丸ビルまたは千葉県機械金属試験場のダクトに 31～43年間使用されていた亜鉛めっき鋼板の 腐食量解析*

野村 広正**, 戸崎 秀男***, 辻川 茂男†

**新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所

***新日本製鐵株式会社 薄板営業部 (現所属; 社団法人ステンレス協会)

†東京大学 名誉教授

Corrosion Performance of Zinc Coated Steel Sheet Used for 31 to 43 Years as Ducts in Marunouchi Building, and Machinery and Metallurgy Research Institute of Chiba Prefecture Building*

Hiromasa Nomura**, Hideo Tozaki*** and Shigeo Tsujikawa†

** Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corporation.

*** Flat Products Division, Nippon Steel Corporation (presently, Japan Stainless Steel Association)

† The University of Tokyo, emeritus professor

Indoor corrosion performance is studied for zinc coating on steel sheet which has been used well for 31 to 43 years as ventilation ducts in two buildings. Initial mass of zinc coating, $W_{Zn(0)}$, is expressed as: $W_{Zn(0)} = W_{Zn(0)} + W_{Zn(II),R} + W_{Zn(II),L}$ (1), where $W_{Zn(0)}$ is mass of metallic zinc staying in the coating, $W_{Zn(II),R}$ is mass of corroded zinc which has remained on the surface, $W_{Zn(II),L}$ is mass of corroded zinc which has been lost away from the surface. Different from usual tests, $W_{Zn(0)}$ is not available from any written record in this study. However, when $W_{Zn(II),L}$ can be regarded as negligible, the mass of corroded zinc, $W_{Zn(II),R}$, can be considered to be equal to $W_{Zn(II),R}$. For the ducts A and B studied, $W_{Zn(0)}$ as the sum of $W_{Zn(0)}$ and $W_{Zn(II),R}$ analytically determined for the inner surface is found to be nearly equal to that for the respective outer surface where zinc has been protected from corrosion by paint film. This fact shows that $W_{Zn(II),L}$ in Eq. (1) is negligible small, or almost whole amount of corroded zinc has remained on the surface. This finding could be applied for all of the outer and half of the inner surfaces of eight ducts. For the inner surfaces of the ducts C, D, E and H where $W_{Zn(II),L}$ can not be neglected, $W_{Zn(II),R}$, the sum of $W_{Zn(II),R}$ and $W_{Zn(II),L}$ in Eq. (1), is calculated as $W_{Zn(0)}$ of the outer surface minus $W_{Zn(0)}$ of the inner surface. There exists a general equation for mass loss of zinc, W , after elapsed time, t : $W = at^n$ (2). Then, mean corrosion rate for t years is expressed as: $W/t = at^{n-1}$ (3-1), which becomes $W/t = a$ (3-2) when the exponent n is assumed to be one in line with life expectancy currently applied for zinc coating on steel component of residential house. The constant a is equal to $a_z \times 1y = 11g \cdot m^{-2}$ in outdoor environment of "standard" (rural) region in Japan. Obtained data for a duct i, mass loss of zinc, W_i , after t_i years, combined with Eq. (2) presents a relation between a and n : $(\log t_i)n + \log a = \log W_i$ (4), but is short to determine individual values of a and n . For example, maximum corrosion rate, $74.8 \sim 80.0 g \cdot m^{-2}/43$ years ($\approx 2 g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$), is observed for inner surface of the duct C. It's amount of deposited Cl^- of $3 g \cdot m^{-2}$ corresponding to severe marine atmosphere requires a in Eq. (4) to be less than $a_z \times 1y = 11 g \cdot m^{-2}$, which is satisfied by n value of around 0.5 or 0.6. Such low corrosion rate of $2 g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ as found for the duct C is attributed well to long year effect, t^{n-1} in Eq. (3-1). The n value of around 0.5 or 0.6 is considered to be appropriate for all the duct, based on reported (a, n) values for milder rural and marine atmosphere.

Key words : corrosion loss, indoor corrosion, zinc coated steel sheet, ventilation duct, long year performance, service life expectancy, amount of deposits

1. は じ め に

スチールハウスは木造ツーバイフォー住宅の枠材を木材から板厚 1.0 mm 程度のめっき鋼板に置き換えたものである。スチールハウスはすでに、アメリカやオーストラリアでは広く普及している。国内においては 1994 年 11 月に、通産省基礎産業局製鉄課主催のアーバンスチー

ル研究会のテーマに取り上げられ、(社)鋼材倶楽部を事務局として鉄鋼 6 社 (川崎製鉄, 神戸製鋼所, 新日本製鐵, 住友金属工業, 日新製鋼, NKK) が共同研究を開始した。

スチールハウスを導入するに当たっての技術的な課題は、①構造、②断熱、③結露、④音響・振動、⑤断熱、⑥耐久性 (腐食) にあった。(社)鋼材倶楽部はそのおのに対して分科会を設置して各種研究活動を行い、いづれも問題のないことを明らかにしてきた。本報では⑥の耐久性に関する研究の一環として行った亜鉛めっき鋼板製のダクトの腐食調査の結果を述べる。

めっき鋼板の耐久性のデータは、屋外については多数公表されており、ある程度耐久性の推定も可能となっている。しかし、住宅内環境については、屋外よりも腐食性が厳しくないことは指摘されているものの、実際の腐

* 第 131 回腐食防食シンポジウム (大阪, 2001) で一部発表

** 〒293-8511 富津市新富 20-1 (20-1, Shintomi, Futtsu, Chiba, 293-8511 Japan)

*** 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10 (3-2-10, Nihonbashi-kayabacho, Chuo-ku, Tokyo, 103-0025 Japan)

† 〒262-0046 千葉県花見川区花見川 2-13-404 (2-13-404, Hanamigawa, Hanamigawa-ku, Chiba, 26-0046 Japan)

Fig.1 Schematic cross section of partly corroded zinc coated steel sheet.

食に関する数10年級の長期のデータはみあたらない。

(社)鋼材倶楽部では、東京駅前丸の内ビルディング（以下、丸ビル）と千葉県機械金属試験場の送・排気ダクトに長期間使用されていた溶融亜鉛めっき鋼板を採取・分析する機会に恵まれ、めっき亜鉛の腐食量と表面の付着イオン量をはじめて測定することができた。その結果、ビルの内部のような、一般に付着物の少ない環境においては、めっき亜鉛の腐食速度は屋外に比べて低いだけでなく経年とともに大きく抑制されていく特徴を有することがわかった。

2. めっき亜鉛の腐食速度算定上の仮定

高沢ら¹⁾は日本各地で行った屋外暴露試験の結果をもとに、腐食したZnの半分が降雨で洗い流されずに表面に付着・残存していること、このZnの腐食生成物の残存量から腐食量の推定が可能であることを述べている。著者らは雨の当たらない屋内環境では腐食生成物の全量が表面に残存しようとの見通しのもとに本研究に着手した。

腐食生成物の全量がFig.1に示すように表面に残存しているとの仮定が成り立つ場合、腐食生成物中のZn(II)量（亜鉛めっきの腐食量）、 $W_{Zn(II)}$ 、と腐食していない健全なZn(0)量、 $W_{Zn(0)}$ 、を3.3.2項で述べる方法で分別して定量することができる。その結果、初期のめっき付着量、 $W_{Zn(0)}^0$ 、を測定していなくても(1)式から $W_{Zn(0)}^0$ を求めることができる^{2),3)}。

$$W_{Zn(0)}^0 = W_{Zn(0)} + W_{Zn(II)} \quad (1)$$

ここで、 $W_{Zn(0)}^0$ ：初期のZn(0)量、 $W_{Zn(0)}$ ： t 年経過後の腐食生成物下のZn(0)量、 $W_{Zn(II)}$ ： t 年経過後の腐食生成物中のZn(II)量、である。

上述の、腐食生成物の全量が表面に残存しているという仮定が成立しないめっき鋼板製ダクトの内面については、外面での $W_{Zn(0)}^0$ を内面での $W_{Zn(0)}^0$ とし、これとその内面での残存付着量、 $W_{Zn(0)}$ 、との差として $W_{Zn(II)}$ を求めた。これについては後述する。

3. 測定・分析方法

3.1 丸ビルの排気ダクト

丸ビルから採取したダクトの履歴を以下に示す。

- ・ダクトA：地下1階旧ボイラー室排気ダクト
使用開始；1964年
回収；1997年6月，使用期間；33年
- ・ダクトB：地下1階第一変電室排気ダクト
使用開始；1960年

Table 1 The ventilation ducts taken out of Marunouchi building.

No.	Room / Floor	Thickness of sheet with zinc coating (mm)	Period of service
A	Former boiler room on the first basement level	0.783	1964 ~ June '97 33 years
B	Substation room on the first basement level	0.575	1960 ~ July'97 37 years
C	Garbage disposal room on the first floor	0.745	1954 ~ June'97 43 years
D	Garbage disposal room on the first floor	0.765	1954 ~ June'97 43 years

回収；1997年7月，使用期間；37年

・ダクトC, D：1階塵芥処理室排気ダクト
使用開始；1954年

回収；1997年6月，使用期間；43年

これらのダクトに使われたのは1953年（八幡製鉄（株）戸畑工場，アームコゼンジミア法）以降各社で設置された連続ラインの製品である可能性がある⁴⁾。

Fig.2（次ページ参照）に採取前のダクト，Fig.3（次ページ参照）に採取したダクト（内面と外面）の写真を示す。ダクトAとダクトBの外面は塗装されていたが、内面は裸の（無塗装の）まま使用されていた。ダクトAの内面は、薄黒くなってはいたが、目に見える白さびや赤さびは無かった。ダクトBの内面には黒褐色の付着物が堆積しており、これが容易に剥がれ落ちる状態であった。ダクトC, Dは内外面ともに裸のまま使用されていた。塵芥処理室に使われたこれらダクトの内面には黒褐色の付着物が厚く堆積しており、これが容易に剥がれ落ちる状態であった。外面は黒く変色していたが、目に見える白さびや赤さびは無かった。回収したダクトの用途、板厚（ノギスで鉄素地と亜鉛めっき層の和を測定）と使用期間をTable 1に示した。

3.2 千葉県機械金属試験場の送・排気ダクト

採取した千葉県機械金属試験場の恒温恒湿室の送・排気ダクトの履歴を以下に示す。

- ・1968年3月竣工
- ・1968年4月より使用開始
- ・1998年3月で使用終了
- ・1999年2月取り壊し

Fig.4に採取した4枚のダクト（E, F, G, H）の外観を示す。いずれの表面にも目に見える白さびは無く、鈍い金属光沢を保持しており、外面より内面の方がややくすんでいた。恒温恒湿室空調用と暖冷房用との2種類があったとのことであるが区別はつけられなかった。ただ、暖冷房用は、竣工時より1983年9月までは冬季の暖房のみに使用され、1983年12月以降は夏期は冷房、冬季は暖房に使用されてきた。この間1970年頃から数年間、暖房の燃焼ガス（重油炊き）の一部が暖冷房用ダクトの内部に漏れていたことがあった。また、いずれのダクトも外面は天井内や壁内では断熱材に覆われており、ダクト内面の清掃が行われたことはなかったとのことである。以上のダクトを分析した。板厚と使用期間をTable 2

Fig.2 Appearance of the ducts in Marunouchi building.

Fig.3 Appearance of the ducts taken out of Marunouchi building.

Fig.4 Appearance of the ducts taken out of Machinery and Metallurgy Research Institute of Chiba Prefecture building (MMRI Chiba building).

Table 2 The ventilation ducts taken out of MMRI Chiba building used for temperature-humidity control or for air conditioning.

No.	Thickness of sheet with zinc coating (mm)	Period of service
E	0.863	March'68 ~ Feb.'99 31 years
F	0.662	March'68 ~ Feb.'99 31 years
G	0.657	March'68 ~ Feb.'99 31 years
H	0.672	March'68 ~ Feb.'99 31 years

に示した。

3.3 採取したダクトの分析方法

3.3.1 付着イオンの分析

回収したダクトがおかれていた腐食環境を推定する目

的で、ダクト内/外表面の付着物（アニオンとカチオン）を以下の方法で採取して分析した。

イオン交換水をしみ込ませたガーゼを換えながら繰り返し3回、ダクト表面の10 cm×10 cmの範囲の付着物を拭き取った。ガーゼからイオン交換水中に抽出したイオンをイオンクロマトグラフィーで分析した。分析したイオンを以下に示す。なお、 Zn^{2+} の分析は丸ビルのみで実施した。

アニオン： Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}

カチオン： Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Zn^{2+}

3.3.2 金属亜鉛 $Zn(0)$ ・酸化亜鉛 $Zn(II)$ の分析方法

腐食生成物中の $Zn(II)$ の分析は以下の方法で行った。10 cm×10 cmのサイズに切断したダクトを、テフロン製のヘラで軽く擦りながら重クロム酸アンモニウム添加アンモニア水溶液（12.5% NH_3 水溶液+2% $(NH_4)_2Cr_2O_7$ ）に常温で15分間浸漬し、 $Zn(II)$ を溶解した。この浸漬液に、浸漬後ダクト表面を洗った水を加え、その中の $Zn(II)$ 量、 $W_{Zn(II)}$ をICP-発光分光法で定量分析した。

一方、腐食生成物の下に残存している健全なめっき亜鉛、 $Zn(0)$ はJIS H0401により分析した。三塩化アンチモン 32 g を濃硫酸 1000 ml に溶かしたものを原液、この原液 5 ml を濃塩酸 100 ml に溶かしたものを試験液とした。上記 $Zn(II)$ の溶解処理を終了したダクトの重量（初期重量）を測定後、この試験液にダクトを1～2分間浸漬し $Zn(0)$ を溶解した。初期重量から溶解後の重量を差し引いて $Zn(0)$ の付着量、 $W_{Zn(0)}$ を求めた。

4. 結果と考察

4.1 丸の内ビルディングの排気ダクト

4.1.1 付着イオン

付着イオンの分析結果を Table 3 に示す。 Cl^- の付着量が最も多いのはダクト C（塵芥処理室）の内面であった。 Cl^- の付着量はダクト内面の方が外面より多く、例えば、ダクト C 内面の Cl^- 量は外面の約 9 倍に達していた。 SO_4^{2-} の付着量が最も多いのはダクト B（地下1階第一変電室）の内面であった。 SO_4^{2-} の付着量もダクトの内面の方が外面より多く、例えばダクト D では約 29 倍であった。 NO_3^- の付着量はダクト A と B では少なく、ダクト C と D（ともに塵芥処理室）で多かった。ダクト C の NO_3^- の付着量はダクト A の約 1100 倍であった。 NO_3^- も Cl^- や SO_4^{2-} と同じく、内面の方が外面より付着量が多く、例えばダクト D では約 24 倍であ

った。

内面の全アニオン付着量を回収したダクト間で比較すると $A < B < D < C$ の順番に多くなる。最も多いダクト C の内面の全アニオン付着量は 10633 mg/m^2 であった。

4.1.2 亜鉛めっきの腐食量

Table 4 に腐食生成物中の $W_{Zn(II)}$ と腐食生成物を除去した後の $W_{Zn(0)}$ との分析結果を示す。健全な塗膜下にあったダクト A, B の外面での全めっき付着量はそれぞれ 105.0 , $83.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で、それぞれの内面での $W_{Zn(II)} + W_{Zn(0)}$ 量である 100.5 , $80.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ にほぼ等しい。このことは A, B の内面では当初からそれぞれの外面にほぼ等しいめっきが付着しており、腐食が進んだ後もほぼ全量が残存していることを示す。Table 4 では、ダクト A, B 内面での腐食量 $W_{Zn(II)}$ として、分析値それぞれ 11.0 , $30.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ と、後述のダクト C, D の内面に適用した修正値それぞれ $10.3 \sim 15.5$, $30.3 \sim 34.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ とを併記した。前者は後者に含まれている。

これに対して、ダクト C, D ではいずれの内面も外面より $W_{Zn(II)} + W_{Zn(0)}$ 量が著しく少ない。これらダクトの内面は Table 3 に示したようにアニオンの付着量が多く、表面に堆積していた黒褐色の付着物が容易に剥がれ落ち

Table 3 Amount of ions deposited on the the inner (I) and outer (O) surface of the ventilation ducts from Marunouchi building.

No.	I or O	Anion ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)				Cation ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)					
		Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Total	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NH_4^+	Zn^{2+}
A*	I	155	1	874	1030	243	125	38	623	3	< 1
B*	I	1300	1	7273	8574	327	306	116	3264	274	3748
C	O	331	68	255	654	90	14	< 1	117	7	786
	I	3041	1106	6486	10633	3790	145	663	4403	70	1038
D	O	200	53	213	466	82	11	1	115	7	41
	I	1865	1264	6207	9336	1378	535	286	4219	204	1992

*) The analysis excluded the outer surface covered by paint film.

Table 4 Analyzed results of zinc on inner (I) and outer (O) surface of the ventilation ducts from Marunouchi building.

No.	I or O	detected or modified	$W_{Zn(0)}$	$W_{Zn(0)}$	$W_{Zn(II)}$	Mean corrosion rate
			$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$			$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$
A	O	detected	105.0*1	—	—	—
	I	modified	99.8 ~ 105.0*3	89.5	11.0 10.3 ~ 15.5	— (10.3 ~ 15.5) / 33
B	O	detected	83.6*1	—	—	—
	I	modified	79.4 ~ 83.6*3	49.1	30.9 30.3 ~ 34.5	— (30.3 ~ 34.5) / 37
C	O	detected	103.4*2	80.8	22.6	22.6 / 43
	I	modified	98.2 ~ 103.4*3	23.4	43.6 74.8 ~ 80.0	— (74.8 ~ 80.0) / 43
D	O	detected	91.2*2	61.0	30.2	30.2 / 43
	I	modified	58.8*2 86.6 ~ 91.2*3	31.9	26.9 54.7 ~ 59.3	— (54.7 ~ 59.3) / 43

*1) The amount of zinc covered by paint film. *2) Calculated as sum of $W_{Zn(0)}$ and $W_{Zn(II)}$.

*3) Mass of initial zinc coating assumed to be equal to that of the outer surface with an error of 5%.

る状態であった。高沢らは屋外暴露試験で二酸化硫黄が
少ない暴露地では腐食生成物付着残存量と腐食減量がほ
ぼ等しく、逆に二酸化硫黄が多い暴露地では腐食生成物
付着残存量が腐食量より少ないこと、Znの塩化物および
硫酸塩が降雨で洗い流されやすいこと、を述べている¹⁾。

そこで、以下のように考えた。ダクトC、Dの外表面は
Zn(II)は全量残存しており、そこで求められためっき初
期付着量、 $W_{Zn(0)}$ 、をそれぞれの内面での $W_{Zn(II)} + W_{Zn(0)}$
に等しいとすると、これと内面での $W_{Zn(0)}$ との差として
内面での $W_{Zn(II)}$ を求めることができる。例えば、Cでは
付着(残存)していた腐食亜鉛量 $W_{Zn(II)} = 43.6$ の代わり
に外面の $W_{Zn(0)}$ 、98.2~103.4、-内面の残存 $W_{Zn(0)}$ 、
23.4=74.8~80.0 g・m⁻²を全腐食亜鉛量、 $W_{Zn(II)}$ とした。
ここに98.2=103.4×0.95は5%のばらつきを考慮した値
である。ダクトDについても同様の計算方法を適用し
た。

$W_{Zn(II)}$ が最も多かったのはダクトCの内面、次いで多
かったのはDの内面であった。CとDはいずれも塵芥
処理室のダクトである。

なお、Table 4に示した $W_{Zn(0)}$ はJIS
G3302(1956)(亜鉛鉄板)に記載の標準
付着量/2の183/2=91.5, 214/2=112 g・
m⁻²...に比べられる。

4.2 千葉県機械金属試験場の送・排 気ダクト

4.2.1 付着イオン

付着イオンの分析結果をTable 5に示
す。いずれのイオンの付着量も4.1.1項
で述べた丸ビルに比べて少なかった。
Cl⁻の付着量はダクトE、F、Hではダクト
の内面の方が外面より多く、ダクトFの
内面のCl⁻は外面の約7倍に達していた。
一方、ダクトGでは内面と外面とで大差
が無かった。Cl⁻の付着量が最も多かつ
たのはダクトFであった。SO₄²⁻の付着
量はいずれのダクトでも内面の方が外面
より多く、ダクトFでは約7.6倍であつ
た。いずれのダクトにおいてもNO₃⁻の
付着量は他のアニオンに比べると少な
く、最も多いダクトEの内面でも6 mg・
m⁻²であった。内面と外面とを比較する
とダクトH以外では内面の付着量の方が
多かった。

全体のイオンの付着量の傾向を考慮す
ると、SO₄²⁻の付着量が飛び抜けて多い
ダクトFは、暖冷房用のダクトであった
可能性が高いものと推定される(3.2節
参照)。また、ダクトFの内面ではCa²⁺
も他のダクトより多かった。

4.2.2 亜鉛めっきの腐食量

Table 6に腐食生成物中のZn(II)と腐
食生成物を除去した後のZn(0)の分析結
果を示す。両者の和である $W_{Zn(0)} (=$
 $W_{Zn(0)} + W_{Zn(II)})$ を内面と外面とで比較す
ると、まず、EとHでは内面側が外面側

のそれぞれ約82%と約64%であり、いずれにおいても
内面側が外面側よりかなり少ない量となっている。こ
こで、EとHの内面側の付着アニオン量はFとGのそれ
より多いわけではないので、後述するように高湿度条件
の影響でEとHの内面での腐食が進行しZn(II)が溶出
したことにより、外面より全Znの量が少なくなったの
ではないかと考えられる。そこで、EとHにおいては丸
ビルのC、Dと同じく、外側の全Zn量、 $W_{Zn(0)} + W_{Zn(II)}$ 、
を内面の初期Zn付着量、 $W_{Zn(0)}$ 、と見なし、この値か
ら内面の $W_{Zn(0)}$ を差し引いて $W_{Zn(II)}$ を求めた。得られ
た結果をTable 6に示す。

ダクトFについて、分析ままの $W_{Zn(0)}$ の値は内外面
で大差はないので、C、Dと同様の修正は必ずしも必要で
はない。 $W_{Zn(II)}$ は分析ままで4.66 g・m⁻²、修正を加えた
とき7.6~13.7 g・m⁻²である。この二つはいずれも正し
いとして取り扱う。ダクトGについても分析ままの
 $W_{Zn(0)}$ の値は内外面で大差はなく、かつ内面の $W_{Zn(II)}$ も
ダクトFのおよそ1/10と少ないので、ダクトC、Dと同

Table 5 Amount of ions deposited on the inner (I) and outer (O) surface of the ventila-
tion ducts from MMRI Chiba building.

No.	I or O	Anion (mg・m ⁻²)				Cation (mg・m ⁻²)				
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Total	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺
E	O	4	<1	7	<12	<1	<10	<1	<2	3
	I	23	6	28	57	5	<10	<1	19	2
F	O	7	1	29	37	2	<10	<1	9	<1
	I	51	5	222	278	21	<10	2	107	4
G	O	9	2	11	22	1	<10	<1	6	<1
	I	7	4	24	35	3	<10	<1	8	1
H	O	7	5	18	30	8	<10	<1	14	9
	I	30	2	31	63	7	<10	<1	16	2

Table 6 Analyzed results of zinc on the inner (I) and outer (O) surface of the ventila-
tion ducts from MMRI Chiba building.

No.	I or O	detected or modified	W ⁰ _{Zn(0)}	W _{Zn(0)}	W _{Zn(II)}	Mean corrosion rate
			g・m ⁻²			g・m ⁻² ・y ⁻¹
E	O	detected	196.2*1	194.8	1.42	1.42 / 31
			160.9*1		8.77	—
	I	modified	186.4 ~ 196.2*2	152.1	34.3 ~ 44.1	(34.3 ~ 44.1) / 31
F	O	detected	122.6*1	121.8	7.83×10 ⁻¹	7.83×10 ⁻¹ / 31
			113.6*1		4.66	—
	I	modified	116.5 ~ 122.6*2	108.9	7.6 ~ 13.7	(7.6 ~ 13.7) / 31
G	O	detected	123.7*1	123.1	6.42×10 ⁻¹	—
	I		137.4*1	137.1	3.22×10 ⁻¹	3.22×10 ⁻¹ / 31
H	O	detected	142.7*1	141.9	7.53×10 ⁻¹	7.53×10 ⁻¹ / 31
			91.8*1		2.15	—
	I	modified	135.6 ~ 142.7*2	89.6	46.0 ~ 53.1	(46.0 ~ 53.1) / 31

*1) Calculated as sum of W_{Zn(0)} and W_{Zn(II)}. *2) Mass of initial zinc coating assumed to be
equal to that of the outer surface with an error of 5%.

Fig. 5 Relationship between corrosion loss of zinc, $W_{Zn(II)}$, and total amount of deposited anion after 33~34 years (●) and 31 years (○) for inner (I) and outer (O) surface of the ducts A~H used in the two buildings.

様の修正は加えていない。

4.3 亜鉛めっきの腐食量とアニオンの付着量との関係

4.1.2 項と 4.2.2 項で述べたように $W_{Zn(II)}$ はダクトに付着していたアニオンの量が多いほど、多くなる傾向がみられていた。Fig. 5 にアニオンの付着量と $W_{Zn(II)}$ の関係を示す。なお、アニオンの付着量としては Table 3 と Table 6 に示した Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の和を使用した。

Fig. 5 において 2 点（千葉県機械金属試験場のダクト E と H の内面）が上方にずれていることがわかる。付着物量から考えると E と H は恒温恒湿室のダクトの可能性が高い。同一の付着物条件で環境の腐食性を厳しくする原因として、温度と湿度が考えられる。一般に温度の影響は小さいこと、恒温恒湿室は相対湿度 90~100% が採用されていたこと、以上を考えるとダクト E と H は他のダクトより高湿な環境におかれていたため、Fig. 5 において上方にずれた可能性が大きい。

4.4 亜鉛の腐食量の時間依存式に基づく考察

腐食量の時間依存式として、最も一般的に用いられるのは次式である。

$$W = at^n \quad (2)$$

ここに、本件では W はめっきの t 年後の腐食量 ($g \cdot m^{-2}$)、 a ($g \cdot m^{-2}$) と n は定数とする。

(2) 式によれば、0~ t 年間の平均腐食速度は次式で表される。

$$W/t = at^{n-1} \quad (3-1)$$

これまで、大気・屋内環境におけるめっき亜鉛の腐食評価においては、 $n=1$ 、従って平均腐食速度は

$$W/t = a \quad (3-2)$$

とみなされてきた。この a は、わが国の標準地域での屋外ではその年間腐食量 $a_z \times 1 y = 11 g \cdot m^{-2}$ (屋内の標準部位ではその 1/7) に等しい。

本報において両ビルのダクトで求めた最大の平均腐食速度は丸ビルのダクト C の内面での $(74.8 \sim 80.0) / 43 \approx 2 g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ で、そこに付着していた Cl^- 量 $3.04 g \cdot m^{-2}$ は 1.83 倍して海塩のそれに換算すると $5.56 g \cdot m^{-2}$ になる。この値は、沖縄県にある琉球大学で測定される海塩付着

Fig. 6 Relationship between n and a values obtained from corrosion loss of zinc, W_i , after t_i years for duct, $i = A \sim D$ (a) and $i = E \sim H$ (b) according to an equation, $(\log t_i) \cdot n + \log a = \log W_i$, shown in the figure as a solid straight line. Dotted lines show contour service life of Z27 coating, $t^* = (275/2 \times 0.9/a) 1/n$.

量⁵⁾、屋上で $0.1 g \cdot m^{-2}$ 、降雨の洗浄作用が及ばない部位で $1 g \cdot m^{-2}$ 、よりもむしろ多い。上記の付着物量からみて、琉球大学より厳しい環境にあるダクト C 内面の平均腐食速度 $2 g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ が、 $n=1$ を仮定した (3-2) 式によると a 値にも等しく、琉球大学の a 値 (上述の $11 g \cdot m^{-2}$ より大きいであろう) より著しく小さくなってしまふことは、(3-2) 式の $n=1$ 、という仮定の再検討を要する。

ダクト i で得られた、 t_i 年後の腐食量 W_i というデータを (2) 式に代入すると次の関係を得る。

$$(\log t_i) n + \log a = \log W_i \quad (4)$$

これを満たす $(a, n)_i$ は n を縦軸、 $\log a$ を横軸に目盛る図上で (4) 式を満たす直線上にあることになる。このような図を、丸ビルと千葉県機械金属試験場とのダクトについて作成し、それぞれ Fig. 6(a) と同 (b) とに示した。同図に示した破線は

$$t^* = (124/a)^{1/n} \quad (5)$$

ここに、 $124 (g \cdot m^{-2})$ はめっき付着量記号 Z27 (JIS G3302, 両面付着量 $275 g \cdot m^{-2}$) の片面分の 90% であり、この亜鉛が (2) 式により腐食しきるまでの年数が t^* である。また、同様に図中に記入した、矩形に囲んだ (a, n) の範囲は既報⁶⁾ からまとめた 3 地域ごとの値域である。

Fig. 6(a) において、上記ダクト C 内面の (a, n) 値は図示の実直線 (4) 式上にあり、そのうち $n=0.5, 0.6$ または 1.0 の点を特に (Δ) 印で示した。 $n=0.5, 0.6$ は $a_z \times 1 y = 11 g \cdot m^{-2}$ に近い a 値を与えるが、 $n=1$ は屋内での値 $a_z/7 \times 1 y$ に近い値を与える。先に述べたように、標準地域の屋外よりは厳しい環境にある同ダクトには $n=1$ は適合せず、 $n=0.5, 0.6$ が妥当であろう。また、 $0.5, 0.6$

の n 値は穏和な (a が小さい) 田園・海岸地域での値にも該当している。

(3-1)式に、ダクト C 内面で得られた $W/t \approx 2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$, $t = 43 \text{ y}$ とともに, $n = 0.5, 0.6$ とを代入すると, それぞれ $a = 13.1, 9.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ を得る。また, (5)式の t^* とし、それぞれ $t^* = 307, 482 \text{ y}$ を得る。

平均腐食速度がダクト C 内面より小さいその他のダクト内外面については、やや小さいか同程度の n 値が期待されるので、丸ビルのダクトは総じて $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上の a 値を持つと思われる。

千葉県機械金属試験場のダクトについて同様に作成した Fig. 6(b) では、全アニオン付着量が飛び抜けて多かったダクト F 内面と、アニオン付着量は少ないが高湿度環境にあった可能性の大きいことを指摘したダクト E・H の内面とで、0.5, 0.6 程度の n 値で $a_z \times 1 \text{ y} = 11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ に近い a 値が得られ、 t^* は 100 年を超えることがわかる。同様にダクト F 外面の a 値は、まだ $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ より大きい、その他のダクト内外面については a 値が 1 桁以上小さく、かなり穏和な環境にあったと思われる。

5. ま と め

1) めっき亜鉛の耐用年数の評価は年間腐食速度が一定である (経年的に変化しない) という前提のもとで行われてきた。これは腐食速度式, $W = at^n$ において $n = 1$ とするものである。

2) 本報では、2つのビル内で3, 40年間ダクトとして使われてきた亜鉛めっき鋼板において表面に残存する金属亜鉛 $\text{Zn}(0)$ と酸化亜鉛 $\text{Zn}(\text{II})_{\text{R}}$ とを分析した。酸化亜鉛については鋼板表面から失われたもの $\text{Zn}(\text{II})_{\text{L}}$ を考慮すると、もともとの (原) 亜鉛付着量 $W^0_{\text{Zn}(0)}$ は次式

$$W^0_{\text{Zn}(0)} = W_{\text{Zn}(0)} + W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{R}} + W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{L}}$$

で表される。腐食した亜鉛量 $W = W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{R}} + W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{L}}$ を求めるにあたって、 $W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{L}} = 0$ と見なせる場合は $W = W_{\text{Zn}(\text{II}), \text{R}}$, そうでない (内面) の場合は $W^0_{\text{Zn}(0)}$ を維持しているとみなせる片面 (外面) の値を、もう一方の面 (内面) の原付着量 $W^0_{\text{Zn}(0)}$ として $W = W^0_{\text{Zn}(0)} - W_{\text{Zn}(0)}$ を求めた。

3) 分析したダクトのうち最も大きい腐食量を示し、かつその表面のイオン性付着物量から判断して屋外であれば沖縄より厳しいと思われる環境条件にあったダクト C 内面でも、43 年間の平均腐食速度は $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ で、標準地域屋外の年間腐食速度 $a_z = 11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ に比較して小さすぎるのがわかった。

4) それぞれのダクトにおける、 t 年後の腐食量 W というデータを 1) の時間依存式に入れ、 n と a との関係式を求め、 a_z に照らしての a の妥当値と文献調査による (a, n) の値とを考え合わせた結果、 n の値として 0.5, 0.6 程度が妥当であるとの結論に達した。すなわち、3) に述べた低い平均腐食速度は腐食速度の経年的な低減効果によってもたらされたものであろう。

謝 辞

丸の内ビルディングの送・排気ダクトは三菱地所株式会社殿のご厚意によりご提供いただいた。千葉県機械金属試験場の送・排気ダクトをご提供頂くにあたっては同試験場の鍋島宏司氏にお世話になった。ここに記して謝意を表する。

本研究は (社) 鋼材倶楽部におけるスチールハウスの耐久性に関する研究の一環として実施された。助言を頂いた委員諸氏：松本雅充氏 (住友金属工業 (株))、鹿毛勇氏 (JFE)、磯部誠氏 (JFE)、岩井正敏氏 ((株) 神戸製鋼所)、川口洋充氏 (日新製鋼 (株)) に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) H. Takazawa, R. Takekoshi and Y. Miyata, *Boshoku-Gijutsu* (presently, *Zairyo-to-Kankyo*), **38**, 143 (1989).
- 2) H. Nomura, Proc. 111th Symposium, p.20, JSCE (1996).
- 3) M. Matsumoto, Proc. 111th Symposium, p.26, JSCE (1996).
- 4) Y. Hisamatsu, *J. Metal Finishing Soc. Jpn.*, **34**, 354 (1983)
- 5) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara, S. Tsujikawa, W. Oshikawa, M. Itomura, T. Fukushima, S. Izumo, *Zairyo-to-Kankyo*, **44**, 218 (1995).
- 6) S. Tsujikawa and W. Oshikawa, Proceedings of JSCE Materials and Environments 2002, p.297, JSCE (2002).

(Manuscript received April 40, 2003;
in final form July 18, 2003)