

January 12th 2021

土木学会西部支部 沖縄会



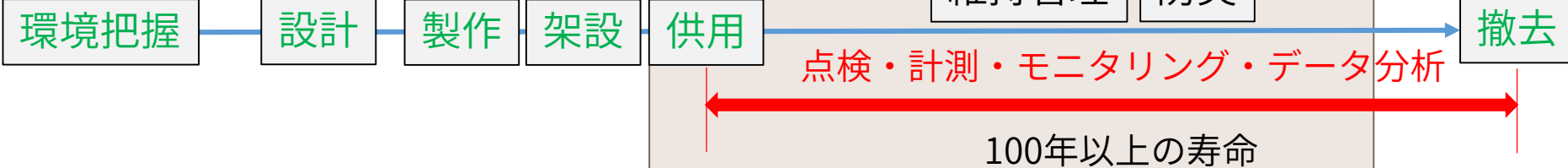
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

鋼構造物を対象とした渦電流計測による 残存板厚および高力ボルト軸力の評価

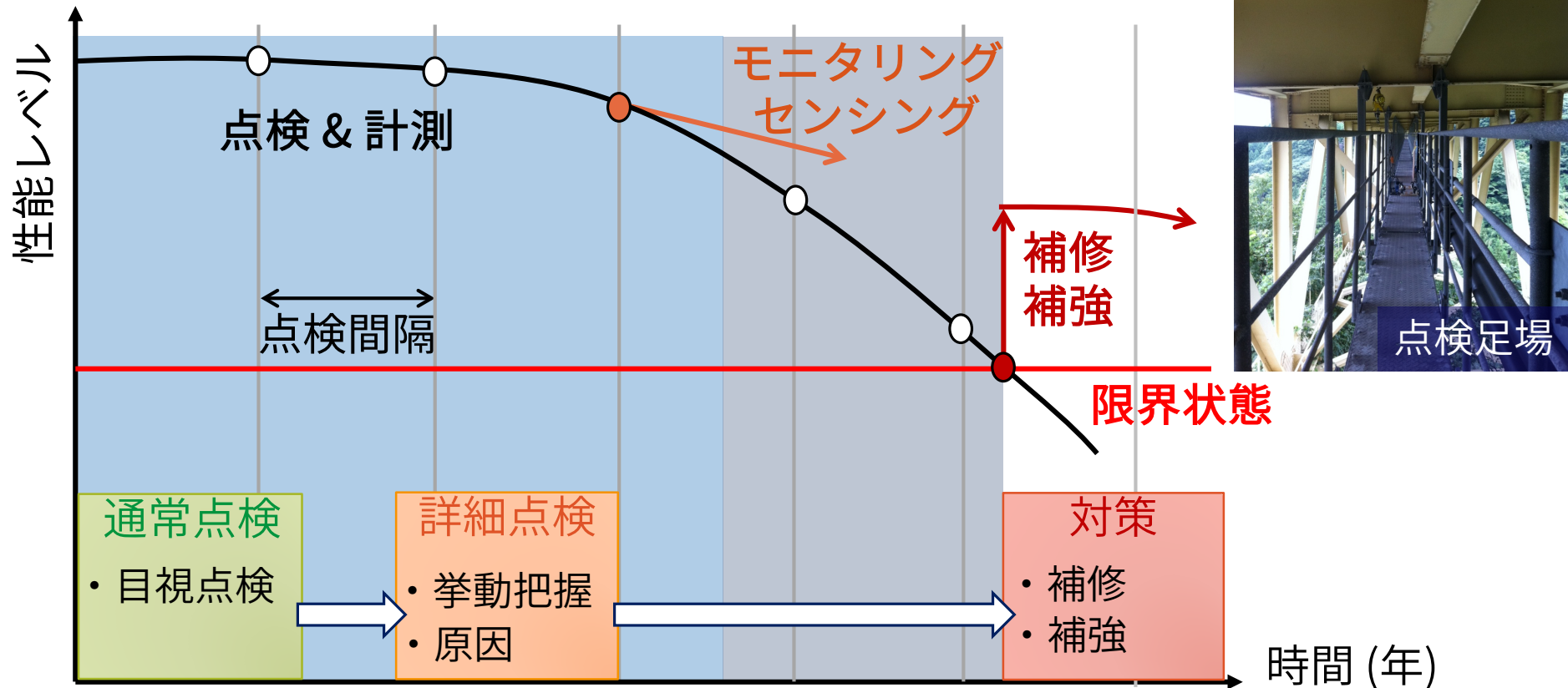
東京工業大学 阿久津絢子，佐々木栄一

インフラ構造物の維持管理

インフラ構造物（鋼橋）

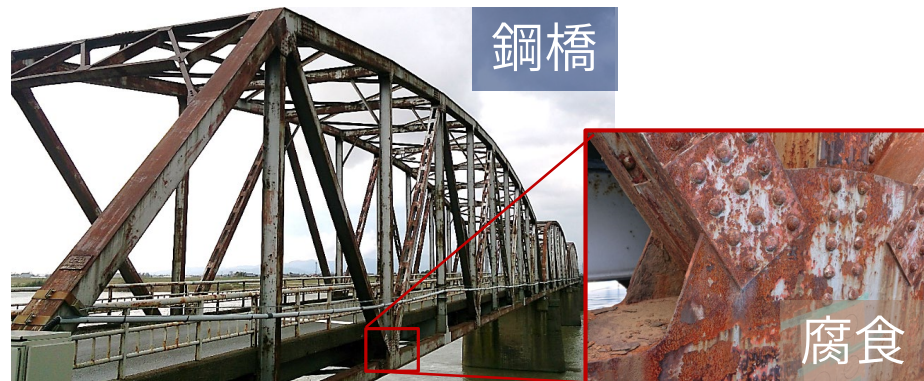


基本的な維持管理プロセス



鋼橋の維持管理における着目ポイント

鋼橋

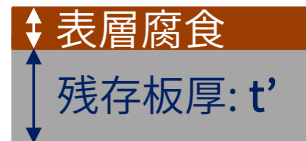
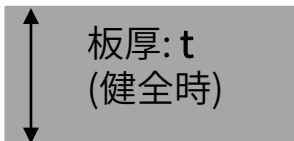


- 鋼部材の耐力低下に影響
- 通行制限や補修補強・架替え工事

板厚損傷率を用いた残存耐荷力評価手法

鋼材モデル

Khurram, N et al. (2014)



$$R_A = (t - t') / t$$

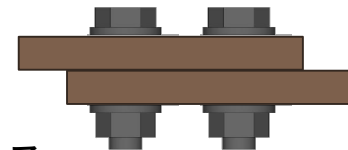
健全時の板厚 t から表層腐食を差し引いた残存板厚 t' から算出される板厚損傷率 R_A を用いて残存耐荷力を評価する手法

腐食損傷を有する鋼橋において表層腐食厚や残存板厚を取得することは重要



ボルト接合 (高力ボルト摩擦接合等)

- 技術者の熟練度によらず容易に建設が可能
- 維持管理や交換が容易
- 火気を用いず安全



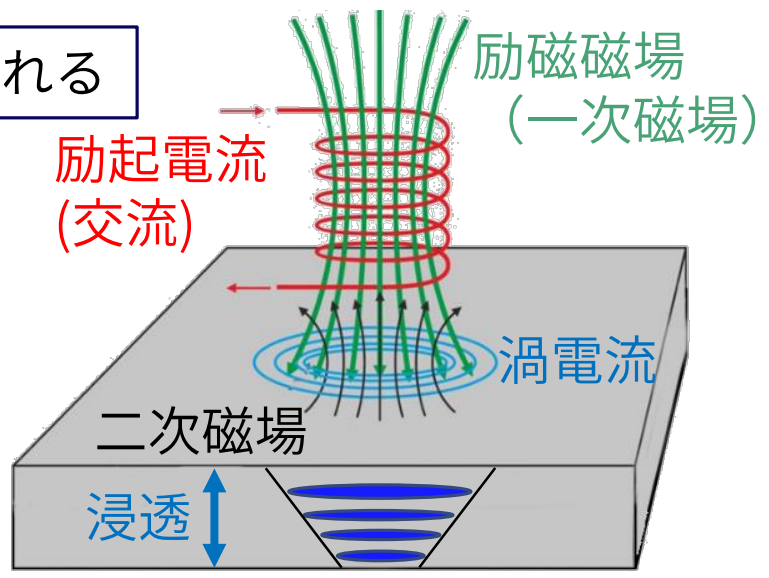
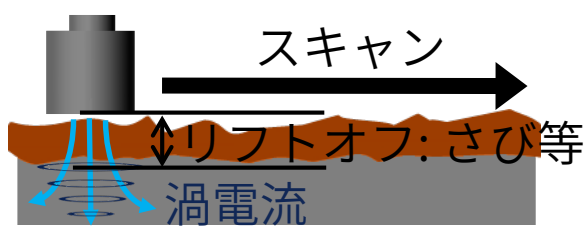
鋼構造物に多く用いられている

締付け後のクリープ・リラクセーション、腐食、車両等による振動により緩みが発生
→ 設計軸力の10%程度増し締めをするがボルト軸力状態は不明確

残存軸力を評価することが重要、非破壊・簡易な方法が望まれる

鋼橋維持管理への渦電流計測の適用

渦電流探傷：表層付近の亀裂検知に用いられる

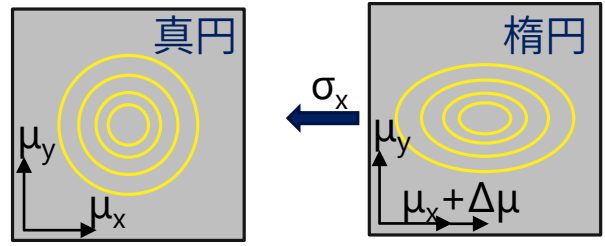


表面処理をすることなく，腐食表面に適用することができる手法

深さ方向にも浸透するため，**板厚情報も取得可能性**がある

※ 浸透深さが深くなると **渦電流の影響範囲が狭く，弱くなる**ことに課題

応力と渦電流の関係



応力を導入されると，渦電流の形状が変化する

σ_x : 応力

$\mu_x, \mu_y, \Delta\mu$: 透磁率

渦電流計測での評価指標

$V = f(\mu) = f(g(\sigma))$

応力変化により鋼材の透磁率が変化し，**検出電圧が変化**する

渦電流計測における検出電圧により **応力状態を把握できる可能性**がある

本研究の目的

目的

鋼構造物の維持管理のため，渦電流計測を用いた腐食層厚や残存板厚等の腐食損傷の評価方法および高力ボルト軸力の評価方法を提案する

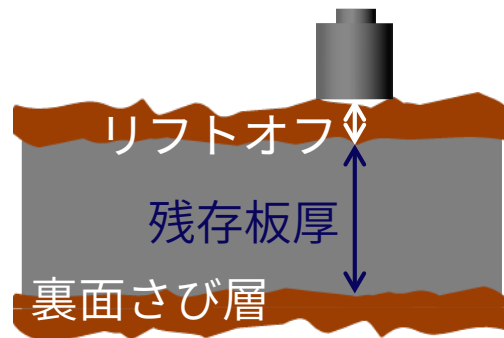
達成すべき目標

- 腐食損傷による評価指標の変化傾向および軸力による変化傾向を数値シミュレーション（FE解析）と実験から明らかにする
- 解析と実験の結果に基づいて，評価指標の抽出および腐食鋼部材のさび層・残存板厚の評価方法を提案する
- ボルトに軸力が導入された際の応力状態や変形状態を明らかにし，高力ボルトの軸力評価方法を提案する
- 提案方法の適用性について実験的に検討を行う

動磁場の数値シミュレーション

【解析条件】 Software : COMSOL Multiphysics

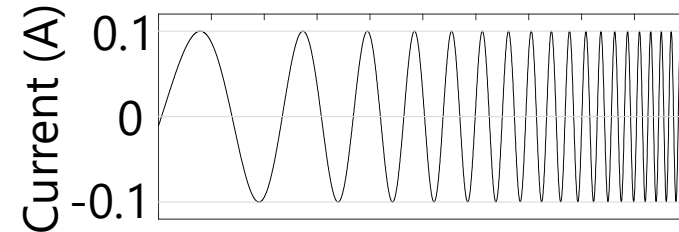
腐食損傷のモデル化



リフトオフ：さび層やコーティング等の高さ（プローブと健全部の間の隙間高さ）

励磁波形

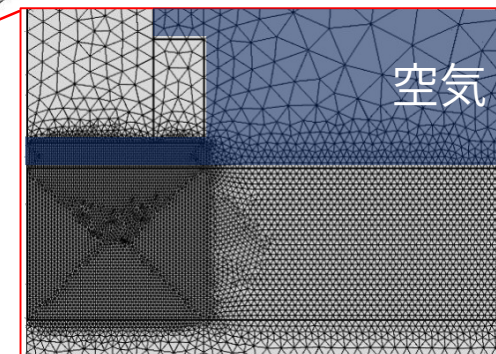
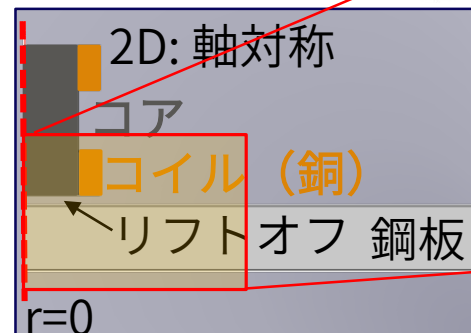
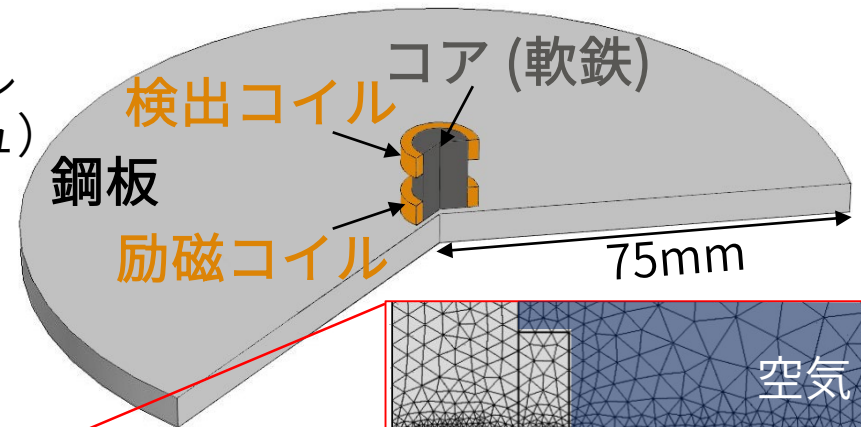
スイープ波: 1 ~ 1000Hz



解析に使用した各種値

材料	比透磁率	電気伝導率 [S/m]
鋼	100	5.85×10^6
空気	1	0
銅	1	6×10^7
軟鉄	2000	1 (損失なし)
変数	残存板厚	9, 8, 7, 6 [mm]
	リフトオフ	0, 0.1, 0.2, 0.3 [mm]
コイル	巻数	400
	直径 [mm]	16.4 (コア : 10)
	高さ [mm]	4.1 (コア : 14)

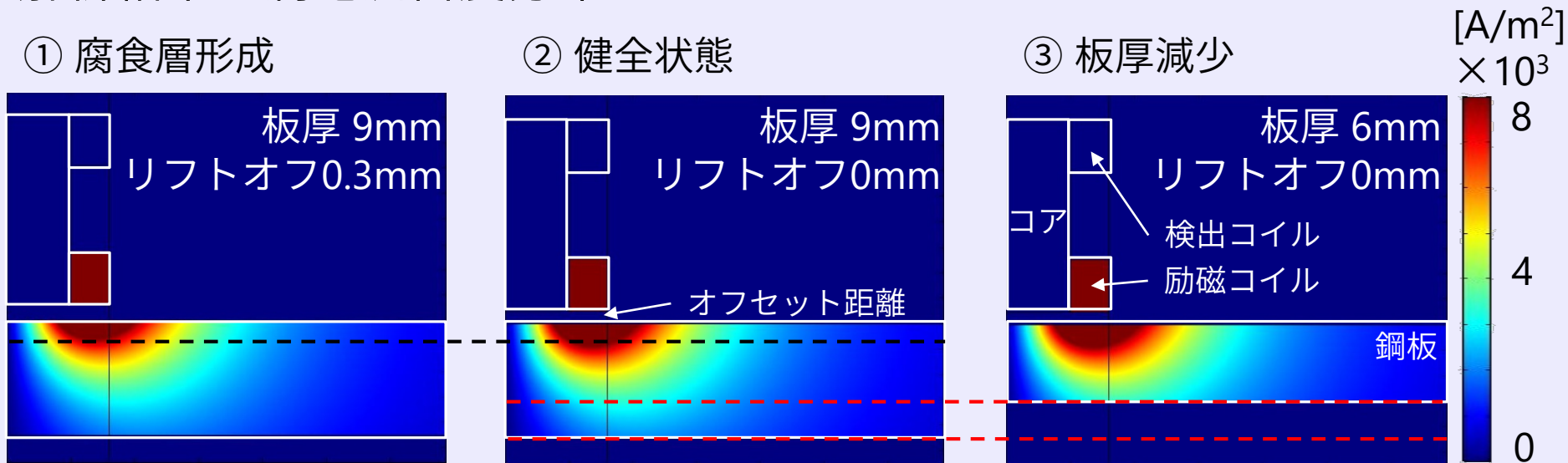
解析モデル
(メッシュ)



要素サイズ：最小: 0.1mm
最大: 2.0mm

渦電流の特徴

解析結果：渦電流密度分布

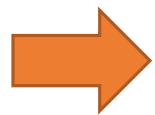


- 渦電流は深さ方向に浸透するにつれて減衰していく (① VS ②)
- 渦電流の影響範囲はコイルの大きさに依存する (① ~ ③)
- リフトオフが増加すると渦電流の強度が小さくなる (① VS ②)
- 板厚によらず渦電流密度分布は似ている (② VS ③)
- 渦電流を浸透させる必要があるため、板厚が減少すると渦電流の強度は小さく (② VS ③)

渦電流の特徴（渦電流損の影響）

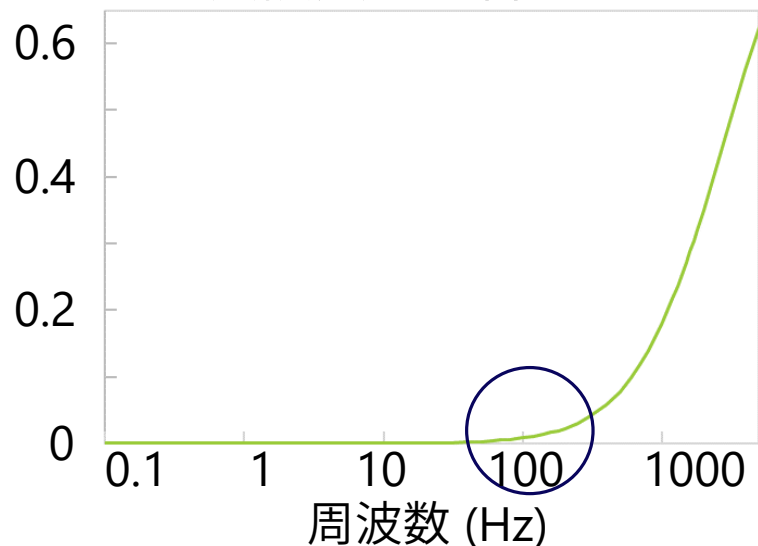
高周波帯における渦電流損の影響

- ❑ 電流密度は材料表面付近では強く、浸透するにつれて弱まる現象（表皮効果）
- ❑ コアまたは鋼板での熱損失により、渦電流のエネルギーが表面付近で発散する現象（渦電流損）



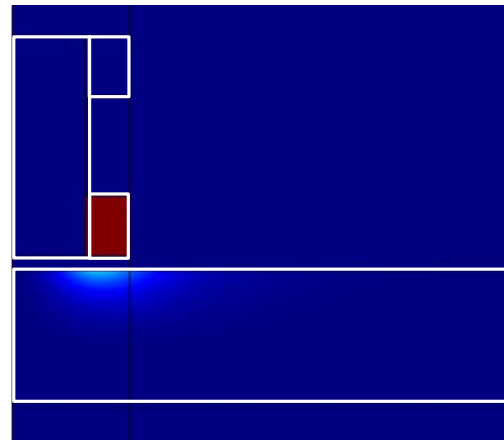
表皮効果および渦電流損の影響により、渦電流の強度が浸透するにつれて減少することが考えられ、**板厚計測への課題**となる

全熱損失に対する鋼板表面での熱損失の割合

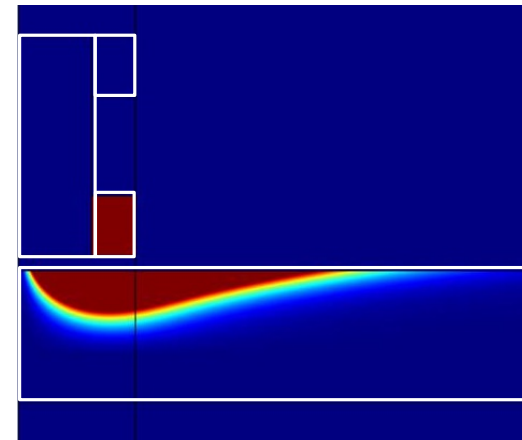


熱損失分布

20Hz



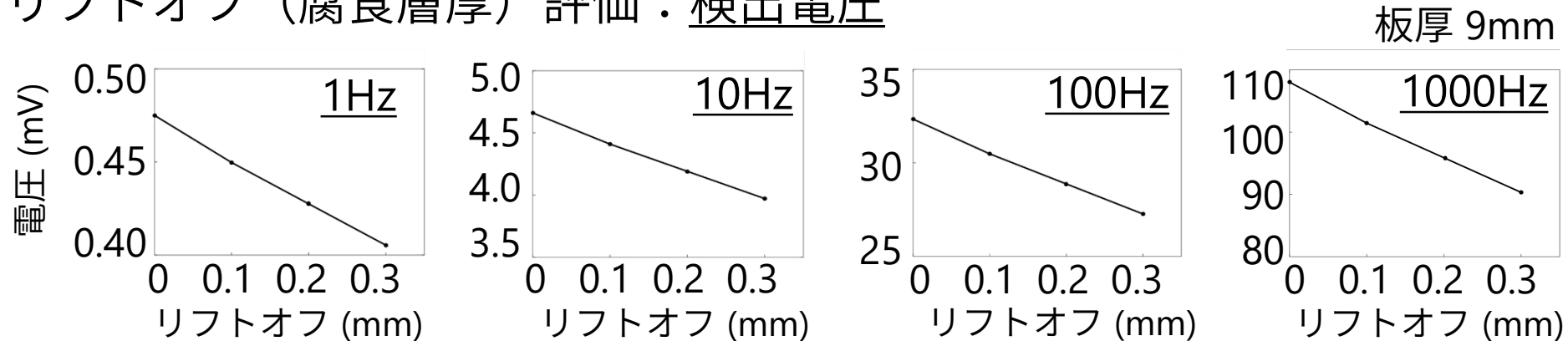
200Hz



ある周波数（100Hz付近）を境に鋼板表面での熱損失が大幅に増加している

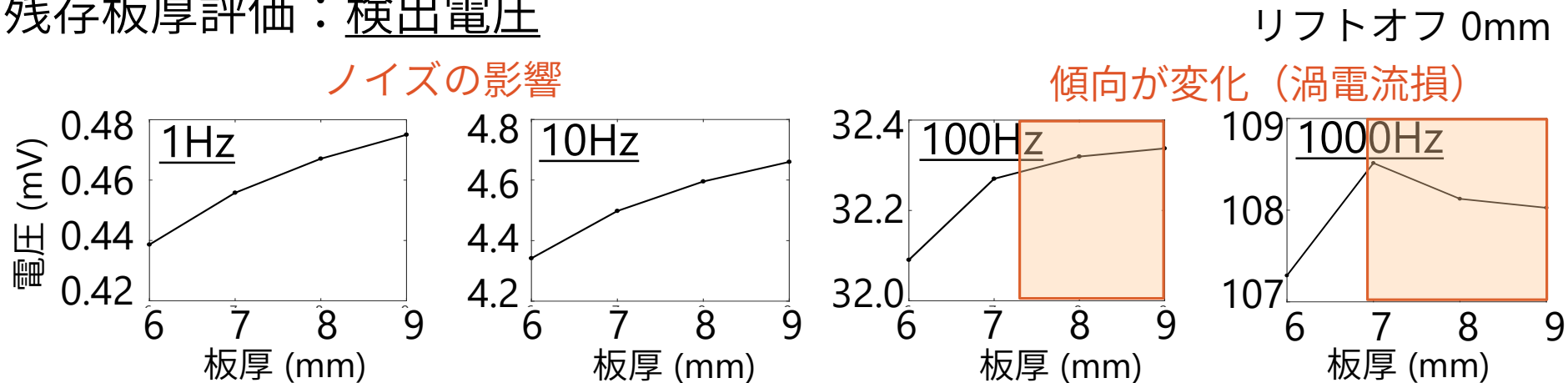
腐食損傷を評価するための評価指標の検討

リフトオフ（腐食層厚）評価：検出電圧



- 周波数によらずリフトオフが増加すると**検出電圧は下がる傾向**
- 周波数が高いほど差が大きくなる → **高周波の方が検出精度が高い可能性**

残存板厚評価：検出電圧



- 板厚が減少すると**検出電圧は下がる傾向**
- **低周波**を用いることにより板厚評価に検出電圧を適用できる可能性

腐食損傷を評価するための評価指標の検討 (続き)

評価指標に検出電圧を用いる場合

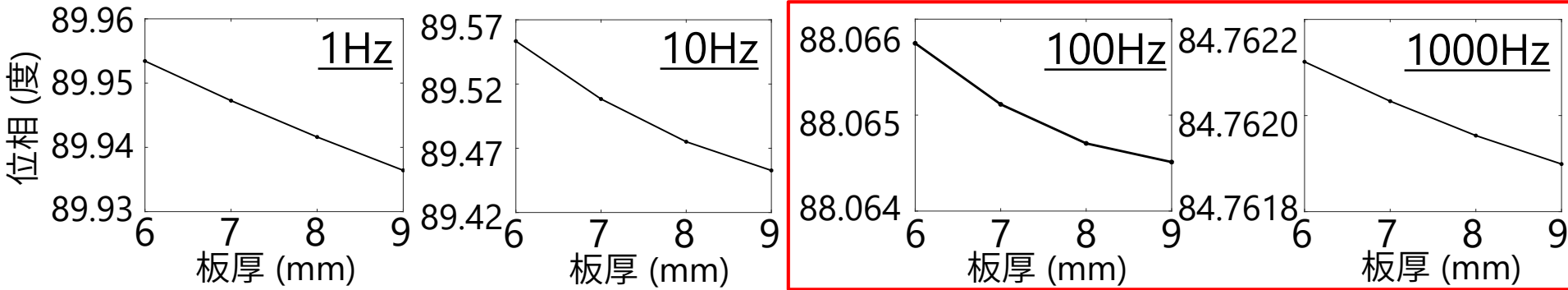
異なる2つの周波数が必要

腐食層厚評価：100Hz以上の高周波

残存板厚評価：10Hz程度の低周波

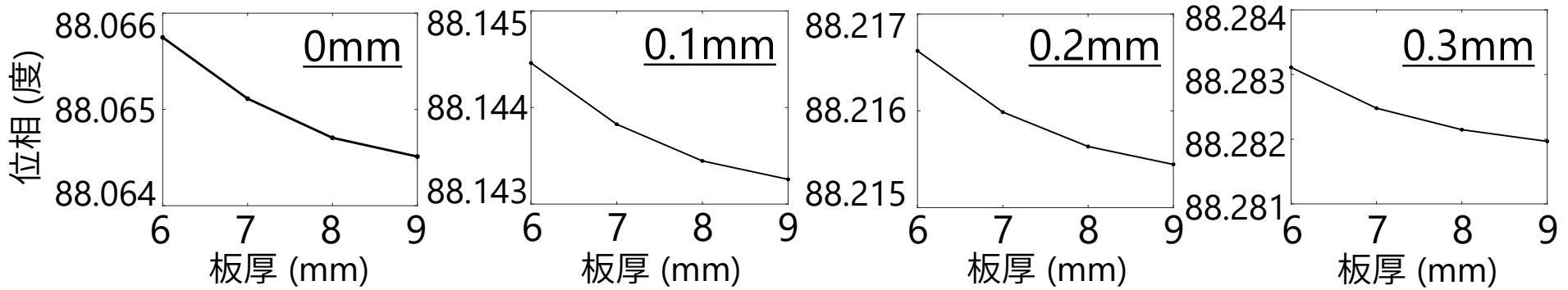
残存板厚評価：位相 (入力電流と検出電圧の位相差)

リフトオフ 0mm
渦電流損の影響なし



位相：100Hz

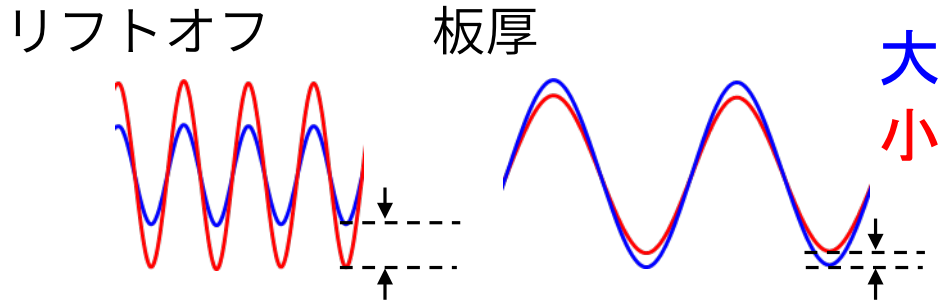
リフトオフによらず同様の傾向を示す



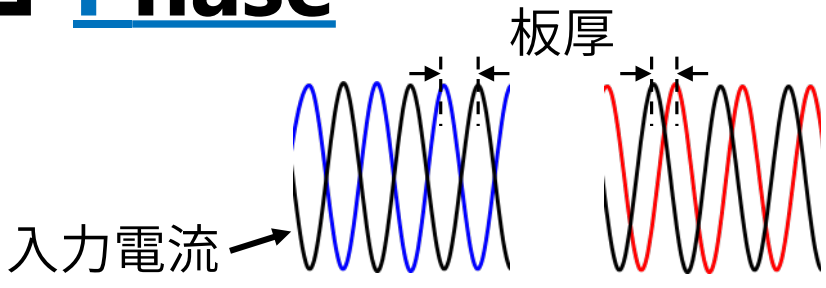
□ 評価指標として位相を用いることにより、**高周波においても板厚の評価可能性**がある
 →計測時間の短縮が可能に

腐食損傷評価方法の提案

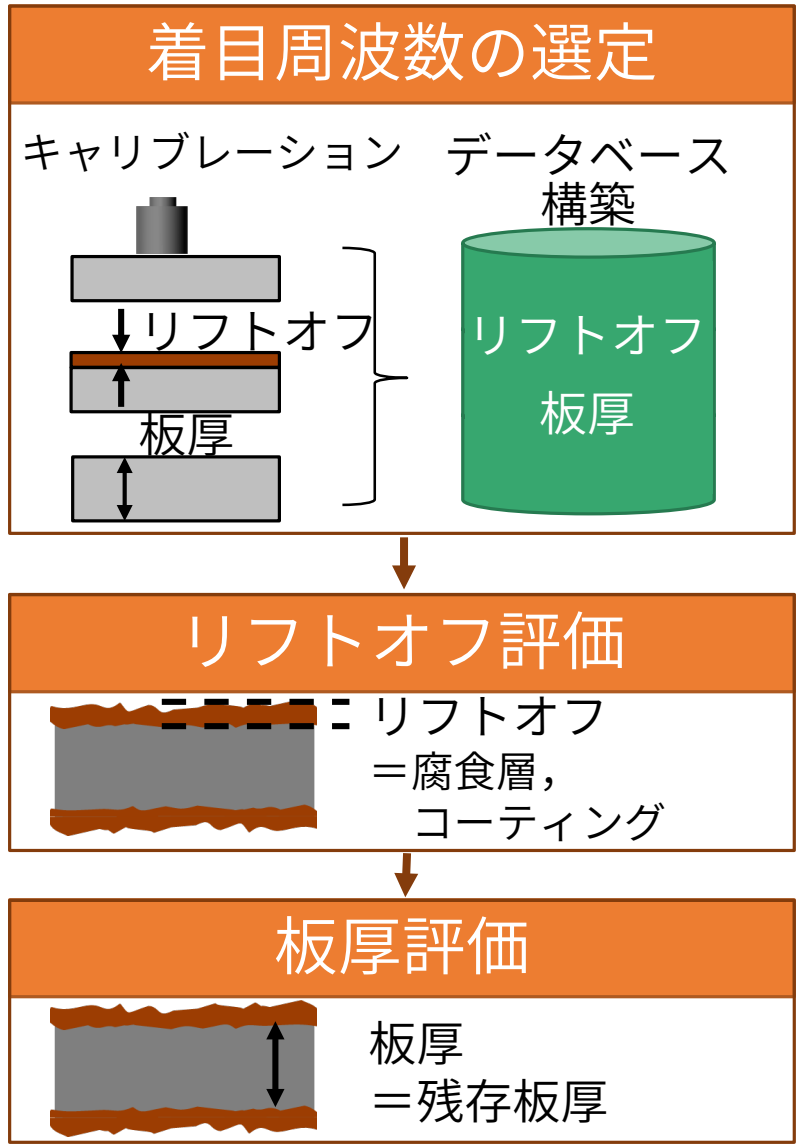
□ Voltage



□ Phase



腐食損傷評価方法



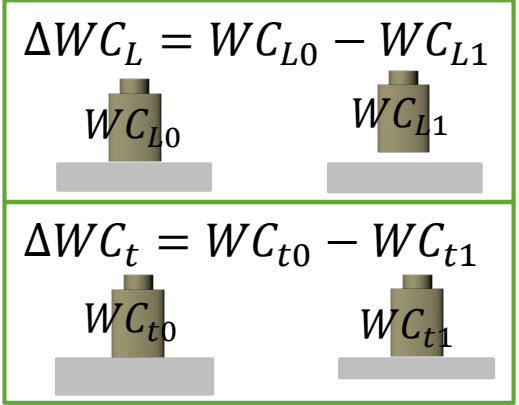
	リフトオフ	板厚	計測時間
VV	V 100Hz	V 10Hz	f: 10Hz
VP	V 100Hz	P 100Hz	f: 100Hz

腐食損傷評価方法

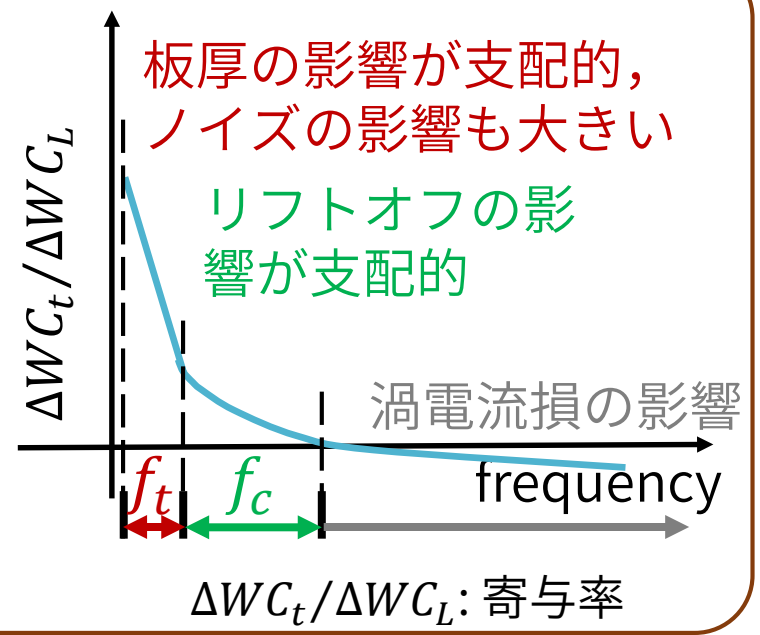
データベース

入力: スイープ波

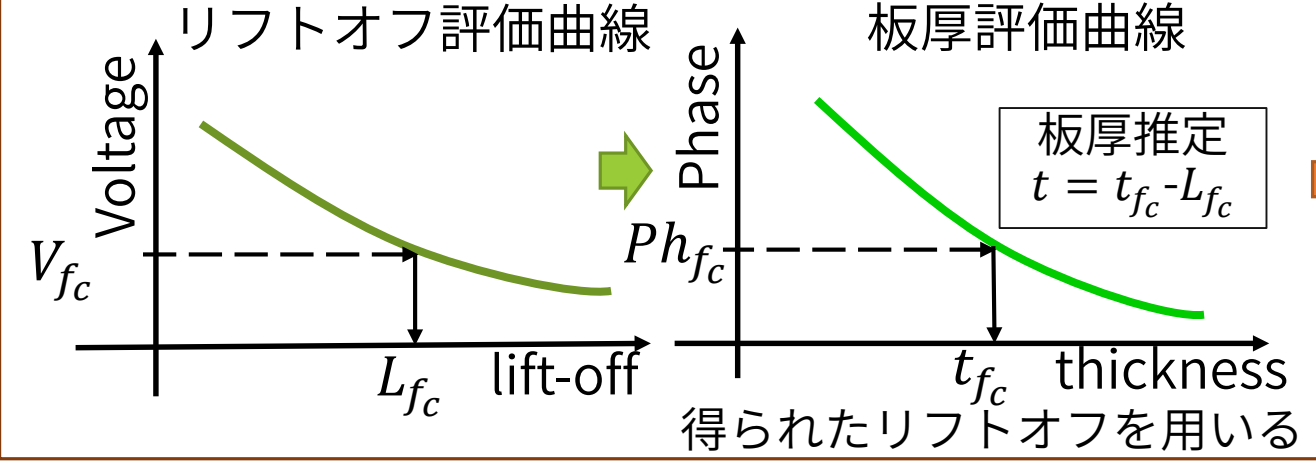
- 対象材料
1. 寄与率
 2. 腐食損傷評価周波数の選択 f_c
 3. マスターカーブ



- 検出電圧波形のウェーブレット変換
- 時間情報を残したまま周波数領域を使える
 - 信号の安定化
 - ノイズ除去



f_c におけるマスターカーブ



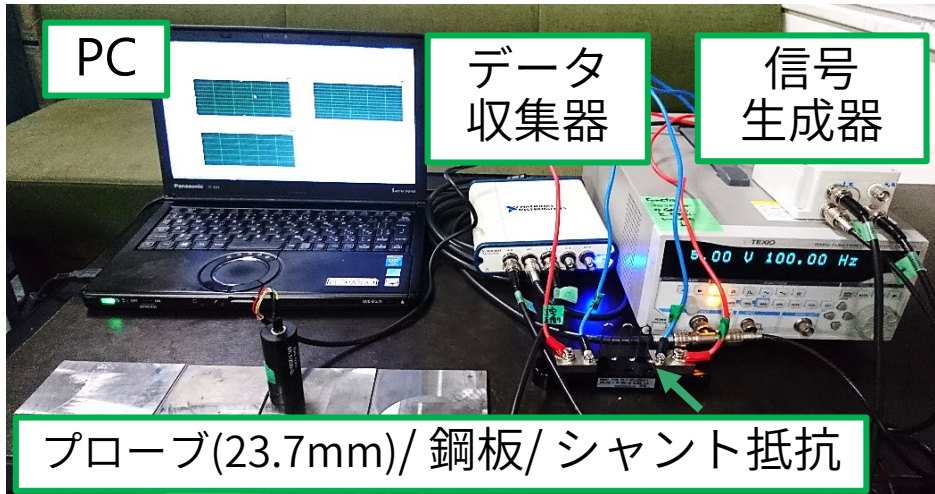
同周波数を用いた1度の計測

残存板厚と腐食層の同時評価

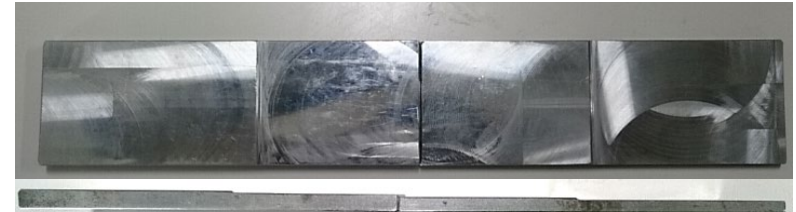
※板厚評価は f_t を用いて検出電圧でも同様に可能

実験計測システム

データベースを構築するための実験

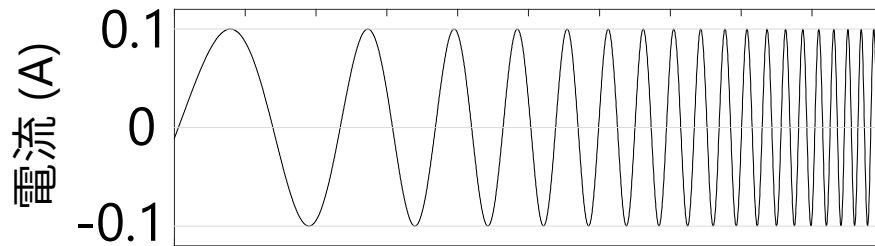


キャリブレーション試験体



鋼板
(板厚 9, 8, 7, 6mm)

励磁波形:
スイープ波 10 ~ 500Hz



リフトオフ計測にはプラスチックの隙間ゲージを使用

伝達関数を用いた位相算出

$$T_{IV}(f) = \frac{P_{VI}(f)}{P_{II}(f)} = \frac{V(s)}{I(s)}$$

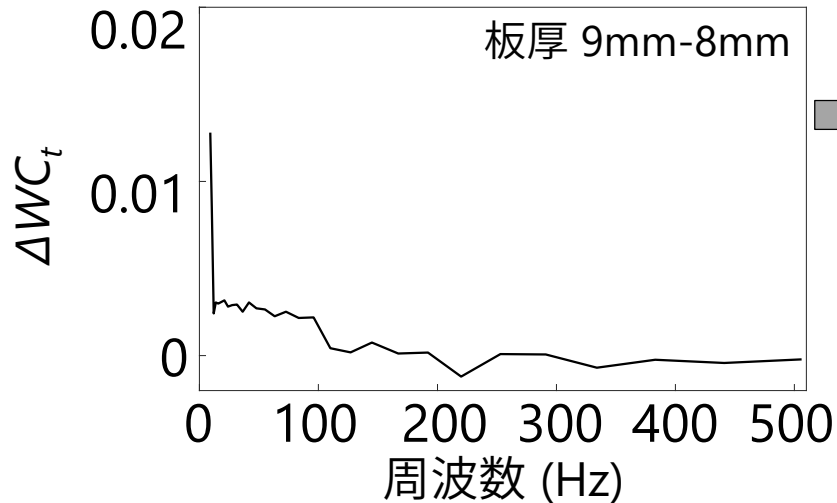
位相

$$\alpha = \text{angle}(T_{IV}(f))$$

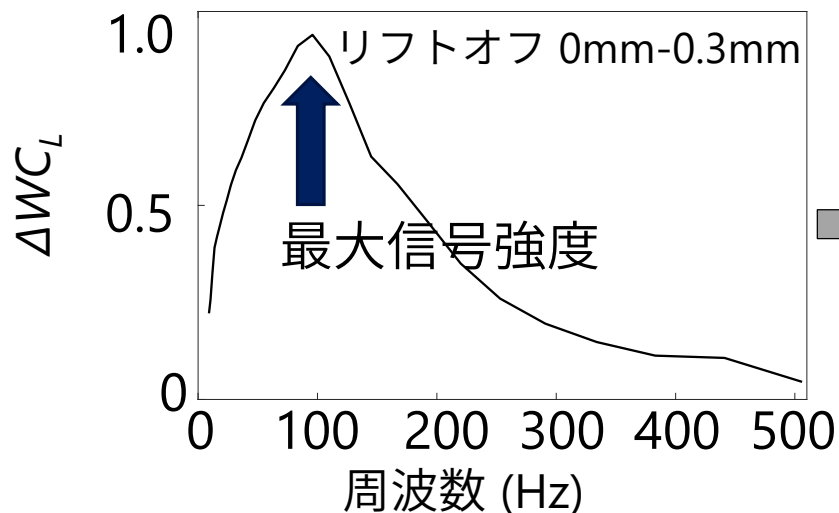


対象周波数選定 (実験結果)

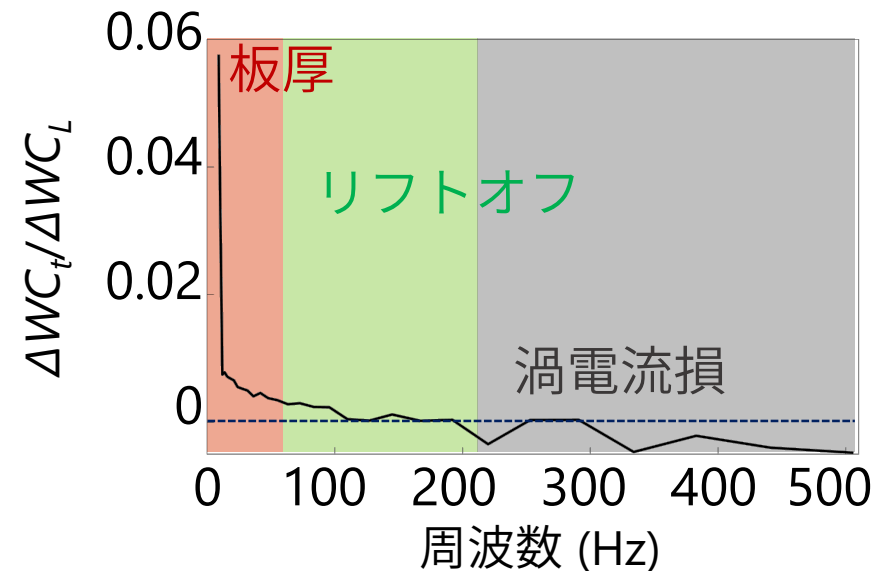
板厚信号強度： ΔWC_t



リフトオフ信号強度： ΔWC_L



TL信号比： $\Delta WC_t / \Delta WC_L$



- 解析と同様の傾向を確認
- ΔWC_L , $\Delta WC_t / \Delta WC_L$ より

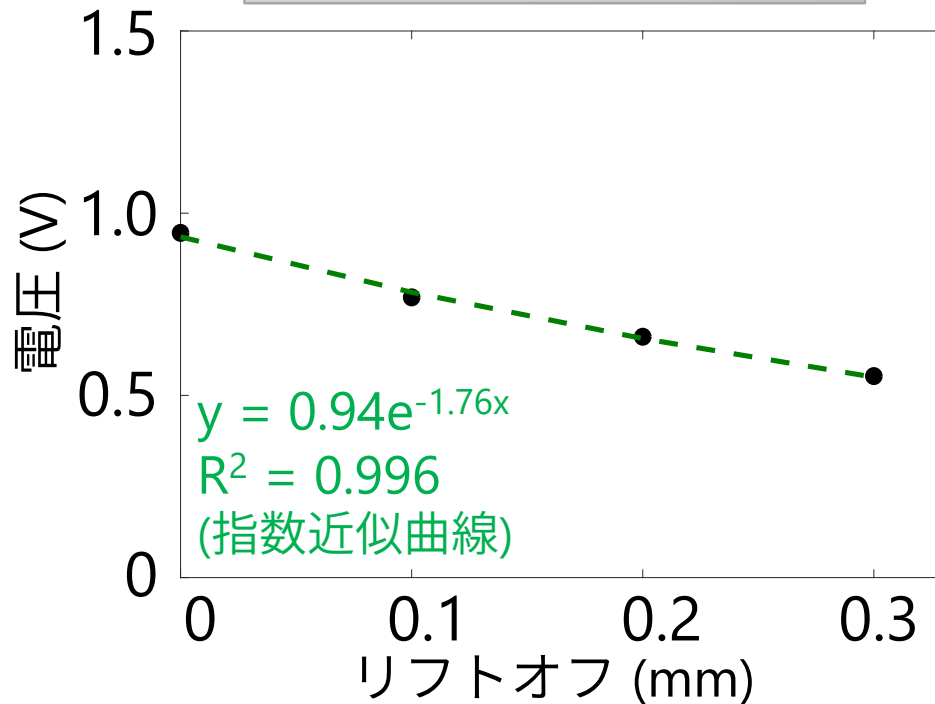
腐食損傷評価周波数: **100Hz**

腐食損傷評価曲線 (Voltage-Phase)

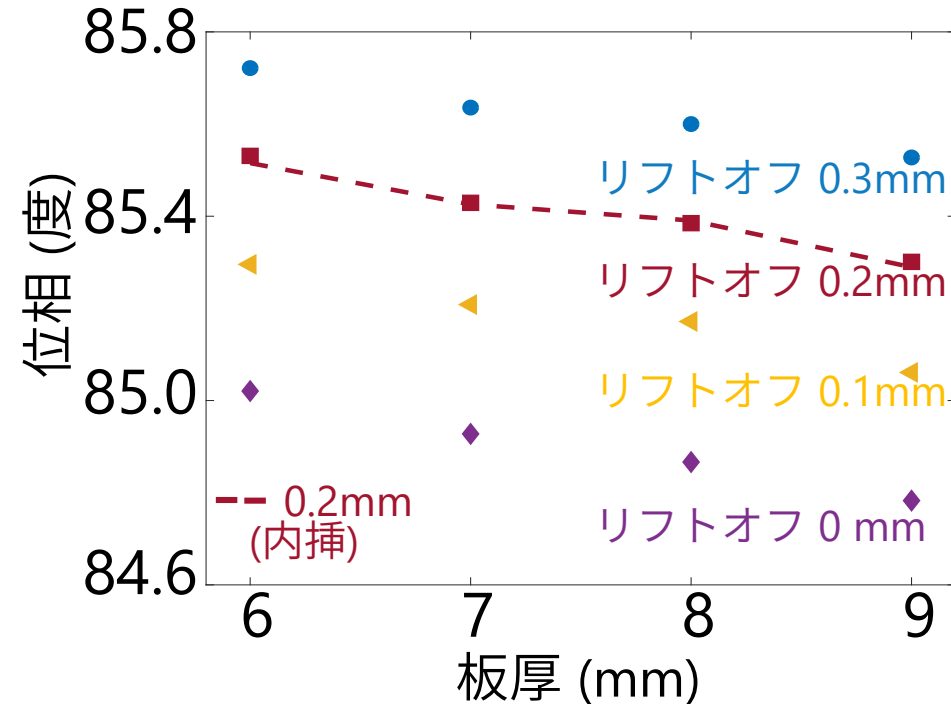


評価曲線 (マスターカーブ) : f_c 100Hz

リフトオフ評価曲線

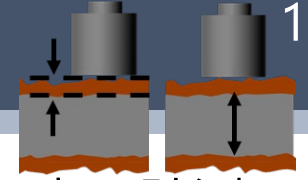


板厚評価曲線

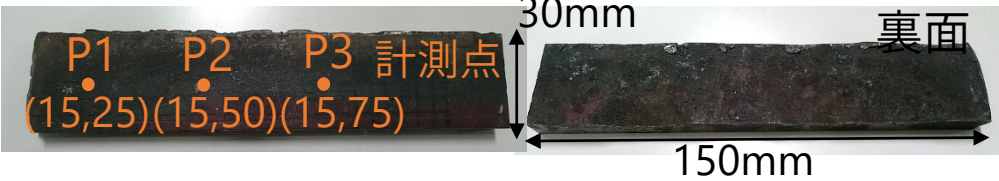


リフトオフ評価に検出電圧，板厚評価に位相を用いることで同周波数で同時に腐食損傷を評価することが可能となる
 検出電圧のみを評価指標とする場合には，板厚評価には10Hz程度の低周波帯を用いることで可能となる (Voltage-Voltage)

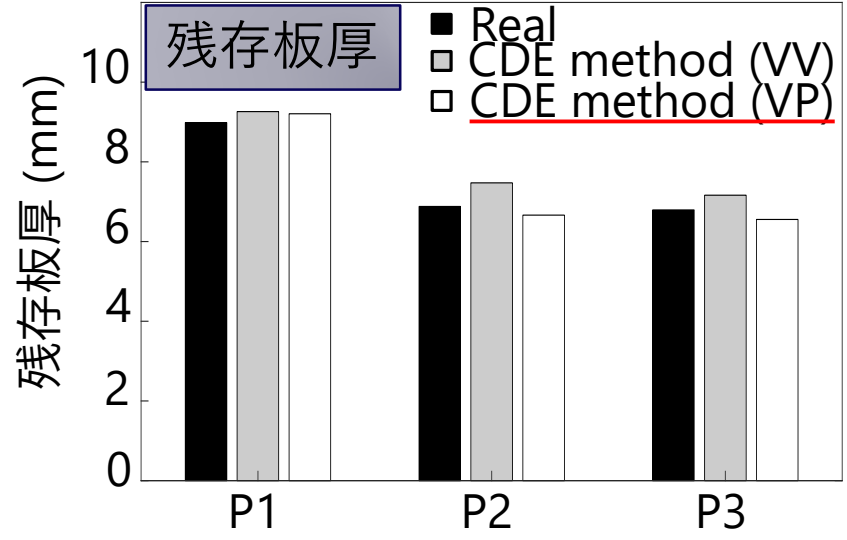
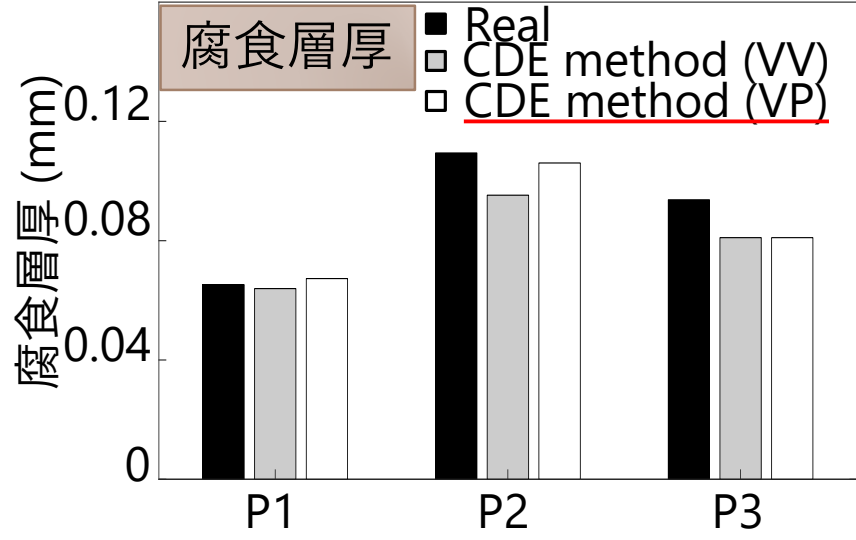
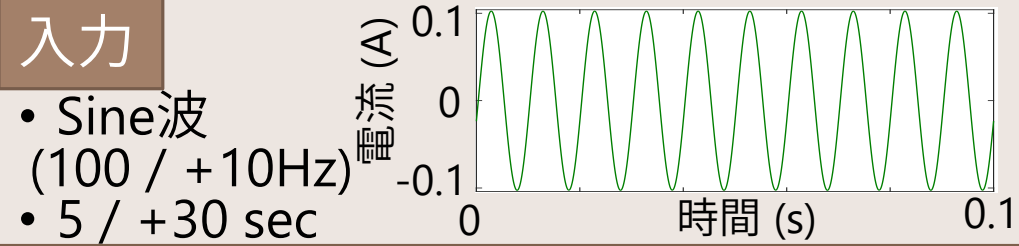
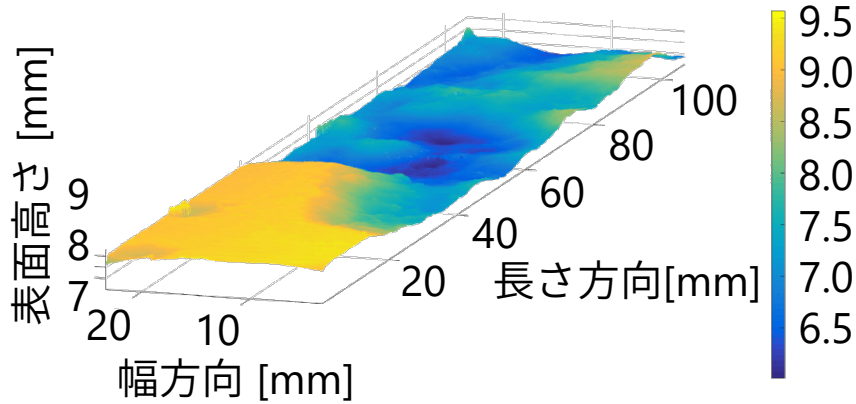
腐食試験体を用いた適用実験



腐食試験体概要



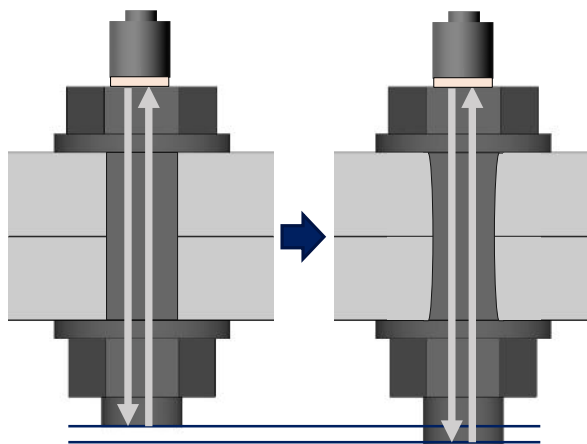
レーザー変位計による裏面計測



提案方法を用いることにより腐食層厚と残存板厚といった腐食損傷を評価可能であることが確認された

軸力評価のアプローチ

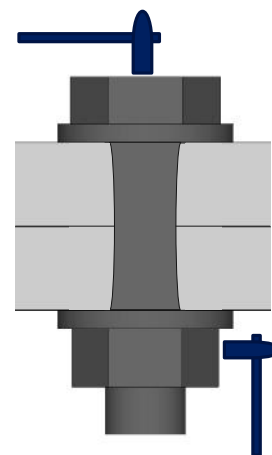
超音波探傷



浸透時間により計測

ボルト頭部,
ナット側の
どちらからで
も計測できる

ハンマー

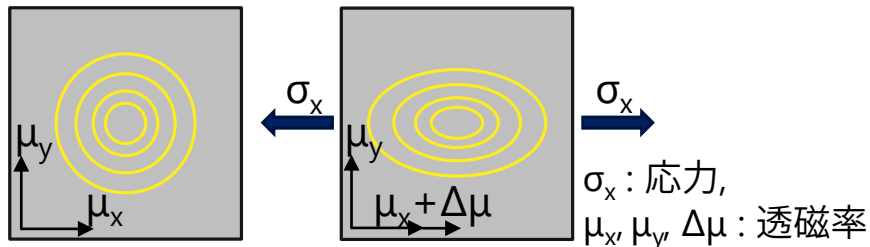


音響や振動により計測

簡易，早い計測方法
一方で信頼性が問題
になることがある

渦電流探傷

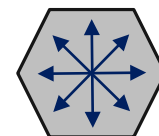
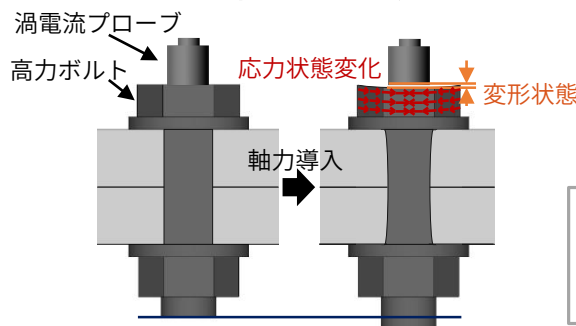
応力と渦電流の関係



$$V = f(\mu) = f(g(\sigma))$$

検出電圧(V)は応力の大きさにより変化

ボルト頭部の応力状態と変形を捉える



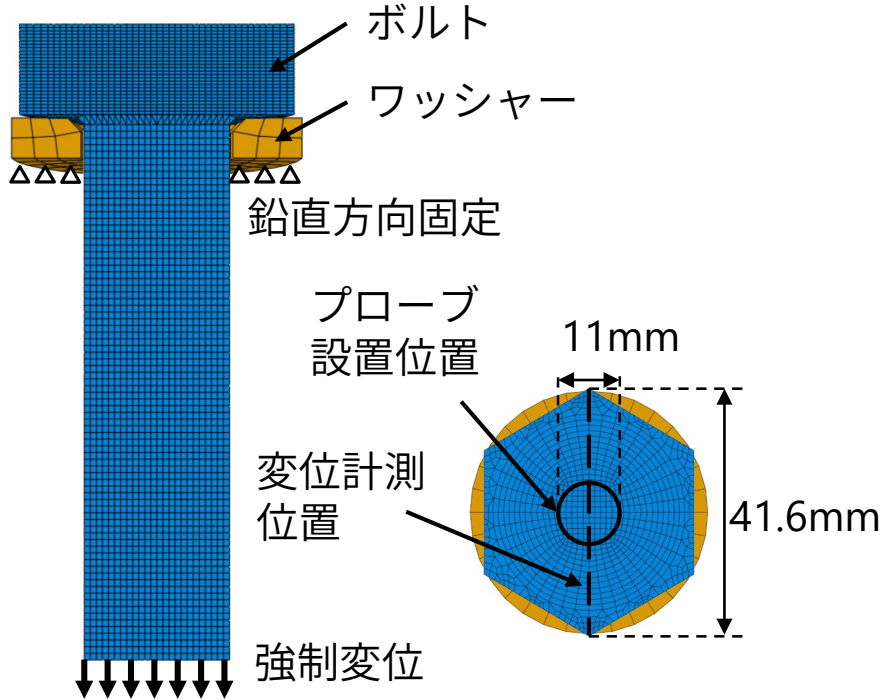
応力状態は一樣
と考えられる

ボルト軸力が導入された場合にボルト
頭部の応力状態変化や変形を渦電流探
傷により検出できる可能性がある

軸力導入時のボルト頭部の状態解析

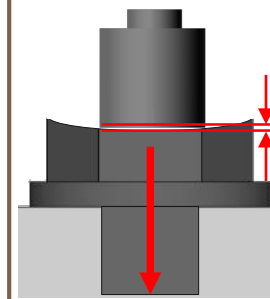
軸力導入にともなうボルト頭部の変形や応力状態を有限要素解析により確認した

解析モデル(解析ソフトウェア：Abaqus 6.14.)



メッシュサイズ	基本：1mm 最小：0.5mm
弾性係数	210GPa
ポアソン比	0.3
降伏応力	900MPa

軸力導入時のボルト頭部の変形



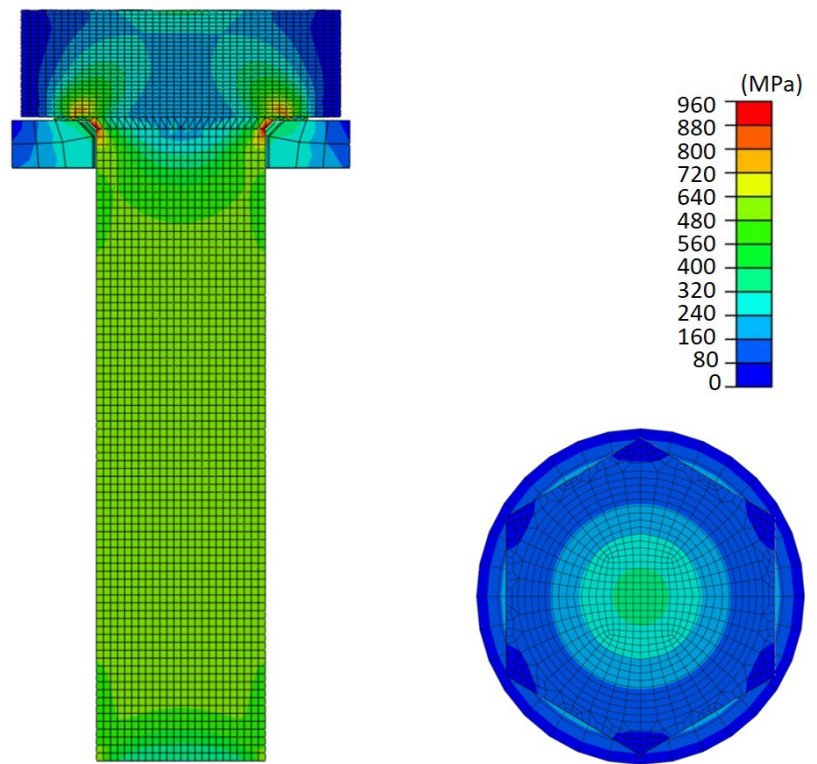
ボルト頭部が変形している場合、ボルト頭部とプローブの間にすき間（リフトオフ）が生じる可能性がある

ボルト頭部が変形し、プローブとの間に生じるリフトオフが大きくなると検出電圧への影響も大きくなる

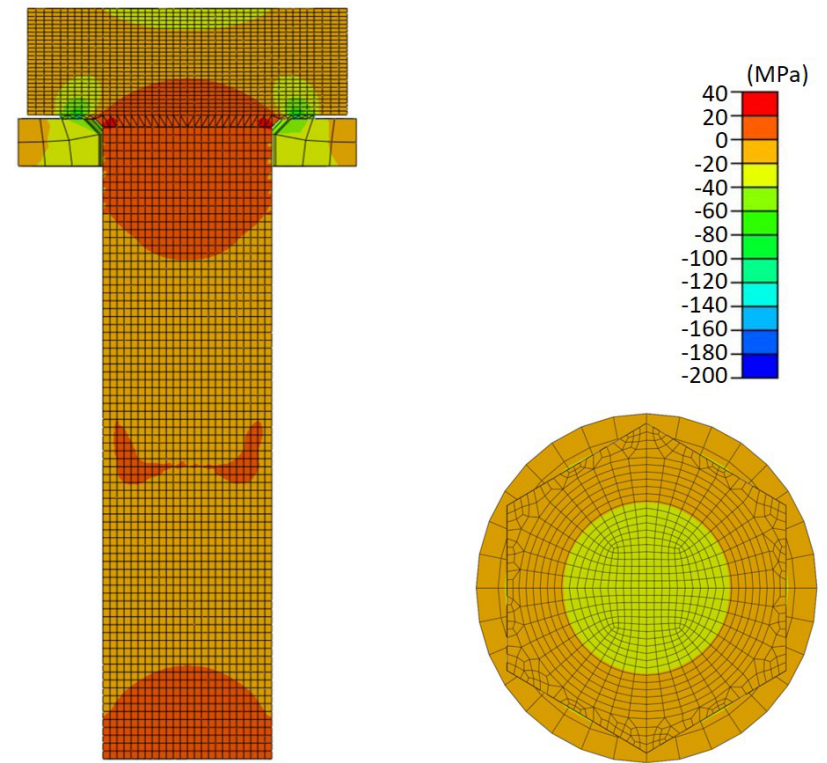
有限要素解析結果（応力分布）

軸力導入時（設計軸力：205kN）のボルトの応力分布

Mises応力



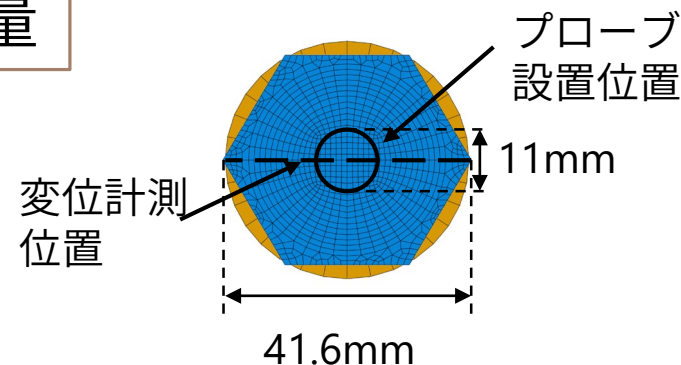
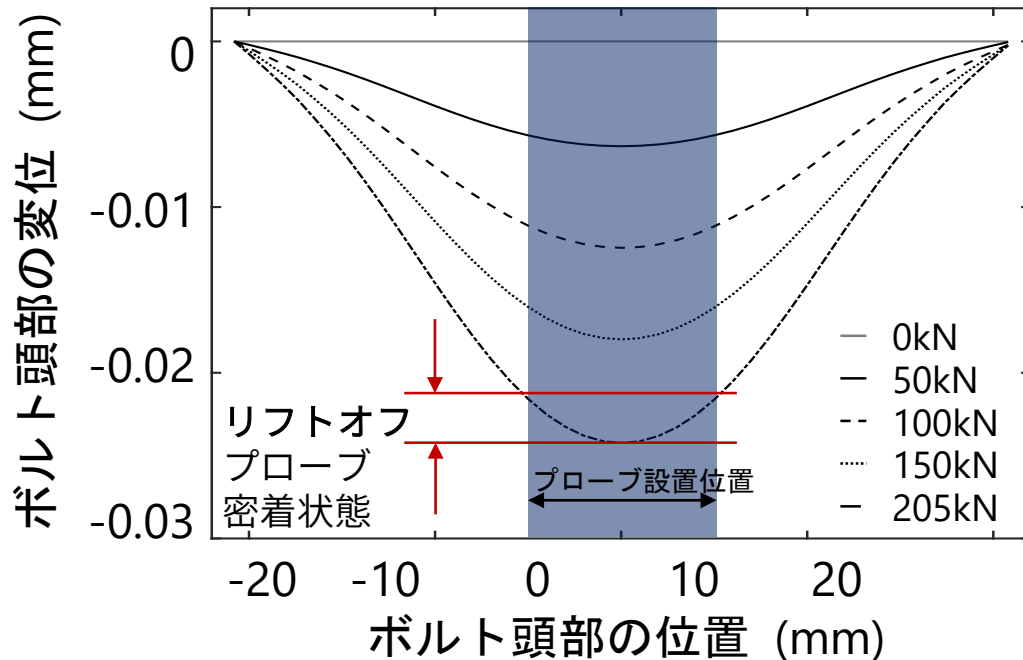
最小主応力



- ボルト頭部の応力は中心から一様に分布している
- ボルト頭部の表面付近では応力は圧縮方向に作用しており，渦電流プローブ設置位置付近では一様である

有限要素解析結果（ボルト頭部変形）

有限要素解析によるボルト頭部の変形量



プローブの設置範囲を考慮すると、軸力205kNを導入した際の変形量は**0.025mm**程度となる。

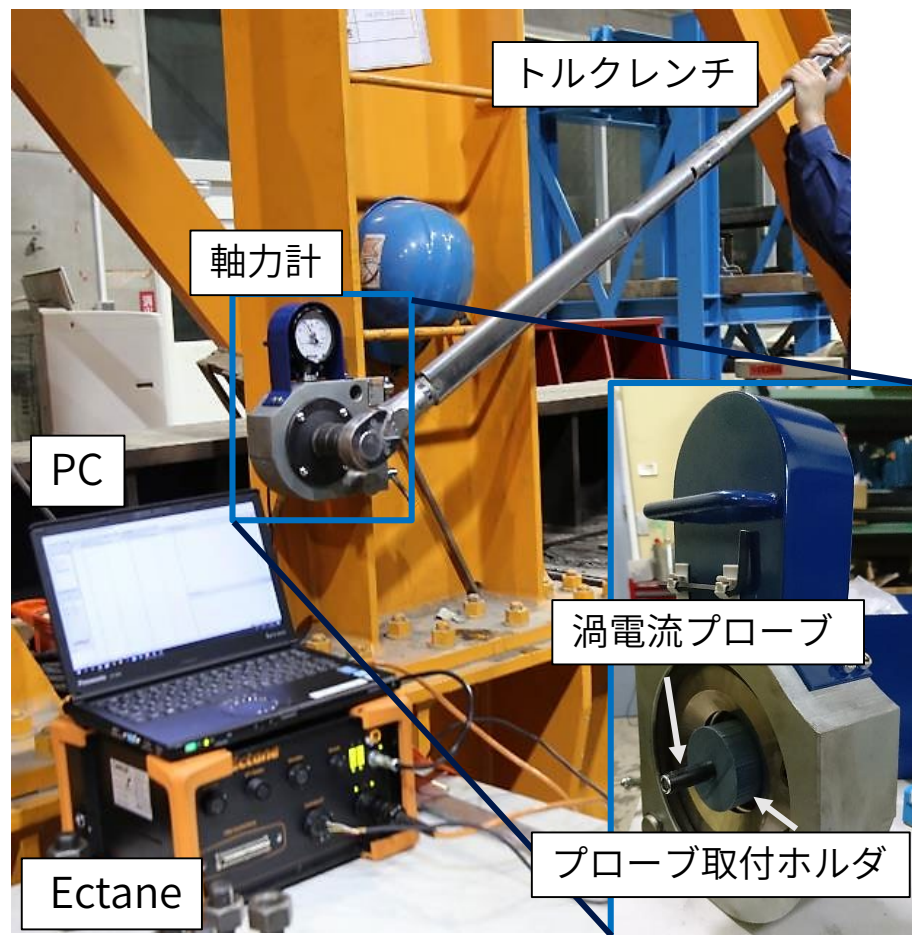
プローブは密着させるため、リフトオフはさらに小さい。

- FE解析により、微小ではあるが**ボルト頭部が変形**し、リフトオフとして影響している可能性を確認した
- 現状では検出電圧からリフトオフの影響か、軸力の影響かの切り分けはできていないが、**変形量も軸力により変化する**ため、計測条件を一定とすることにより軸力評価は可能であると考えられる

ボルト軸力導入実験

実験セッティング

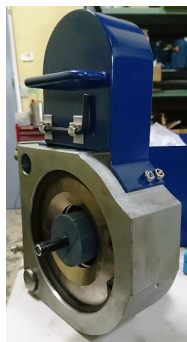
高力ボルト：M22



- ボルト刻印に干渉しない直径11mmの渦電流プローブを使用した
- プロブをボルト頭部に固定するための取付ホルダを3Dプリンタを用いて作成した

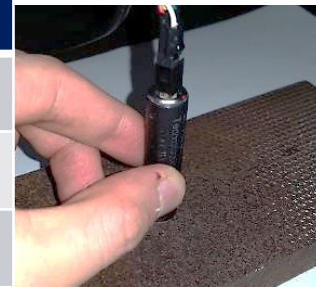
導入軸力: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 205 (kN)

実験結果 (軸力評価曲線)



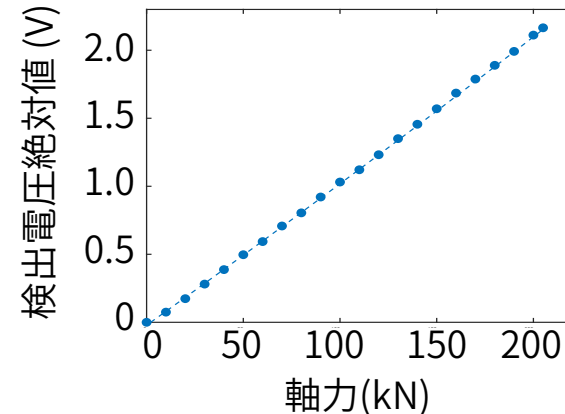
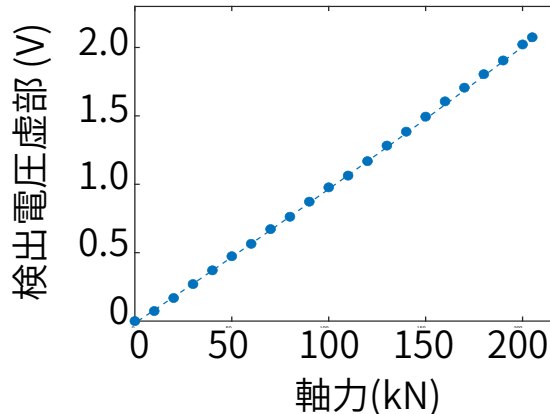
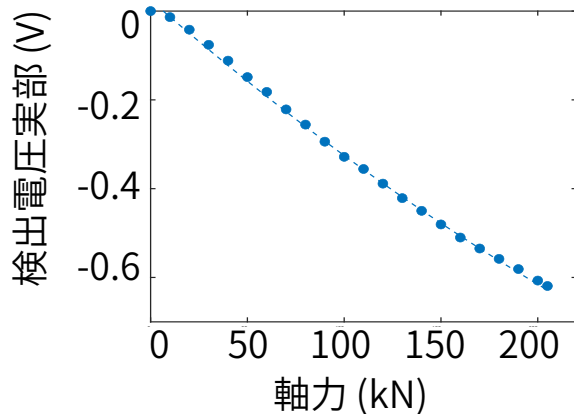
計測

プローブ情報	
直径 (mm)	11
高さ (mm)	46.5
重さ (g)	9.4



0kN時点で初期値をゼロ，締め付け
検出電圧と軸力の関係

-- 2次近似曲線



- 軸力導入にともなう検出電圧の変化を確認
- 検出電圧の実部と虚部では軸力にともなう電圧の変化傾向が異なる
- 得られた曲線を**軸力評価曲線**とし，任意の軸力で計測した検出電圧を**評価曲線の値に参照させて軸力を取得する**

軸力評価結果

軸力評価曲線として検出電圧の絶対値と実部をそれぞれ適用

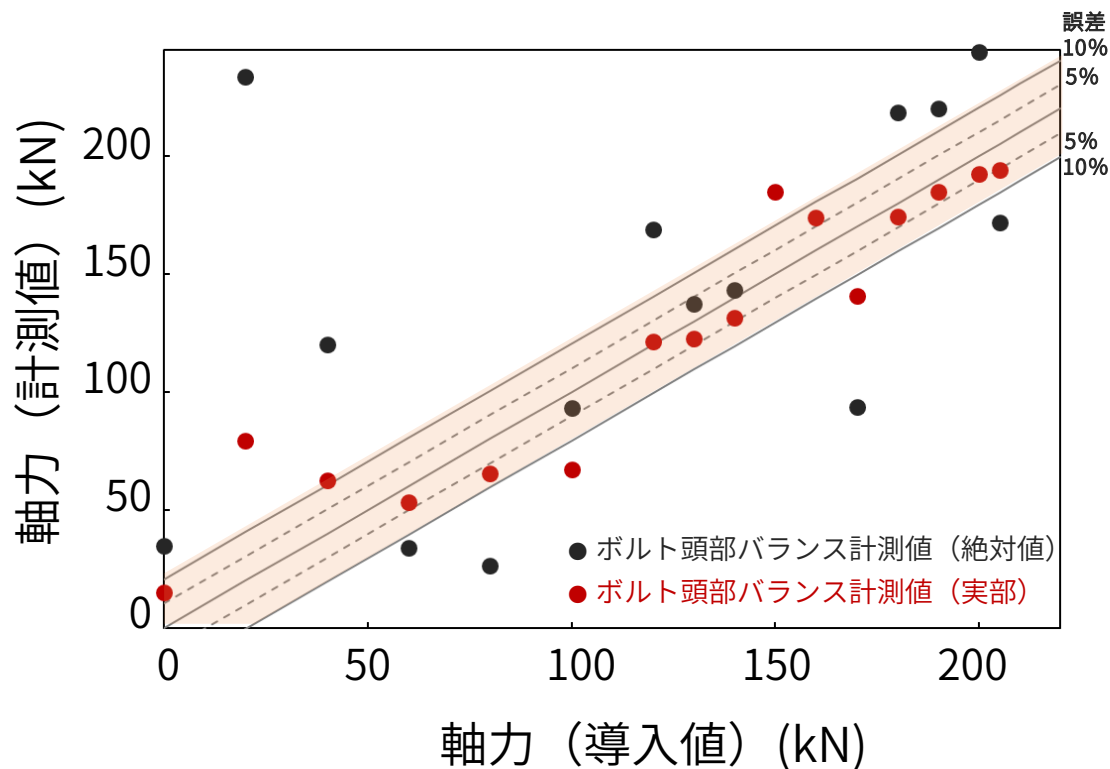


参照用ボルト

同種のボルトで軸力が導入されていないもの

- ① 参照用ボルトでの計測値を初期値とし、ゼロとする
- ② 任意の軸力が導入されたボルトに対して計測を行う
- ③ 得られた電圧を評価曲線の値に参照して軸力を取得する

軸力評価結果



- 実部を評価曲線として採用するとばらつきを低減することができる
- 軸力が高い方がばらつきは少ない傾向
- 軸力80kN以上では誤差10%以内、かつその多くは誤差5%以内または5%に近い精度で軸力を評価できている

本研究のまとめ

結果

渦電流計測を用いた腐食層厚や残存板厚等の腐食損傷の評価方法および高力ボルトの軸力評価方法を，それぞれ解析および実験による検討に基づき，提案した．

- 渦電流と腐食層（リフトオフ）・残存板厚・軸力との関係から評価曲線を算出し，腐食試験体や高力ボルトを用いた適用実験を行い，本研究で提案する手法の適用可能性を示した．

今後の展望

残存板厚評価（腐食損傷）

- 精度向上や適用板厚の拡充に加え，機械学習等を適用した評価曲線（マスターカーブ）を要さない方法について検討をしていきたいと考えている

高力ボルトの軸力評価

- ボルトの状態（腐食やその他の損傷等）への適用や，腐食損傷では行っているロボティクスへの適用等を行っていききたいと考えている