

70542 さび層のある鋼の腐食反応について*

岡田 秀弥**・細井 祐三**・内藤 浩光***

The Role of Rust Layers on the Corrosion Process of Steels
in the Atmosphere

Hideya OKADA, Yuzo HOSOI, and Hiromitsu NAITO

Synopsis:

An electrochemical investigation has been made of the corrosion process of the steels rusted in the atmosphere, in order to reveal the role of the rust in the atmospheric corrosion.

The cathodic reaction of the rusted steel is found to be mainly consisted of the reduction of FeOOH (brown rust) to Fe_3O_4 rather than the reduction of dissolved oxygen, and the anodic reaction is the dissolution of iron.

In the case of low alloy steels alloyed suitably for atmospheric corrosion resistance, both anodic and cathodic reactions are remarkably suppressed by the formation of protective rust layer after exposure to the atmosphere for more than about 3.5 years. Anodic reaction is prevented due to masking of active sites on the steel surface by the formation of dense amorphous iron oxide layer and cathodic reaction is suppressed by increasing difficulty in the reduction of FeOOH .

(Received July 31, 1969)

1. 緒 言

前報¹⁾において、大気中で鋼上に形成されるさび層の構造について検討し、耐候性鋼のさび層の特徴は下層に存在する非晶質スピネル型酸化物層にあり、それは3次元網目構造を有する oxide polymer であると推定した。

大気中における鋼の腐食の初期段階では、酸素復極過程が全腐食反応を支配していることはよく知られている事実である²⁾が、鋼表面にさび層が形成されると鋼の腐食反応も異なってくるのが当然予想される。従来さび層のある鋼の腐食挙動、すなわちさび層が後続の鋼の腐食反応にどのように影響を及ぼすかという点に関してはほとんど明らかにされておらず、わずかにさび下層に生成する Ni, Cu などの難溶性の塩基性硫酸塩によつて鋼の腐食が抑制されると考えた COPSON³⁾の研究があるが、確かな証拠に欠けている。

本報告では、後続の鋼の腐食反応に対するさび層の影響を明らかにするために、普通鋼および耐候性鋼の大気暴露材について検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

実験に用いた試料は普通鋼, Cu-P 系および Cu-P-Ni-Cr 系耐候性鋼の工業地帯と準田園地帯における大気暴露材である。Table I に試料の化学組成, 暴露試験

期間を示す。暴露試験前の鋼表面状態は5年暴露材がミルスケール付, 他は酸洗材であるが, 長期間の暴露後ではさび層形成に表面状態のちがいはほとんど影響しない。

2.2 実験方法

実験はおもに電気化学的手法を用いて、さび層のある鋼の浸漬電位, 陰陽両分極特性, さび層の還元特性などを測定した。浸漬時におけるさび層の変化と鋼素地の腐食状態についてはライヘルト製倒立型顕微鏡を用いて直交ニコル下および普通光下で断面顕微鏡観察を行ない、またさびの解析は反射X線回折法で検討した。電気化学的測定には日亜計器製ポテンシオスタットおよび直流高電圧電源と高抵抗からなる定電流電解装置を使用した。電解用試料の作製法, 前処理と電解槽は前報¹⁾のとおりである。

定電位電解法では電位掃引速度 50 mV/min, 定電流電解法では一定電流保持時間 5 min を最適条件として、前者によつて広範囲の電位域にわたる測定を、後者によつて分極曲線の立ち上り部の測定を行なつた。

測定環境はおもに静止状態の 3% NaCl 中としたが長時間を要する実験では空気あるいは窒素を吹き込みながら行ない、また塩素イオンの影響を考慮する必要のある

* 昭和43年9月本会講演大会にて発表
昭和44年7月31日受付

** 八幡製鉄(株)東京研究所 工博

*** 八幡製鉄(株)東京研究所

Table 1. Chemical compositions of steels used (wt %).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Periods of exposure to the atmosphere
Carbon steel	0.07	0.01	0.35	0.007	0.022	0.03	0.02	0.02	<0.005	1, 2, 3.5, 5 y
Low alloy steel	0.09	0.20	0.50	0.099	0.021	0.35	0.05	0.12	0.05	1, 2, 3.5, 5 y
	0.13	0.46	0.37	0.093	0.027	0.32	0.21	0.58	0.01	5 y

場合には 0.25 M Na_2SO_4 中においても測定を行なった。これらの溶液の調製には市販特級試薬と脱イオン水を用いた。

3. 実験結果

3.1 さび層のある鋼の分極特性

3.1.1 定常陰陽分極特性

普通鋼および耐候性鋼の 1, 3.5, 5 年暴露材の陰陽分極特性を窒素飽和 3% NaCl 中で測定した (Fig. 1~3)。

陽分極曲線はいずれの場合も 0~800 mV (vs SCE) においてあたかも限界電流のごとき様子をを示し、電位によって電流はほとんど変化しない。

普通鋼と耐候性鋼の差異は 3.5 年暴露材から明りように現われはじめ、5 年暴露材においてはより明りようになる。すなわち Fig. 2, 3 にみられるごとく陰陽極反応いずれも耐候性鋼のほうが顕著に分極している。

陽分極特性に及ぼす陰イオンの影響を検討したのが Fig. 4 である。3% NaCl と 0.25 M Na_2SO_4 溶液中ではほとんど差異を認めなかつた。

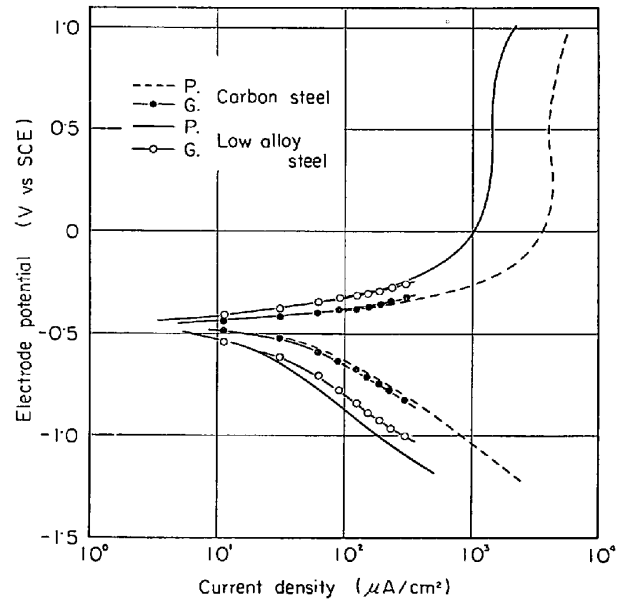


Fig. 2. Polarization curves of steels exposed to the atmosphere for 3.5 years in N_2 -saturated 3% NaCl solution.

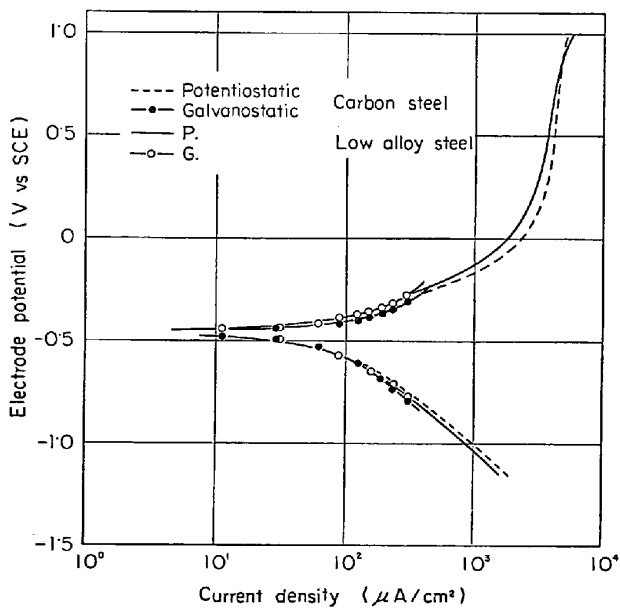


Fig. 1. Polarization curves of steels exposed to the atmosphere for 1 year in N_2 -saturated 3% NaCl solution.

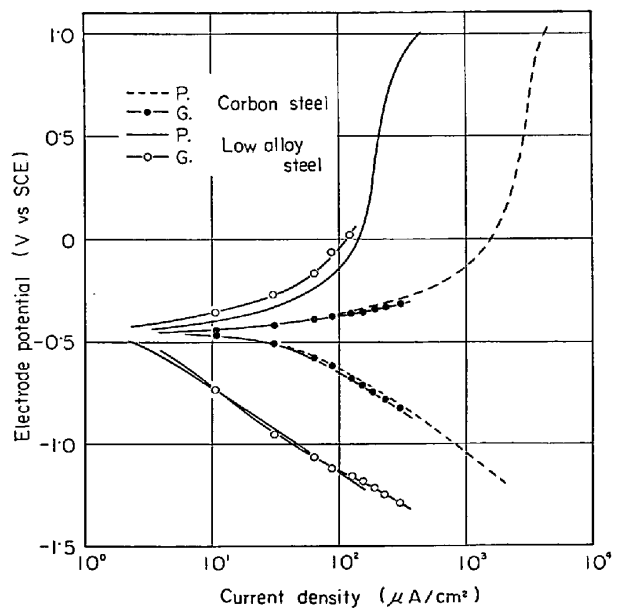


Fig. 3. Polarization curves of steels exposed to the atmosphere for 5 years in N_2 -saturated 3% NaCl solution.

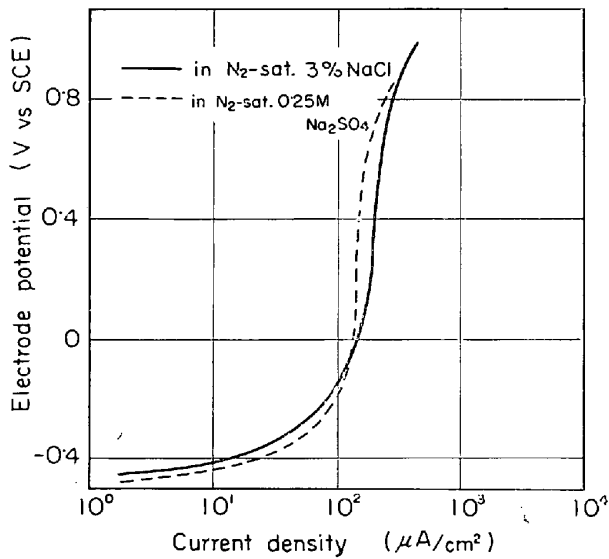


Fig. 4. Anion effect on anodic polarization curve of low alloy steel exposed to the atmosphere for 5 years.

3.1.2 陰分極特性および浸漬電位に及ぼす溶存酸素の影響

普通鋼と耐候性鋼の5年暴露材の陰分極特性に及ぼす溶存酸素の影響を検討した (Fig. 5)。普通鋼の場合に多少電流が増大する傾向にあるが、耐候性鋼においては溶存酸素の影響はほとんどないと考えてよいであろう。この事実はさび層のついた鋼の主陰極反応は溶存酸素の還

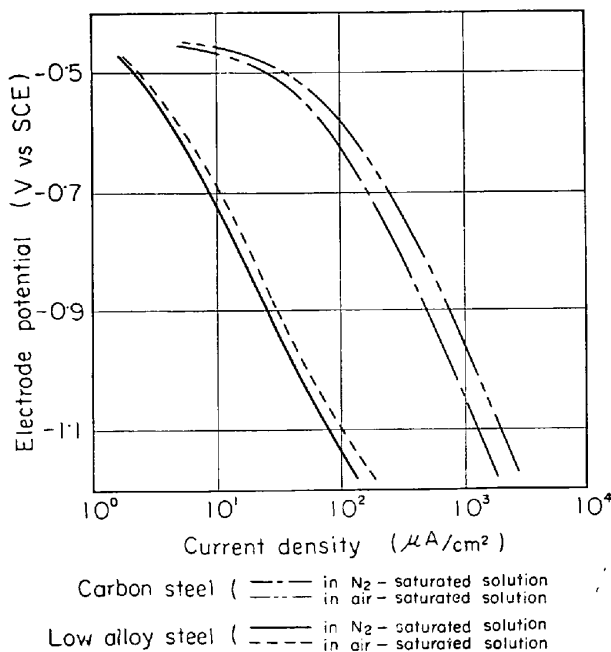


Fig. 5. Effect of dissolved oxygen on cathodic polarization curve of steels exposed to the atmosphere for 5 years in 3% NaCl solution.

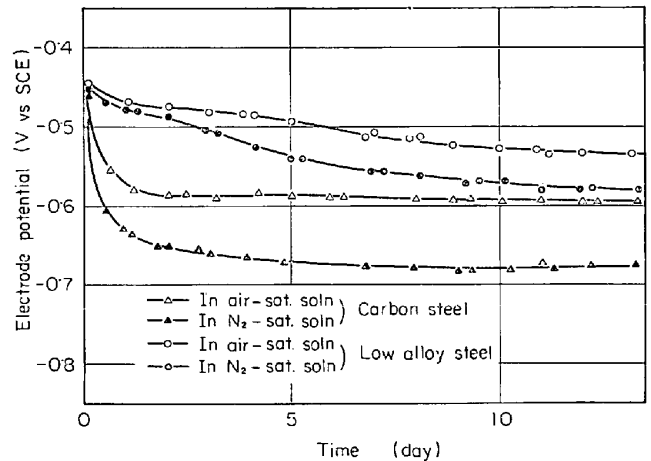


Fig. 6. Change of corrosion potential with time during immersion of steels exposed to the atmosphere for 5 years in 3% NaCl solution.

元反応でなく、異なつた反応すなわちさび層の還元反応が主であることを暗示している。

Fig. 6 に5年暴露材の浸漬電位の時間変化 (14日後まで) の溶存酸素がある場合とない場合について示した。

いずれの場合も浸漬時間とともに電位は卑方向へ移行するが、耐候性鋼では移行がゆつくりである。また溶存酸素の影響は両鋼種でそれぞれ認められるが、普通鋼のほうが浸漬後比較的早い時間に認められる。またいずれの場合も電位は溶存酸素を含む場合がより貴である。

これらの電位変化の詳細については考察の項で論ずるが、FeOOH 上では酸素の還元反応は起こらないで、FeOOH の還元生成物である Fe₃O₄ 上で生じるためと、浸漬時間とともに電解質の浸透に伴つて陽極部が増大するためであると考えられる。

3.1.3 陰極反応の時間変化

上述の結果よりさび層のある鋼の主陰極反応は溶存酸素が存在しても、酸素の還元反応よりむしろさび層自体の還元反応が主であることが推定されたので、その還元反応が浸漬時間とともにどのように変化していくか、その変化の様子が鋼種、暴露期間にどのように影響されるかを追跡する必要がある。

Fig. 7 はその点を予備的に検討した結果であるが、普通鋼と耐候性鋼の5年暴露材を3% NaCl 中に浸漬した場合の浸漬直後および浸漬 2 hr 後の陰分極曲線の変化の様子である。図から明らかなように、耐候性鋼では浸漬直後は著しく分極しているが、時間とともに電流が多少増大するのに対し、普通鋼ではそれとは逆に電流は減少する傾向がある。これらのことからさび層のついた鋼の主陰極反応であるさび層の還元反応が浸漬時間によつ

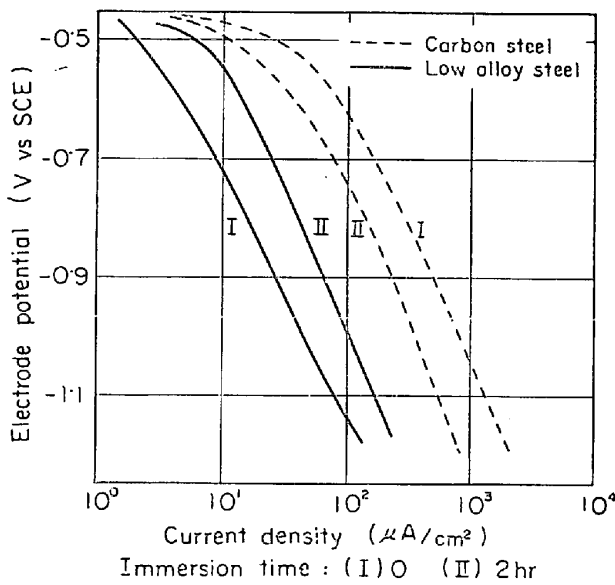


Fig. 7. Effect of immersion time on cathodic polarization curve of steels exposed to the atmosphere for 5 years in N_2 -saturated 3% NaCl solution.

て変化することが明らかになったので、さらにこの点について定電位法を用いて詳細に検討したのが Fig. 8, 9 である。

FeOOH 層 (赤さび層) のみが還元されると考えられる -800 mV (vs SCE) に電位を設定し、普通鋼と耐候性鋼の暴露期間の異なる試料について陰極還元電流時間曲線を測定した。

普通鋼の場合は、Fig. 8a に示すごとく 2, 5 年暴露材においてほとんど変化なく、いずれの場合も電流は電解初期にピークを形成した後急激に減少して約 $75\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ でほぼ一定となり、それ以後は徐々に下降していく。14 hr 後においても約 $50\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の値を示す。

耐候性鋼の結果は Fig. 8b に示したが、1 年暴露材は普通鋼の場合とほとんど同じ傾向にあるが、暴露期間が長くなるにつれて陰極還元曲線の形態は異なってくる。すなわち暴露時間の長い試料ほど電解初期の電流のピークは長時間側にづれ、しかもピーク電流値は低くなっている。そして 5 年露材においては電解初期の電流は著しく低いが、時間とともに上昇して 5 hr 後に他の暴露材の場合とほぼ同じ値を示す。

Fig. 8 の測定値に及ぼす溶存酸素の影響を検討したのが Fig. 9 である。普通鋼、耐候性鋼いずれにおいても電解初期には酸素の影響を受けないが、電解時間の経過とともに徐々に酸素還元反応による電流分だけ多く流れるようになる。

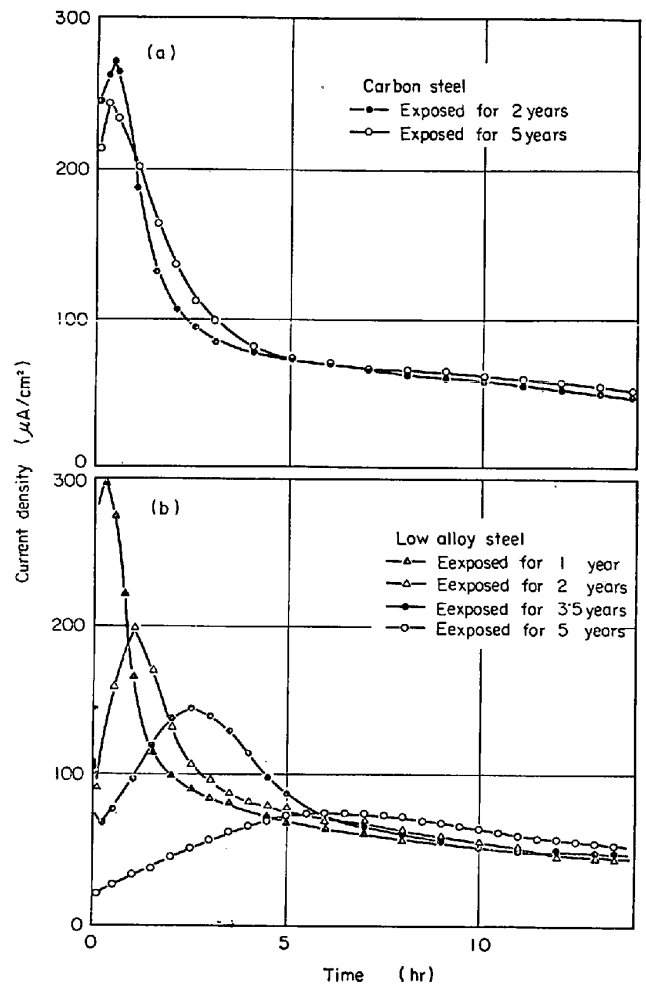


Fig. 8. Change of current with time during potentiostatic cathodic reduction of FeOOH on steels at -800 mV (vs SCE) in N_2 -saturated 3% NaCl solution.

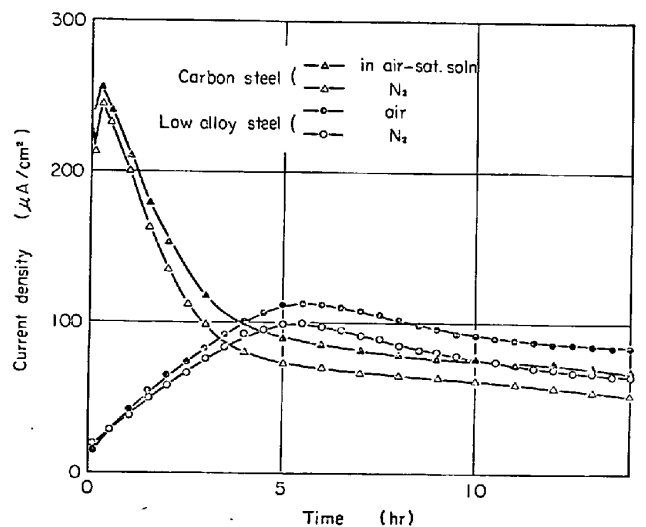


Fig. 9. Effect of dissolved oxygen on potentiostatic cathodic reduction of steels exposed to the atmosphere for 5 years at -800 mV (vs SCE) in 3% NaCl solution.

3.2 さび層のある鋼の腐食反応に対する顕微鏡およびX線の検討

普通鋼と耐候性鋼の5年暴露材を3% NaCl中に浸漬したときのさび層の変化を顕微鏡とX線回折法によつて検討した。

浸漬前の5年暴露材のさび層断面偏光写真を Photo. 1 に示す。前報りに報告したように、偏光下で観察すると耐候性鋼では偏光層 (FeOOH 層) の下に地鉄を一様に覆うち密な低原子価の酸化物層が生成しているのに反し、普通鋼では地鉄との界面に直接偏光層が存在する写真のような個所が数多くみられる。両者のさび層の差異は下層の低原子価層 (消光層) のち密さにある。これら

の試料を3% NaCl中に浸漬すると、偏光層が消光層へと変化する。耐候性鋼では空気飽和、窒素飽和溶液中いずれにおいても腐食速度が非常に遅いので、100 hr 浸漬ではほとんど偏光層の変化はみられなかったが、14日間の浸漬ではかなり変化していた。この現象は普通鋼の場合にはより明りようであり、Photo. 2 にみられるように窒素飽和溶液中 100 hr 浸漬で上層の偏光層はほとんど還元されて認められず、さらに14日間の浸漬ではさび層全体が消光層となつている。この変化は空気飽和溶液中ではよりゆるやかに進行する。

以上の事実は3.1.2で暗示したさび層のある鋼の腐食反応の主陰極反応は溶存酸素の還元反応ではなく FeO-

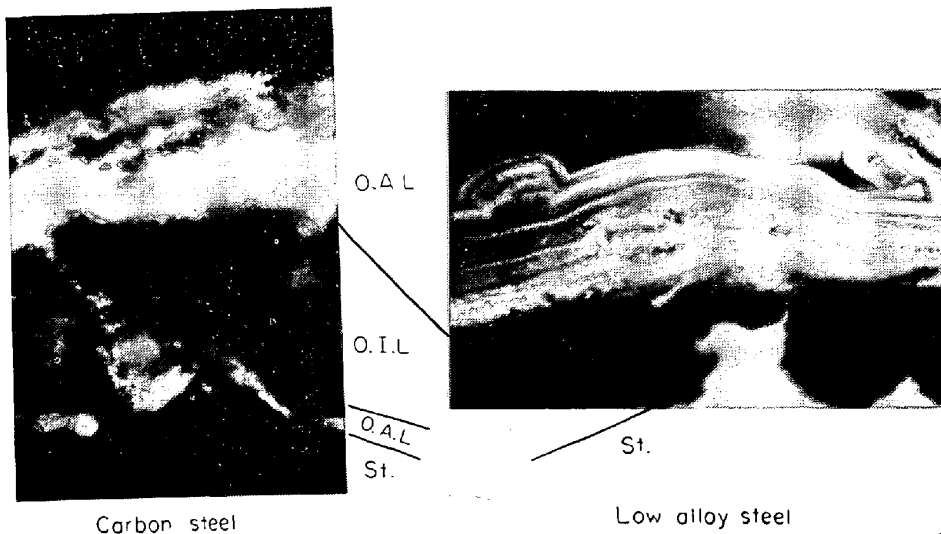


Photo. 1. Microscopic observations of polished cross-section of the rusts on steels exposed to the atmosphere for 5 years with reflected polarized light and crossed nicols. O.A.L.: Optically active layer, O.I.L.: Optically isotropic layer, St.: Steel. $\times 450$ (2/3)

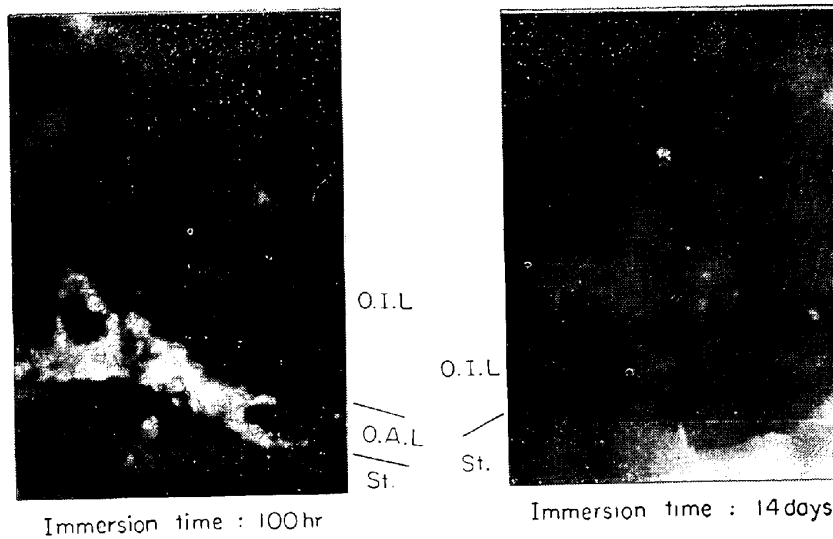


Photo. 2. Change of the rusts during immersion of carbon steel (exposed to the atmosphere for 5 years) in 3% NaCl solution. $\times 450$ (5/7)



Photo. 3. Corrosion profile of low alloy steel (exposed to the atmosphere for 5 years) in 3% NaCl solution. $\times 80$ (4/5)

OH 層の還元反応であるという推定と、還元生成物である Fe_3O_4 上では酸素の還元反応が進行するという推定を (空気飽和溶液中の場合には、窒素飽和溶液中におけるよりさび層の還元反応はゆるやかに進むという事実から) 裏付けている。

耐候性鋼では上述したように 14 日間の浸漬により腐食反応の進行がさび層断面観察で確認できるようになるが、この場合には Photo. 3 のような個所が認められ、普通鋼とは異なつて孔食的に腐食反応が進行している。

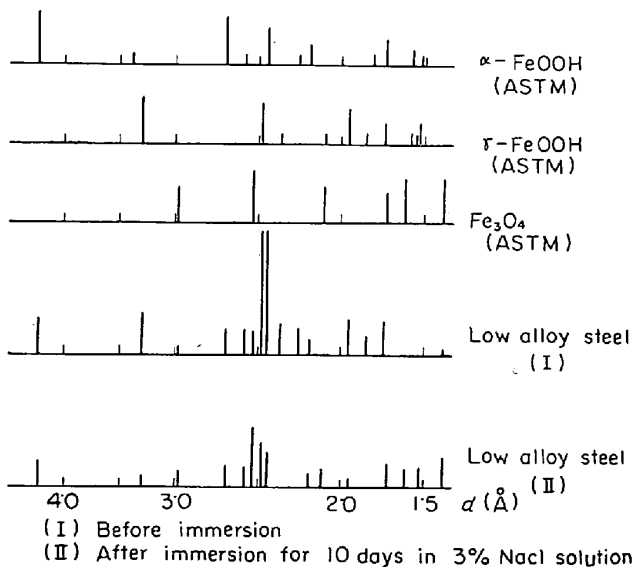


Fig. 10. Change of reflected X-ray diffraction profiles during immersion of low alloy steel (exposed to the atmosphere for 5 years) in 3% NaCl solution.

Photo. 3 は普通光下の場合を掲載しているが、偏光下でこれを観察すると食孔の上部の偏光層は消光層へと変化しているが、食孔内に新たに生成したさび層は偏光層である。

普通鋼ではさび層下で新たに生成したさびはさび層外へ流出するため、さび層断面写真に観察されていないが、耐候性鋼の 5 年暴露材のさび層はクラックなどによる孔がほとんどないため新たに生じたさびがさび層外へ逸散することがないと考えられる。

反射 X 線回折法によつて浸漬前後のさび構造変化を検討した結果が Fig. 10 である。

これによると、浸漬後著しく、変化しているのは γ - FeOOH の減少と Fe_3O_4 の生成である。 α - FeOOH は赤さび層の内層に存在するのが一般であるので、これらの結果は上述してきたように、さび層のある鋼の主陰極反応は FeOOH の Fe_3O_4 への還元反応であるということとさらに裏付けていると考えられる。

4. 考 察

4.1 大気暴露材の腐食反応

従来中性環境中の鋼の腐食反応は、陰極反応は溶存酸素の還元反応、陽極反応は鉄の溶解反応と考えられていたが、本報告ではさび層が十分付着している暴露材 (1~5 暴露) について検討した結果、陰極反応について次の結果を得ている。

1) 3.1.2 の結果により暴露材の陰分極特性は溶存酸素によつてほとんど影響されない (Fig. 5)。また Fig. 9 の結果でも溶存酸素は陰極反応にほとんど影響を及ぼさない。

2) Photo. 2 の結果により、暴露材を浸漬して腐食を進行させると、偏光層 (FeOOH) は消光層へと変化する。

3) Fig. 10 の結果より、浸漬後のさび層は FeOOH が減少し、 Fe_3O_4 が増加している。

以上の 3 つの結果より、暴露材の主陰極反応は次式のごとく進行すると考えられる。



陽極反応は鉄の溶出反応と考えてよいが、Fig. 1~3 にみられるごとく、あたかも限界電流のような様相を呈している特徴がある。この理由は明確ではないが、次のように推定される。溶出した鉄イオンまたは溶出に必要な陰イオン (OH^- , Cl^- など) がさび層を通過する過程が律速段階であるため限界電流のごとくなるのであると考えられる。したがつてさび層がよりち密になるにつれてイオンの通過過程が抑制されて、限界電流が抑

制された形になる。

陽極反応における他の1つの問題点は鋼の不動態化に関する点である。Fig. 1~3はNaCl溶液中における結果であるが、Fig. 4に示したごとくNa₂SO₄溶液中でも同様な結果を得ている。鋼を裸のままNa₂SO₄溶液中で陽分極すると、容易に不動態化して電流は急激に減少するが、本実験のようにさび層が厚くついた場合は全く不動態化せず電流の減少は認められなかつた。この種の事実については従来報告している人もいるが、著者らが検討した結果では比較的さび層が薄くかつ粗な場合には不動態化に類似の現象すなわち不動態化電位域における電流の減少が認められるが、厚いさび層がついた場合には不動態化し難い特徴がある。

この原因については不明確な点が多いが、上述した陽分極特性が限界電流のごとく振舞うことに関連があるように思う。すなわちさび層下の孔の中で鉄が溶出する場合、OH⁻が著しく不足するために限界電流を示すようになる。したがって著しくOH⁻が不足した状態では裸の鋼にみられるような不動態化現象は生じ難いと考えられる。

以上の考察によつて大気暴露材の陰陽極反応の実体についておおよそ理解されたと思うが、さらにFig. 6およびFig. 9の結果について考察する必要がある。暴露材の浸漬初期にはFig. 6にみられるごとく、溶存酸素の有無および鋼種によつてその浸漬電位は影響されないが、浸漬時間とともに差が出てくることである。

この点については暴露材の浸漬初期の電位は、陰極反応はFeOOHのFe₃O₄への還元、陽極反応は鉄の溶出の両反応によつて形成される混成電位で規定されるが、FeOOHがFe₃O₄へ還元されるにつれて、Fe₃O₄上で酸素の還元反応が生じるために、浸漬電位は溶存酸素によつて影響されて酸素のない場合より貴になるものと考えられる。Fe₃O₄上で酸素が還元されることはFig. 9に示されており、さび層の還元が進むにつれて溶存酸素の還元による電流だけ増大している。

以上のことからFig. 6の電位変化は次のように考えられる。

電位が卑方向に移行するのは、浸漬すると溶液の浸透により徐々に陽極部の面積が増大するためであり、耐候性鋼の場合はさび層がち密であるためゆつくり移行するが、普通鋼ではかなり急激に低下しており、明らかにさび層がち密でないことを示している。溶存酸素が存在する場合、浸漬時間とともに酸素の影響が顕著になるが、これは腐食が進み表面のFeOOHがFe₃O₄へ還元されて、そのFe₃O₄上で酸素の還元反応が進行するため

ある。したがって浸漬電位は時間とともに、さびの還元反応と鉄の溶出反応によつて規定される混成電位から徐々に酸素の還元反応と鉄の溶出反応によつてきまる混成電位へと変化していく。

4.2 耐候性鋼の特徴

耐候性鋼長期暴露材のさび層の特徴については、すでに前報りで論じたように、さびの下層に存在する低原子価層が著しくち密であり、そのち密さは非晶質スピネル型酸化物に依存していることを認めたが、本報告でさび層のある鋼の腐食反応を検討した結果、耐候性鋼の特徴として得られたものは次のごとくである。

1) Fig. 2~3にみられるように、3.5年以上暴露した試料では陰陽極反応いずれもかなり分極するようになる。

2) Fig. 8, 9の結果によると(4.1で論じたように陰極還元電流は主に赤さび層の還元によるので)長期暴露した場合に赤さび層の表面層において差がみられる。赤さび層の内層は両鋼種、暴露期間によつてほとんど差がないのに対し、表面層は耐候性鋼の場合は暴露期間が長くなるにつれて還元電流が著しく低くなっている。

以上の点から次のことが考察される。耐候性鋼と普通鋼の暴露材の赤さび層をX線回折によつて検討すると、両者いずれも α -および γ -FeOOHを示し差がみられない。しかるにFig. 8b示したごとく耐候性鋼の5年暴露材において著しく初期還元電流が低くなっているのは表面層がち密になつており、真の表面積が減少しているためと考えられる。

Fig. 8, 9の測定は赤さび層のみ還元される-800mV(vs SCE)における結果であるので鋼種、暴露期間に関係なく、赤さび層中の内層はほとんど同じ程度のち密さを有しているのに反し、表面層では鋼種、暴露期間の影響があらわれていると考えることができる。

前報りに報告したように、赤さび層中には鋼中添加元素がほとんど含有されていないこと、および大気暴露中においてさび層は剝離、脱落、生成という過程によつて形成される事実から、耐候性鋼における赤さび表面層の特徴は次のことに起因していると考えられる。

1~2年間に生成している表面の赤さび層は、さび層中の孔から新しく生成したさびによつて表面を覆われているが、さらに暴露期間が長くなると、さび層中の孔の減少から鋼の腐食速度も減じ、新しい赤さびは徐々に生成しがたくなつてくる。したがって表面層を形成している赤さび層は新しくできた赤さび層ではなく、かなり長時間表面に残存したままのものである。新しい赤さび層は粗であるのに反し、長く残存しているものはその間新

Table 2. Corrosion rate of steels exposed to the atmosphere.

Periods of exposure (years)	Carbon steel		Low alloy steel	
	Corrosion current ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate ($\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{hr}$)	Corrosion current ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate ($\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{hr}$)
0	—	—	0.5	0.0005
1	51	0.053	47	0.049
2	43	0.045	32	0.033
3.5	32	0.033	13	0.014
5	27	0.028	2	0.002

しいさびによつて絶えず空隙を埋められ、かつ密着の悪い部分は暴露中に流出、脱落し去つているので、ち密になつていふと考えられる。耐候性鋼の場合はほぼ2年暴露後より下層にも密層が生成しはじめ、腐食速度が次第に減少していくので、その事実と上述の推定とはよく符号していると考えられる。

増子、久松²⁾は耐候性鋼と普通鋼のさび層の表面積を BET 法で測定し、ほとんど差がないと論じており、本報告と矛盾する結果を述べているが、その差異は測定法の差に帰因しているものと思う。本報告は酸化物還元の際の電子授受反応から真の表面積ひいては酸化物のち密さを論じたのに反し、BET 法はガス吸着から真の表面積を求めている。電子授受の面積とガス吸着の面積との差異が両測定法の結果の矛盾する点であると考えられる。

これまで論じた点から耐候性鋼長期暴露材の陰極反応が抑制されている点について理解されたと思うが、陽極反応の抑制については前報¹⁾から直接推定されるように、さび下層のち密によつて陽極活性点がつぶされいふと考えられる。

以上の陰陽極反応の抑制についての2つの論拠、このいずれもその原因はさび下層に存在する低原子価のち密層にあり、それが耐候性鋼の特徴を支配するすべてであると推定される。

4.3 分極特性からの腐食度の概算

Fig. 1~3 のさび層のある鋼の陰陽分極特性から浸漬状態における鋼の腐食度を算出すると Table 2 のようになる。

分極特性は図にみるごとくさび層による抵抗分極などの原因で Tafel 式、($\eta = a + b \ln i$, η : 過電圧, i : 電流密度, a, b : 定数) の直線関係から相当ずれているので正確を期し難いが、鋼の耐食性を知る1つの目安として概算したものである。Table 2 に示した鋼の腐食速度は試料を浸漬した直後に測定した分極曲線から得られた計算値であるが、Fig. 8, 9 から知ることができるよう陰極反応である FeCOH の還元反応は浸漬時間によつ

て変わるので、この計算値は平均腐食速度と異なるはずである。また大気腐食試験結果*よりかなり大きな値を示しているのは、腐食環境が異なつていふことと、大気中においては腐食がほとんど進行しない乾燥期間があることに起因していると考えられる。しかし Table 2 の結果は鋼種によつてさび層の防食効果に差があることをはつきり示しており、耐候性鋼上のさび層の特徴を知ることができる。

5. 結 論

さび層のある鋼の腐食反応を普通鋼および耐候性鋼の大気暴露材について検討し、次の結論を得た。

(1) さび層がある鋼の腐食反応は、陰極反応が酸素の還元反応より主に FeOOH (赤さび層) の Fe_3O_4 への還元反応であり、陽極反応が鉄の溶出反応である。酸素の還元反応は FeOOH 上で起こりがたく、 FeOOH の還元生成物である Fe_3O_4 上でおこる。

(2) 普通鋼と耐候性鋼の分極特性の差異は、普通鋼の場合、陰陽両分極特性とも暴露期間によつて大きな変化は認められないのに反し、耐候性鋼においては暴露期間が長くなると陰陽両極反応は著しく分極される。

この耐候性鋼の特徴は長期暴露によつてさび下層に形成される非晶質さび層が鋼表面の陽極活性点をつぶすとともに、 FeOOH 層が還元され難くなるためである。このように耐候性鋼のさび層は陰陽極反応を抑制して後続の鋼の腐食度を減じている。

文 献

- 1) 岡田, 細井, 湯川, 内藤: 鉄と鋼, 55 (1969) 5 p. 355
- 2) たとえば G. V. AKIMOV: Corrosion, 14 (1958) p. 463
- 3) H. R. COPSON: Proc. ASTM, 45 (1945) p. 554
- 4) 松島, 上野: 鉄と鋼, 53 (1967) p. 402
- 5) 増子, 久松: 防蝕技術, 17 (1968) 12 p. 17

* 暴露試験結果によると、普通鋼および耐候性鋼の平均腐食速度はそれぞれ1年暴露材で 0.005 ($\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{hr}$), 0.004 , 5年暴露材で 0.004 , 0.001 である。