



攻 専 工 学 社 会 工 学 専 攻
京 都 大 学 大 学 院
大 研 究 大 都 市
学 造 物 マ ネ ジ メ ン ト
構 造 物 マ ネ ジ メ ン ト

杉 浦 邦 征

アジアメガシティの腐食環境と 鋼構造物（橋梁）の維持管理

自己紹介(杉浦邦征, 1960年3月21日生)



- 名古屋大学工学部土木工学科卒業(1982年3月)
→卒業論文: 梁-柱部材の強度データベースと統計評価
→修士論文: ひずみ速度を考慮した構造部材の応答特性



Japan Airlines Flight 350, Feb 9th, 1982

- 米国立大学Buffalo校Ph.D.課程修了(1988年8月)
→博士論文: Low-cycle Fatigue of Structural Steels
→1988年11月に帰国



The Space Shuttle Challenger disaster, January 28, 1986

➤ はじめに(背景など)

- 阪神高速道路7号北神戸線における耐候性鋼橋の防食機能に関する詳細調査の分析(阪神高速道路(株)からの受託研究)
- 耐候性鋼橋の建設位置や構造詳細に起因する地形・局部腐食環境の調査(阪神高速道路(株)との共同研究)
- アジア・メガシティにおける鋼材の曝露試験および腐食環境測定(日本鉄鋼連盟からの学助成, KUSPIRITS(学内)&科学研究費補助金, . . . JICA-EEHEプロジェクト, . . . JSCEインフラマネジメント技術国際展開研究, . . .)

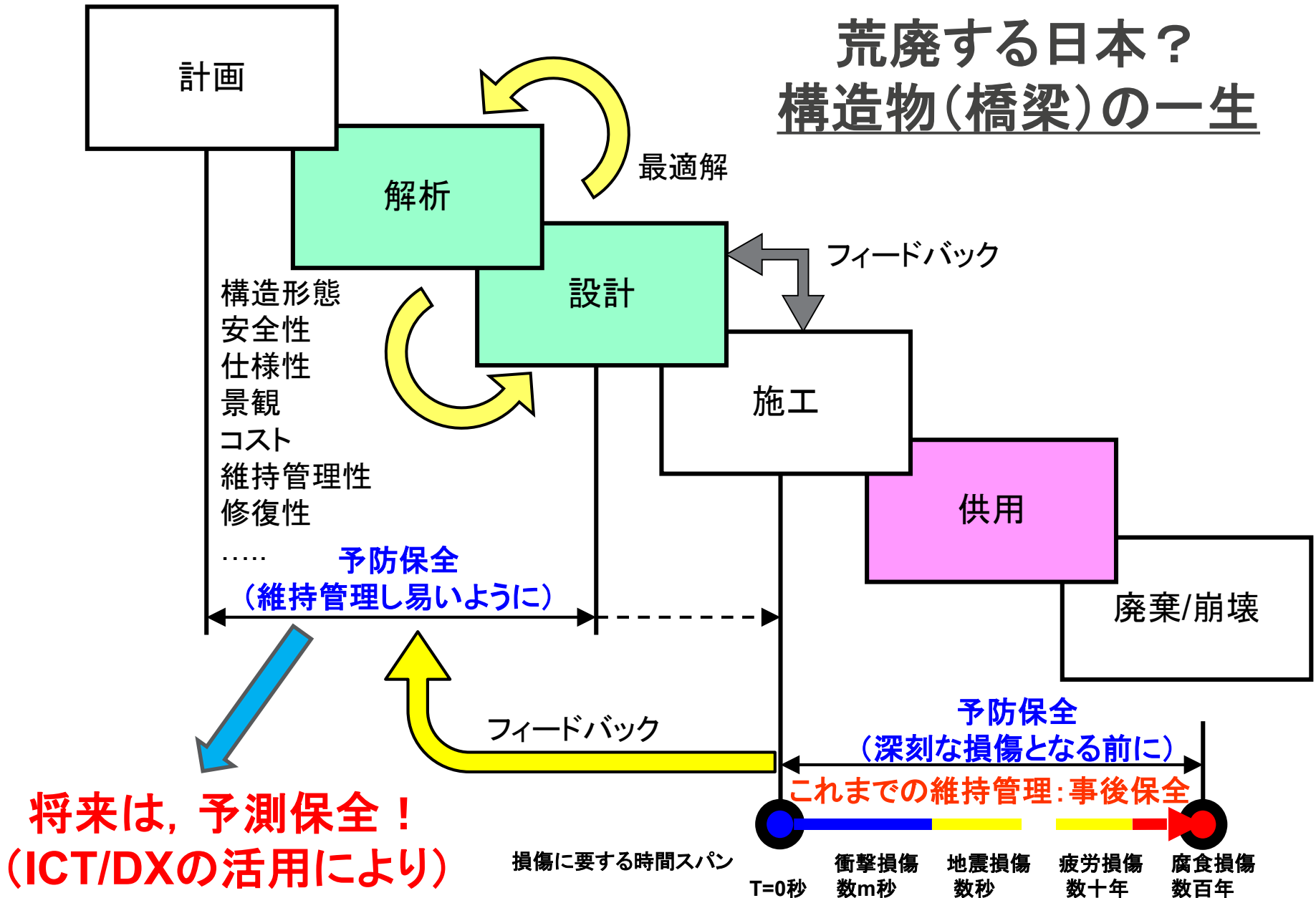
➤ まとめ(課題など)

本日の発表内容



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

荒廃する日本？ 構造物(橋梁)の一生



はじめに



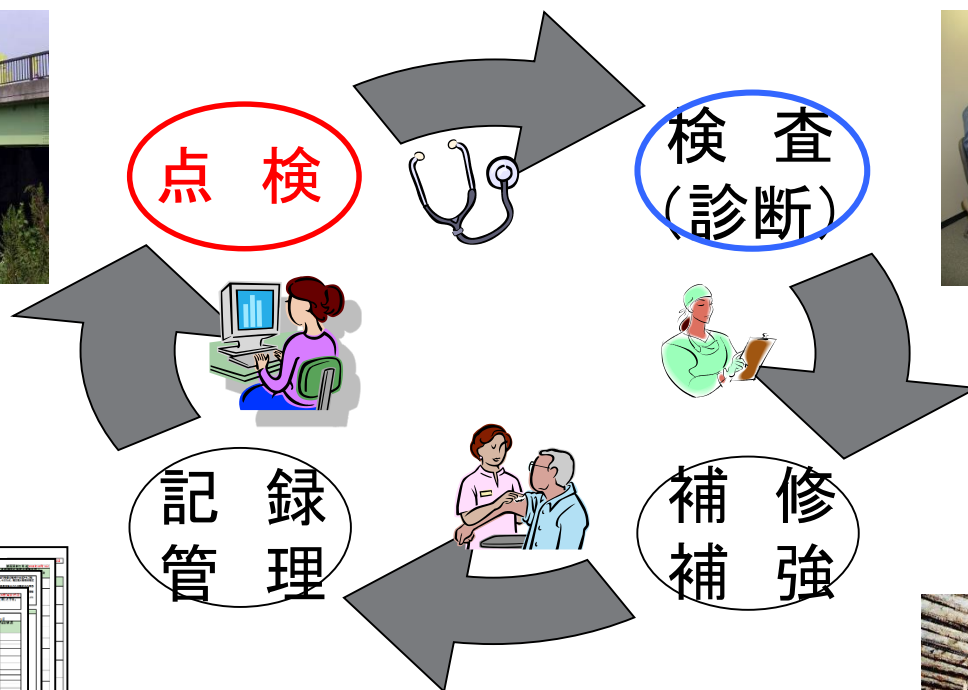
京都大学
KYOTO UNIVERSITY

2013年がインフラのメンテナンス元年(例:橋梁は5年に一度点検)



定期的に橋梁の点検を実施し、損傷状況の把握に努める。

橋梁の維持管理に活用するため、各種点検結果、補修等の結果を記録する。



維持管理におけるPDCAサイクルの重要性



定期点検結果に基づき、損傷原因に関する所見をまとめ、対策区分の判定、補修・補強計画を策定する。

補修・補強計画に基づき、的確かつ効率的に補修・補強を行う。



- ◎道路構造物の点検は維持管理サイクルの重要なパーツ
- ◎点検をしないで効率的な補修は出来ない
- ◎点検により損傷を受け易い部位の傾向を把握

非破壊による状態把握が極めて重要！！

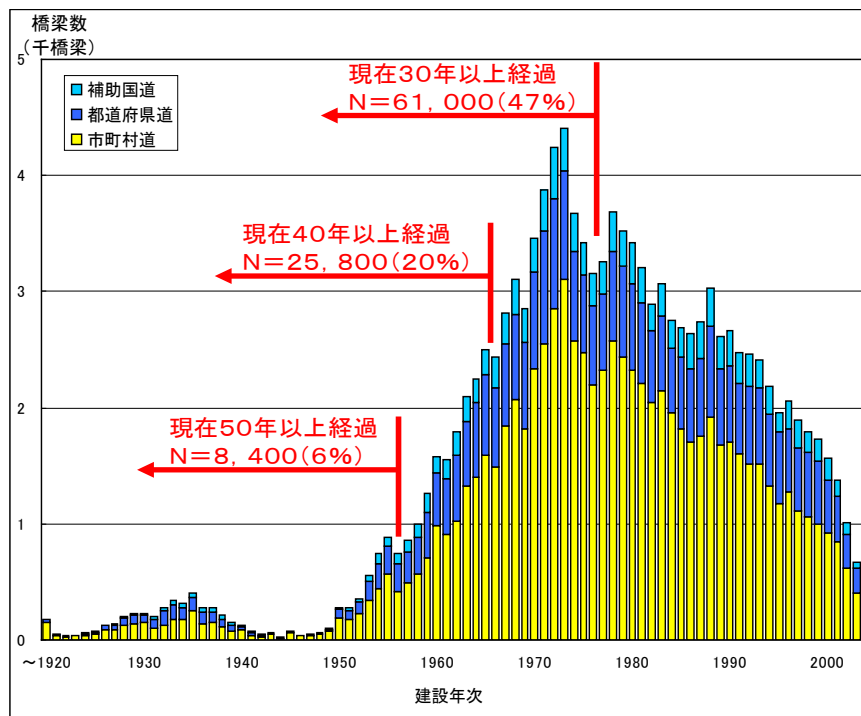
はじめに(続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

地方自治体が管理する道路は、幹線道路から生活道路まで対象が幅広く、予算・人材が不足している。今後、地方管理道路の橋梁についても急速に高齢化が進むが、道路施設の現状が適切に把握できていない自治体が多く、維持管理が放置されている地方自治体もある。 → **発展途上国の縮図？**

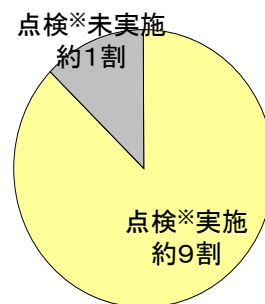
【自治体管理道路における建設年度別橋梁数】



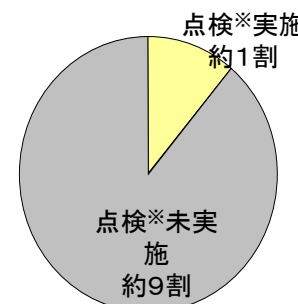
出典：道路施設現況調査「橋梁現況調査」H16. 4. 1

【橋梁の点検状況】

● 都道府県(47都道府県)



● 市町村
(政令市を含む1,768市町村)



● 点検※：定期点検を指し、日常パトロールは除く

〔国土交通省調べ〕



塩害により鉄筋がむき出し



老朽化による重量規制

『少なくとも、新設時は、建設の段階から、維持管理の在り方について十分な検討が必要！』

はじめに（続き）

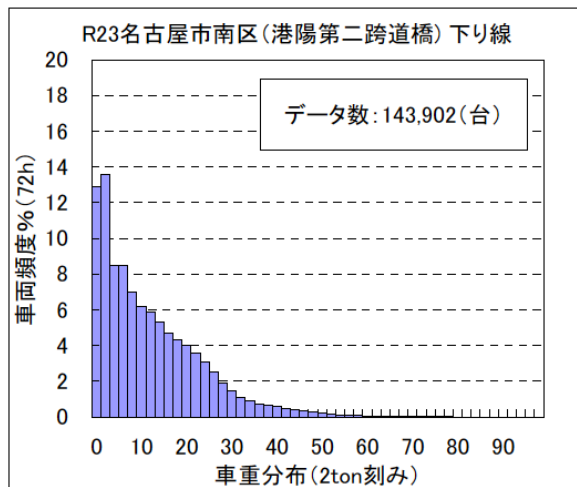


京都大学
KYOTO UNIVERSITY

過積載は、倫理の問題！

“**精神**が発展途上”

発展途上国の交通事情



調査箇所	取得データ(72時間)	
	計測台数 (台/日/車線)	最大総重量 (t)
1 R408 つくば	763	58.7
2 R354 谷和原	1015	85.4
3 R50 小山	1672	88
4 R16 市原	1826	146.4
5 R45 八戸	339	49.7
6 R13 村山	1205	68.2
7 R357 有明	6404	122.4
8 R357 市川	5989	105.5
9 R4 草加	2640	104.4
10 R18 軽井沢	6437	82.8
11 R4 猿島郡	2647	96.1
12 R16 野田	3804	89.6
13 R6 松戸	3655	94.7
14 R17 深谷	2046	97.2
15 R1 島田	4335	86
16 R22 一宮	8086	128.9
17 R23 名古屋市		
18 R19 山口村	4128	70.7
19 R2 八本松	353	83.5
20 R2 尾道	732	87.2
21 R2 下松	3818	120.1



重交通！



過積載！！



はじめに（続き）



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

ミャンマー：東南アジアの発展途上国の例



19世紀半ば、インワからアマラプラへの遷都の際に、
インワの旧王宮から運んだチーク材のみで建造。

マンダレー近郊のU-Bein木橋(1849年)と夕日
ー全長約1.2kmー

国の誇り！



多くの建造物は住民の寄付で建設！

ミャンマーの聖地：Shwedagon Pagoda@Yangon
2500年前に建設，現形は15世紀ごろ？

はじめに（続き）



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

途上国の維持管理体制？

(近代的橋梁が、建設後、10-20年で著しい損傷を生じる！)



Bailey橋の鋼桁ならびに鋼製パイプ脚の腐食@ミャンマー(イラワジデルタ地帯)



Yar Yamaung吊橋(1999)のメインケーブルの腐食@ミャンマー

<http://infra-jip.or.jp/H23BridgeMaintenanceReport.pdf>

<http://www.infra-jip.or.jp/H24.9MyanmarBridgeReport.pdf>

はじめに (続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

維持管理上, 鋼構造物の長寿命化が重要(設計の段階から)!



はじめに(続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

日本における経験: 腐食環境

厳しい塩害環境(飛来塩分)

冬季の
厳しい季節風

日本海

太平洋

台風経路

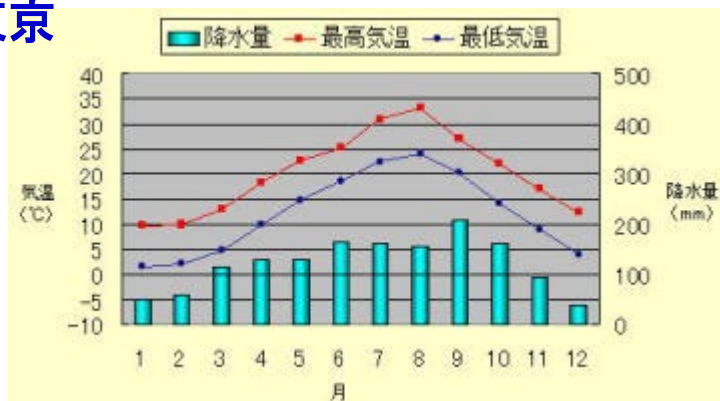


はじめに(続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

東京



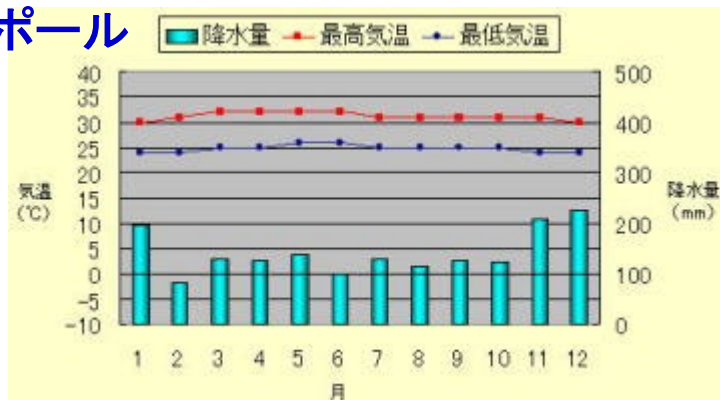
○東南アジア(アフリカ?)での腐食環境因子

→ 温湿度?

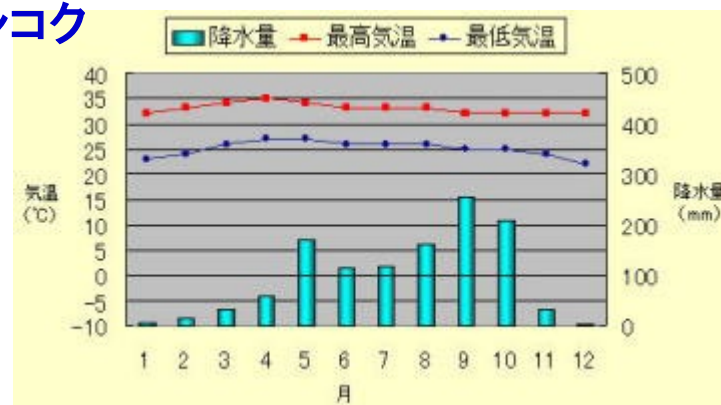
→ 飛来塩分量?

→ 日較差?

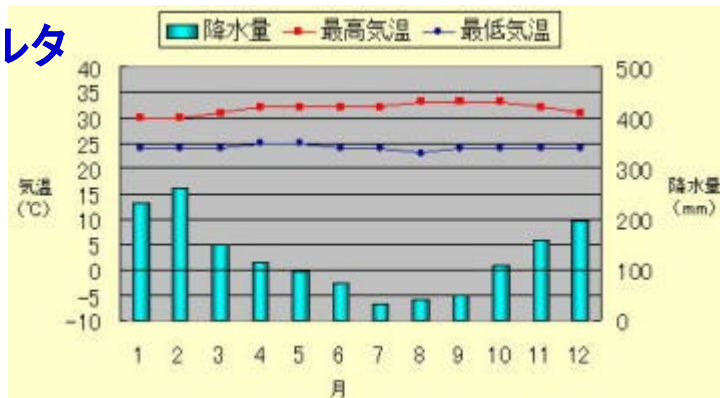
シンガポール



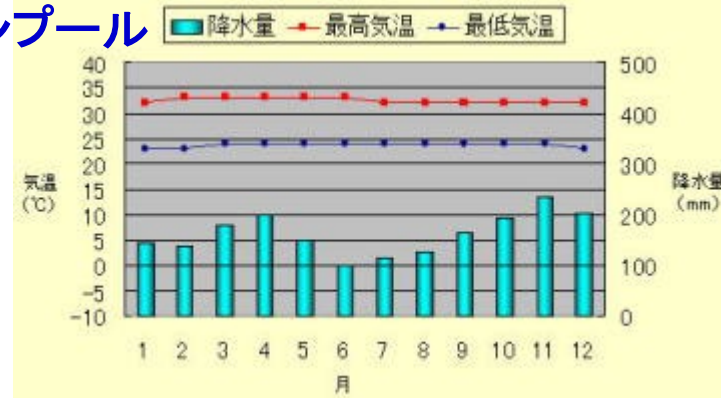
バンコク



ジャカルタ



クアラルンプール



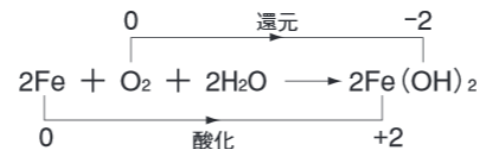
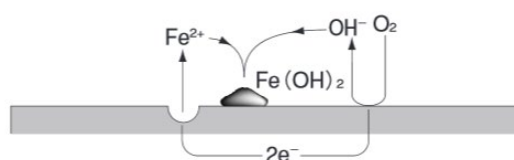
はじめに (続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

鋼材の防食メカニズムと耐食性の高い鋼材

○電気化学反応(水+酸素+?)

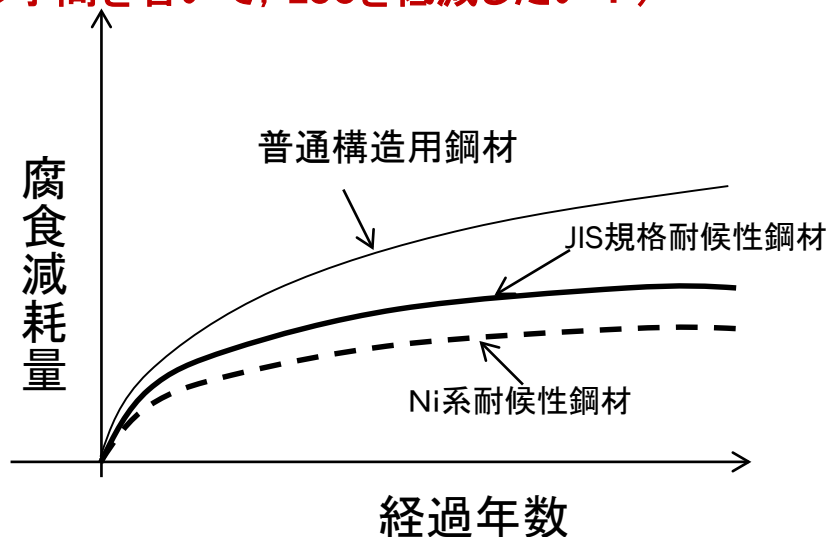


- Cu, Ni, Crなどの合金元素を適量添加することにより, 大気腐食環境下で緻密なさびを析出させる.
- その緻密なさび(保護性さび)により腐食速度を低減させる.

→ 『耐候性鋼』(メンテナンスフリー?, 再塗装の手間を省いて, LCCを低減したい!)

合金元素の含有率(%)

鋼材	Cu	Ni
普通構造用鋼材	—	—
JIS規格耐候性鋼材	0.3~0.5	0.3~0.5
Ni系耐候性鋼材	0.3~0.5	2.0~3.0
SUS304	—	8.0~10.5



※最近の開発動向: 塗装周期延長耐食鋼(日本製鉄)
 塗装寿命延長鋼(JFEスチール)

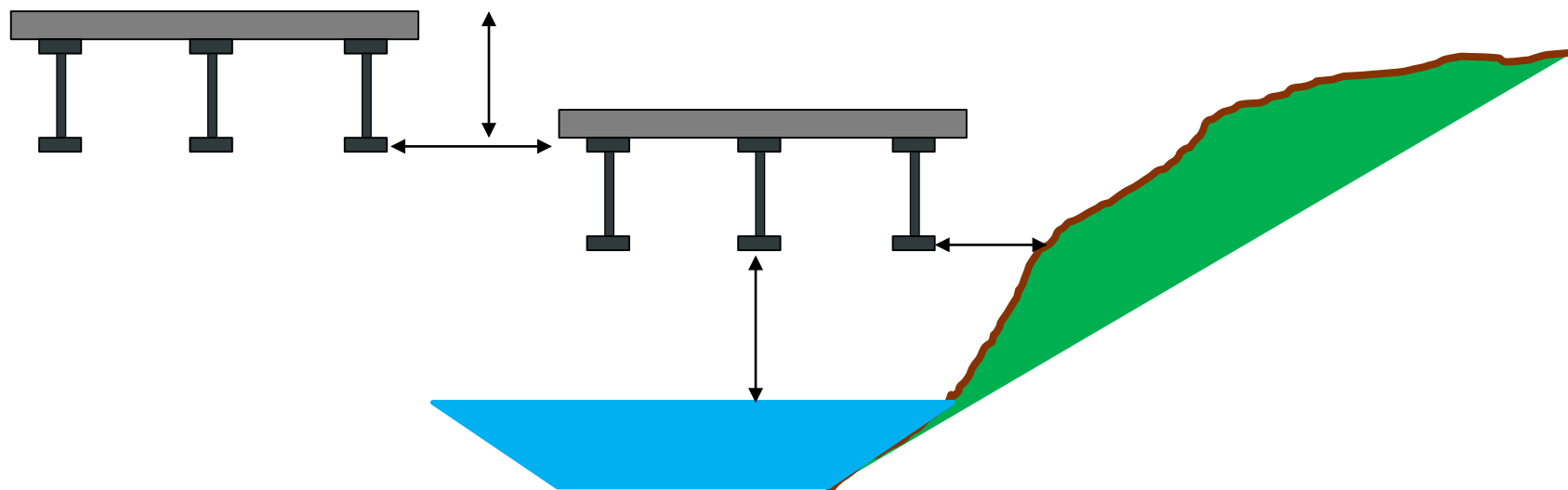
各メーカーで様々な種類がある(JIS化されていない)

はじめに(続き)

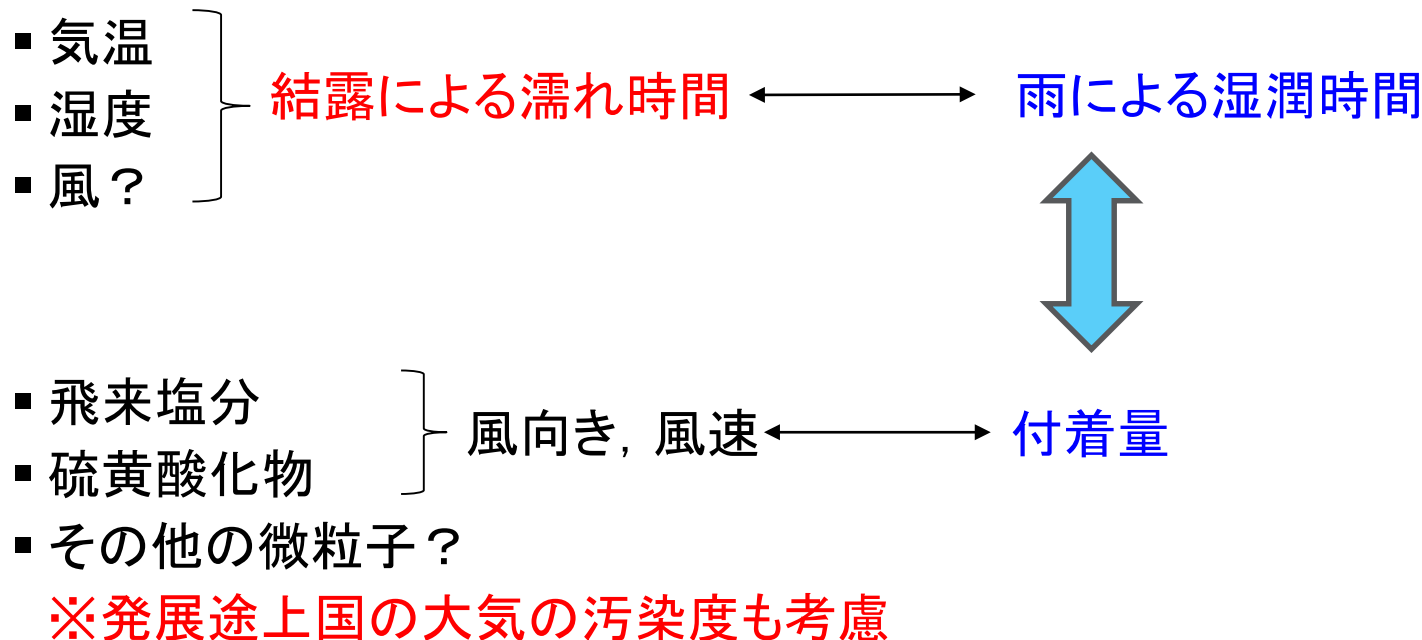
やはり、腐食損傷には、ローカルな環境が影響！

(ここでは、主に橋梁周辺を指す)

- 地域環境・・・その地域の気象，海岸との距離
- 地形環境・・・周辺の環境(近接橋梁，地山，河川，植生)
- 局部環境・・・構造詳細に起因した環境



○鋼材の腐食因子(再検討するに至った!)



はじめに
を終了

マクロ分析



鋼材の無塗装使用: 耐候性鋼材

阪神高速道路7号北神戸線における
耐候性鋼橋の防食機能に関する詳細
調査の分析(過去10数年の経過分析)

阪神高速道路(株)との共同研究
土木学会論文集A1(構造・地震工学)
Vol.68(No.1), pp.124-135, 2012.3.



7号北神戸線(1997年)で供用されている耐候性鋼橋
の防食状態を10年間にわたり追跡調査

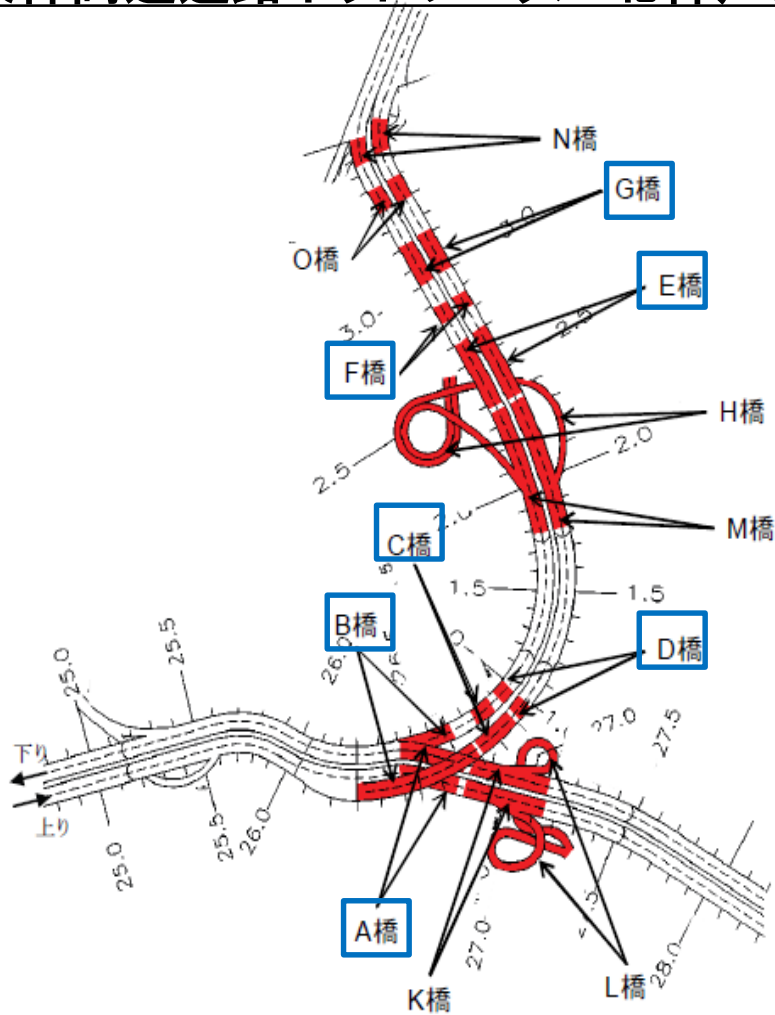
さびの組成分析や電位測定などの様々な計測によっ
て、耐候性鋼橋のより詳細な防食機能の分析



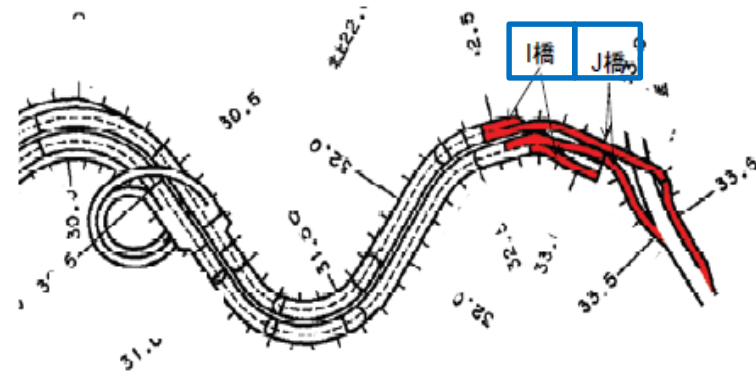
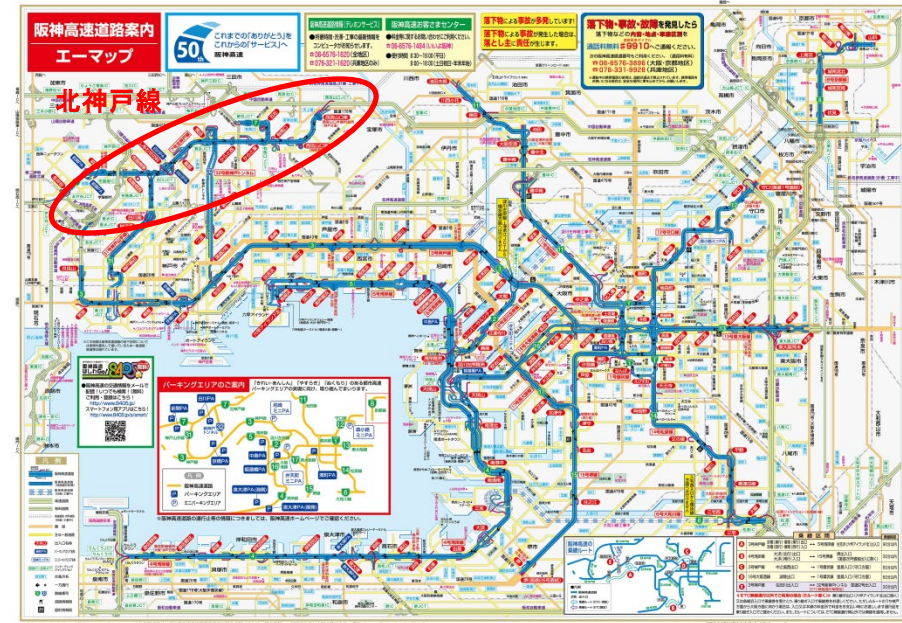
最適な維持管理方法を検討(技術がある国で！)

- 外観評価, さび厚測定
- 板厚測定
- 電位測定→腐食速度の調査
- さび組成分析→保護性さびの形成状況の調査
- 飛来塩分量測定
- 付着塩分量測定

阪神高速道路ネットワーク／北神戸線



(a) 北延伸部



(b) 東延伸部

対象橋梁

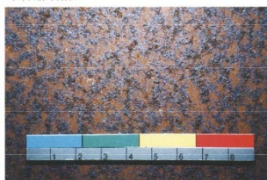
調査の位置



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

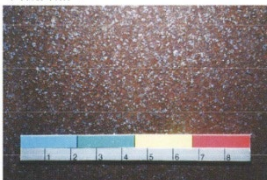
令和6年度橋梁技術発表会及び講演会/北海道地区(令和6年10月25日@かでの2・7)

外観評点5



さびの量は少なく、比較的明るい色調を呈する。
[今後の処置の目安: 不要] (約 200 μ m未満)

外観評点 4



さびの大きさは1mm程度以下で細かく均一である。
[今後の処置の目安: 不要] (約 400 μ m未満)

外観評点 3



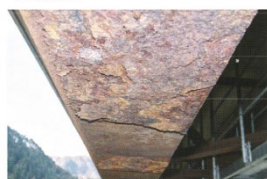
さびの大きさは1～5mm程度で粗い。
[今後の処置の目安: 不要] (約 400 μ m未満)

外観評点 2

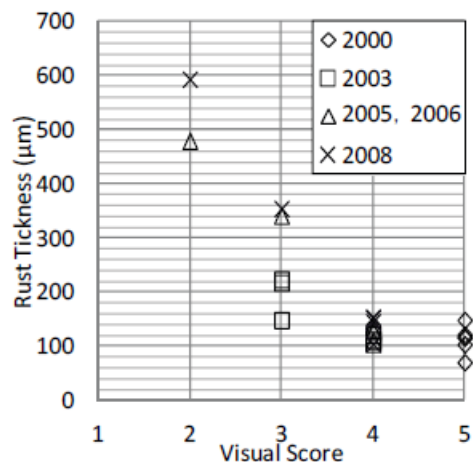


さびの大きさは5～25mm程度のうろこ状である。
[今後の処置の目安: 経過観察要] (約 800 μ m未満)

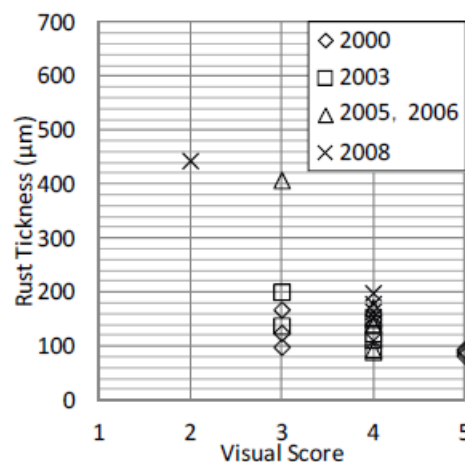
外観評点 1



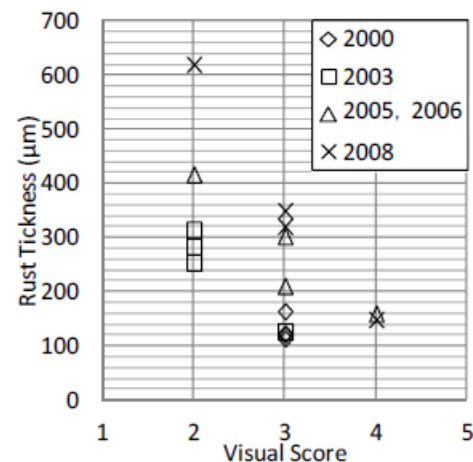
さびは層状の剥離がある。
[今後の処置の目安: 板厚測定] (約 800 μ m超)



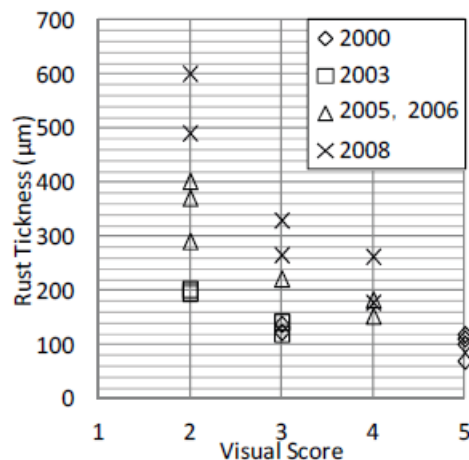
(a) B橋



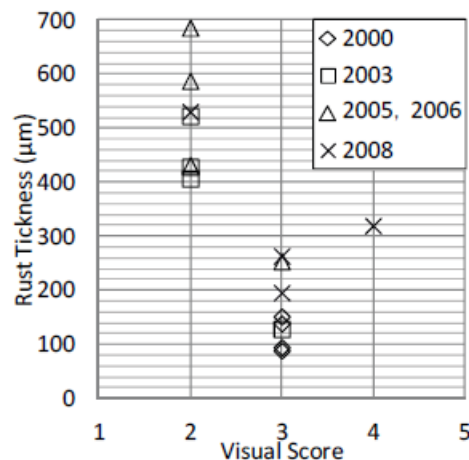
(b) C橋



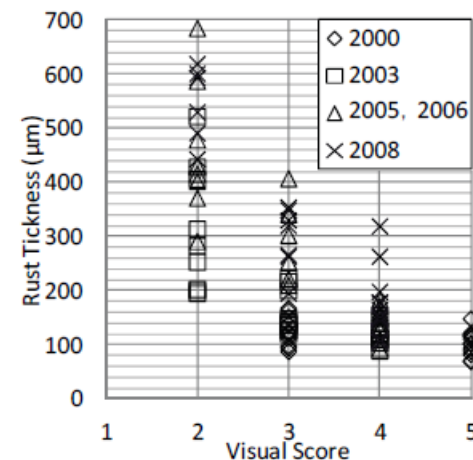
(c) D橋



(d) E橋



(e) F橋



(f) 全橋のデータ

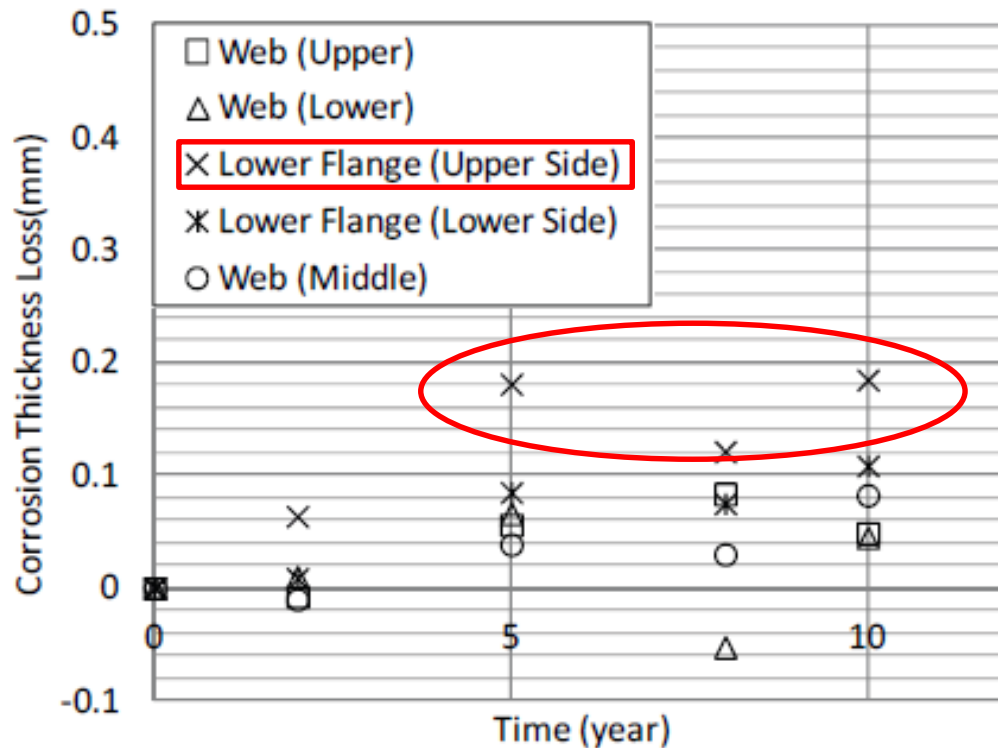
外観評点とさび厚

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0777pdf/ks077705.pdf>

外観評点とさび厚測定結果



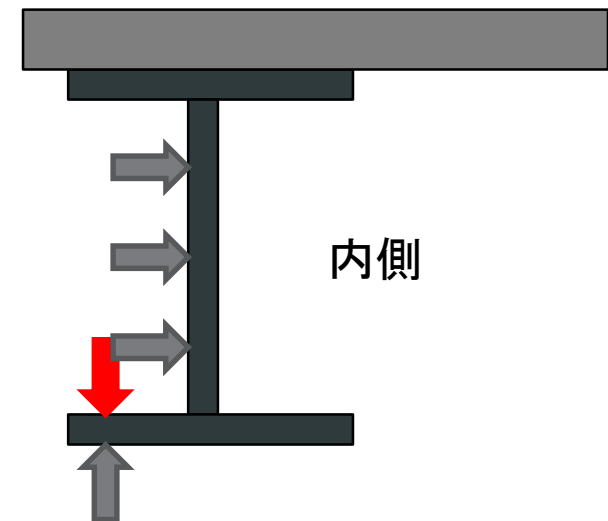
京都大学
KYOTO UNIVERSITY



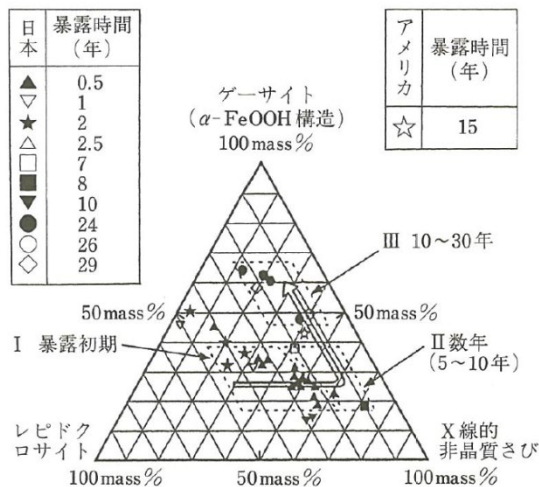
腐食厚の経年増加 → 板厚の経年減少

下フランジ上側の板厚
減少量が一番大きい.

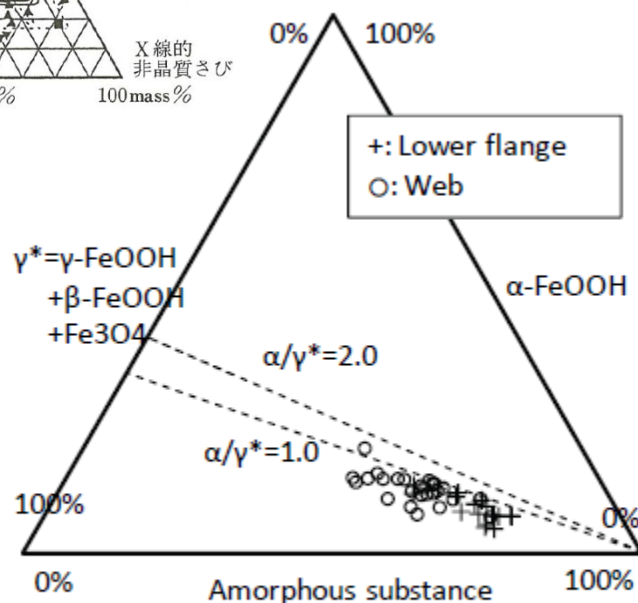
下フランジ上側 > 下フ
ランジ下側 > ウェブ



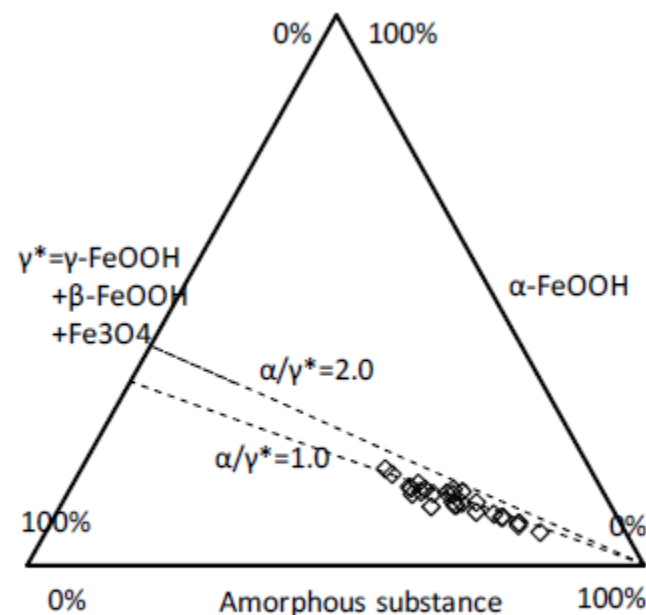
板厚測定の結果



耐候性鋼の錆は、 α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, Fe_3O_4 , 非晶質さびなどで組成されている(オキシ水酸化物など)



(a) 2003年



(b) 2008年

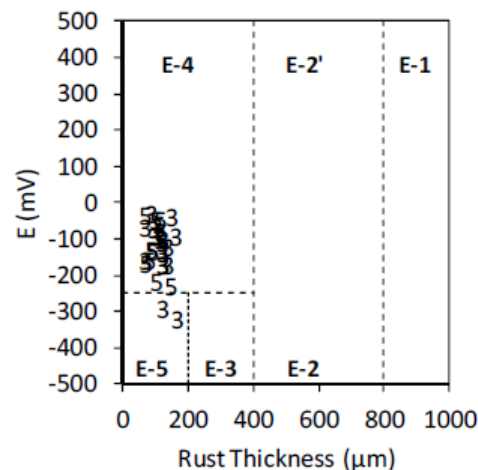
さび組成の三元系ダイヤグラム

- ・ $1.0 < \alpha/\gamma^* < 2.0$ の範囲に入るとさびの状態が良い
→ 2003年よりも2008年のほうがさびの状態が良いことがわかる

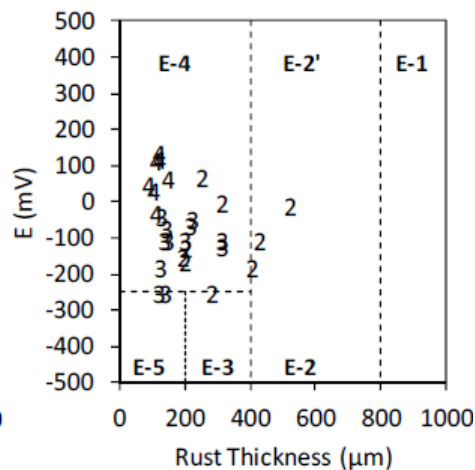
さび分析の結果



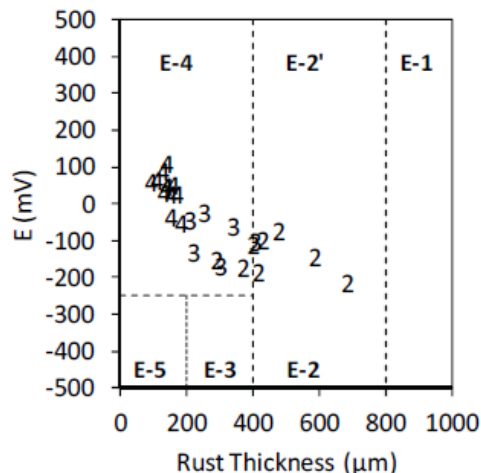
京都大学
KYOTO UNIVERSITY



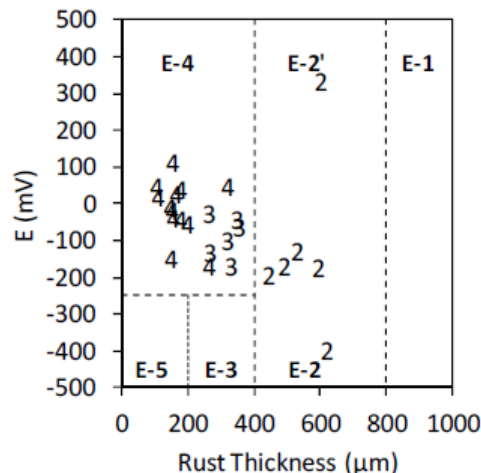
(a) 2000年



(b) 2003年

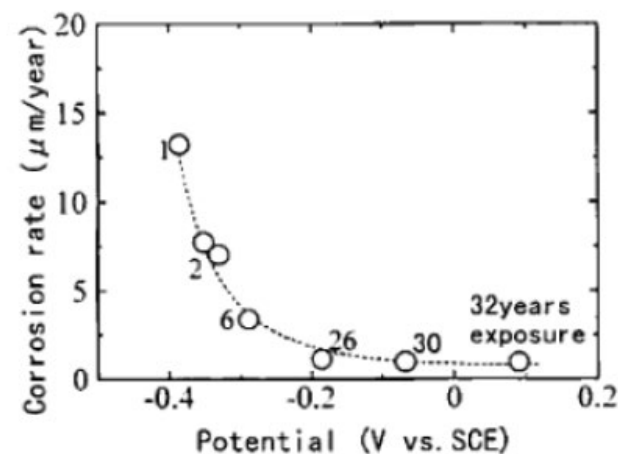


(c) 2005, 2006年



(d) 2008年

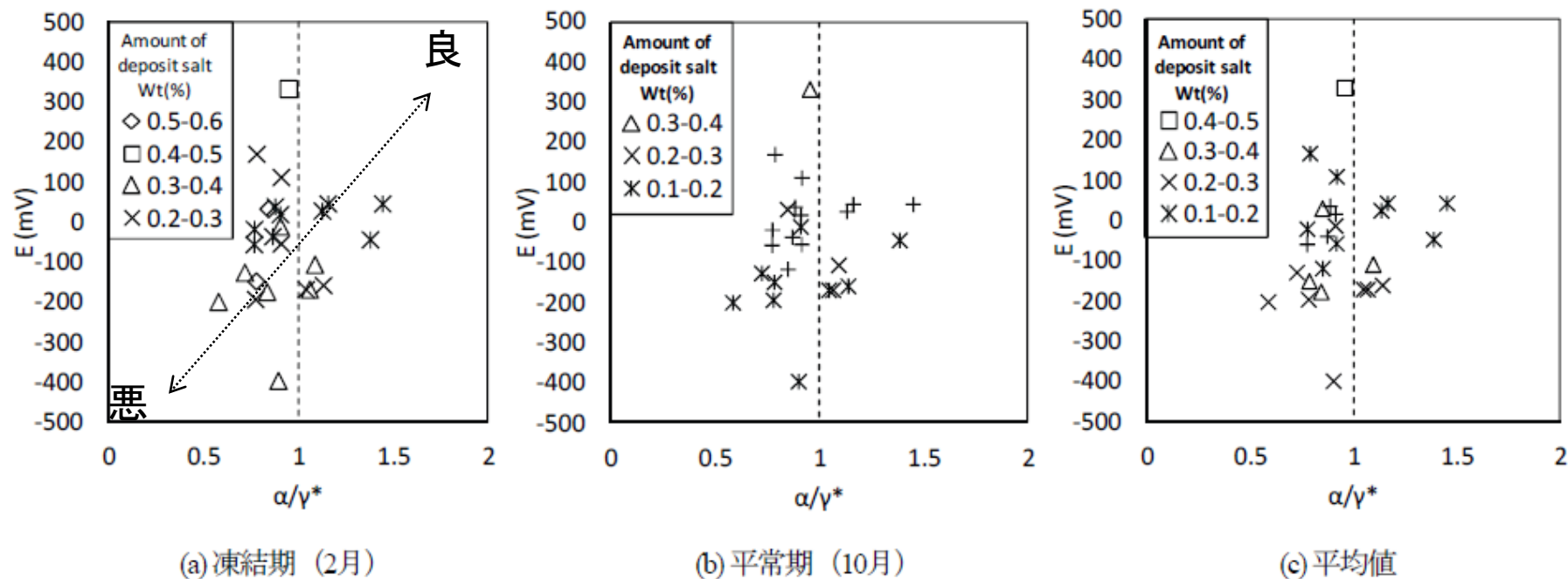
- 電位が貴(プラス)であるほど腐食速度が遅くなる。
- さび厚と電位との関係から評価すると, 外観評点の5段階評価と同等の評価が可能。



電位とさび厚と外観評点との関係



京都大学
KYOTO UNIVERSITY



電位と α/γ^* と付着塩分量との関係

付着塩分量が多いところほど保護性のさびが形成しにくく、電位も卑(マイナス)であることがわかる

付着塩分量, 電位とさび組成



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

ミクロ分析



約1/3終了

耐候性鋼橋の建設位置や構造詳細に 起因する地形・局部腐食環境の調査 (1年間のモニタリング)

阪神高速道路(株)との共同研究
(フィールドの提供)

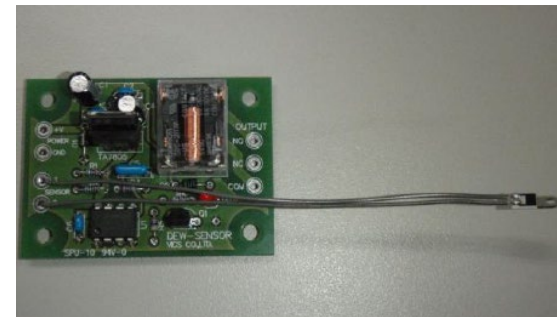


橋梁の構造詳細や機能低下に起因する局部環境および地形環境に着目

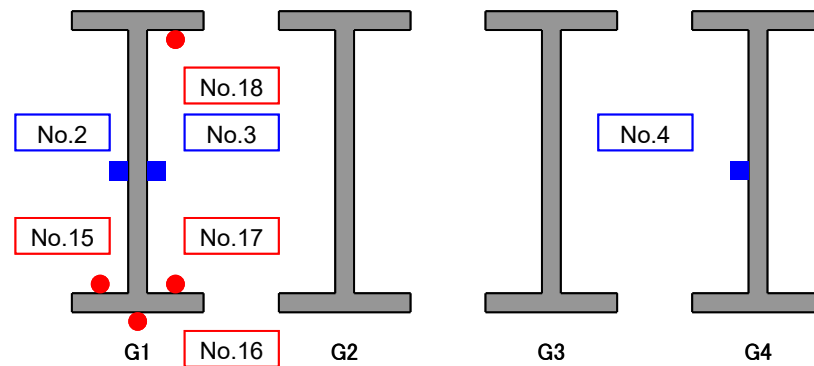
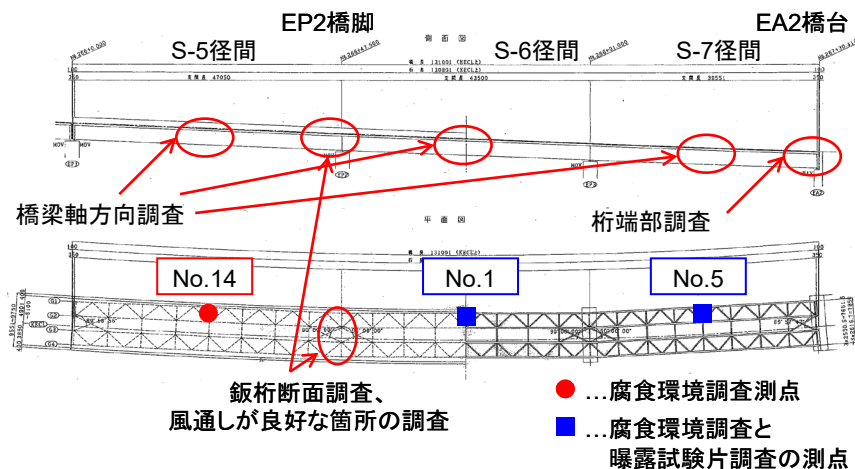
- 橋軸方向, 断面内の環境の違い
- 局部腐食が発生している箇所

腐食量と付着塩分量や温湿度との関係を詳細に調査

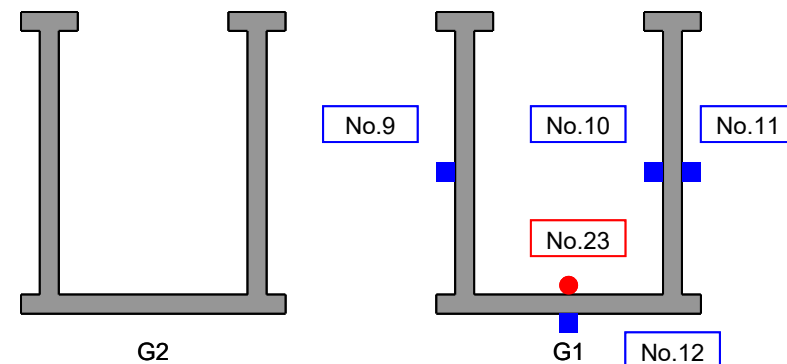
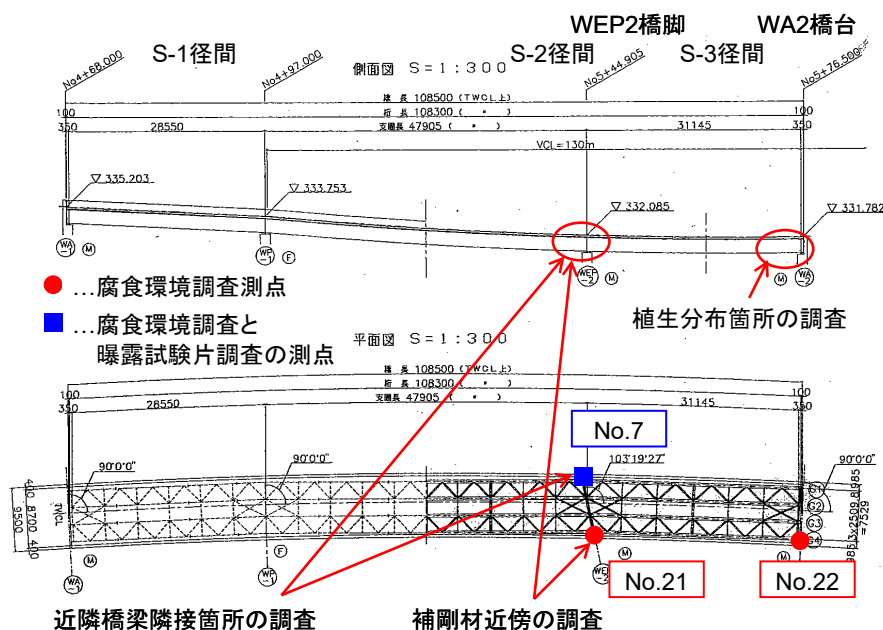
- 気温
 - 湿度
 - 鋼材温度
 - 濡れ時間
 - 付着塩分量
 - ワッペン試験
- 温湿度ロガー
- 温度ロガー
- 結露センサー
- 表面塩分濃度計
- ワッペン試験片による腐食量



令和6年度橋梁技術発表会及び講演会/北海道地区(令和6年10月25日@かでの2・7)



鋼桁断面@EP2橋脚



地山に近い

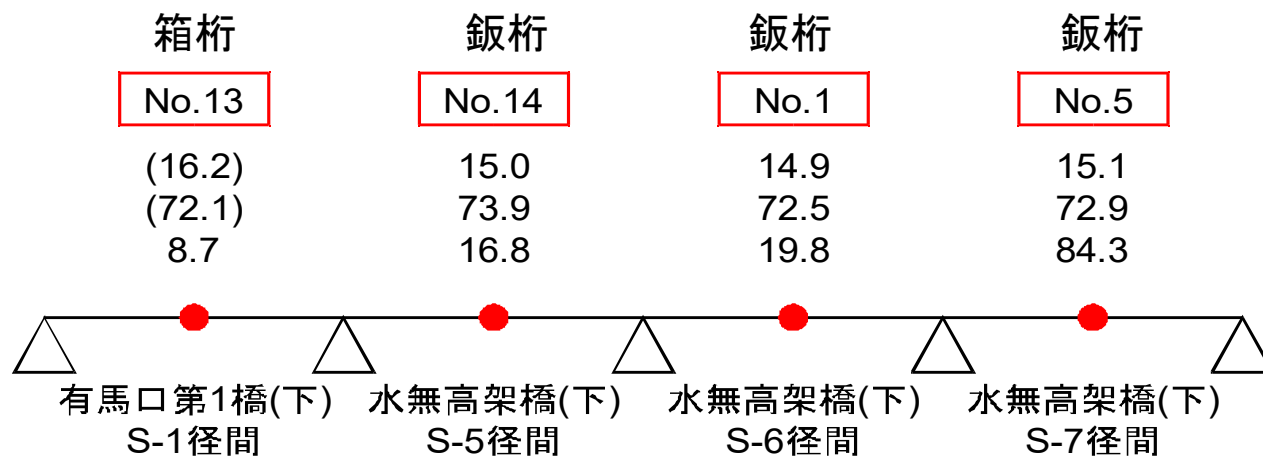
● ...腐食環境調査測点
■ ...腐食環境調査と曝露試験片調査の測点

箱桁断面径間(S-5径間の左)

調査の位置

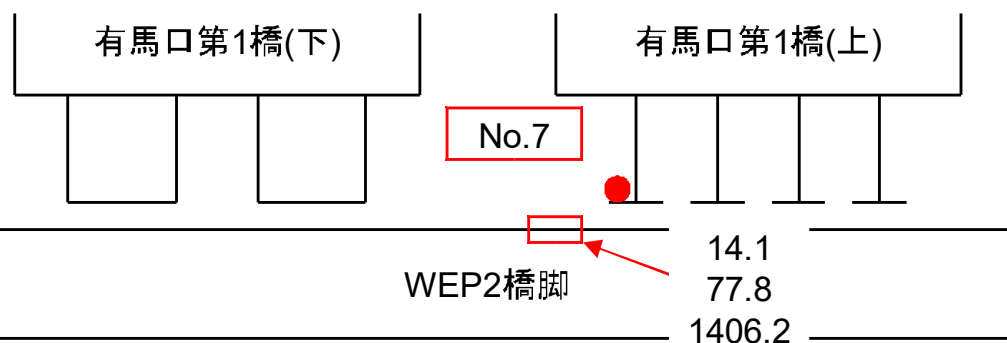


京都大学
KYOTO UNIVERSITY



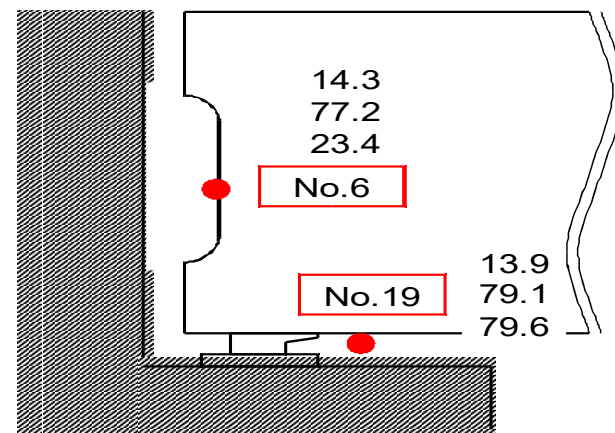
橋梁軸方向調査における雰囲気気温度[℃]、相対湿度[%]
および付着塩分量[mg/m²]の分布

鈑桁断面@WEP橋脚

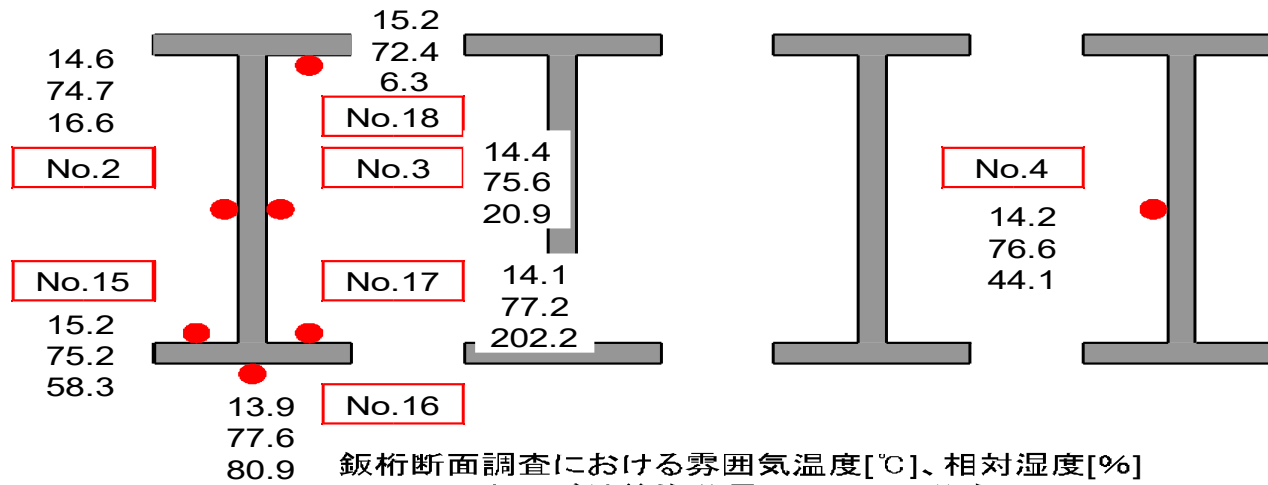


近隣橋梁隣接箇所の調査における雰囲気気温度[℃]、相対湿度[%]
および付着塩分量[mg/m²]の分布

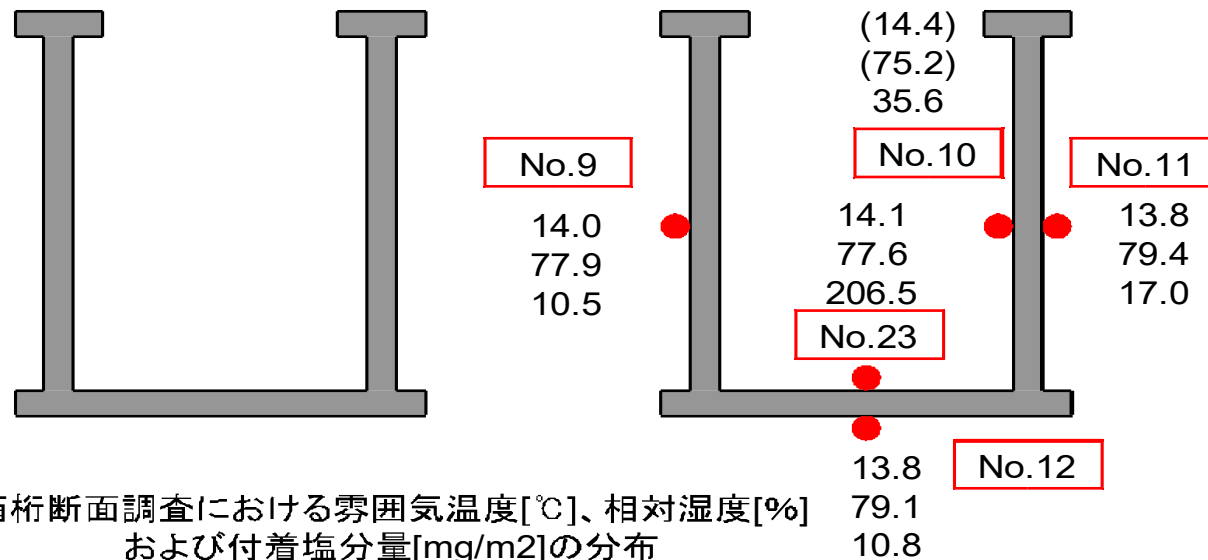
S-7径間桁端@EA2橋台



桁端部調査における雰囲気気温度[℃]、相対湿度[%]
および付着塩分量[mg/m²]の分布

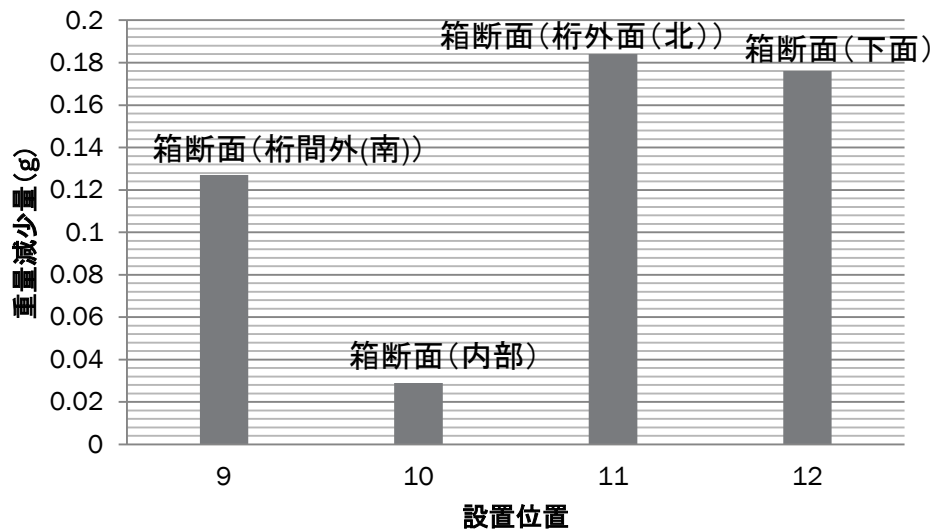
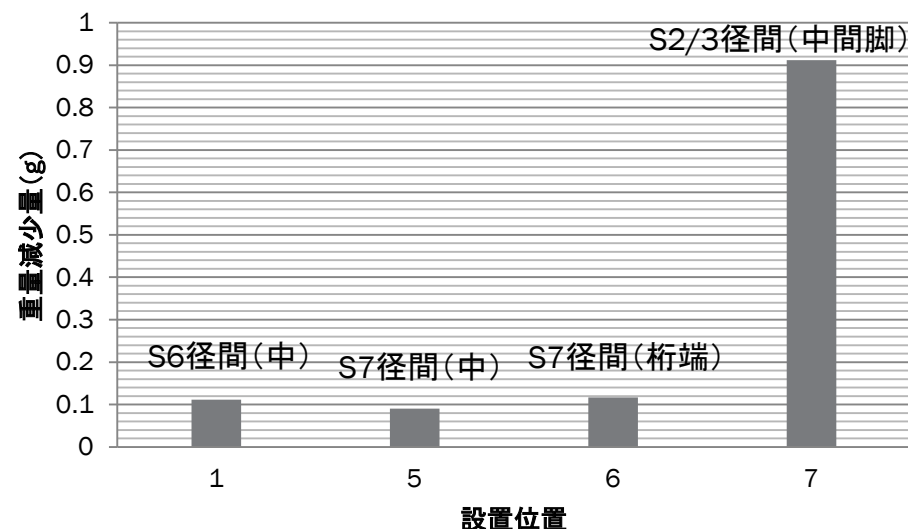
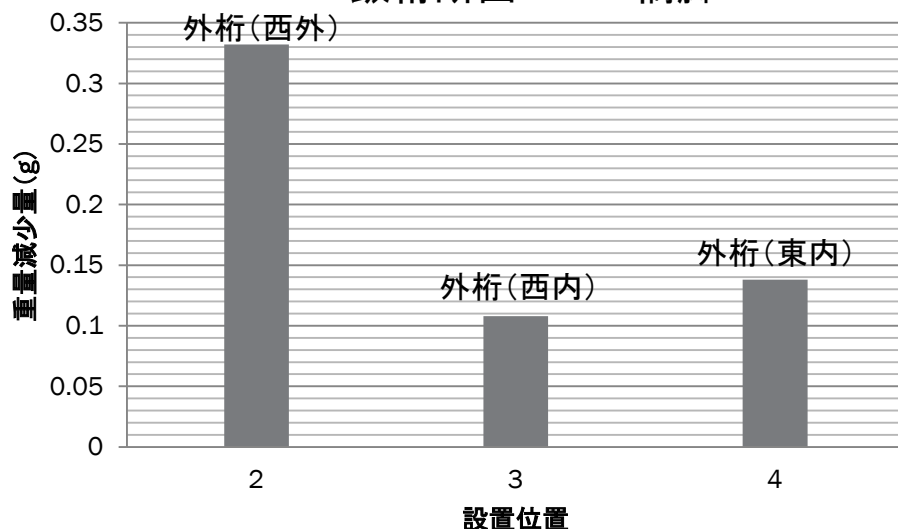


鋼桁断面調査における雰囲気気温度[°C]、相対湿度[%]
および付着塩分量[mg/m²]の分布

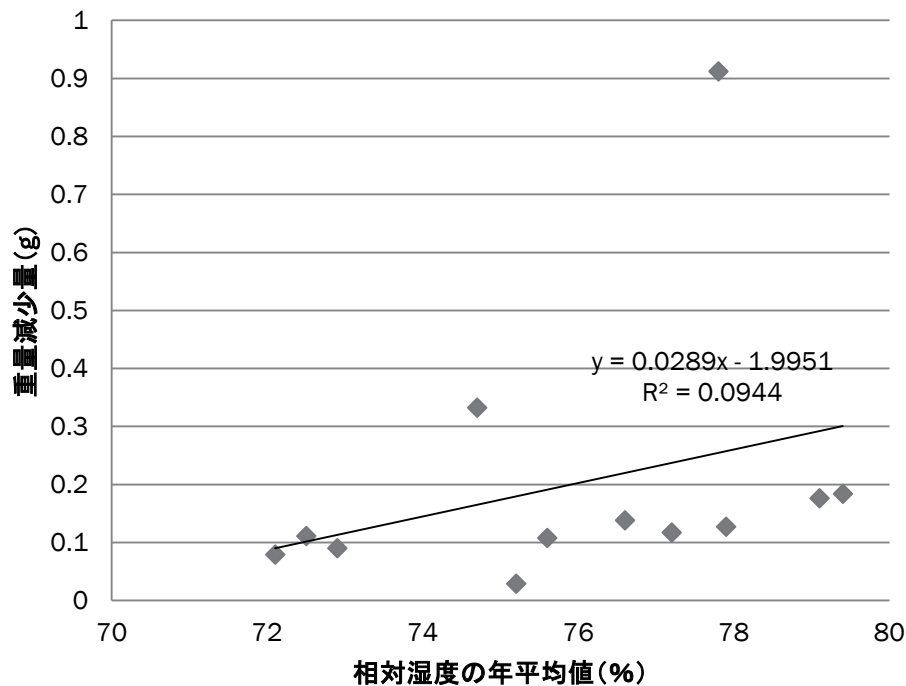


箱桁断面調査における雰囲気気温度[°C]、相対湿度[%]
および付着塩分量[mg/m²]の分布

鈹桁断面@EP2橋脚

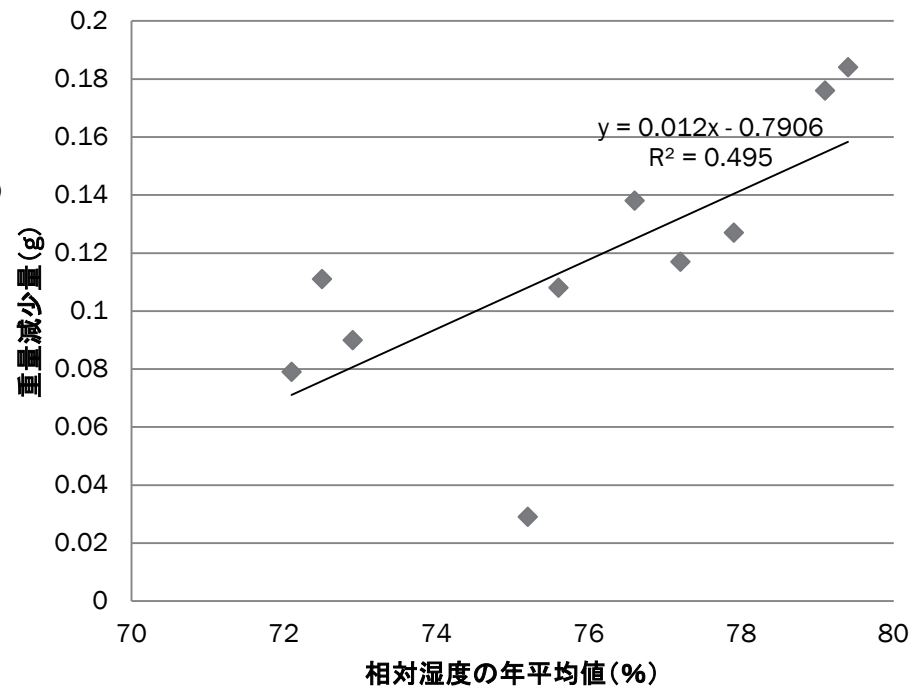


- ・ No. 2は濡れ時間の影響が大きい
- ・ No. 7は隣接橋梁からの飛来塩分の影響が大きい
- ・ No. 11, 12は湿度の影響か？



- ・ 飛来塩分による影響の大きいNo.7を省くと...

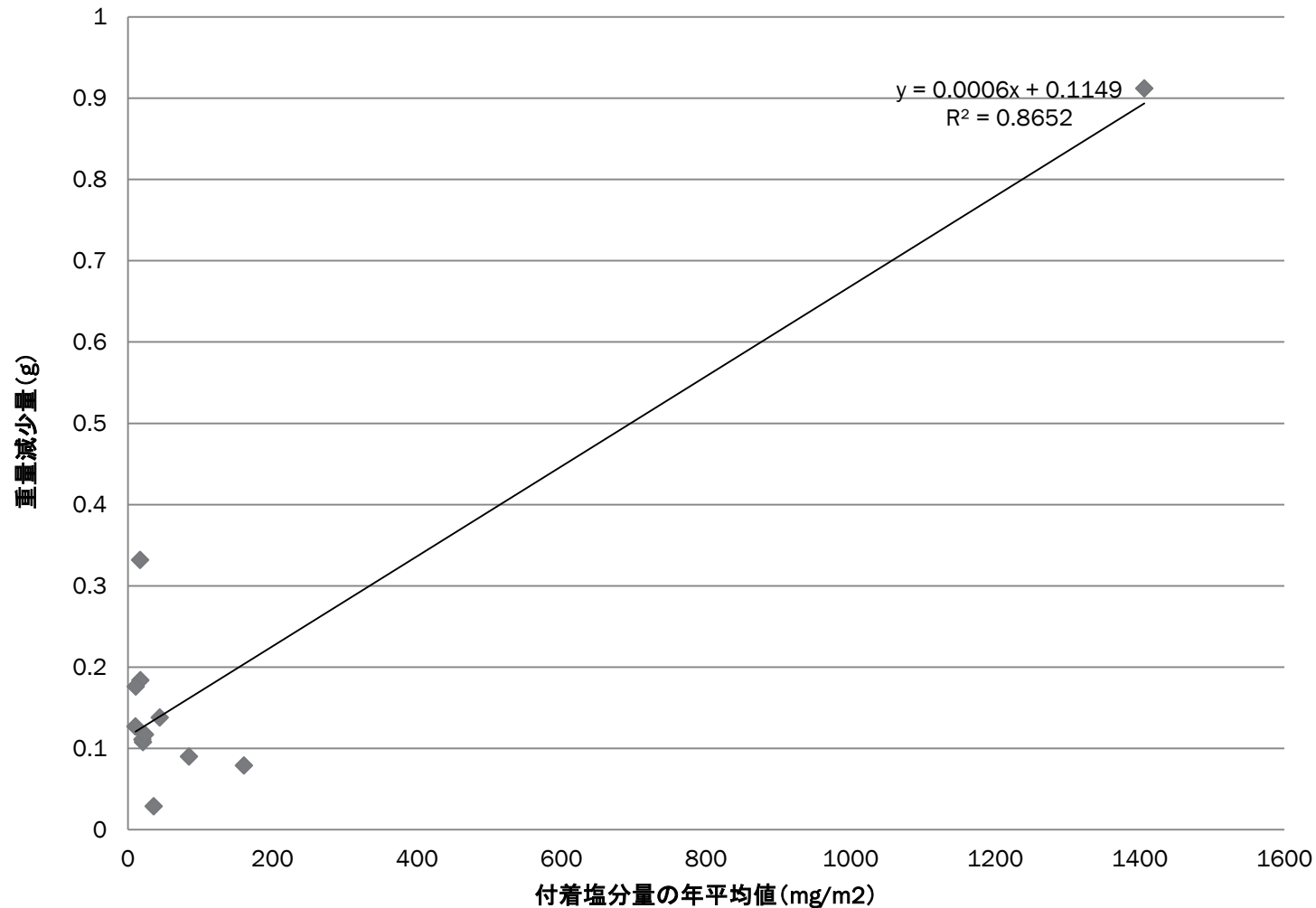
→相対湿度と相関高い？



相対湿度と腐食量との関係



京都大学
KYOTO UNIVERSITY



付着塩分を減らし、湿潤状態(相対湿度?)を継続させない!

付着塩分量と腐食量との関係



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

グローバル／ダイナミック



残りの1/3: 本題!

アジア・メガシティにおける鋼材の 曝露試験および腐食環境測定

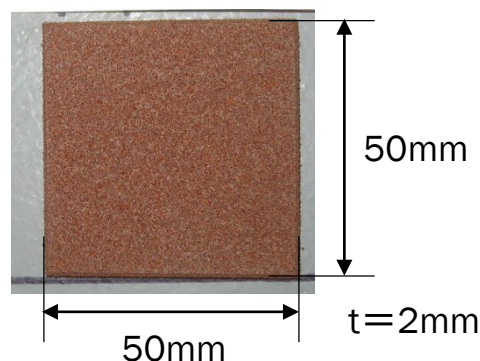
- ・日本鉄鋼連盟・鋼構造研究教育助成事業(2010年度)
- ・GCOEプログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」の現地教育研究のサブプロジェクト(終了)ー
- ・KUSPIRITS:「知の越境」融合チーム研究プログラム(平成25・26年度)
- ・科学研究費補助金 基盤研究B(海外調査) 平成27年度～30年度
- ・JICA/工学教育拡充プロジェクト
- ・JSCEインフラマネジメント技術国際展開研究

目的: 日本よりも高温多湿・高温乾燥, 大気環境の厳しいアジア各国の都市部で鋼材(特に, 無塗装使用の耐候性鋼材)を用いた構造物の維持管理性を検討するため, 大気曝露試験を行う. 特に, 地域間での環境の差と腐食との関連性を検討する.

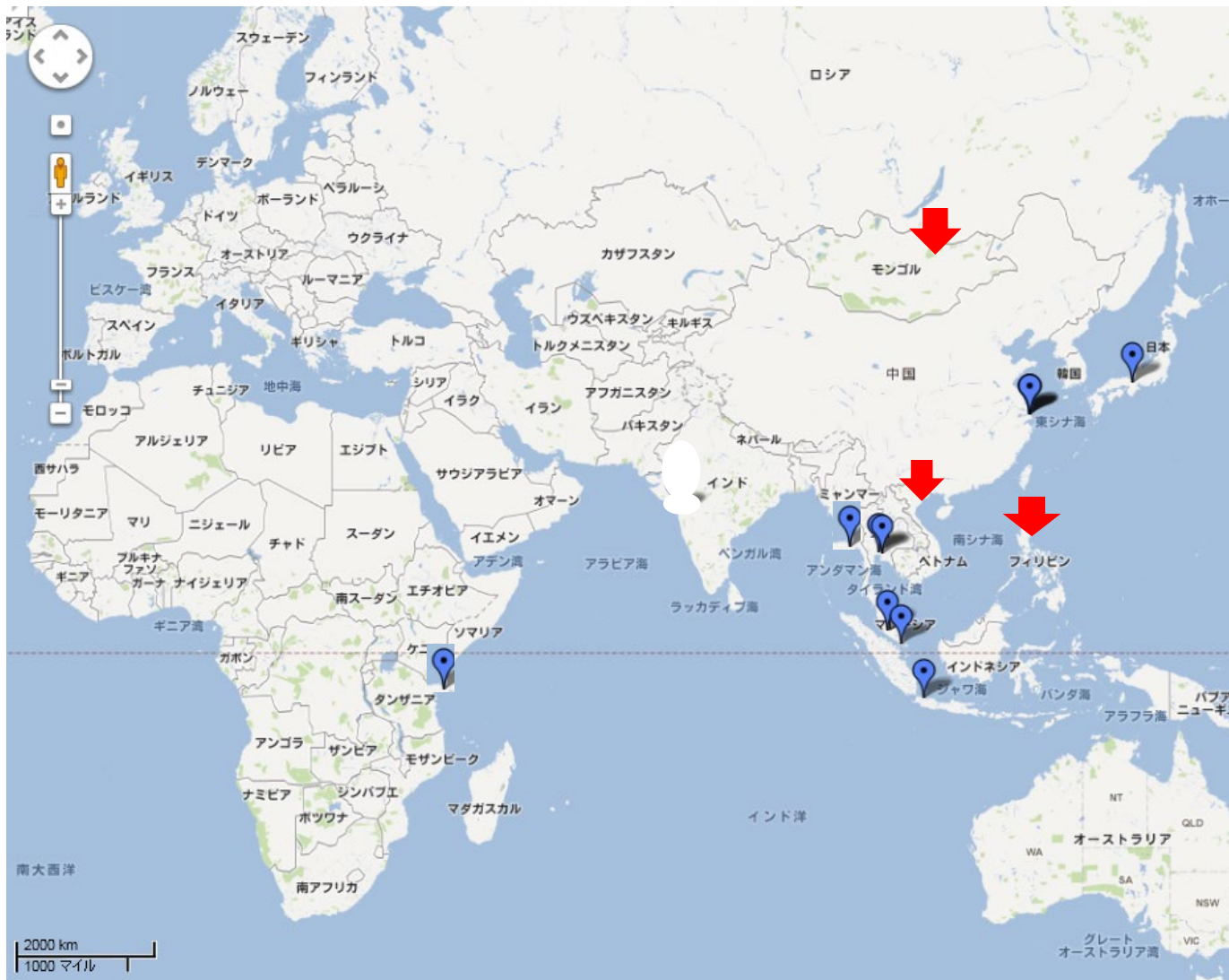
調査方法:

- 鋼材曝露試験(ワッペン試験: 雨かがり無し)
- 腐食環境測定(温湿度, 飛来塩分, 二酸化硫黄)

一部地域のみ



ワッペン試験片



📍 調査済み

- ・シンガポールシティ
- ・クアラルンプール
- ・バンコク／チョンブリ
- ・上海
- ・ヤンゴン／マンダレー
- ・モンバサ
- ・ジャカルタ
- ・京都



調査予定して実施せず
(予算の関係で断念！)

- ・マニラ
- ・ウランバートル
- ・ハノイ

調査済みおよび調査できなかった都市



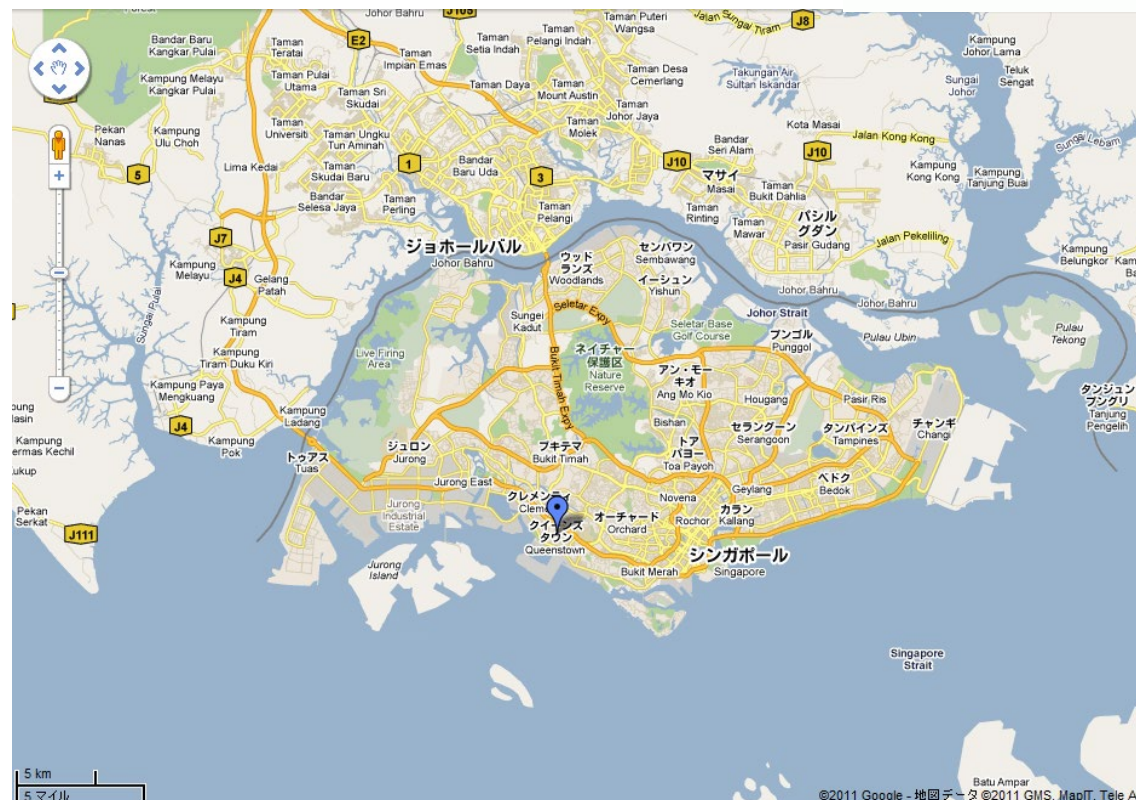
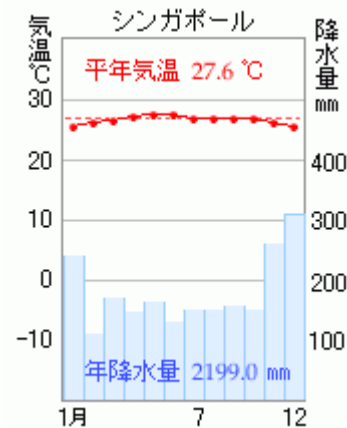
京都大学
KYOTO UNIVERSITY

アジアの代表的メガシティの比較

国名	都市名	年間平均気温 (℃)	年間平均湿度 (%)	年間降水量 (mm)	都市人口 (人)	人口密度 (人/km ²)
シンガポール	シンガポールシティ	27.4	84	2087.3	5,075,000	10,900
中国	上海	16.1	80	1155.0	18,400,000	6,400
タイ	チョンブリ	28.6	78	1529.6	6,980,000	3,200
	バンコク					
マレーシア	クアラルンプール	27.0	82	2389.7	5,100,000	2,600
インドネシア	ジャカルタ	26.4	79.5	2097	10,680,000	16,704
日本	京都	15.6	67	1547.8	1,387,000	1,700

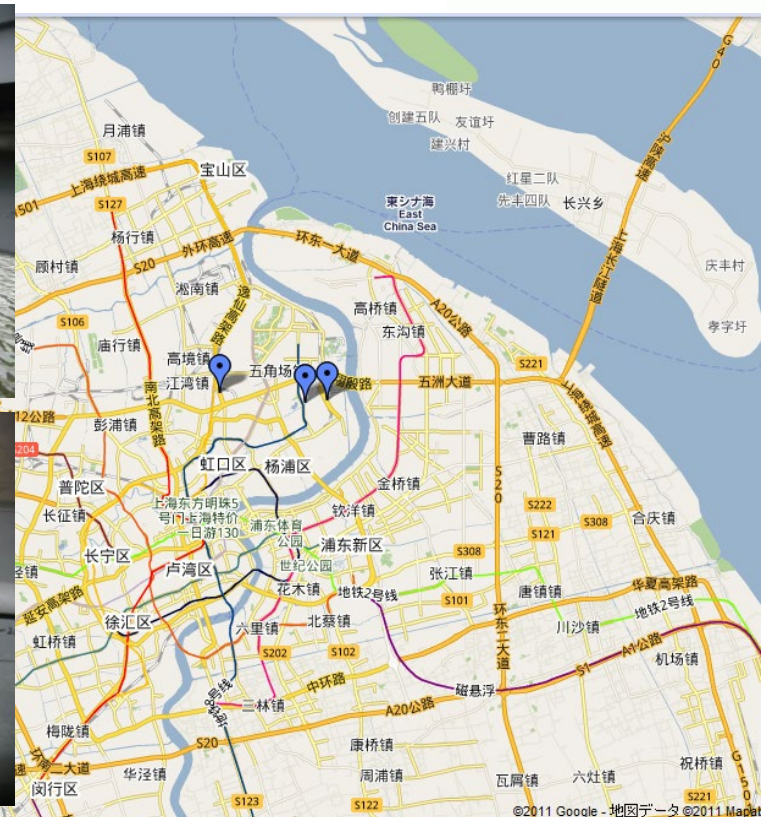
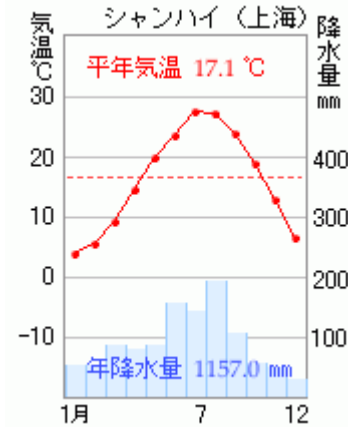
事例1:シンガポールシティ(シンガポール)

- 2009年3月からシンガポール国立大学の協力のもと実施
※離岸距離1km



事例2: 上海(中国)

- 2009年8月から同済大学の協力のもと実施
※離岸距離10km



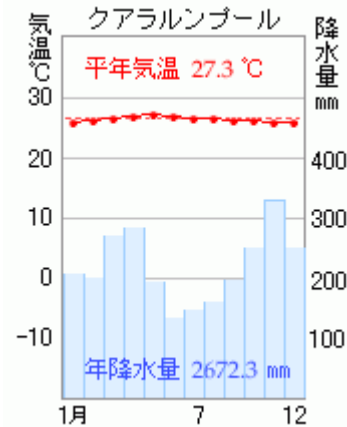
各都市の曝露試験状況(続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

事例3: クアラルンプール(マレーシア)

- 2011年2月からCREAM(マレーシア建設材料研究所)の協力のもと実施 ※離岸距離42km



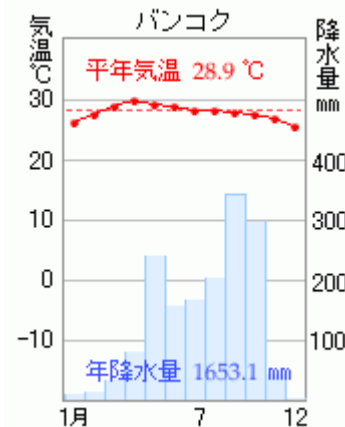
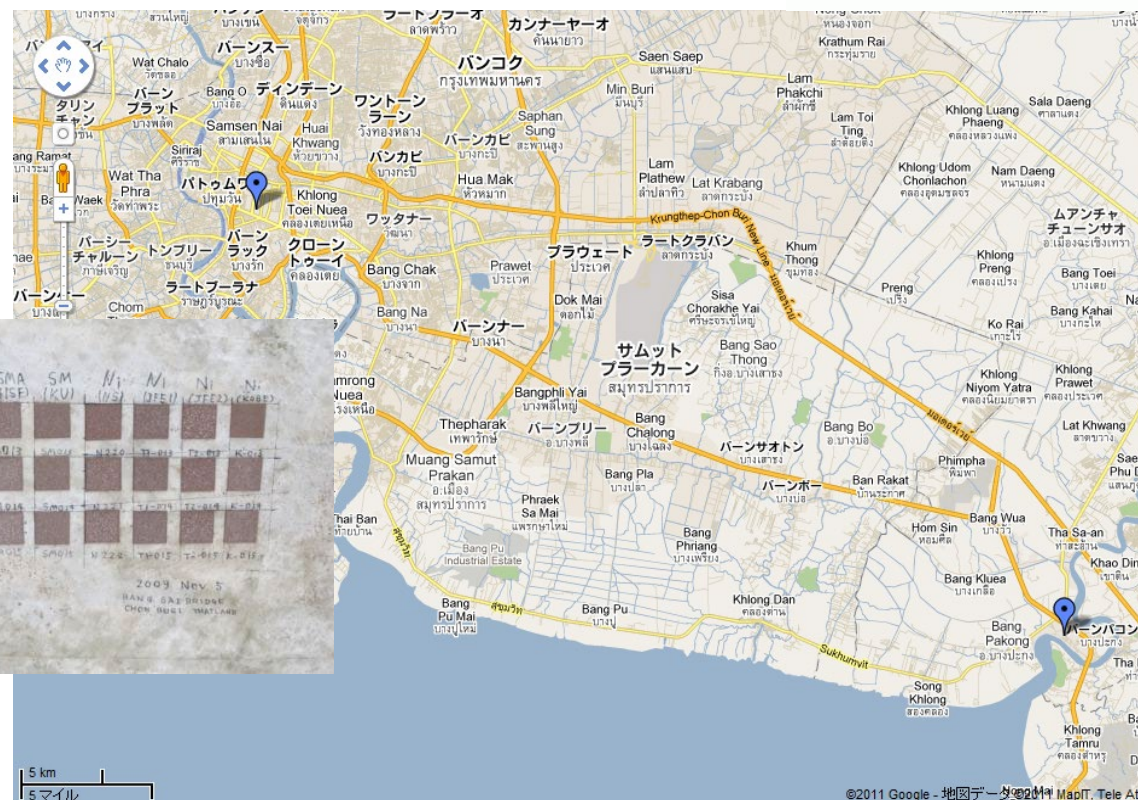
各都市の曝露試験状況(続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

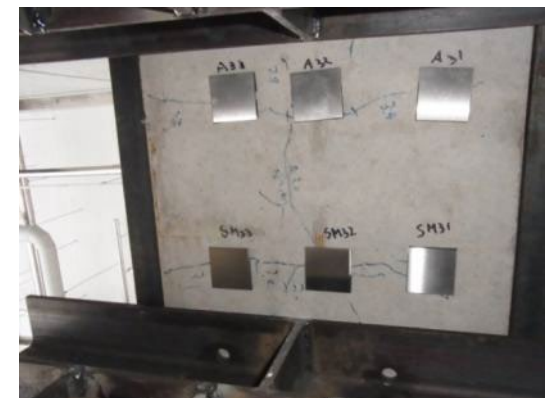
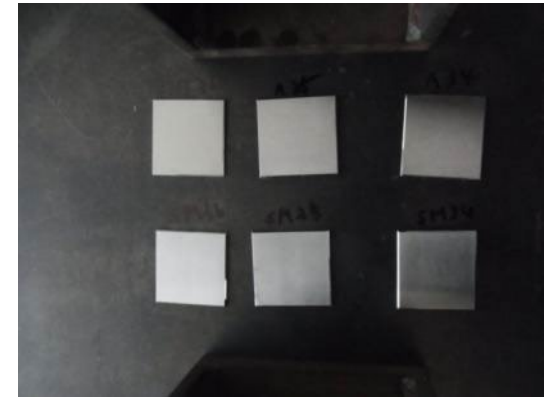
事例4: バンコク・チョンブリ(タイ)

- 2009年11月からチュラロンコン大学の協力のもと実施
※離岸距離0km(チョンブリ), 22km(バンコク)



京都(日本)

- 鋼材への貼付とコンクリートへの貼付での違い
 - 他国との比較
 - 2011年2月から開始
- ※離岸距離41km



1・3年曝露時の腐食減耗量

曝露地点		腐食減耗量(1年曝露／3年曝露)[mm]		
		SM	SMA	
			Aシリーズ	Mシリーズ
シンガポール	上面	0.028/0.080	-/-	0.014/0.031
	ウェブ	-/-	-/-	0.010/0.025
	下面	0.022/0.033	-/-	0.011/0.030
上海	逸仙高架橋*	0.025/0.050	0.025/0.048	0.023/0.045
	中環路	0.025/0.053	0.023/0.050	0.021/0.046
	環保広場	0.021/0.042	0.019/0.038	0.016/0.034
チョンブリ**		0.008/0.010	0.008/0.010	0.007/-
バンコク		0.01/0.008	0.0045/0.009	0.005/-
クアラルンプール		0.018/0.010	0.047/0.012	0.008/-
ジャカルタ (秘密保持契約有)		-/-	-/-	-/-
京都	コンクリート版	0.009/0.009	0.010/0.031	-/-
	鋼版	0.012/0.010	0.032/0.010	-/-

* 逸仙高架橋では、2-3年目の曝露期間中に塗装され、参考値として記す

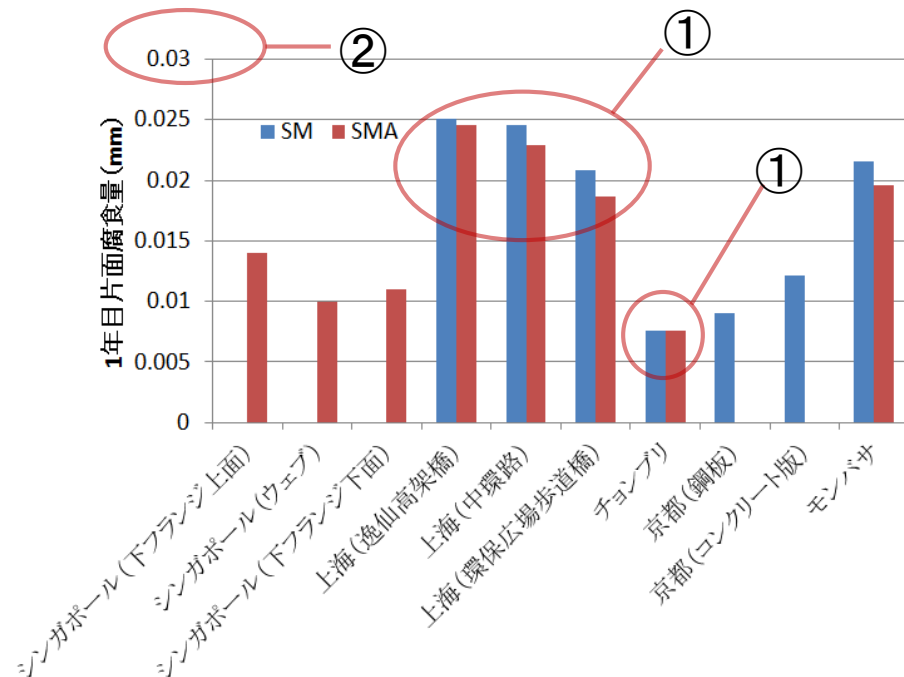
** 曝露期間は、1.3年および3.3年

結果の概略

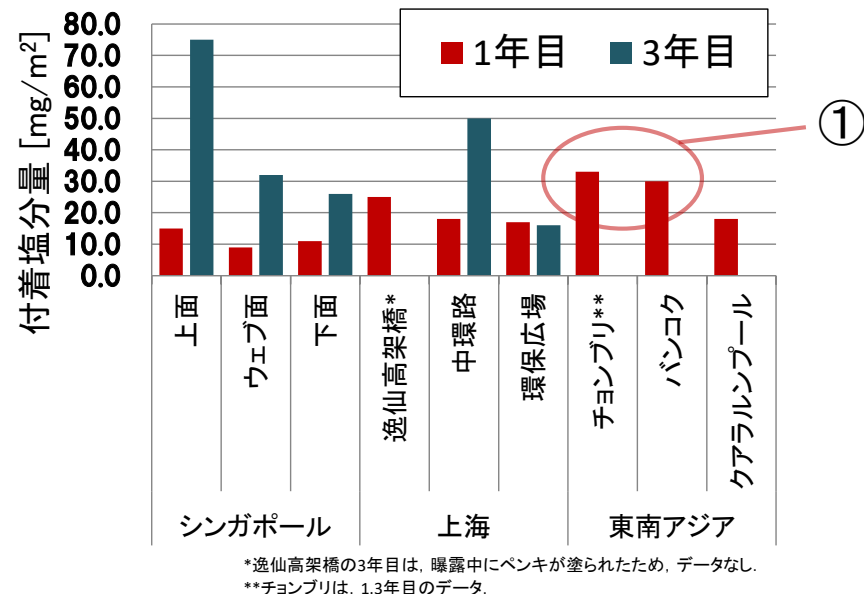


耐候性鋼材の腐食減耗特性

● 1年目腐食減耗量



● 付着塩分量



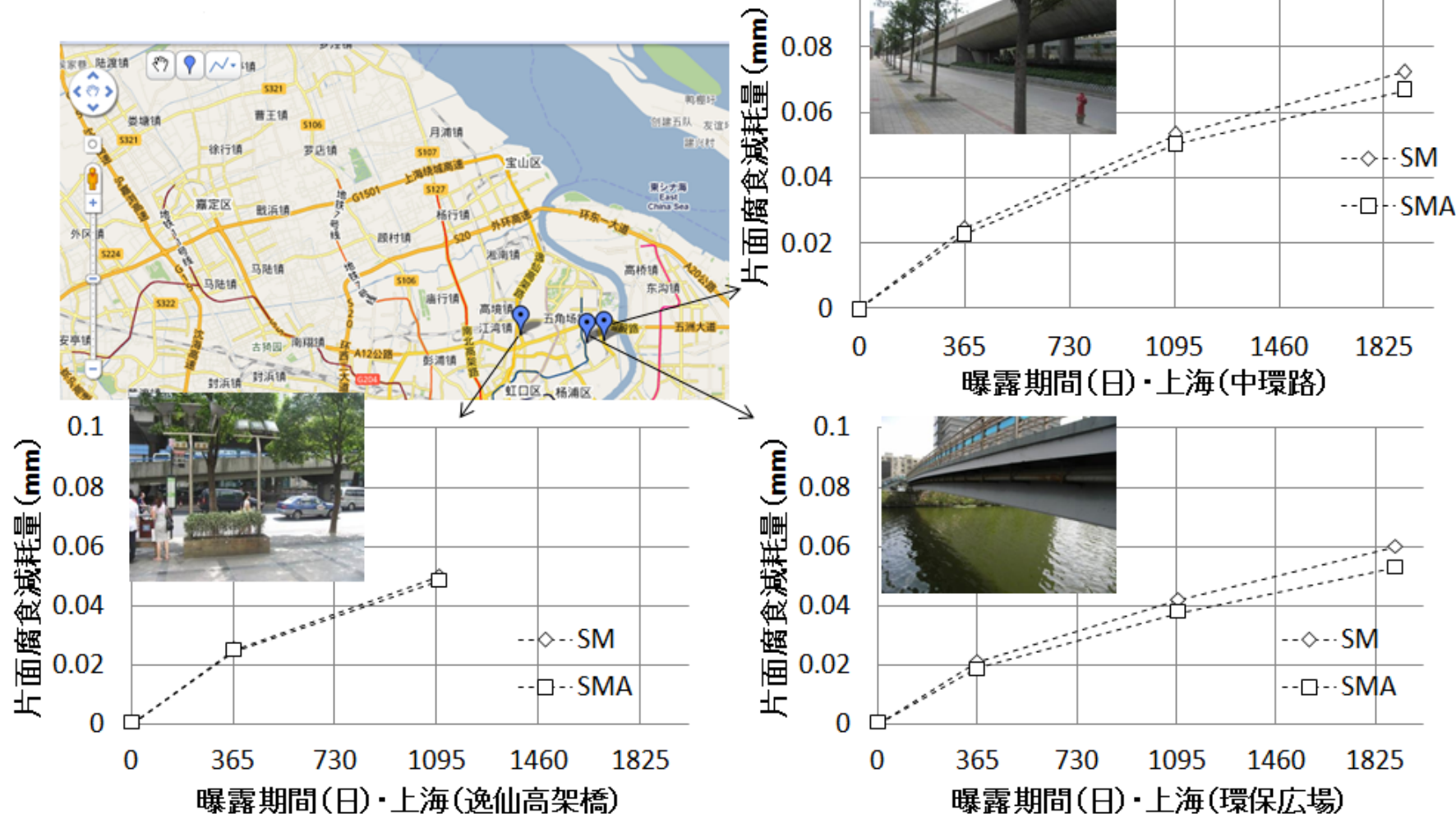
- ① 耐候性鋼材の腐食減耗量が最も多いのは上海で、最も小さいのはタイ。
→しかし、タイでは、付着塩分量が相対的に多い。
- ② 日本での耐候性鋼材の適用条件は、「1年目の腐食減耗量が0.03[mm]以下」となるので、全ての地点で条件を満たしている。

結果の一例



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

耐候性鋼材の腐食減耗量の経時変化 (例: 中国・上海市)



※3年回収前に塗装されてしまった！

結果の一例

● 耐候性鋼材の腐食減耗挙動の評価式(紀平ら)

$$Y = A_{SMA} \cdot X^{B_{SMA}}$$

Y: 腐食減耗量[mm], X: 時間[年]

A_{SMA} , B_{SMA} : JIS耐候性鋼材(SMA材)に対する腐食速度パラメータ



B_{SMA} の算出



A_{SMA} と B_{SMA} の関係式

A_{SMA} の算出



Zと A_{SMA} の関係式

Zの定義式



大気環境腐食性指標Z

$\left\{ \begin{array}{l} TOW: \text{年間ぬれ時間[h]} \\ T: \text{年平均気温[K]} \\ W: \text{年平均風速[m/s]} \\ C: \text{飛来塩分量[mdd]} \\ S: \text{硫黄酸化物量[mdd]} \end{array} \right.$

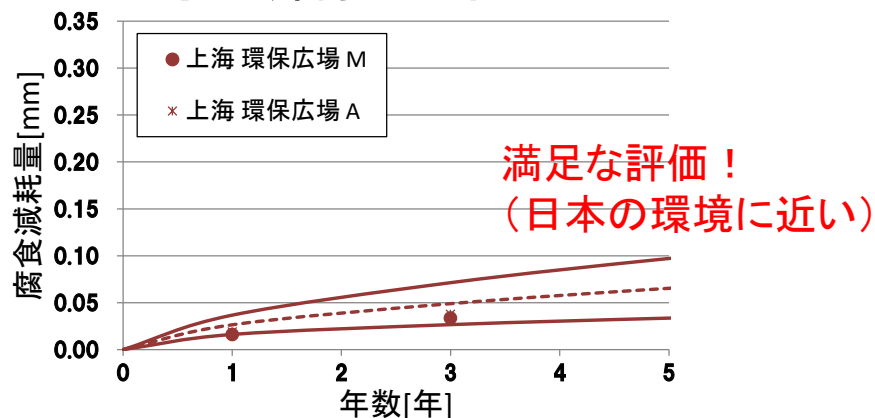
※ 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集 No.780, I-70, pp.71-86, 2005.1.

腐食減耗予測式の適用例

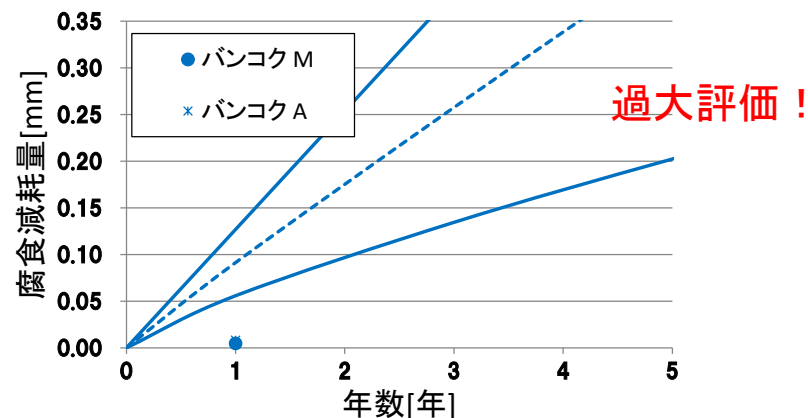


京都大学
KYOTO UNIVERSITY

● 上海の鋼歩道橋



● バンコク



■ パラメータの適用範囲

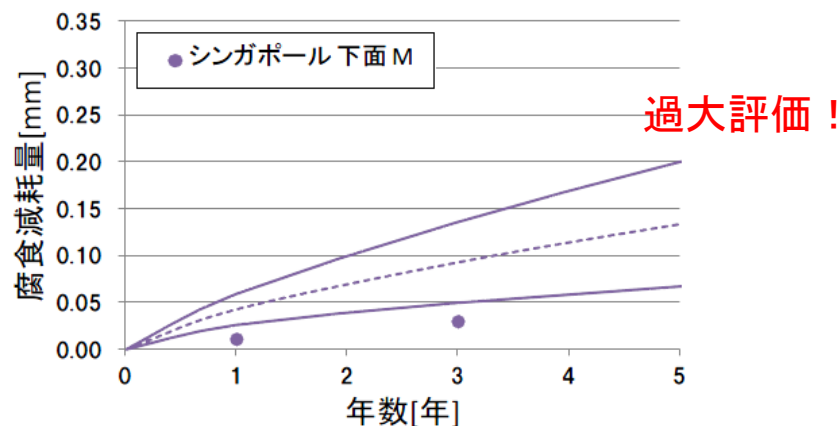
上海以外で、

温度と相対湿度が範囲外



感度分析によると、
温度に対して過大評価している
可能性あり。

● シンガポール



予測式のパラメータでは説明
できない環境因子の存在？
または時間軸の捉え方？

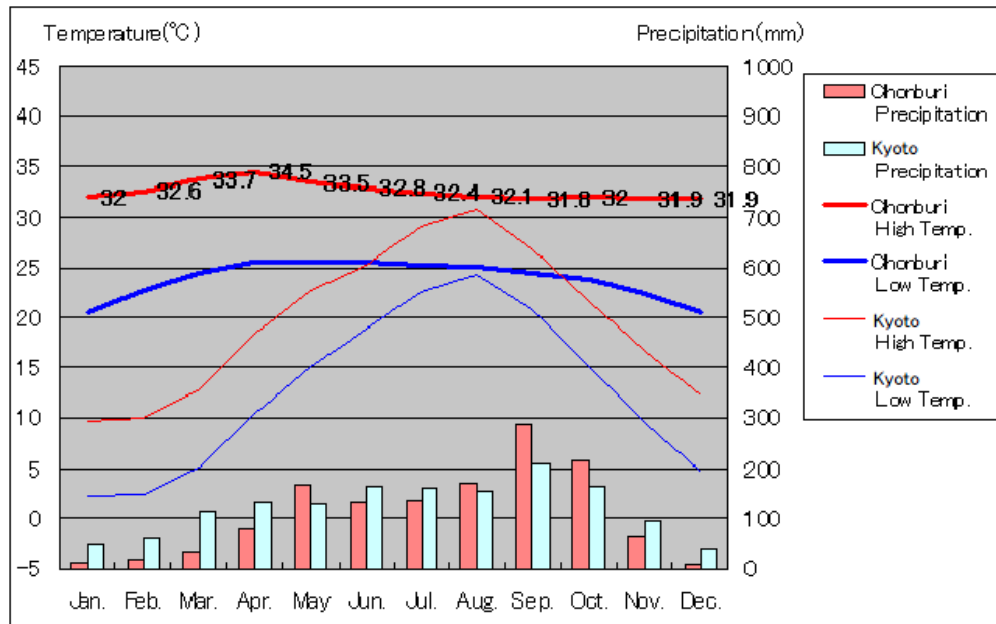
腐食減耗予測式の適用例



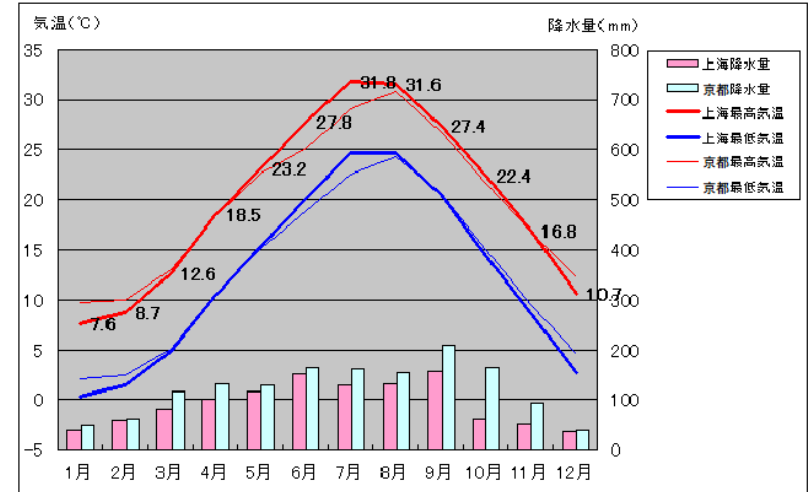
京都大学
KYOTO UNIVERSITY

京都と上海(中国)の比較

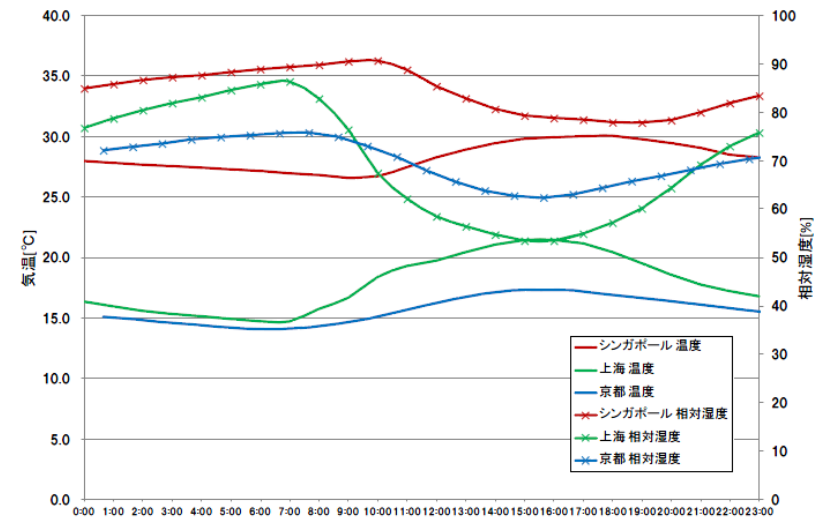
京都とチョンブリ(タイ)の比較



※雨量は大きく変わらない



一日の温湿度変化(4月の例)



※日較差は、上海が最大!

気象条件の違い(京都とチョンブリ)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

グローバル大気腐食 データベースの構築

(1. 炭素鋼)

公益財団法人 スガウエザリング技術振興財団

腐食研究委員会

(石川 雄一・須賀 茂雄)

表 4-2 表面状態と臨界湿度の関係

表面状態	臨界湿度 (%)
清浄な空気中の清浄な表面	100
食塩付着表面	78
清浄な大気中でさびた表面	70
SO ₂ 汚染空気中の清浄な表面	65
食塩水中でさびた表面	55
塩化カルシウム付着表面	35

出典：松島巖、「腐食防食の実務知識」，オーム社（2002），p.121.

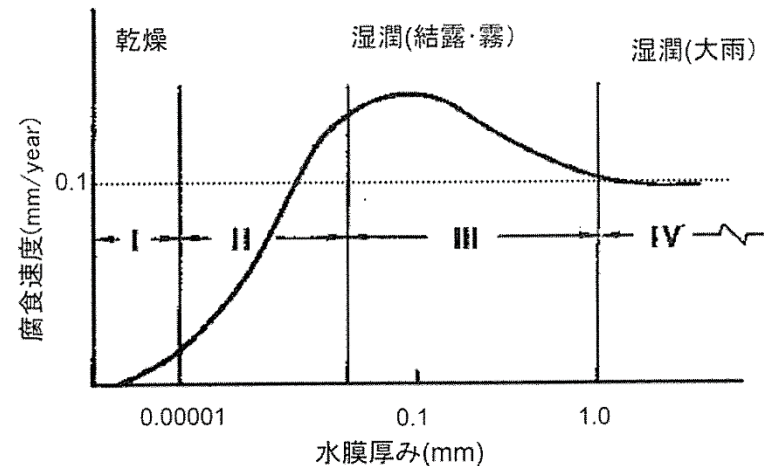


図 4-3 水膜厚みと炭素鋼の腐食速度との模式的関係

出典：N. D. Tomashov, Corrosion, 20, 76 (1964).

既存のデータは？



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

国名	暴露地点	年間腐食速度		T	RH	TOW	SO ₂ [*]	SO ₂
		g/m ² /year	μm/year	°C	%	h/year	mg/m ² /day	μg/m ³
中国	貴陽	2060.9	262.2				147.0	183.8
	重慶	1155.4	147	17.9	80.7	1434	81.1	101.4
	上海	619.4	78.8	16.5	76.8	1491	12.4	15.5
	北京	202.0	25.7				27.0	33.8
韓国	大邱	360.0	45.8	15.1	63.8	2303	17.2	21.5
日本	石川	249.9	31.8	14.5	74.7	4310	3.8	4.7
	東京	393.8	50.1	15.3	65.3	2894	7.4	9.3
	大阪	215.4	27.4	16.6	68.1	1950	5.8	7.2
	奈良	206.7	26.3	15.5	68.1	3784	3.7	4.6
	京都	193.4	24.6	14.7	73.6	4117	3.4	4.3
	茨城	208.3	26.5	14.4	71.9	4027	3.1	3.9

【上海】

普通構造用鋼材 : 23.7μm

耐候性鋼材 : 21.2μm

平均気度 : 17.4°C

平均湿度 : 73.2%

飛来塩分 : 0.040mdd

硫黄酸化物 : 0.134mdd

【京都】

普通構造用鋼材 : 10.5μm

耐候性鋼材 : 10.0μm

平均気温 : 16.1°C

平均湿度 : 70.0%

→ ほぼ無し？

→ 非常に少ない！

既存のデータ（続き）



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

暴露地点	腐食速度(1年後)		2年後		4年後		T (°C)	RH (%)	SO ₂ [*]	SO ₂	CL-
	g/m ² /year	μm/year	g/m ² /year	μm/year	g/m ² /year	μm/year			mg/m ² /day	μg/m ³	mg/m ² /day
Bhubaneswar-u	157	20.0	126	16.0	96	12.2	26.5	69	3.2	4	1.9
Bhubaneswar-r	156	19.8	135	17.2	102	13.0	26.5	69	2.4	3	0.6
Bangkok	116	14.8	80.5	10.2	83	10.6	29.3	76	8.8	11	0.1
Phrapradaeng	281	35.8	208.5	26.5	160	20.4	29.3	73	47.2	59	0.3
Hanoi	182	23.2	139.5	17.7	98	12.5	24.7	79	12	15	0.13
Ho Chi Min	164	20.9	107	13.6	65	8.3	28.3	74	16.8	21	0.13
Mytho	167	21.2	149	19.0	133	16.9	27	81	1.6	2	1
Chongqing	786	100.0	600.5	76.4	386	49.1	18.5	70	79.2	99	0.23
Tie Shan Ping	492	62.6	384.5	48.9	280	35.6	18.5	90	40.8	51	0.07
Hong Kong	151	19.2	100.5	12.8	65	8.3	22.9	78	12.8	16	0.27
Kuala Lumpur	139	17.7	90.5	11.5	59	7.5	28	78	9.6	12	0.07
Tanah Rata	51	6.5	45	5.7	37	4.7	18.1	91	0	0	0.03
Johannesburg	105	13.4	84	10.7	48	6.1	17.2	78	14.4	18	0.03
Kitwe	464	59.0	280.5	35.7			22.6	58	73.6	92	0.07
Magoye	27	3.4	35	4.5	30	3.8	22.2	62	0	0	0.03
Harae	193	24.6	138.5	17.6	84	10.7	18.9	63	12.8	16	0.03

【バンコク/チョンブリ】

普通構造用鋼材 : 9.0μm

耐候性鋼材 : 7.0μm

平均気温 : 30.5°C

平均湿度 : 69.0%

飛来塩分 : 0.040mdd

【クアラルンプール】

普通構造用鋼材 : 18.0μm

耐候性鋼材 : 12.5μm

平均気温 : 27.0°C

平均湿度 : 81.0%

飛来塩分 : 0.042mdd

※SOXか？

既存のデータ（続き）



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

令和6年度橋梁技術発表会及び講演会/北海道地区(令和6年10月25日@かでの2・7)

国名	都市	年間腐食速度		T (°C)	RH (%)	TOW (h/year)	SO ₂ ※1 mg/m ² /day	SO ₂ ※2 μg/m ³	CL ⁻ mg/m ² /day
		g/m ² /year	μm/year						
Philippines	Baguio	87.2	11.1	19	88	8147	1.7	2.1	4
	Bicutan	448.0	57			3416	15.0	18.8	10
	Cabuyao	382.0	48.6			5716	10.2	12.8	10
Thailand	Phra Pradaeng	631.9	80.4			5274	54.2	67.8	8.1
	Rayong	336.4	42.8	28	65~86	5676	10.1	12.6	25.7
	Phuket	369.4	47	27	82.1	5589	7.8	9.8	87.3
	Bangkok	287.7	36.6	28	73.8	2330	16.2	20.2	6.94
Vietnam	Ho Chi Minh	294.8	37.5	29	80.8	3562	14.9	18.6	6.3
	Hue	263.3	33.5				0.6	0.75	8
	Nha Trang	125.8	16				0.5	0.6	21
	Hanoi	269.6	34.3	23	85	7884	5.0	6.2	8.7
Australia	Cowley Beach	3041.8	387	23	71.02	8088	13.5	16.9	386.3
	Walkamin	92.0	11.7	22	72~85	6132	0.7	0.87	8
Indonesia	Lembang	48.7	6.2	23.1	80.3	3416	3.1	3.9	7
	Cikampeck	341.1	43.4	27	79.9	6132	13.8	17.2	25
	Gresik	616.2	78.4	28.3	76.4	2628	23.0	28.8	10
	Jebus	310.5	39.5			2102	1.4	1.8	47
	Mentok	484.2	61.6			1314	54.3	67.9	20
Singapore	Singapore	120.3	15.3	26.5					
Taiwan	China Steel Corp.	59.5	7.57	24.5	78		130.0	162.5	18
	Sun Yat-Sen Univ.	60.8	7.73	24.5	81		90.0	112.5	11
	Tsing-Hua Univ.	112.2	14.28	22.2	77		70.0	87.5	22

【シンガポール】

普通構造用鋼材 : 23.0μm

耐候性鋼材 : 11.7μm

平均気度

平均湿度

: 28.0°C

: 84.2%

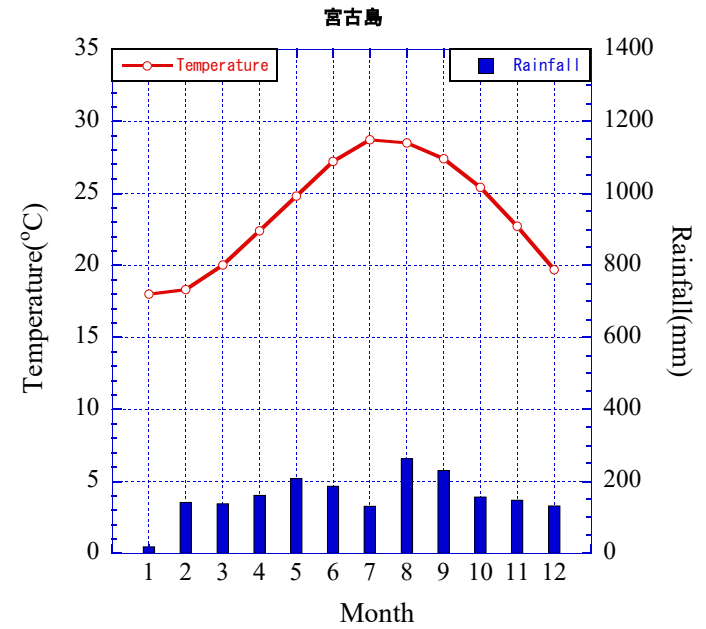
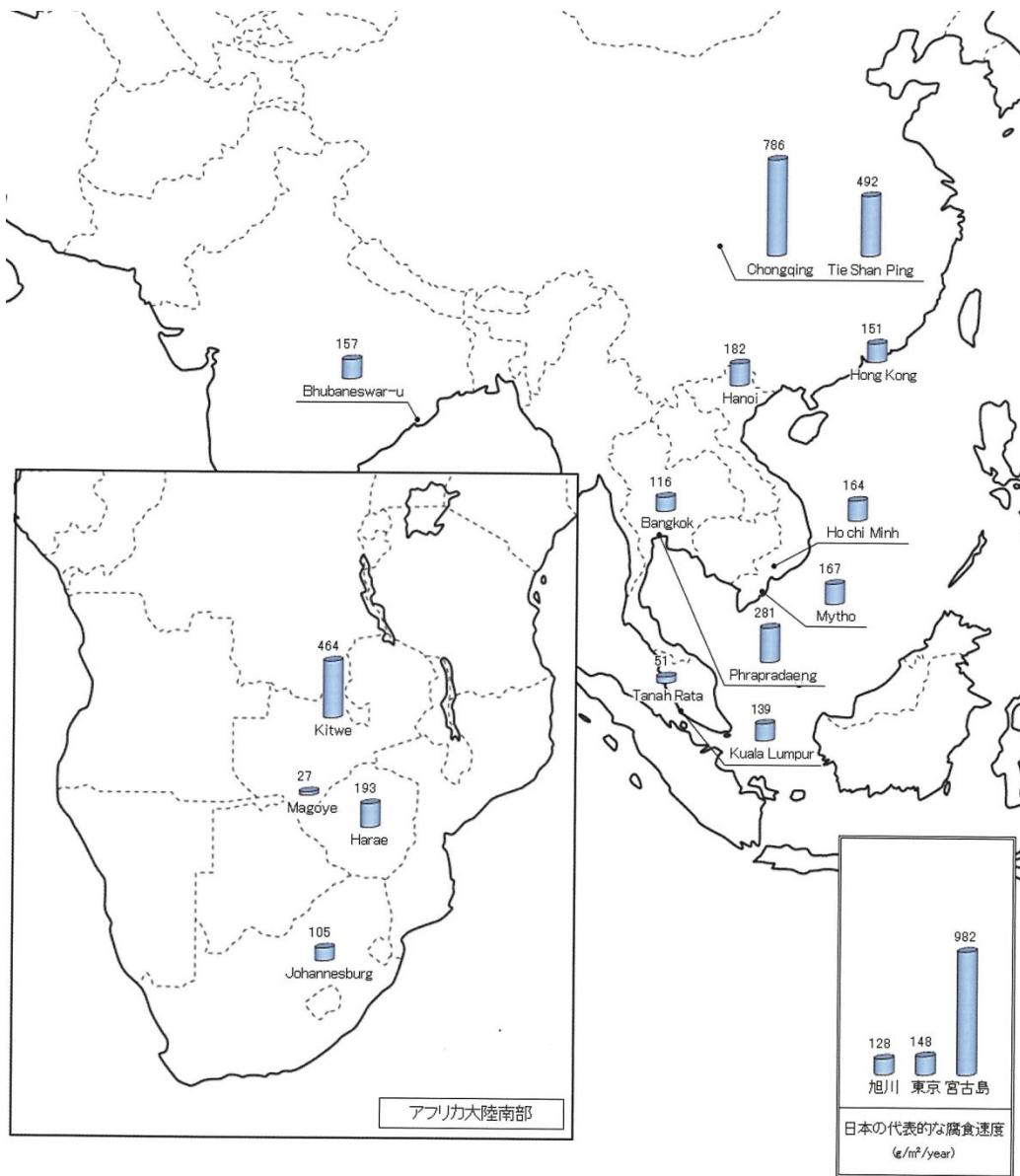
≡ クアラルンプール

≠ チョンブリ

既存のデータ（続き）



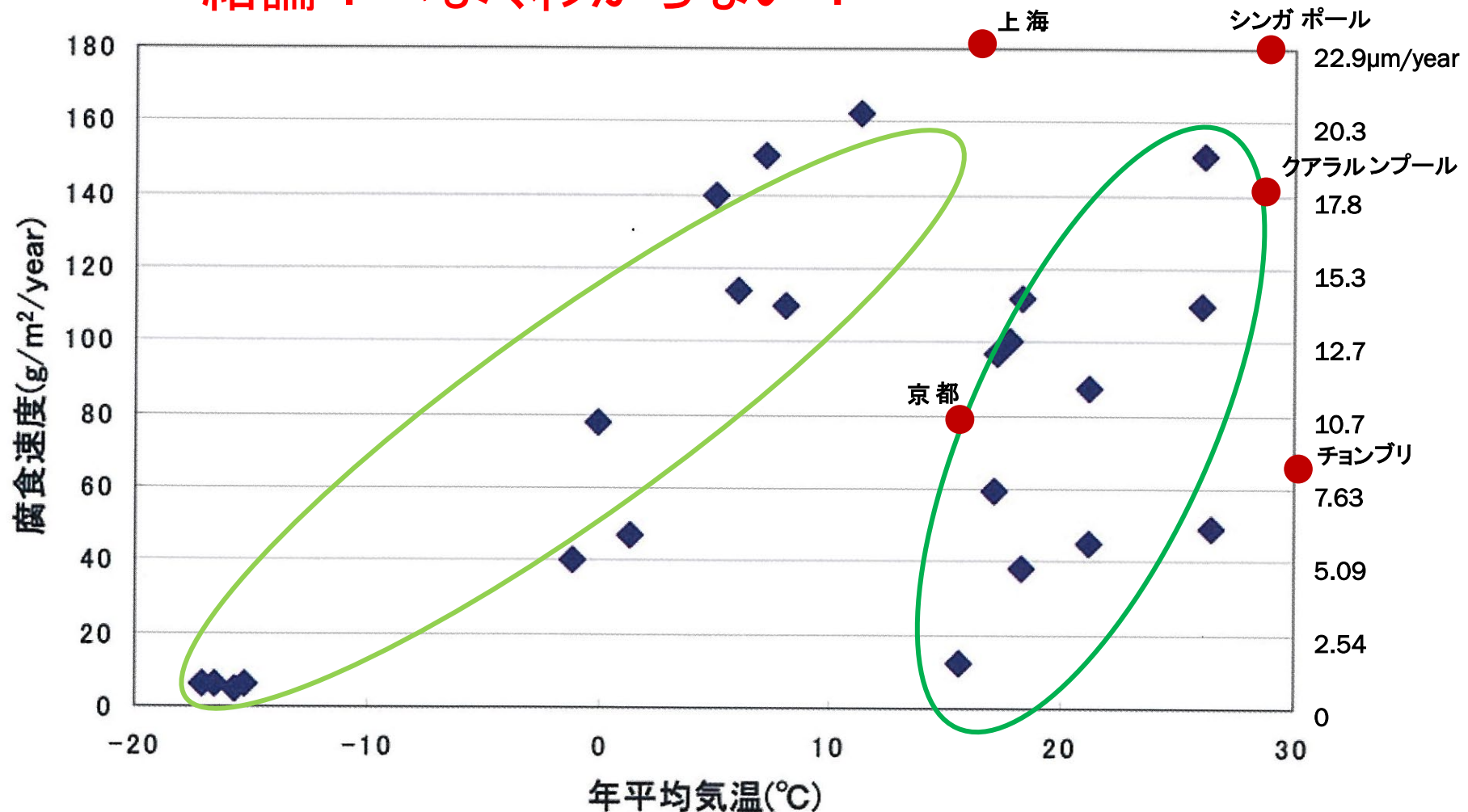
京都大学
KYOTO UNIVERSITY



なぜ宮古島の
環境が厳しい
のか？

既存のデータ（続き）

結論? → よくわからない!



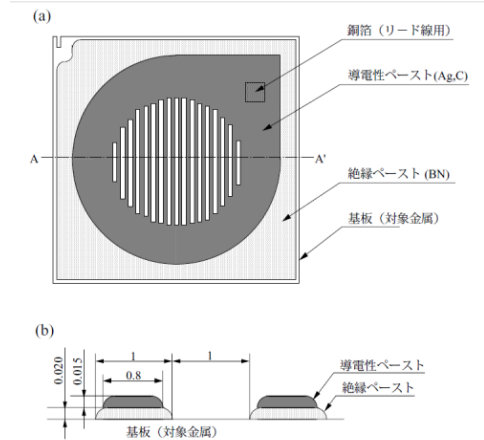
【上海・シンガポール・クアラルンプール】
大気汚染が著しい!

【チョンブリ】
日常的スクールが大気中塩分を除去?

既存のデータ (続き)

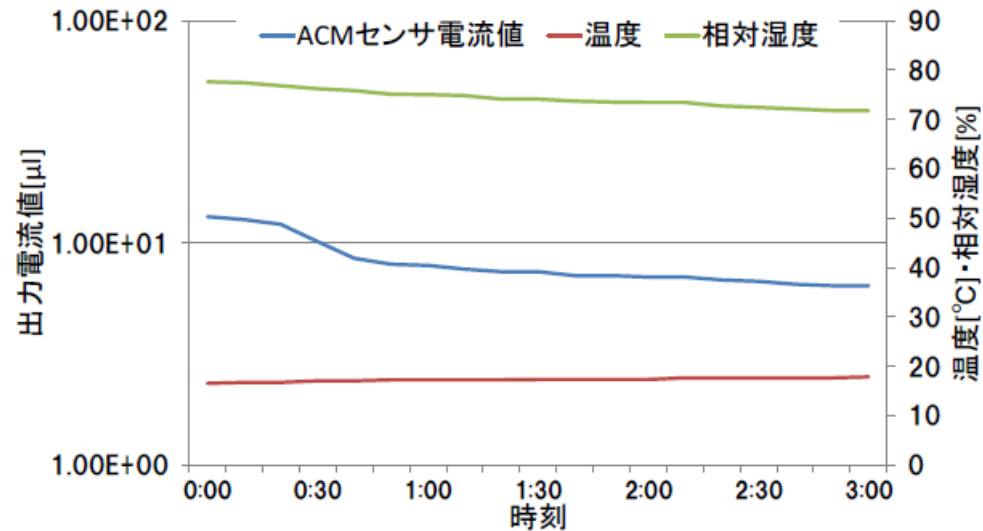


京都大学
KYOTO UNIVERSITY



恒温恒湿槽とACMセンサを用いた腐食環境因子の評価

ACMセンサ



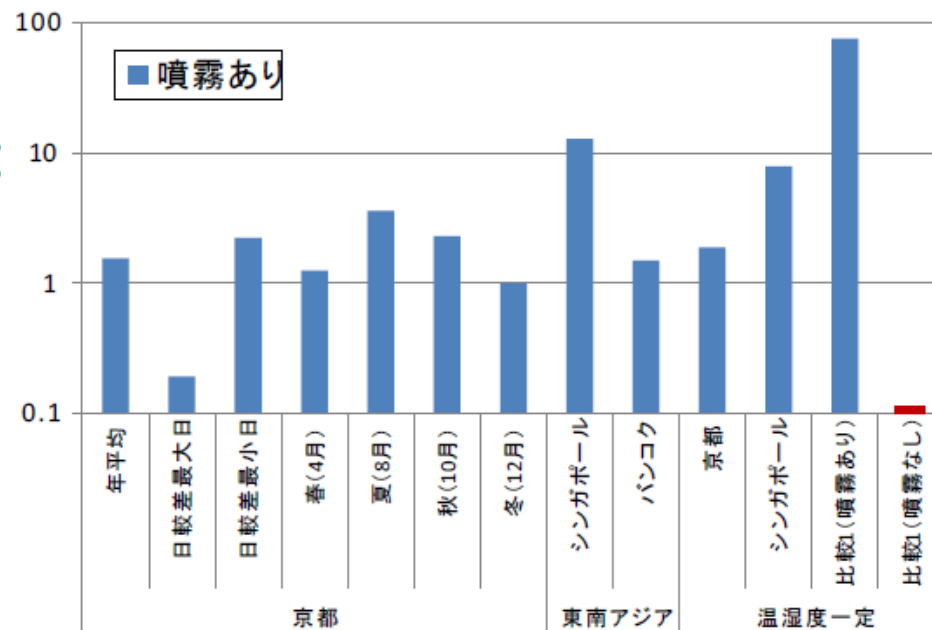
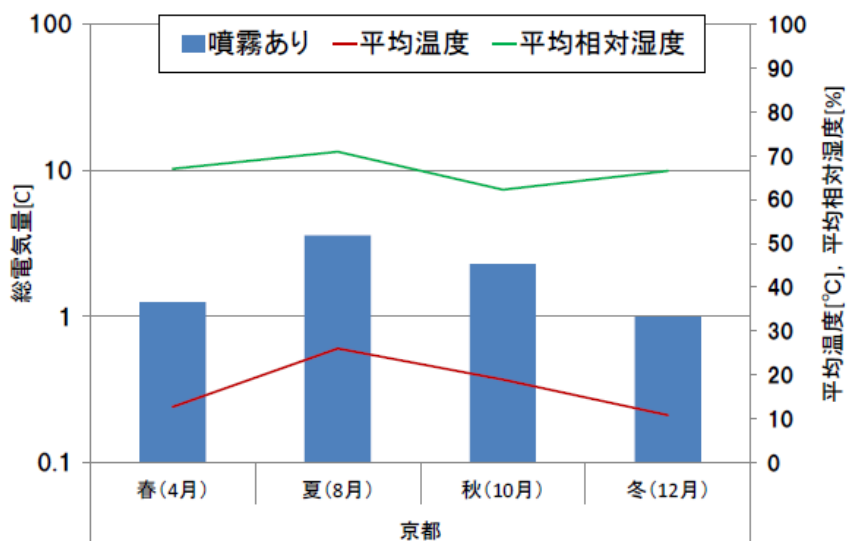
京都での年間平均温湿度で、塩水噴霧時の出力電流計測結果

令和6年度橋梁技術発表会及び講演会/北海道地区(令和6年10月25日@かでの2・7)

パターン		logI [μ A]		付着塩分量[g/m ²]		噴霧塩分量 [g/m ²]
		噴霧あり	噴霧なし	噴霧あり	噴霧なし	
京都	年平均	1.26	-5.29	2.40	0.00	1.25
	日較差最大日	0.42	-3.38	2.93	0.01	
	日較差最小日	1.41	-2.07	1.53	0.00	
	春(4月)	1.17	-5.21	2.14	0.00	
	夏(8月)	1.63	-5.13	4.15	0.00	
	秋(10月)	1.45	-4.87	4.48	0.00	
	冬(12月)	1.11	-2.07	2.03	0.01	
東南アジア	シンガポール	2.18	-2.65	4.88	0.00	1.25
	バンコク	1.25	-4.45	4.02	0.00	
温湿度一定	京都	1.34	-2.81	2.93	0.00	
	シンガポール	1.97	-5.18	4.54	0.00	1.25
	比較1	2.94	0.11	10.72	0.20	

- ◆ 温度？
- ◆ 付着塩分量？

比較1: 温度40°C, 相対湿度100%



室内試験 (続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

ワッペン曝露試験のみでは情報が不足するので、多様な長期曝露試験結果を踏まえて、腐食環境を評価し、構造物の維持管理を検討！

- 気温
- 湿度
- 鋼材温度
- 風速・風向
- 日射量
- UV
- 雨量
- 飛来塩分量
- 硫黄酸化物
- 雨がかり有無

.....

ヤンゴンの気温

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均気温 °C	25.1	26.3	28.7	30.2	29.3	27.4	26.9	27.0	27.4	27.5	27.1	24.7
降水量 mm	1.6	2.0	52.3	59.0	359.0	532.2	447.4	476.8	280.0	146.0	48.2	21.6
平均湿度 %	62	62	68	65	75	84	89	86	86	79	68	67

雨期 5月下旬～10月中旬

乾期 10月下旬～2月

暑期 3月～5月中旬

乾期が、最も快適な気温で、日本の初夏のような季候

JICA:ミャンマー工学教育拡充プロジェクトに関連付けて
ヤンゴン工科大学 & マンダレー工科大学で長期曝露試験開始
(KUSPIRTSの支援, 科学研究費補助金による共同研究など)

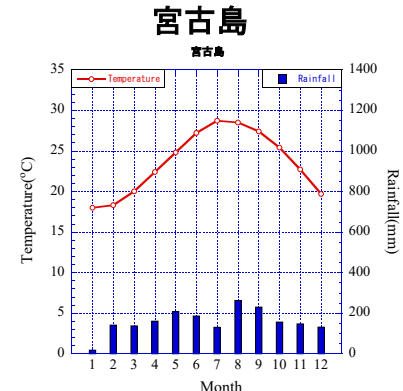
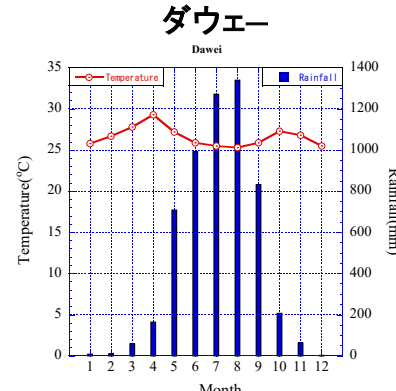
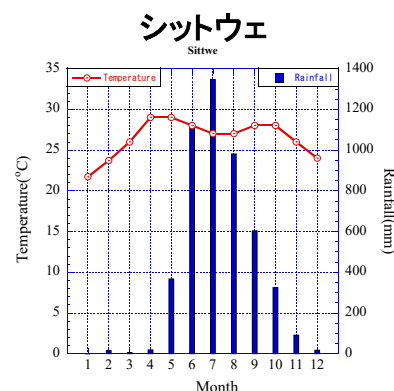
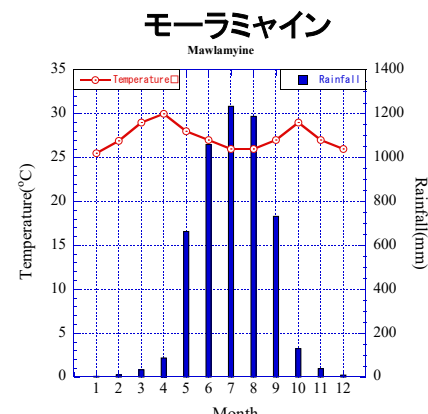
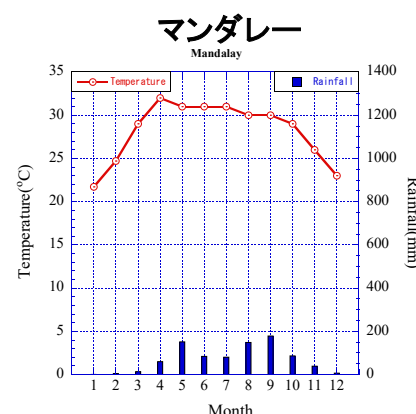
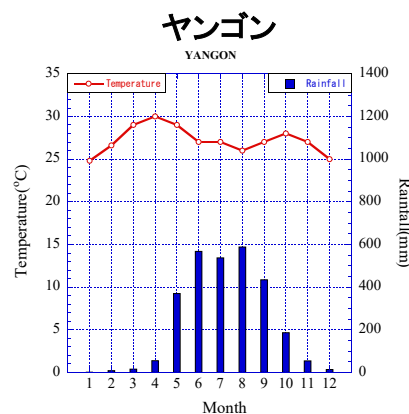
KUSPIRTS:ミャンマーでの曝露試験



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

● ミャンマーでの気象条件の異なる 曝露試験実施都市

○ 気象観測＋大気曝露＋ワッペン試験
○ ワッペン試験＋温湿度計測



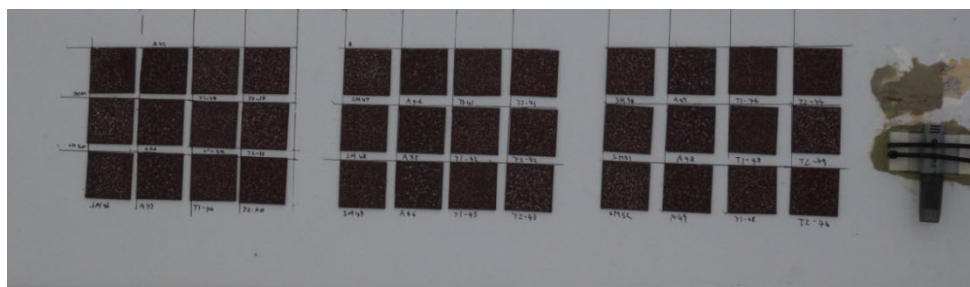
KUSPIRITS (続き)



京都大学
KYOTO UNIVERSITY



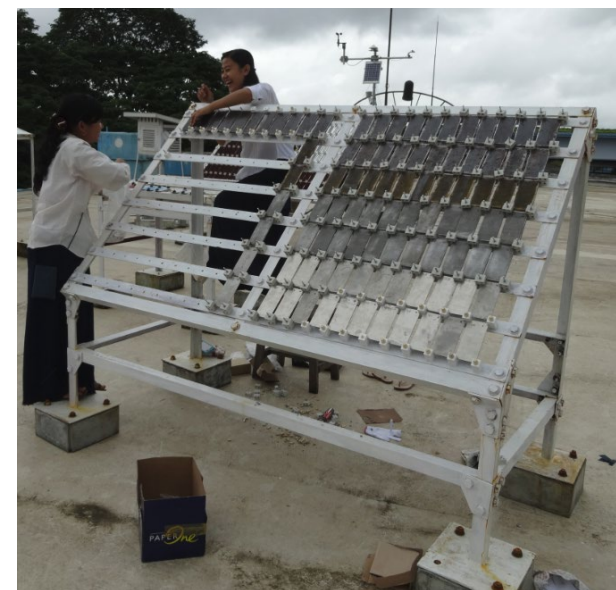
YTU建物屋上での大気曝露試験(2014年3月から)



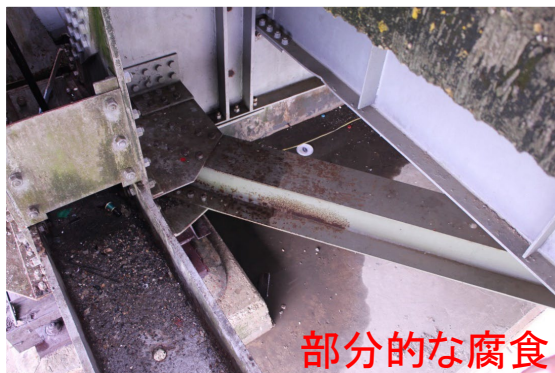
YTU建物軒下でのワッペン曝露試験



塗膜の大気曝露試験



各種鋼材の大気曝露試験



鋼橋における腐食の実態調査



塗膜厚計測・表面付着塩分測定



塗替えの試験施工

Yadanarpon橋

- ・エーヤワディー川、マンダレー・ザカイン間
- ・中国が設計、製作
- ・2008年にMOCが現地架設 (中国の指導)
- ・4車線+両側歩道
- ・2@112mトラス + 3@224m連続アーチ + 2@112mトラス

ひずみゲージ貼り付け



応力聴診器



荷重車走行におけるひずみ計測

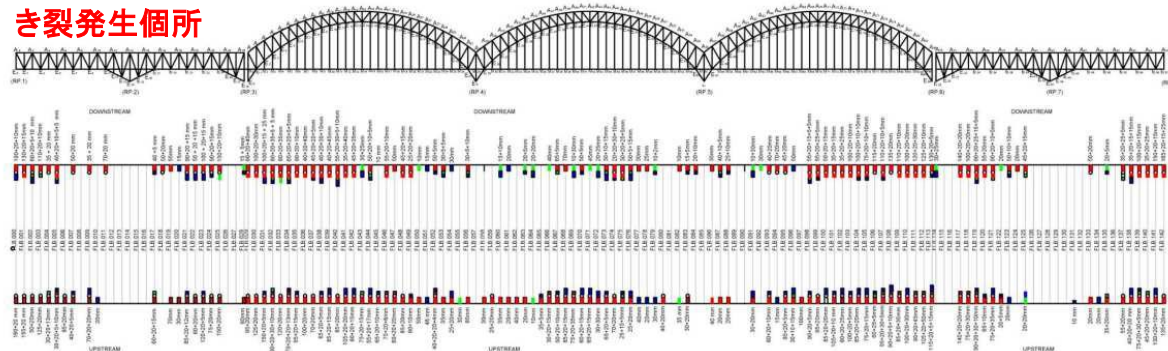


横桁取り付け部に発生した疲労き裂に対する応力集中度の調査

荷重車 30ton



き裂発生箇所



Rehabilitation of Major Bridges in Myanmar under Seismic Risks

Maubin橋



支承の損傷

Sr.	Load Combination (AASHTO 1973)	Top Chord		Bottom Chord	Diagonal	
		Over Support	Mid Span		Tension	Compression
1.	D + L + I	183.8	-140.4	86.1	195.1	-173.3
2.	1.25D + 1.25W	158.0	-129.8	94.9	209.7	-254.1
3.	1.33D + 1.33EQX	178.7	-137.0	85.3	188.9	-168.8
4.	1.33D + 1.33EQY	187.0	-140.2	81.42	191.2	-166.8
Allowable Stresses		178.75	173.25	173.25	189.75	178.75

Location : Maubin Township, Ayeyarwady Delta Region
 Total Length : 720 m [(4 x 30 m) + (4 x 120 m) + (4 x 30 m)]
 Super structure : 4 span Continuous Steel Truss + 8 span PC Girders
 Sub structure : Reinforced Concrete Piers + Precast Concrete Piles
 Date of Completion : 3rd February 1998



60トン荷重車

交通規制



ひずみゲージ貼り



計測班

アフターコロナ禍におけるJSCEプロジェクト (FOLLOW-UP)

フェーズⅠ : 2022～2023

フェーズⅡ : 2024～2025

1. 対象地域(ミャンマー)の鋼橋の腐食状況や塗装・再塗装の実態調査(Follow-up)
2. 気象データに基づく腐食環境評価
3. 高温多湿下での塗膜の耐候性・耐久性評価
4. 飛来塩観測と耐候性鋼の適用地域特定
5. 対象国橋梁管理者へ塗装・再塗装基準に関する技術移転

* 下線部は2014年から実施中

鋼橋の実態調査

種類

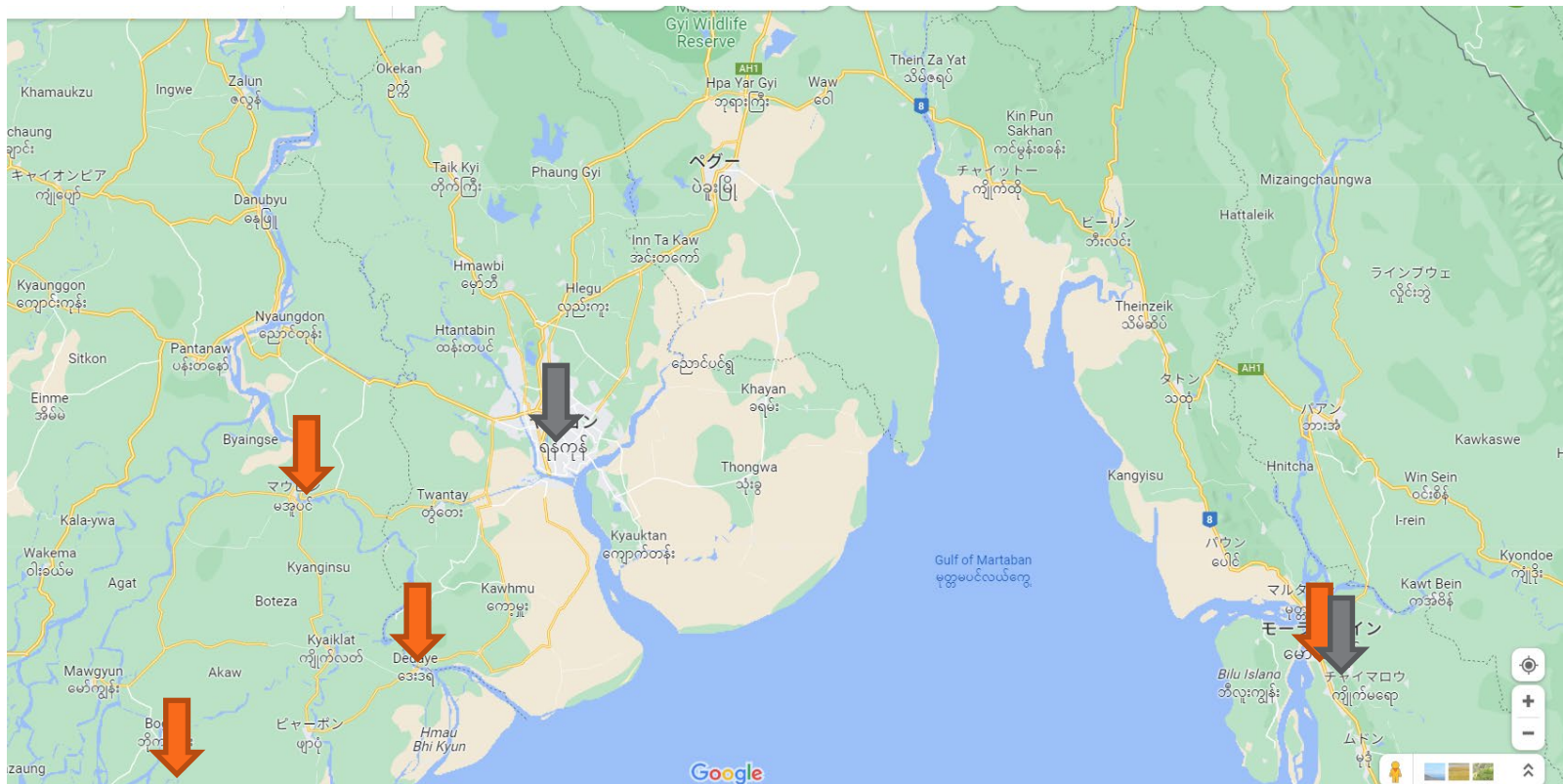
- 通常の塗装鋼橋(トラス, 斜張橋, 吊橋)
- 耐候性鋼橋(鋼桁部分)

* 下線は詳細に膜厚やさび厚などを調査



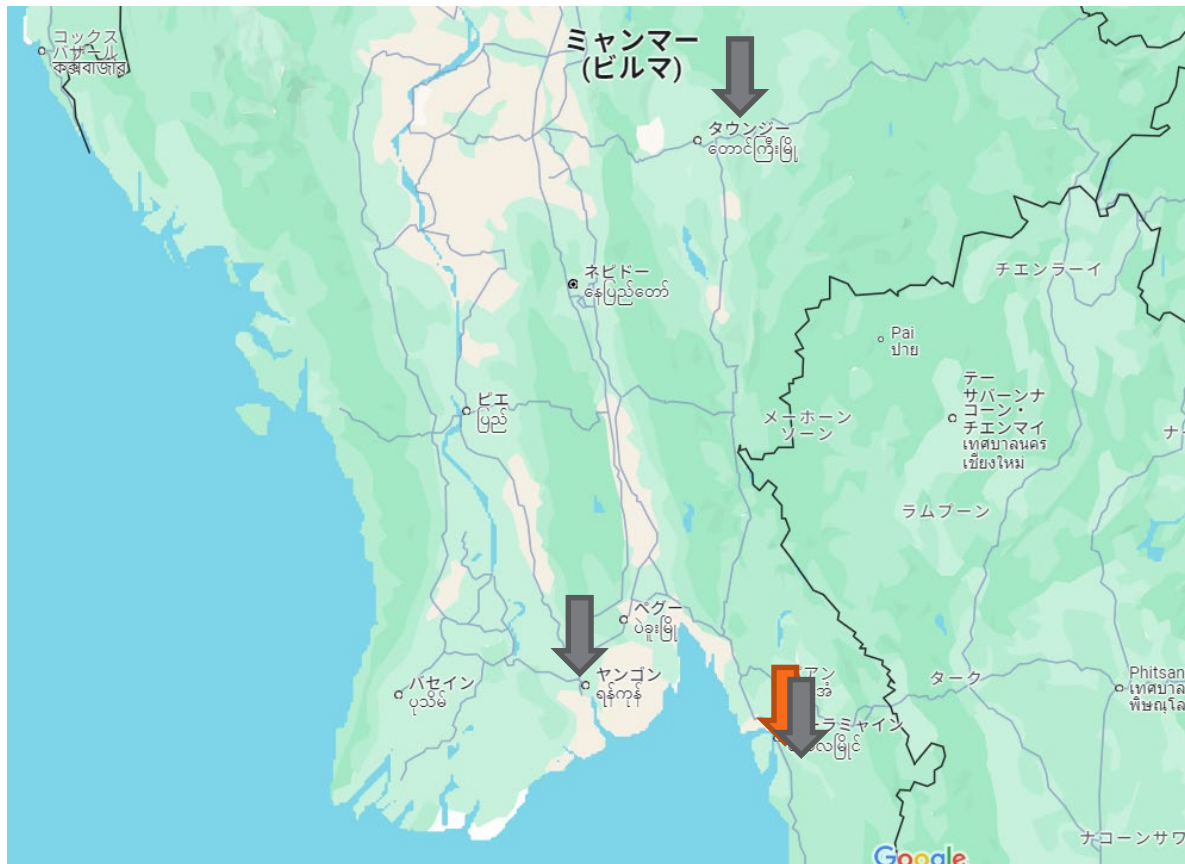
最近の調査事例：2023年5月

↓ : 気象ステーションと暴露架台メンテナンス ↓ : 橋梁調査



2024年1月の調査場所

↓ : 気象ステーションと暴露架台メンテナンス ↓ : 橋梁調査



橋梁調査（目視）



斜張橋



吊橋

デルタ地帯ではBAILEY橋が今でも使われている！

部材の変形



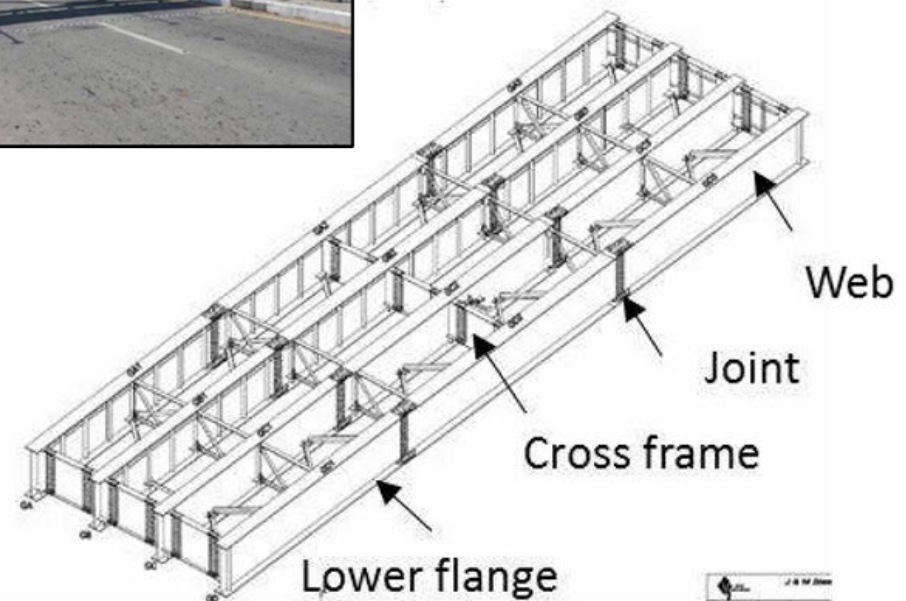


鋼製水門扉



橋梁調査

耐候性鋼橋(桁橋)→目視、さび厚、付着塩分量
※ミャンマーで初めての耐候性鋼橋



さび厚計測



表面塩分計測



目視による健全度評価



Rating: 5



Rating: 4



Rating: 3

← さび形成: 良好

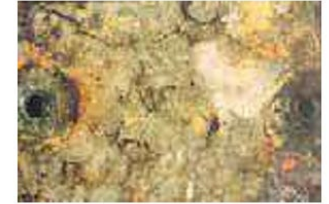
さび形成: 悪い →



Rating: 2



Rating: 1



Rating: 1

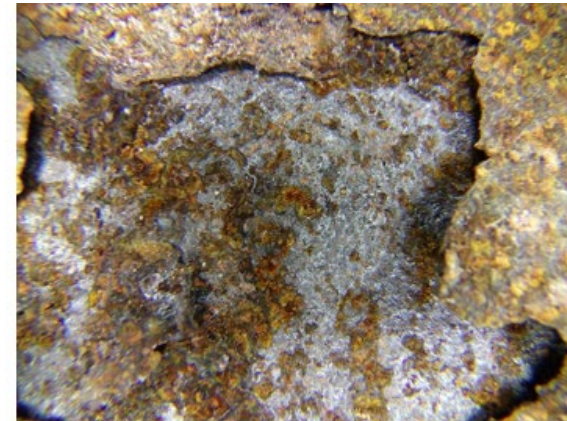
Figure 3.2. Appearance of 9 years' exposure test (Japan Iron and Steel Federation)

目視による検証

大方, 良好な状態!



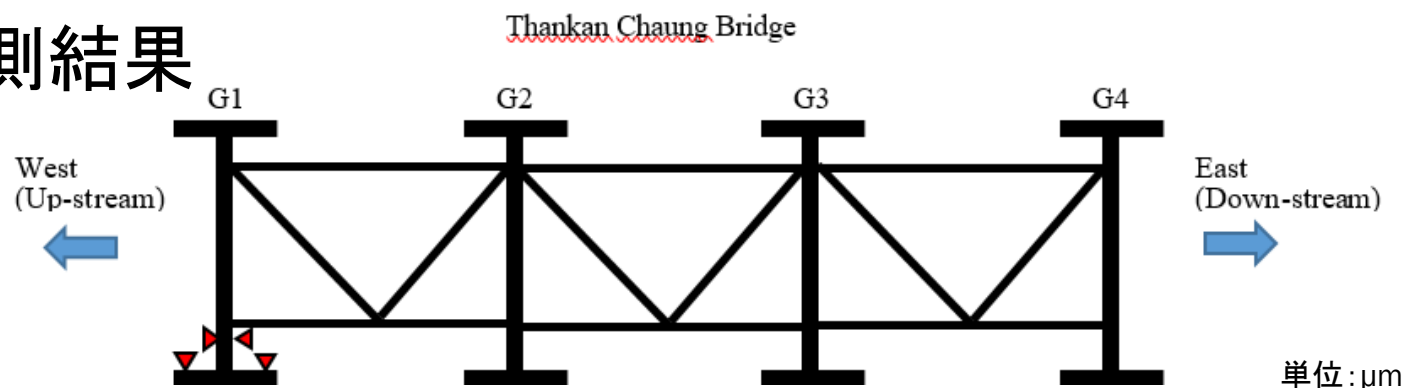
Rating:3-5



Rating:1-2

局所的に非常に悪い!

さび厚計測結果



Location	G4(Down Stream) @Sway Bracing				
	Web-West	Web-East(P)	Flange-U-West	Flange-U-East(P)	Flange-L
1	79.7	52.0	124	155	71.6
2	64.6	100	190	181	123
3	60.9	95.4	256	143	150
4	75.3	73.7	127	137	51.0
5	65.8	81.1	177	161	49.9
6	85.1	67.7	173	175	81.0
7	74.0	79.1	122	150	110
8	139	40.6	104	130	165
9	132	124	184	125	185
10	64.2	144	130	143	95.3
Mean	84.06	85.76	158.70	150.00	108.18
SD	28.20	31.39	45.53	18.33	47.15

付着塩分

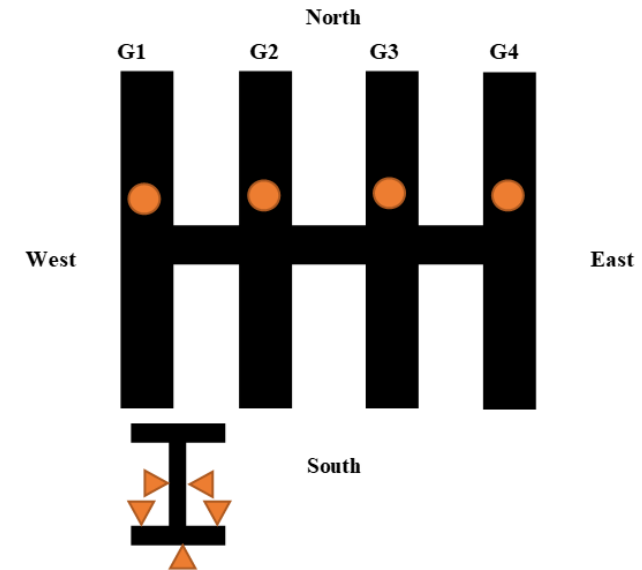


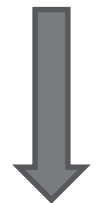
Table 3.2. Result of deposited salt content (Unit: mg/m²)

Washing by rain

	Web-West	Web-East	L_Flange-L	L_Flange-U-West	L_Flange-U-East
G1	18.2	86.2	23.2	10.4	134.5
G2	90.4	34.7	43.2	241	150.6
G3	124.0	132.0	186.0	160.5	141.4
G4	46.8	7.7	202	298	46.6



Higher



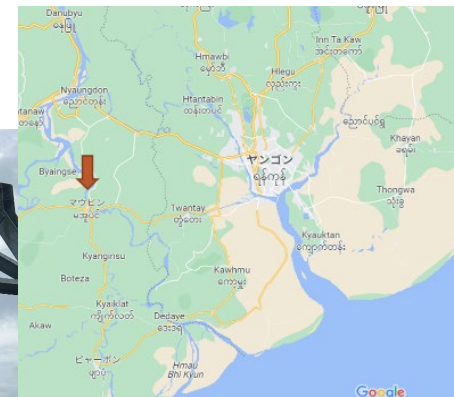
Higher

塗替塗装の検証 (MAUBIN橋)

4支間鋼製トラス橋(1998年架設)

熱帯モンスーン気候/温湿度ともに高い

床版下の鋼桁の表面付着塩分量: 100mg/m²程度
(内桁下フランジ上面を除く)

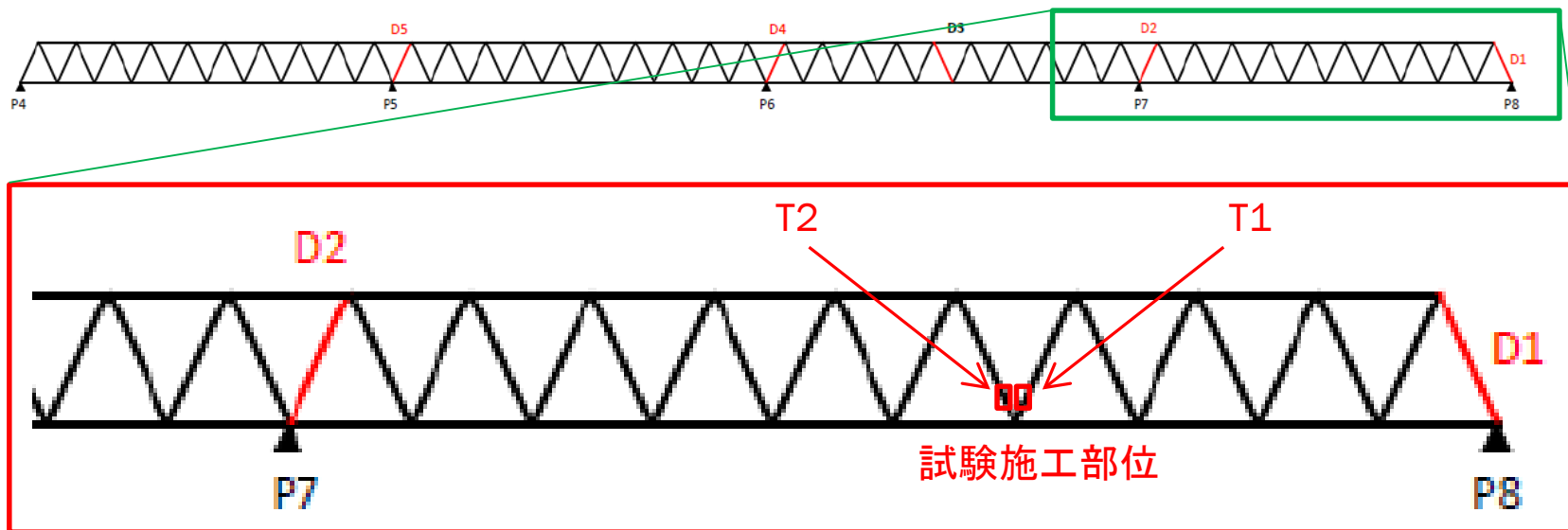


Myitmaka川

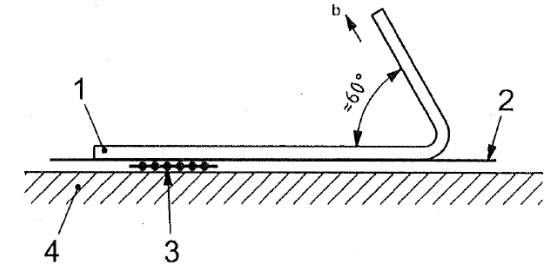
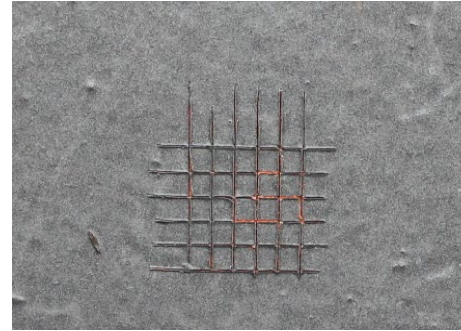
← ヤンゴン

Maubin橋全体図

Maubin →



クロスカット試験



Classification	Description	Appearance of surface of cross-cut area from which flaking has occurred (Example for six parallel cuts)
0	The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.	
1	Detachment of small flakes of the coating at the intersections of the cuts. A cross-cut area not greater than 5 % is affected.	
2	The coating has flaked along the edges and/or at the intersections of the cuts. A cross-cut area greater than 5 %, but not greater than 15 %, is affected.	
3	The coating has flaked along the edges of the cuts partly or wholly in large ribbons, and/or it has flaked partly or wholly on different parts of the squares. A cross-cut area greater than 15 %, but not greater than 35 %, is affected.	
4	The coating has flaked along the edges of the cuts in large ribbons and/or some squares have detached partly or wholly. A cross-cut area greater than 35 %, but not greater than 65 %, is affected.	
5	Any degree of flaking that cannot even be classified by classification 4.	

鋼トラス橋における塗替試験施工の概要

3層構成(平均膜厚)

下から

I : 鉛丹系さび止め塗料: 140 μ m

II : MIO塗料: 30 μ m

III : アルキド系上塗り塗料: 100 μ m

(この膜厚には塗替え塗装系を含む可能性)

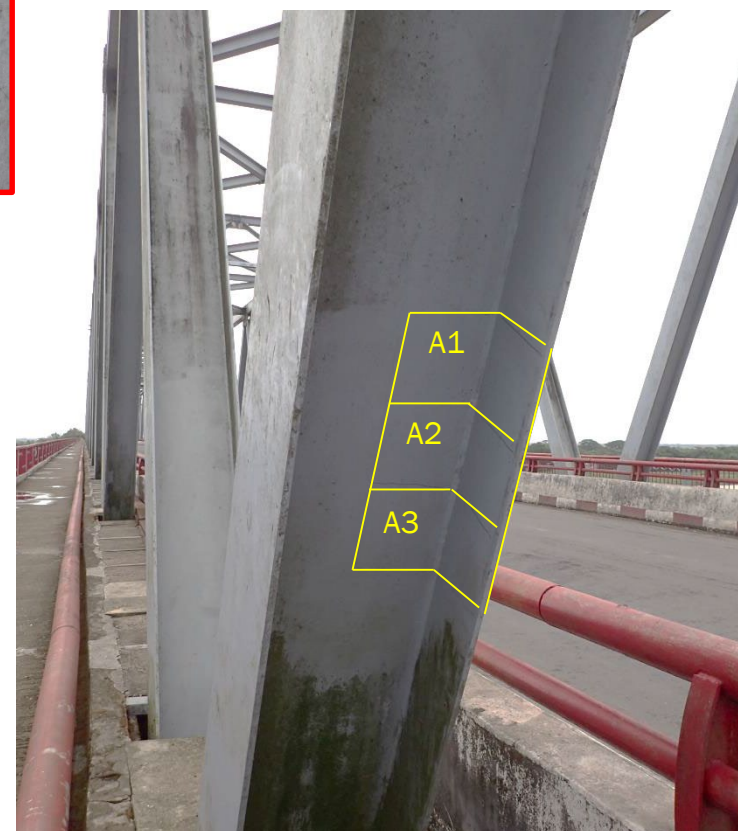


鉛丹系さび止め塗料以外は、
クロスカットパターンを導入した
のみで容易に剥落してしまう。

試験施工面積: 1仕様あたり約0.09m²

➤ できるだけ簡易な素地調整を目指す!

ケース名	A1	A2	A3
素地調整	ハンドツール (スクレーパーおよびサンドペーパー処理#220)		
第1層	エポキシプライマー(80 μ m)	エポキシプライマー(80 μ m)	変性エポキシ(60 μ m)
第2層	ポリウレタン上塗(80 μ m)	エポキシ下塗(60 μ m)	変性エポキシ(60 μ m)
第3層		エポキシ下塗(60 μ m)	エポキシ中塗(30 μ m)
第4層		ポリウレタン上塗(80 μ m)	ポリウレタン上塗(25 μ m)
硬化時の膜厚	180 μ m	280 μ m	175 μ m
相当する塗装系	ISO12944 C3 A3-08	ISO12944 C4 A4-09	鋼道路橋防食便覧 Rc-III

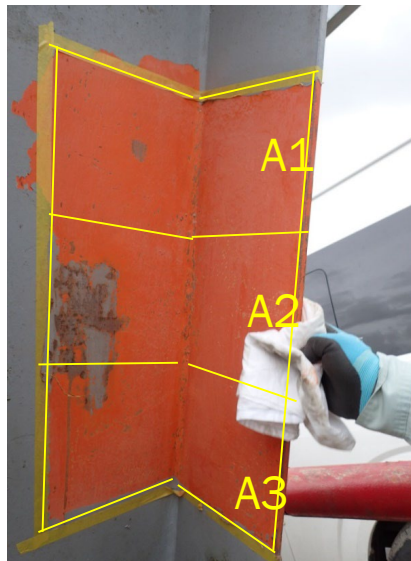


2018年5月実施



ハンドツールとサンドペーパーによる素地調整

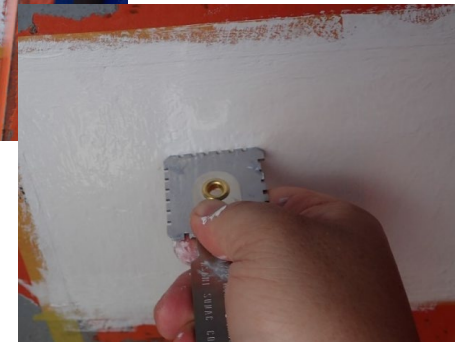
- ・MIO塗料と上塗り塗料は容易にはく離
- ・鉛丹塗料は概ね残る



素地調整終了後、乾燥布で拭く



塗替え塗装



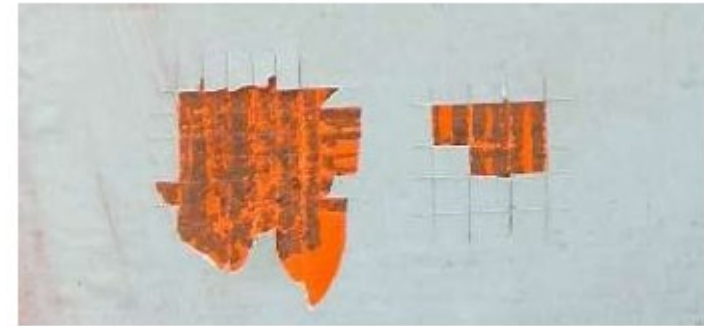
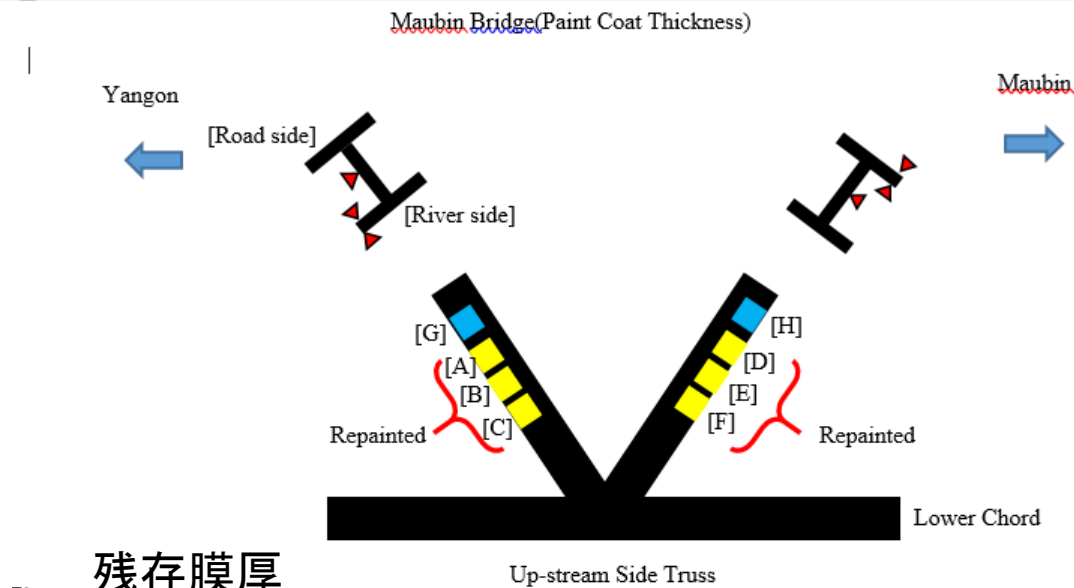


塗替え塗装後、6年7か月後の状況
(9 JAN 2024)

外観観察

試験塗装範囲の塗膜異常
は観察されない





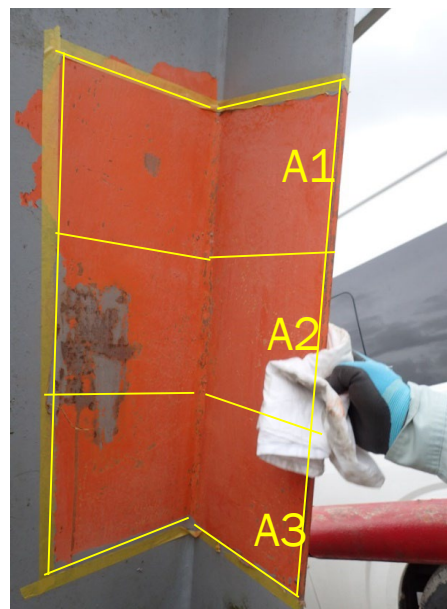
残存膜厚

Location	G			H					
	Web	F-I	F-O	Web	F-I	F-O			
1	240	206	246	266	168	329			
2	258	181	221	222	256	349			
3	246	205	215	236	177	344			
4	291	213	227	298	201	363			
5	465	201	235	230	197	321			
6	240	177	201	220	153	315			
7	259	139	202	233	217	340			
8	264	189	235	224	225	317			
9	331	195	229	231	209	331			
10	372	185	192	217	179	309			
Mean	296.6	189.1	220.3	237.7	198.2	331.8			
SD	73.18	21.15	17.48	25.26	30.39	17.1			

クロスカット試験の 実施位置

各塗装仕様

- ・ウェブとフランジ各1か所
- ・3mmメッシュと5mmメッシュ
- ・A2とA3の鉛丹の無い部位
は追加で試験実施



クロスカット試験結果のまとめ

A1: 旧塗膜層内ではく離

A2、A3: はく離は認められない

考察

- ・A1のはく離は鉛丹の旧塗膜内
 - ・A1とA2は第1層が同じ
 - A1の素地調整の際、脆弱な旧塗膜が除去しきれなかった可能性
 - ・A2とA3では付着耐久性が認められた。
 - 手工具による素地調整でも適切に塗替えが行える可能性
- 活膜範囲を正しく見極める必要
- 現地の実態に合わせた適切な塗替え塗装手順につなげたい(今後の課題)

クロスカット試験のメッシュのサイズ

※3mmメッシュの方が、5mmメッシュより厳しい

橋梁調査のまとめ

1. 目視調査した吊橋および斜張橋は、腐食が多く見られた。現在隣に新橋を建設中で、そのうち撤去されるとのこと。それまで大丈夫かどうか少し心配。
2. 比較的規模の小さい多く橋梁では塗装が剥がれ腐食が進行しており、メンテナンスがされていない状況であった(特に田舎へ行くほど)。
3. 調査した耐候性鋼橋は一部さびの状態が悪いところがあった(桁内側の雨がかりがなく風通しの悪いところ)が、それ以外は今のところ、良くはないが悪くもない状況。
4. 塗装橋の再塗装を調査した結果、いくつかの塗装仕様では接着状態が悪かったものの良い接着強度が保てていた仕様もあった。

気象観測および暴露試験について

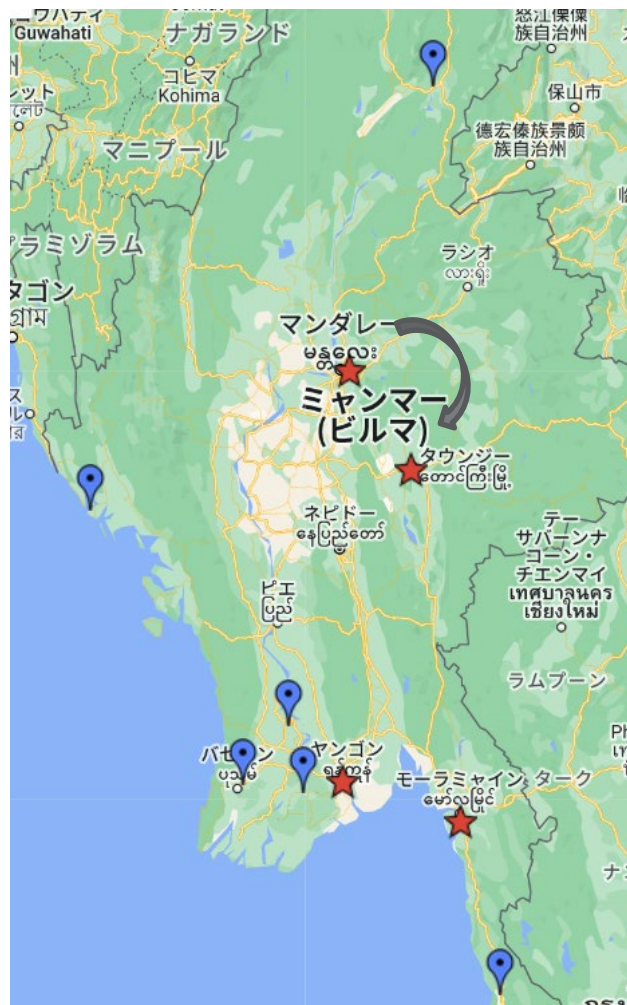
気象観測

- 気象ステーション(温湿度, 降雨, 紫外線など)
 - 設置都市: ヤンゴン, モーラミヤイン, マンダレー → タウンジー移設
- 温湿度ロガー
 - 設置都市: ヤンゴン, モーラミヤイン, マンダレー, タウンジ, シットウェイ, ダウェイ, ミッチーナ(ここまで京大), モービン, パセイン, ヘンタダ (YTU)

暴露試験

- 暴露架台(普通鋼, 耐候性鋼, 塗装鋼数種類)
 - 設置都市: ヤンゴン, モーラミヤイン, マンダレー
- ワッペン試験(普通鋼, 耐候性鋼)
 - 設置都市: ヤンゴン, モーラミヤイン, マンダレー, タウンジ, アキャブ, ダウェイ, ミッチーナ, モービン, パセイン, ヘンタダ

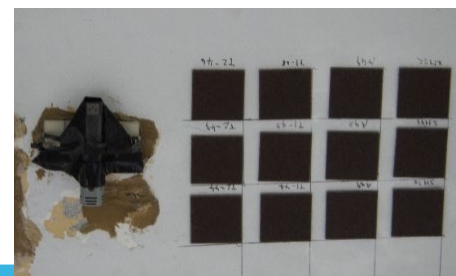
気象観測および暴露試験設置位置



★ : 気象ステーション
★ : 暴露架台orワッペン試験



📍 : ワッペン試験
📍 : 温湿度計測



気象ステーション, 暴露架台のデータ回収・メンテナンス実施

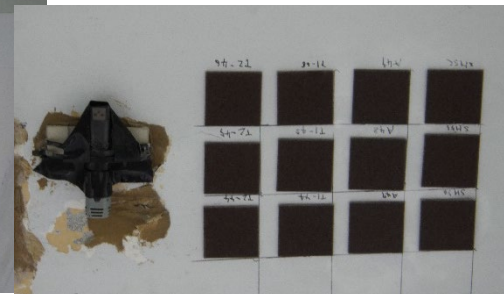
1. ヤンゴン(10年目の回収→校舎の改築のため, 廃棄されており回収できず)
2. モーラミヤイン(温湿度データ回収)
3. タウンジ(5年目の回収, 温湿度データ回収)

→タウンジ回収データは現在分析中

今後(2024年度, 2025年度)の回収予定

1. マンダレー10年目(2024年)
2. モーラミヤイン10年目(2025年)
3. シットウェイ, ダウェイ10年目(2024年)→危険地域で入れない可能性も

気象ステーション，暴露架台のデータ回収・メンテナンス実施



ワッペン試験結果（これまでの結果含む）

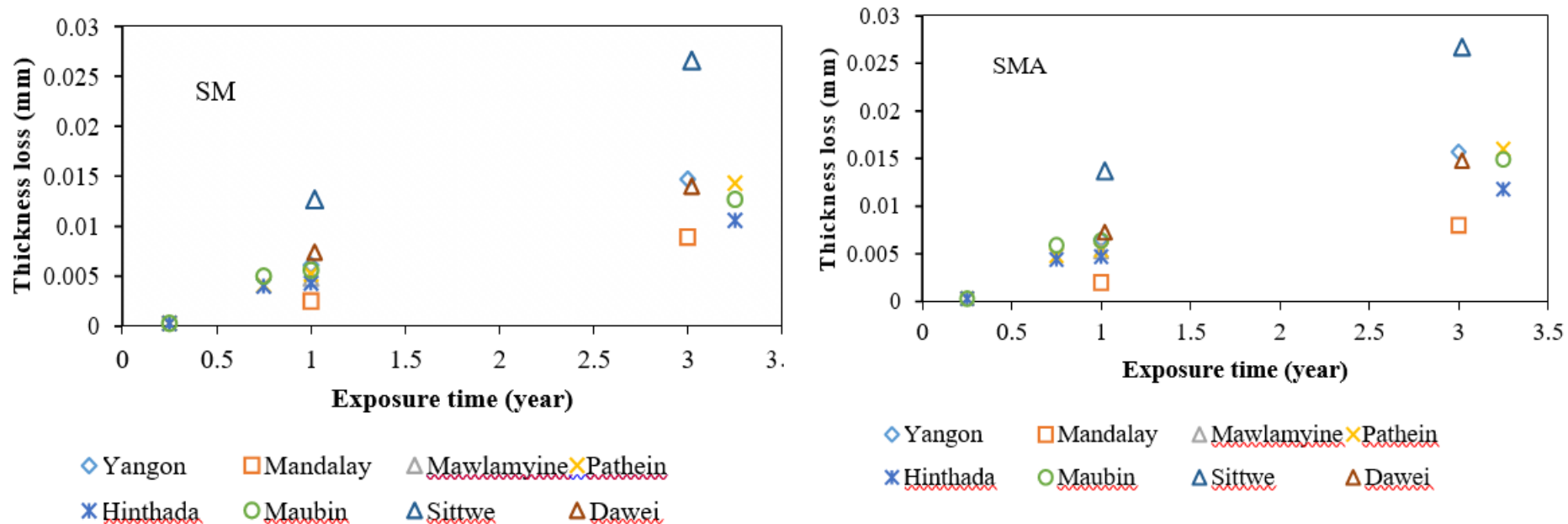


Figure 2.17. Long-term corrosion losses of SM and SMA steels (shelter)

対象国橋梁管理者へ塗装・再塗装基準に関する技術移転

- ✓ 2023年6月渡航の橋梁調査の際、橋梁管理者や技術者が調査に同行し、現場で情報共有および意見交換を実施



実物を見ながらの技術移転が望ましい！

対象国橋梁管理者へ塗装・再塗装基準に関する技術移転

- ✓ 2024年1月渡航の際、ミャンマー政府MOC関係者とこれまでの調査結果の情報共有および意見交換を実施

維持管理技術に非常に興味がある！



Construction and Maintenance of Bridges (180 ft and Above) by MOC ✕as of January 31, 2021

No.	Region/ State	No. of Bridges
1	Kachin State	84
2	Kayah State	11
3	Kayin State	44
4	Chin State	14
5	Sagaing Region	123
6	Tanintharyi Region	31
7	Bago Region	74
8	Magway Region	112
9	Mandalay Region	44
10	Mon State	27
11	Rakhine State	78
12	Yangon Region	44
13	Shan State (East)	18
14	Shan State (South)	19
15	Shan State (North)	28
16	Ayeyarwady Region	155
17	Napyidaw Council	5
	Total	911

多くの橋梁を維持管理しなければならない！





https://www.jica.go.jp/Resource/publication/mundi/1811/201811_03.html

日本の援助による橋梁建設の例



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

- 阪神高速7号北神戸線での耐候性鋼橋の実態調査を実施し、保護性さびの形成状況を確認した。付着塩分量が多いところは、外観評点も低く、注意が必要であることがわかった。
- 耐候性鋼橋で、腐食環境調査とワッペン試験を実施し、地形環境や局部環境によって、付着塩分量や相対湿度の分布が違ふことやそれらと腐食量との関係性を確認した。
- アジア各国で一般構造用鋼材と耐候性鋼材のワッペン試験を実施し、様々な地域環境で腐食環境評価を行い、例えば、耐候性鋼材が使用可能な地域を精査している。

※ 高温多湿・高温乾燥地域など、異なる地域特性下において鋼材の腐食予測の精度向上、腐食促進試験方法の確立、効率的な防食法の技術移転！

今後の予定

1. 引き続きミャンマー国内で暴露試験および気象観測の継続(10年間をめど)
2. 他の新興国地域での暴露試験状況の経過観察など(ケニア, 東南アジア: 塗装やFRP)

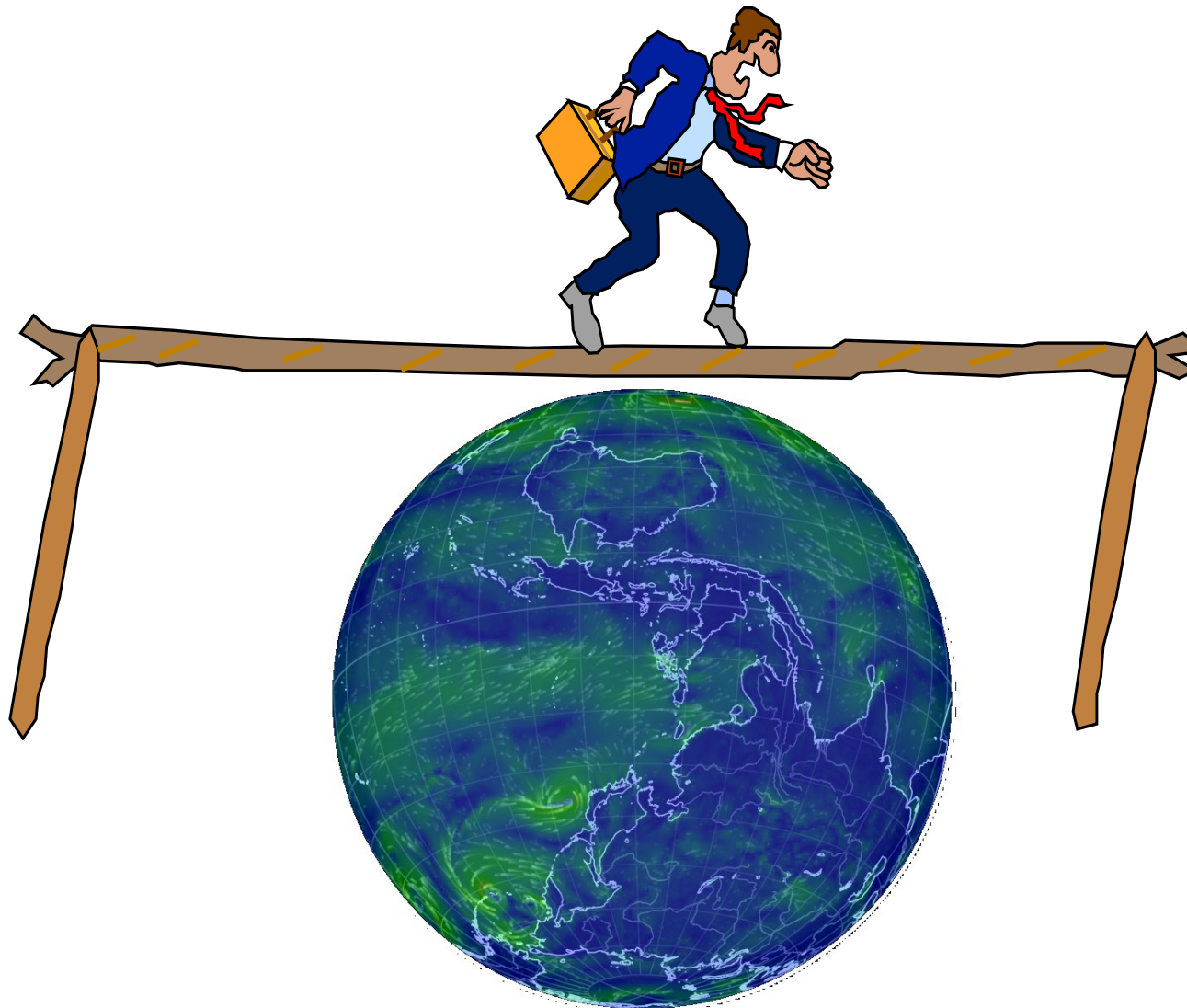
備考: 2023年に訪問した地域(ヤンゴン, モーラミヤイン, モービン, ボガレイなど)は落ち着いており(通常通りの活気)安全性にはそれほど不安は感じませんでした. 車での移動の場合, 州を跨ぐ検問所では少し厳しいチェックがありました. また, 修を跨ぐフライトでは, 到着時に入国検査がありました.

謝辞

ミャンマー国建設省、ヤンゴン工科大学、JFEエンジニアリング(株)

今後も現地支援が必要です！

ご質問は？



一息！

<http://earth.nullschool.net/jp/#current/wind/surface/level/orthographic=-51.55,162.00,248>

ご清聴ありがとうございました！



京都大学
KYOTO UNIVERSITY