

炭素鋼の大気腐食挙動におよぼすさびの影響

(独) 物質・材料研究機構 篠原 正

1. はじめに

炭素鋼の大気腐食速度は、暴露の経過とともに低下することが知られている¹⁾³⁾。本稿では、1年間までの暴露試験結果と従来からなされている長期暴露試験結果¹⁾³⁾とを比較し、炭素鋼の腐食挙動におよぼすさびの腐食抑制効果について検討した。

2. 屋外暴露におけるさびの影響

2.1 暴露試験

試料は厚さ1mmのSPCC(70mm×150mm)で、一方の面を暴露面として、端部および裏面をポリエチレン製シートで被覆した。暴露地は、物質・材料研究機構(茨城県つくば市:以下、つくば)、東京海洋大学清水臨海実験実習所(静岡県静岡市清水:以下、清水)、日本ウェザリングテストセンター銚子暴露場(千葉県銚子市:以下、銚子)、日本ウェザリングテストセンター宮古島暴露場(沖縄県宮古郡上野村:以下、宮古島)、琉球大学(沖縄県西原町:以下、西原)、沖縄電力(沖縄県浦添市:沖縄本島西海岸。以下、浦添)、南西石油(沖縄県中城村:沖縄本島東海岸。以下、中城)、の7箇所である(図1)。各暴露地での暴露期間と方位を表1に示す。

炭素鋼試片を上記の暴露地に暴露し、1か月ごとに更新した。また、特定の暴露開始時期に関しては、2、3、6、12か月の暴露試験も実施した。

- 1) 物質・材料研究機構(茨城県つくば市:つくば)
- 2) 東京海洋大学清水臨海実験実習所(静岡県静岡市清水:清水)
- 3) 日本ウェザリングテストセンター銚子暴露場
(千葉県銚子市:銚子)
- 4) 日本ウェザリングテストセンター宮古島暴露場
(沖縄県宮古郡上野村:宮古島)
- 5) 琉球大学(沖縄県西原町:西原)
- 6) 沖縄電力(沖縄県浦添市:沖縄本島西海岸。浦添)
- 7) 南西石油(沖縄県中城村:沖縄本島東海岸。中城)

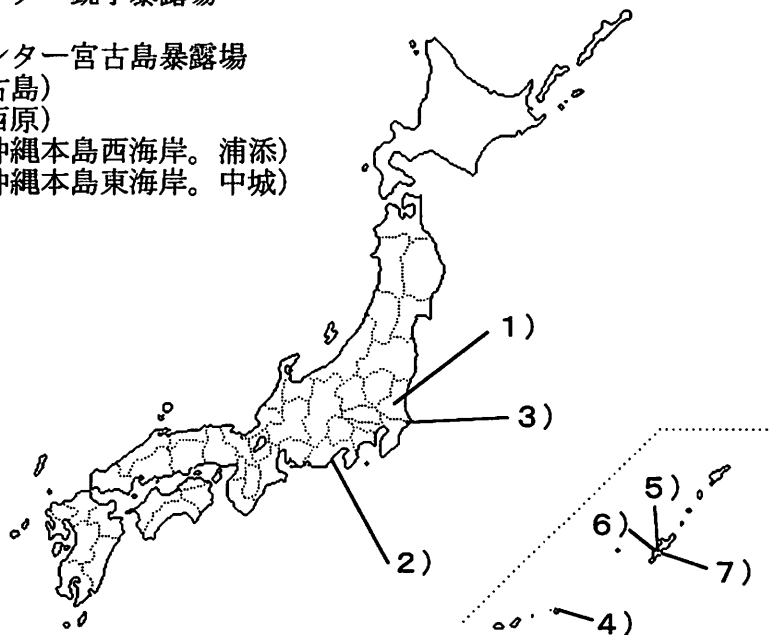


図1 暴露試験実施箇所

表 1 各暴露地での暴露期間と暴露方位

暴露地	暴露期間	方位
つくば	2003.3~2004.2	南
清水	2003.3~2004.2	北西 (海方向)
銚子	1999.5~2000.12	南
宮古島	1999.5~2000.12	南
西原	1995.5~1997.12、2003.1~2003.12	南
浦添	1995.7~1997.12	南
中城	1996.9~1997.12	南

2.2 結果および考察

2.2.1 1年間の腐食挙動

田園地域にあるつくばにおける各月毎の侵食深さ(X_M)および所定の暴露期間の侵食深さ(X)の結果を図 2 に示す。1か月の暴露期間においてはさびの影響は小さいと考えられるので、 X_M を所定の期間積算したものをさびの影響がない場合の侵食深さ(X^*)とした:

$$X^* = \sum_T X_M \quad (1)$$

ここで、 \sum_T は所定の期間の積算を表す。図 2 中には X^* も併せて示しており、 X^* に対する X の比 (X/X^*) が小さいほどさびの腐食抑制効果が大きいことになる。つくばにおいては6か月以降で($X/X^* < 1$)となり、さびの腐食抑制効果があらわれている。

飛来海塩量が多く腐食量も特に大きかった浦添および中城での腐食量の実測値(X)とその暴露期間における X^* との関係を図 3 に示す。両暴露地とも ($X/X^* \approx 1$) であり、さびの腐食抑制効果は見られない。

上記暴露地をのぞく 5 箇所の暴露地における X と X^* との関係を図 4 に示す。 X^* が 10~20 μm 以上となった場合に ($X/X^* \leq 1$) となって、さびの腐食抑制効果があらわれ、しかも $X-X^*$ の関係はほぼ 1 本の曲線 (曲線 A) に乗る。すなわち、1 年までの暴露においては、浦添や中城のようにとくに腐食性が厳しくない限り、 $X-X^*$ の関係は暴露地によらない。各暴露地での年間腐食速度 ($X_y [\mu\text{m}/\text{y}]$) と腐食抑制効果の有無の判定を図 5 にまとめた。1 年間の暴露においては、 X_y が 120 $\mu\text{m}/\text{y}$ より小さい場合に腐食抑制効果があらわれる。

2.2.2 長期間の腐食挙動の推定

長期間の腐食挙動を推定するために、以下のような検討を行なった。

2.2.1 での暴露地に含まれる、銚子、宮古島、西原における 10 年まで暴露試験結果^リにおいて、まず 1 年暴露の結果と 2.2.1 で求めた $X-X^*$ の関係 (曲線 A) とを用いて、さびの影響がない場合の腐食速度($X^*_y [\mu\text{m}/\text{y}]$)を推定した (図 6)。この X^*_y が各暴露地での代表的な値であるとして、

$$X^* = X^*_y T \quad (T: \text{暴露期間}) \quad (2)$$

より所定暴露期間での X^* を求め、これと $X-X^*$ の関係 (曲線 A) を用いてこの時の X を推定した (図 6)。こうして得られた宮古島および西原における X と T の関係 (曲線 P[u] / $u=M$: 宮古島, $u=N$: 西原) を実測値と併せて図 7 に示す。西原においては 10 年暴露のデータまで曲線 P[N]に乗っている。一方、宮古島では 2 年目までは曲線 P[M]に乗って

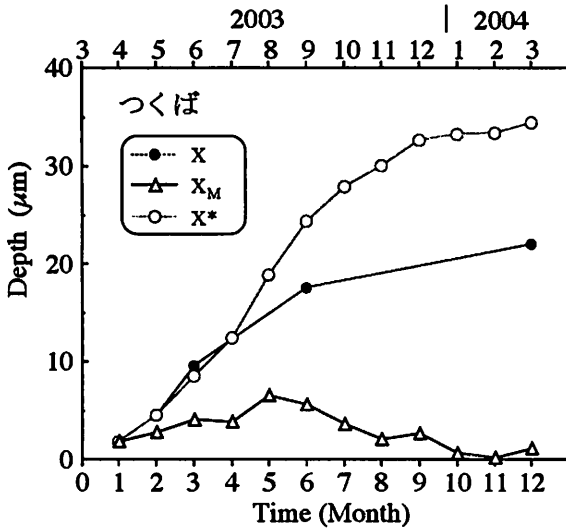


図2 つくばにおける暴露試験結果

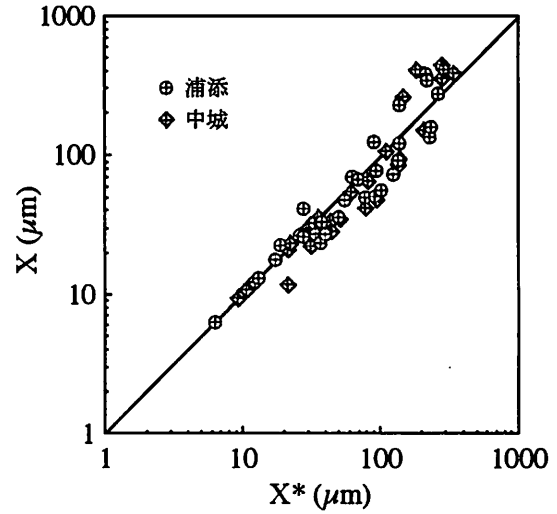


図3 浦添と中城での X-X* の関係

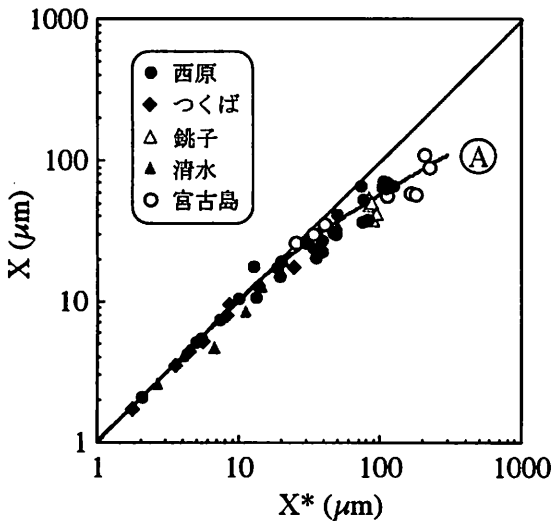


図4 図3以外の暴露地での X-X* の関係

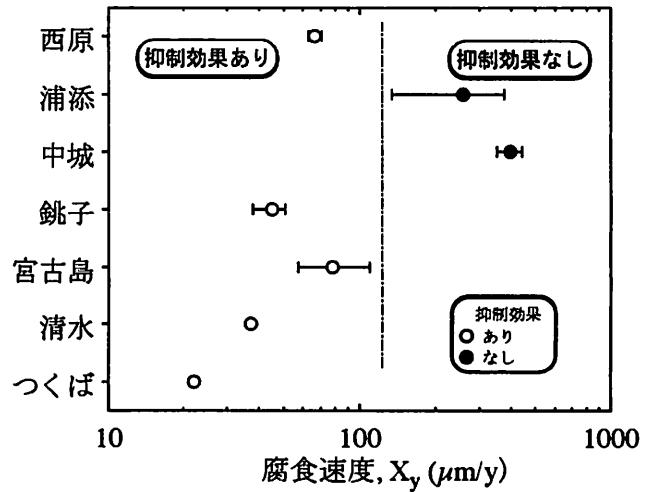


図5 各暴露地での1年暴露での X_y と腐食抑制効果の有無の判定

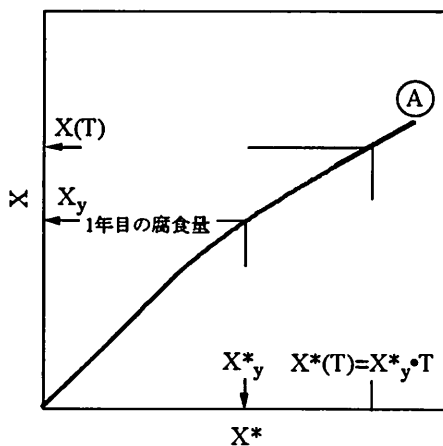


図6 暴露期間(T)での侵食深さ(X(T))の推定法

いるが、その後の X は P[M] よりかなり大きくなる。宮古島でのデータを線形目盛で表したものが図 8 である。図中には P[M] も併せて示した。2.5 年以降 X は暴露期間 (T) に対して線形的に増加し、その腐食速度(X_y)は $187\mu\text{m}/\text{y}$ である。この値は、腐食抑制効果がある上限の腐食速度 $X_y=120\mu\text{m}/\text{y}$ (図 5) より大きい。すなわち、2.5 年以降では、 X_y が $187\mu\text{m}/\text{y}$ に達するほど環境腐食性が厳しくなったためにさびの腐食抑制効果がなくなり、2.2.1 の浦添および中城と同様に、 $(\Delta X/\Delta T)=(\Delta X^*/\Delta T)=X_y=187\mu\text{m}/\text{y}$ となったものと考えられる。そこで、宮古島における $T>2.5\text{y}$ での X および X^* は

$$X[\mu\text{m}]=X(T=2.5\text{y})+187\cdot(T-2.5) \quad (3-1)$$

$$X^*[\mu\text{m}]=X^*(T=2.5\text{y})+187\cdot(T-2.5) \quad (3-2)$$

で与えられるとした。式(3-1)を用いて求めた X と T の関係を図 8 中に Q[M] で示した。

式(2)および(3-2)を用いて各々の暴露地、暴露期間における X^* を求め、これと実測の X との関係として図 9 に示す。図中には、2.2.1 で求めた曲線 A、および式(3-1)および(3-2)より求められる X- X^* の関係 (曲線 Q*[M]) も併せて示した。銚子および西原のデータは曲線 A に、また宮古島のデータは曲線 Q*[M] に、それぞれ乗っている。

5 年までの暴露試験結果²⁾において、式(2)を用いて X^* を求め、各々の暴露地、暴露期間における X- X^* の関係を示したのが図 10 である。いずれの暴露地においてもデータは曲線 A を上限とする 1 本の広幅線の範囲内にある。

このように、つくばや高山などの温かな環境から銚子や西原などの海洋環境に至るまで、長期暴露試験においても X- X^* の関係は暴露地によらず 1 本の広幅線の範囲内にある。以上の各暴露地における X_y^* と腐食抑制効果の有無の判定を図 11 にまとめた。 $X_y^*<160\mu\text{m}/\text{y}$ ($X_y<75\mu\text{m}/\text{y}$) の場合に長期暴露においても腐食抑制効果がある。また、 $X_y^*>220\mu\text{m}/\text{y}$ の場合には、1 年目においても腐食抑制効果がなく $X=X^*$ となり、 $160\mu\text{m}/\text{y}<X_y^*<220\mu\text{m}/\text{y}$ ($75\mu\text{m}/\text{y}<X_y<220\mu\text{m}/\text{y}$) の場合には、図 9 の宮古島のように、当初さびの抑制効果がみられるものの、長期間暴露ではさびの抑制効果がみられなくなる。なお、工業地域においては $X_y^*=660\mu\text{m}/\text{y}$ においても腐食抑制効果がある。

2.3 X- X^* 関係図による腐食量推定法

2.2.2 で示したように、温かな環境から海洋環境に至るまで、X- X^* の関係は暴露地によらず 1 本の広幅線の範囲内にある。各月毎の侵食深さ(X_M)を実測するか、あるいは各年毎の侵食深さの実測値と図 6 の X- X^* の関係より $X_y^*(T)$ を推定すると、所定の年数(T_y)における X^* は

$$X^*=\sum_{T_y} X_M \quad (4)$$

あるいは

$$X^*=\sum_{T_y} X_y^*(T) \quad (5)$$

で与えられるので、これと図 10 の X- X^* の関係から T_y における侵食深さを求めることができる。

一方、1 年間の侵食深さ(X_y)を実測し、これより与えられる X_y^* を当該暴露地の代表的な値とすると、 X^* は

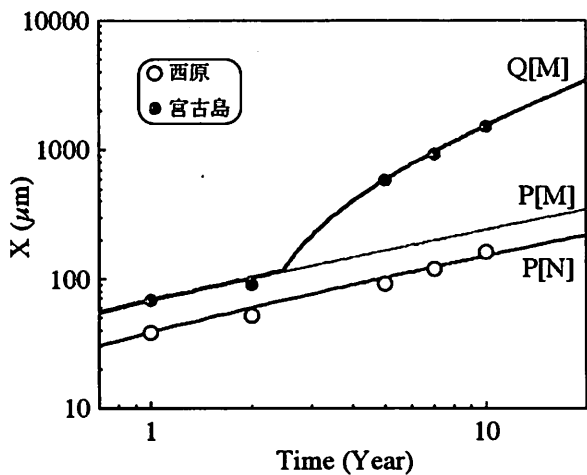


図7 宮古島および西原におけるXと暴露期間(T)との関係¹⁾ (両対数)

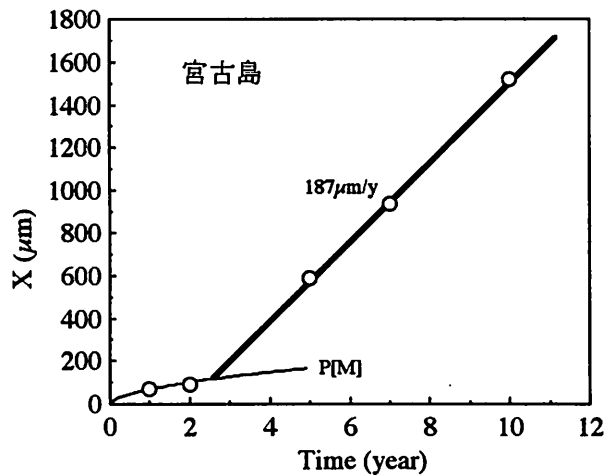


図8 宮古島におけるXと暴露期間(T)との関係¹⁾ (線形目盛)

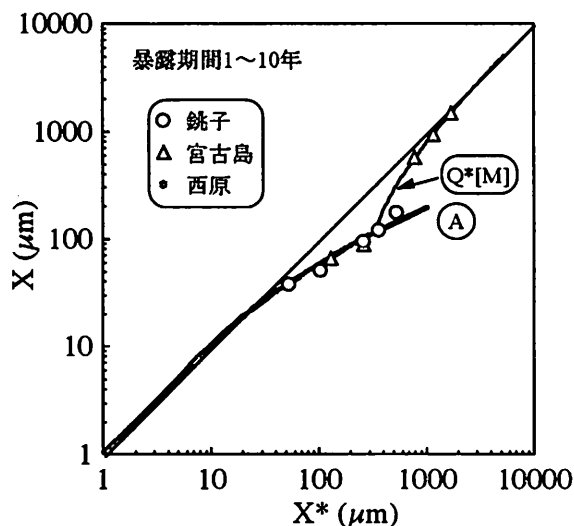


図9 文献1)でのXとX*との関係

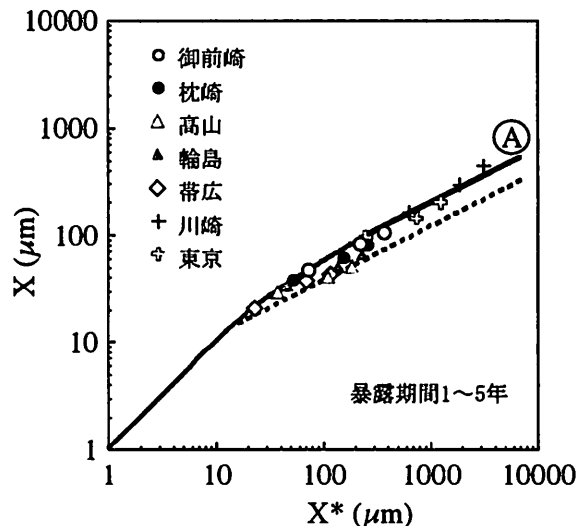


図10 文献2)でのXとX*との関係

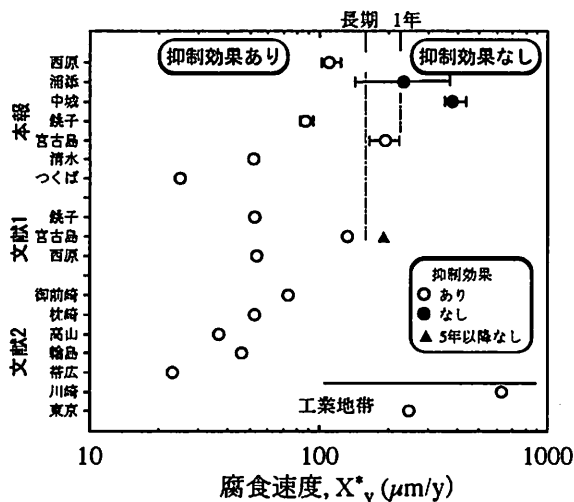


図11 各暴露地でのX*yと腐食制効果の有無の判定

$$X^* = X^*_y T_y \quad (6)$$

で与えられる。ここで、図5に示したように、 $X_y < 120 \mu\text{m/y}$ の場合の X^*_y は図6の $X-X^*$ の関係より求められ、 $X_y > 120 \mu\text{m/y}$ の場合には $X^*_y = X_y$ である。図12には $X-X^*$ の関係を模式的に示し、その上横軸には、種々の X^*_y における暴露期間 (T_y) を目盛った。また、所定の X_y を X^*_y に換算し、図12と同様にして上横軸を目盛ったのが図13である。 $X^*_y < 160 \mu\text{m/y}$ ($X_y < 75 \mu\text{m/y}$) の場合の X の経時変化は曲線Aを含む広幅線によって推定でき、 $X^*_y > 220 \mu\text{m/y}$ ($X_y > 220 \mu\text{m/y}$) の場合のそれは $X=X^*$ によって推定できる。また、 $160 \mu\text{m/y} < X^*_y < 220 \mu\text{m/y}$ ($75 \mu\text{m/y} < X_y < 220 \mu\text{m/y}$) の場合には、図9の宮古島のように、当初は曲線Aを含む広幅線によって推定できるが、その後はこれと $X=X^*$ との間の値を取るようになる。

このように、 X^* そのもの (式(4)あるいは(5)) あるいは年間腐食速度 (X_y あるいは X^*_y) を求めることによって、長期間の腐食量 (X) を推定できる。

3. 雨が直接かからない箇所におけるさびの影響

実橋梁の直接雨のあたらない部位で実施された9年までの暴露試験結果³⁾において、1年目の侵食深さおよびこれから得られる X^* を、それぞれ各暴露箇所での代表的な腐食速度 (X_y および X^*_y) であるとした。この X^*_y と式(6)より X^* を求め、各々の暴露箇所、暴露期間における $X-X^*$ の関係を求めた例を図14, 15に示す。図中に示した番号は、文献(3)における橋梁の番号であり、以下の図でも同様である。No.1~10における $X-X^*$ の関係は橋梁によらずほぼ曲線Aに乗っている (図14)。これに対して、No.11~20における $X-X^*$ の関係は、No.13および17において曲線Aより上方にずれ、それ以外ではほぼ曲線Aに乗っている (図15)。全橋梁 (No.1~41) で、 $X-X^*$ の関係が曲線Aより上方にずれたのは、9年目の侵食深さが $200 \mu\text{m}$ を越え、かつ $X > 100 \mu\text{m}$ となった時点であった。そこで、

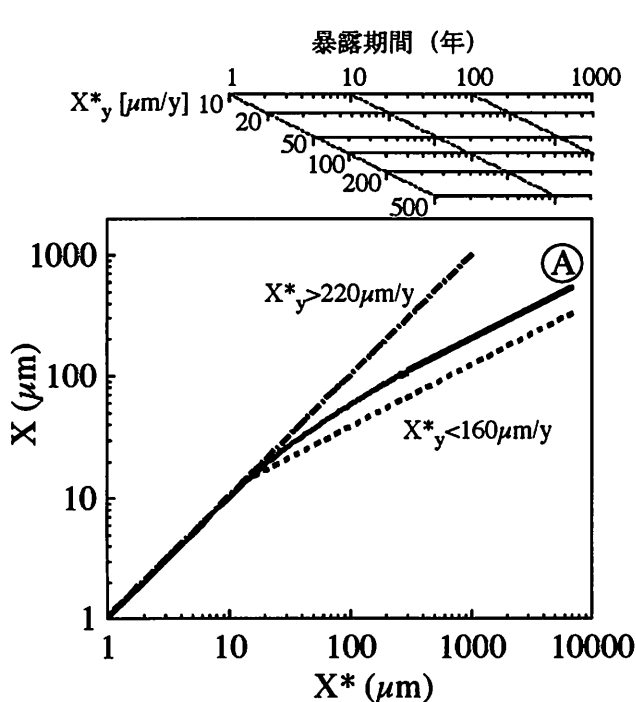


図12 $X-X^*$ の関係の模式図
(上横軸: 種々の X^*_y における暴露期間 (T_y))

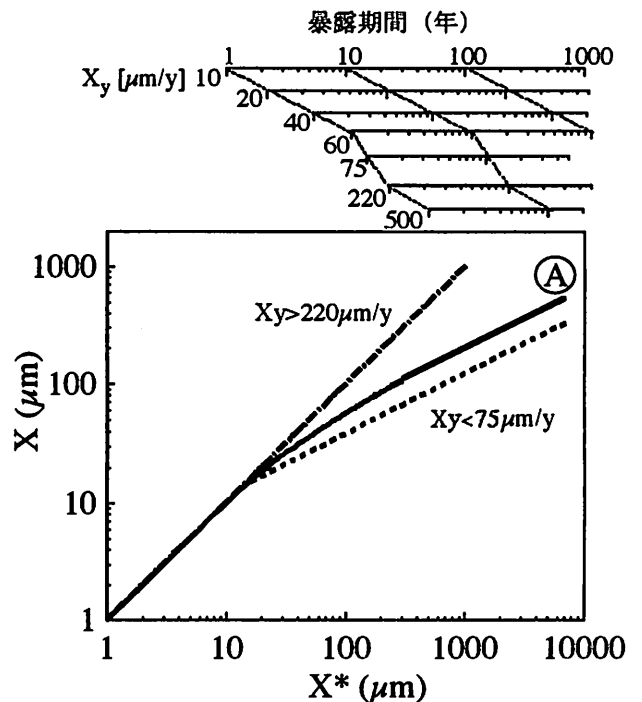


図13 $X-X^*$ の関係の模式図
(上横軸: 種々の X_y における暴露期間 (T_y))

9年目の侵食深さが200 μm を越えた橋梁のうち $X > 100\mu\text{m}$ であるデータを抽出し、それらの X - X^* の関係を図16に示した。 X - X^* の関係は橋梁によらず、ほぼ

$$\log X[\mu\text{m}] = 0.748 \log X^*[\mu\text{m}] + 0.352 \quad (7)$$

で表される一本の直線に乗った。全橋梁(No.1~41)での X - X^* の関係を、式(7)(一点鎖線B)を含めて描き直したものを図17(a)~(d)に示す。多くの場合、 $X > 100\mu\text{m}$ となると式(7)(一点鎖線B)に乗るようであるが、No.12では $X > 100\mu\text{m}$ であっても曲線Aに乗っている。 $X > 100\mu\text{m}$ となった場合には式(7)に乗るのか、あるいは環境によっては曲線Aに乗ることもあるのか、ということについては今後も調査を続けて行く予定である。

4. まとめ

1年間までの暴露試験結果と従来の長期暴露試験結果とを比較し、炭素鋼の腐食挙動におよぼすさびの腐食抑制効果について検討した。

1) 雨がかかる場合、環境がとくに厳しくない限りさびの腐食抑制効果があらわれる。このとき、侵食深さの実測値(X)とさびの影響がない場合の侵食深さ(X^*)との関係は、つくばや高山などの温和な環境から銚子や西原などの海洋環境に至るまで、暴露地によらず1本の広幅線の範囲内にあることがわかった。したがって、 X^* そのものあるいは年間腐食速度(X^*)を求めることによって、長期間の腐食量(X)を推定できる。

2) 浦添、中城のように腐食環境がとくに厳しいところでは、さびの抑制効果がなく、 $X = X^*$ となった。環境腐食性が比較的厳しい宮古島では、当初さびの抑制効果がみられ、1)の X - X^* の関係に従ったが、長期間暴露ではさびの抑制効果がみられなくなった。

3) 実橋梁の直接雨のあたらない部位で実施された9年までの暴露試験結果について、 X - X^* の関係を調べた。 $X < 100\mu\text{m}$ の場合の X - X^* の関係は橋梁によらず、1)と同じ1本の広幅線の範囲内にある。 $X > 100\mu\text{m}$ である場合の X - X^* の関係は橋梁によらず、ほぼ

$$\log X[\mu\text{m}] = 0.748 \log X^*[\mu\text{m}] + 0.352$$

で表される一本の直線に乗った。

ただし、 $X > 100\mu\text{m}$ であっても1)と同じ広幅線の範囲内にあることがあり、環境によって X - X^* の関係が異なるか否かについて今後も調査を続けて行く予定である。

文献

1) (財)日本ウェザリングテストセンター編：経済産業省委託「新発電システムの標準化に関する調査研究」(新発電関連要素機器の長期耐久性及び寿命予測標準化)成果報告書、p.金-1(2003).

2) 堀川、瀧口、石津、金指：防蝕技術, 16, 154 (1967).

3) 建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書(X VIII)」, p.29(1993).

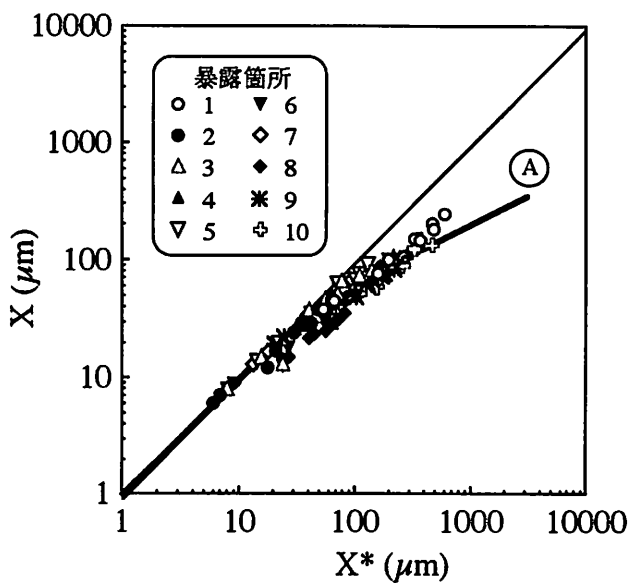


図 14 文献(3)での X と X^* との関係例 (No.1~10)

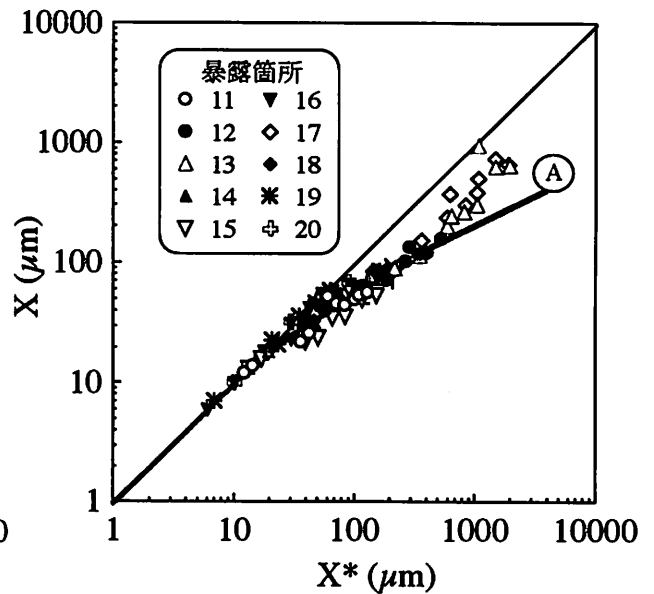


図 15 文献(3)での X と X^* との関係例 (No.11~20)

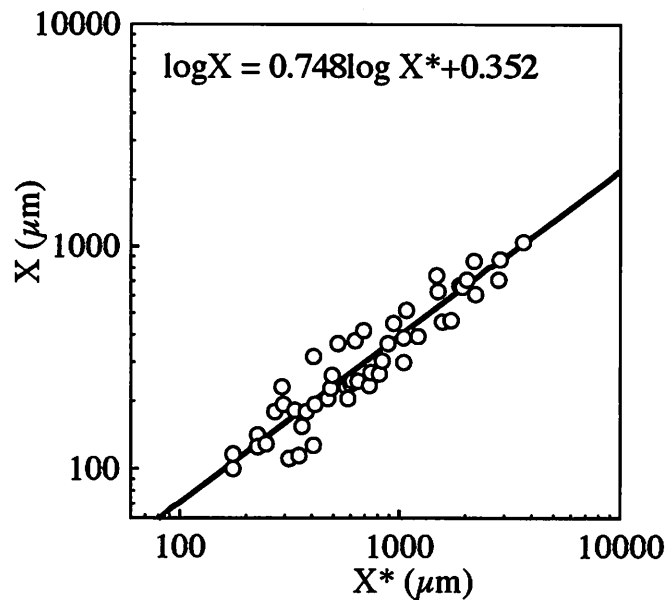
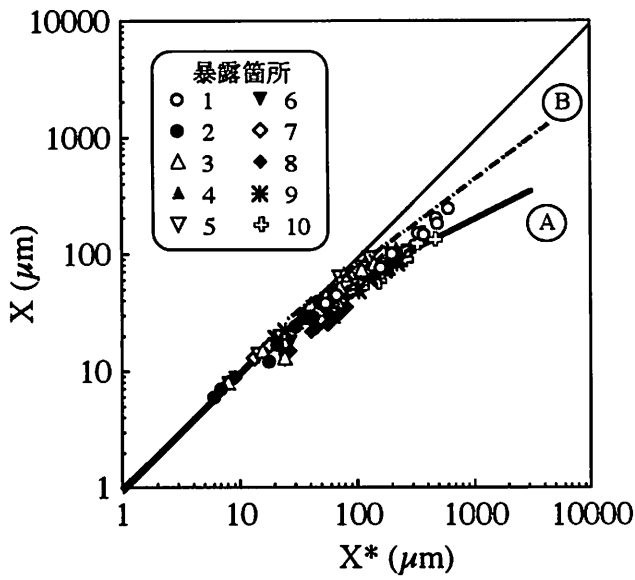
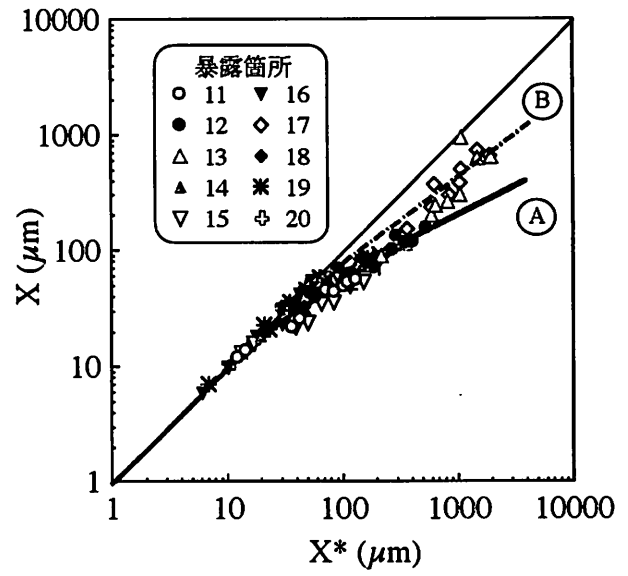


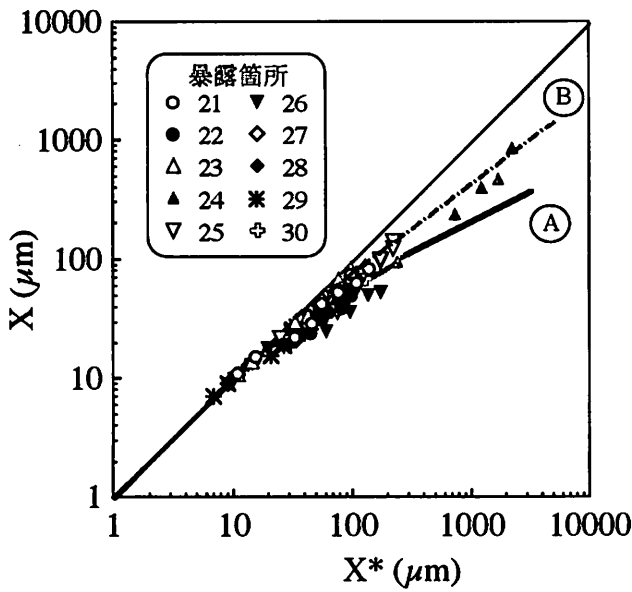
図 16 9年目の侵食深さが $200\mu\text{m}$ を越えた橋梁のうち $X > 100\mu\text{m}$ であるデータでの X - X^* の関係



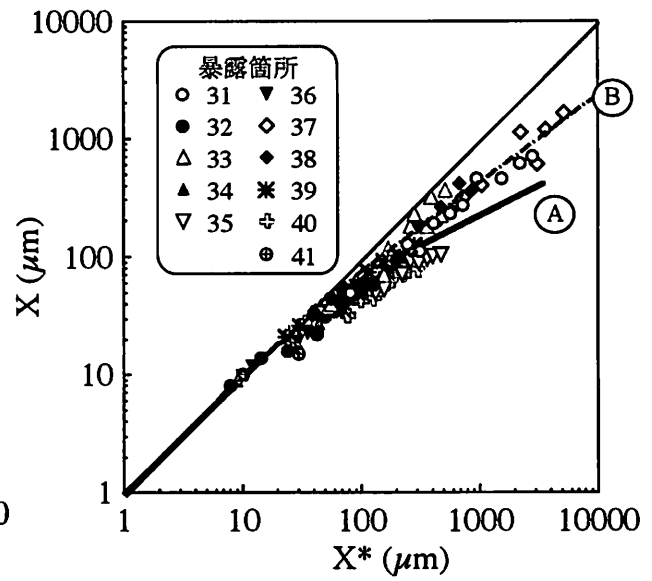
(a) No.1~10



(b) No.11~20



(c) No.21~30



(d) No.31~41

図17 文献(3)での X と X^* との関係 (一点鎖線 B : 式(7))