国内の気象要素と鉄鋼の大気腐食に関する研究 (第2報)*

気象因子と大気汚染物質との重相関性

尾 間 一 彦** 菅 野 照 造** 平 井 陽 一**

Studies on Atmospheric Corrosion of Steels Related with Meteorological Factors in Japan (2nd Report) Multiple Correlation of Meteorological Factors and Atmospheric Pollution Substances on Corrosion of Steel

Kazuhiko Oma, Teruzô Sugano and Yôichi Hirai

The atmospheric corrosion rates of steel were measured in an industrial district (Kôtô-ku) of Tokyo, Japan.

Analyzing correlations between the corrosion rates and meteorological factors and/or atmospheric pollution substance factors by means of statistical analysis method, a corrosion regression was obtained to describe the influence of these two mutual interacting factors on corrosion of steel.

The result may be expressed as:

$$y = -136.91 + 0.05x_1 + 2.56x_2 + 0.12x_3 + 3.60x_4$$

$$+ (-24.63)x_5 + 2.0x_6 + (-14.37)x_7 + 13.43x_8 \\ + 3.65x_9 + (-1351.99)x_{10}$$

where,

y : corrosion rate (mdd), x_1 : temperature ($^{\circ}\text{C}$),
 x_2 : humidity (RH %), x_3 : precipitation (mm),
 x_4 : sulfur dioxide (mg/day $\cdot$ 100 cm ^{2}),
 x_5 : sea-salt particles (chlorides) (mg/100 cm ^{2}),
 x_6 : wind velocity (m/sec), x_7 : soluble substances (g),
 x_8 : insoluble substances (g), x_9 : sulfates (g),
 x_{10} : tar substances (g).

1. ま え が き

第1報¹⁾にてわが国全域にわたる19ヵ所の各地で鉄鋼の大気暴露試験を実施し、得られた腐食量と気象因子との関係を単相関的な立場から考察を加えて報告した。本報においては、さらに大気汚染物質を腐食因子として加え、これらとの重相関関係を明らかにし腐食回帰式を求めることを目的として本研究を行なったものである。

わが国の地域環境を大別して腐食傾向を比較すると、前報に述べたごとく図1のとおりである。すなわち工業地域は太平洋沿岸地域、日本海沿岸地域の約2.5倍、内陸地域の9~9.5倍である。

図1 1ヵ月間暴露試験片地域別腐食量

これらの平均値からそのまま腐食回帰式を求めたのでは妥当性を欠くことになるので、今回は腐食条件の最も苛酷な工業地域のみを対象として昭和37年度より研究を始めた。その結果常識的には工業地域では単に亜硫酸ガスなどによる大気汚染物質により腐食が進行するものと考えられているが、筆者らの結果ではむしろ気温、湿度、降水量など気象因子の相乗効果による影響はるかに大きいことが明らかになった。

これらの結果をもとにして、工業地域〔東京(江東区)〕における腐食回帰式を求めることができたのでここに第2報として報告するものである。

2. 試験片取付位置

暴露台を設置した位置は東京〔江東区深川豊州、石川島播磨重工業(株)技術研究所屋外暴露試験場〕緯度 $35^{\circ}39'$ 、経度 $139^{\circ}47'$ で暴露架台は南面とし、角度は暴露位置の緯度に等しくし、日照量が最大となるようにした。

3. 試験片寸法および成分

試験片は $60 \times 100 \times 1.2$ mmのJIS 3310 ミガキ鋼板を使用した。化学成分を表1に示す。

表1 試験片の化学成分(%)

成分	C	Si	Mn	P	S
%	0.04	0.015	0.25	0.009	0.014

* 昭和39年10月15日 第11回腐食防食討論会(仙台)において発表

** 石川島播磨重工業(株)技術研究所(東京都江東区深川豊洲2の3)

4. 試 験 期 間

試験期間は昭和 37 年 4 月～38 年 3 月の各月々とし、取りつけ、取りはずしは各月の 1 日に行なった。

5. 気象要素の測定

気象要素は東京〔江東区深川豊洲、石川島播磨重工業（株）技術研究所屋外暴露試験場〕で観測した気温、湿度、降水量、風速、風向の各項のデータを使用した。

6. 大気汚染物質の測定

大気汚染物質として亜硫酸ガス、海塩粒子を対象とし、それぞれ過酸化鉛法、サラン布地付着法を用い、前者は塩化バリウム法による定量化学分析により SO₂ を求め、

後者はサラン布地に付着した海塩粒子 (Cl⁻) を純水で抽出し、チオシアン酸水銀第二鉄塩による吸光度定量法（使用波長 460 mμ）により分析したものを使用した。

降下煤塵はデボジットゲージ（降下煤塵計）により各月々の雨水を捕集して英国規格の方法に従って分析した²⁾。その項目は溶解性物質総量、不溶解性物質総量、硫酸塩、タール物質である。

7. データシート

上記の方法にて測定した腐食量、気象要素、および大気汚染物質の量は表 2 の通りである。

なお各項目の測定値は次項に示すような毎月の平均値

表 2 東京（江東区）における気象要素および大気汚染物質の量と腐食量

月	気 温 (°C)	湿 度 (%)	降水量 (mm)	亜 硫 酸 ガ ス (mg/day/100 cm ²)	海 塩 粒 子 (mg/100 cm ²)	風 速 (m/sec)	風 向	溶 解 性 物 質 (g)	不 溶 解 性 物 質 (g)	硫 酸 塩 (g)	タ ー ル 物 質 (g)	腐 食 量 (mdd)
37/4	13.9	55.9	115.7	3.22	0.3	2.3	4	0.0739	1.3937	0.0628	0.0038	42.4
5	18.9	65.4	212.7	3.12	0.3	2.3	4	0.3172	1.0515	2.1663	0.0049	75.1
6	20.8	73.1	227.9	2.10	0.2	2.4	5	0.1613	0.7562	0.2414	0.0022	96.8
7	24.9	81.3	108.1	3.15	0.1	1.9	4	0.4902	0.5269	0.1839	0.0023	95.1
8	28.1	69.5	31.8	2.80	0.7	3.5	5	0.2862	0.7412	0.1106	0.0027	50.0
9	25.0	67.9	6.8	1.99	0.5	2.1	4	0.4950	0.7520	0.0994	0.0001	41.2
10	16.8	67.4	126.0	1.35	0.2	3.6	6	0.3712	0.5123	2.5227	0.0108	52.3
11	11.9	64.8	139.5	1.44	0.3	3.4	6	0.4132	0.7583	0.1496	0.0076	44.3
12	7.8	56.8	69.9	2.03	0.2	3.7	8	0.5783	0.6533	2.9891	0.0124	25.8
38/1	3.9	50.0	0.3	2.28	0.3	2.1	7	0.1238	0.5330	0.2445	0.	2.1
2	5.4	51.0	16.6	2.09	0.4	5.4	8	0.1598	0.3393	0.0837	0.0019	6.3
3	7.8	59.0	73.9	2.88	0.7	5.1	6	0.4143	0.5527	0.0563	0.0017	25.8

注：風向は下図のごとく八方位（向）にわけ数字化して表わした。

表 3 各気象要素、大気汚染物質間および腐食量との単相関関係

	気 温	湿 度	降 水 量	亜 硫 酸 ガ ス	海 塩 粒 子	風 速	風 向	溶 解 性 物 質	不 溶 解 性 物 質	硫 酸 塩	タ ー ル 物 質	腐 食 量
気 温		0.13	-0.17	0.01	0.13	0.30	0	-0.18	-0.27	-0.27	-0.30	0.80**
湿 度			0.45*	0.10	-0.20	-0.43	-0.43	0.40	0.01	-0.04	-0.01	0.89**
降 水 量				0.08	-0.47*	-0.28	-0.27	-0.07	0.43	0.28	0.30	0.76**
亜硫酸ガス					0.20	-0.24	-0.24	-0.20	0.45*	-0.30	-0.44	0.25
海塩粒子						0.46	-0.02	-0.02	-0.04	-0.41	-0.42	-0.39
風 速							0.66**	0.07	-0.49*	0.03	0.19	-0.52*
風 向								0	-0.62	0.26	0.34	-0.70**
溶解性物質									-0.28	0.40	0.43	0.15
不 溶 解 性 物 質										0.	0.03	0.30
硫 酸 塩											0.82**	0.05
タール物質												0.03
腐 食 量												

注：** は強度の相関性のあるもの、* は相関性のあるものを示す。

を示した。

(1) 腐食量 (mg/dm²·day): 昭和37年4月～38年3月までの月々の腐食量。

- (2) 気象要素: 1) 気温 (°C) 各月の平均値
2) 湿度 (RH %) 各月の平均値
3) 降水量 (mm) 各月の平均値
4) 風速 (m/sec) 各月の平均値
5) 風向 各月の最多風向

(3) 大気汚染物質

- 1) 亜硫酸ガス (mg/day·100 cm²) 各月の平均値
2) 海塩粒子 (mg/100 cm²) 各月の平均値
3) 溶解性物質 (g) 各月の平均値
4) 不溶解性物質 (g) 各月の平均値
5) 硫酸塩 (g) 各月の平均値
6) タール物質 (g) 各月の平均値

このデータを常道の統計的手法³⁾により電子計算機を用いて計算した。データの構造は次式の通りである。

$$y_i = \alpha + \beta_1(x_{1i} - \bar{x}_1) + \beta_2(x_{2i} - \bar{x}_2) + \dots + \beta_{11}(x_{11i} - \bar{x}_{11}) + \varepsilon_i$$

ただし, y_i : 腐食量, α : 常数, β : 母回帰係数,

ε_i : 誤差

8. 結 果

8.1 単相関性

表2のデータにより東京(江東区)における気象要素および大気汚染物質と腐食量との単相関係数を求めた結果が表3である。

気温, 湿度, 降水量, 風速, 風向が腐食との間に強度の単相関性を示し, 一般に考えられている亜硫酸ガスおよび海塩粒子と腐食量との間には個々における相関関係は比較的低いものであることが表3から考えられる。

8.2 重相関性

気象要素および大気汚染物質と腐食量との重回帰分析を行なった結果を表4, 5に示した。

単相関的には SO₂, Cl と腐食量との間に相関性が認

められなかったが, 重相関的立場においては表5に示すように 95% 信頼度で有意であることが認められた。

このことは冒頭に述べたごとく, 大気腐食の過程は単純な SO₂, Cl などの大気汚染物質との化学反応に依存するものでなく, 気象因子との相乗効果によるものであることを定量的に明らかにすることができた。

すなわち表5に示す重回帰分析から工業地域〔東京(江東区)〕における腐食回帰式を求めると次式のようになる。

$$y = -136.91 + 0.05x_1 + 2.56x_2 + 0.12x_3 + 3.60x_4 + (-24.63x_5) + 2.00x_6 + (-14.37x_7) + 13.43x_8 + 3.65x_9 + (-1351.99x_{10})$$

ただし,

y = 腐食量 (mg/dm²·day) x_1 = 気温 (°C)

x_2 = 湿度 (RH %) x_3 = 降水量 (mm)

図2 各月の腐食量 (測定値) と計算値の比較

表4 分散分析表

要 因	S	ϕ	V	F ₀
R	10198.54	10	1019.85	19.83
e	51.42	1	51.42	—
T	10249.97	11	—	—

表5 気象要素および大気汚染物質と腐食量との重相関関係

要 因	定数項	気 温	湿 度	降 水 量	亜硫酸ガス	海塩粒子	風 速	溶解性物質	不溶解性物質	硫 酸 塩	タール物質
回 帰 係 数	-136.91	0.05	2.56	0.12	3.60	-24.63	2.00	-14.37	13.43	3.65	-1351.99
統 計 量	—	0.12	2.68	1.27	0.54	-0.62	0.20	-0.58	0.43	0.55	-0.48

$$t(1 \cdot 0.05) = 12.706$$

注: 重回帰分析において, 風向は数値化して計算することに疑問があるため除いて計算した。

x_4 = 亜硫酸ガス (mg/day·100 cm²)

x_5 = 海塩粒子 (mg/100 cm²) x_6 = 風速 (m/sec)

x_7 = 溶解性物質 (g) x_8 = 不溶解性物質 (g)

x_9 = 硫酸塩 (g) x_{10} = タール物質 (g)

この式を用いて当所において実測した腐食量と計算値を毎月々の腐食量につき比較したものが図 2 である。

この図によれば鉄鋼の大気腐食条件を最も具備すると推察される 6, 7 月がわが国においては腐食量の最大値を示すことが明かで、この見地からこのような地域における経済的な防食対策を講ずることが可能となるものと筆者らは考えている。

9. 結 論

当社技術研究所屋外暴露試験場における毎月々の鉄鋼の腐食量を求め、同時に観測した気象データならびに大気汚染物質から、これらの相互関係を統計的手法により求めた結果、大気汚染物質は、気象因子との相乗効果において 95% の信頼度で有意であることを明らかにし、

その結果より工業地域における腐食回帰式を求めることができた。

本式により工業地域における鋼材の腐食量を求めることが可能となったことは鉄骨構造物の設計上必要な腐食代の設定にきわめて有益なものと考えている。

また各種防食対策を講ずるうえの腐食指数 (Corrosion Index) を求めるのに、本式によって得られた腐食量はその示標となり得るものと筆者らは考えている。

報告を終るにあたり、本研究のデボジットゲージの化学分析を終始担当した当所化学実験課高垣孟君および気象観測に協力していただいた課員一同各位に厚く感謝いたします。(昭和 39 年 12 月 4 日受理)

文 献

- 1) 尾間一彦, 菅野照造, 植木 質, 平井陽一: 防蝕技術, 13, No. 1, 15~22 (1964)
- 2) 吉川英夫: 統計解析手順集
- 3) 英国理工学研究局編, 寺部本次訳: 大気汚染測定法

学振腐蝕防止第 97 委員会会議 (昭和 39 年 11 月 30 日) 講演概要

1) ボイラ蒸発管の腐食について

住友金属工業(株) 小若正倫氏・○北村昌章氏

高温高圧ボイラ蒸発管に起こったアルカリ腐食の実態を把握するため、各種アルカリによる鋼片のオートクレーブ中での静的腐食試験結果および沸騰条件下の鋼管の腐食状況を考察し、アルカリ腐食に至った給水処理の変遷を述べた。

Na_3PO_4 による腐食は極端なハイドアウトがなければ、最も腐食は軽微であるが、ハイドアウトすると局部過熱により腐食が促進される。 NaOH による腐食はまず孔食を生じ、腐食生成物下に、激しい凹凸状の腐食を起こす。 K_3PO_4 は細かい孔食を起こす。 K_2HPO_4 は腐食速度が大きく悪質な孔食を起こし、また腐食生成物は容易に壁面を離れる性質がある。また、水素侵食らしき粒界割れが認められた。 Na_3PO_4 のハイドアウト物質は Na_3PO_4 と Na_2HPO_4 の混合物のようであることを報告した。

2) 流電陽極用アルミニウム合金について

住友化学工業(株) 柳田清実氏・○波多野郁夫氏・河合正純氏

流電陽極用合金としては、従来亜鉛およびマグネシウム系合金が多く使用されていたが、最近ではアルミニウム系合金も開発されつつある。それで、各種アルミニウム系合金について、定電流法といわれる実験方法でその流電特性を比較した。その結果、Al 系に対しては Zn, In

および Hg が有効な成分であるが、特に Hg は電位も効率も向上するのですぐれた添加元素であり、Al-Zn, Al-Sn 等の合金系に対しては、Hg, Sn および In のほかに Zr, Ti に若干の効果を認めた。Hg の添加はいずれの系に対しても最も有効であるが、特に Al-Sn-Hg 系が最もよい結果を得た。しかしこれら Hg 添加合金は腐食状態が均一でなく、今後検討の余地がある。

3) Ti の耐食性について

(株) 神戸製鋼所中央研究所 高村 昭

チタンの耐食性の特長について不動態域が広いこと、不動態化しやすいことならびにその不動態が塩素イオンに対して安定であることを説明した後、過去約 10 年間の使用実績から二、三の問題点について述べた。すなわちチタンは還元性酸に腐食されやすいが、チタンパラジウム合金はこのような酸に対する耐食性がすぐれているので最近かなり大量に使われるようになった。またこの合金を使用することにより腐食による水素脆化ならびに高温高濃度塩化物水溶液中における細隙腐食をも防止することができる。従来チタンは水分含有量 0.013% 以上の塩素ガスに完全耐食であるとされていたが、水分含有量 0.01 ~ 0.1% でも燃焼あるいは局部腐食が起こる場合があり、安全使用範囲は水分 0.1% 以上である。塩酸を含むメタノール中でチタンは容易に応力腐食割れを起こすことがわかったが、これは水を 2% 以上添加することにより完全に防止できる。