沖縄におけるステンレス鋼屋根の実態および 各種ステンレス鋼の耐錆性の特徴*

中田 潮雄**, 小野 直人**, 臼田 泰彦***

** 新日本製鐵株式会社技術開発本部光技術研究部

*** 三晃金属工業株式会社

State of Stainless Steels Roofing in Okinawa and Characteristics of Corrosion Resistance in Atmosphere of Various Stainless Steels*

Michio Nakata**, Naoto Ono** and Yasuhiko Usuda***

** Hikari R & D Lab., Technical Development Bureau, Nippon Steel Co.

*** Sanko Metal Industrial Co., Ltd.

This paper describes two types of exposure test in Okinawa. One is about 10 years of field observation for SUS 304 and SUS 316 roofs to prove the corrosion performance of building materials used stainless steels. The other is exposure test for various kinds of stainless steel specimens attached to model structures, which simulates roof and eaves, to clarify the corrosion characteristics of them in atmosphere. There is no discernible difference in the degree of rusting between SUS 304 and SUS 316. SUS 316 however has a smaller pit depth than SUS 304. The pit depth is not seemed to increase after a few years. The superiority of SUS 316 in the pit depth in comparison with SUS 304 is also observed by the two years exposure test on the simulated roof and eaves model structure. Seawater-resistant stainless steel (20Cr-18Ni-6Mo steel) has superior corrosion resistance on the roof and eaves.

Key words : stainless steel, roof, corrosion, Okinawa, rust, pitting, exposure test, seawater-resistant stainless steel

1. 緒 言

ステンレス鋼の特徴を生かした用途に屋根・壁などの外装材があり、特に体育館や展示場など大型物件への適用が進んでいる。

著者らは、過去、北海道から沖縄に至る SUS 304 を主とするシーム溶接工法で施工された屋根の腐食状況と腐食環境の実態調査を行い、屋根上に堆積する塩分量は地理的要因によりむしろ軒下などの構造に大きく左右されていることなどを見いだした¹⁾。

本報では、塩害環境の沖縄に絞り、SUS 304 と SUS 316 製屋根について約 10 年間にわたって孔食の進展速度などの経年変化調査を行うとともに、各種ステンレス

鋼について構造シミュレート体による暴露試験を行い、耐錆性の特徴を検討した。

2. 実験方法

実態調査を行った屋根は、Table 1 に示す 5 つの体育館などであり、板厚 0.4 mm の鋼板が使用されている。サイト A (SUS 316 製) とサイト E (SUS 304 製) の

Table 1 Subject roofs.

Site	Roof material	Location	Time passed	Distance from sea
A	SUS 316	Okinawa-shi	About 10yrs	About 1 000 m
B	SUS 316	Ginowan-shi	About 8yrs	About 1 000 m
C	SUS 316	Naha-shi	About 8yrs	Scores of m
D	20Cr-18Ni-6Mo	Ginowan-shi	About 5yrs	About 1 000 m
E	SUS 304	Sashiki-cho	About 13yrs	About 500 m

* 腐食防食'94 (つくば, 1994 年), 腐食防食'95 (東京, 1995 年) で発表

** 〒743 光市大字島田 3434 (3434, Shimata, Hika-ri-shi, 743 Japan)

*** 〒104 東京都中央区京橋 2-9-2 (9-2, Kyobashi 2-chome, Chuo-ku, Tokyo, 104 Japan)

No	Type	Steel	Composition	Pitting potential, $V_c' / 100 (V_{SCE})^{4)}$
				0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
1	γ	SUS304	18Cr-8Ni	
2		SUS316	18Cr-12Ni-2.5Mo	
3		Steel A	20Cr-18Ni-6Mo-0.2N	
4	α	Steel B	19CrNb-low C, N	
5		Steel C	22Cr-0.8Mo-Nb-low C, N	
6		Steel D	25Cr-4Ni-4Mo-Nb-low C, N	

4) Pitting potential as per JIS G0577 (3.5%NaCl, 30 °C)

Fig. 1 Exposure test specimens and pitting corrosion potential.

屋根トップ部は平坦で堆積物や雨水が溜まる構造であり、急傾斜の部位も存在する。サイト C (SUS 316 製) はすべて傾斜部であるが、特徴は海から数 10 m の直近にあり、サイト B (SUS 316 製) は平坦から垂直まで徐々に変化しており、傾斜角度の影響を見るに好都合である。また、サイト D は耐海水ステンレス鋼製 (20 Cr-18Ni-6Mo) で、雨水が当たる傾斜部と軒下に平坦部が存在する。

発錆状況は発錆の程度を 7 ランクに分類した基準をもとに評価した²⁾。評点『A』は発錆がなく、『B』は点錆が認められる程度、『C』は斑点状のシミ模様程度でこれまでが外観上許容できるレベルで、『D』は斑点状の目立つさびが生じ、『E』、『F』、『G』に従ってさびの面積と濃さが増すことを示している。腐食深さは携帯顕微鏡を用い、焦点深度法により測定した。また、腐食環境の測定は屋根上に堆積している土砂粉塵を採取し、傾斜部など土砂粉塵の堆積がない場合は、純水で湿らしたガーゼで鋼表面 100 mm 角を拭き取り、Cl⁻イオン濃度などを分析した。

一方、暴露試験による耐錆性の調査は、SUS 304、SUS 316 に加え、これら鋼種と JIS 法による孔食電位が同等のフェライト系 2 鋼種と、更に耐海水ステンレス鋼のオーステナイト系とフェライト系の計 6 鋼種を用いた。供試材の公称成分系と孔食電位を Fig. 1 に示した。

試験体は、森田ら³⁾によって提案された屋根部、軒先部、軒裏部および軒下部を有する構造シミュレート体を用い、暴露試験は宜野湾市の海から約 50 m 離れた位置で 2 年間行った。なお、本報では屋根部と軒裏部の結果を示した。

3. 調査結果および考察

3.1 屋根の実態

3.1.1 腐食状況の経年変化

発錆の経時変化状況を Fig. 2 に示す。図中 a) の

Fig. 2 Secular change of rusting.

SUS 304 (サイト E) および b) の SUS 316 (サイト A) において、傾斜部は約 1 年以降約 10 年経過しても発錆評点は『C』でほとんど変化していないが、平坦部の特に乾湿繰り返しが生じる界面は発錆が年々進んでいる。なお、この事例でみる限り傾斜部、平坦部とも SUS 304 と SUS 316 で発錆の進展状況に差はない。図中 c) の傾斜した SUS 316 製の海から約 1 km 離れたサイト B は、サイト A の傾斜部とほぼ同じ状況にあるが、海直近に位置するサイト C は発錆が多く、立地場所による違いが見られた。一方、図中 d) の耐海水ステンレス鋼は、約 5 年後の調査時海塩の結晶が観察された軒下部においても、発錆はなかった。

次に、孔食深さの測定結果を Fig. 3 に示す。図中 a) の SUS 304 と b) の SUS 316 については、傾斜部と平坦部の測定結果を示した。なお、発錆が目立った平坦部は、主に 1 回目の調査で観察された深いものから 4 個の孔食を引き続き調査した。図中 a) の SUS 304 (サイト E) において、傾斜部は約 2 年経過時点で最大 20 μm であり、4 年半経過後には 35 μm まで進展していたが、それ以降進展はなかった。一方、平坦部の孔食は約 2 年経過時点では 40 μm 以下であったが、同じ孔食を追跡した 4 年半経過後では 50~120 μm まで進展した。しか

し、それ以降進展はない。この経時変化は、図中b)のサイト A の SUS 316 においても同様であったが、孔食深さは SUS 304 の約 1/2 と浅く、ここに SUS 316 の優

Fig. 3 Secular change of pit depth.

Fig. 4 Appearances of pitting corrosion in sloping and level parts.

位性が見られた。なお、両鋼種ともに平坦部は経過年数につれ孔食点数が増加していたが、各調査時点とも追跡調査した孔食より深い孔食は観察されなかった。

その代表的な孔食の発生状況を Fig. 4 に示すように、SUS 304, SUS 316 とも傾斜部の浅い孔食は不定形であり、平坦部では典型的な円形であった。また、同図より SUS 316 は SUS 304 より口径も小さいことが分かる。なお、平坦部の孔食形態は皿形ないし円筒状であり、孔食の底は金属光沢を有していた。また、数日間雨が降らなかった後の調査では孔食内に水分が存在している様子はなかった。

一方、Fig. 3 c) の SUS 316 製傾斜屋根において、サイト B は約 10 μm 程度で進展していないが、海直近のサイト C はこれより約 3 倍深くなっているものの、約 3 年以降進展している様子はなかった。海直近のサイト C が発錆とともに孔食がやや深くなっている原因は、後述の海塩の飛来量に起因している。なお、耐海水ステンレス鋼のサイト D には孔食の発生はなかった。

以上のように、沖縄においても立地場所によりやや状況が異なるが、傾斜部および平坦部とも孔食が進展している様子はなく、また、SUS 304 に対する SUS 316 の優位性は孔食深さにあった。

3.1.2 腐食環境

平坦部に堆積していた土砂粉塵の成分分析結果の一例を、Table 2 に示す。同表には北海道から沖縄に至る 17 施設の屋根と、臨海地に存在する幕張メッセ屋根の堆積物の測定結果を比較して示した。

雨水の当たる一般部の Cl⁻イオン濃度は、17 施設の平均値 0.1% に対して 1.4~4.7% と高く、更に軒下部は一桁高く、それは幕張メッセの軒裏部の約 6 倍の約 22% と異常に高い濃度であった。このほかの特徴として、

S 量が 17 施設より高い傾向にあるが、S の分析値を SO₄²⁻ として SO₄²⁻/Cl⁻ 比でみると、軒下部は海水の比率 0.1 (SO₄²⁻: 2649 ppm, Cl⁻: 18900 ppm) になっており、この S 分は海塩によるものと見られる。一方、幕張メッセの場合にはこの比が大ききずれ、S 量が高い原因は隣接する工業地帯の影響と推定される。

次に各サイトごとの Cl⁻イオン濃度を比較した結果を Fig. 5 に示す。前述のように、平坦部がなく土砂粉塵の堆積物が採取できない屋根もあることから、ガーゼによって拭き取った汚れによる濃度を比較した。同図には国内 17 施設の分析値を併記した。

その結果、傾斜部では海直近のサイト C を除けば、0.1~0.6 mg/dm² であるが、経

Table 2 Chemical composition of deposit on roof.

		(mass%)						
		Cl	S	Cu	Na	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻
Okinawa	Roof top -1	1.39	0.24	0.01	1.28	7.44	0.91	0.5
	Roof top -2	4.71	0.39	0.01	3.08	0.83	0.79	0.2
	Under eaves	21.69	0.92	0.15	13.90	3.29	1.57	0.1
17 Facilities in Japan	Range	0.001 ~31.6	0.009 ~0.19	0.01 ~2.30	0.51 ~20.2	0.69 ~16.8	1.03 ~2.78	—
	Average	0.098	0.025	0.12	1.68	3.71	1.50	0.8
Makuhari Messe	Roof top	0.16	0.12	0.01	1.16	2.74	1.25	2.3
	Under eaves	3.54	3.05	0.01	3.97	5.72	1.17	2.6

Fig. 5 Cl⁻ ion concentration of roof deposit.

年とともに発錆が進展したサイト C は他の屋根の平坦部や軒下に近い約 2 mg/dm²であった。なお、濃いさび部を拭き取り分析したサイト A と E の平坦部は、一段と高い値を示した。

3.1.3 傾斜角度の影響

サイト B は、水平から垂直まで変化した部位が存在し、その形状を約 5 年経過後の傾斜角度別の付着 Cl⁻イオン濃度の測定結果と共に、Fig. 6 に示した。

土砂粉塵がたまらない部位では、急傾斜部ほど Cl⁻イオン濃度が高く発錆状況と一致した。この状況は他の屋根にもみられ、傾斜部に比し壁のように立ち上がった部位の発錆が目立った。この理由は、垂直部ほど飛来する海塩粒子が付着しやすく、雨水による洗浄効果が少ないためと考えられる。なお、いずれの部位も孔食深さは最大 10 μm 程度で大差なかった。

Fig. 6 Relationship between roof inclination and Cl⁻ ion concentration.

Fig. 7 Secular change of rusting.

3.2 構造シミュレート体による暴露試験

SUS 304 および SUS 316 製屋根の経年変化の調査結果、両鋼の発錆程度に差はなく、SUS 316 の優位性は孔食深さにある結果を得た。しかしながら、立地場所が異なることから、同一場所における耐錆性比較とこのほかのステンレス鋼の特徴把握を目的に、構造シミュレート体による暴露試験を行った。

3.2.1 耐発錆性

1 および 2 年後の発錆状況を発錆評点で Fig. 7 に示した。SUS 304 のほか孔食電位が 0.3~0.5 V (vs. SCE) にある 4 鋼種のうち、屋根部では鋼 B (19Cr) が劣る傾向にあるが、鋼 C (22Cr-0.8Mo) とともに、SUS 304 と SUS 316 は前述の屋根の実態とほぼ同様な評点『C』であった。鋼種間の違いは腐食性の高い軒裏

Fig. 8 Pit depth and pit diameter after exposure test.

部にみられた。すなわち、SUS 304 と SUS 316 は同等であるが、SUS 304 と同じ孔食電位を示す鋼 B (19Cr) は 1 年目からの発錆が多く、鋼 C (22Cr-0.8Mo) は軽微である。これに対して、孔食電位が 1 V を越え孔食発生のない耐海水ステンレス鋼の鋼 A (20Cr-18Ni-6Mo) と鋼 D (25Cr-4Ni-4Mo) は、軒裏部においても発錆はなかった。

3.2.2 耐孔食性

観察された孔食の深いものから 10 個の口径と深さの測定結果を、発錆のない耐海水ステンレス鋼 2 鋼種を除く 4 鋼種について Fig. 8 に示した。

共通して屋根部に比し軒裏部の口径が大きく、かつ深い孔食を生じている。その特徴を SUS 304 を基準に示すと、SUS 316 は屋根部、軒裏部ともに口径が小さく深さも浅く、前述の屋根の実態調査結果と合致した。SUS 304 と同じ孔食電位の鋼 B (19Cr) は、屋根部では同等であるが軒裏部では大きくかつ深い孔食が多く存在し、孔食電位が SUS 316 と同等の鋼 C (22Cr-0.8Mo) は浅く口径も小さく、SUS 316 より優れていた。

Fig. 9 Secular change of pit density.

次に、孔食の発生密度についてみると、測定結果を Fig. 9 に示したように、耐海水ステンレス鋼の 2 鋼種を除く 4 鋼種は、屋根部ではほぼ同等であり、軒裏部に差異がみられた。SUS 316 は SUS 304 に対して 2 年後の孔食点数が増加しており、小さな孔食が多く発生する特徴があり、このために SUS 304 と発錆程度が変わらなくなっているものとみられる。更に、鋼 B (19Cr) には多くの孔食が生成しており、口径が大きく深い孔食が多数発生する特徴がある。一方、鋼 C (22Cr-0.8Mo) は発生数も少ない。

ステンレス協会技術委員会腐食専門委員会で行われた駿河湾実海域暴露試験結果によると⁴⁾、同一 PI 値でも α 系に比し γ 系の孔食が浅いことが示されており、鋼 B (19Cr) に対する SUS 304 の優位性は Ni の効果とみられる。

3.2.3 腐食環境

1 および 2 年暴露材の付着 Cl⁻イオン濃度を他の暴露地と比較して Fig. 10 に示した。屋根部は沖縄と他の地区で差はなく約 0.1 mg/dm²であるが、一方、軒裏部の Cl⁻イオン濃度は沖縄が桁違いに高く、2 年目では約 2 mg/dm²に達している。屋根部の Cl⁻イオン濃度が沖縄と他地区で同じであるにもかかわらず、他の地区では SUS 304 においても発錆がないかもしくは軽微であることは、沖縄は台風などの瞬間的な海塩の飛来や温度、湿度、日射量などの気象要素が関与しているものとみられる⁵⁾。一方、沖縄暴露材の軒裏部には、Fig. 11 に示すような角錐形の高塩の結晶が生じており、SUS 304 には潮解した結晶の境界部に孔食が観察された。これは、押川ら⁶⁾の MgCl₂溶液を滴下乾燥した試験片を恒湿槽に保持した腐食試験で、液滴の周囲に孔食が生じていたことと対応している。

Fig. 10 Cl^- ion concentration of test specimen surface deposit at various exposure test sites.

Fig. 11 Sea salt and pitting corrosion on eaves interior specimen (SUS 304) at Okinawa exposure test site.

疑問と残る傾斜部や平坦部で孔食が進展していない実態については、全国の屋根の実態調査で¹⁾、避雷針などのCu製品の溶出液がたまる部位で、かつ雨水が長期にわたって乾燥し難い部位の孔食は袋形状で進展しており、これを裏返して考えると、前記実屋根の平坦部の乾湿繰り返し部に生じていた孔食内は乾燥状態にあったことから、晴天時には80°Cまで達すると言われる温度によって乾燥し不動態化するものと考えられる。この現象の解明は今後の課題である。

4. ま と め

沖縄におけるステンレス鋼屋根の約10年間にわたる経年変化調査と、各種ステンレス鋼の耐錆性の特徴を調査した。その結果は以下のである。

(1) SUS 316 屋根の傾斜部は、那覇市の海直近では目につく発錆が認められるが、500 m 以上離れた位置では、SUS 304 を含め約 10 年後も許容されるレベルであった。

(2) 土砂粉塵や雨水がたまる平坦部は、乾湿繰り返し部を中心に発錆が年々増加していたが、SUS 304、SUS 316 とともに孔食は進展する様子はなかった。

(3) 孔食の特徴として、傾斜部の浅い孔食は不定形で、平坦部は円形であった。その平坦部の孔食の底は金属光沢を有しており、数日間降雨がない後の調査では水分は存在しなかった。上記、孔食が進展していなかった理由は、孔食内が乾燥によって不動態化するためと考えられる。

(4) 耐海水ステンレス鋼の 20Cr-18Ni-6Mo 鋼は、約 5 年経過後も軒下部に発錆がなく、特に美観を必要とされる外壁などに適している。

(5) 傾斜角度の影響は、急傾斜部ほど発錆がやや多い傾向にあり、鋼表面付着 Cl^- イオン濃度が高かった。これは、雨水による洗浄効果が小さいためとみられる。

(6) 屋根上の平坦部に存在する堆積物中の Cl^- イオン濃度は、国内他所の屋根より約 10~50 倍を示し、軒下部には海塩の結晶が観察された。

(7) 海から約 50 m 離れた位置での構造シミュレート体による 2 年間の暴露試験結果、SUS 304 と SUS 316 の発錆程度は同等であり、SUS 316 は孔食径深さに優位性があることなどが分かった。また、構造シミュレート体による暴露試験によって、実建材の耐錆性が評価出来ることを確認した。

(Manuscript received January 23, 1997 ;
in final form May 21, 1997)

参 考 文 献

- 1) 中田潮雄, 稲垣博巳, 林 義信, 若曾根肇, 橋本 潔, 福来光男, 細羽満男, 柿島孝男:「第 35 回 腐食防食討論会予稿集」, p.183, 腐食防食協会 (1988).
- 2) 中田潮雄, 伊藤 功, 小野山征生, 稲垣博巳:「第 28 回腐食防食討論会予稿集」, p.18, 腐食防食協会 (1981).
- 3) 森田 大, 近藤 実:「形状を工夫した暴露試験による金属建材の色差変動」, p.161, 日本建築工学会 1994 年大会学術講演会研究発表論文集 (1994).
- 4) ステンレス協会技術委員会腐食専門委員会:「実海域における耐さび性」, ステンレス協会 (1989).
- 5) 石原金盛:ステンレス, 4, 9 (1986).
- 6) 押川 渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 辻川茂男, 篠原 正:「第 40 回腐食防食討論会予稿集」, p.345, 腐食防食協会 (1993).