ステンレス鋼の耐候性

遅 沢 浩 一 郎*

*日本冶金工業株式会社研究開発部

The Atmospheric Corrosion Resistance of Stainless Steel

Koichiro Osozawa*

*Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd.

The effects of alloying elements on the atmospheric corrosion of stainless steel, the results of exposure tests in different environments in Japan and the evaluation methods of atmospheric corrosion resistance were discussed.

1. はじめに

ステンレス鋼は建築物および車両の外装や屋外の造形に、表面被覆なしで裸のまま使用されることが多い。その理由は、いうまでもなくステンレス鋼が大気中における耐食性にすぐれるため、あまり手間をかけずに美観を保てることが第一であろうが、さらに金属地のまま利用できるということが建築家や芸術家にとって魅力になっているからであると思われる。また、成形、溶接などの加工が比較的容易であることも、受入れやすい理由の一つとなっている。

建築への適用は、古くは米国における第一次超高層建築時代である 1920~30 年にかけてのことで、ニューヨーク市のクライスラー・ビルやエンパイアステイト・ビルに大量のステンレス鋼が使われ、また日本においては、1929 年に大阪朝日新聞社ビルの一部にステンレス鋼が初めて使われた¹⁾。1929 年に建設されたクライスラー・ビルにおいては、ドーム、ひさき (gargoyle)、その他の飾りを 32 年後の 1961 年にはじめて清掃しているが、簡単な清掃処理後に初期の光沢が現出しており²⁾、これらは現在までに設置後約 50 年を経過していることになり、ステンレス鋼が大気中において長期にわたって安定していることが実証されているわけである。ステンレス鋼の耐候性については古くから試験されており、欧米においては多くのデータが公表されているが^{3)~10)}、日本における結果についての報告は比較的少ない^{20)~27)}。表 1 には、それらの暴露試験において用いられた鋼種、仕上げ、期間、試験後の評価法などをまとめて示した。

本稿においては、ステンレス鋼の耐候性に対する主として材料側の影響について解説した。

2. 耐候性に及ぼす合金元素の影響

鉄の大気中におけるさびの発生は、Cr 量がある量以上増すと抑えられ、図 1¹³⁾に示すように、ほぼ 12% になると重量減はほとんど無視できる程度になる。ただし Cl⁻ イオンを含む海岸地帯などにおいては、その影響の程度に応じて 15.7% または 18.5% 以上というように必要 Cr 量は増大する¹⁸⁾。

Cr を約 12% 以上含む、いわゆるステンレス鋼に対する合金元素の影響に関して公表されたデータは少ない

図 1 Fe-Cr 合金の 8 年間大気暴露結果に対する Cr 量の影響

* 〒104 東京都中央区京橋 1-15-1 (1-15-1, Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo 104, Japan)

表 1 ステンレス鋼の大気暴露試験結果に関する文献

試験地	文 献		材 質	形 状	仕 上	試験地数	期間 (年)	評 価			
	No.	発行年						外観	重量	ビット深さ	引張強さ
国 外	3)	1946	18-8, 316, (Cu-Zn)	網板	酸洗+サンドブラスト	1~4	0.8~8.4				○
	4)	1946	13Cr, 17Cr, 18-8	板		1	15		○		○
	5)	1956	ステンレス16種	板		1	12		○	○	
			Fe/0~37Ni/8~28Cr	板	バフ	2	26	○			
	6)	1963	各種オーステナイトステンレス鋼	板	#240	4	12~23	○	○	○	
	7)	1964	オーステナイト系, 析出硬化形, Ni合金	板	2B, 4(3), EP	5	1~1.3	○*	○	○	
	8)	1964	ステンレス16種	板	2B, #220, 梨地, EP	4	1	○*			
	9)	1964	17Cr, 18-8, 18-10-2.5Mo	板	temperpass, unibrite	4	3.5	○*			
	10)	1968	201, 301, 434	板		4	7		○	○	○
	11)	1968	800, 825, (600, 625, 400, 200)	板		2	20	○*	○		○
	12)	1969	ステンレス21種	棒		4	8		○	○	(疲れ寿命)
	13)	1969	Fe/0.5~28Cr	板	No. 4, 酸洗	5	7				○
	14)	1969	430, 302, 316	線		4	7		○	○	
	15)	1974	304, (他金属10)	板		5	4, 10	○*			
	16)	1975	17Cr, 18-8, 18-10-2Mo	板		9	7.5	○*			
	17)	1978	409, 430, 321, Cuクラッド	板	2D, 4, 8	1	5	○	○	○	
	18)	1979	430, 304, 316, (315)	板	2D, 4, 8	1	5	○			
	19)	1979	430, 434, 302, 316	板							
国 内	20)	1963	410, 304, 316, 316J1	板	(受入れ)	7	1		○		
	21)	1966	304	板	BA, 2B, HL, MP, 梨地	2	0.5	○			
	22)	1967	410, 304, 316, 316J1, (ほか)	板	(受入れ)	7	5		○		
	23)	1967	410, 430, 304, 321, 316L	板	研磨	5	3				
	24)	1968	304, (Cu-Zn-Ni)	板	Niメッキ(304に対し)	3	1	○			(疲れ寿命)
	25)	1973	304, (SPCC, BsP 3, 63S)	線	(受入れ)	3	1	○*			
	26)	1976	430, 304, 316	板	2B, No. 4	4	8	○*		○	
	27)	1980	410, 430, 316	板	2B(304は2B, 2D, BA)	1	5	○*		○	

* 外観レーティングにより評価 26), 27) では光沢残存率によっても評価。

図 2 異なる暴露試験シリーズにおける重量減と鋼中 Mo 量の関係

が、図 2 は英国 Sheffield の工業地帯の暴露における重量減を鋼中の Mo 量に対してプロットしたもので、暴露開始年の異なる試験シリーズについて示してある¹³⁾。

これによると、Mo 量の増加に伴い重量減が明らかに少なくなる。なお、1962 年開始のデータが示すように、同一 Mo レベルにおいては 17Cr 系の方が 18-8 系よりも腐食度が高い。ただし、精錬技術の進歩により、最近工業的に製造可能になった低 C 低 N レベルの 17Cr 系高純度ステンレス鋼においては、Cr 炭化物または窒化物の析出に基因する金属地の Cr 欠乏がほとんどないため、同一 Mo レベルで比較した場合、これら高純度 17Cr 系と 18-8 系との耐候性の差は小さくなっていると考えられる。

その他の合金元素の影響についてはあまり明らかにされていないが、ステンレス鋼の大気中における腐食は多くは塩化物による孔食が発端となることを考えると、その中性塩化物溶液中における耐孔食性と関連があるといえるので¹⁴⁾、耐孔食性に対する合金元素の影響²⁵⁾を、そのまま耐候性に対してもあてはめることができる。したがってまた、発錆点となりやすい非金属介在物を作らないようにすることも耐候性向上に役立つ²⁶⁾。

3. 暴露試験データ

各ステンレス鋼種の耐候性を比較するために、米国の

表 2 米国における 20 年間暴露結果 (丸棒) (J. C. Jasper & H. H. Lawson)

鋼 種 (AISI呼称)	外観レーティング*		鋼 種	外観レーティング*	
	Middletown (マイルド 工業環境)	Kure Beach* ¹ (海洋環境)		Middletown (マイルド 工業環境)	Kure Beach* ¹ (海洋環境)
302	9	6	416(焼なまし)	7	1
303	9	3	416(焼戻し)* ⁴	6	1
303Se	9	3	416(焼戻し)* ²	5	0
304	9	5	416(半硬化)	7	1
309	9	8	416(硬化+S.R.)* ³	7	1
310	9	8	420(バフ仕上)	9	2
316	9	9	430	9	4
321	9	4	430F	8	2.5
347	9	5	431	9	4
410(焼なまし)	7	1	440A(バフ仕上)	8	2
410(焼戻し)* ²	5	1	440B(バフ仕上)	8	2
410(半硬化)	7	1	440C(バフ仕上)	8	2
410(硬化+S.R.)* ³	7	2.5	442	9	5
414	8	1	446	9	8

*0 (最悪)～9 (最良), *¹ 海岸から 800ft 地点, *² BHN=260～320, *³ S.R.=stress relieved,*⁴ BHN=235～260

マイルドな工業環境 (Middletown) および海洋環境 (Kure Beach, 海岸から 800 ft 地点) で 20 年間暴露した丸棒試験片の外観評価結果を表 2¹⁾に示した。これによると, 300 系ステンレス鋼 (すなわちオーステナイト系ステンレス鋼) および Cr を 16% 以上含む 400 系ステンレス鋼は工業環境においては外観上もすぐれているが, 海洋環境においては Cr を約 25% 含むステンレス鋼 (すなわち 309 鋼, 310 鋼および 446 鋼) および Mo を含む 316 鋼だけが良好な外観を呈している。同試

験では多くの鋼種に対して仕上げ (粗削り, センタレス, バフ, 圧延, 電解研磨, 冷間引抜) の影響も検討されており, その結果では電解研磨仕上げがもっとも良好な耐候性を示している。電解研磨したものが明らかにすぐれていることは, 板材を用いた他の試験でも認められている¹⁰⁾。

一方, 日本において, 環境の異なる地域で仕上げの異なる 430, 304 および 316 鋼を 8 ケ年暴露したときの外観変化を JIS D 0201 法によってレーティングした結果²⁰⁾を図 3 および図 4 に示した。これによると, 川崎

図 3 屋外暴露材の外観レーティング経時変化 (1)

注) 表 2 中の外観レーティングは, 暴露後の試験片の発錆状態を肉眼で検査し, 感能的に最悪のものを 0, 最良のものを 9 としてある。原文にはレーティング 0, 3, 6 および 9 の試験片の外観写真が載っているが本稿では省略した。

図 4 屋外暴露材の外観レーティング経時変化 (2)

注) 外観レーティングナンバ (RN) は表面の変色面積率 (WA) を基準として, 次式で表わされる。

$$RN = 3(2 - \log WA)$$

図 5 2年および8年後の外観変色率

(臨海工業地帯)以外の暴露地ではレーティングナンバが暴露期間の対数とほぼ直線関係を示すものが多い。外観上あまり変化が目立たない程度をレーティングナンバ5以上(すなわち変色面積率2.5%以下)として、各地における2年および8年後の外観を評価すると図5のようにまとめられる。同図から、清浄な大気においてはSUS 430でも外観上とくに問題ないが、海岸または工業地帯ではまったく手入れなしで金属光沢を維持するにはSUS 316またはそれ以上の耐食性を有するステンレス鋼が適しているといえる。仕上げの影響は図3および図4から明らかのように、2B仕上げの方がNo.4(またはヘアライン)仕上げよりもすぐれている。

ステンレス鋼の大気中における重量減は、前述のとおり問題になる程度ではない。上記8年間の試験後の重量変化測定例を表3に示したが、これからもステンレス鋼における引張強さの劣化は実用上ないといえる。ステンレス鋼で問題となる腐食形態は孔食であるので、表4⁹⁾に15年間海岸地帯に暴露された各種ステンレス鋼に発生したピットの平均深さを示した。平均ピット深さは鋼種により若干異なり大体10~90 μm である。図6²⁰⁾は国内の8年間におけるピット深さの変化を示したもので、これによるとその進行は暴露初期に速く、その後の成長は緩慢であるといえる。

ステンレス鋼を他金属と接触させた場合の耐食性についてはあまり発表されていないが、304鋼もしくは316鋼と他金属の円板形試験片を重ね合わせて、米国の4暴露地で5年間試験した結果²⁰⁾では、Al合金(2024およ

表 3 8年間暴露後の重量減(mg/cm^2)

暴露地 材質	海岸工業 (川崎市)	都市工業 (東京都王子)	海岸 (千葉県興津)
SUS 304	0.065	0.002	0.10
SUS 430	0.13	0.036	0.16
亜鉛鉄板	88.0	52.6	39.0
耐候性鋼板	66.0	29.3	39.0

表 4 15年間海岸地帯の大気に暴露したステンレス鋼の状況 (Kure beach, 海水から800ft)

鋼種 (AISIタイプ)	平均腐食率* (mm/y)	ピットの 平均深さ* (μm)	外観**
301	$< 2.5 \times 10^{-5}$	41	C(20)
302	$< 2.5 \times 10^{-5}$	30	D(10)
304	$< 2.5 \times 10^{-5}$	28	B(15)
321	$< 2.5 \times 10^{-5}$	66	B(15)
347	$< 2.5 \times 10^{-5}$	86	B(20)
316	$< 2.5 \times 10^{-5}$	25	A(15)
317	$< 2.5 \times 10^{-5}$	28	A(20)
308	$< 2.5 \times 10^{-5}$	41	D(25)
309	$< 2.5 \times 10^{-5}$	28	B(25)
310	$< 2.5 \times 10^{-5}$	10	B(20)

* mil単位の値から換算

** A: 非常にさびかなさび, よごれ

B: さびかなさび, よごれ

C: 軽度のさび, よごれ

D: さび, よごれ

() 内はさび・よごれ面積(%)

図 6 SUS 304 2B 仕上げ板のピット深さ(表側)

び5053合金)はステンレス鋼と接触させない場合と比較して最大5倍の腐食量を示し、他の金属(銅、青銅、亜鉛、モネル400、軟鋼)も2倍程度まで加速されるものがあつた。一方、ステンレス鋼の方は上記金属との接触の有無にかかわらず、重量損失はほとんど無視できる程度であることが示された。また、銅を表面にクラッド

した銅-ステンレス鋼合せ板についての 7.5 年の暴露結果¹⁷⁾によると、海岸地帯においては、ステンレス鋼側が 409 鋼および 430 鋼の場合には、それらが腐食されるが、田園地帯においては腐食されない。ステンレス鋼側に 321 鋼を用いた場合は、いずれの暴露地においても銅の変色はあるが、ステンレス鋼側は腐食されることが示された。なお、大気中における異種金属の接触で影響される部分は、両金属が接している部分およびそのごく近傍に限られる。また、アルミニウムにステンレス鋼をクラッドして自動車のモールとして使用される例もあるが、この場合は、ステンレス鋼の外観を利用するとともに、アルミニウムにより車体の鋼板の防食をしていることになる。

大気暴露された場合に発生する腐食の形態のおもなものは写真 1 および写真 2²⁰⁾に示すように、孔食および付

写真 1 川崎に 8 年間暴露後の SUS 304 2B 仕上げ板表面の SEM 像 (付着物洗浄後) (×400)

写真 2 川崎に 8 年間暴露後の SUS 430 2B 仕上げ板表面の SEM 像 (付着物洗浄後) (×400)

図 7 SUS 304 2B 仕上げ板の重量変化

着物下の全面的腐食であり、後者はほこり等の付着しやすい場所において耐食性の比較的低い SUS 430 などに認められる。SUS 304 2B 仕上げ板試験片の重量の変化を図示すると図 7²⁰⁾のとおりである。一般に腐食生成物およびその他の付着物のために重量が増加するが、清浄大気中で塩化物によりピットが生ずる海岸地帯では比較的初期に重量減として表われてくる。

4. 耐候性の維持

ステンレス鋼を外装材として用いるときには、通常は強度上は問題ないが、外観を重視するときには、表面のほこり等のよごれを除去し、腐食の進行を未然に防ぐために定期的クリーニングが行われている。表 5²¹⁾には建物外装の定期清掃のひん度の大体の標準を示した。ただし、Truman が工業地帯において実験した結果は表 6¹⁰⁾のとおりで、これによると、クリーニングによってよごれは除去されるが、腐食面積は鋼種により決まり、手入れ回数には影響されないことになる。この点についてはさらに確認する必要がある。

ステンレス鋼は普通鋼からの“もらいさび”のために外観を損い、最終的に発錆するので、最近はそれに対処するため、表 7 に示したように厚さ 20 μm 程度の有機塗装を施したステンレス鋼板が国内で市販されている。

表 5 建物の立地条件と定期清掃のひん度 (参考)

ステンレス協会

立地条件	清掃回数
海岸・工業地帯	3～4回/年
市街地	1～2回/年
田園地帯	0.5回/年

表 6 6 年間の暴露後の腐食面積 (%)*

鋼 種	仕 上	清 掃 ひ ん 度			
		(なし)	3 ヶ月	1 ヶ月	1 週
430	2D	36	45	35	35
	4	37	34	42	33
	8	25	30	30	23
434	2D	5.6	7.0	6.3	6.3
	4	4.3	7.6	5.0	3.6
	8	2.6	3.6	3.6	3.0
304	2D	1.0	2.6	2.3	1.6
	4	3.6	18.5	10.0	8.0
	8	3.3	7.0	4.3	4.6
316	2D	0	0	0	0
	4	0	0	0	0
	8	0	0	0	0

* 暴露地：英国 Sheffield (工業地帯)

表 7 塗装ステンレス鋼

素材	塗 装 材	呼称およびメーカー
SUS 304	シリコン変成ポリエス テル樹脂, 2 コート 2 ベーク処理	ナルカラー(日本ステンレス), スワンカラー(日本金属工業), カラーソフテン(日新製鋼)
	シリコン変成アクリル 樹脂, 2 コート 2 ベーク処理	ナスコート(日本冶金工業)

これらはとくに屋根材としての利用が多いが、クリア塗装を施したものは、ステンレス鋼本来の金属光沢を長期間保ちつつさびの発生を防止することを意図したものである。

5. 耐候性の評価法

大気暴露結果の評価法としては、外観（または腐食面積）、重量変化、ピット深さ、引張強さなどがある。表 1 には各試験者が用いた評価法も記したが、最近では外観

図 8 腐食面積と重量減の関係——英国 Sheffield 暴露結果

による評価が多く用いられている。評価法はデータの利用目的によって異なるが、外観を重視する用途が多い今日においては、外観レーティングによるものが適しているといえよう。腐食量が比較的多い場合は、図 8¹⁸⁾に示すように、腐食面積と重量減との間には相関があると考えられるが、この図よりもさらに重量減の少ない場合には必ずしも一致しない。筆者らは外観レーティング(JIS D 0201) の代りに反射率(JIS Z 8741) を測定したが²⁰⁾、その結果とレーティングナンバの関係は図 9 のとおりで、反射率によっても外観変化を判定できると考えられる。とくにレーティングナンバがゼロの場合でも 0°—0° 方向の反射率により、より細かく区別できる。この方法は、外観レーティング法よりも人為的誤差が少ないと考えられる。

一方、強度や破壊を問題とする場合には孔食を重視し

図 9 外観レーティングナンバと残存反射率の関係

図 10 ピットの深さと数の関係

なければならないので、深いピットの平均深さをとることが適している。孔食深さと孔食数（腐食面積と関係する）とは図 10⁴⁹⁾ のように反比例する傾向があり、問題となる深いピットの数はい少ない。

6. おわりに

ステンレス鋼の大気腐食に対する環境因子の影響についてはあまり追究されておらず、本稿では触れなかったが、多くの試験データが示すように鋼種の差よりも環境の差の方が大きい場合もある。したがって環境に適した鋼種を選ぶことも必要である。腐食性因子としては、水分のほかに海塩粒子、すずなどが大きいと考えられ、海岸近くに建物類が多く、また、台風に見舞われる日本では環境がきびしいといえる。方向によるさび発生程度の差異は長期暴露後は顕著ではないが、同一建物においても結露時間が長く、雨によって表面が洗浄されない日影部分では発錆しやすいので、そのような部分ができないようにデザインすることも必要である。

現在多くのステンレス鋼外装部は定期的クリーニングを行うことによりその美観を保っているが、表面を機械的に研磨するような手入れ法は本来は好ましくない。初期のさびはもっとも発錆しやすい介在物部分に生じるので、クリーニング時には腐食生成物とよごれだけを除去することが理想的で、研磨により新しい表面を露出させることは得策ではないと考える。耐候性向上の点からは、材質のグレードアップ以外に前述のとおり有機塗装も考えられているが、清掃しやすい構造にするとともに手入れ法自体にも工夫が必要であろう。

さらに、ステンレス鋼の耐候性に関しては、さび発生の機構に基づいて考えられた促進試験法の確立および暴露結果の評価法について統一することも今後の課題であろう。

(1980年5月28日受理)

文 献

- 1) ステンレス協会開発委員会建築開発専門委員会編：“ステンレス建築のメンテナンス”，ステンレス協会，(1978).
- 2) F. L. LaQue: *ASTM STP*, **454**, p. 3 (1969).
- 3) W. A. Wesley & H. R. Copson: *Proc. ASTM*, **46**, 652 (1946).
- 4) I. V. Williams & K. G. Compton: *ibid.*, 673 (1946).
- 5) H. R. Copson: *ASTM STP*, **175**, 141 (1956).
- 6) INCO: “Corrosion Resistance of the Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steels in Atmospheric Environments, INCO 資料 (1963).
- 7) H. R. Copson & E. A. Tice: *Werkst. Korros.*, **15**, 645 (1964).
- 8) T. E. Evans: *ibid.*, **15**, 797 (1964).
- 9) K. Janssen & R. Moser: *ibid.*, **15**, 804 (1964).
- 10) H. L. Black & L. W. Lheirbier: *ASTM STP*, **435**, p. 3 (1968).
- 11) D. Van Rooyen & H. R. Copson: *ibid.*, **435**, p. 175 (1968).
- 12) J. C. Jasper & H. H. Lawson: *ASTM STP*, **454**, 118 (1969).
- 13) R. J. Schmitt & C. X. Mullen: *ibid.*, **454**, 124 (1969).
- 14) J. H. Rigs: *ibid.*, **454**, 137 (1969).
- 15) W. H. Ailon, Jr.: Prepr. Annu. Offshore Technol. Conf. 6th., p. 293 (1974).
- 16) R. Ergang & M. B. Rockel: *Werkst. Korros.*, **26**, 36 (1975).
- 17) R. Baboian, G. Haynes & P. Sexton: *ASTM STP*, **646**, 185 (1978).
- 18) J. E. Truman: *Stainless Steel Ind.*, **7**, No. 35, 11 (1979).
- 19) J. E. Truman: *ibid.*, **7**, No. 36, 23 (1979).
- 20) 堀川一男，滝口周一郎，大久保秀世，石津善雄：防蝕技術，**12**, 62 (1963).
- 21) 門井守夫：防錆管理，**10**, No. 8, 1 (1966).
- 22) 堀川一男，滝口周一郎，石津善雄，金指元計：防蝕技術，**16**, 153 (1967).
- 23) 堀川一男，滝口周一郎，石津善雄，金指元計：第14回腐食防食討論会講演要旨集，p. 217 (1967).
- 24) 西畑三樹男，佐藤洋太，加藤正一，磯江好徳，小野山隆志：日本金属学会誌，**32**, 1305 (1968).
- 25) 川又 尚，長谷川 毅，根岸建二，大山義一，桜井正毅，小平 勲，村田武司：防食技術，**22**, 373 (1973).
- 26) 遅沢浩一郎，藤原最仁：腐食防食協会’76 春期学術講演大会講演予稿集，p. 94 (1976)；遅沢浩一郎：防食設計のための表面処理に関するシンポジウム予稿集，金属表面技術協会，(1977).
- 27) 伊藤哲司，福島敏郎：防錆管理，**24**, No. 2, 13 (1980).
- 28) K. Osozawa, N. Okato, Y. Fukase & K. Yokota: 防食技術，**24**, 1 (1975).
- 29) 木下 昇，大橋延夫，竹田元彦：鉄と鋼，**57**, 2152 (1971).
- 30) Subcommittee VIII on Galvanic and Electrolytic Corrosion: *Proc. ASTM*, **48**, 167 (1948). (文献 6) 参照)