

土木建築における腐食に関する研究 (その10)

——屋根鋼板に発生した特異な腐食事例——

喜田大三 守屋正裕

Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 10)

——Examples of Corrosion on Sheet Steel Roofing——

Daizo Kita Masahiro Moriya

Abstract

This paper deals with examples of typical corrosion occurring on sheet steel roofing from the viewpoints of the state of corrosion generation its causes and mechanisms, and anti-corrosion measures.

Example 1: In an aluminum foundry, corrosion occurred on the back surface of the sheet steel lining of a foldedplate roof resulting in through holes localized at several portions of the lining. Investigations revealed that the flux used in the aluminum foundry contained ammonium chloride which sublimated at high temperatures, became dissolved in dew condensed on the back surface of the roof, and caused corrosion.

Example 2: Rust was formed on weather-resistant sheet steel at a sanatorium. Not only did the rusting continue even after several years, but it occurred at the back surfaces of the steel sheets. These phenomena arose mainly from salt contained in sea water and besides problems associated with the steel material and roof structure.

概 要

本報告では、屋根鋼板に発生した特異な腐食事例について、腐食の発生状況、腐食原因、腐食機構の調査結果ならびに防食上の注意点についてまとめている。

事例 1. 某アルミニウム工場で、折板屋根のライニング鋼板に、裏面から腐食が発生し、数ヶ所で局部的に腐食貫通した。調査の結果、この原因は、アルミニウムの鋳造過程で使用されているフラックスに塩化アンモニウムが含有しており、それが高温で昇華し、屋根裏面の結露水に溶けて腐食を誘発したことが判明した。

事例 2. 某保養所の屋根に使われた耐候性鋼板のサビが、数年経ても安定せず、さらに、裏面からの局部腐食も発生した。この原因は、海塩粒子の影響が主で、その他に、材質、構造上の問題など、いくつかの要因が重なったためであった。

1. まえがき

金属材料は、材質、表面状態、使用環境によって、様々な形態で腐食する。したがって、用途や環境条件などに応じて、適切な材料と防食法を選定し、効果的に用いることが絶えず要求され、そのために多くの努力が払われている。

しかしながら、時として、予期しない因子による異常な腐食事例も少なからず発生し、場合によっては、建築物の機能を損い、直接、間接に多大の被害を招く原因と

なっている。したがって、これらの腐食原因を調査究明し、耐久性の向上、トラブルの防止に寄与することが非常に大切である。

本報では、屋根鋼板に発生した特異な腐食現象の調査事例を報告し、参考に供する。

事例の一つは、某アルミニウム工場で、鋼板に防食被覆の施された折板屋根に発生した腐食である。竣工後5年足らずで、局部的な腐食が多発し、雨漏りを起こした。

もう一つの事例は、某保養所の屋根に使われた耐候性

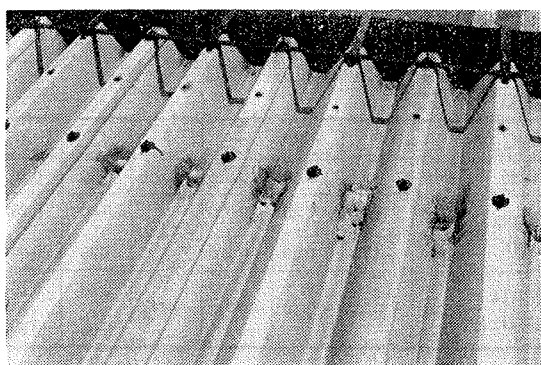
鋼板の腐食である。周知のように、耐候性鋼板は、その表面に自然に形成される安定なサビ層によって腐食が抑止される性質を有する。当建物の場合、竣工後4、5年経過してもサビがなかなか安定せず、さらに、局部的なスリット状の腐食貫通が数箇所が発生した。

以上の事例について、腐食原因の調査結果を述べ、防食上の留意点にも触れる。

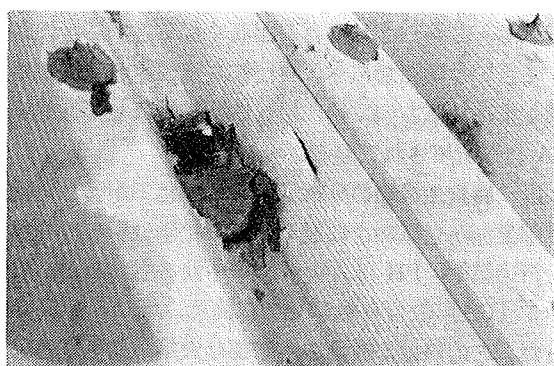
2. 事例 1. 某アルミニウム工場折板屋根の腐食

2.1. 屋根材

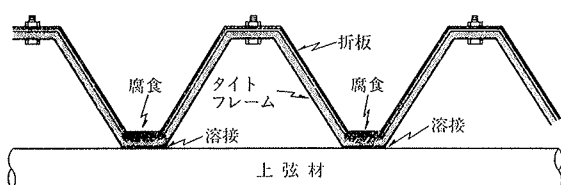
腐食した屋根材は、厚さ0.7mmの鋼板に、表裏面とも防食被覆の施されたライニング鋼板である。カタログによると、被覆層は次の5工程で形成されている。(1) 金属メッキ、(2) メッキ面の化成処理、(3) 下地樹脂の焼付、(4) 樹脂接着層、(5) 無機質繊維を配合した樹脂層。被覆層の厚さは、およそ300 μ 前後である。



写真一 折板屋根の腐食



写真二 腐食貫通部



図一 屋根断面と腐食発生部

2.2. 腐食状況

竣工後5年経過した頃に、写真一、2に示すような腐食が発見された。腐食は明らかに裏面(天井面)から進行したもので、図一に示すように、折板の谷部において、タイトフレームとの接触部に集中していた。

タイトフレームは、亜鉛メッキされた鋼板の成形品でやはり谷部の腐食が著しく、4.5mmの板厚が1.8mm程度まで欠損していた。

2.3. 調査検討結果

2.3.1. 腐食生成物の分析 腐食箇所から採取したサビについて、まずその一部を水に懸濁し、PHを測定した。その結果、3.6~5.1の酸性を呈した。次に、腐食性アニオンの定性分析を行なったところ、多量の塩素イオンが検出され、定量分析の結果、4~8%含有していることが判明した。

これらの結果から、塩素化合物が腐食に関与し、しかもその一部は強酸である塩酸(HCl)として作用していると判断した。

そこで、この塩素化合物を究明するために、X線回折による結晶分析を行なった。その結果、この物質は塩化アンモニウム(NH₄Cl)であることが判明した。

2.3.2. 腐食原因 当事例の場合、腐食生成物から検出された塩化アンモニウムが、腐食の主要因であったと判断した。

塩化アンモニウムは、白色の結晶で、水によく溶解し、水中でアンモニウムイオン(NH₄⁺)と塩素イオン(Cl⁻)とに電離する。この塩素イオンは、鋼材に対して強い腐食作用を示す。さらに、腐食の反応過程で、アンモニアを放出し、塩酸を生成して腐食を一層促進する。

塩化アンモニウムの由来源を調査したところ、当工場のアルミニウム鋳造工程で使用しているフラックスに含有していることが明らかとなった。この塩化アンモニウムがアルミニウム鋳造時の熱によって昇華し(昇華温度337.8℃)、冷えて再結晶しながら屋根裏面に付着したと考えられる。

ところでタイトフレームとの接触部に腐食が集中した原因は次のように推定される。

腐食には水分が不可欠である。当事例では、外気温の変化によって屋根裏面に結露し、その水に塩化アンモニウムが溶け込んで腐食を誘発したと考えられる。タイトフレームと屋根折板との接触部は、すきまが形成されているために、塩化アンモニウムを含む結露水が滞留し易く、また蒸発しにくい。特に折板の谷部は、この結露水が溜り易い。そのため、この部分が最も著しく腐食されたものである。

なお、防食被覆層は、本来、不透水性であり、被覆層

が損傷あるいは劣化しない限り、環境条件が多少悪くても腐食は発生しないはずである。この点では、当屋根材は、被覆層の性能が十分ではなかったと言えよう。

3. 事例 2. 某保養所、耐候性鋼板屋根の腐食

3.1. 屋根材

当建物を設計した某設計事務所の資料によると、屋根材は、厚さ 1.3 mm の耐候性鋼板で、葺上げ後、ウエザーコート処理（リン酸塩化成処理）、プレパレン吹付け（低分子アクリル樹脂）仕上げとなっている。

耐候性鋼は、P（リン）、Cu（銅）、Cr（クロム）などを少量添加した低合金高張力鋼である。大気中で塗装せずに使用した場合、初期の何年間かは普通鋼と同時にサビが発生するが、腐食が進むにつれて、表面に緻密で硬いサビ層（安定サビ層と呼ばれる）が形成され、その後の腐食が進まなくなるといった特性をもっている。

ウエザーコートおよびプレパレン処理は、日本パーカライジング(株)が開発した耐候性鋼の表面処理法で安定サビ層の形成を促進するとともに、初期におけるサビ汁の流出をおさえるという効果がある。耐候性鋼を無塗装で使用する場合にはほとんどの処理が行なわれている。

3.2. 腐食状況

本調査は、竣工後約 5 年経過した時点で実施した。調査のきっかけは、耐候性鋼板のサビがなかなか安定せず、サビ汁の流出が続き、耐候性鋼本来の特性が十分発揮されていないように懸念されたためである。

現地調査の結果、表面状態は、部分的に赤サビの発生が見られ、十分に安定化しているとは言い難い状況であった。

さらに、写真-3 および図-2 に示すようなスリット状の腐食貫通が数箇所で見えられた。この腐食は、屋根鋼板の重なり部に沿って、裏面から発生したものであった。

3.3. 調査検討結果

3.3.1. 材質のチェック 屋根材（耐候性鋼）の一部を切り取って、成分組成を分析した。分析結果を表-1 に示す。同表には、JIS 規格による耐候性鋼の成分組成を併記している。

表-1 の結果によると、当屋根材は、耐候性鋼の SMA 材であると判断できる。

耐候性鋼の JIS 規格には、JIS G3125「高耐候性圧延鋼材」(SPA材)と、JIS G3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」(SMA材)とがある。両材の相違点は、SPA材の方がP（リン）の添加量が多く（高リン）、SMA材はPの添加量が少ない（低リン）、耐候性は、高リンのSPA材の方が優れている。一般に、SMA材の耐候性

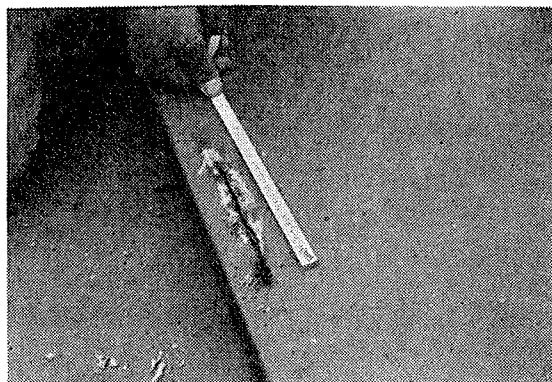


写真-3 耐候性鋼板屋根の腐食

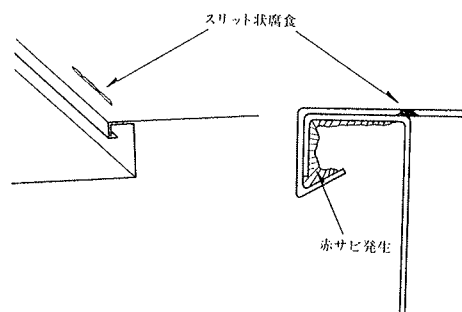


図-2 同上、腐食状況模式図

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
屋根鋼板	0.10	0.28	0.44	0.016	0.015	0.56	0.30
JIS G 3125 (SPA材)	<0.12	0.25 0.75	0.20 0.50	0.070 0.150	<0.040	0.30 1.25	0.25 0.60
JIS G 3114 (SMA41材)	<0.20	<0.35	<1.40	<0.040	<0.040	0.20 0.65	0.20 0.60

表-1 屋根鋼板の組成分析結果

は普通鋼の約 4 倍、SPA 材のそれは約 8 倍程度と言われている。しかし、P 含有率が高くなると、溶接性が悪化するという問題があり、溶接性が重視される橋梁や大規模な構造物においては、耐候性を犠牲にして低リンの SMA 材が使用されている。

3.3.2. 腐食生成物の分析 サビの発生が著しい折り曲げ部裏面から試料を採取し、まず化学分析を行なった。

分析の結果、PH は 7.0~7.3 の中性を示したが、塩素イオン (Cl⁻) の含有率が比較的高く、0.14~0.18% であった。この値は、通常の内陸部の大気中で生成したサビと比べて、およそ 3~5 倍に相当する。このサビに含まれる多量の塩素イオンは、当建物が海に近いため、海塩粒子に由来するものと判断した。

次に、X 線回折による分析を行なった結果、Fe₃O₄ Magnetite)、 γ -Fe OOH (Lepidocrocite)、 α -Fe OOH (Goethite) が検出された。これらは、いずれも大気中で生成した鉄サビの主成分である。しかし、一般に、それぞれの量は、サビの生成する環境条件によって異なり、

次のような傾向がある。(a) 亜硫酸ガスによる大気汚染の著しい工業地帯では Fe_3O_4 が少ない。(b) 大気の清浄な内陸部等では $\alpha-FeOOH$ が多い。(c) 塩化物の影響を受ける海浜地帯では Fe_3O_4 が多く生成する。これらの観点から分析結果を検討したところ、 Fe_3O_4 の回折線が非常に強く、上記Cに相当した。すなわち、化学分析結果と同様、海塩粒子の影響を少なからず受けて生成したサビであると判定された。

以上の他に、蛍光X線分析では、Fe以外に、耐候性鋼の添加元素であるCu, Cr, Mn, Ni, P等が、また、海塩粒子の影響を示唆するClが検出された。

3.3.3. 偏光顕微鏡による安定サビ層の判定 耐候性鋼の表面に形成する緻密な非晶質のサビ層(安定サビ層)の形成機構、組成等はまだまだ十分明らかになっておらず、安定サビ層の形成状態を確実に判定する方法も確立されていない。このような現状で、比較的信頼できる方法として、偏光顕微鏡による判定法がある。この方法では、耐候性鋼のサビ層の断面を偏光顕微鏡で観察した際、クロスニコル下で黒くなる部分(消光層という)が非晶質

の安定サビ層であると判定する¹⁾。

そこで、採取した屋根材の一部について、この方法による判定を試みた。その結果、母材と密着した状態で消光層が確認でき、その上部には、部分的に赤サビの付着が認められた。消光層は、厚いところでは 100μ ほどあるが、まだほとんど生成していない部分もあった。

以上の結果から、屋根表面は、安定サビ層が形成されつつあるものの、全面が安定サビ層で覆われるという状態にはまだ至っていないと判定した。

なお、屋根材の裏面は、消光層が全く見られず、母材の上に直接厚い赤サビ層が生成していた。

参考までに、写真-4, 5にサビ層断面の偏光顕微鏡写真を例示する。また、写真-6は表面の走査電子顕微鏡写真で、プレパレン皮膜のピンホール部分を示している。写真-7は、同じく、赤サビ部で、イガ状に成長したサビの結晶が見られる。

3.3.4. サビ層の安定化を阻害した原因 表面のサビ層がなかなか安定せず、調査の結果でも、安定サビ層形成がまだ不十分であると判定された。この要因としては、

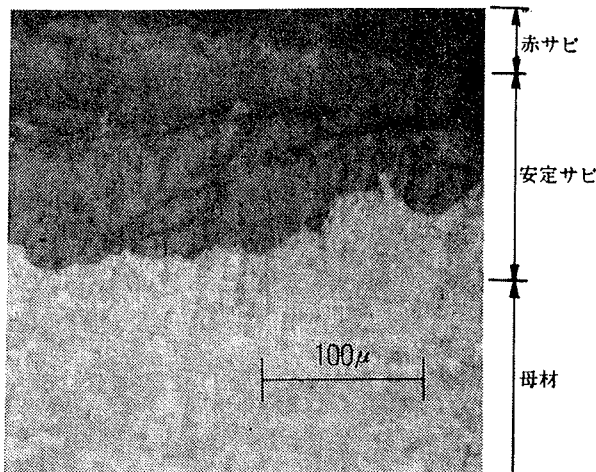


写真-4 サビ層断面の偏光顕微鏡写真(表面部)

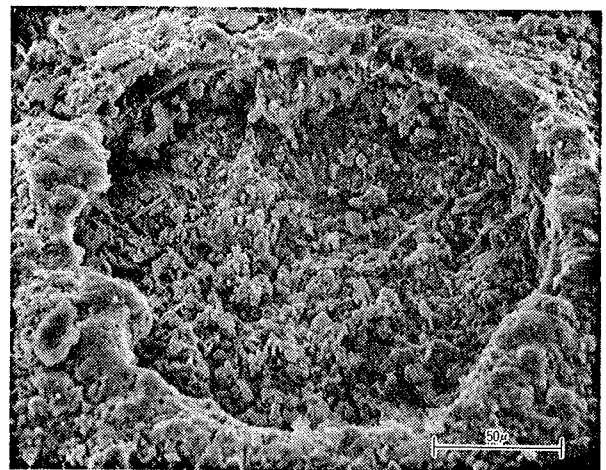


写真-6 走査電子顕微鏡写真(表面部)

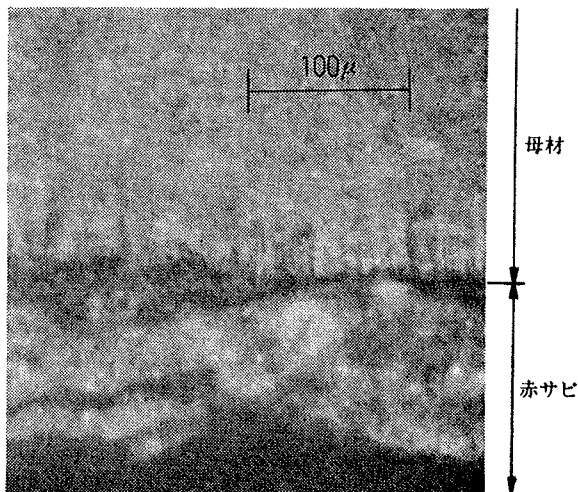


写真-5 同上(裏面部)

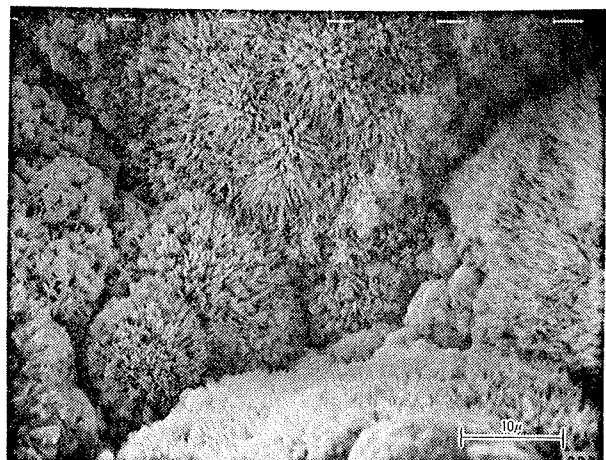


写真-7 同上(赤サビ部)

次に挙げるいくつかが考えられ、それらの悪条件が重なった結果であると判断される。

(1) 耐候性鋼は、本来海塩粒子の影響を受ける海岸地帯では安定サビ層が形成されにくく、そのような場所での無塗装使用は推奨されない。まして、当屋根材は、低リンのSMA材であり、耐候性が十分ではなかった。

(2) ウェザーコートおよびプレパレン処理は、工場の十分な管理下で完全に施し、その上で現場搬入することが望ましい。しかし当屋根材の場合には、最長42mもの長スパンの鋼板を山、谷部で溶接するというデザインのためロール状のみがき鋼板を無処理のまま現場で折り曲げ加工し葺き上げた後に、現場で表面処理を行なっている。したがって、施工環境や処理面積等からみて、工場での完璧さにはおよばなかったものと思われる。

(3) ウェザーコート、プレパレン処理の工程は、現在ではプレパレンのトップコートの前に、プレパレンPSを吹付けることになっている。このプレパレンPSは、海の近くなどの苛酷な環境に対処する目的で開発された。しかし、当建物が施工された当時はまだこの材料が開発されていなかったため、当屋根には使用されていない。

(4) 当屋根の納りは、長スパンの鋼板を、出隅、入隅部で相互に溶接しているため、温度変化に伴う鋼板の伸縮に対する逃げ場所がなく、長手方向は常に拘束された状態にある。したがって、温度変化による伸縮が、屋根鋼板を変形させるように挙動し、プレパレン被膜の剝離を促進した可能性がある。

3.3.5. スリット状腐食の原因 屋根鋼板の一部が、裏面からの腐食によってスリット状に貫通した原因は次のように考えられる。

(1) 耐候性鋼の安定サビ層は、適当に乾湿がくり返され、また降雨によって浮きサビが洗い流されるような環境条件下でないと形成されない。屋根鋼板の裏面は、このような条件が不十分なため、安定サビは生成せず、普通鋼と同様に腐食する状態にあった。

(2) 屋根裏面は、塗装やプレパレン処理などの防食対策が配慮されておらず、腐食が発生し易い状態であった。

(3) 屋根鋼板の下には、断熱および防音用として木毛板が取り付けられていた。しかし、木毛板は、水蒸気の透過性が比較的大きいため、屋根裏面の結露防止効果はほとんど期待できない。したがって、このような納りの場合には、透湿を防ぐような結露防止策が必要である。

(4) 上記(2)、(3)のような状態のもとで、スリット状腐食の発生した鋼板の重なり部は、他の部位に比べて熱容量

が大きく、外部の温度変化に対する時間的な遅れが大きくなるので、結露が最も発生し易くまた乾燥しにくい。さらに、表側の折り返し部分から、海塩粒子を含んだ水が、毛管現象によって重なり部のすきまへ侵入した可能性が大きい。

(5) 腐食の発生した鋼板の重なり部は、微細なすきまが形成されている。このようなすきま部は、結露等によって水分が供給される場合、水分が滞留し易いと同時に、溶存酸素の濃淡による局部電池が形成され易く、その電位差が駆動力となって急激な局部腐食が発生する。

4. 防食上の留意点

一般に屋根材は、気象条件の変化を直接受け、さらに大気汚染の影響もあって、腐食反応の加速や防食被覆層の劣化を受け易く、苛酷な腐食環境条件にさらされている。

ここに報告した調査例では、特殊条件として塩化アンモニウムや海塩粒子の腐食促進作用が大きく影響していたと考えられるが、この事例を踏まえて、防食上のいくつかの留意点を以下に列記する。

(1) 事例1、2とも共通して、屋根裏面のすきま部分で腐食が集中的に発生し、早期の被害を招いている。

前にも触れたように、金属面のすきま形成部は非常に腐食が発生し易い。したがって、屋根材に限らず、水の供給がある部位では、できるだけすきまを作らない構造とし、すきま部は、コーキング材等で目詰めをする。

(2) 屋根裏面は、外気温の変化によって結露し易いので、断熱構造、透湿防止、適正換気等による結露防止の配慮が大切である。

(3) 屋根材は、大気に暴露される外面の防食に重点が置かれ、裏面の防食は軽視されがちである。材料によっては、表面は重防食塗装、裏面はサービスタップのみという製品もあるが、条件に応じて裏面の防食も十分考慮する必要がある。

(4) 耐候性鋼は、その腐食特性を十分配慮した上で用いないとトラブルの原因となり易い。裸（無塗装）を使用する場合には、安定サビ層の形成条件、表面処理法、サビ汁による周囲の汚染防止等について、事前に十分な検討を必要とする。

参考文献

- 1) 久板敬弘：さび層をもつ鋼の大気腐食、防蝕技術、Vol. 20, No. 5, (1971), pp. 1～6