

橋梁メンテナンス教育・技術の国際展開の取組と 次世代への継承・発展



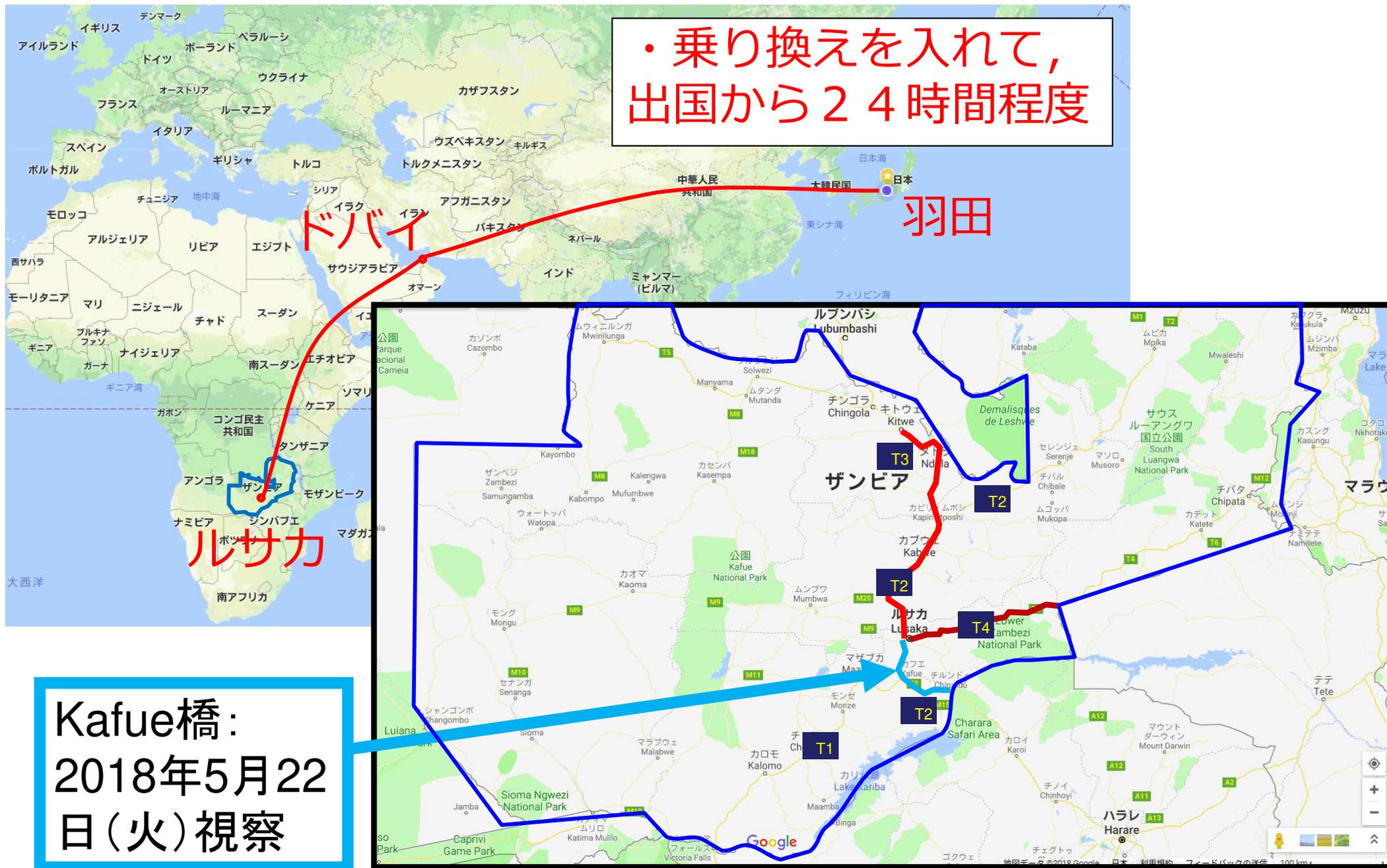
岐阜大学工学部
社会基盤工学科 防災コース 准教授
岐阜大学工学部附属
インフラマネジメント技術研究センター 国際展開領域長
木下 幸治

- 橋梁メンテナンス教育・技術の国際展開の取組
 - JICAザンビアプロジェクトを通じた国際展開
 - JICA留学生制度を通じた国際展開
- 次世代への継承・発展
 - 耐候性鋼暴露100年試験について
 - 岐阜大学での構造系博士課程学生育成の取組について

ザンビア国におけるJICA技術プロジェクト実施経緯

- SIPとJICAが「道路アセットマネジメント」技術の海外展開実施に関わる覚書締結（平成29年10月）
- SIPインフラ-JICA連携道路アセットマネジメントに関する留学生事業に関する岐阜大学との意見交換会（平成29年11月）
- JICA ザンビア国における橋梁維持管理能力向上プロジェクトフェーズII「詳細計画策定調査団」参团打診（平成30年2月）
- JICA ザンビア国における橋梁維持管理能力向上プロジェクトフェーズII「詳細計画策定調査団」へ参团（平成30年5月19日から30日 六郷特任教授と木下の2名）。
- ザンビア大学を訪問。幹線道路管理者RDAとザンビア大学とのMOUにおける技術者教育に関する確認、先方より岐阜大学とのMOU締結についての打診、ならびに橋梁維持管理に関するセンター立ち上げへの協力要請。

ザンビアの位置



Kafue橋：
2018年5月22
日(火)視察

ザンビア大学 (University of Zambia)

- 1) 設置年度：1965年
- 2) 設置形態：国立
- 3) 相手機関の学部等の構成

Schools : Agricultural Sciences, Education, Engineering, Graduate School of Business, Health Sciences, Humanities and Social Sciences, Law, Medicine, Mines

Natural Sciences, Nursing Sciences, Public Health, Veterinary Medicine

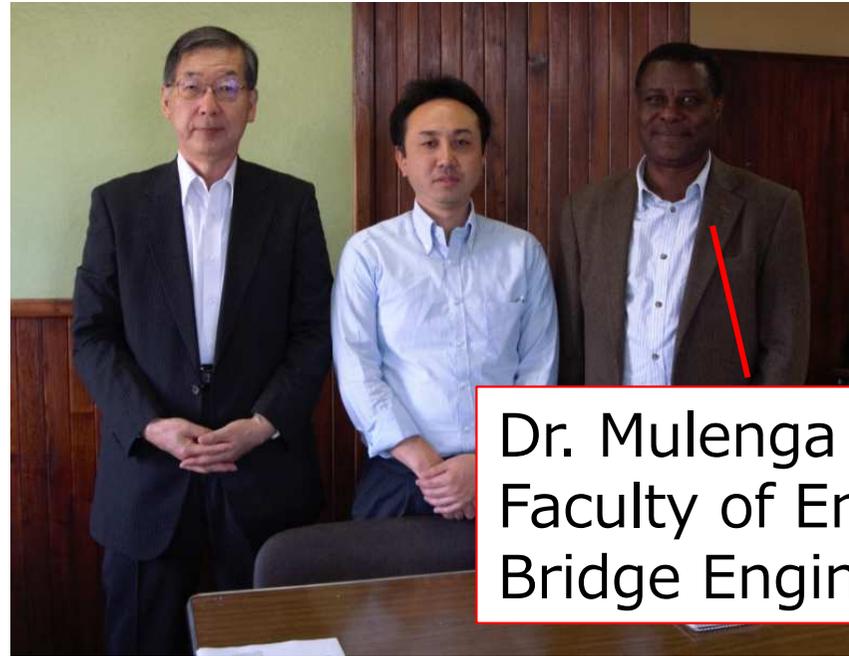
Institutes : Confucius, Distance Education, Institute of Economic and Social Research

- 4) 職員数 教員 約800人, その他 約1900人
- 5) 学生数 (学部・大学院) 約31000人
- 6) その他 (参考)

我が国の大学の内、北海道大学、三重大学、同志社大学がザンビア大学とInternational Agreement and Partnership を締結している。特に、北海道大学は、ザンビア共和国を中心とした南部アフリカにおける人獣共通感染症病原体の疫学調査のための活動拠点として、2007年に「ザンビア大学獣医学部内に人獣共通感染症リサーチセンターのザンビア拠点」を設置し、さらに、2012年にはザンビア大学内にHokkaido University Africa Office in Lusakaを設置している。



ザンビア大学訪問 : 2018/5/23と/5/28



Dr. Mulenga : Dean of Faculty of Engineering
Bridge Engineer



Dr. Shikabonga
橋梁振動計測
に興味有

ザンビア大学訪問：5/23 実験室視察

構造実験試験機



アスファルト舗装系試験機



水処理系実験室



構造系設備，特にインフラ維持管理に関しては，改善の必要有

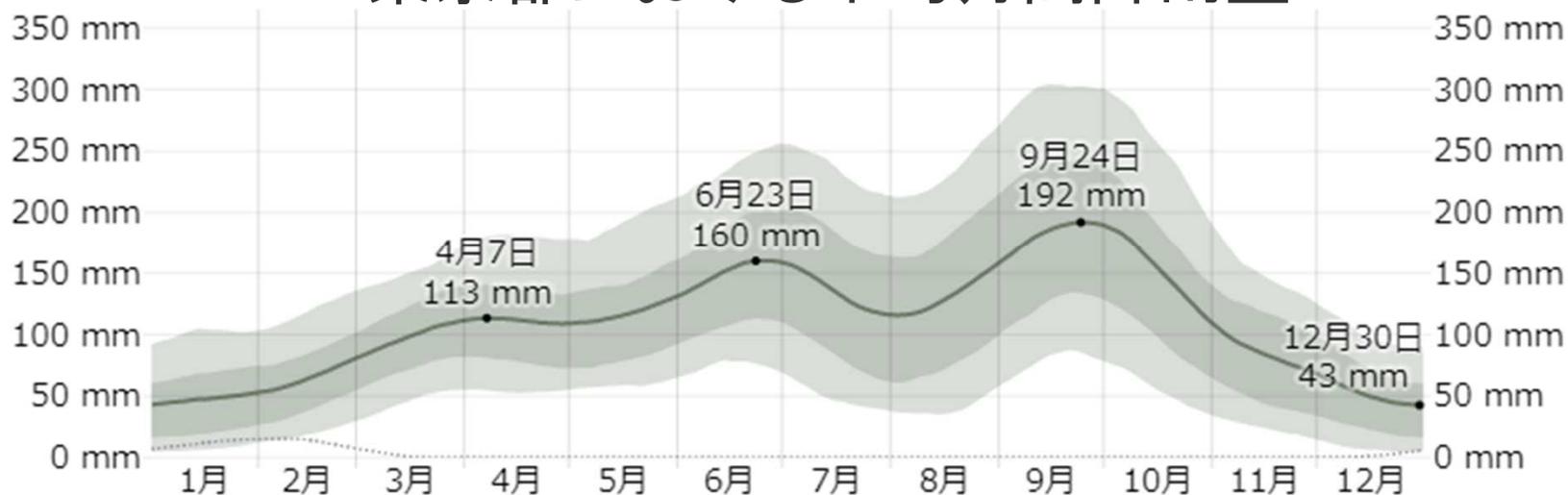
Kafue橋 1993年完成. 日本製鉄の耐候性鋼材使用



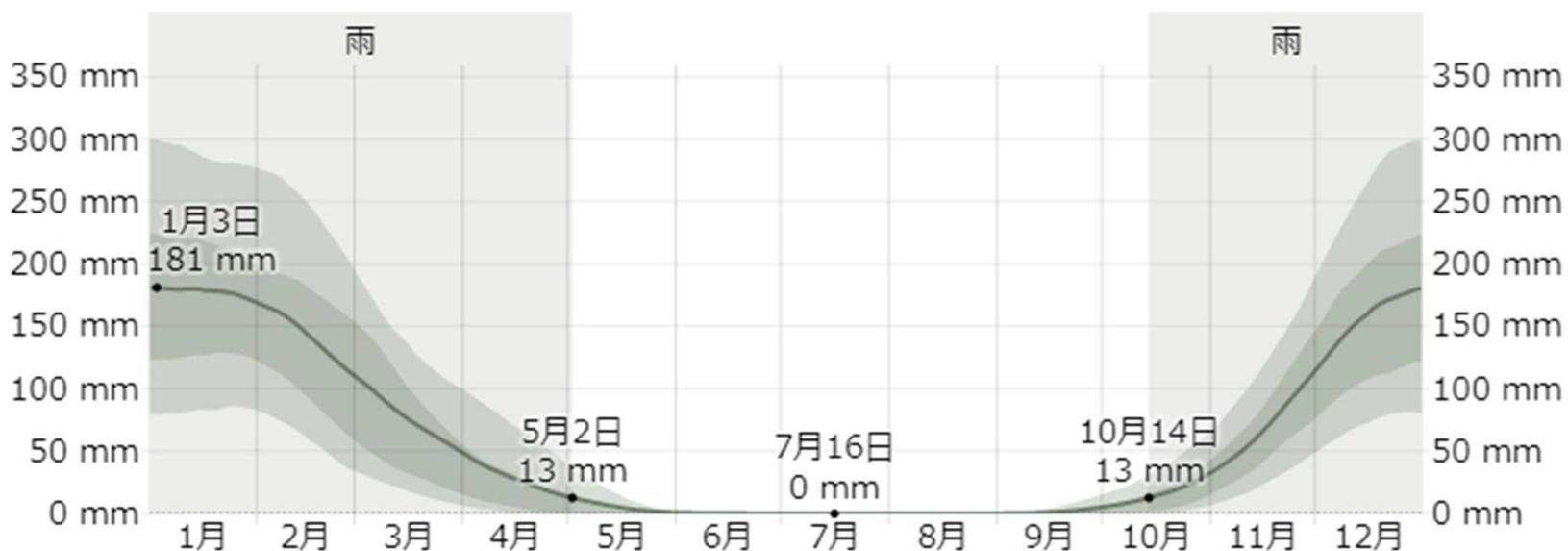
25年経過. 非常に健全.

ザンビア国の平均月間降雨量

東京都における平均月間降雨量



ルサカにおける平均月間降雨量



- 年間を通じて、降雨量が少ない乾燥している期間が長い。

Kafue橋 1993年完成. 日本製鉄の耐候性鋼材使用



25年経過して非常に健全ではあるが，腐食だけでなく疲労も要検討？

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、 橋梁日常維持管理 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、 橋梁補修 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、 橋梁点検 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。



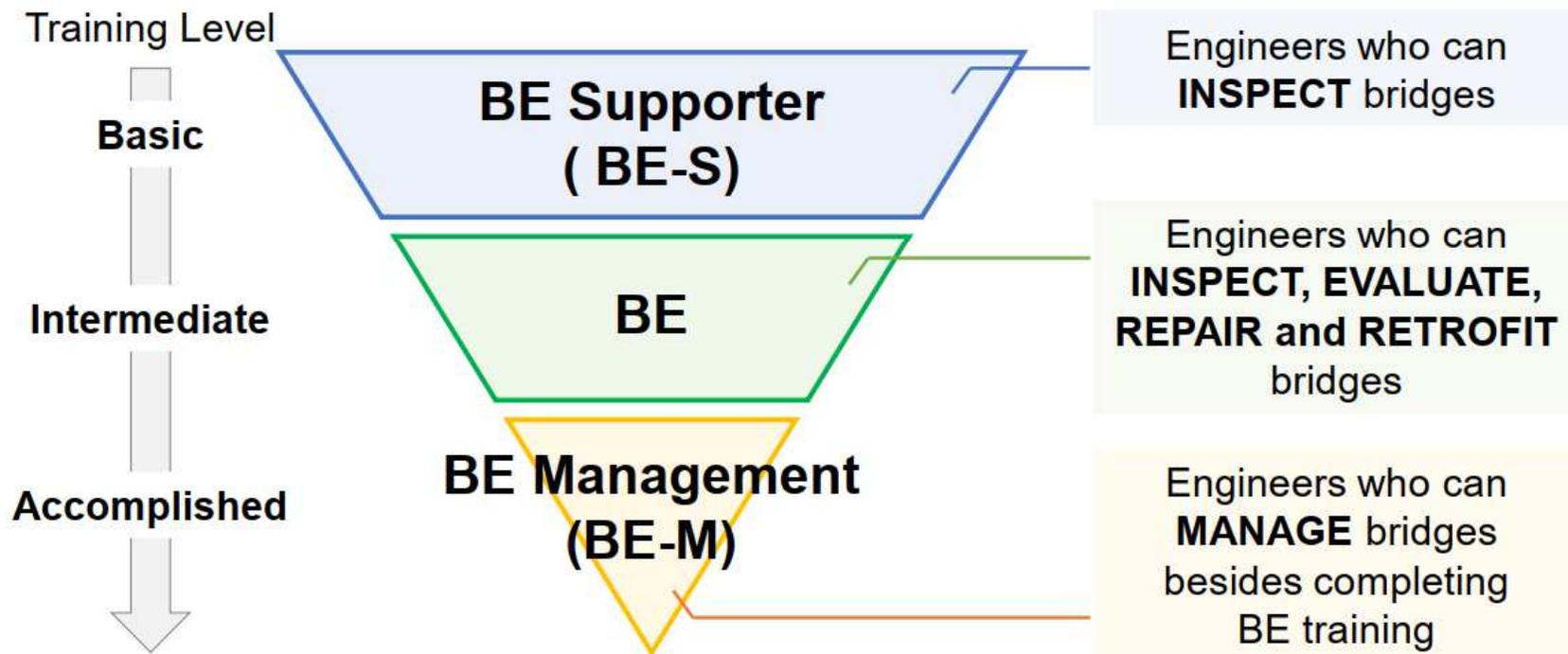
ザンビア国への橋梁維持管理エキスパート養成講座の国際展開

Overview of **Bridge Experts Training Unit (BE)**

1

... A platform for the Sustainable Human Resource Development in Zambia

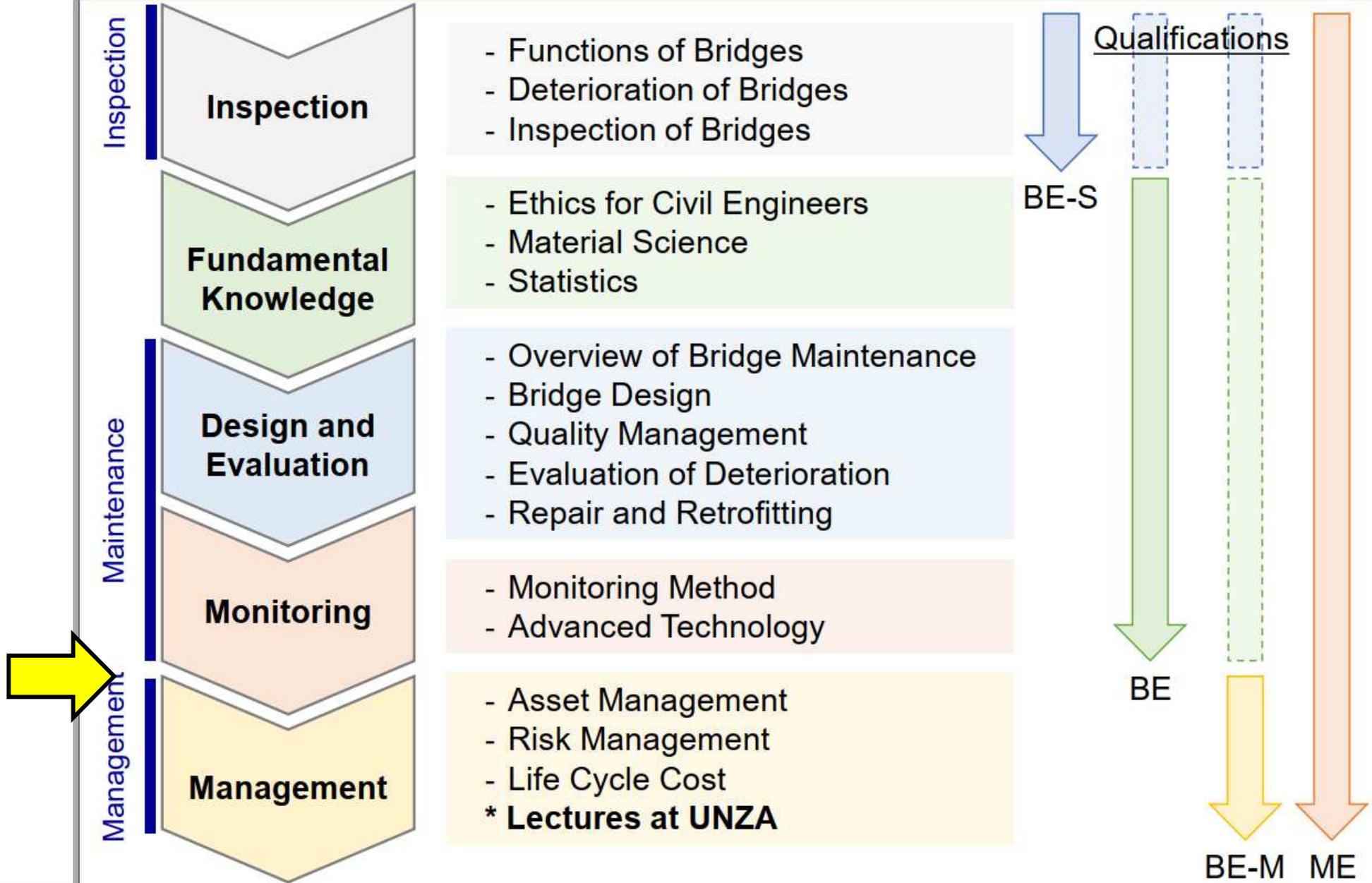
Training Unit Structure



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

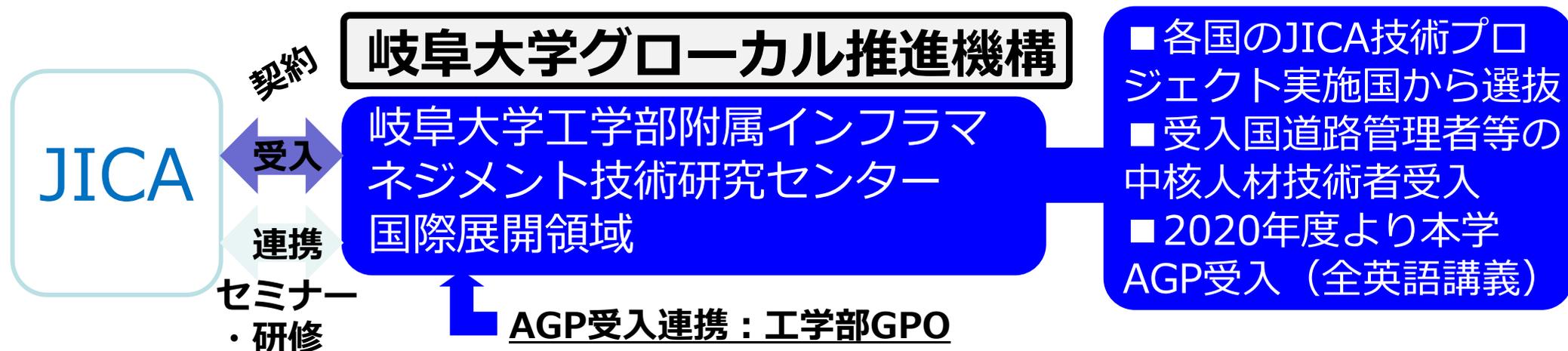
Overview of Curriculum (BE, ME)

2

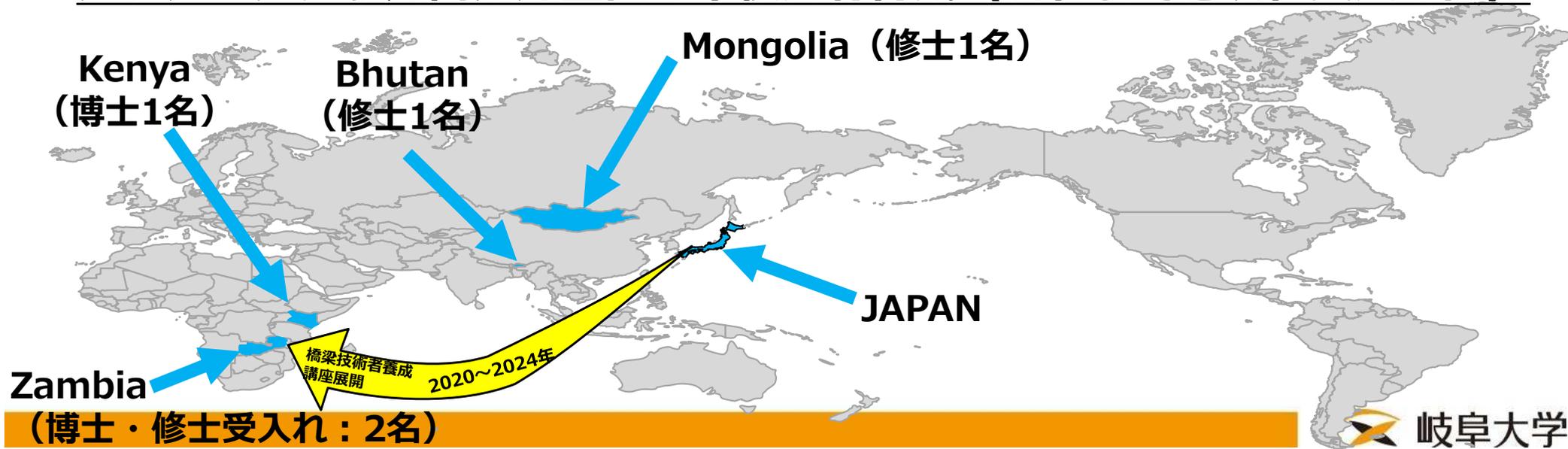


岐阜大学工学部附属インフラマネジメント技術研究センター国際展開領域 設置（2020年11月） <アジア・アフリカ開発途上国の中核人材育成>

- 2018年6月にJICAと締結した「JICA研修員（学位課程就学者）受入れに関わる独立行政法人国際協力機構と国立大学法人岐阜大学との覚書」を基に、JICAと連携して、**アフリカ・アジア途上国**の道路管理者等の中核人材を修士・博士課程への「長期研修員」を受入、**橋梁維持管理エキスパート養成講座の国際展開候補先となる中核人材として育成する。**
- 現在、JICA研修員受入は3名程度に留まっているが、国際展開領域設置に伴い、受入人数・分野を拡大。



アジア・アフリカ開発途上国の中核人材育成（これまでと現在受入の国）



- 橋梁メンテナンス教育・技術の国際展開の取組
 - JICAザンビアプロジェクトを通じた国際展開
 - JICA留学生制度を通じた国際展開
- 次世代への継承・発展
 - 耐候性鋼暴露100年試験についてと長期暴露試験を基にした研究成果
 - 岐阜大学での構造系博士課程学生育成の取組について

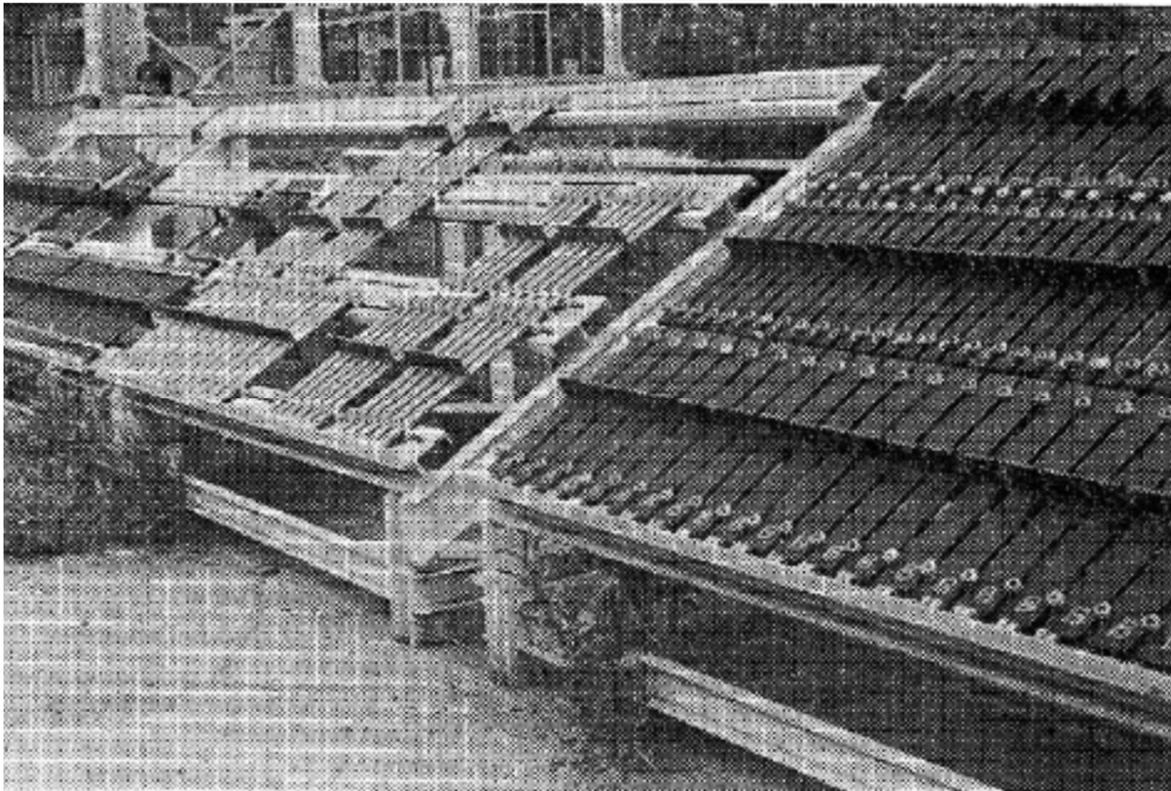
無塗装橋梁の長期暴露試験

耐候性鋼材溶接継手の長期大気暴露試験

塗替え費用の削減を目的に耐候性鋼の無塗装仕様が検討され始めた当時、**山田健太郎先生**（当時：名古屋大学助手，現在：中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 顧問）は，耐候性鋼を無塗装で使用した場合に鋼材表面に生成される緻密なさびが溶接継手の疲労強度に及ぼす影響の検討を目的に，**耐候性鋼SMA50**（現SMA490）と**普通鋼SM50**（現SM490）の**リブ十字すみ肉溶接・面外ガセット溶接継手**の大気暴露試験を開始。

○大気暴露期間：1977年～2018年【41年】
○場所：トピー工業

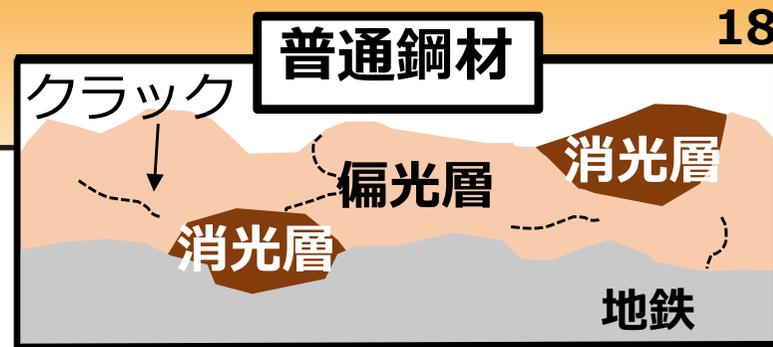
暴露試験開始時（1977年）



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.

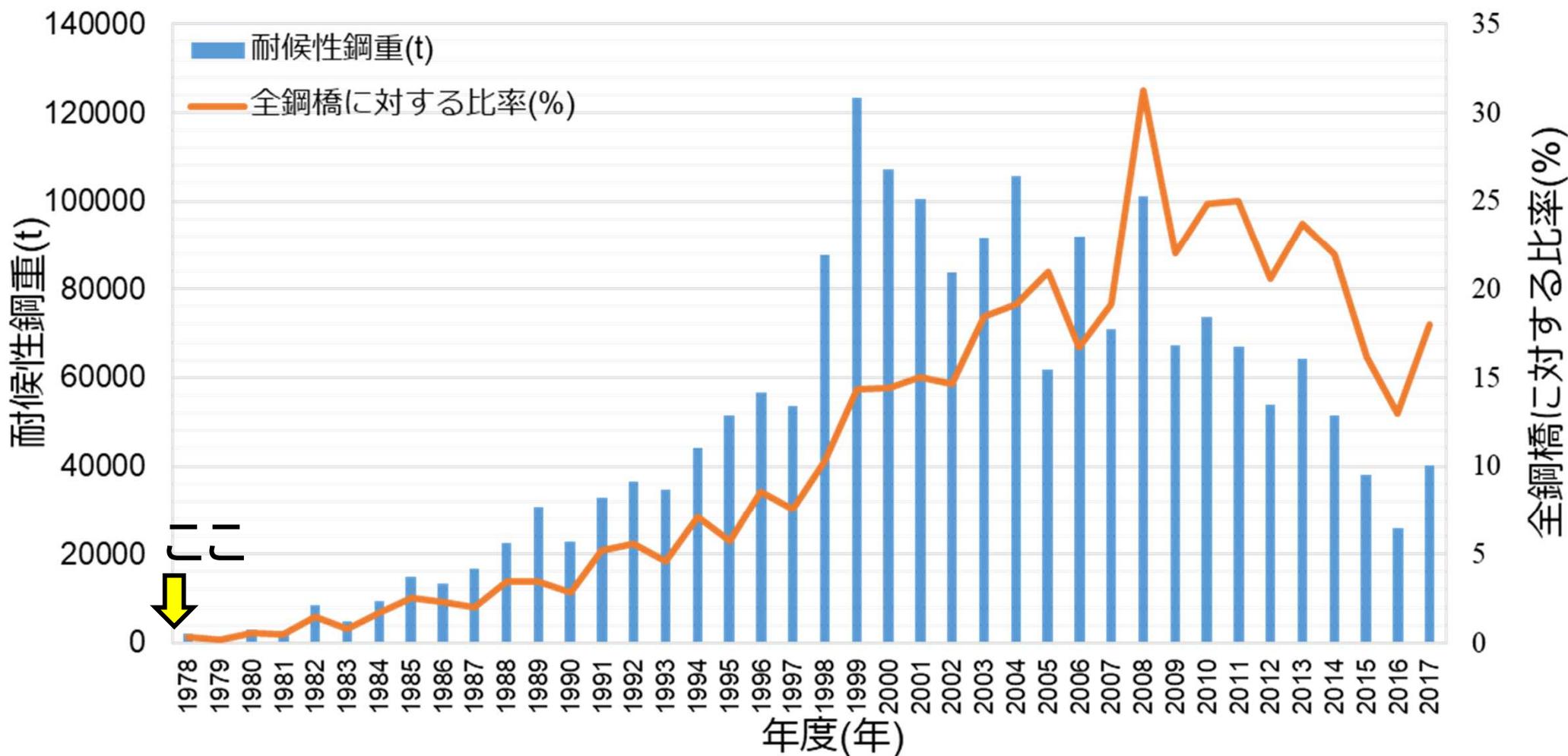


**1960年代
耐候性鋼材の橋梁への適用**

**1980年代
無塗装橋梁の提案・実現**

大幅な塗装コストの削減

1977年 New River Gorge橋

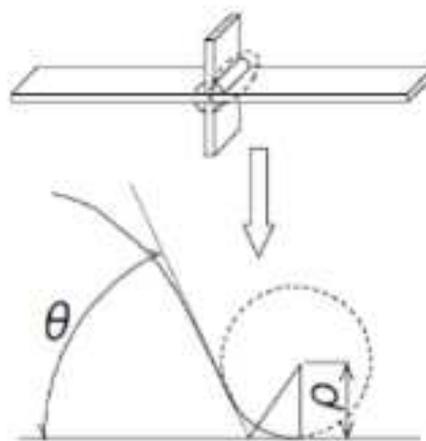
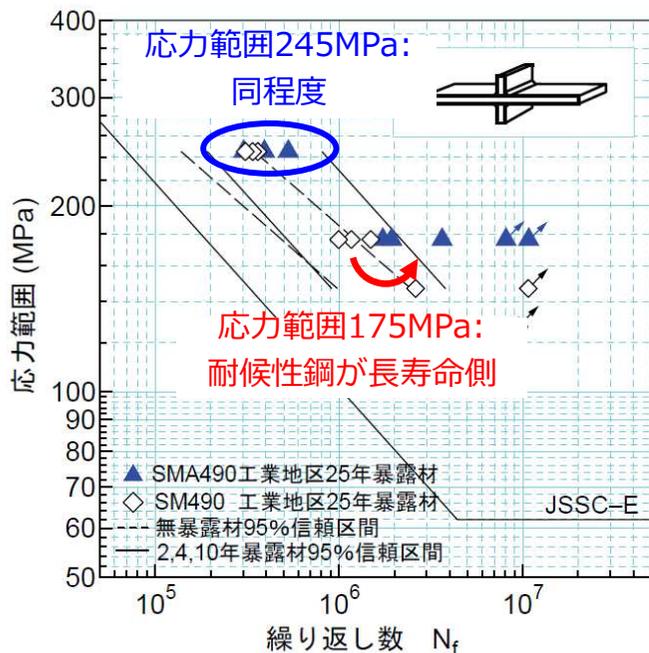


1) (社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼橋梁実績資料集第24版，2019

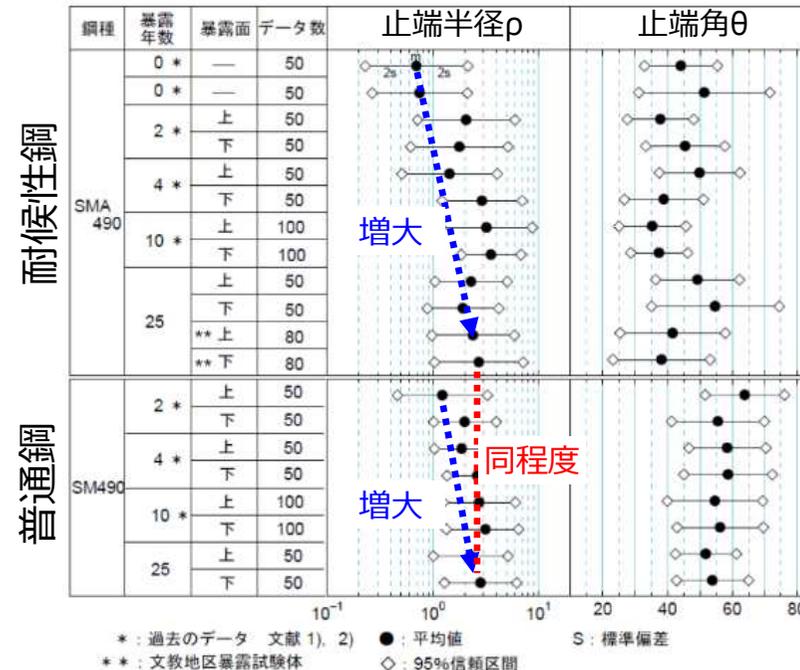
- 1970年代以降，数多く建設。
- 長いもので40～50年程度の供用年数。
- 腐食により，鋼材の断面減少が進んでいる。疲労き裂の発生も報告されている。

大気暴露期間25年の耐候性鋼と普通鋼の疲労強度の比較

疲労試験結果(耐候性鋼・普通鋼)



すみ肉溶接止端形状(耐候性鋼・普通鋼)



疲労試験結果の比較

応力範囲245MPaでは、耐候性鋼、普通鋼ともに疲労強度に差はみられない。
 応力範囲175MPaでは、普通鋼の疲労強度よりも長寿命側であった。

すみ肉溶接止端形状の比較

止端半径は、耐候性鋼・普通鋼ともに暴露期間が長くなるほど大きくなっている。
 大気暴露期間25年において、止端半径はそれぞれ同程度である。

➡ **長期大気暴露により耐候性鋼溶接継手の疲労強度は低下しない結果であった。**

100年大気暴露試験への継続と技術継承について

後世に伝えるために

山田健太郎先生（現：中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 顧問，当時：名古屋大学 助手）より引き継いだ貴重な耐候性鋼暴露試験体の概要・主旨を後世に伝えるため，暴露試験体の架台には下記の看板を取りつける予定。 **木下が99歳になれた時点で試験終了。**

耐候性鋼溶接継手試験体100年暴露試験

目的と概要

- ①我が国では1960年代以降，鋼橋への耐候性鋼の適用が開始。
- ②緻密なさびの生成が耐候性鋼の静的・疲労強度に及ぼす影響について，**山田健太郎先生(当時名古屋大学助手)**が研究を実施（1977年9月からトピー工業で大気暴露試験開始）。
- ④これまでに暴露期間2, 4, 10, 25年の疲労挙動の変化などが解明され，さらなる研究が継続。
- ⑤耐候性鋼暴露試験体を2018年9月（暴露期間41年目）に**木下幸治先生(岐阜大学准教授)**が引き継ぎ，暴露期間100年を目指して**施工技術総合研究所・瀧上工業**にて暴露試験を継続中。

大気暴露



瀧上工業

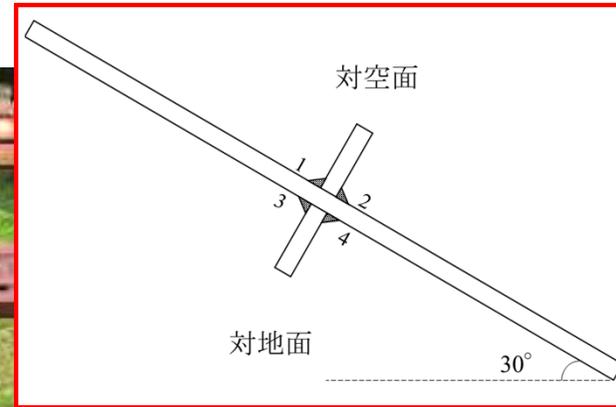


施工技術総合研究所

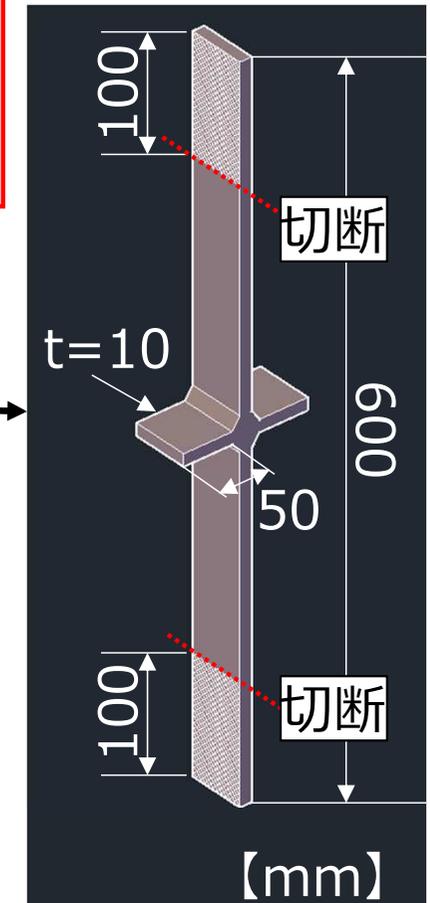


大気暴露期間41年の耐候性鋼溶接継手の疲労強度

暴露状況



試験体寸法



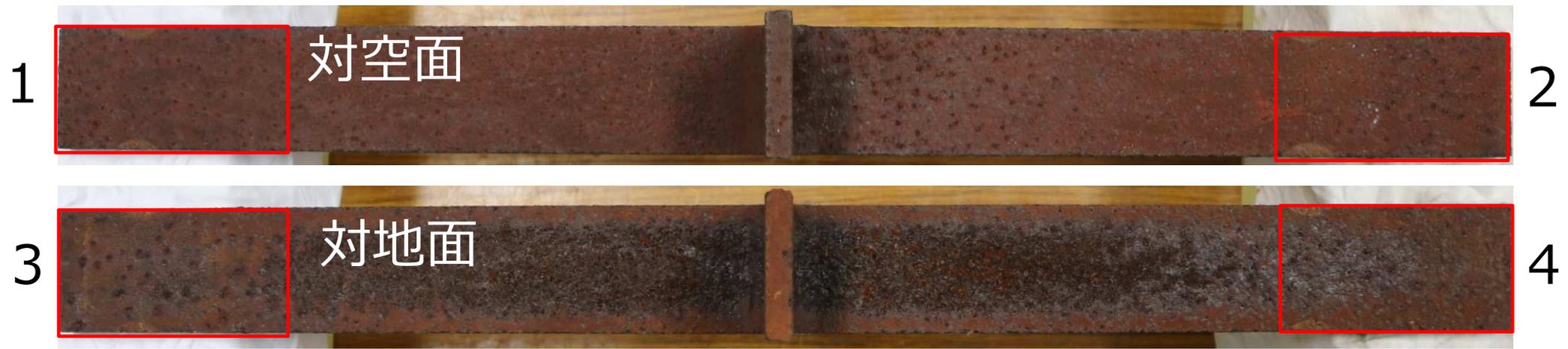
- 使用鋼材：SMA50（現SMA490）
荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手
- 大気暴露：41年間(1977年9月～2018年9月)
- 暴露場所：三河湾の海岸から約1km離れた工場敷地内
- 暴露方法：架台上に南向き30°の角度で雨ざらし

試験体一覧

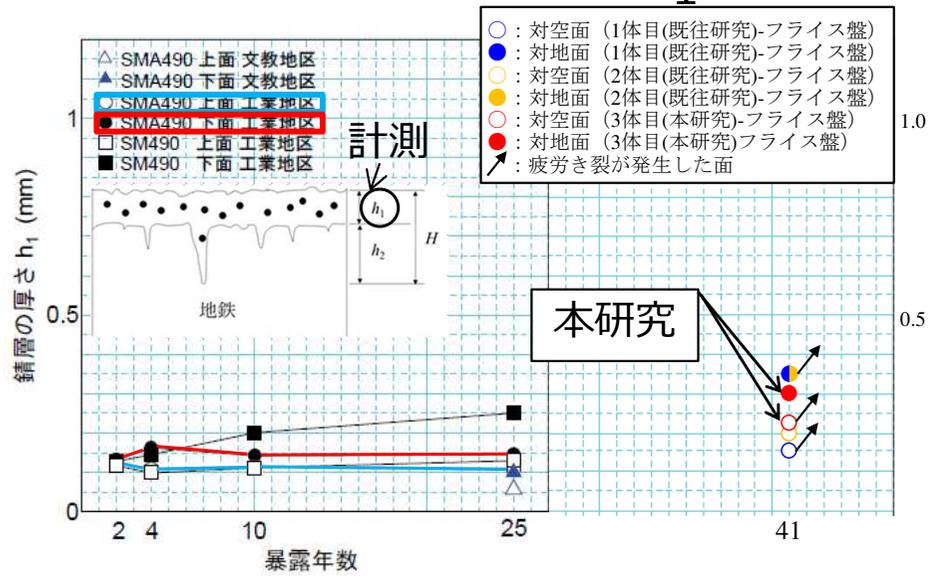
試験体	き裂発生面	き裂確認 (目視)	磁粉探傷試験	疲労寿命	ビーチマーク試験	SEMによる破 面観察
1体目*	対地面			1150000回 ($\Delta\sigma=215.6\text{M Pa}$)		
2体目*	対地面	56.2万回		602535回 ($\Delta\sigma=214.0\text{M Pa}$)	実施	
3体目	対空面	40万回	~35万回：未検出 40万回：6mm 41万回：22mm	424950回 ($\Delta\sigma=215.6\text{M Pa}$)	実施	実施

* 日本鋼構造協会：鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料，JSSCテクニカルレポート，No.120，2020.9.に掲載。

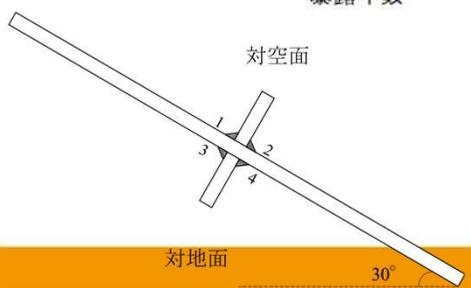
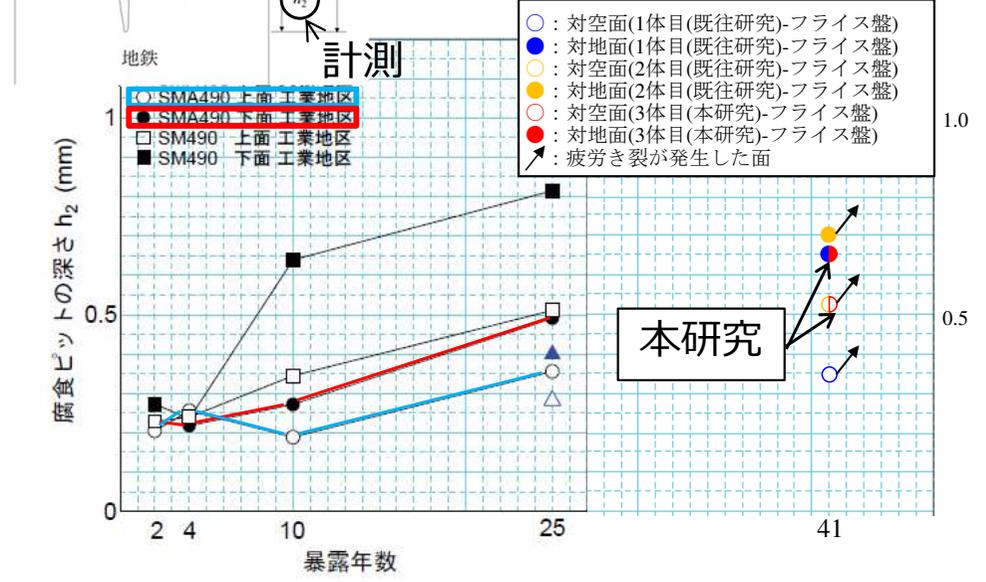
さびの性状



さび層厚さ h_1

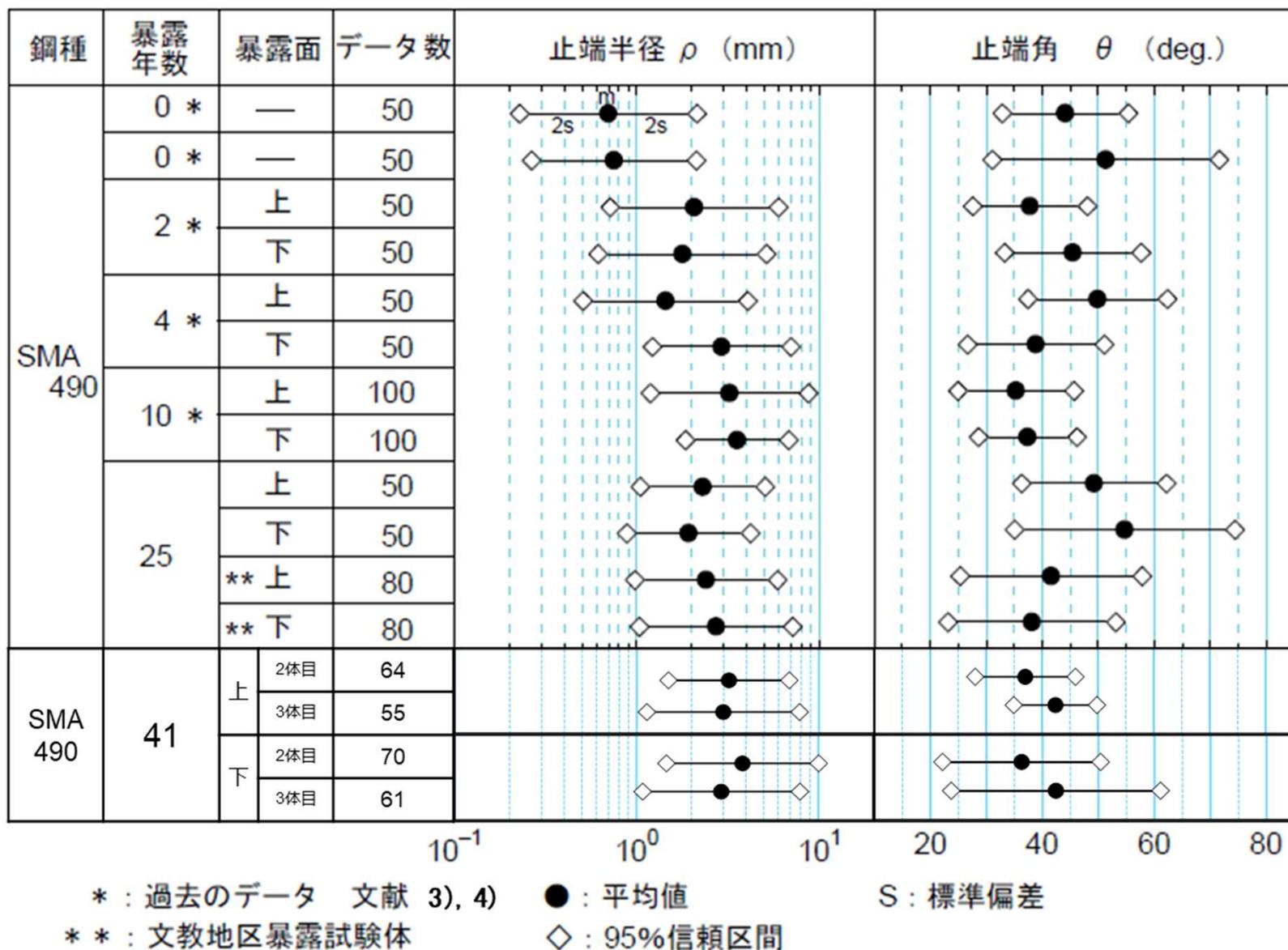


腐食ピット深さ h_2



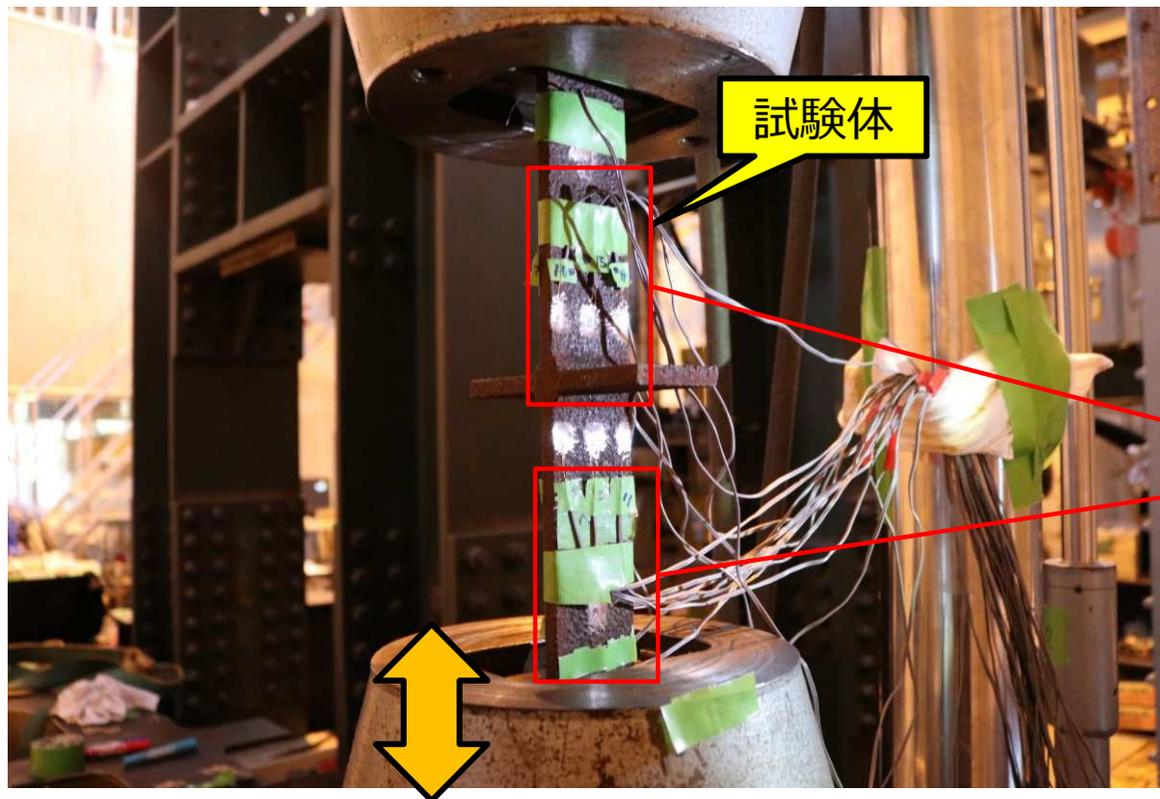
- 腐食による断面減少(各面あたり平均で0.3~0.4mm)が推定される。
- 対地面のさび層厚さは対空面のさび層厚さより大きくなった。
- 対地面のさび層厚さは暴露期間25年に比べて2倍程度厚い結果。
- 対地面の腐食ピットの深さは曝露期間4年~41年で線形的に増加。

溶接部形状

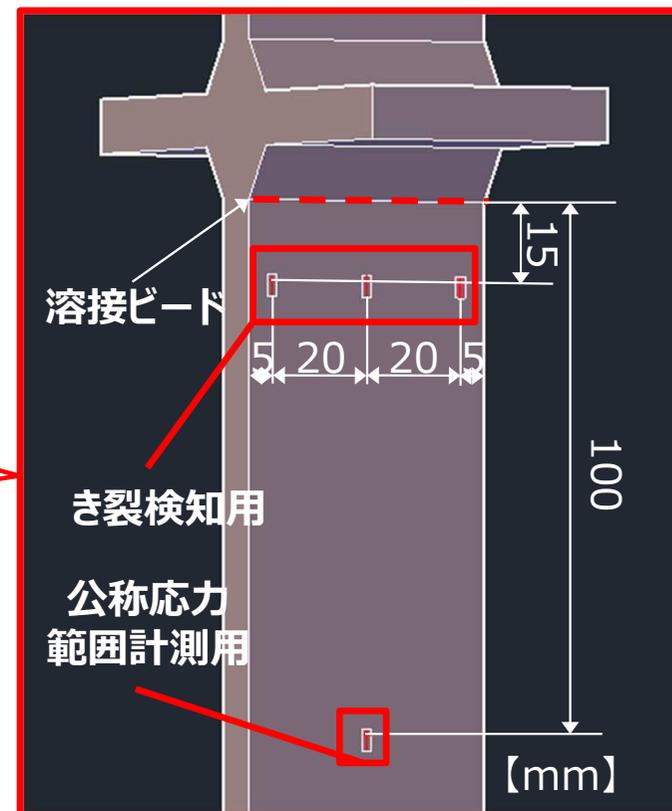


- さび上からの計測ではあるが、41年であってもそれほど大きな変化は見受けられない。

疲労試験実施状況



ひずみゲージ貼付例



- ・使用試験機：200kN電気油圧サーボ式疲労試験機
- ・試験方法：一軸引張疲労試験
- ・公称応力範囲：160MPa ⇒ 215MPa
- ・応力比：0
- ・繰り返し速度：5Hz

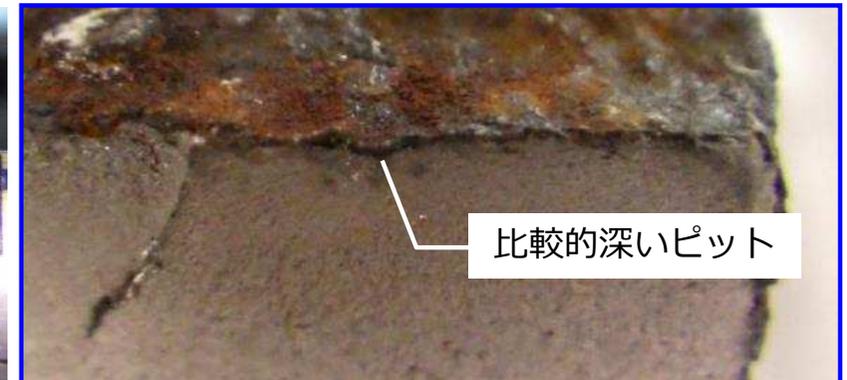
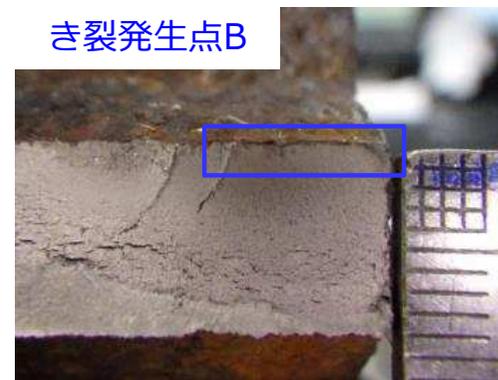
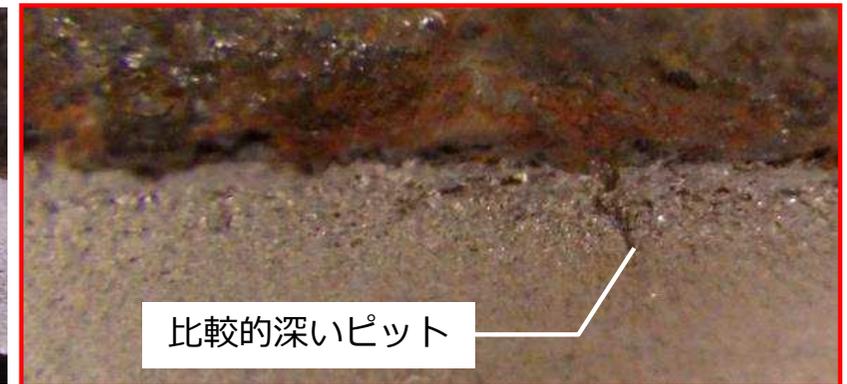
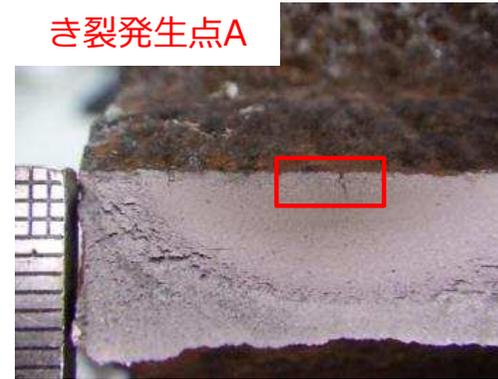
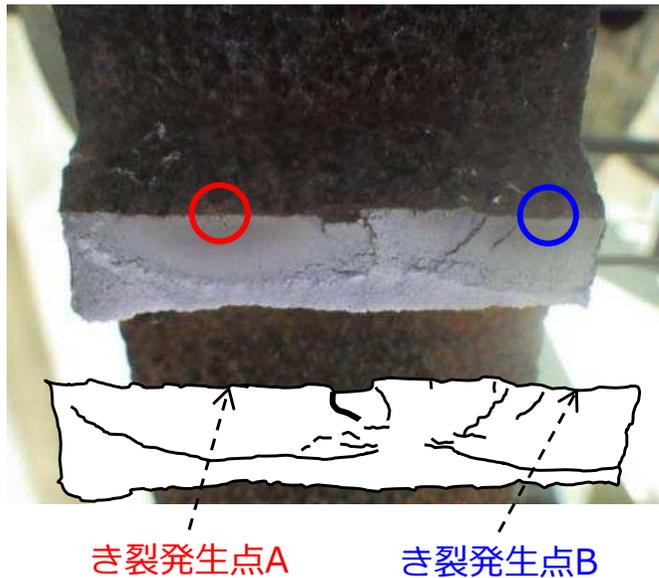
※溶接部近傍のひずみ計測，目視，磁粉探傷試験（3体目のみ）により，き裂の発生および進展状況の確認を並行して実施。

疲労試験結果：き裂発生位置

疲労試験体の破断状況

疲労試験後の試験体の破面観察より、き裂起点発生位置について確認した。

疲労試験体破面

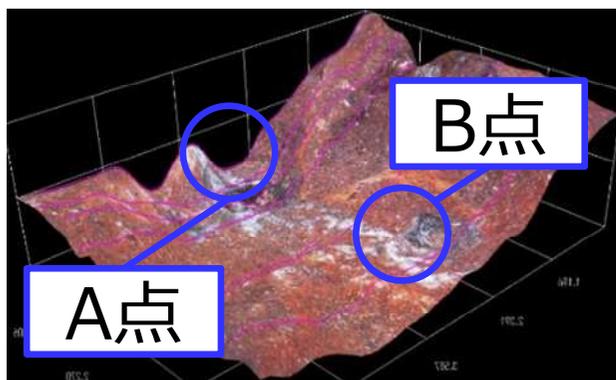
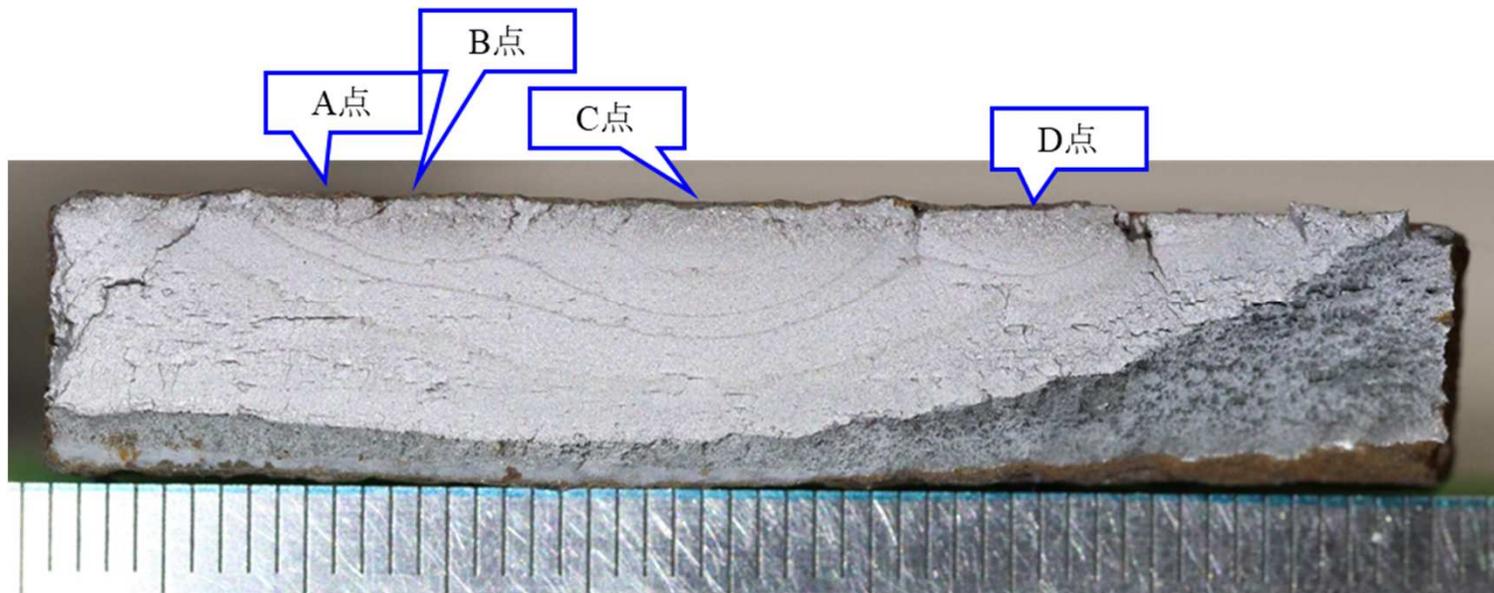


き裂発生位置

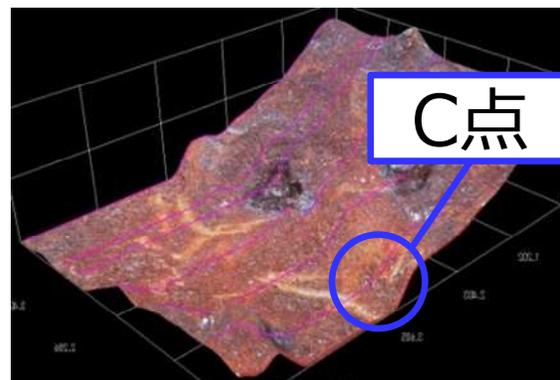
破面の模様より、き裂起点はA・B点と考えられる。

き裂発生点A・B点を拡大すると、地金表面に比較的深い腐食ピットがみられた。

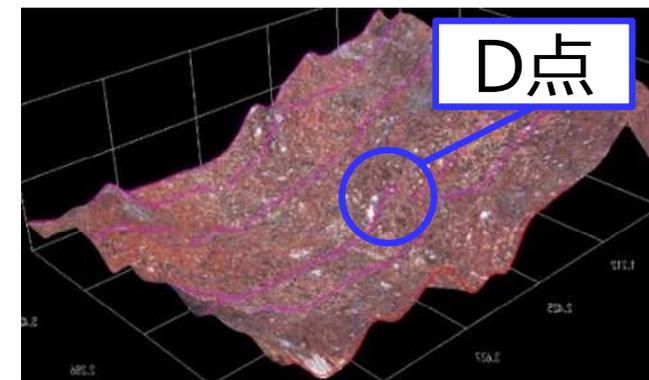
マイクロ스코プによるさび形状観察とき裂発生位置について



A:腐食ピット底2.50mm程度



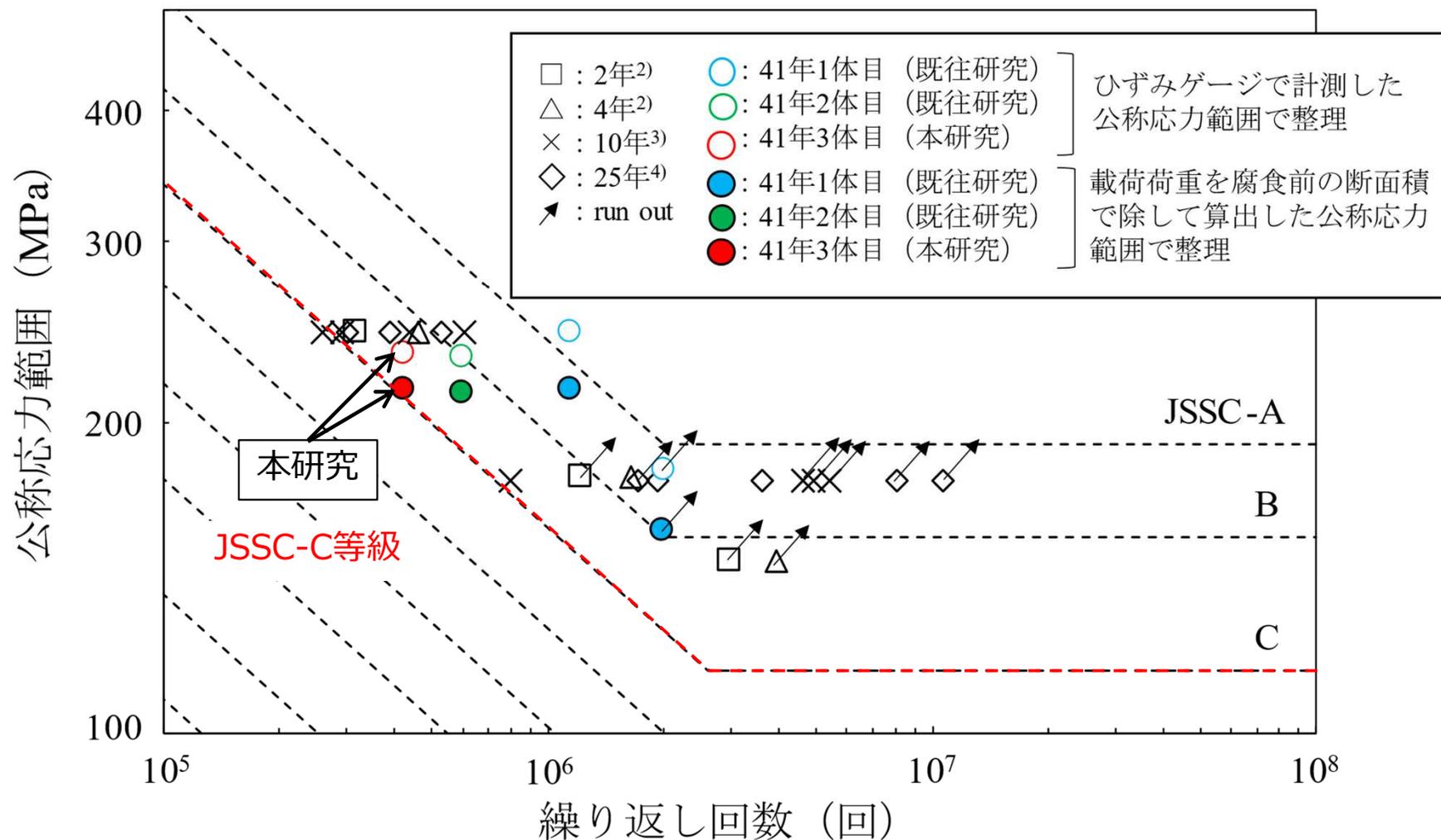
C:腐食ピット底5.74mm程度



D:腐食ピット底5.71mm程度

腐食ピット底が溶接止端部よりも滑らかな半円形状となり、き裂発生位置の応力集中が緩やかになっていることが推察される。

疲労試験結果：疲労強度



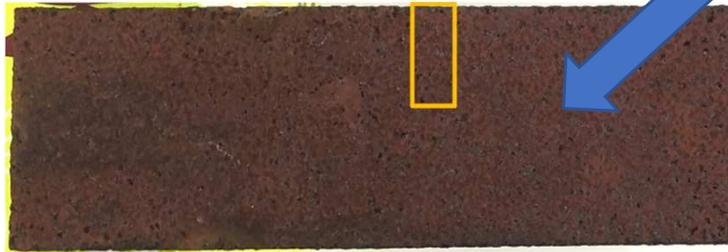
- 2) 山田ら：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ
 3) 近藤ら：10年間大気暴露した耐候性鋼と普通溶接継手の疲労挙動
 4) 近藤ら：25年間大気暴露した耐候性鋼と普通溶接継手の疲労強度

41年暴露試験体の疲労強度の下限値は2,4,10,25年暴露試験体と同程度。

➡ **25年暴露と同様に長期大気暴露により疲労強度は低下しない結果となった。**

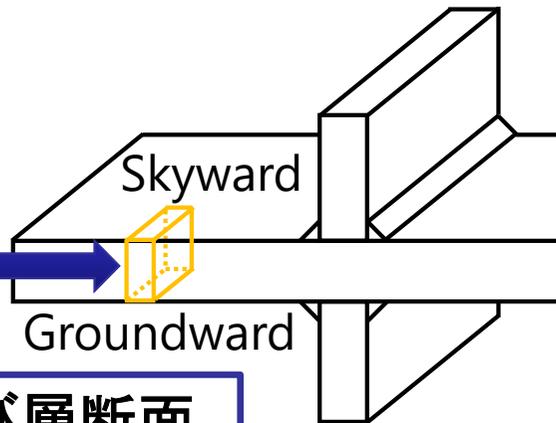
耐候性鋼試験体【41年】

Skyward surface

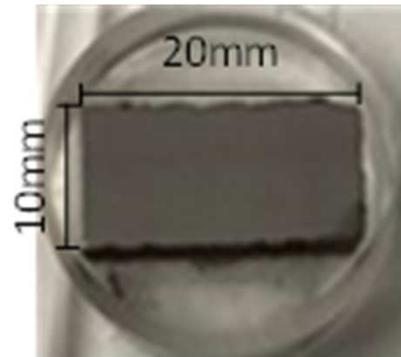


Dense rust

The cross-section of the specimen



さび層断面



Groundward surface



Bigger rust

Dense rust

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。

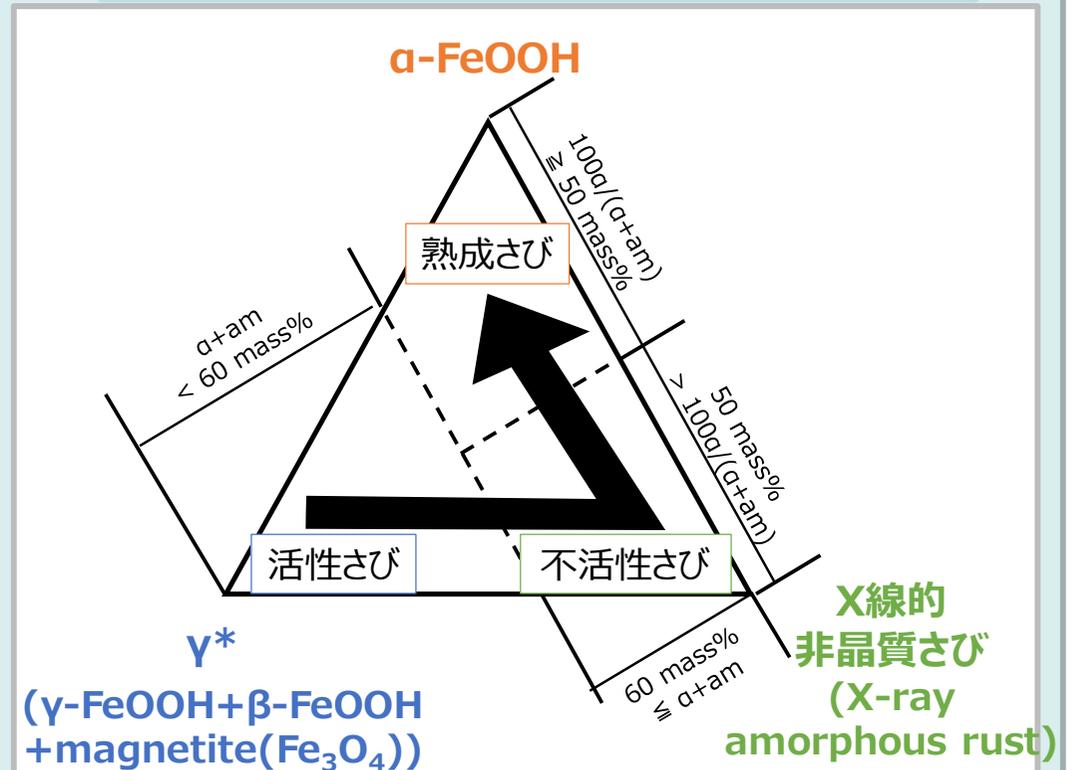


耐候性鋼の保護性さびについて

大気腐食環境下で生成される主なさび¹⁾

- ▶ **α -FeOOH**
…化学的に不活性（安定）熟成さび
- ▶ **γ -FeOOH**
…化学的に活性，他のさびに変化しやすい
- ▶ **β -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， β -FeOOHや γ -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²⁾



最終安定さび層の長期形成過程のモデル^{3), 4)}



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.

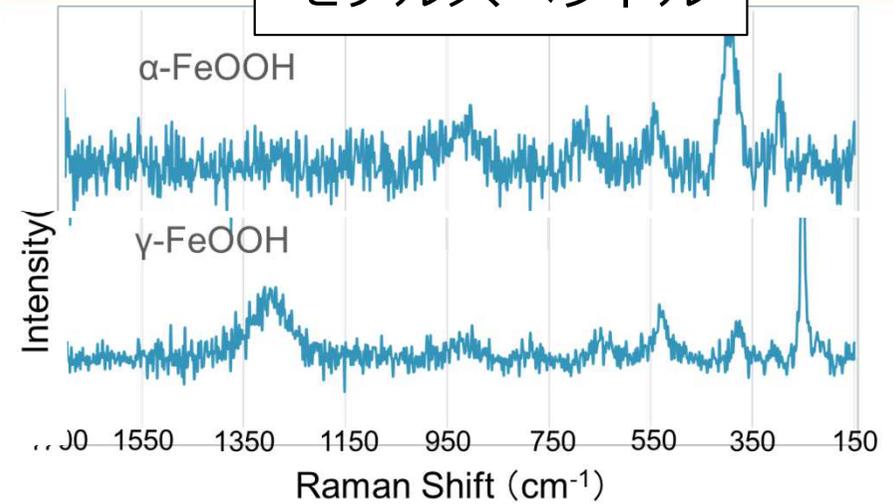
4) 山下ら：材料と環境，1994.

さび層断面の組成分析

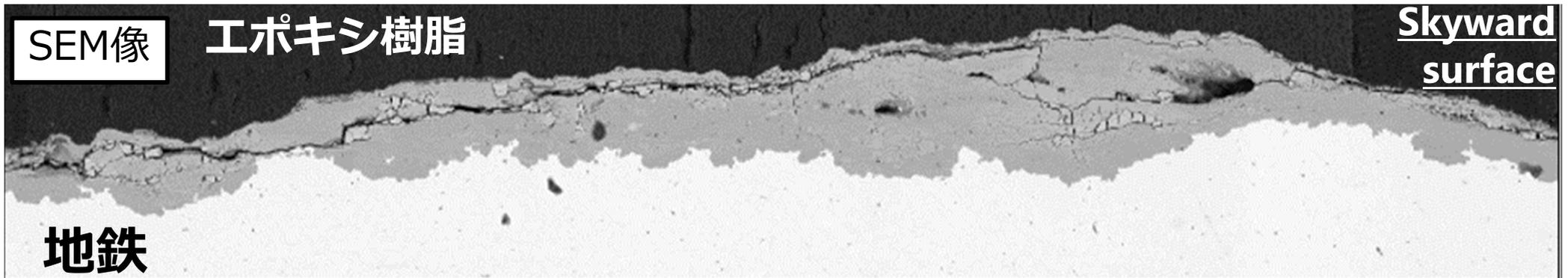
ラマン分光光度計によるマッピング分析

大気暴露期間41年の耐候性鋼のさび層断面を2.5 μm 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 α 、 γ -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

モデルスペクトル



SEM像 エポキシ樹脂

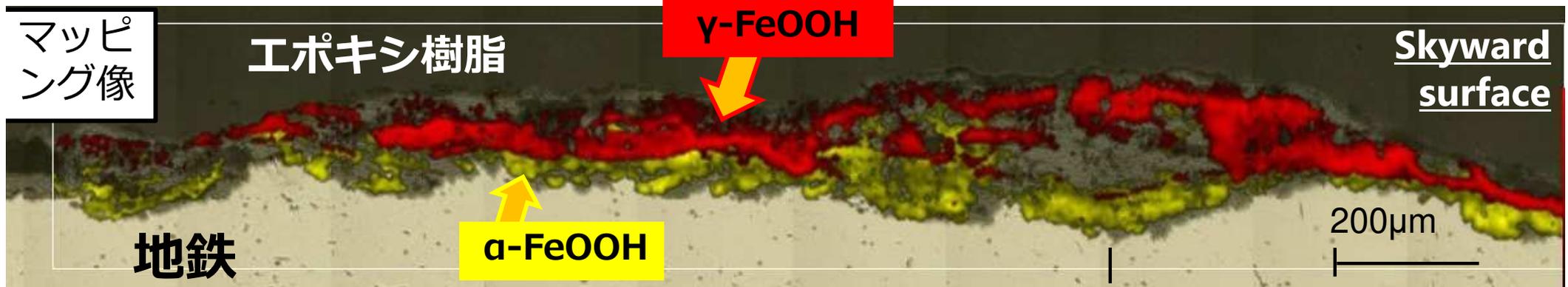


マッピング像

エポキシ樹脂

γ -FeOOH

Skyward surface



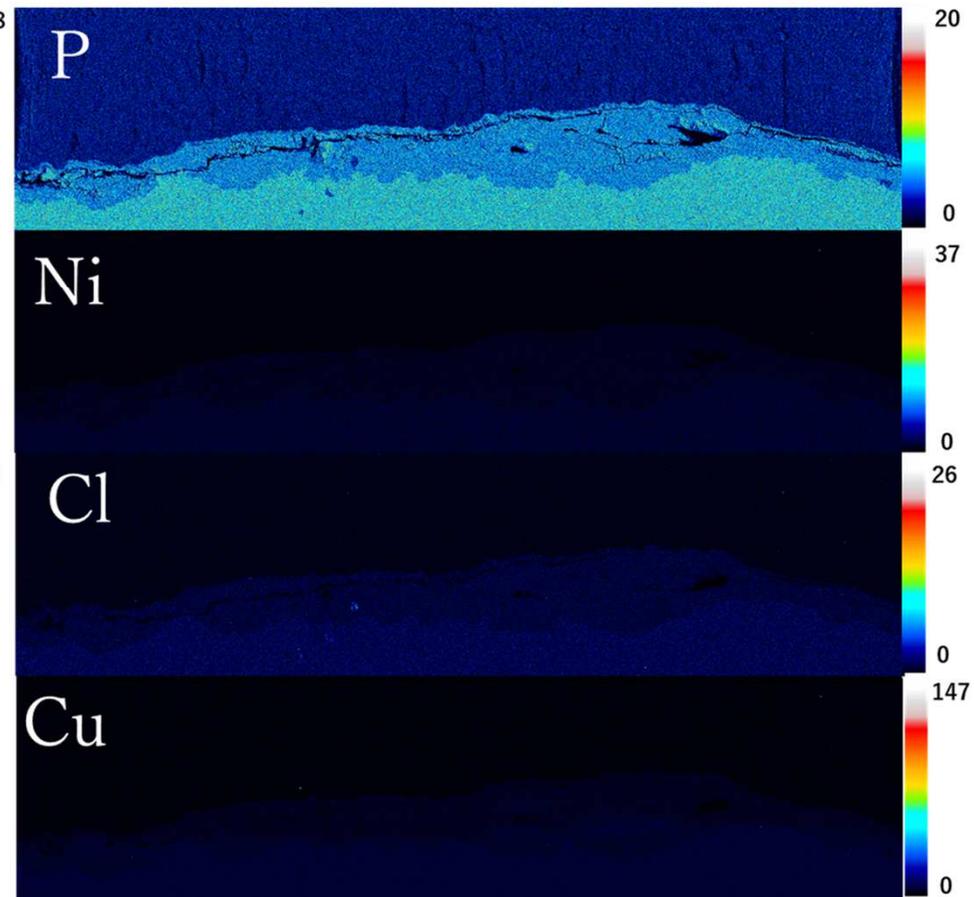
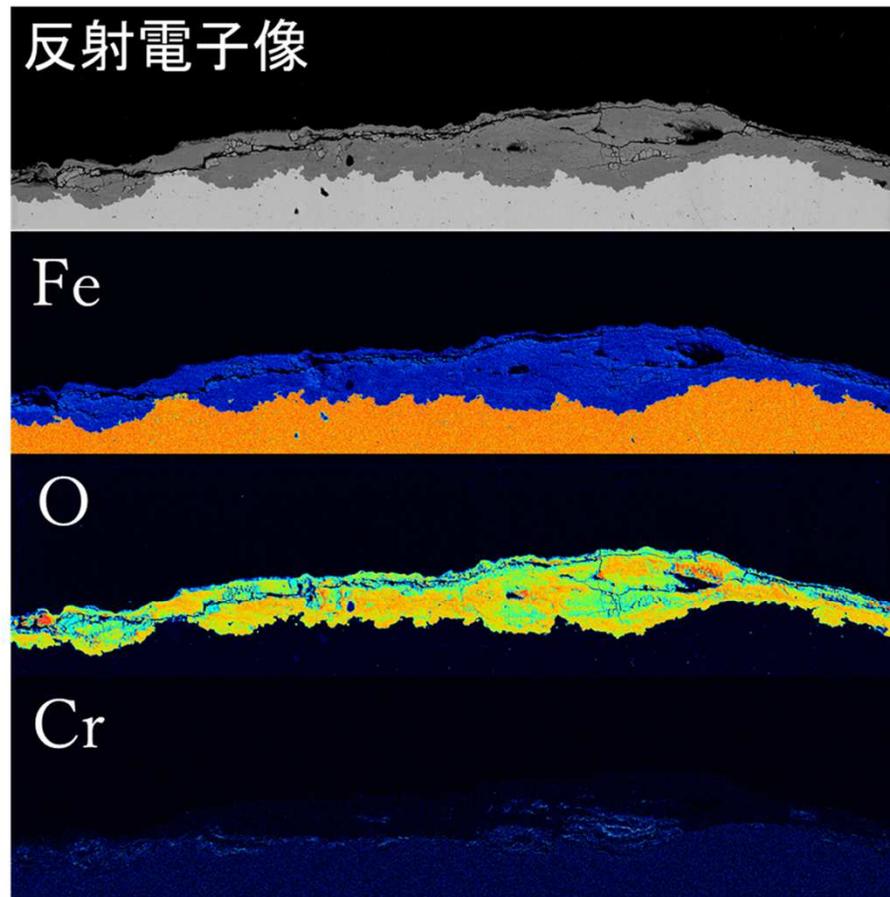
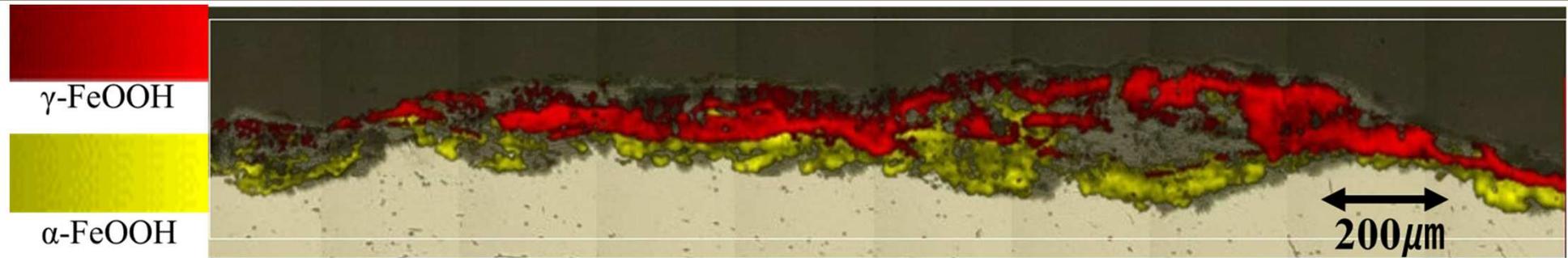
地鉄

α -FeOOH

200 μm

α -FeOOHが内層側、 γ -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. α-FeOOH層にCrの濃化が確認. 地鉄付近にCl無. α-FeOOHが内層側, γ-FeOOHが外層側に分布→四半世紀の結果と一致. よって, 疲労強度に大きな変化がない理由として, 緻密なさび層が41年に渡り保持されたため.

耐候性鋼材溶接部での疲労き裂

疲労強度の検討

- 耐候性鋼橋は普及当初から現在まで40～50年程度の供用期間を迎えている。
- 右下図に示すような疲労き裂の発生が報告されている。
- 既往研究では、2・4・10・25年間大気暴露された耐候性鋼溶接継手の疲労挙動の検討²⁾が実施されている。



- **25年間を超えて大気暴露された耐候性鋼材を用いた実験データは殆どない。**
- **長期大気暴露された耐候性鋼材の緻密なさびが疲労強度に与える影響に関するデータの継続的な貯蓄が必要である。**

2) 近藤明雅, 山田健太郎, 小野彰之: 25年間大気暴露した耐候性鋼と普通溶接継手の疲労強度, 2007.7.

3) 日本鋼構造協会: 鋼橋の疲労対策のための技術資料, JSSCテクニカルレポート, No.115, 2018.8.

疲労き裂の検出³⁾

<従来の塗装橋梁>



さびによる変色や塗膜割れにより、疲労き裂やき裂長さが検出可能。

<耐候性鋼無塗装橋梁>



まわりのさび性状によつては、さび上からき裂を目視で早期に検出するのは難しい。

- 耐候性鋼材はき裂近傍の変色や塗膜割れが見られず、さび上から目視で早期に疲労き裂を発見するのが難しい場合がある。
- さび上から疲労き裂を非破壊的に検出する方法は確立されていない。



長期大気暴露された耐候性鋼材溶接継手に生じた疲労き裂を早期に非破壊的に検知する手法について検討の余地が残されている。

緻密なさび上からの疲労き裂検出(41万回)

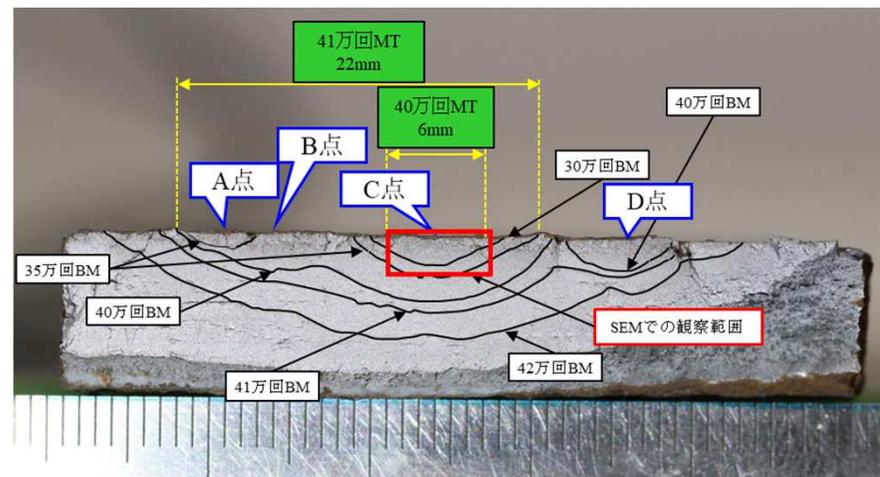
疲労き裂の検出状況

繰り返し回数	目視	磁粉探傷試験
350000		
400000		
410000		

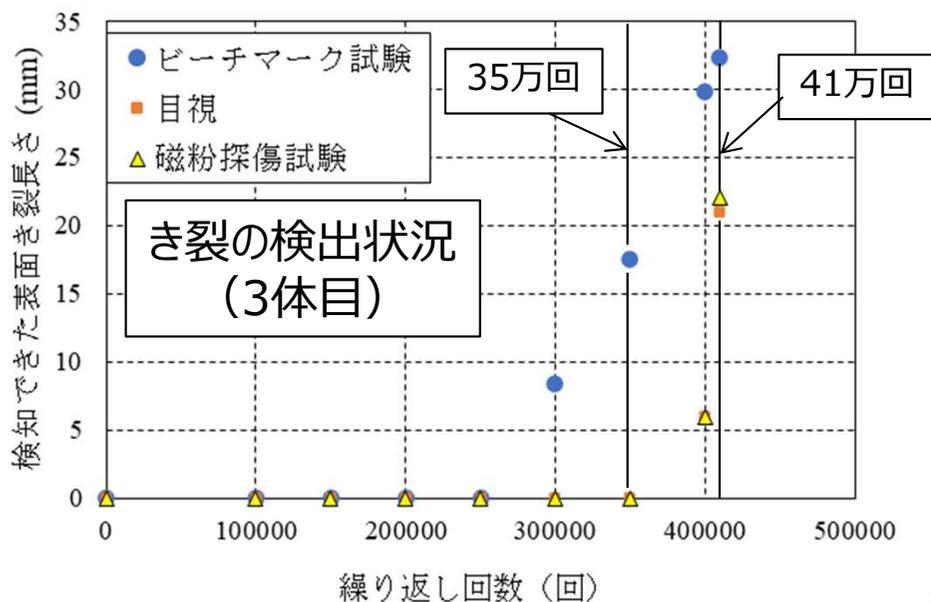
比較



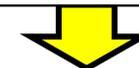
疲労破面のビーチマークより正確な表面き裂長さから計測



疲労き裂の検出精度の検証



- 35万回終了時：検出長さ0mm(検出率0%)
- 40万回終了時：検出長さ6mm(検出率20%程度)
- 41万回終了時：検出長さ22mm(検出率68%程度)



き裂発生初期段階

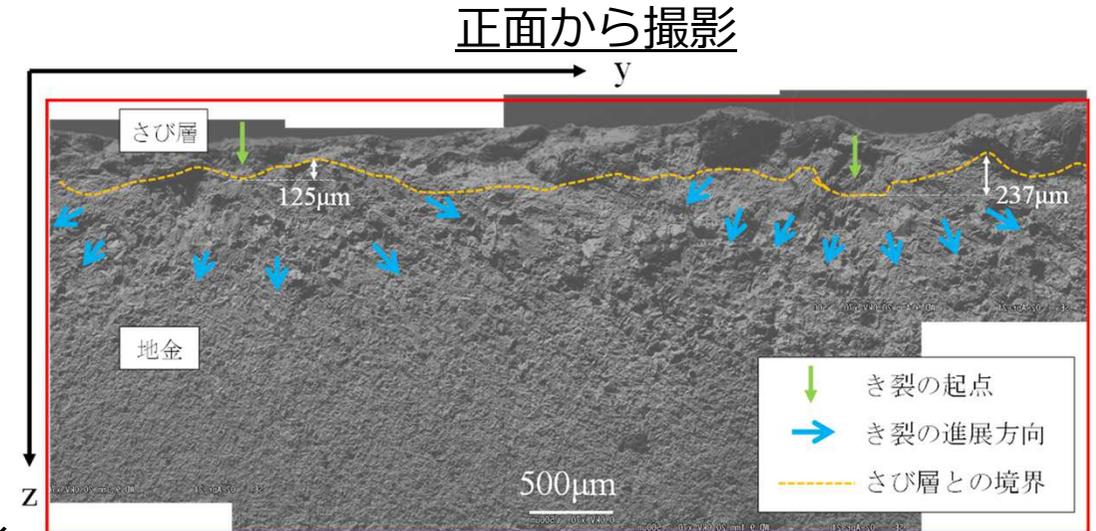
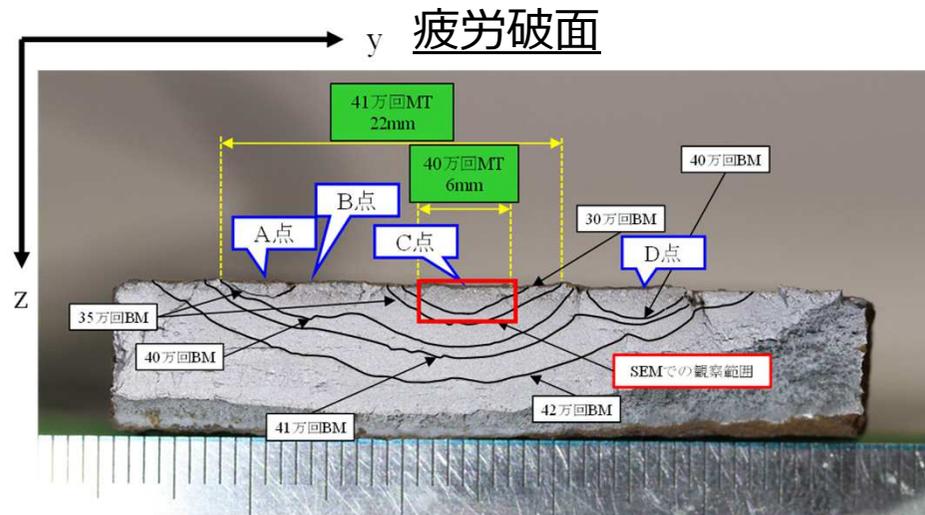
さび上からき裂の検出は難しい

き裂がある程度進展した段階

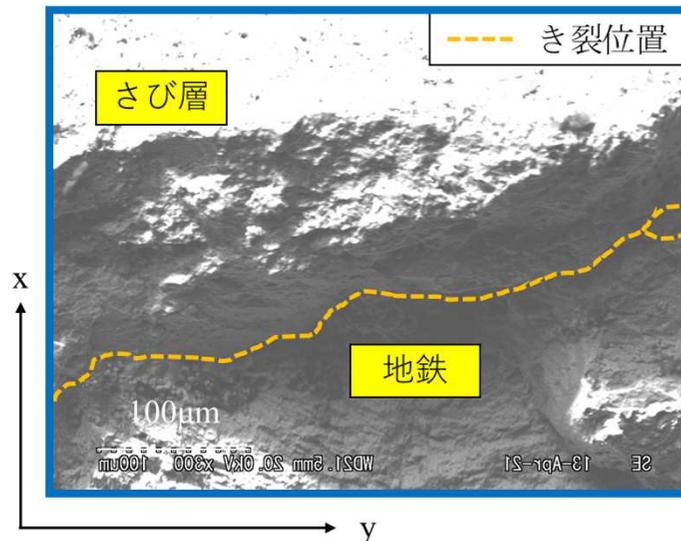
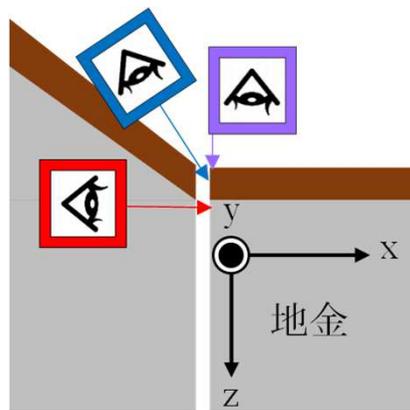
さび上からき裂を検知可能

(長さまでは十分に把握できていない)

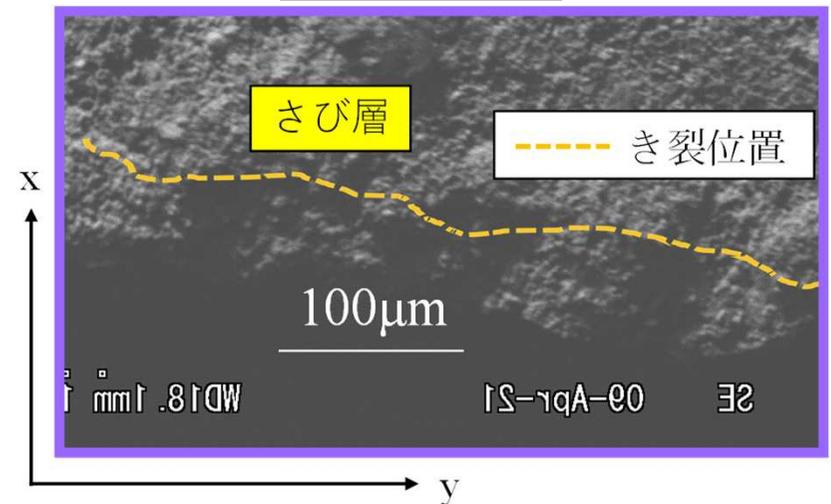
SEMによる観察結果



上面45°から撮影



上面から撮影



✓ さび層の割れ部が地鉄部に対して屋根状に約60μm 程度突出している。
 →き裂発生初期段階では、き裂発生位置がさび層に覆われた状態となり、
 磁粉探傷試験でのき裂の検知ができなかったと考えられる。

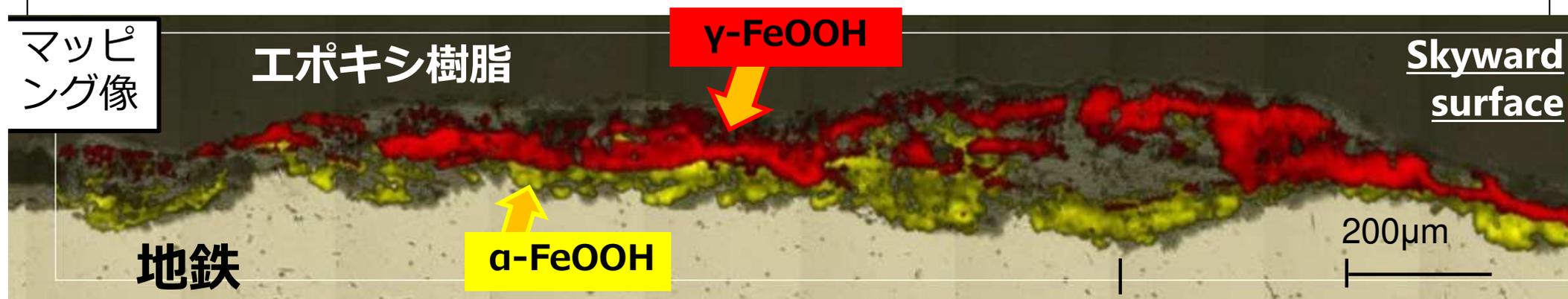
41年暴露試験のさび組成と疲労強度：まとめ

41年暴露試験体の疲労強度

- ✓ 41年暴露試験体の疲労強度は、腐食による断面減少があるにも関わらず、2年、4年、10年、25年暴露試験体と同程度の疲労強度等級であった。

さび組成分析結果

- ✓ ラマンイメージング分析法およびEPMA分析法によるさびの組成・元素分布の分析により、大気暴露期間26年の既往の研究で示された α -FeOOH層が地鉄付近に、 γ -FeOOH層が α -FeOOH層上に分布するという緻密な保護性さび構造と一致していることを証明した。
- ✓ 以上より、大気暴露期間25年以降も緻密な保護性さび層が長期間に渡り形成され続けたことから、さびの進行に伴う断面減少が小さいこと、ならびにさびの進行に伴う溶接止端部の形状改善、すなわち応力集中の低下に寄与したことで疲労強度が低下しなかったと言える。
- ✓ よって、さびの進行が抑制される緻密な保護性さび層を確実に有する耐候性鋼溶接継手の疲労強度は、40年程度の供用期間では低下しないと結論づけられる。



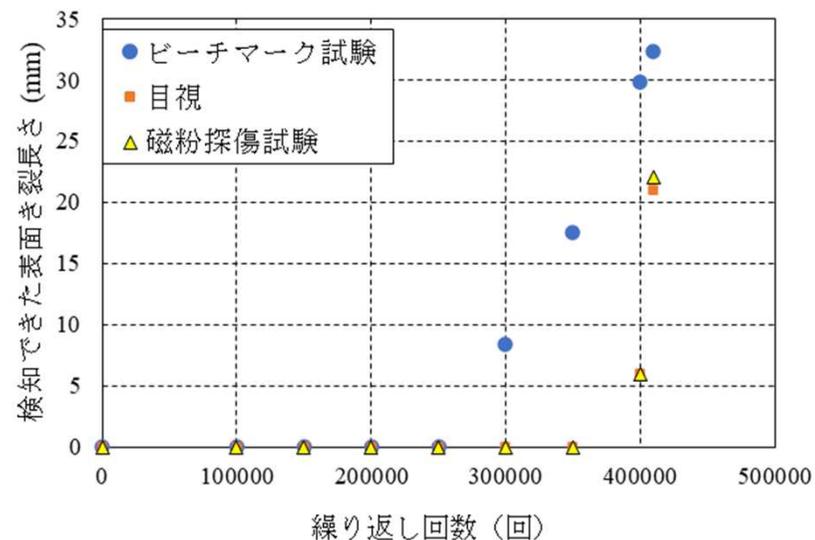
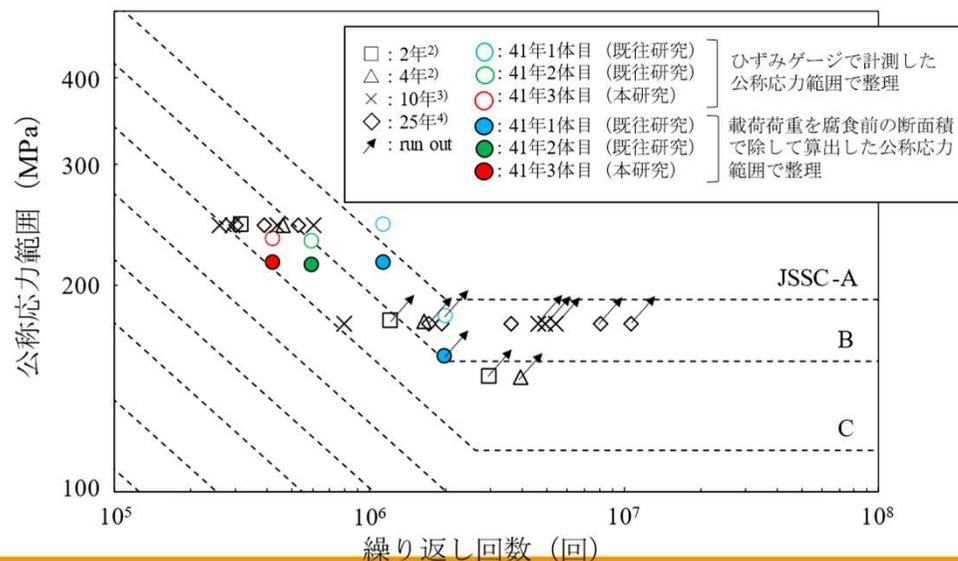
41年暴露試験の緻密なさび上からのき裂検出:まとめ

緻密なさび上からの疲労き裂検出

- ✓ 41年暴露試験体に生じた疲労き裂は、緻密なさび上からの目視と磁粉探傷試験では、き裂発生初期段階での検出は難しい。一方、き裂がある程度進展した段階では検知可能であるが、き裂の長さまでは十分に把握できていない。

MTによる疲労き裂の検出精度

- ✓ 通常のき裂探傷では、目視よりも磁粉探傷試験の方が良好に検出できるため、緻密なさび層が存在し、き裂がさびに覆われる場合には、さび層の下に存在するき裂長さに対するさび上からの磁粉探傷試験での検出精度が低下したことが示唆される。





- 100年暴露試験は、**木下が99歳になれた時点で試験終了。**
- 引継ぎを考えると・・・現在の20代後半の教え子に引継いでも、60年後は80代後半。現在の教え子たちでも試験終了は年齢的に危うい...
- そもそも、今回の100年暴露試験では、試験開始時1977年に木下は生まれていない。
- 100年度暴露試験でちょうど60歳となる教え子を育成するには、ちょうど生まれたばかりの方々が対象→思いを伝える手段がない...
- そもそも木下は山田先生の教え子ではない→奇跡的？突然変異的？山田先生の志、お考えに共感。その実験の価値を理解・継続すべきと思ひ至る。
- よって、教え子を継続的に輩出する必要もあるが、やはり、我々分野に誇りを持ち、志を持ち、凜とした姿を次世代に見せることが、確実な技術継承と技術のさらなる発展に繋がるのではないかと考えます。広報などの短期的な取組もありますが、みなさまの日々のお仕事の中に、最も次世代への技術継承に重要な要素があると考えます。