはり断面図】



データベースの作成：解析

X線画像とディジタル画像処理を用いた腐食生成物の可視化



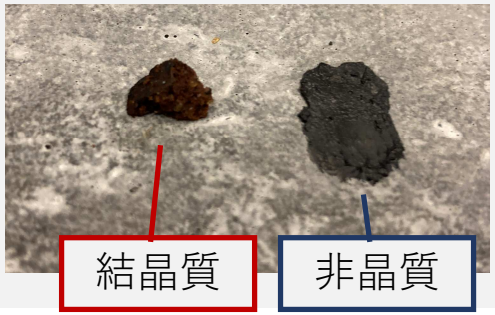


電流密度によって
腐食生成物の厚さが
異なる

- 電流密度が低い方が腐食生成物が
  硬い結晶質である割合が多い
  →腐食生成物厚さが大きくなる

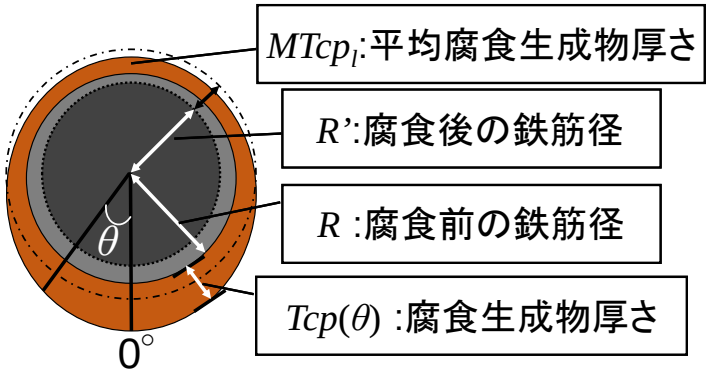
- 電流密度が高い方が腐食生成物が
  柔らかい非晶質である割合が多い
  →腐食生成物が細孔や空隙に溶出しやすい

電食後の鉄筋から採取した
腐食生成物



データベースの作成：解析

電流密度の影響を考慮した腐食生成物モデル



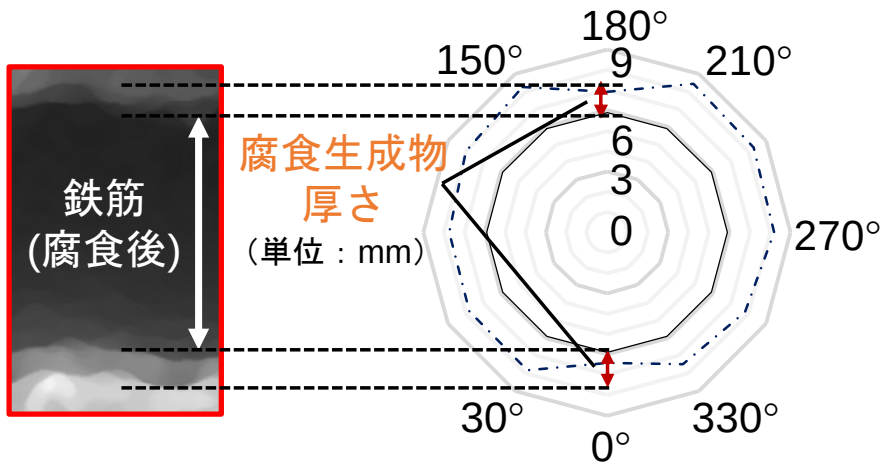
$$Tcp(\theta) = MTcp_l \cdot \alpha(\theta)$$

鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係をモデル化

$$MTcp_l = \{(R^2 - R'^2)/R^2\} \times (2.873 - 2.372 \times 10^{-3} I_{corr})$$

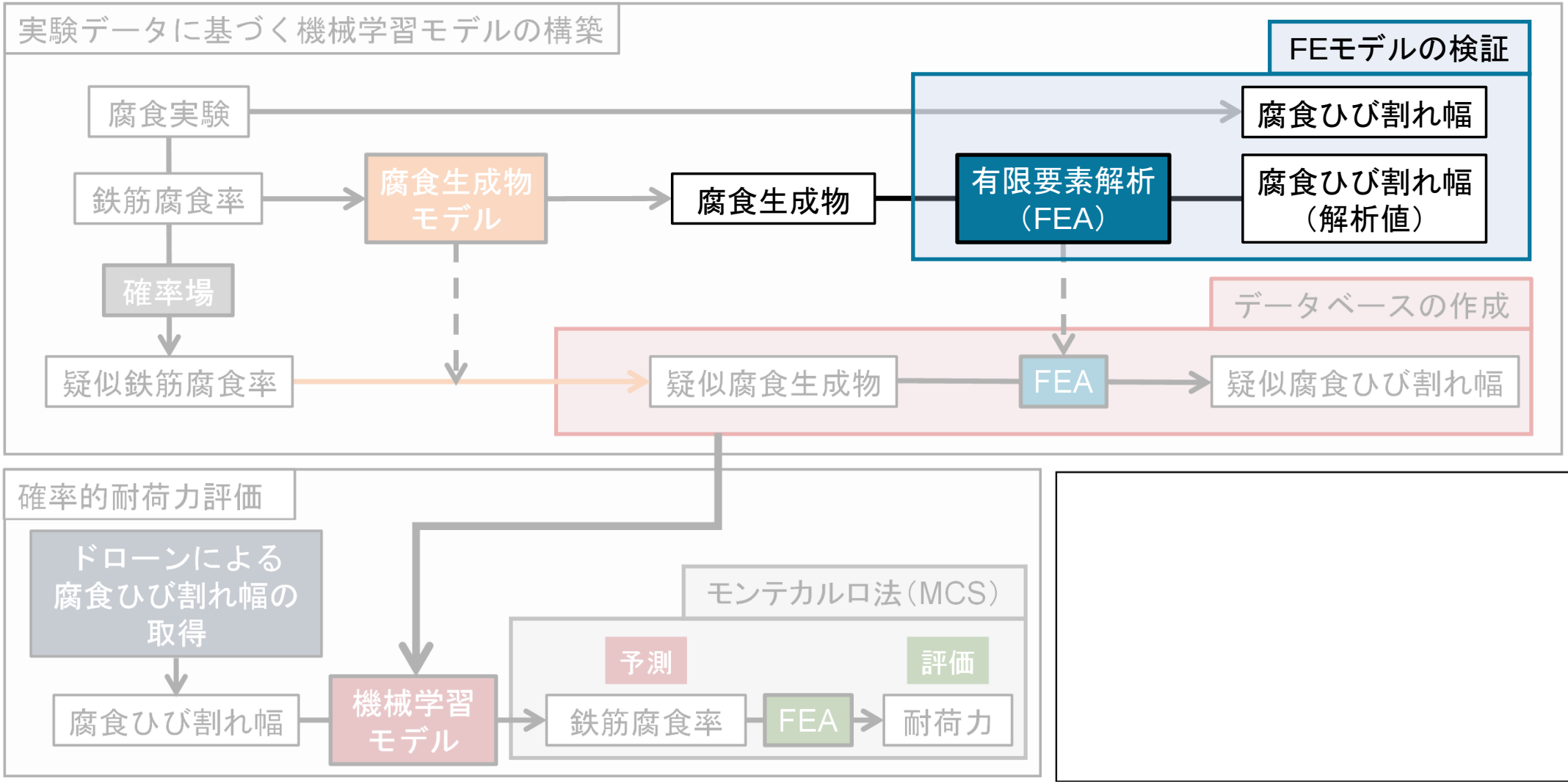
$$\alpha(\theta) = 1.884 \times \{-(\theta/1.600)^2\} + 0.1241$$

I_{corr} :電流密度



電流密度によって
腐食生成物の厚さが
異なる

耐荷力評価フロー

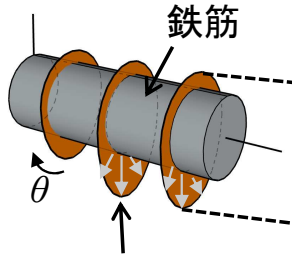

実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

データベースの作成：解析

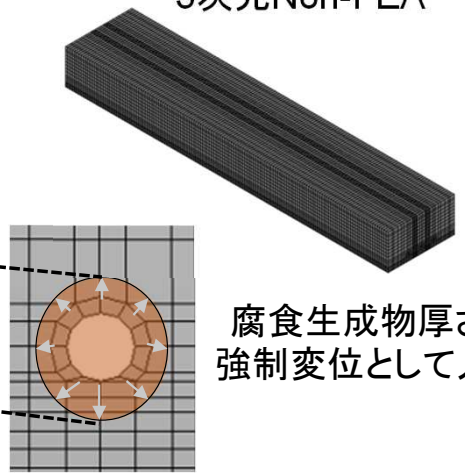
腐食ひび割れ計算用FEモデルの検証

腐食生成物モデル

入力:腐食生成物厚さ

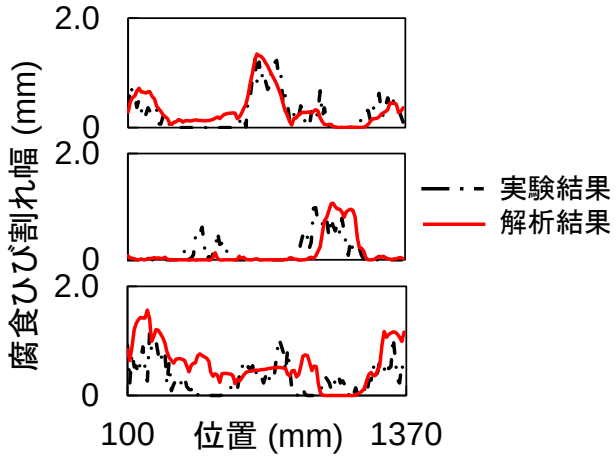


3次元Non-FEA



腐食生成物厚さを
強制変位として入力

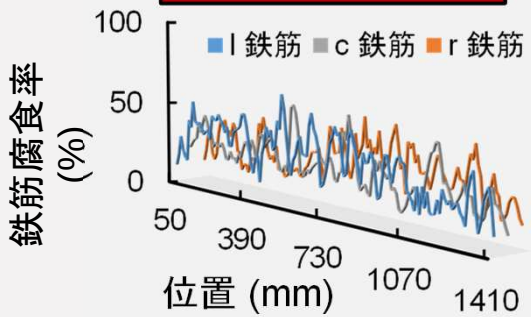
出力：腐食ひび割れ幅分布



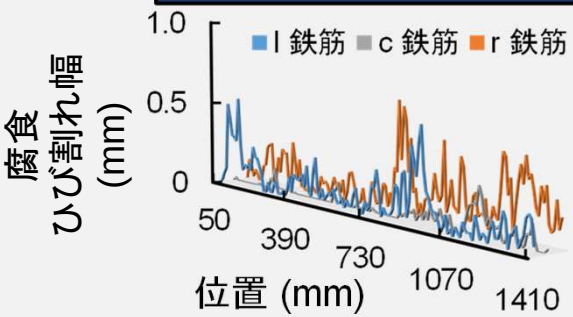
実験結果を
精度よく
再現した

実験結果

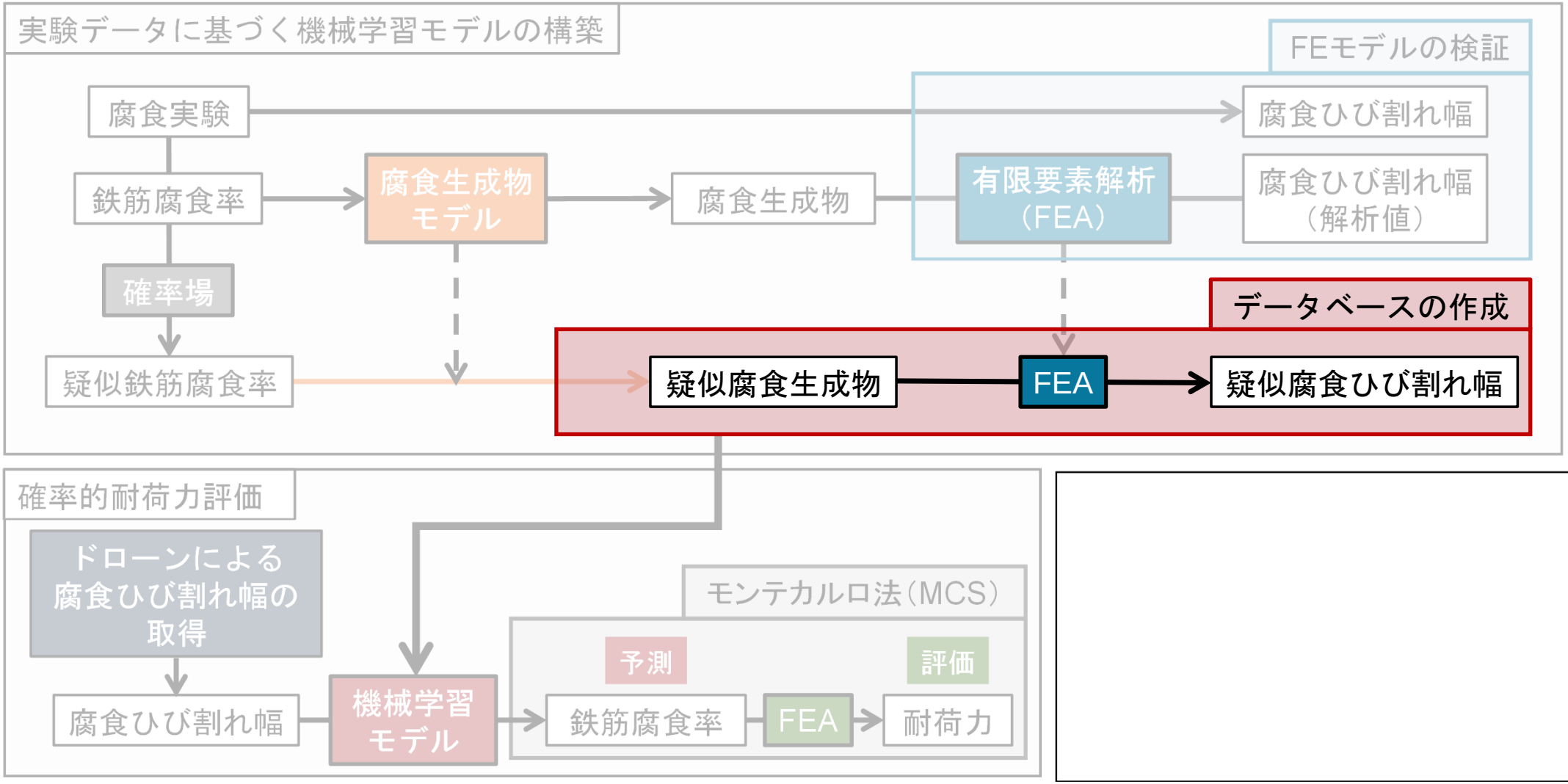
鉄筋腐食率分布



腐食ひび割れ幅分布



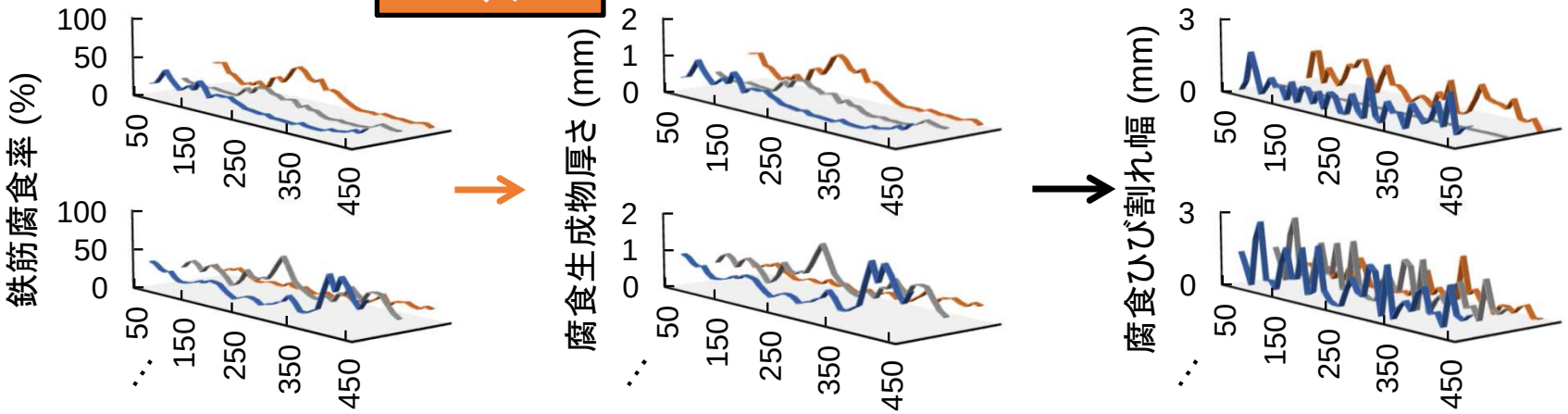
耐荷力評価フロー


実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

データベースの作成：解析

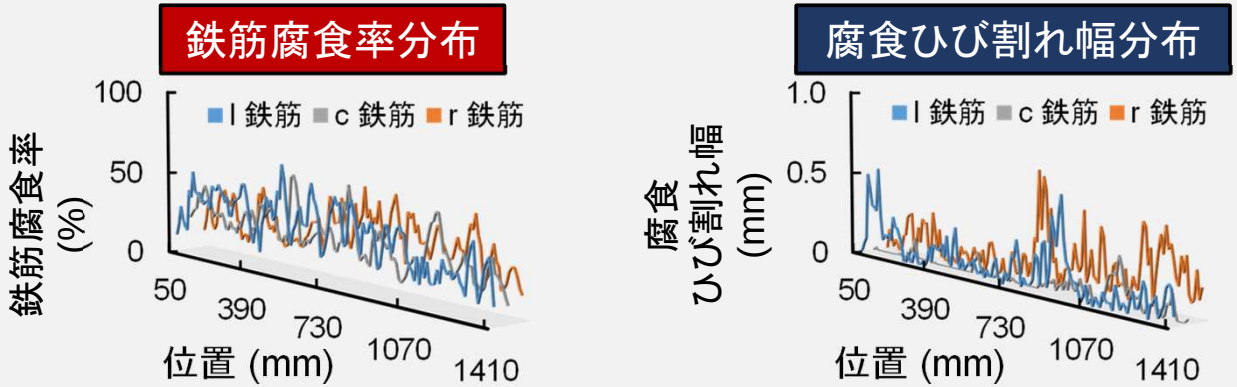
データベースの作成

疑似鉄筋腐食率 → 腐食生成物モデル → 疑似腐食生成物 → FEA → 疑似腐食ひび割れ幅

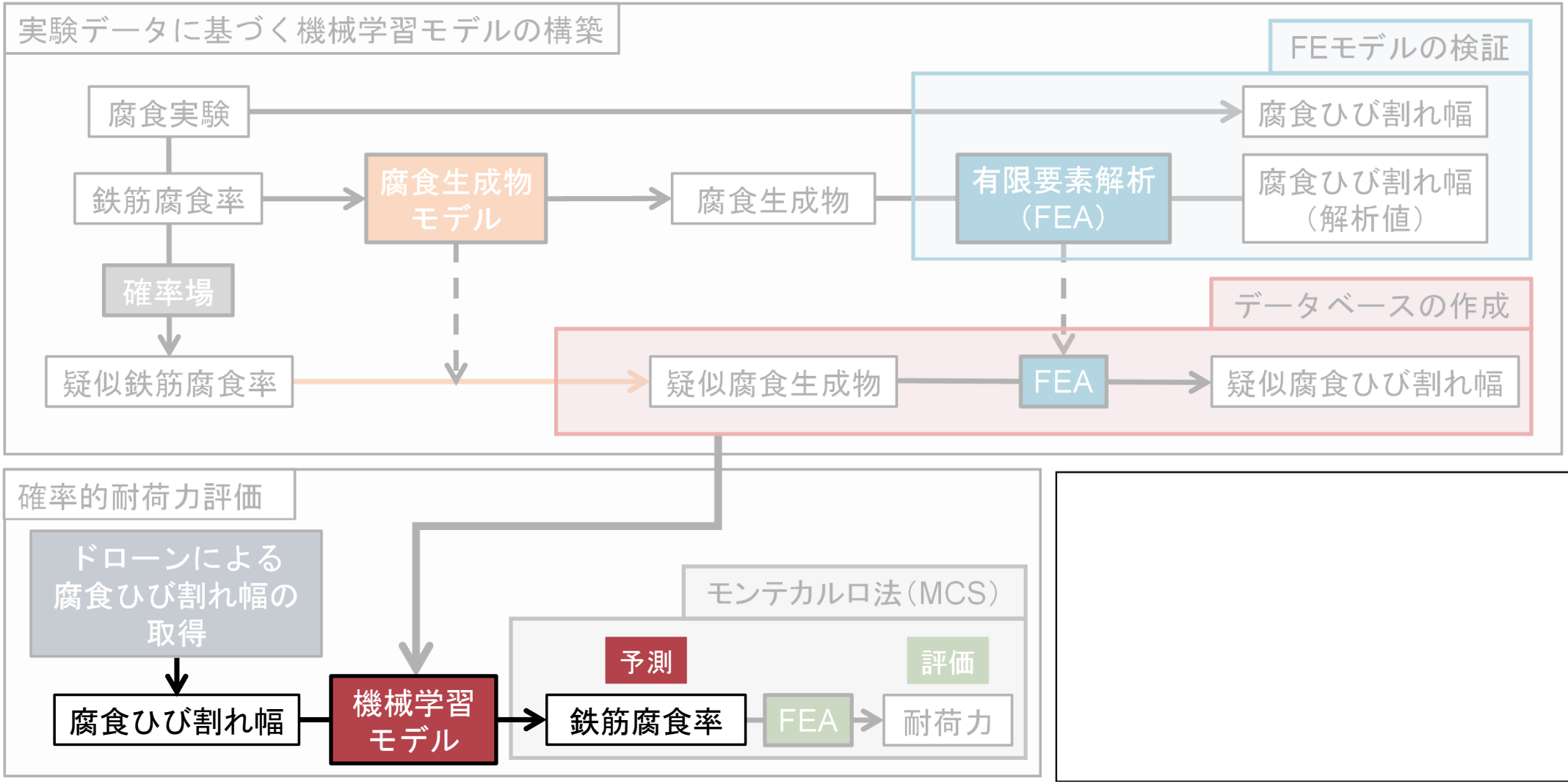


腐食したRC供試体（データベース）を**疑似的に**50体作成した

実験結果



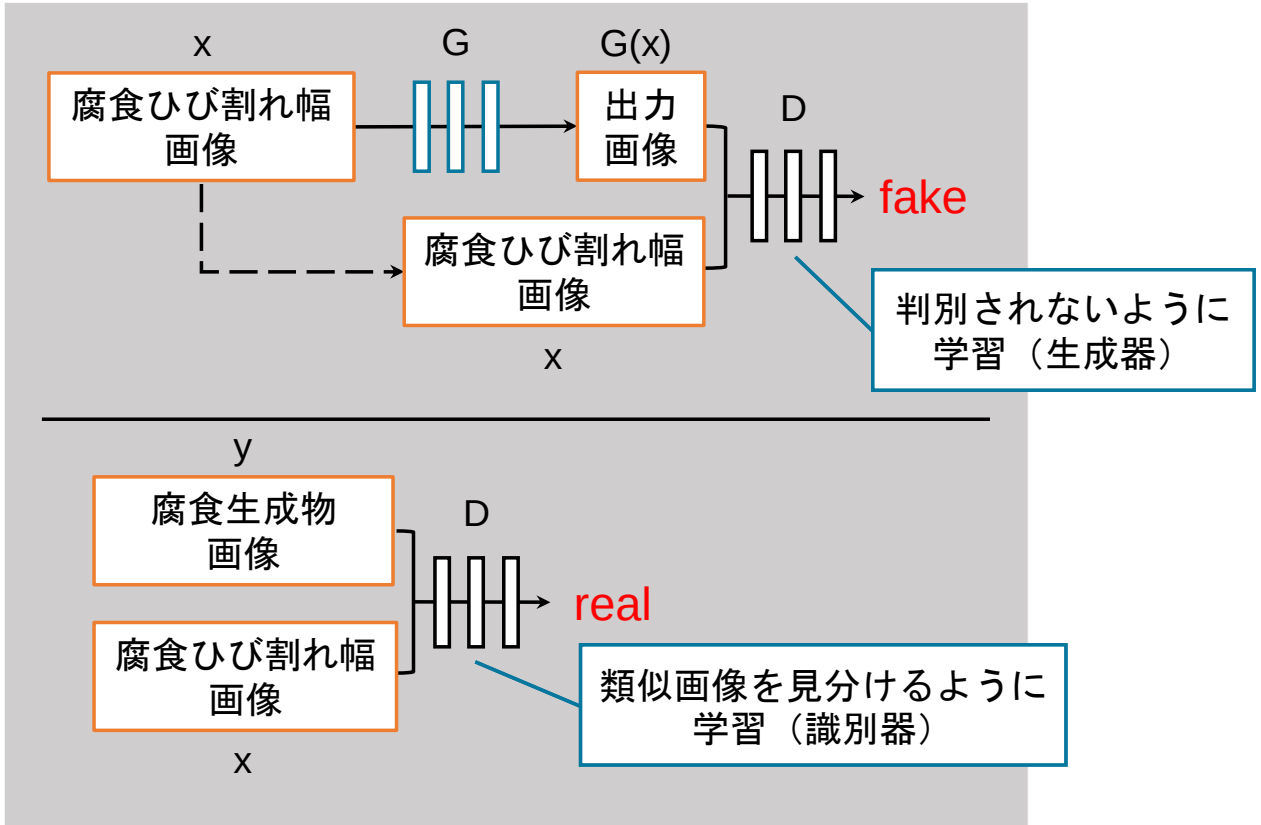
耐荷力評価フロー


実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

機械学習モデルの構築：学習

機械学習モデルの選定 -Pix2pix-

2次元的な連続性を有する鉄筋腐食率分布と腐食ひび割れ幅分布の関係を紐づける
画像間の関係を学習可能なモデル



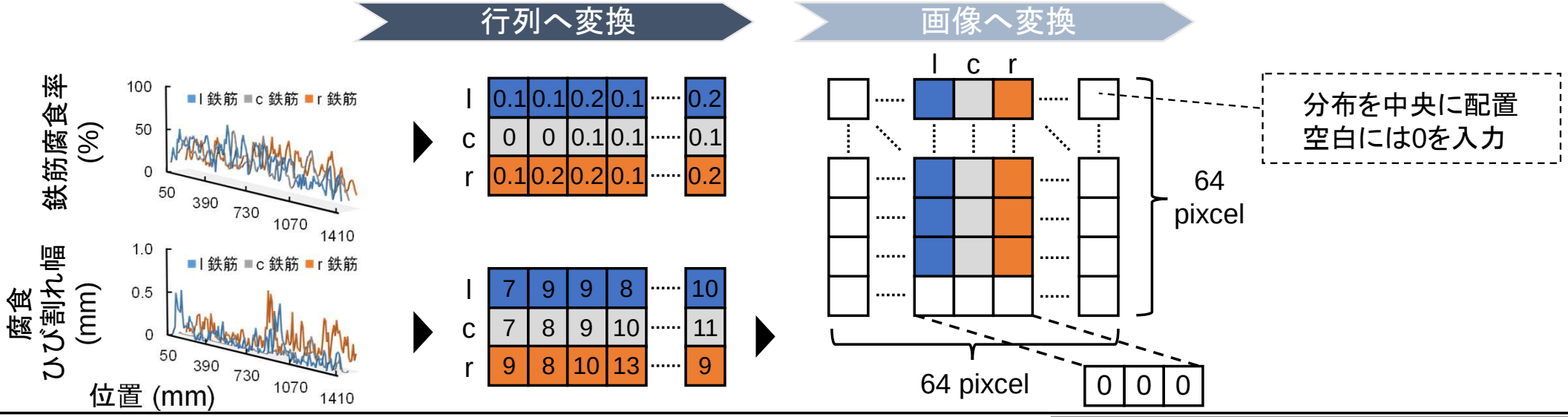
➢ 学習例：カラー画像変換

入力画像　出力画像

Isola et al., Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks (2017)

機械学習モデルの構築：学習

Pix2pixモデルによる学習



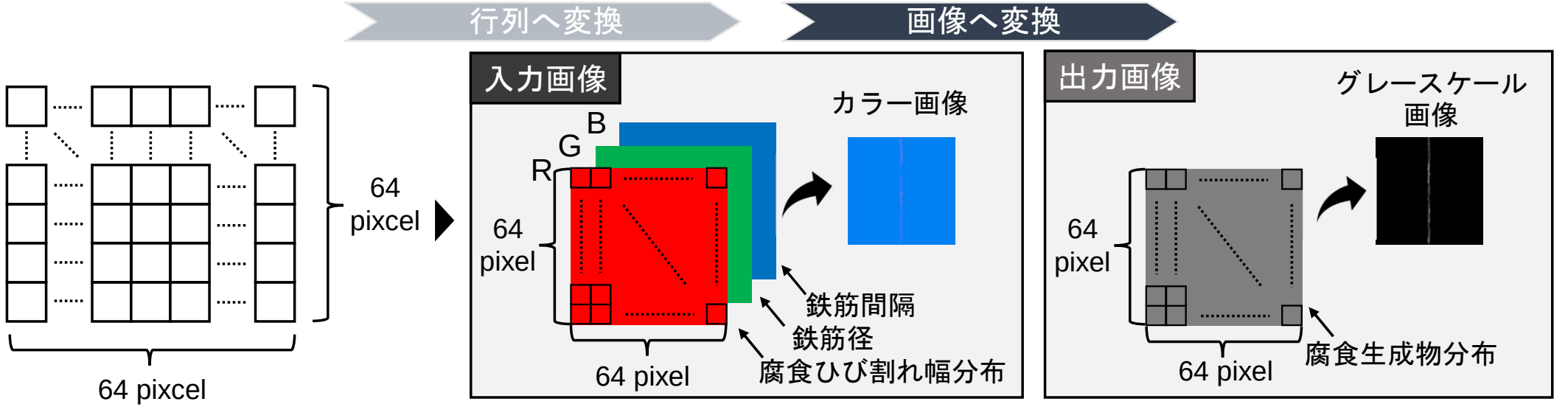
データベースの概要

■ 構造諸元（細目）の異なる疑似腐食RCはりを作成

ケース名	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋径	RCはり寸法 (mm)
1	95	D13	160×300×1460
2	57	D13	160×300×1460
3	57	D19	160×300×1460

機械学習モデルの構築：学習

Pix2pixモデルによる学習



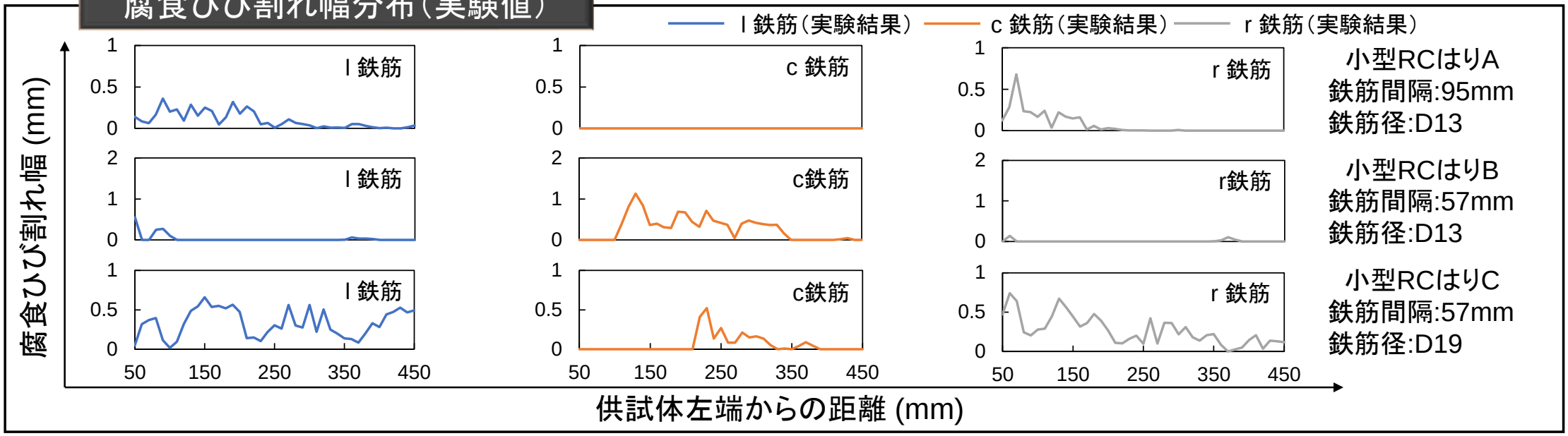
データベースの概要

■ 構造諸元（細目）の異なる疑似腐食RCはりを作成

ケース名	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋径	RCはり寸法 (mm)
1	95	D13	160×300×1460
2	57	D13	160×300×1460
3	57	D19	160×300×1460

機械学習モデルの構築： 予測

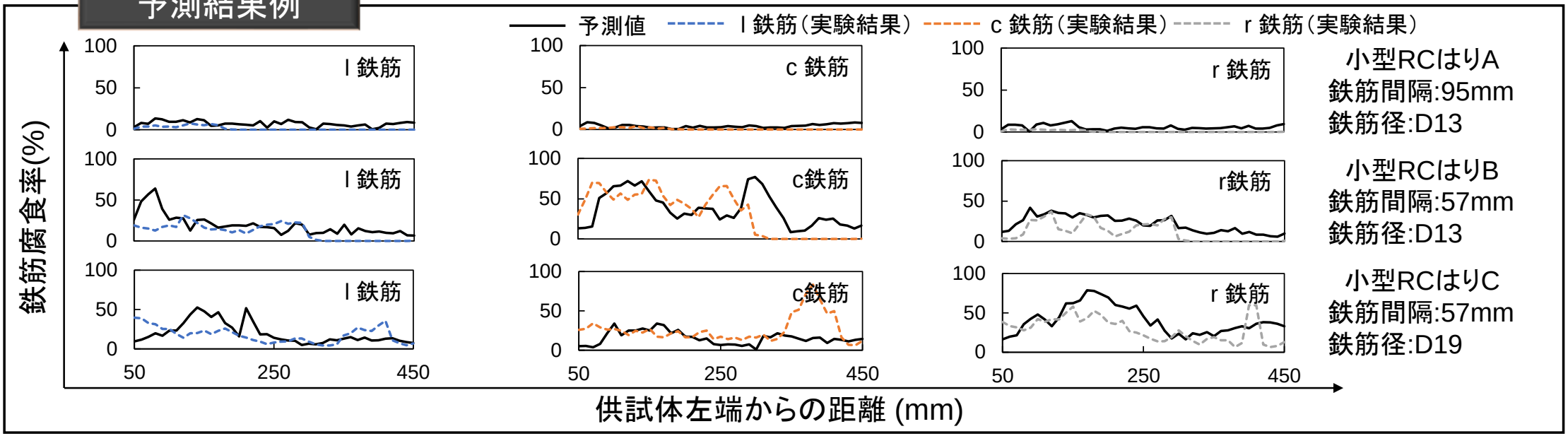
腐食ひび割れ幅分布（実験値）



pix2pixを用いて腐食ひび割れ幅分布から
鉄筋腐食率分布を予測する

機械学習モデルの構築： 予測

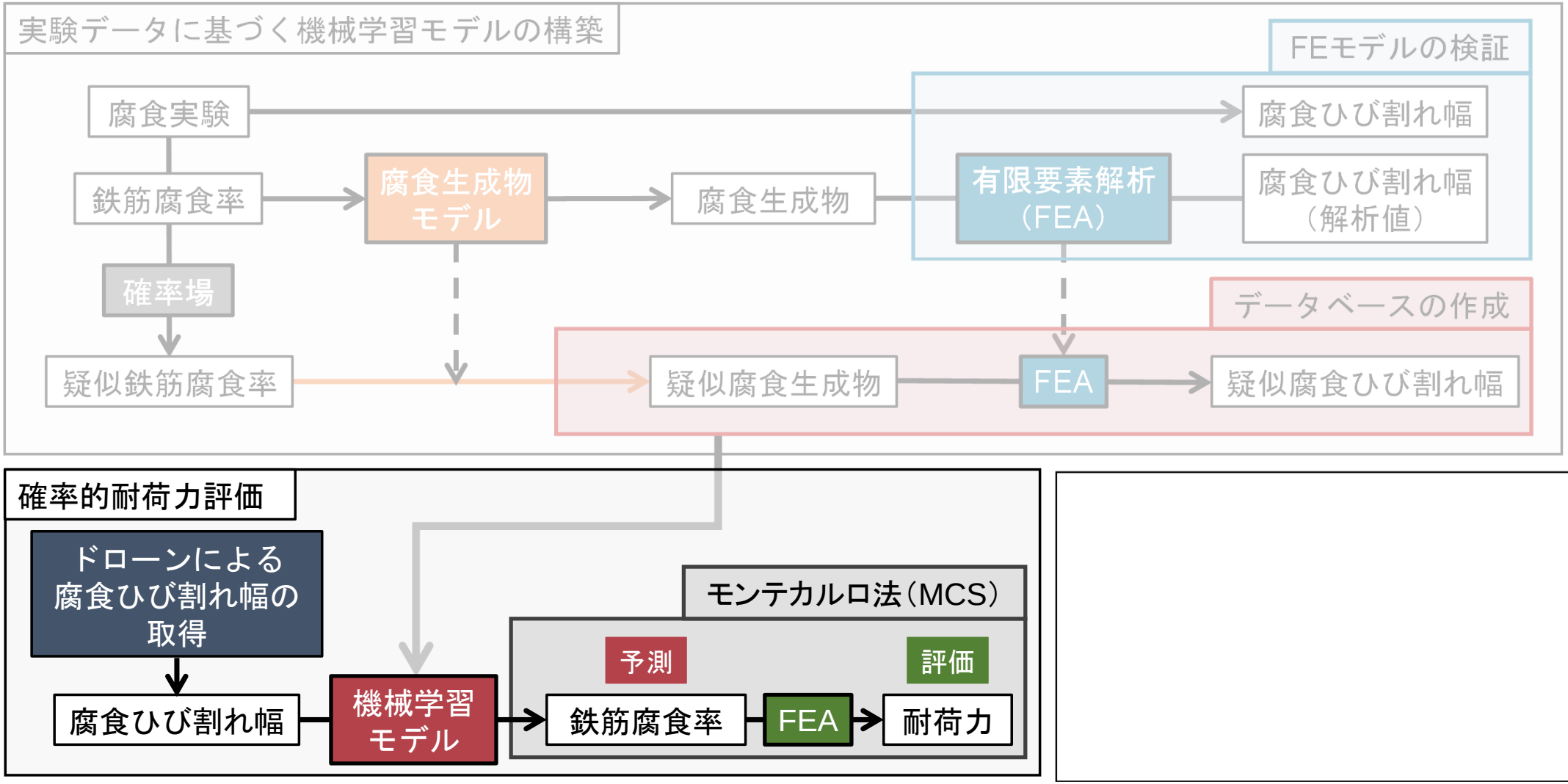
予測結果例



➡ 概ね良い精度で腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率分布を予測できた

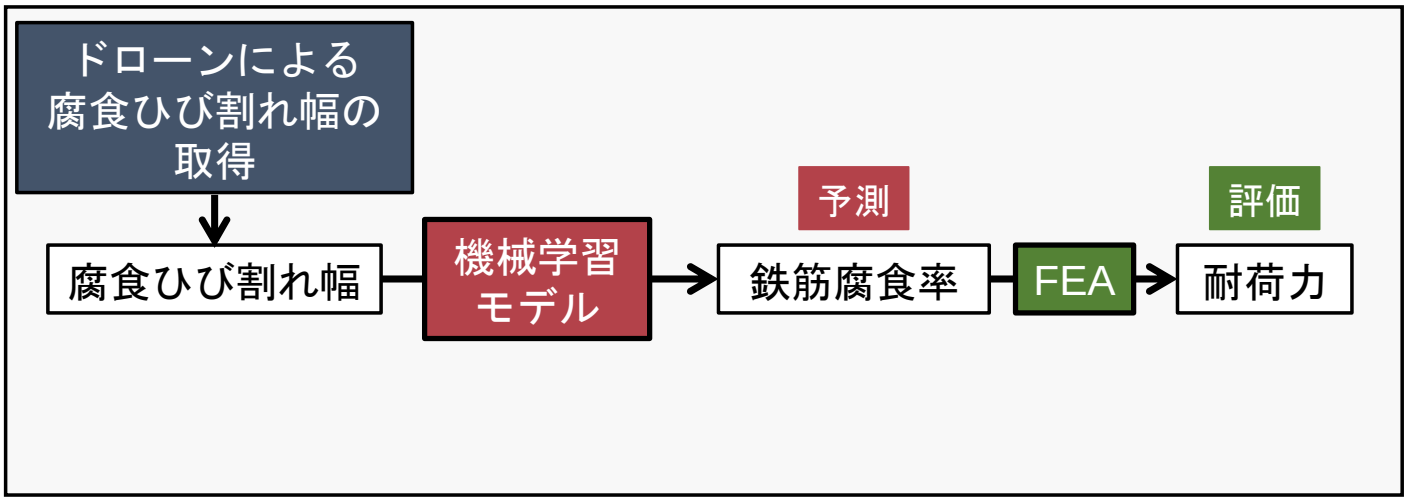
➡ 予測には誤差が伴うため，モデル誤差を考慮した耐荷力評価を行う

耐荷力評価フロー


実験データに基づく機械学習モデルの構築
FEモデルの検証
腐食実験
腐食ひび割れ幅
鉄筋腐食率
腐食生成物モデル
腐食生成物
有限要素解析（FEA）
腐食ひび割れ幅（解析値）
確率場
データベースの作成
疑似鉄筋腐食率
疑似腐食生成物
FEA
疑似腐食ひび割れ幅
確率的耐荷力評価
ドローンによる腐食ひび割れ幅の取得
モンテカルロ法（MCS）
予測
評価
腐食ひび割れ幅
機械学習モデル
鉄筋腐食率
FEA
耐荷力

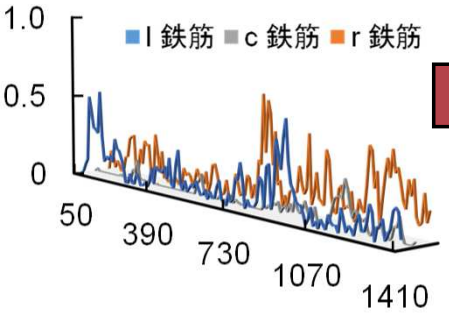
耐荷力評価

耐荷力評価フロー



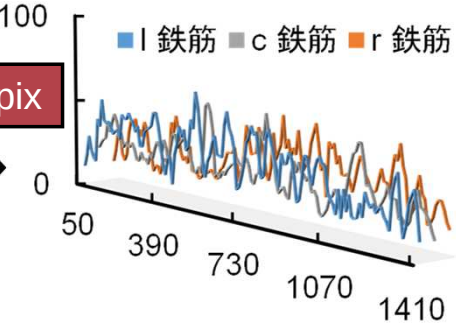
✓ 鉄筋腐食率の予測やNon-FEAの計算には誤差が伴うため，一つの予測値から耐荷力を評価することは困難

与えられる
腐食ひび割れ幅（例）



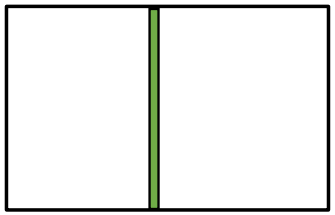
pix2pix

予測された
鉄筋腐食率分布群



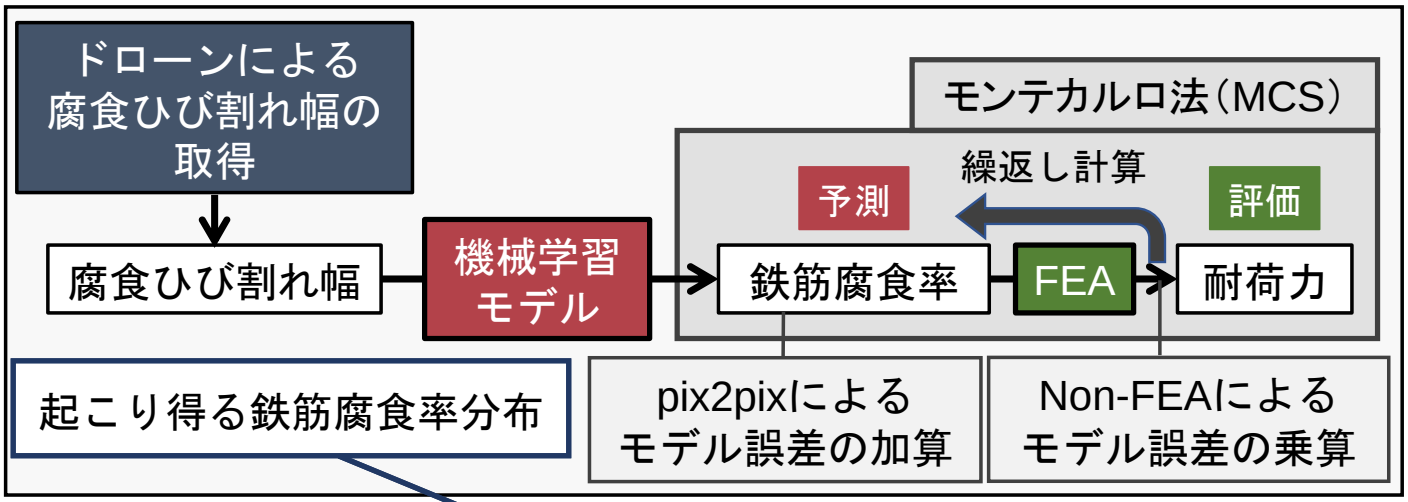
3次元
FEA

降伏荷重



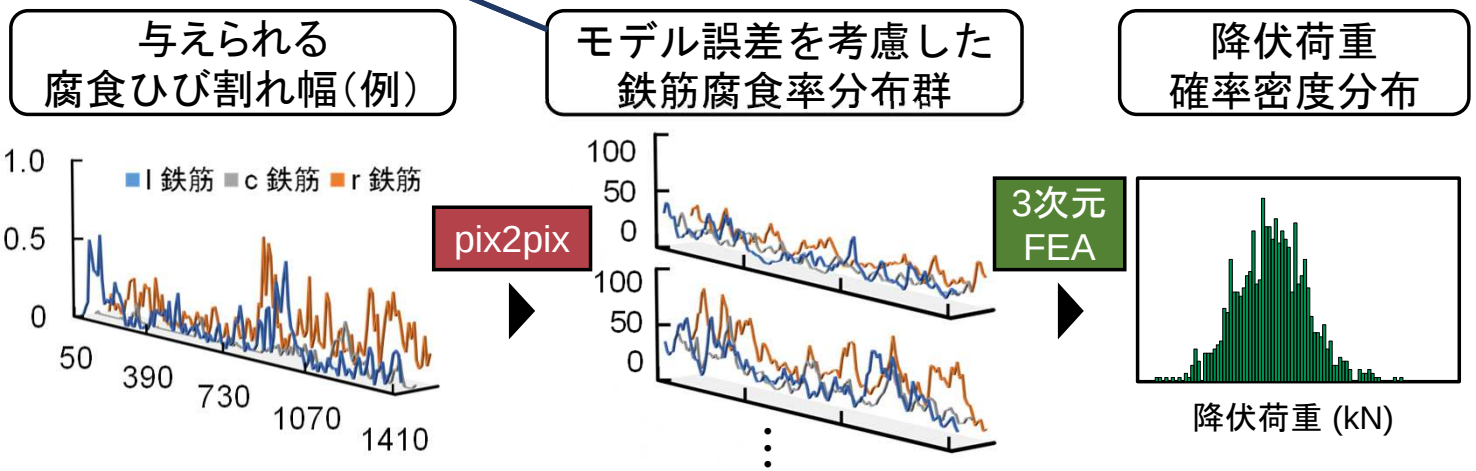
耐荷力評価

モデル誤差を考慮した確率論的耐荷力評価フロー



✓ 鉄筋腐食率の予測やNon-FEAの計算には誤差が伴うため，一つの予測値から耐荷力を評価することは困難

耐荷力を
確率密度分布として推定

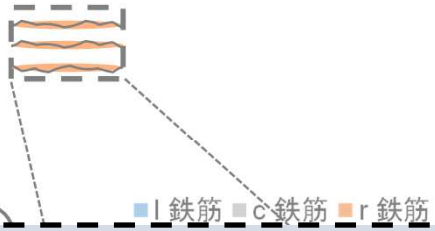


ケーススタディ

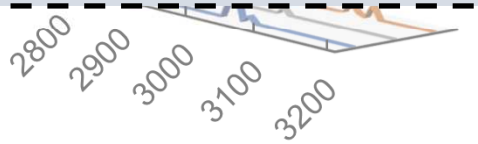
撮影方法①：ドローン撮影

東北大学
社会環境工学実験棟にて

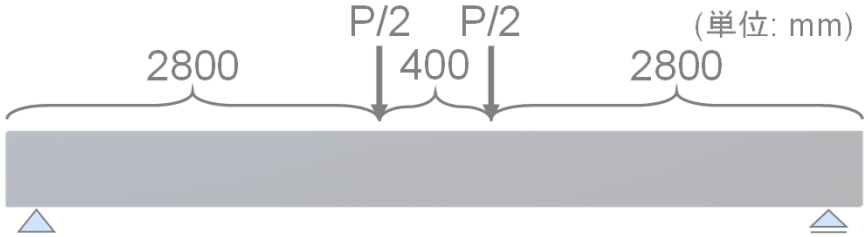
撮影方法②：近接撮影



・各撮影方法から得られた腐食ひび割れ幅分布を用いて耐荷力を推定する
・3つの実験供試体の耐荷力と比較する



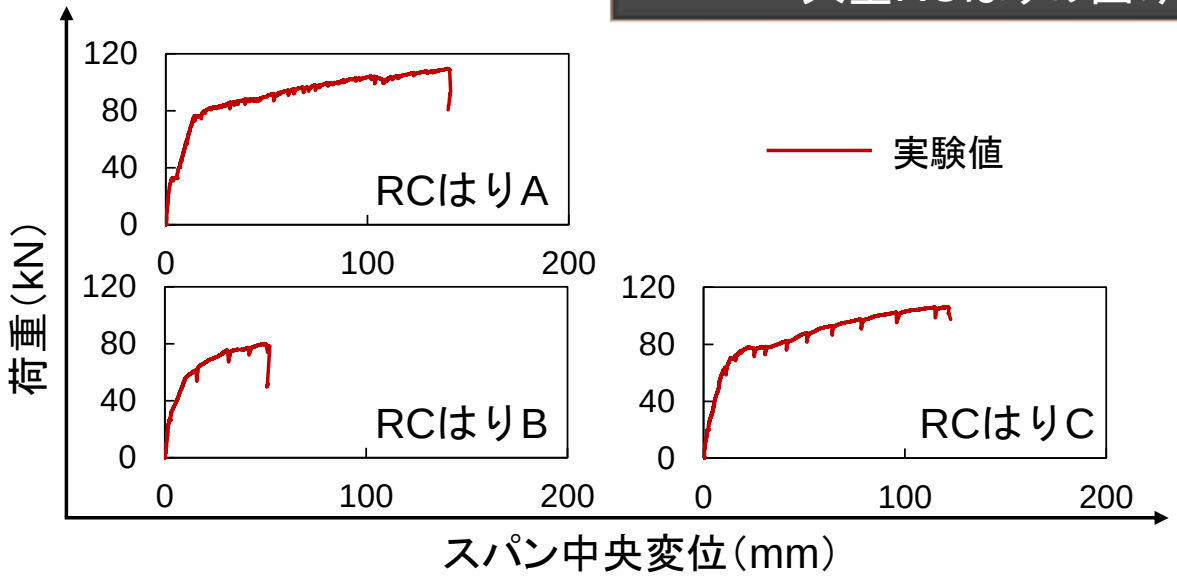
対象劣化RCはりの概要



かぶり (mm)	20
鉄筋	D19
寸法 (mm)	370×450×6000

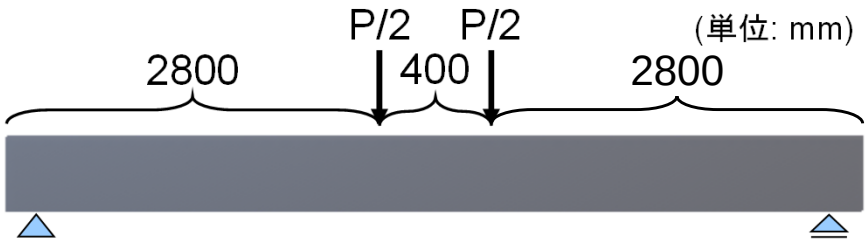
ケーススタディ

大型RCはりの曲げ載荷実験



大型RCはり載荷実験の様子（東北大学）

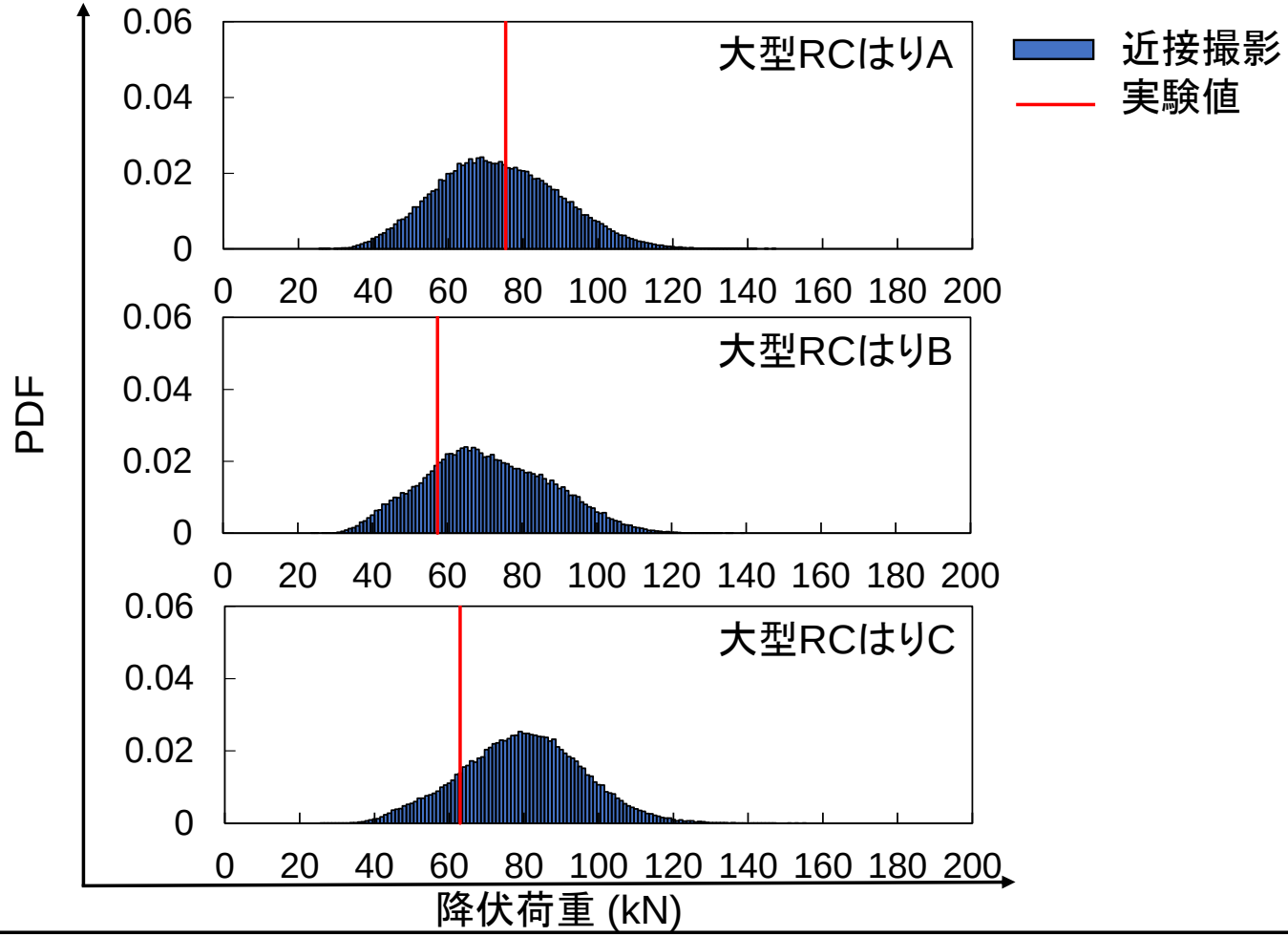
対象劣化RCはりの概要



かぶり (mm)	20
鉄筋	D19
寸法 (mm)	370×450×6000

ケーススタディ

耐荷力推定結果（近接撮影）

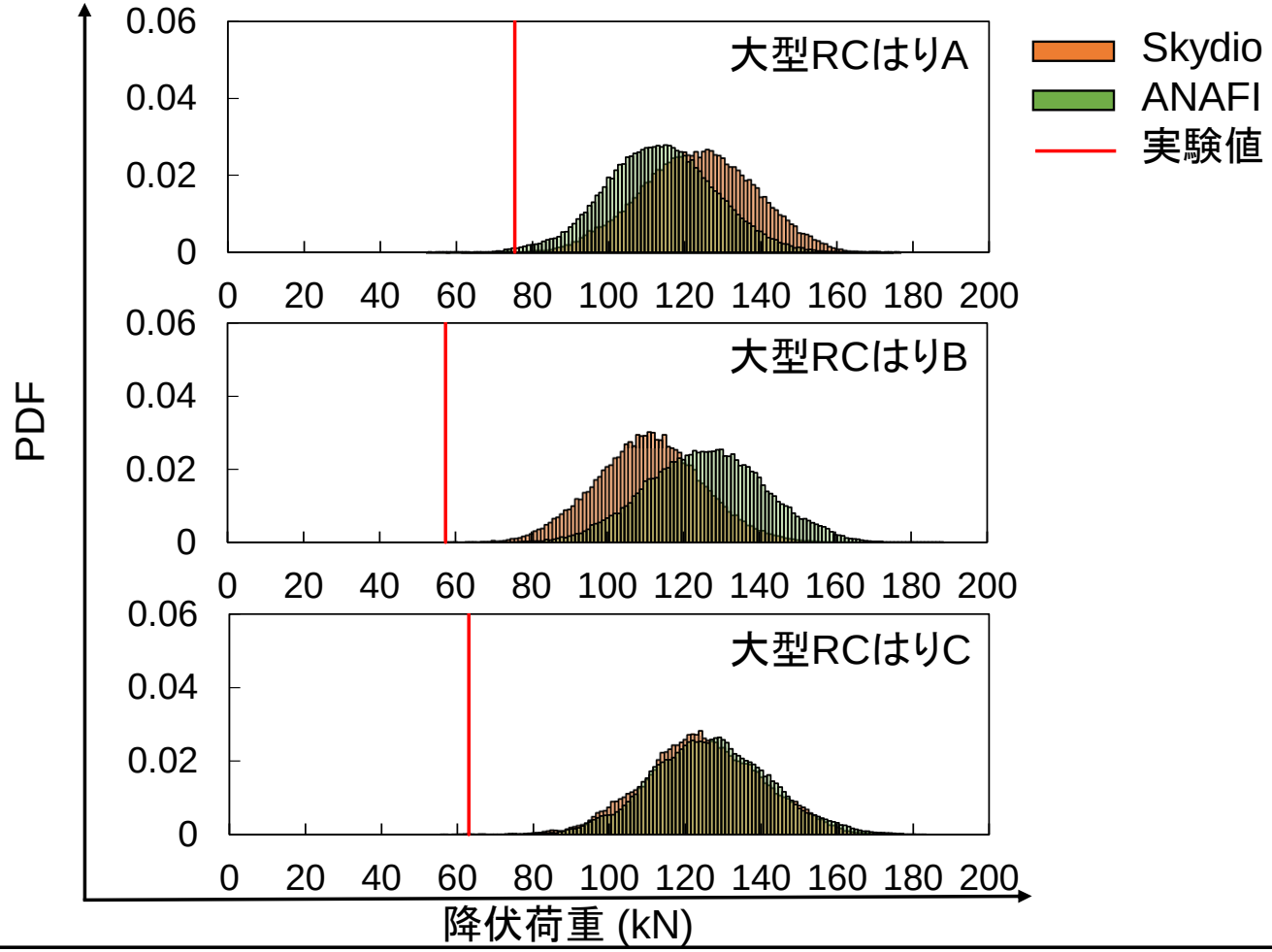


全ての実験結果が
ヒストグラムの最頻値に近く，
耐荷力を適切に評価できた

- 提案手法を用いることで，
  腐食ひび割れ幅から
  耐荷力を精度よく推定できた
- 精度よく推定するためには，
  正確に測定された
  腐食ひび割れ幅分布が必要である

ケーススタディ

耐荷力推定結果(ドローン撮影)

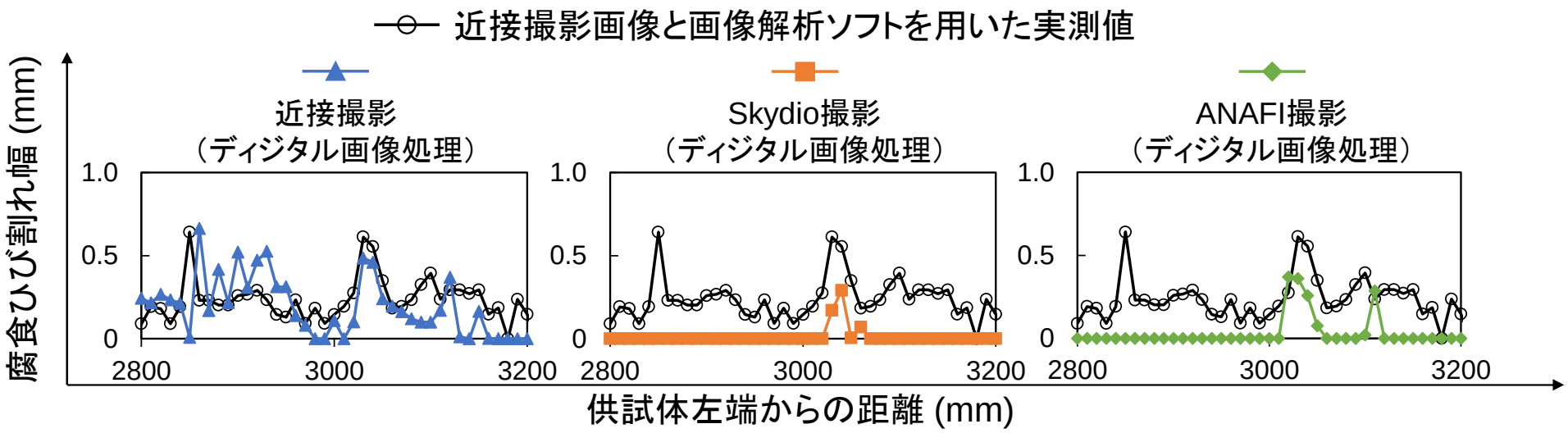


ドローン撮影ではどちらの場合でも耐荷力分布から外れ，正確に評価できなかった

- ドローン撮影では，実際よりも耐荷力を大きく推定した

腐食ひび割れ幅の取得

腐食ひび割れ幅分布の取得精度の検証

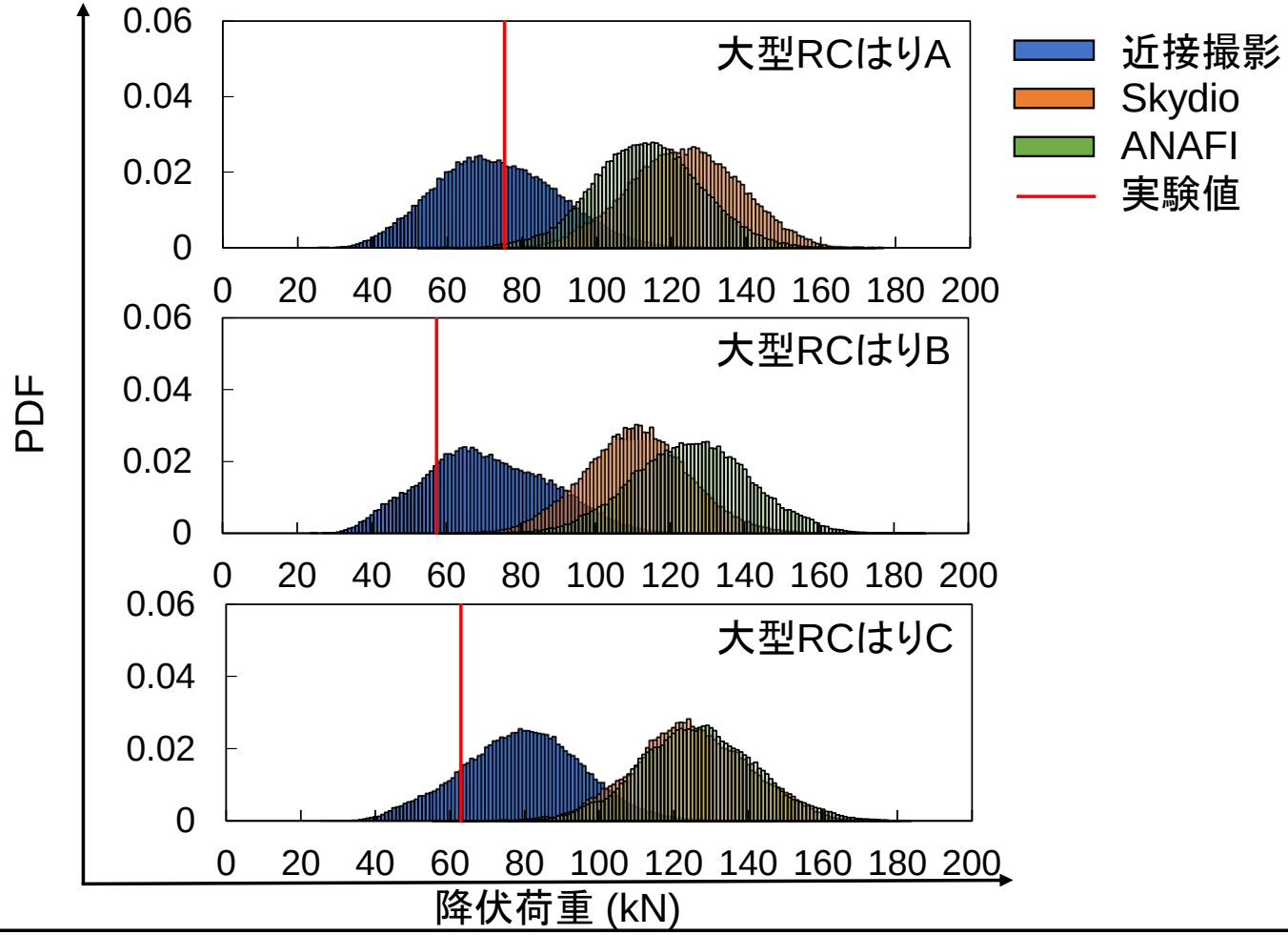


比較結果

- ドローン撮影では，錆汁と腐食ひび割れ幅の識別が難しいため，腐食ひび割れ幅が計測されない領域が多く，腐食ひび割れ幅を過小評価していた
- その結果，実際の鉄筋腐食率よりも小さく予測され，耐荷力を過大に評価した

ケーススタディ

耐荷力推定結果（異なる撮影方法の比較）



腐食ひび割れ幅の取得精度の違いは耐荷力推定に大きく影響する.

- 錆汁を伴う腐食ひび割れが生じたRC部材に対して，ひび割れ幅の計測が困難であった
- 精度よく耐荷力を評価するためには，近接撮影と同程度の画質で撮影可能な高精細カメラが必要

結論

- ドローンによる撮影画像から得られる腐食ひび割れ幅分布と機械学習を用いて，部材内の鉄筋腐食率を予測し，推定された鉄筋腐食率から耐荷力評価を行った
- ディジタル画像処理によって腐食ひび割れ幅分布を測定した
- pix2pixを用いることで，異なる構造諸元を持つRC部材の鉄筋腐食率を推定可能とした
- 鉄筋腐食率分布の予測に伴う誤差を定量化し，MCSを用いてモデル誤差を考慮した耐荷力を実験結果の耐荷力と比較することにより，耐荷力評価フローの有用性を示した

今後の展望

- 高精細カメラを搭載したドローンの利用
- 機械学習などを用いた腐食ひび割れ幅の測定精度の向上
- より広範な構造細目を持つ供試体を対象とした実験によるデータベースの更新
- 桁から上部工としての実験・解析へ

対外発表

国際ジャーナル

- Xin, J., Akiyama, M., Miyazato, S., Frangopol, D.M., Lim, S., Xu, Z., and Li, A.: Effects of galvanostatic and artificial chloride environment methods on the steel corrosion spatial variability and probabilistic flexural capacity of RC beams, *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(10-11):1506-1525, 2022.
- Srivaranun, S., Akiyama, M., Taiki, Y., Frangopol, D.M., and Xin, J.: A novel combined experimental-machine learning approach to estimate the probabilistic capacity of RC beams with spatially correlated rebar corrosion in transverse and longitudinal directions, *Engineering Structures*, 279: 115588, 2023.
- Xin, J., Akiyama, M., and Frangopol, D. M.: Autonomous Detection of the Steel Corrosion Spatial Variability in Reinforced Concrete Using X-Ray Technology and Deep Learning- Based Semantic Segmentation, *Automation Construction*, 2023 (印刷中)
- Xu, Z., Akiyama, M., Lim, S., Srivaranun, S., Frangopol, D. M., Miyazato, S., and Li, A.: Experimental and numerical investigation of corrosion-induced cracks and load-bearing capacity using corrosion products and steel weight loss of RC beams corroded with two different methods, *Cement and Concrete Composite*, （投稿中）

対外発表

国際会議

- Akiyama, M., Frangopol, D. M. 2023. Probabilistic life-cycle performance assessment of corroded concrete structures: Core technologies to predict the remaining service life. Proceeding of the 8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2023), Milan, Italy. (Keynote Lecture)

国内での発表

- 安達雄裕，山田大樹，中村智，徐哲俊，内藤英樹，秋山充良：ドローンを用いて取得した腐食ひび割れ情報と 機械学習モデルを用いた劣化 RC はりの確率論的耐荷力評価，AI・データサイエンス論文集，第4巻（印刷中）
- 安達雄裕，秋山充良，山田大樹，中村智，徐哲俊：RC 部材の腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物モデルの提案およびその腐食ひび割れ幅推定への適用に関する基礎的研究，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会講演概要集，V-251，2023.

Thank you!