

土木学会インフラマネジメント技術国際展開研究助成  
2021年度中間報告会 2021年11月4日 14:55~15:10  
発表5~10分, 質疑5~10分, 合計15分前後

## 中央アフリカ・ザンビア国を対象とした耐候性鋼橋梁の 普及促進を目指した腐食環境調査と補修工法の提案

---



岐阜大学工学部  
社会基盤工学科防災コース  
准教授 木下 幸治

# 耐候性鋼材について

**普通鋼材**

- 鉄に2%以上6%以下のCを含む
- 塗装により腐食を防ぐことで使用



**耐候性鋼材**

- Cu, Ni, Cr, Pを含む低合金鋼
- 緻密な保護性さびの形成により腐食抑制
- 二層構造（外層が偏光層, 内層が消光層）
- 内層が高い環境遮断, 防食性を発揮.



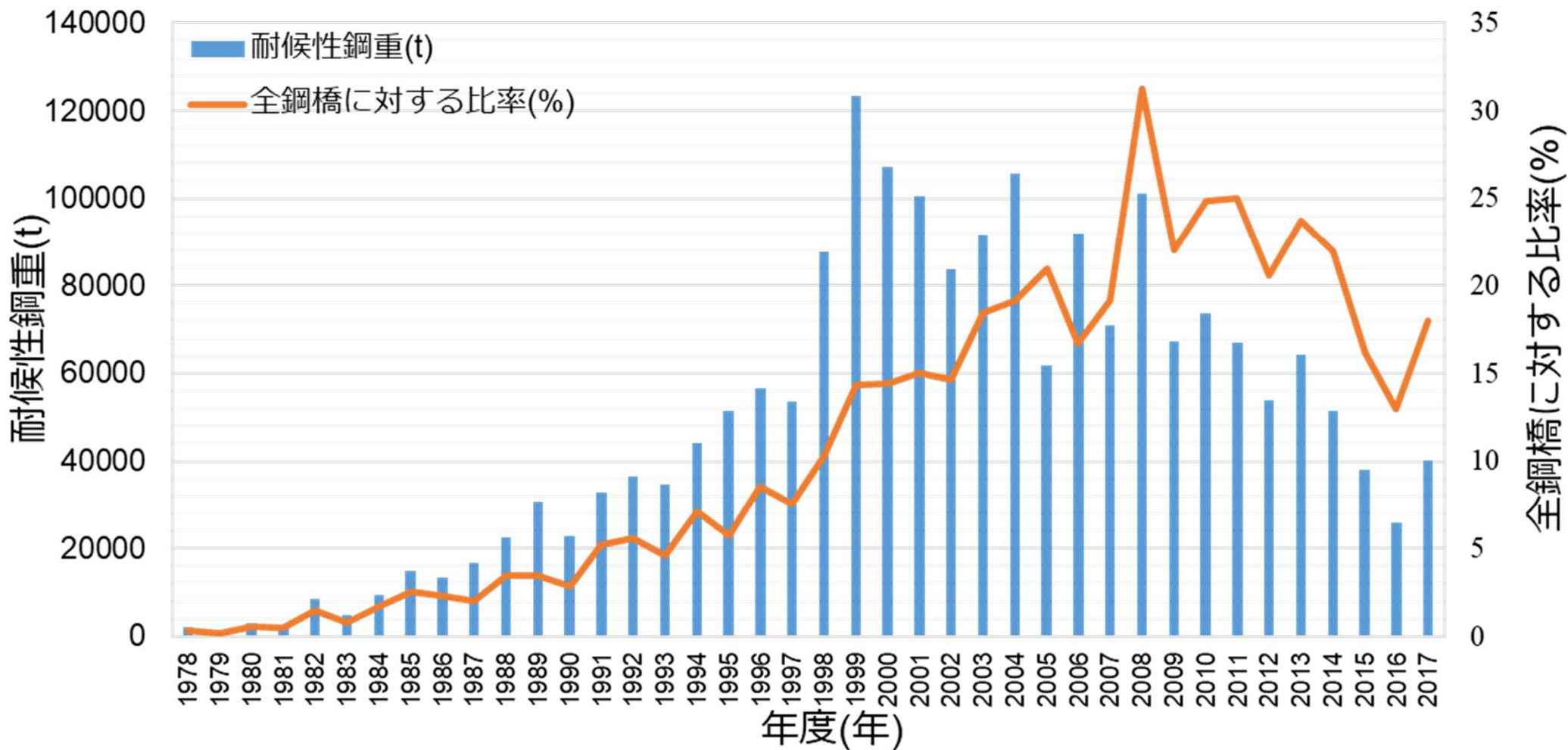
**1960年代  
耐候性鋼材の橋梁への適用**

1977年 New River Gorge橋



**1980年代  
無塗装橋梁の提案・実現**

**大幅な塗装コストの削減**



1) (社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼橋梁実績資料集第24版，2019

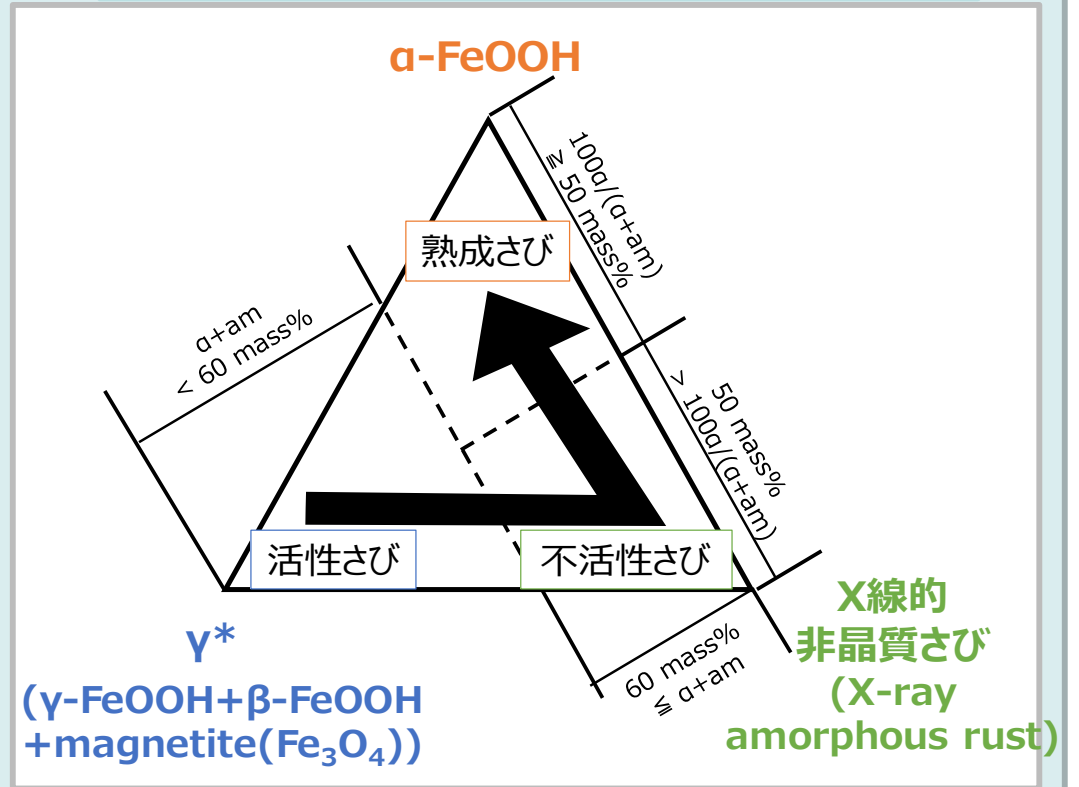
- 1970年代以降，数多く建設。
- 長いもので40～50年程度の供用年数。
- 腐食により，鋼材の断面減少が進んでいる。疲労き裂の発生も報告されている。

# 耐候性鋼の保護性さびについて

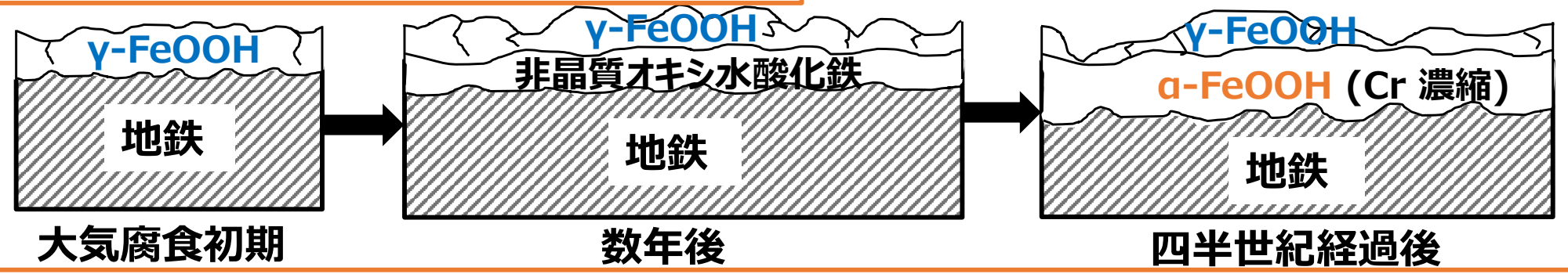
## 大気腐食環境下で生成される主なさび<sup>1)</sup>

- ▶  **$\alpha$ -FeOOH**  
…化学的に不活性（安定）熟成さび
- ▶  **$\gamma$ -FeOOH**  
…化学的に活性，他のさびに変化しやすい
- ▶  **$\beta$ -FeOOH**  
…化学的に活性，他のさびに変化しやすい  
.生成環境に塩化物が存在すると生成される.
- ▶  **$Fe_3O_4$**   
…単体では腐食反応を促進しないが， $\beta$ -FeOOHや $\gamma$ -FeOOHと混在すると腐食を促進

## 安定化に向かうさび組成変化<sup>2)</sup>



## 最終安定さび層の長期形成過程のモデル<sup>3)</sup>,<sup>4)</sup>



1) 紀平ら：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集No.745，2003.  
 2) 三木ら：現代の橋梁工学，数理工学社，2004.  
 3) M. Yamashita et al. : Corros. Sci., 1994.  
 4) 山下ら：材料と環境，1994.

# 耐候性鋼材の異常腐食と補修

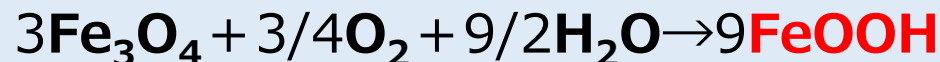
- 耐候性鋼材**
- Cu, Ni, Cr, Pを含む低合金鋼
  - 緻密な保護性さびの形成により腐食抑制
  - 二層構造（外層が偏光層，内層が消光層）
  - 内層が高い環境遮断，防食性を発揮。



## 耐候性鋼の異常腐食

飛来塩分・凍結防止剤に含まれる**塩分**等により保護性のない異常腐食が発生

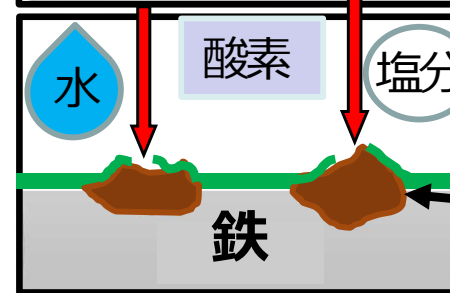
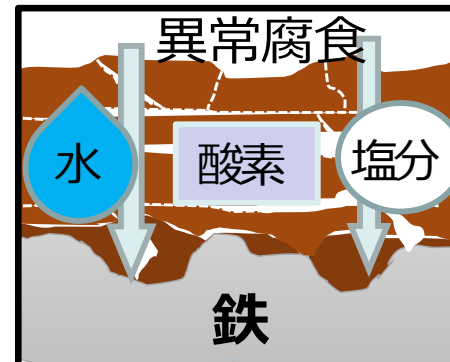
活性さび酸化還元サイクル



乾湿繰り返して活性さびが**腐食を促進**



## 主な補修方法とその課題



### 主な補修方法

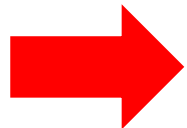
#### 異常腐食の除去

- ブラスト処理
- 水洗処理

#### 塗装

### 課題

- 耐候性鋼異常さびは強固で除去が困難
- 活性さび、塩分が残存
- 再腐食により塗膜が破損



わが国で培った耐候性鋼橋梁における世界最先端の維持管理上の問題点の改善案を踏まえた維持管理システムもパッケージ化して海外展開??

# ザンビア国におけるJICA技術プロジェクト

- JICA橋梁維持管理能力向上プロジェクトフェーズII
- このフェーズIIの事前調査である「**詳細計画策定調査団**」に参加を通じて、岐阜大学の連携模索。
- 2019年1月30日に岐阜大  
・ザンビア大交流協定調印



Pictured at Gifu University UNZA Vice Chancellor Professor Luke Mumba exchanging the partnership agreement with the Gifu University Dean of the Faculty of Engineering Prof Toshiaki Murai

ザンビア 橋梁維持管理能力向上プロジェクトフェーズII概要	
1. プロジェクトサイト/対象地域名	ザンビア全土
2. 本事業の受益者 (ターゲットグループ)	直接受益者: RDA本部、パイロットプロジェクト対象リージョン事務所の橋梁技術者 最終受益者: 道路利用者
3. 事業実施期間	2019年1月~2022年12月を予定 (計48カ月)
4. 上位目標	RDA管轄の橋梁の状態が改善する
5. プロジェクト目標	RDA本部とリージョン事務所において、橋梁の維持管理業務が改善する。
6. 成果	成果1 RDA本部とリージョン事務所において、 <b>橋梁日常維持管理</b> にかかる技術者の能力が向上する 成果2 RDA本部とリージョン事務所において、 <b>橋梁補修</b> にかかる技術者の能力が向上する 成果3 RDA本部とリージョン事務所において、 <b>橋梁点検</b> にかかる技術者の能力が向上する。
7. 日本側の投入	専門家派遣・研修 (日本・第三国) ・機材供与

## 成果2 & 成果3に対する活動の1つ

ザンビア大学工学部にRDA及び民間コンサルタント/コントラクター向けの技術者育成講座を立ち上げ、中・長期的な人材育成体制を構築する

ザンビア大学工学部関係者  
**ME養成講座をザンビア大学に取り入れ、技術者育成に力を入れたい**  
技術協力の活動を活用し技術者育成講座を実施

技術協力の日本側の投入  
・専門家派遣  
・**研修** (日本・第三国)  
・機材供与

## 岐阜大学及び相互協力大学

現地: 技術協力の活動を活用して実施するザンビア大学が実施する技術者育成講座を支援

日本国内: 技術協力の本邦研修の受け入れ先にME養成コース(橋梁のみ)を想定。研修生(RDA職員)が日本のME養成コースを受講

- 2020年1月21日にJICAと岐阜大学にて契約した「JICAザンビア・プロジェクト」の基、ザンビア国を対象にME養成講座をベースに橋梁技術者養成講座の国際展開を実行するために、CIAM内に国際展開領域を設置。

### 組織改編



- ・ 人材育成領域
- ・ 地域実装領域
- ・ 国際展開領域

### 岐阜大学の強み「ME養成講座」 10年以上の実績の国際展開

- ・ 産官学が連携したプラットフォーム
- ・ 実績に基づく、「MEカリキュラム」
- ・ 最新教材の「インフラミュージアム」

## ザンビア国への橋梁維持管理エキスパート養成講座の国際展開

### University of Zambia



- ザンビア国における橋梁技術者養成講座の運営を担うザンビア大学「橋梁維持管理センター」設置を支援。
- インフラミュージアムをカスタマイズした大型橋梁構造モデル教材設置の支援
- ザンビア国における橋梁維持管理エキスパート養成講座の実装支援

### 【事業のポイント】

- ザンビア大学が持続的に技術者養成講座を継続できる体制が整備されたか。
- ザンビア国にて持続的に実施可能な体制・講座のカスタマイズ実現できたか。



# 目的とスケジュール

- 現在岐阜大学が連携しているJICAの技術プロジェクト「ザンビア国橋梁維持管理能力向上プロジェクトフェーズⅡ（2018年から2022年※コロナ禍で延長予定）」において、腐食環境が非常に良い中央アフリカのザンビア国を対象に耐候性鋼橋梁の普及促進を目指し、ザンビア国における現幹線道路と新道路ネットワークの腐食環境調査とザンビア国における耐候性鋼橋梁の維持管理方法と補修工法の提示を行う。

**環境が良い→耐候性鋼材が使える→既の実績有→その実績をわが国技術で良いさび証明・適した点検・補修方法提示→RDAに新規路線の環境調査・耐候性鋼材進める。**

2019年度

2020年度

2021年度

2022年度

## 1. 腐食環境調査準備・実施

- ・ Kafue橋の腐食環境調査のための外観調査, ACM設置, さびサンプル採取と組成分析
- ・ 暴露試験体の架台・試験体設置と暴露試験開始

## 2. 腐食環境調査継続とザンビア国の耐候性鋼橋梁の不具合調査と補修工法の検討

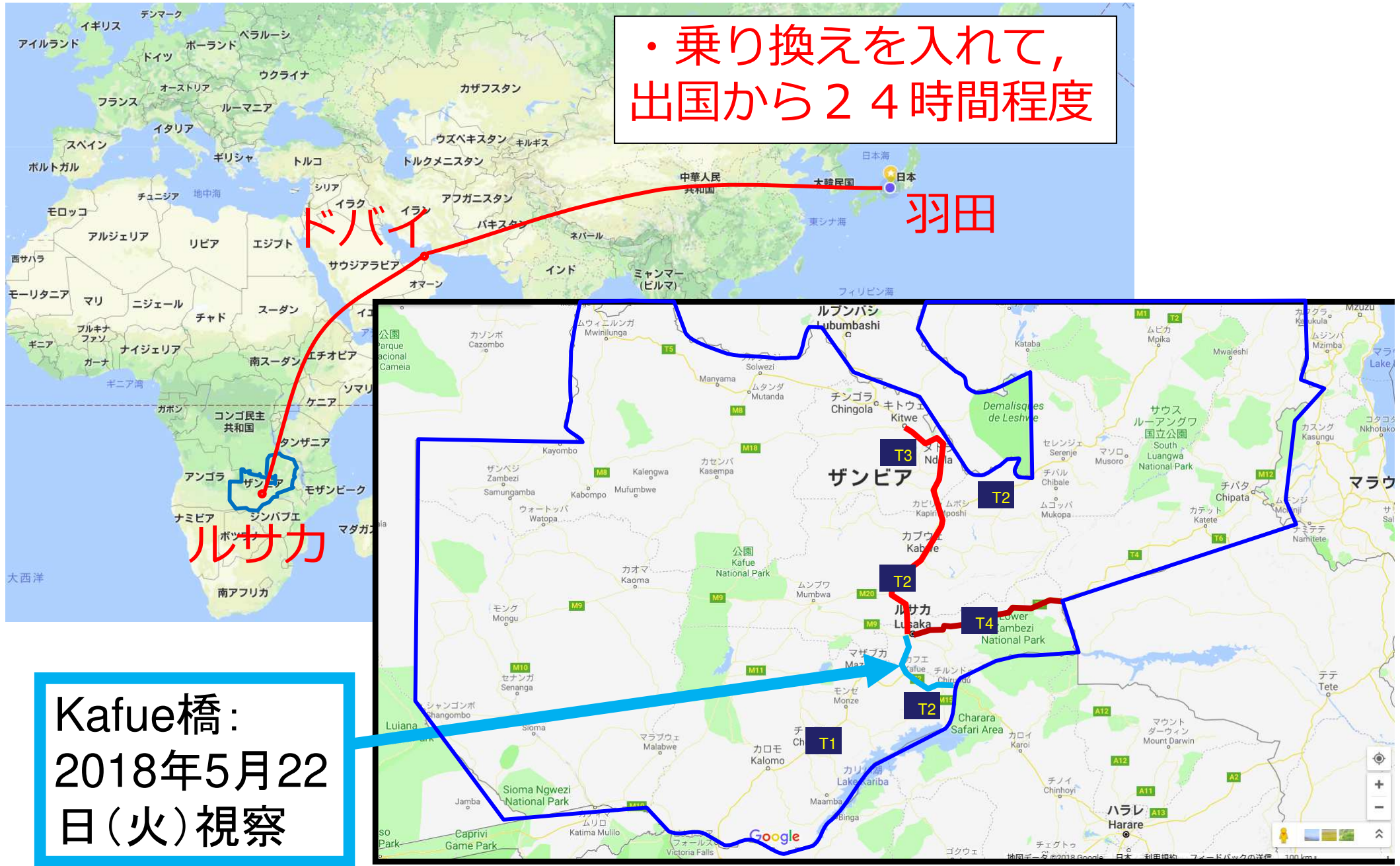
- ・ 暴露試験の継続と経過観察
- ・ RDAのヒアリングを通じた耐候性鋼橋梁適用の不具合調査
- ・ ザンビア国の耐候性鋼橋梁に適した新たな補修工法の提示と検証実験（実験室における要素試験と実橋梁を対象）

## 3. 腐食環境調査の取りまとめとザンビア国における耐候性鋼橋の適用のための維持管理法ならびに補修法の提案

- 若手教員・博士課程学生, 道路アセットマネジメント長期研修員プログラム研修生, 修士学生（博士課程進学予備軍）の海外渡航



# ザンビアの位置と腐食環境調査対象橋梁



# Kafue橋 1993年完成. 日本製鉄の耐候性鋼材使用

25年経過. 非常に健全.



# Kafue橋 1993年完成. 日本製鉄の耐候性鋼材使用

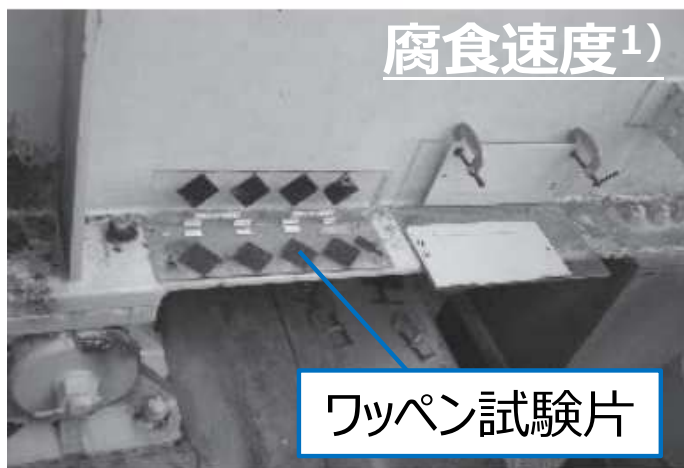


25年経過. 非常に健全→腐食だけでなく, そのうち, 疲労も要検討?

# ザンビア国渡航延期継続中：今後の進め方について

## 1. 腐食環境調査準備・実施（2021年度以降）

- 外観調査，さびサンプル採取/分析，環境調査用試験片/ACMセンサ等設置．
- 渡航困難のため，計測機器等をザンビア国へ郵送し，計測開始予定 **（ザンビア大学了承→RDA調整中．ただし盗難に注意）**



## 2. ザンビア国の耐候性鋼橋梁の不具合調査と補修工法検討（2020-2022年度）

- 国内耐候性鋼橋梁の適用の現状，設計，維持管理，並びに耐候性鋼橋梁の不具合に関する調査のため，道路管理者であるRDAにヒアリングを実施．
- ザンビア国の耐候性鋼橋梁に適した新たな補修工法の提示，ザンビア大学と連携した検証実験．

## 3. 腐食環境調査取りまとめと維持管理法・補修法提案（2022年度）

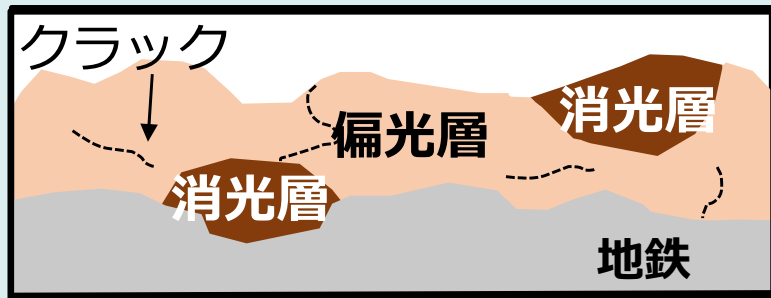
1) 玉城喜章，下里哲弘，田井政行，淵脇秀晃，平良博孝：亜熱帯島しょ環境の沖縄地域での海塩粒子飛来環境下における鋼桁橋の洗浄効果に関する研究，鋼構造論文集，2019.

2) 岩崎英治，鹿毛勇，加藤真志，中西克佳，丹羽秀聡：耐候性鋼橋梁の断面部位別の腐食特性とその評価に関する一考察，土木学会論文集A，2010.

3) 鈴木啓悟，吉田翔太，佐々木栄一，竹谷晃一，前田健児，近藤泰光：海岸部に位置する橋梁の腐食環境モニタリングと統計的腐食因子分析，土木学会論文集A2，2016.

# 耐候性鋼さび層断面の組成分析の高度化

## 普通鋼材



## 耐候性鋼材

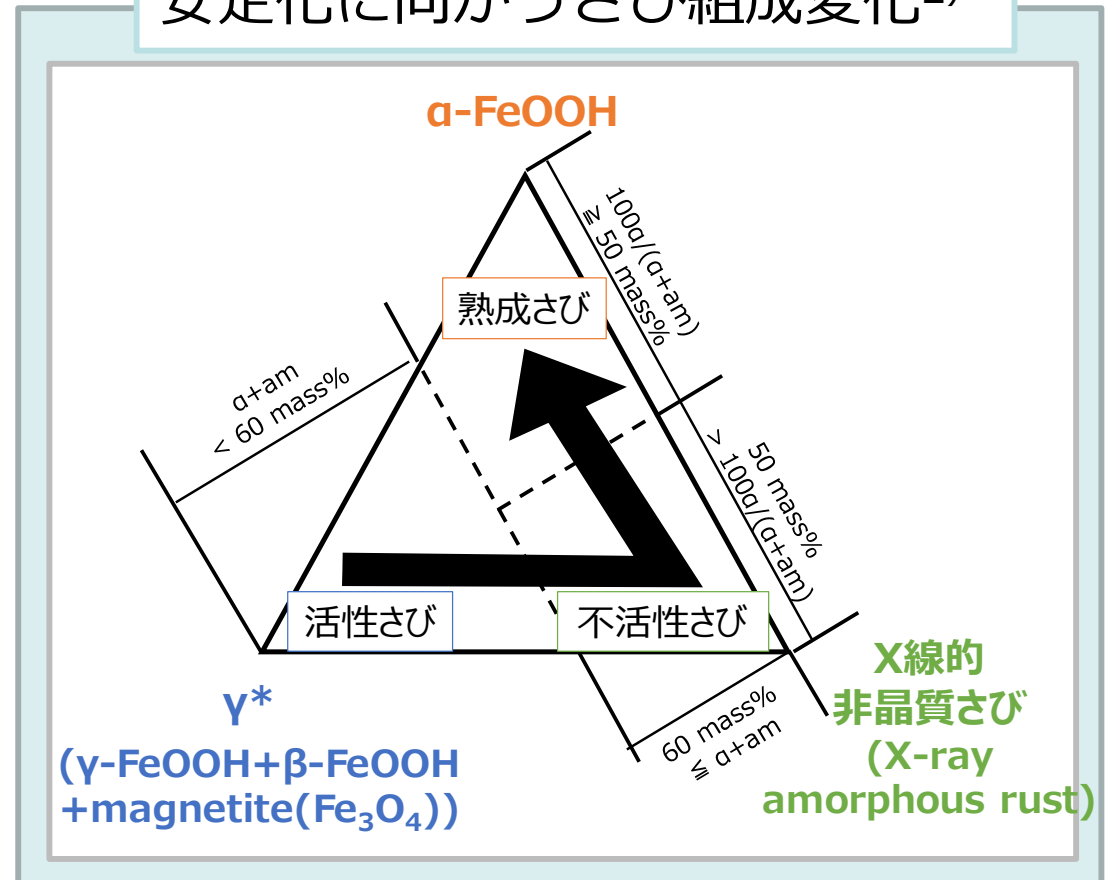


- 二層構造（外層が偏光層，内層が消光層）
- 内層が高い環境遮断，防食性を発揮.

### 大気腐食環境下で生成される主なさび<sup>1)</sup>

- **$\alpha$ -FeOOH**  
…化学的に不活性（安定）熟成さび
- **$\gamma$ -FeOOH**  
…化学的に活性，他のさびに変化しやすい.
- **$\beta$ -FeOOH**  
…化学的に活性，他のさびに変化しやすい. 生成環境に塩化物が存在すると生成される.
- **$\text{Fe}_3\text{O}_4$**   
…単体では腐食反応を促進しないが， $\beta$ -FeOOHや $\gamma$ -FeOOHと混在すると腐食を促進

### 安定化に向かうさび組成変化<sup>2)</sup>



1) 紀平ら：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集No.745，2003.

2) 三木ら：現代の橋梁工学，数理工学社，2004.

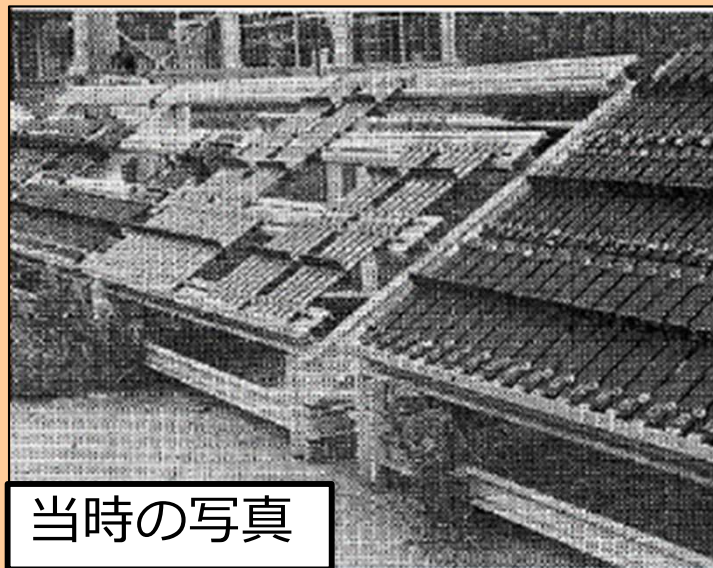
# 耐候性鋼さび層断面の組成分析の高度化

保護性さび層の生成メカニズムについて、これまでに四半世紀（25年）経過した耐候性鋼材については示されてきているものの、そのさび層に関するデータ自体が少ない。

→数年でのアモルファス層形成後、アモルファス層が四半世紀の間に、Crが濃化した $\alpha$ -FeOOHを主体とする保護性さび層への変化。

→Kafue橋も25年経過。25年以上経過したさび層に関する分析が必要。Kafue橋については、アフリカでの事例として、貴重なデータとして今後期待される。

ここでは、大気暴露期間41年の耐候性鋼のさび層断面を組成分析実施  
→山田健太郎名古屋大学名誉教授らが1977年から暴露試験を実施。

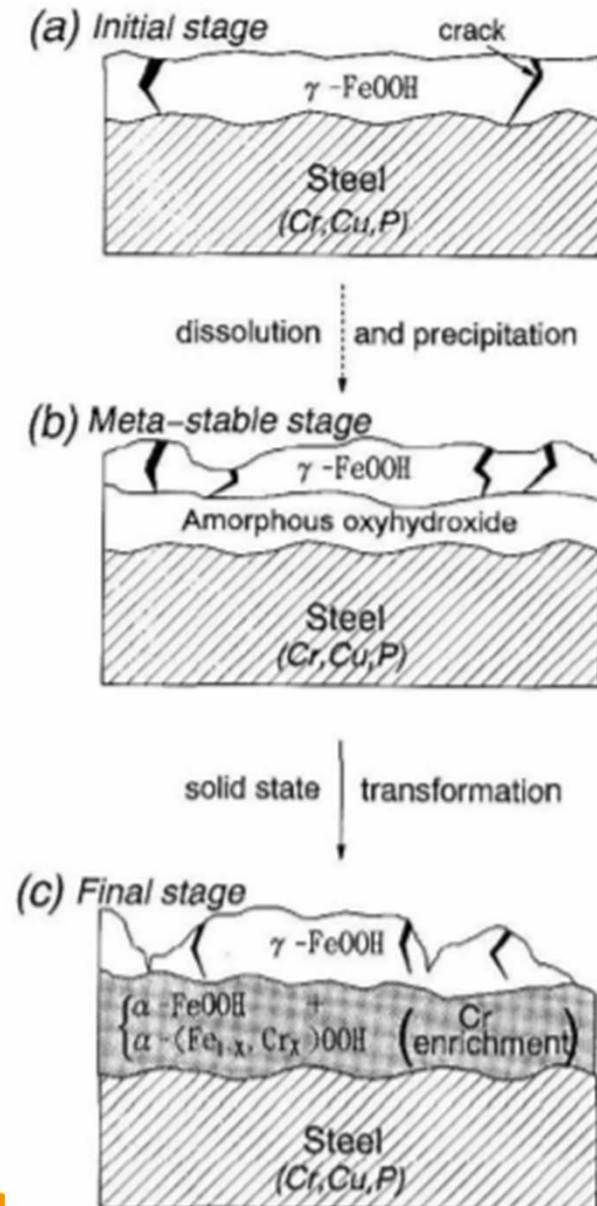


当時の写真

## 四半世紀経過した耐候性鋼材さび層

2) Kihira et al, 2003    3) Okada et al. 1969

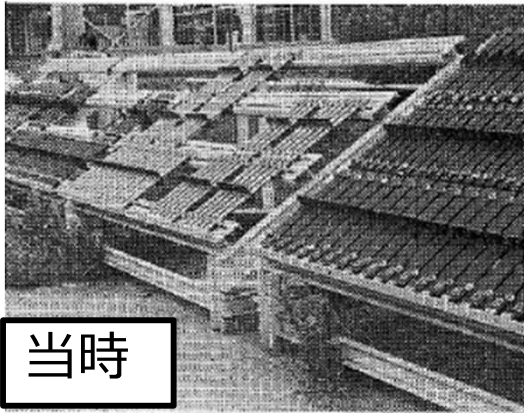
4) Misawa et al. 1994



# 大気暴露期間41年(現在)の耐候性鋼溶接継手の活用

## これまでの試験【41年】

- 期間：1977年～2018年
- 場所：トピー工業



当時

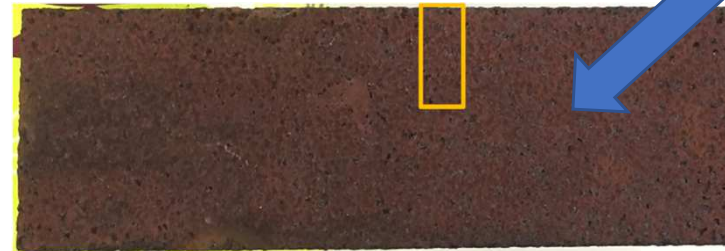
## これからの試験【+60年】

- 期間：2018年～2077年  
+約60年行い，合計100年目標
- 暴露に用いられた架台は再利用
- 場所：施工技術総合研究所  
瀧上工業



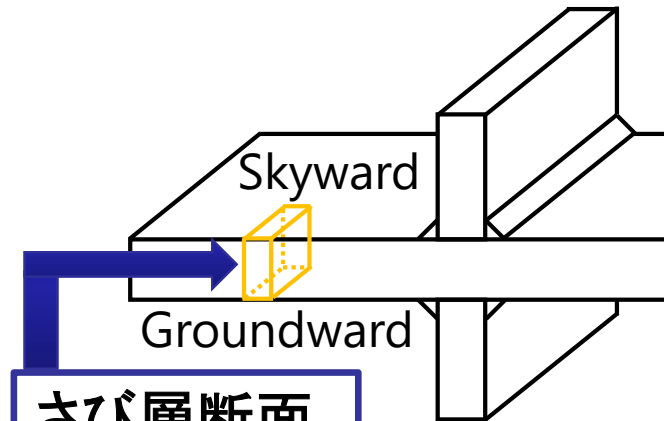
## 耐候性鋼試験体【41年】

### Skyward surface

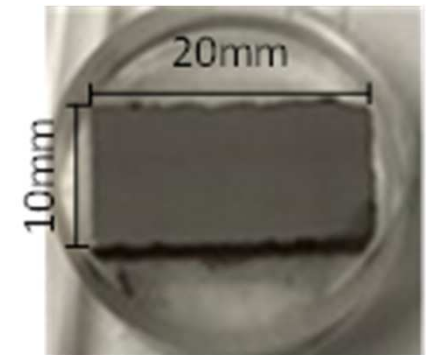


Dense rust

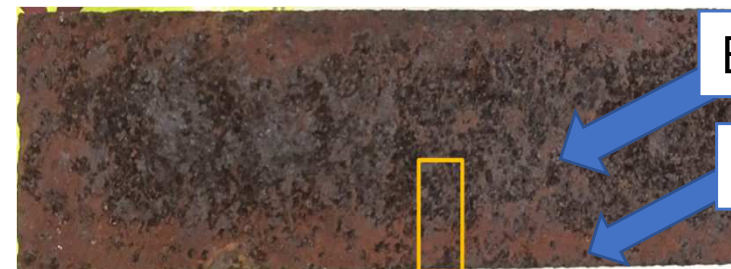
### The cross-section of the specimen



### さび層断面



### Groundward surface



Bigger rust

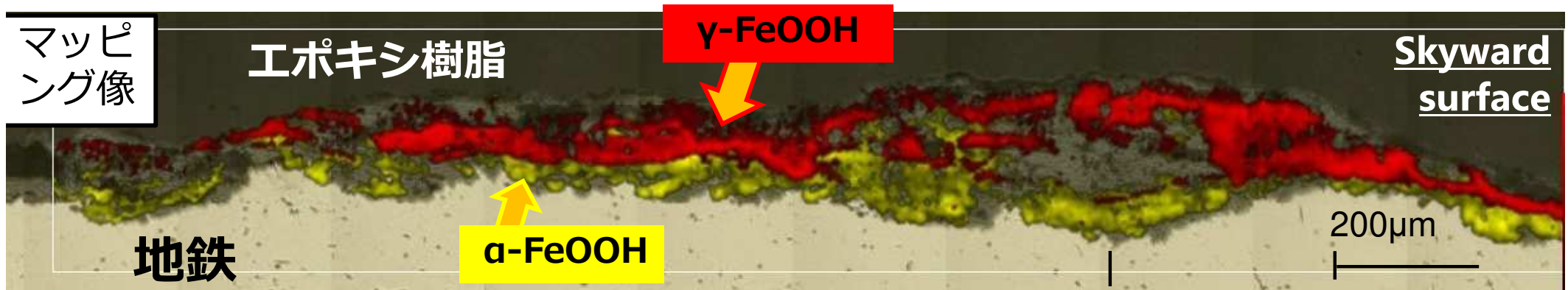
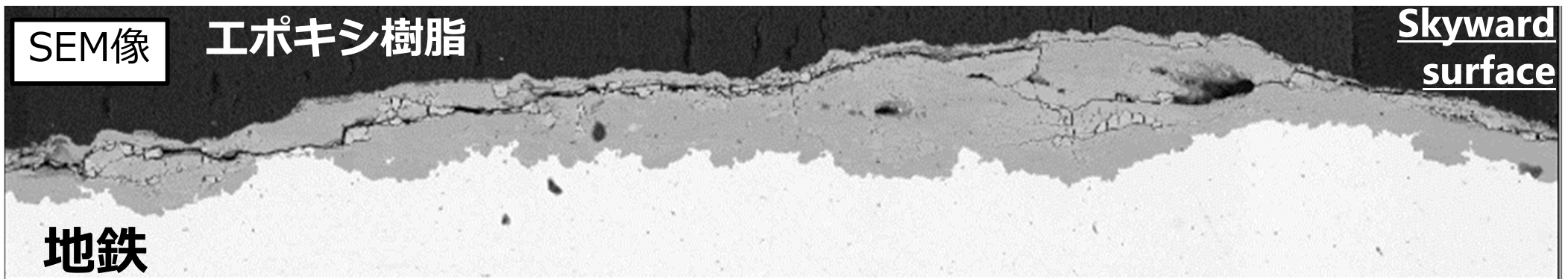
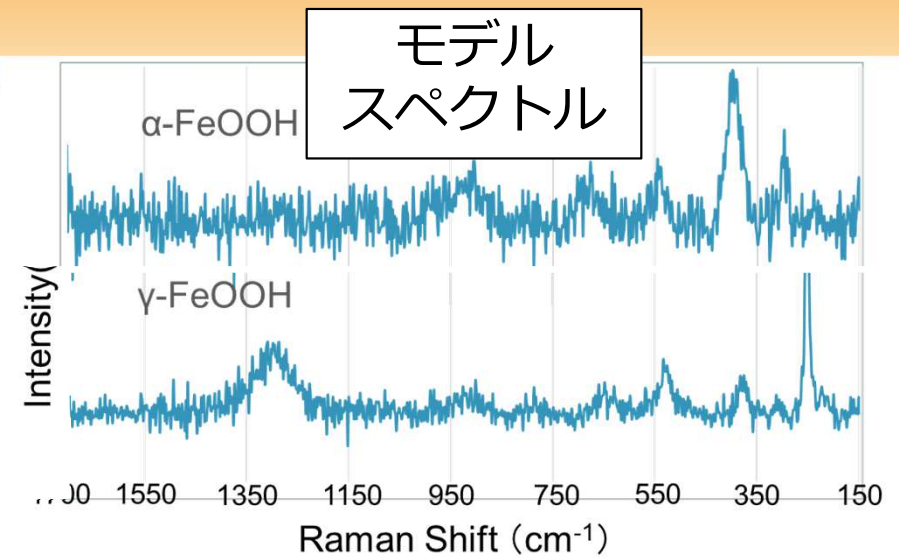
Dense rust

- 1) 山田ら，大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ，土木学会論文報告集，1983.9
- 2) 近藤ら，25年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労強度，土木学会論文集，2007.7
- 3) 近藤ら，10年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，1994.4

# さび層断面の組成分析

## ラマン分光光度計によるマッピング分析

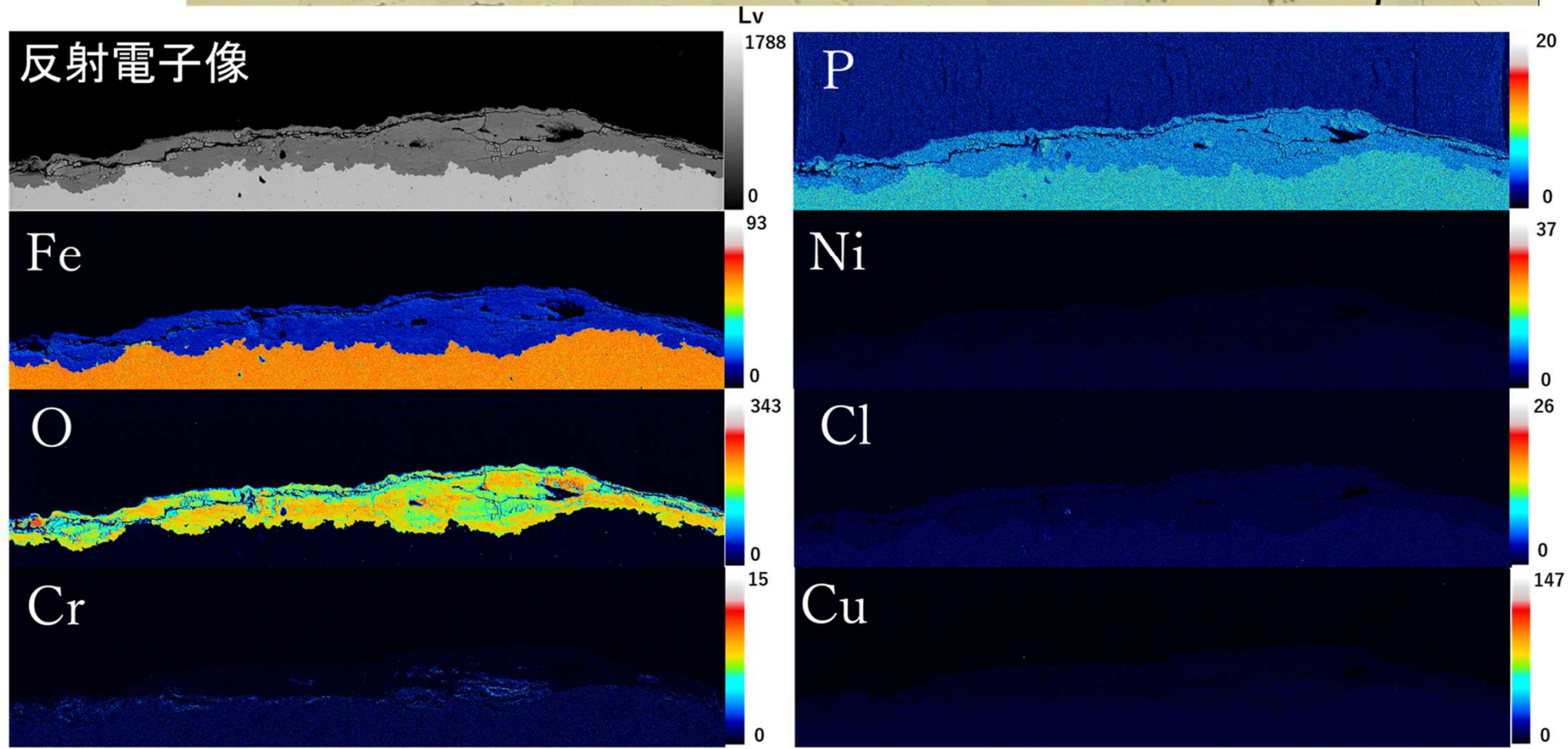
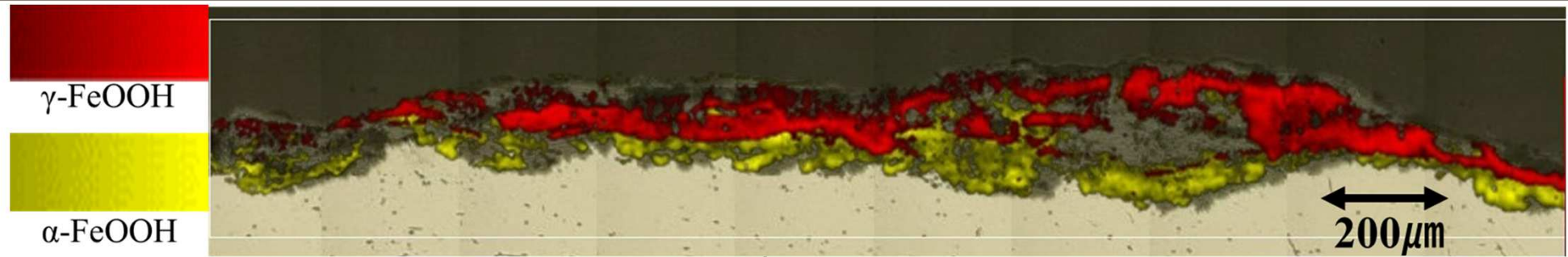
大気暴露期間41年の耐候性鋼のさび層断面を2.5 $\mu\text{m}$ ごとに約7万点測定（2日半）。各点で得られた波形と、波形が特徴的な $\alpha$ 、 $\gamma$ -FeOOHのモデルスペクトルとを比較し、各組成の存在箇所を判定



$\alpha$ -FeOOHが内層側， $\gamma$ -FeOOHが外層側に分布



# さび組成と元素分布の比較

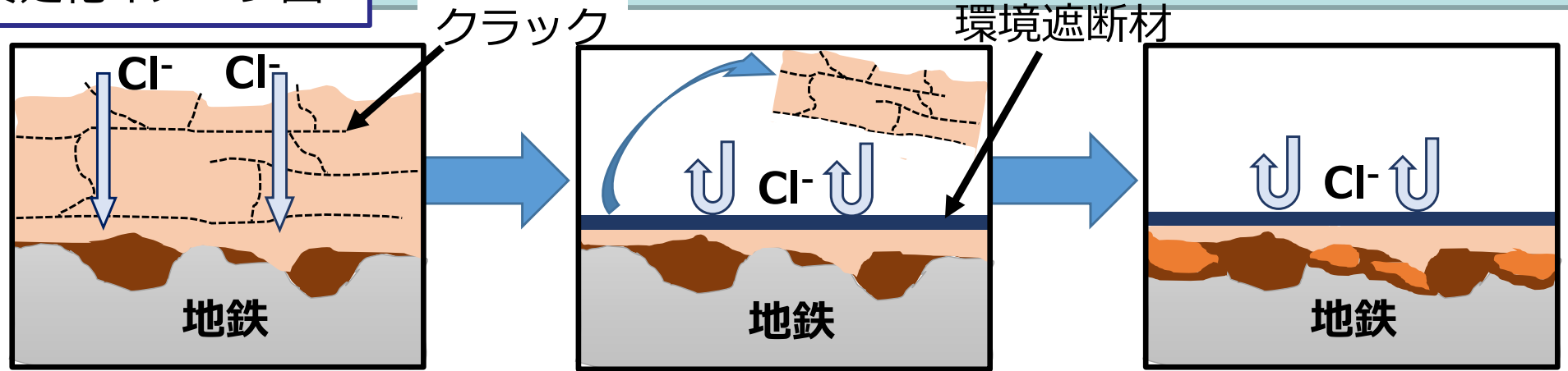


地鉄付近さび層クラック無の緻密層.  $\alpha$ -FeOOH層にCrの濃化が確認. 地鉄付近にCl無.  
 $\alpha$ -FeOOHが内層側,  $\gamma$ -FeOOHが外層側に分布→四半世紀の結果と一致

※日本鋼構造協会・テクニカルレポートの一部として掲載済. その後, 論文投稿中.

# 耐候性鋼材の補修工法の検討:さびの安定化特性を利用

さび安定化イメージ図



<b>活性さび</b> $\beta$ -FeOOH $\gamma$ -FeOOH $Fe_3O_4$	<b>不活性さび</b> X線的非晶質さび <b>熟成さび</b> $\alpha$ -FeOOH
---	--

- ①層状剥離さび除去
- ②環境遮断材

- ①さびの不活性化  
腐食速度の低下
- ②保護性さびの再生

異常腐食さびの生成

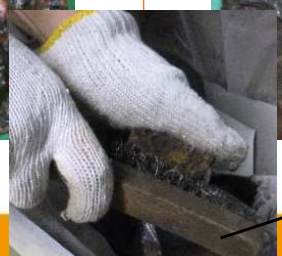
浮きさびの除去

環境遮断材貼付け

試験再開



36サイクル



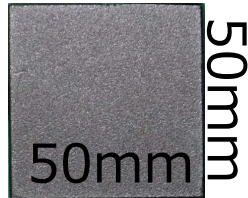
ワイヤーブラシ

## 試験体

・普通鋼

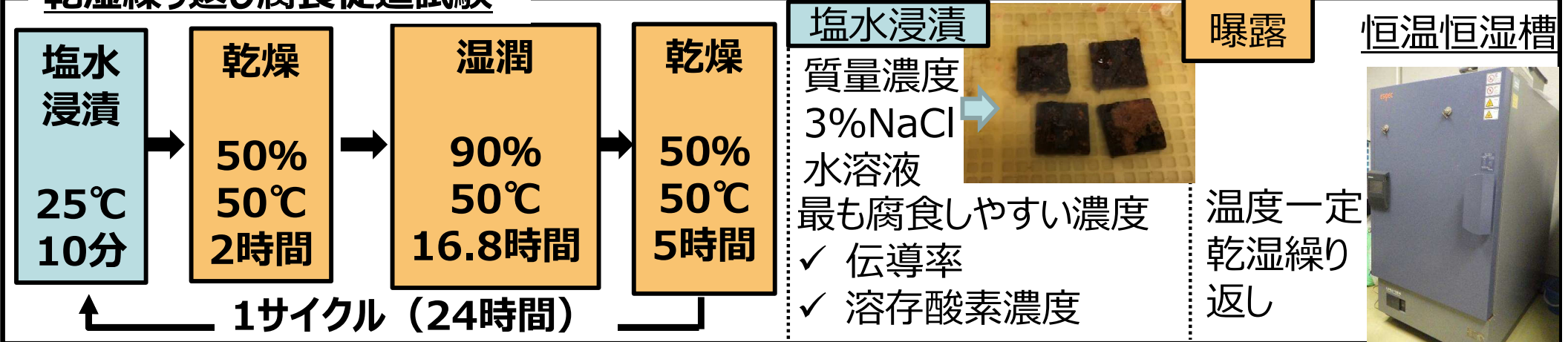
・耐候性鋼

JIS-SMA  
1%ニッケル高耐候性鋼  
3%ニッケル高耐候性鋼



化学成分	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)
普通鋼	0.17	0.33	1.43	0.015	0.005				
JIS-SMA	0.11	0.18	0.66	0.011	0.004	0.32	0.48	0.13	0
1%ニッケル高耐候性鋼	0.1	0.2	0.92	0.013	0.001	0.77	0.06	1.2	0.02
3%ニッケル高耐候性鋼	0.06	0.2	0.5	0.013	0.001	0.38	0.06	3.01	0.01

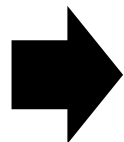
## 乾湿繰り返し腐食促進試験



## さび層断面観察用試験体の製作

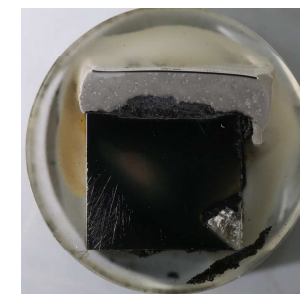
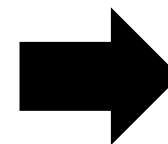


①切断



②エポキシ樹脂に埋め込み

研磨



## 元素分布：電子線マイクロアナライザ（EPMA）

加速電圧：15kV

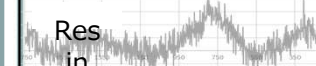
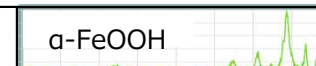
サンプリング時間：10.0ms

検出信号：反射電子, Fe, O, P, Ni, Cr, Cu, Cl

\* 322サイクルは、構造分析にのみ焦点を当てて断面観察を行ったため、検出信号を反射電子, Fe, O, Clのみ検出した。



## モデルスペクトル



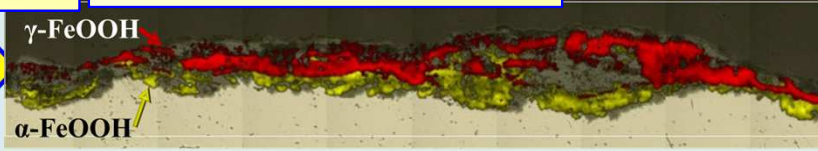
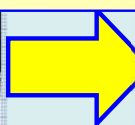
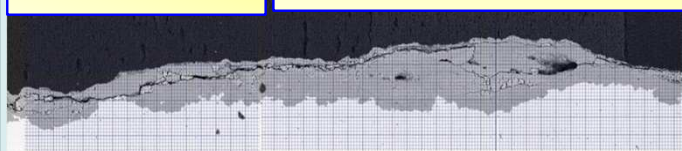
## 組成分布：ラマン分光光度計によるマッピング分析

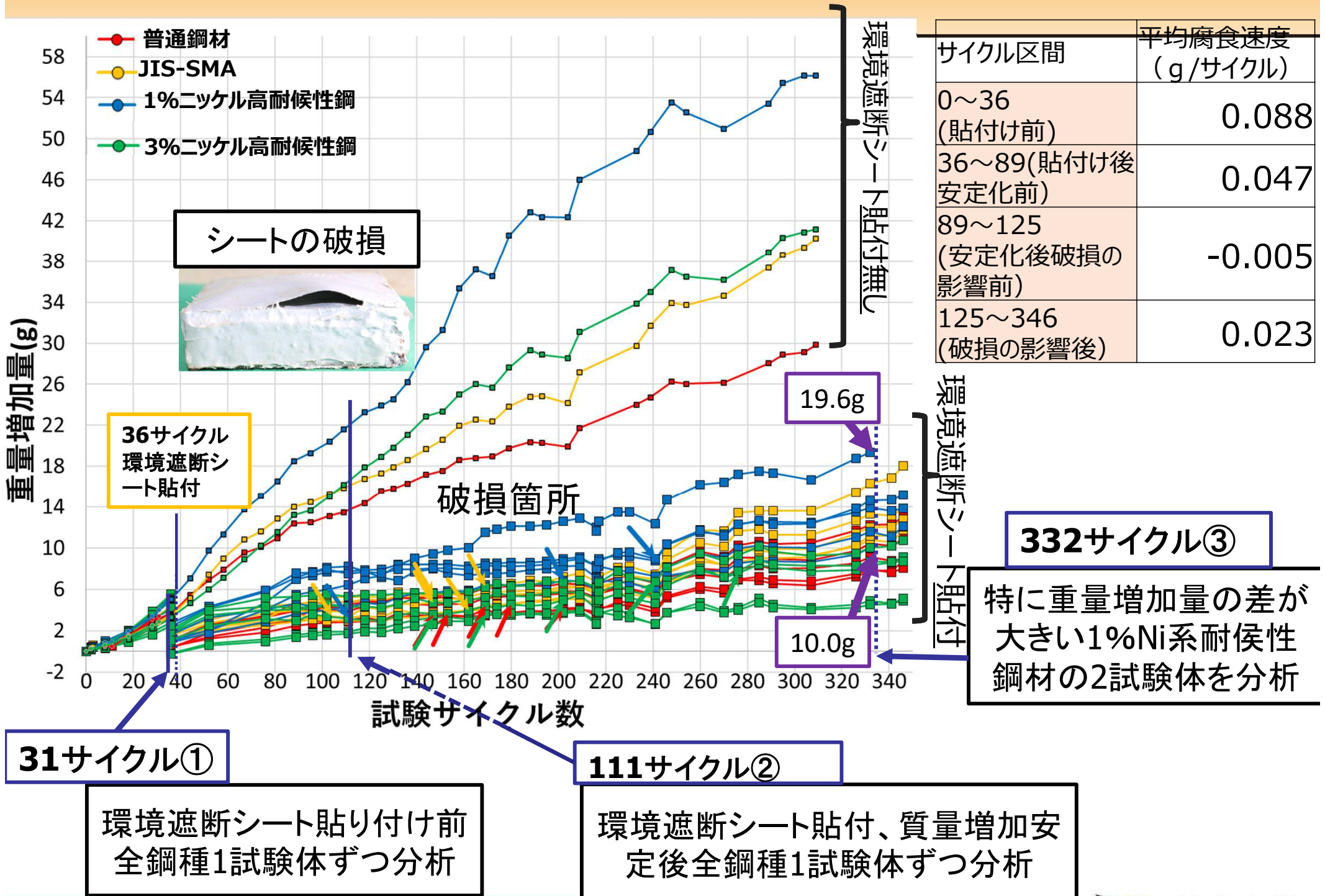
さび層断面を2.5μmごとに測定する。各点で得られた波形とモデルスペクトルとを比較することによって、各組成の存在箇所を判定する。

波形取得

各ピクセル毎に組成を判定

組成分布図の作成





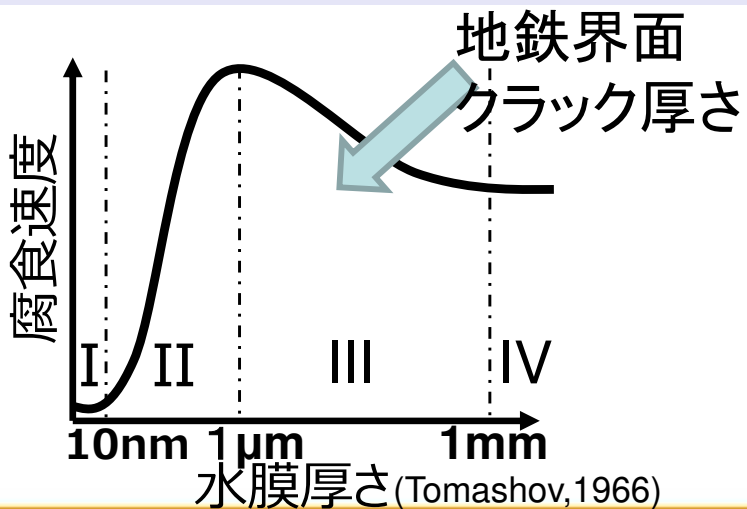
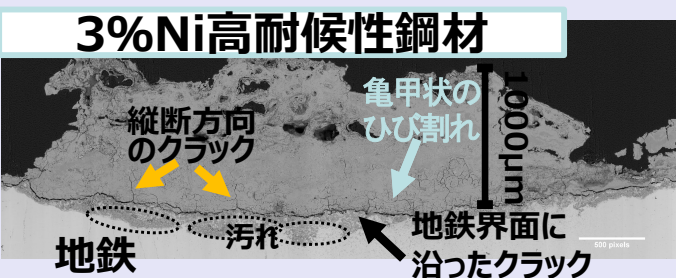
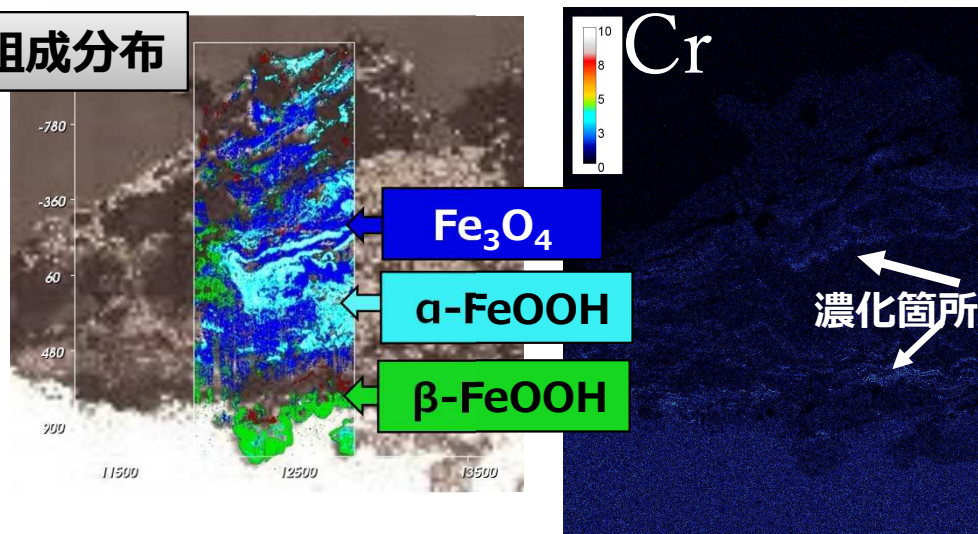
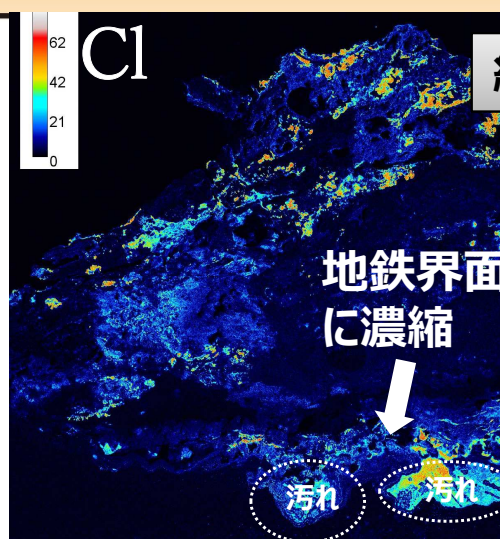
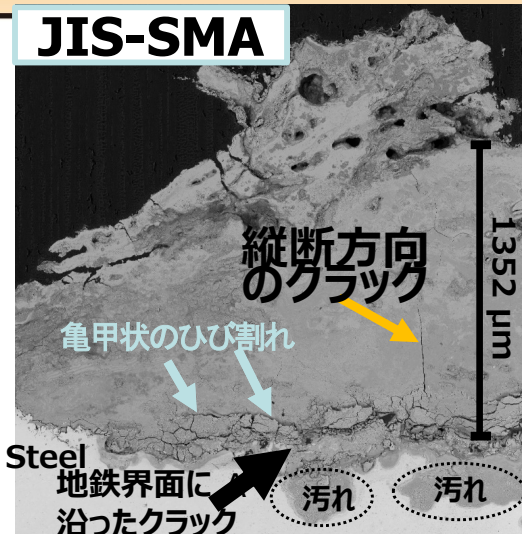
**31サイクル①**

環境遮断シート貼り付け前  
全鋼種1試験体ずつ分析

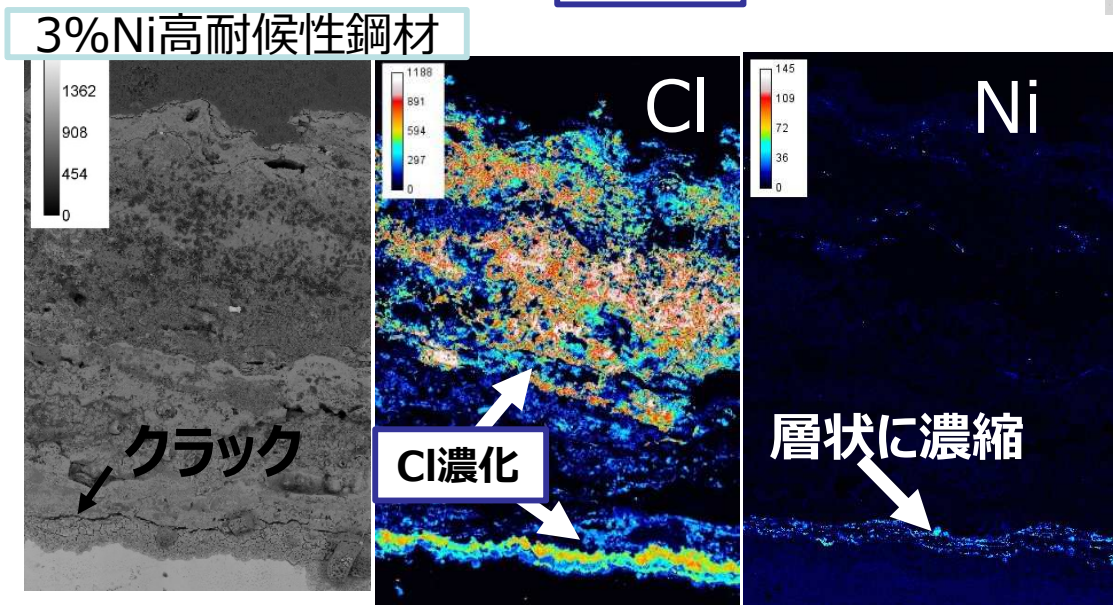
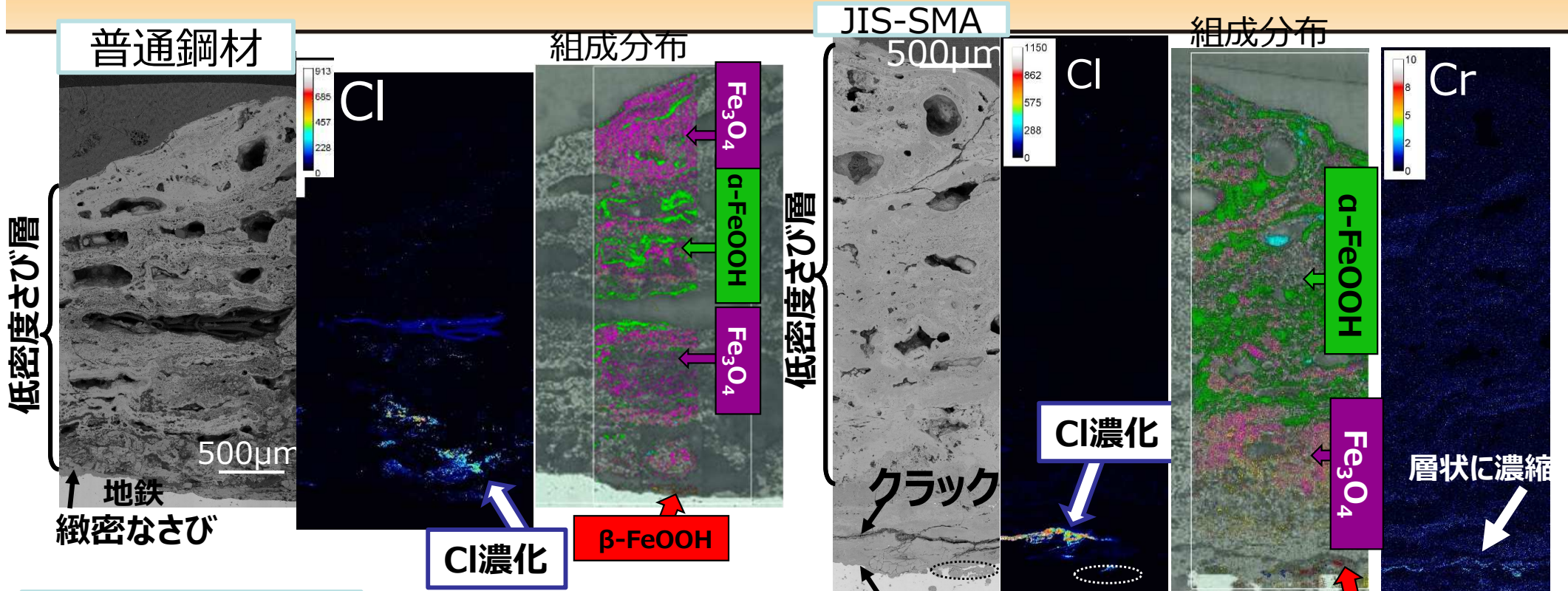
**111サイクル②**

環境遮断シート貼付、質量増加安定後全鋼種1試験体ずつ分析

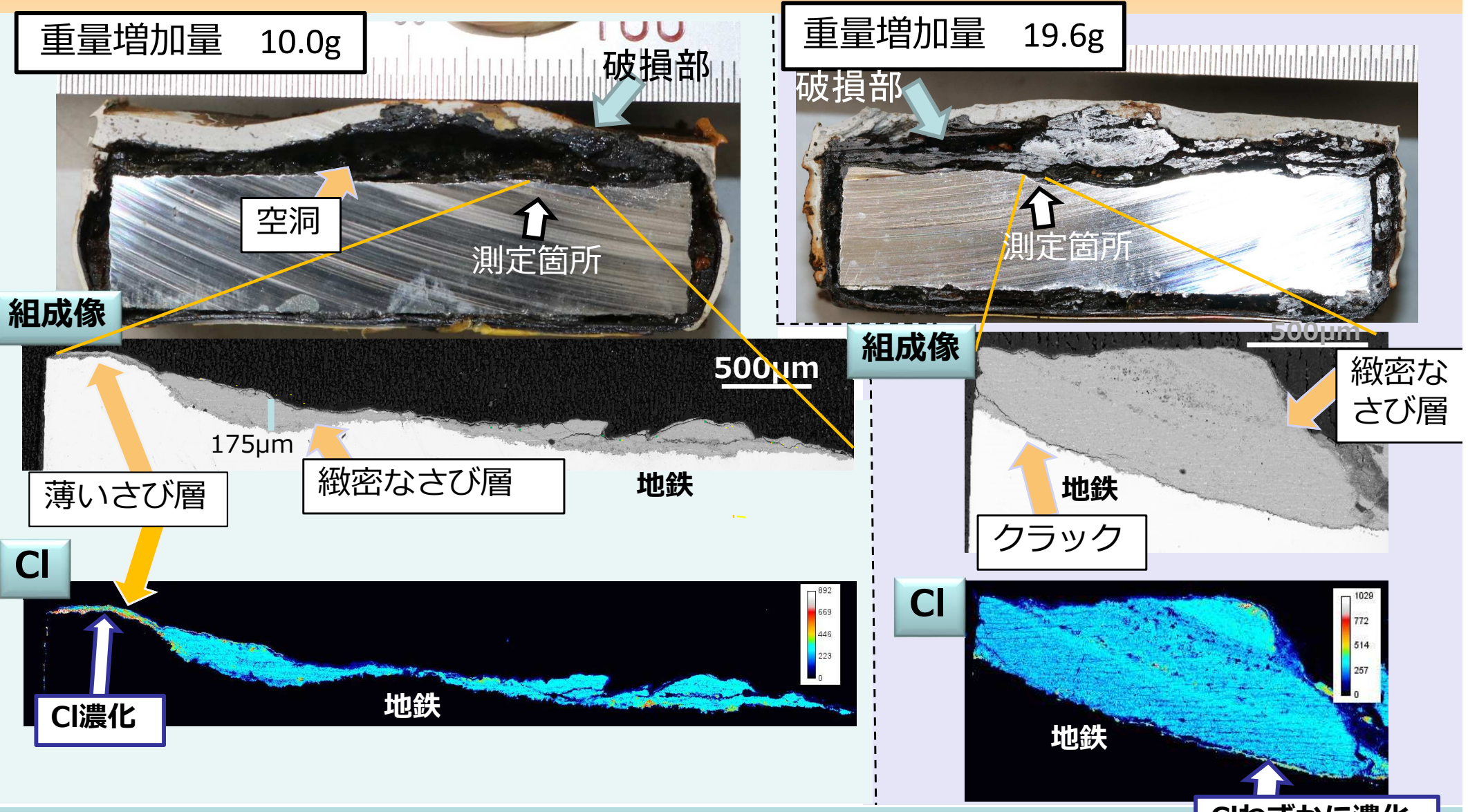
**332サイクル③**  
特に重量増加量の差が大きい1%Ni系耐候性鋼材の2試験体を分析



- ・地鉄界面に腐食の進行を助長する水膜を形成するクラック
- ・Cl地鉄界面に濃縮
- ・耐候性鋼材においてCr, Niが中層部でわずかに濃化



- JISや普通鋼で地鉄界面に緻密なさび層がみられ、Clの濃化が見られなかった。
- さび層の中・上層部に $\alpha$ -FeOOH, 下層部に $Fe_3O_4$ が分布.  $\beta$ -FeOOHはCl濃縮部, クラック部でのみわずかに見られた。
- $Ni, Cr$ が層状に地鉄界面に濃縮



- 遮断されてた試験体では、中層部が脆弱化していた
- 地鉄界面で緻密なさび層が見られた。
- 環境遮断シートの破損によりClが侵入し、緻密なさびの薄いところから地鉄に侵入していた。



# 今後の研究活動予定：本日の中間報告

## 1. 腐食環境調査準備・実施（2021年度）

- 外観調査，さびサンプル採取/分析，環境調査用試験片/ACMセンサ等設置.
- 渡航困難のため，計測機器等をザンビア国へ郵送または持参し，計測開始予定  
**（ザンビア大学は了承→RDA調整中．ただし盗難に注意）**
- **耐候性鋼橋梁腐食環境の調査に向けたさび組成分析手法の高度化**  
日本と環境が大きく異なるザンビア国に建設された耐候性鋼橋（Kafue橋）の腐食状況調査，並びに耐候性鋼暴露試験に向けて，まず耐候性鋼材の腐食状況をより詳細に明らかにするために，耐候性鋼上に生成したさび層の組成分布を観察する方法を発展させた.

## 2. ザンビア国の耐候性鋼橋梁の不具合調査と補修工法検討（2020-2022年度）

- 国内耐候性鋼橋梁の適用の現状，設計，維持管理，並びに耐候性鋼橋梁の不具合に関する調査のため，道路管理者であるRDAにヒアリングを実施.
- ザンビア国の耐候性鋼橋梁に適した新たな補修工法の提示（**補修工法の検討**）  
従来わが国では耐候性鋼橋の異常腐食の補修工法として，主に塗装が行われているが，塗装を用いずに異常腐食部の環境を変化させることで，耐候性鋼材の緻密なさびを再生成させる新たな補修工法の検討を行った.

## 3. 腐食環境調査取りまとめと維持管理法・補修法提案（2022年度）

**（残りの期間は，試験継続と遠隔で進めたいと考えている）**