

鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験と その促進倍率に関する基礎的研究

Accelerated Exposure Tests of Environmental Durability for Steels and the Estimation of Acceleration Coefficient

伊藤義人*, 岩田厚司**, 貝沼重信***

Yoshito ITOH, Atsushi IWATA and Shigenobu KAINUMA

*工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

**名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 博士課程前期課程 (同上)

***博(工) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Reducing the lifecycle cost and lifecycle environmental load of steel bridges is recently one of the most important issues. For this purpose, there is a need to study the durability of members of steel bridges to evaluate the life of bridges and to develop the appropriate design method and maintenance strategy. In this study, the fundamental data for uncoated steels are collected using accelerated exposure tests and the comparison between the test results and the field exposure tests is conducted. As the result, it is clarified that the acceleration coefficient has high correlation to the amount of flying salt and its relationship can be expressed by the involution function.

Keyword: accelerated exposure test, steel, acceleration coefficient, corrosion

キーワード: 環境促進実験, 鋼材, 促進倍率, 腐食

1. はじめに

社会基盤施設のライフサイクルにおけるコストや環境負荷を低減するためには、建設時の効率化やコスト低減のための技術革新だけでなく、維持管理、廃棄・架替えを考慮したライフサイクルによる比較検討が必要である。鋼橋において LCA (Lifecycle Assessment) を行う時には、各部材の耐久性や寿命などを知ることが必要不可欠である。しかし、これまでに行われてきた鋼橋に関する LCA は、各専門家へのヒアリングや文献等により、経験的に仮定された寿命が多く用いられてきた¹⁾。

一般的に部材の耐久性や寿命を実験的に算出する方法として大気暴露実験があり、建設省土木研究所などによって耐候性鋼を主な対象として行われてきた¹⁰⁾。大気暴露実験は、実環境における劣化を追うことはできるが多大な時間を必要とし、かつ、通常設置環境が限定されるため一般性を持った解を得ることは難しい。そのため、大気暴露実験を補完する実験方法として、環境促進実験が材料の分野を中心として行われてきた^{4), 5)}。これまで環境促進実験は主に、新塗装や新防錆法の品質に関する相対的な評価方法として用いられてきた^{6), 7)}。例えば、藤原らの研究⁶⁾においては、塗装鋼板を対象とした2ヶ月間の環境促進実験と、3年間の大気暴露実験を比較することによって、

暴露実験との相関性が高い環境促進実験サイクルの開発などが行われてきた。これらの研究の特徴として、環境促進実験を行う期間が短いため、長期にわたる鋼材の腐食特性が明らかにされていないという点が挙げられる。また、環境促進実験と暴露実験を3ヶ月や2年という、ある1点同士で比較しているため、そこで得られる相関性や促進倍率は非常に汎用性の低いものであると言える。つまり、既往の環境促進実験に関する研究においては、橋梁部材や塗装の耐久性評価および寿命算定には至っていないという状態にある。

そこで、本研究の環境促進実験では、各地に架設される橋梁の各部材に関する耐久性や寿命を環境促進実験により算出し、コストや環境負荷について、100年をターゲットにしたライフサイクル評価に用いることを最終的な目的としている。その第一段階として、本実験では裸仕様の普通鋼材に関する腐食耐久性の基礎データの取得、および耐久性評価において不可欠となる暴露実験との関係を明らかにすることを目的としている。そのため、長期的な環境促進実験による腐食進行の現象を把握するとともに、経時的な重量減少量、平均および最大板厚減少量などの腐食特性を求める。また、それらの結果と既往の大気暴露実験結果を比較することで促進倍率を算出し、暴露地点における各種腐食影響因子と促進倍率の相関性について検討することで、汎用性の高い促進倍率の算出式を提案する。さらには、

暴露地点における鋼材の板厚減少量に関する簡易的な算出式の提案を試みる。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本実験では、図-1 および写真-1 に示す複合サイクル試験機（スガ試験機社製）を用いた。この複合サイクル試験機は塩水噴霧条件、温湿度条件、乾燥条件などを任意の順序・組み合わせによって自動サイクル運転することができる装置である。試験槽内の寸法は、幅2,000×奥行1,000×高さ500mmであり、最大設置枚数はウェザロサイズ供試体（150×70×9mm）で188枚である。

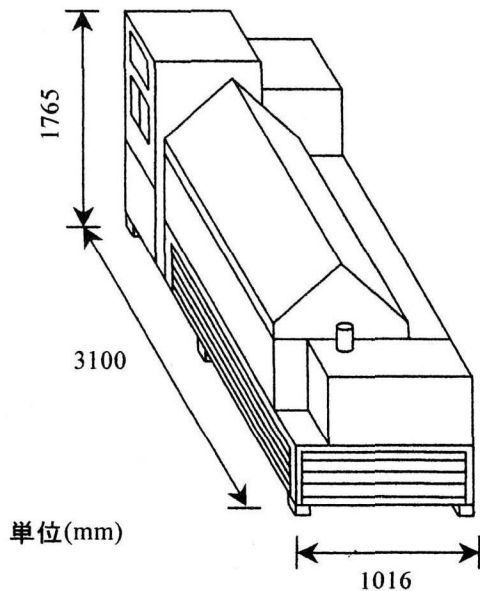


図-1 複合サイクル試験機

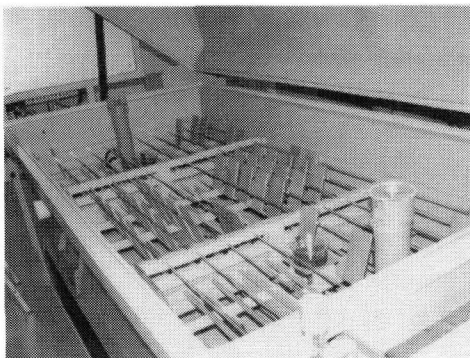


写真-1 複合サイクル試験機内部

2.2 実験供試体

本実験では JIS 規格の普通鋼（SM490 材）の高炉材および電炉材（各 15 枚）を実験供試体として用いる。表面処理方法については、高炉材、電炉材それぞれ JIS で規格化されている 50 番グリットブラスト（S-G50）によって行った。また、供試体に

用いた鋼材の化学成分を表-1 に示す。

これまでに行われてきた環境促進実験では、一般に縦 150×横 70×幅 1.6~3.2（mm）の供試体がいわれており⁶⁾、縦と横のサイズについてはこの値を採用することとした。なお、板厚に関しては図-2 に示すように道路橋示方書において規定されている鋼材の最小板厚 8mm を考慮した上で、板厚 9mm の供試体を用いることとした⁸⁾。

表-1 鋼材の化学成分（%）

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	×100			×1000		×100		
高炉材	16	32	131	10	2	—	—	—
電炉材	12	25	131	19	5	10	6	6

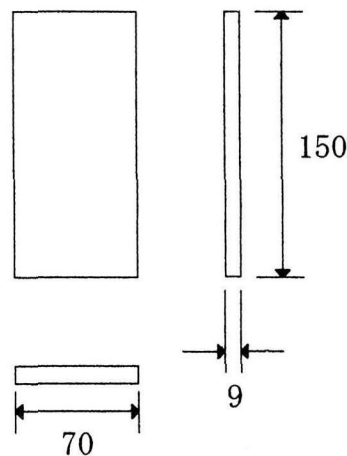


図-2 実験供試体の寸法（mm）

2.3 実験条件

図-3 に本実験で用いる複合サイクル条件（S6）を示す。このサイクルは 5%濃度の塩水噴霧、湿潤、および温度の異なる 2 種類の乾燥からなる。本実験では最大で 600 サイクル（約 150 日）行った。

この S6 サイクルは藤原ら⁹⁾の行った塗装鋼板の研究において、表-2 に示すように他の試験方法と比べ、暴露試験との相関性が最も高いと結論付けられたものであり、JIS で採用されている通産省の S6 サイクルである。本実験で用いる供試体は裸仕様の普通鋼であるが、普通鋼については特に推奨されているサイクル条件がなく、この後行う予定である塗装鋼板の実験を考慮した上で、このサイクルを用いることとした。

2.4 実験供試体の配置

図-4 に複合サイクル試験機内の供試体の配置図を示す。一般に、複合サイクル実験では供試体の配置場所により、腐食減少量が 40~50%程度ばらつくと言われている。そこで、本実験に先立って、複合サイクル試験機内の供試体の配置場所による腐食量の違いを確認するため、予備実験を行った。その結果、

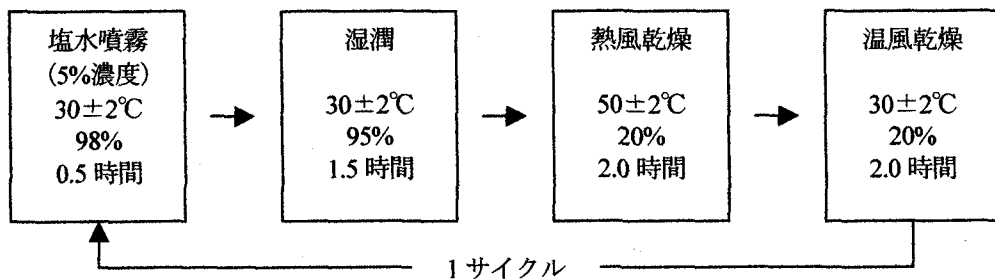


図-3 サイクル条件

表-2 屋外暴露3年間と促進腐食試験2ヶ月間の相関関係⁶⁾

促進腐食試験名	屋外暴露試験				
	東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢
SS (JIS・塩水噴霧試験)	0.122	0.578	0.505	0.275	0.444
S6 (通産省)	0.688	0.714	0.787	0.819	0.846
DS (建設省土木研究所)	0.629	0.602	0.504	0.648	0.552
NS (日産自動車)	0.613	0.676	0.672	0.793	0.831
JASO (日本自動車技術会)	0.414	0.780	0.664	0.701	0.793
海水 NS	0.650	0.737	0.907	0.837	0.862
ASTM	0.559	0.891	0.823	0.771	0.804

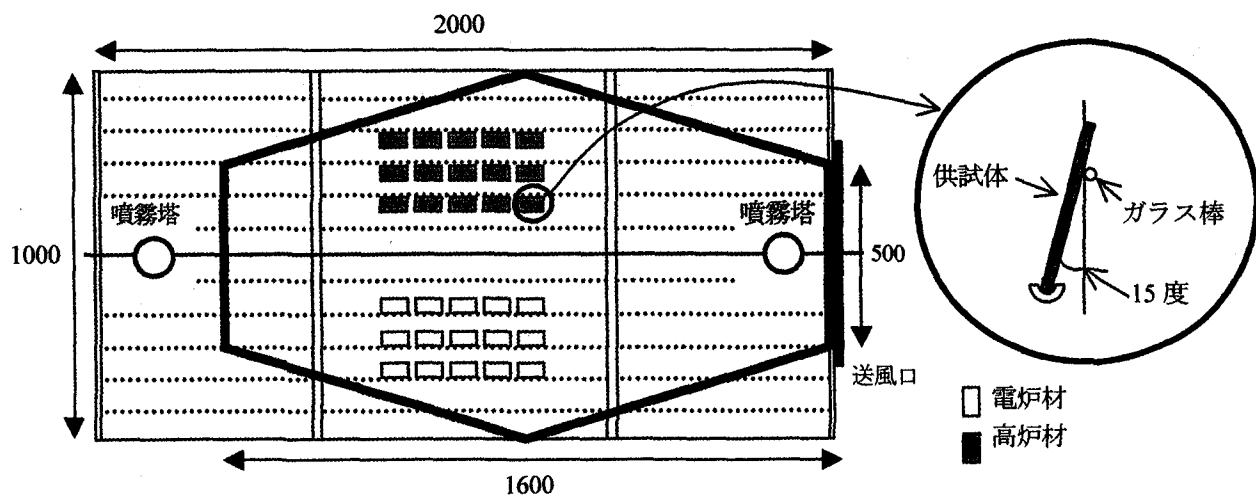


図-4 供試体の配置図と設置角度

図-4 の太線内では、その誤差が重量減少量で 10%程度以内となることが明らかになった。また、太線外では最大で 50%の誤差が確認された。そこで本実験では、試験槽の中央部付近に供試体を配置した。また、供試体の配置角度については、図-4 に示す通り、鉛直方向から保持角 15 度で配置した。

3. 実験結果と考察

今回の実験では 120 サイクル (約 30 日) ごとに供試体を 3 体ずつ取り出し、クエン酸アンモニウムとチオ尿素により煮沸することによりサビ取りを行った後、重量および板厚を測定した。以下に、各測定値に対する 600 サイクルまでの経時的変化量について考察を行う。

3.1 表面性状の経時変化

図-5 および図-6 に、120 サイクルから 600 サイクルにおける高炉材と電炉材の表面性状の変化、および 17 色からなる色見本を示す。本実験では、各サイクルに対して 3 体ずつの供試体を用いて実験を行ったが、ここではそれぞれ代表的な 1 体についてのみ示す。

図-5 および図-6 より、120 サイクルでは高炉材と電炉材ともに赤褐色の錆が生成し、240 サイクルから 600 サイクルへと時間とともに黒色を帯びた錆が生成されている。これらの赤褐色および黒色を帯びた錆の成分は主に水化した酸化第二鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ であり、式 (1) および式 (2) の化学反応により生成される。

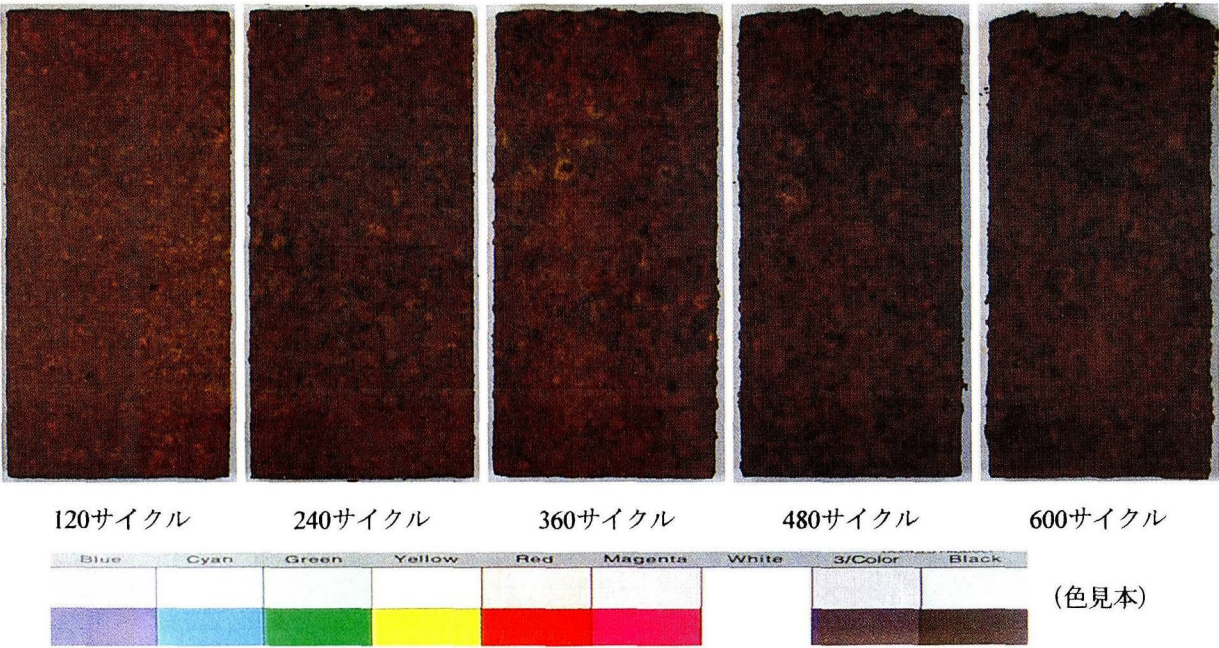


図-5 表面性状の変化（高炉材）

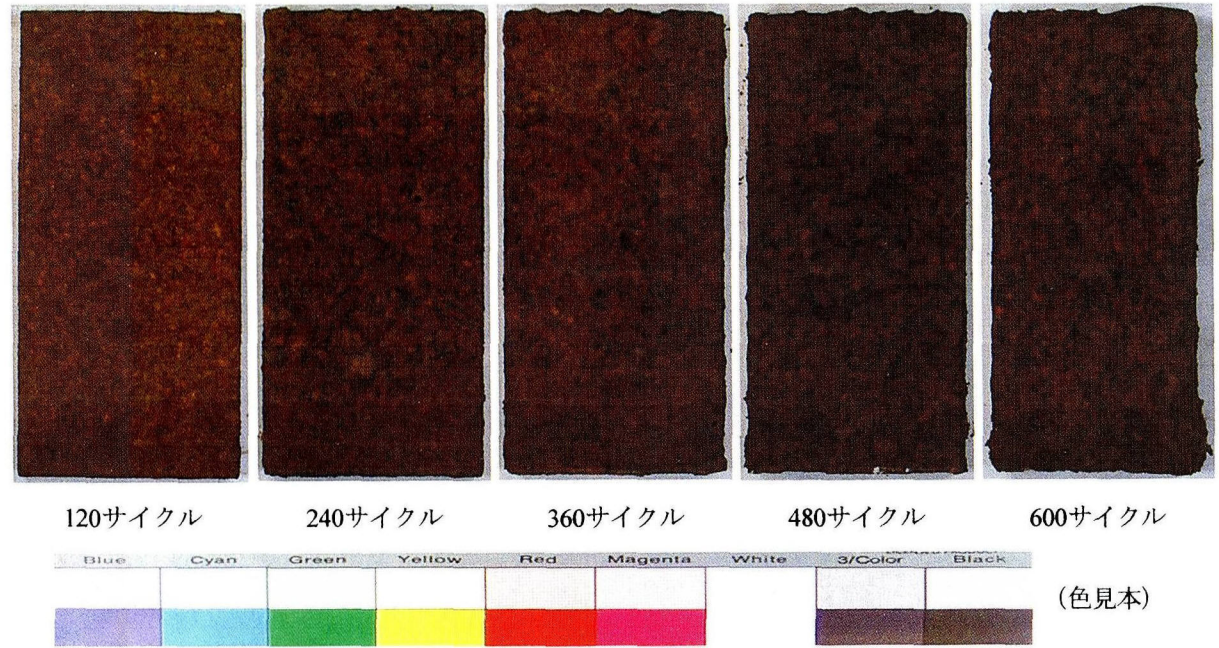
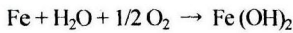
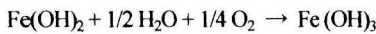


図-6 表面性状の変化（電炉材）



(1)



(2)

また、360 サイクルの供試体から徐々に割れの数やふくれの量などが増加しており、特に供試体の側面や下端などの端部においてふくれが激しくなっている。

3.2 重量減少量の経時変化

表-3 に各サイクルにおける重量減少量を示す。図-7 に高炉材と電炉材の3体の平均値を▲と でそれぞれ示す。また、

平均値±標準偏差をIで示す。表-3の腐食による供試体の重量減少量は、サイクル数とともに大きくなっているが、各サイクル間の増加量は減少している。

一般に、腐食による重量減少量と時間の関係は式(3)により表される⁹⁾。

$$P = k t^n \quad (3)$$

ここで、

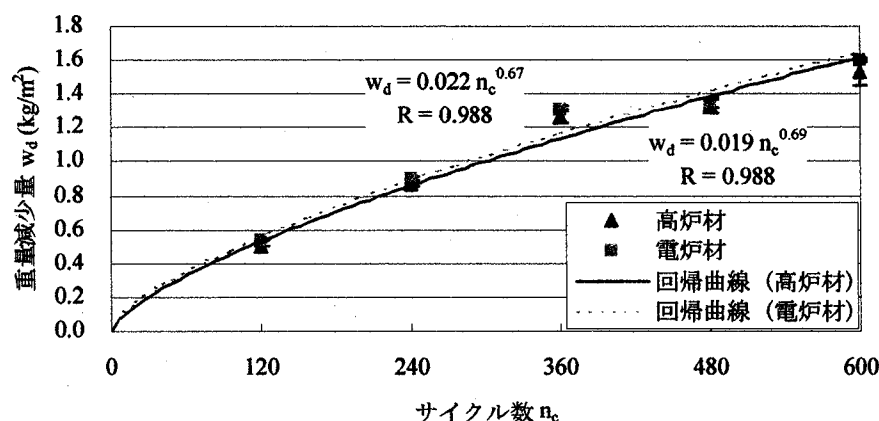
P：重量減少量 (kg/m²)

t：時間 (年)

k, n：定数

表-3 各サイクルにおける重量減少量 (kg/m²)

		120 サイクル (約 30 日)	240 サイクル (約 60 日)	360 サイクル (約 90 日)	480 サイクル (約 120 日)	600 サイクル (約 150 日)
高炉材	平均値 (M)	0.51	0.87	1.27	1.34	1.53
	標準偏差 (S)	0.015	0.036	0.048	0.074	0.022
	変動係数 (%)	2.98	4.17	3.82	5.51	1.46
電炉材	平均値 (M)	0.54	0.90	1.31	1.35	1.60
	標準偏差 (S)	0.031	0.028	0.039	0.096	0.064
	変動係数 (%)	5.78	3.16	2.96	6.93	4.01

図-7 重量減少量の経時変化 (kg/m²)

そこで、ここでは時間 t の代わりにサイクル数 n_c を用いて、重量減少量とサイクル数 n_c の関係を最小二乗法により式 (3) の累乗関数で表したものを図-7 に示す。ここで、 w_d は重量減少量、 n_c はサイクル数、 R は相関係数を表している。図中の実線と点線は高炉材と電炉材の結果を示している。各サイクルにおける電炉材の重量減少量は高炉材に比べ 2~8% 程度大きい。しかし、これは環境促進実験の配置による誤差の範囲 (約 10%) であることから、高炉材と電炉材の差異はほとんどないと言える。

3.3 板厚減少量の経時変化

腐食した供試体の平均板厚減少量を算出する方法として、重量換算板厚およびマイクロメータによる測定を行っている¹⁰⁾。

¹¹⁾ 重量換算板厚は、供試体の全面が均一に腐食すると仮定し

て、重量減少量を表面積で割って求めた板厚であり、土木研究所の暴露実験結果の評価¹¹⁾ に用いられている。表-4 に重量換算とマイクロメータによる高炉材の板厚減少量を示す。ここで、マイクロメータによる測定結果には、図-9 に示す 5 点の測定点の平均値を用いた。また、図-8 に高炉材 3 体の平均値および平均値±標準偏差を、●と○および I で示す。さらに、重量減少量の時と同様に、最小自乗法による板厚減少量 t_d とサイクル数 n_c の回帰曲線を図中に示す。

図-8 より、マイクロメータと重量換算の差は 120 サイクルにおいて多少見られるものの、全体としては一致していると言える。また、板厚減少量についても、重量減少量の結果と同様に、サイクル数の累乗関数で精度良く表現できる。

表-4 各サイクルにおける平均板厚減少量 (mm)

		120 サイクル (30 日)	240 サイクル (60 日)	360 サイクル (90 日)	480 サイクル (120 日)	600 サイクル (150 日)
重量換算	平均 (M)	0.065	0.111	0.162	0.170	0.195
	標準偏差 (S)	0.0019	0.0046	0.0062	0.0094	0.0028
	変動係数 (%)	2.98	4.17	3.82	5.51	1.46
マイクロメータ	平均 (M)	0.088	0.109	0.156	0.157	0.198
	標準偏差 (S)	0.0046	0.0072	0.0073	0.0128	0.0136
	変動係数 (%)	5.24	6.68	4.69	8.15	6.86

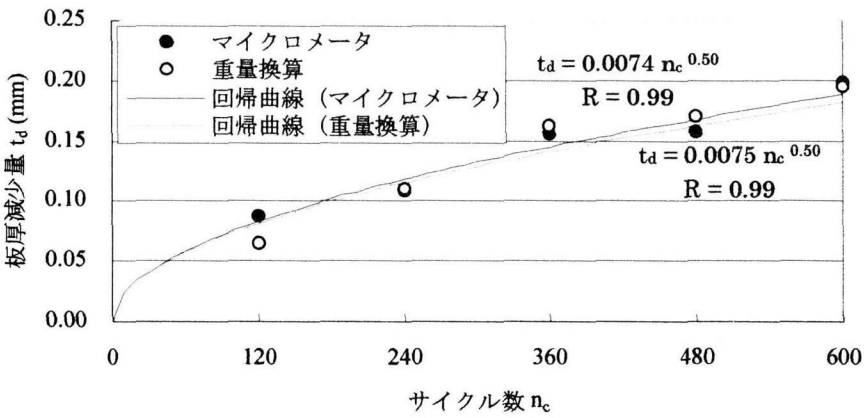


図-8 板厚減少量の経時変化 (mm)

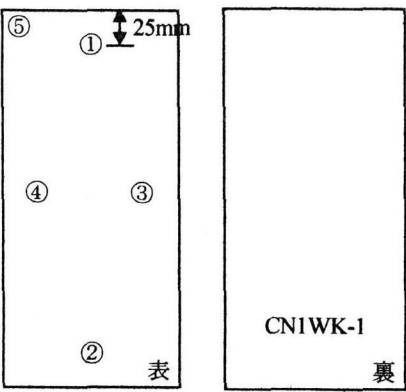


図-9 供試体の板厚測定ポイント

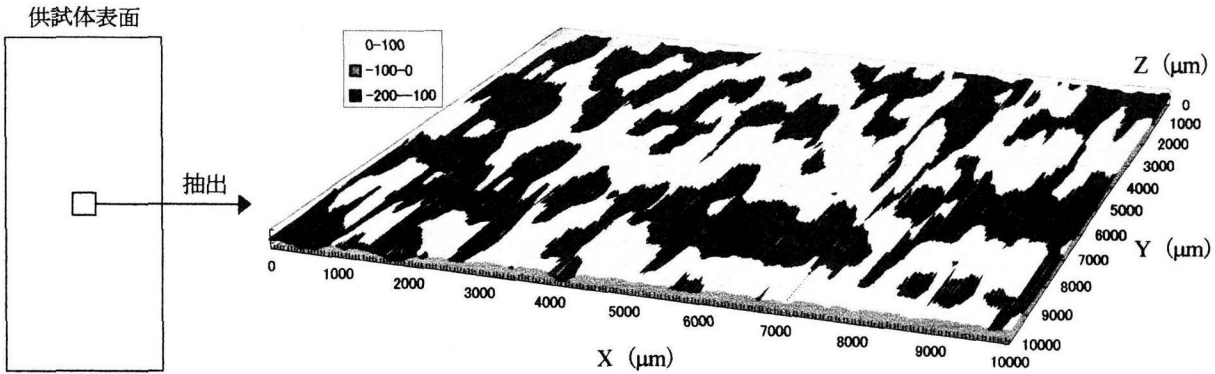


図-10 レーザフォーカス深度計による測定結果

表-5 各サイクルにおける最大腐食孔の深さ (mm)

	120 サイクル (30 日)	240 サイクル (60 日)	360 サイクル (90 日)	480 サイクル (120 日)	600 サイクル (150 日)
平均 (M)	0.299	1.340	1.607	1.681	2.568
標準偏差 (S)	0.0539	0.0903	0.3965	0.2759	1.0612
変動係数 (%)	18.0	6.74	24.7	16.4	41.3

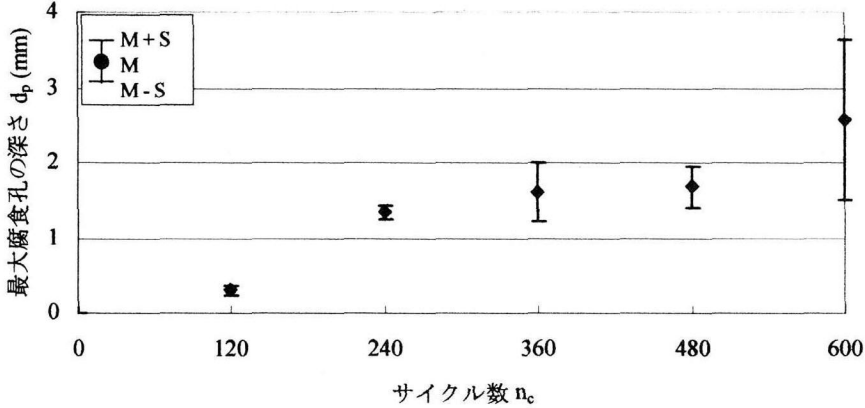


図-11 最大腐食孔の深さの経時変化 (mm)

3.4 最大腐食孔の深さの経時変化

本実験ではレーザフォーカス深度計 (最小読み取り値: 0.1

μm, 測定精度: 0.1 μm, (株)KEYENCE 社製) を用いて, 高炉材の最大腐食孔の測定を行った。図-10 に結果の表示例を, 表

－5および図－11に各サイクルにおける最大腐食孔の深さの平均値、標準偏差、および変動係数を示す。今回行ったレーザフォーカス深度計による計測では、腐食後の平均断面に対する最大腐食孔の深さを算出した。

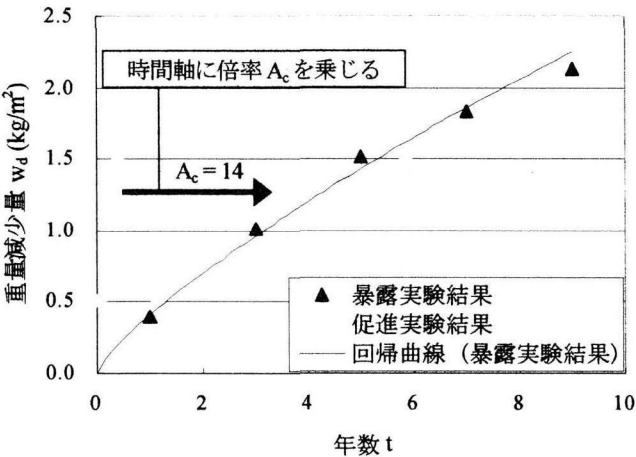
図－11より、平均断面に対する最大腐食孔の深さはサイクル数とともに増加している。しかし、各サイクル間における増加の割合についてはばらつきが大きく、一定の関係は見られない。

3.5 暴露実験結果と促進倍率の算出

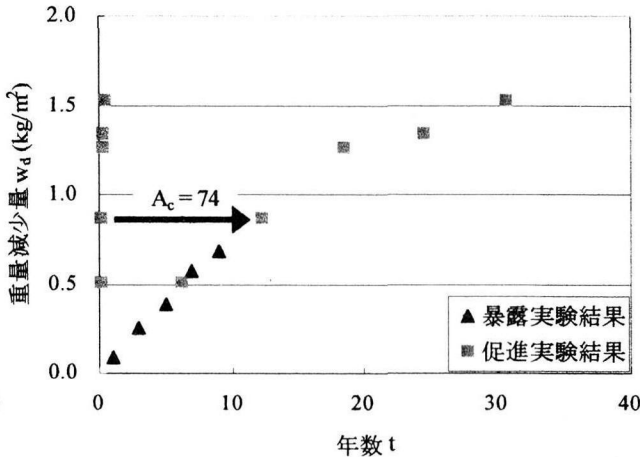
建設省土木研究所では全国 41ヶ所の橋梁を対象として鋼材の暴露試験と飛来塩分量の調査を行ってきた¹¹⁾。そこで、公開されている9年分の暴露実験結果のうち、欠損データのない31の暴露実験結果と、今回行った600サイクル(約5ヶ月)の促進実験結果を用いて、それぞれの暴露実験結果に対する促進倍

率を算出した。ここで、促進倍率とは今回行った環境促進実験が大気暴露実験の何年分に相当するかを表した指標である。図－12に示すように環境促進実験結果の時間軸に倍率 A_c を乗じ、暴露実験結果との残差が最小となる時の倍率 A_c を最適促進倍率と考えて算出した。なお、促進倍率の算出は、各実験結果の重量減少量を用いて行った。図－13で示したように東北地方の都市部における促進倍率は74と算出された。

暴露地点における飛来塩分量($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ 、以下 mdd とする)および海岸線からの距離と各暴露実験結果による促進倍率の結果を表－6に示す。促進倍率は海岸部で6～75倍と比較的小さく、都市・田園部で70～178倍、山間部で53～189倍と非常に大きくばらつく値となった。従って、それぞれの地域区分内における促進倍率の範囲が非常に大きいため、地域区分による促進倍率の議論は非常に難しいことが分かる。



図－12 促進倍率の算出方法(四国・海岸部)



図－13 促進倍率の算出結果(東北・都市部)

表－6 各暴露実験結果に対する促進倍率⁹⁾

地区	地域区分	飛来塩分量(mdd)	海岸線からの距離(km)	促進倍率	地区	地域区分	飛来塩分量(mdd)	海岸線からの距離(km)	促進倍率
北海道	海岸	0.198	1.5	27	中国	海岸	0.856	0.1	6
	都市	0.015	15.0	178		海岸	0.052	1.0	42
	山間	0.021	40.0	105		山間	0.022	56.0	189
	海岸	0.074	1.5	59		都市	0.053	4.7	81
東北	海岸	0.084	1.4	54		都市	0.021	4.0	139
	都市	0.029	8.0	74	四国	山間	0.003	15.0	174
関東	田園	0.040	35.0	110		都市	0.018	7.6	129
	海岸	0.093	0.0	49		海岸	0.231	0.1	14
	海岸	0.341	0.3	13		山間	0.016	13.0	114
北陸	都市	0.042	6.0	70	九州	海岸	0.178	0.8	20
	山間	0.013	57.0	53		山間	0.012	24.0	193
中部	都市	0.016	4.0	84		都市	0.080	1.8	112
	海岸	0.041	1.6	75		都市	0.017	4.5	114
近畿	海岸	0.078	1.8	55	沖縄	海岸	0.181	0.3	17
	山間	0.011	52.0	84		山間	0.064	2.8	63
	海岸	0.076	2.0	61					

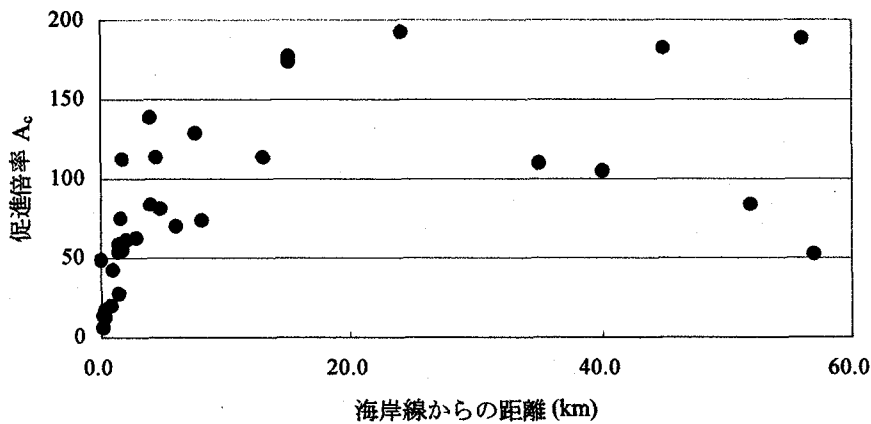


図-14 海岸線からの距離と促進倍率の関係

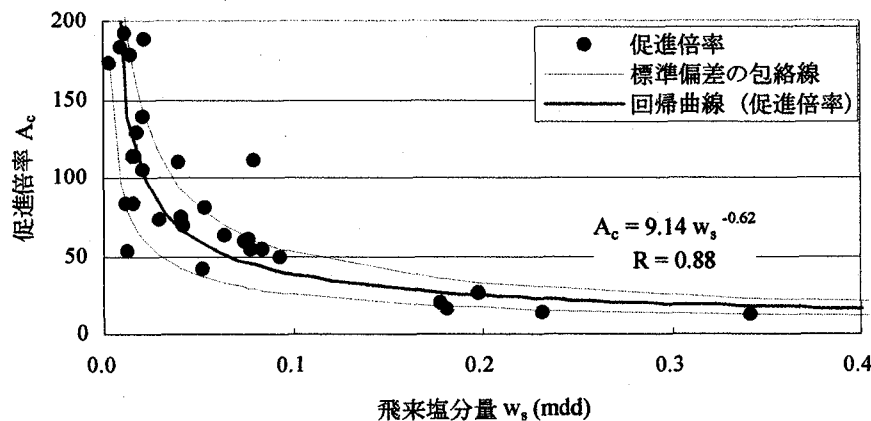


図-15 飛来塩分量と促進倍率の関係

3.6 腐食影響因子と促進倍率の相関性

表-6 の結果から分かる通り、鋼材の腐食量や促進倍率は地域ごとによって決まるものではなく、部位や環境条件に依るところが大きい。一般的に、周囲の相対湿度、金属表面と大気との温度差、亜硫酸ガス等の汚染物質、飛来塩分量などが腐食に対する影響因子として挙げられる^{12), 13)}。

そこで、ここではどのような因子との相関性が高いかを検討する。図-14 に海岸線の距離と促進倍率の関係を示す。5km 程度までの比較的距離の近い領域では、ある一定の傾向が見られるが、それ以上の領域では、同じ距離であっても促進倍率が 2 倍以上異なるなど、一定の関係を導き出す事は難しいと言える。

次に、飛来塩分量と促進倍率の関係を図-15 に示す。図中の実線は累乗関数による回帰曲線を表している。また、点線は、飛来塩分量の値による促進倍率の結果のばらつきを考慮した、標準偏差 (±S) の包絡線を表している。

回帰分析の結果、データの約 70% が ±S 帯域に存在しており、相関係数 R も 0.88 と高いことから、飛来塩分量と促進倍率の関係は、図中の実線で示す式 (4) によって近似することができると言える。

$$A_c = 9.14 w_s^{-0.62} \quad (4)$$

ここで、

w_s : 飛来塩分量 (mdd)

A_c : 促進倍率

3.7 促進倍率を用いた板厚減少量の推定

3.3 で算出したマイクロメータによる板厚減少量の式 ($t_d = 0.0074 \times n_c^{0.50}$) と式 (4) を用いることにより、飛来塩分量 w_s の地点に架設された橋梁の垂直部材に関する t 年後の平均板厚減少量 t_d は式 (5) により算出することができる。

$$t_d = 0.094 \times (w_s^{0.62} \times t)^{0.50} \quad (5)$$

ここで、

t_d : 板厚減少量 (mm)

w_s : 飛来塩分量 (mdd)

t : 時間 (年)

ただし、式 (5) による板厚減少量の算出には、(a) 対象とする実橋の部材は垂直に配置されている (b) サビは部材全体に一樣に生成されている (全面腐食) などの制約条件がある。しかし、今後、水平に配置した供試体の実験や局部腐食を考慮した実験を追加して行うことで、より汎用性の高い推定式を算出することができると言える。

4.まとめ

本研究では、長期の環境促進実験による腐食減量の経時変化と、暴露実験結果との相関性について検討した。以下に、本研究で得られた主な結果を示す。

- (1) 供試体の重量減少量はサイクル数とともに単調増加するが、その増加量はサイクル数とともに減少する。重量減少量は時間の累乗関数で精度良く表現することができることを示した。
- (2) 塩水噴霧複合サイクル実験により、高炉材と電炉材の腐食特性の差について比較したところ、2~8%程度電炉材の方が重量減少量が大きかった。しかし、これは環境促進実験の誤差の範囲であり、高炉材と電炉材の差異はほとんどないことを明らかにした。
- (3) マイクロメータ測定と重量換算による板厚減少量の結果はほとんど一致しており、サイクル数を変数とした累乗関数によって精度良く表現することができることを示した。
- (4) 最大腐食孔の深さのはサイクル数とともに増加し、そのばらつきもサイクル数とともに大きくなることを明らかにした。
- (5) 促進倍率と海岸線からの距離および飛来塩分量の相関性を検討した結果、海岸線からの距離と促進倍率の関係については、同じ距離であっても促進倍率が2倍以上異なるなど、一定の関係を導き出すことは難しい。一方、飛来塩分量と促進倍率の関係については、式(4)により近似できることを明らかにした。
- (6) 飛来塩分量 w_s の地点に架設された橋梁の垂直部材に関する t 年後の平均板厚減少量 t_t は、ある一定の制約条件の下で、式(5)により算出することができることを明らかにした。

今後の課題

本研究で行った実験は裸仕様の普通鋼材を対象としたものであるため、ここで得られた促進倍率や板厚減少推定式の結果は基礎的なデータであり、直接ライフサイクルアナリスまでに用いようとすると塗装が剥がれた後の鋼材および腐食環境の厳しい桁端部など、限定的な状況でしか用いることができない。そのため、今後は鋼材の塗膜や継手部などに関する実験を行い、今回得られた結果と結びつける事によって、橋梁部材の耐久性や寿命を算出する必要があると言える。

謝辞：本研究を行うにあたって、供試体製作などにご協力頂いたトピー工業の酒井吉永氏、長屋五郎氏に深く感謝致します。また、本研究の一部は平成11~13年度の文部省・科学研究費補助金・基盤研究(B)(研究代表者：伊藤義人)として研究補助を受けて行った。

参考文献

- 1) 伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣：少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1259-1270, 2000.
- 2) 伊藤義人, 永田裕規, スズル ラクシマン, 西川和廣：地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1306, 1999.
- 3) Sunuwar, L., Itoh, Y., Nagata, H. and Nishido, T. :Characteristics of Environmental Impact of Bridges for Type Selection, Journal of Civil Engineering Information Processing System, Vol.6, JSCE pp.173-180, 1997.
- 4) 自動車技術協会：自動車用材料腐食試験方法-複合サイクル試験の促進性および暴露との相関性, 自動車技術界テクニカルペーパー, p.57, 1991.
- 5) 自動車技術協会：自動車用材料腐食試験法, 自動車規格, JASO M 609-91, 1991.
- 6) 藤原博, 田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.129-140, 1997.
- 7) Cleveland Society for Coatings Technology Technical Committee : Correlation of Accelerated Exposure Testing and Exterior Exposure Site, Journal of Coatings Technology, Vol.66, No.837, pp.49-67, 1993.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, pp.144-145, 1996.
- 9) H. H. ユーリック, R. W. レヴィー：腐食反応とその制御, 産業図書株式会社, 1989.
- 10) 藤井堅：腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法, 第1回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集, pp.21-30, 1999.
- 11) 建設省土木研究所：耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XV), 1992.
- 12) Talbot, D. and Talbot, J. : Corrosion Science and Technology, CRC Press LLC, 1998.
- 13) 腐食防食協会：金属の腐食・防食 Q&A, 丸善株式会社, 1988.

(2001年9月14日受付)