

自動車用熱延鋼板の耐孔あき腐食性に 及ぼす合金元素の影響

© 1990 ISIJ
 技術報告
 //

中山 武典*・三尾谷一夫*²・白沢 秀則*³
 泊里 治夫*⁴・佐藤 廣士*

Effect of Alloying Elements on Perforation Corrosion Resistance of Hot Rolled Steel for Automotive Bodies

Takenori NAKAYAMA, Kazuo MIONOYA, Hidenori SHIRASAWA,
 Haruo TOMARI and Hiroshi SATOH

Synopsis :

The effect of alloying elements on perforation corrosion of mild steel was studied by cyclic corrosion tests and an outdoor exposure test. Ultra low C-P-Cu hot rolled steel has been alloy-designed for the perforation corrosion resistance application for the automotive bodies.

The newly designed TS 45 kgf/mm² steel, produced in the mill, shows the excellent mechanical properties and an equivalent paintability to a low C mild steel. In addition, the perforation life time of the developed steel is about twice longer than that of the mild steel, according to a cyclic corrosion test conducted on automotive underbody parts.

Its excellent resistance to perforation corrosion was considered to be achieved by the formation of a protective rust layer of amorphous species, judging from the results of rust analysis by EMPA, FT-IR and laser Raman spectrometer.

Key words : automotive corrosion ; perforation corrosion ; ultra low carbon steel ; corrosion resistant steel ; cyclic corrosion test ; rust analysis ; corrosion resistant mechanism.

1. 緒 言

北米、北欧などにおいては、冬期の道路の積雪結水による交通災害の防止を目的として岩塩など凍結防止剤が多量に散布されるため、自動車車体の腐食が問題となっている¹⁾。腐食の形態としては種々分類されているが、車体内面のドア袋構造部などで発生しやすい孔あき腐食が最も重要な腐食形態の一つとされている。このため、自動車メーカーでは、車体構造、塗装、鋼板など多方面から種々の腐食対策を進めている。この中で、鋼板については、従来の熱延及び冷延鋼板に代えて合金化溶融亜鉛めっき鋼板や亜鉛系合金電気めっき鋼板など各種表面处理防錆鋼板が使用され始めている^{2)~4)}。

しかしながら、合わせ目構造部や溶接部位などでは塗

装不良などの問題があり、こうした部位の孔あき腐食寿命を抜本的に高めるためには鋼板自体の耐食性の改善も必要と考えられる。また、鋼板自体の耐食性を高めることによってめっき鋼板としての更なる耐食性向上も期待できるであろう。従来、鋼の大気中、海水中における腐食速度の低減にはP, Cu, Crなどの元素添加が効果的とされているが、自動車用鋼板の腐食試験法として提案・実施されている複合腐食試験条件下における熱延鋼板の孔あき腐食性に及ぼすこれら合金元素の影響を検討した報告例は少ない。

そこで、本研究では、鋼板自体の孔あき腐食に及ぼす合金元素の影響を調査して、耐孔あき腐食性に優れた自動車用鋼板の適正成分系を検討した。次に、実ラインで製造した熱延鋼板を用いて自動車足回り部品を試作して

昭和 63年 11 月本会講演大会にて発表 平成元年 8 月 31 日受付 (Received Aug. 31, 1989)

* (株)神戸製鋼所材料研究所 工博 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

*2 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (現:(株)神戸製鋼所薄板技術部) (Kakogawa Works, Now Steel Sheet Technology Department, Kobe Steel, Ltd.)

*3 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 工博 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

*4 (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

複合腐食試験による耐食性能等の評価を行うとともに、生成錯分析による耐食機構の若干の考察を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試材

Table 1 に供試材の化学組成を示す。No. 1~No. 5 は低炭素鋼 (0.05% C), No. 6~No. 11 は極低炭素鋼 (0.003% C) をベースにおのおの 1% Mn, 0.07% P, 1% Cr, 0.3% Cu 及び 0.07% P-0.3% Cu を単独あるいは複合添加したものである。ここで、P, Cr, Cu の各添加量は耐候性鋼, 耐海水鋼の適正レベルを参考として限定した。これらの鋼は実験室で真空溶製し、皮削り→鍛造→熱間圧延 (板厚: 2 mm)→コイル巻取り相当熱処理 (550°C×60 min, 炉冷) の工程後、表面研削を行って厚さ 1.5 mm の薄鋼板とした。No. 12 及び No. 13 は、おのおの通常の熱延軟鋼板及び本研究で開発した耐孔あき腐食性熱延鋼板 (工場試作材) であり、後述するように、これら材料は自動車足回り部品の試作に使用したものである。なお、一部の腐食試験には No. 1 を原板とする合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (目付量 45 g/m²) も比較

Table 1. Chemical composition of steels tested (wt%).

No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Note
1	0.048	0.02	0.21	0.008	0.001	—	—	0.05C
2	0.048	0.03	1.03	0.009	0.001	—	—	0.05C-Mn
3	0.049	0.03	0.20	0.071	0.001	—	—	0.05C-P
4	0.047	0.02	0.19	0.008	0.001	—	1.01	0.05C-Cr
5	0.050	0.02	0.21	0.068	0.001	0.31	—	0.05C-P-Cu
6	0.003	0.03	0.21	0.09	0.002	—	—	0.003C
7	0.004	0.02	0.97	0.010	0.001	—	—	0.003C-Mn
8	0.002	0.01	0.20	0.074	0.001	—	—	0.003C-P
9	0.004	0.03	0.20	0.010	0.001	—	1.00	0.003C-Cr
10	0.003	0.02	0.20	0.010	0.002	0.33	—	0.003C-Cu
11	0.004	0.02	0.20	0.066	0.001	0.31	—	0.003C-P-Cu
12	0.042	0.02	0.27	0.014	0.014	—	—	Mild steel (SPHC)
13	0.004	0.27	1.25	0.087	0.003	0.33	—	Developed steel

Table 2. Corrosion test conditions.

Type	Content
CCT-1*	<p>SST (5% NaCl, 50°C×1hr) → WET (RH 85-90%, 50°C×15hr) → DRY (70°C×5.5hr) → DIP (5% NaCl, 50°C×1hr)</p> <p>Spontaneous Dry (1.5hr)</p>
CCT-2*	<p>SST (5% NaCl, 35°C×6hr) → DRY (50°C×2hr) → WET (RH 95%, 50°C×15hr)</p> <p>Spontaneous Dry (1hr)</p>
Outdoor exposure test	Set at Kakogawa Works' quay for 10 months (Added salt spray once a week)

*: 1cycle/day

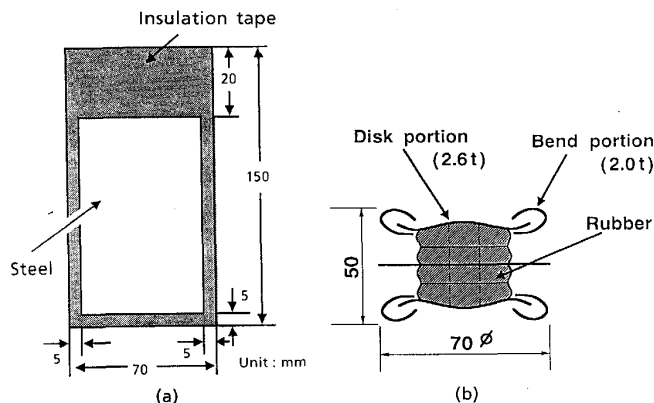
材として用いた。

2.2 腐食試験

本研究で実施した腐食試験の概要を Table 2 にまとめる。すなわち、塩水噴霧 (SST), 湿潤 (WET), 乾燥 (DRY, 温度制御なし) 等を組み合わせた 2 種の複合サイクル試験 (CCT-1, CCT-2) 及び加古川製鉄所岸壁において週一回の塩水 (5% NaCl) 散布を施した大気暴露試験を行った。

次に、これら腐食試験に用いた試料形状を Fig. 1 (a) 及び (b) に示す。(a) の板状試験片 (70×150 mm) は、アルカリ脱脂, 水洗, 乾燥後、裏面及び周囲を有機絶縁テープで被覆したものであり、CCT-1 試験, CCT-2 試験及び大気暴露試験に供した。同一条件下での腐食試験に供した同一試験片の数は 3 枚とした。試験後の耐食性評価としては、70°C の 10% クエン酸アンモニウム溶液を用いて防錆し、最大侵食深さを測定した。ここで、最大侵食深さは、試験後の各試験片の絶縁被覆部を除いた自由表面部 (60×125 mm) の外周部 5 mm 幅を除いて縦 3 列, 横 5 行に分割して得た 15 区画 (17×23 mm) 内の各最大侵食深さをデプスゲージを用いて求め、続いて最大値の極値統計処理法⁵⁾ に従い各区画中の最大値を小さなものから順に 45 個 (15 区画×3 枚) 並べ極値確率紙にプロットして標準化した値を採用した。

(b) は自動車足回り部品を模擬した試作部品である。No. 12 及び No. 13 の鋼板を切り出し後、プレス加工、ゴム加硫接着、吹付けラッカー塗装をして作製し、CCT-1 試験に供した。試験後の評価としては、70°C の 10% クエン酸アルモニウム水溶液を用いて除錆後、外観上侵食が最も大きい位置を基準に 90 度ごとに切断して得られた上下計 8 断面について、検鏡を行って曲げ部及び平板部各断面の最大侵食深さを求めた。



(a) Plate specimen (b) Automotive underbody parts
Fig. 1. Schematics of specimens for corrosion tests.

2.3 生成錆の分析

試作部品については、腐食試験後生成錆をカッターナイフにより採取して、その組成をフーリエ変換型赤外分光光度計 (FT-IR, JIR-100) 及びレーザーラマン分光光度計 (JASCO NR-1000) により同定した。ここで、カッターナイフで容易に剝離・採取できた錆を外層錆、試料表面に残存した錆を内層錆として両者を分けて分析した。内層錆は、カッターナイフにより残存錆をかき集めて分析に供した。

さらに、未除錆の一部の試料については EPMA を用いて錆層断面の元素分布を分析した。

2.4 塗装後性能試験

試作部品用鋼板については、りん酸塩処理 (日本ペイント(株)製 SD5000, $43 \pm 2^\circ\text{C} \times 2$ 分) 後カチオン電着塗装 (日本ペイント(株)製, PTU52, $15 \mu\text{m}$) を施した平板 ($70 \times 150 \text{ mm}$) を作成し、次の2種の塗装後性能試験を行った。

①クロスカット SST 試験: クロスカット付与後塩水噴霧 (SST) を最長 840 h 行い、クロスカットからの塗膜ふくれ幅 (最大ふくれ幅の 1/2) を測定した。

②耐水密着試験: 温水浸漬 (40°C 純水中 10 日間浸漬) 前後の試験片についてカッターナイフを用いて 2 mm □ のごばん目を 100 個施し、テープ剝離による密着性を調べた。

3. 実験結果及び考察

3.1 孔あき腐食に及ぼす合金元素の影響

低炭素鋼板 (0.05% C) 及び極低炭素鋼板 (0.003% C) の孔あき腐食に及ぼす 1% Mn, 0.07% P, 1% Cr, 0.3% Cu 及び 0.07% P-0.3% Cu 添加の影響について CCT-1 試験及び CCT-2 試験により調べた結果を Fig. 2 に示す。まず、低炭素鋼 (0.05% C) では、P 及び P-Cu の添加は両 CCT 条件下でも孔あき腐食抑制に効

果的であるが、Mn 添加は CCT 条件によって効果が異なり、Cr 添加は両条件下ともに孔あき腐食を助長する結果となっている。次に、極低炭素鋼 (0.003% C) では、P 及び P-Cu の添加は CCT-1 において孔あき腐食抑制効果があり、Mn 添加は特に影響は見られず、Cr 及び Cu の添加は CCT-2 の条件で孔あき腐食をむしろ助長する結果である。一方、全般に、極低炭素鋼板 (0.003% C) は低炭素鋼板 (0.05% C) に比べて耐孔あき腐食性に優れている。これらの結果をまとめると、極低炭素化 (0.05→0.003) 及び P 添加, あるいは P-Cu の複合添加により CCT 条件における耐孔あき腐食性が向上することがわかった。

Fig. 3 は、極低炭素 (0.003% C) をベースに 1% Mn, 0.07% P, 1% Cr, 0.3% Cu 及び 0.07% P-0.3% Cu の各元素を添加した鋼板の 10 か月の大気暴露試験結果であり、CCT-1 試験及び CCT-2 試験の結果と対応させて示してある。大気暴露条件下では、いずれの元素添加によっても、孔あき腐食が改善される結果となっており、SST-WET-DRY の複合サイクル条件下とは腐食の挙動が異なっていることが示唆される。特に、P-Cu の複合添加による改善効果が顕著であり、ベース鋼に比べて侵食深さを 1/5 まで減少させている。以上より、鋼中炭素量の低減、P 添加あるいは P と Cu の複合添加により鋼の孔あき腐食が低減できることがわかった。また、1% の Mn 添加の影響は腐食条件によって異なり、1% の Cr, 0.3% の Cu 添加は条件によっては孔あき腐食を助長する恐れのあることがわかった。これらの結果は、換言すれば、鋼板の孔あき腐食に及ぼす合金元素の影響は腐食条件によって異なり、自動車車体の腐食がどの条件に近いかをよく踏まえて評価する必要性のあることを示唆するものである。

Fig. 4 は、上述の各試験で優れた耐孔あき腐食性を示した 0.003% C-P-Cu 鋼 (No. 11) の最大侵食深さの経

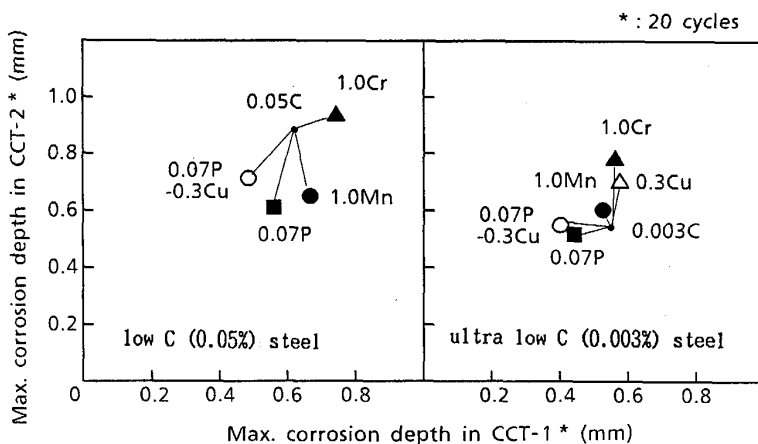


Fig. 2. Effect of alloying elements on maximum corrosion depth at CCT-1 and CCT-2. The maximum depth was analyzed by the extreme-value statistics.

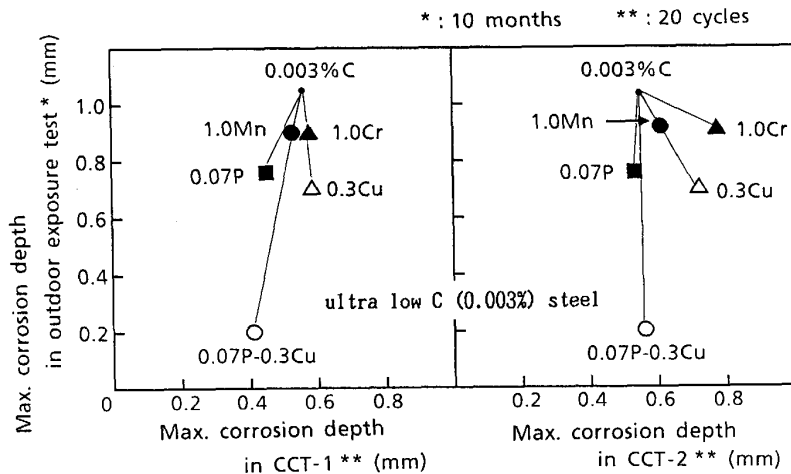


Fig. 3. Effect of alloying elements on maximum corrosion depth at CCT-1, CCT-2, and outdoor exposure test. The maximum depth was analyzed by the extreme-value statistics.

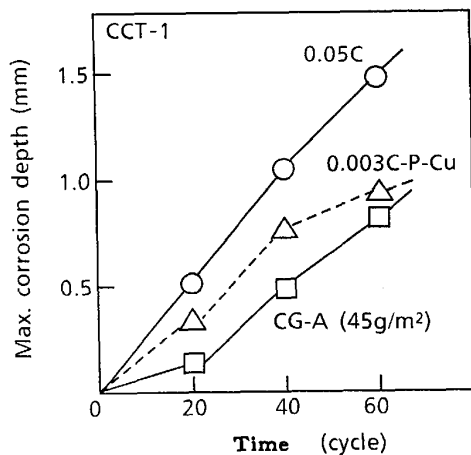


Fig. 4. Relationship between maximum corrosion depth of 0.05C, 0.003C-P-Cu, and CG-A steel sheets and test time (CCT-1).

時変化をベース鋼である 0.05% C (No. 1) 及びその鋼板上に付着量 45 g/m^2 の合金化溶解亜鉛めっきを施した鋼板 (CG-A) と比較したものである。これら鋼の耐孔あき腐食性序列は、CG-A, 0.003% C-P-Cu, 0.05% C の順であるが、これらの経時変化挙動は互いに異なっている。すなわち、0.05% C の侵食深さは時間経過に対して直線的に増大しているが、0.003% C-P-Cu はしだいに緩やかとなる傾向を有する。一方で、CG-A は、初期の侵食速度が小さいが (亜鉛めっきによる防錆効果が寄与したものと考えられる)、時間経過に伴って (めっき効果が失われるにつれて) その侵食速度が 0.05% C と同等レベルにまで高まる傾向を示している。従って、0.003% C-P-Cu においては、時間経過とともに、0.05% C との侵食深さの差がますます広がり、CG-A の値に次第に近づく傾向であることがわかった。

以上の結果から、鋼中炭素量の低減や P-Cu の添加により、鋼の耐孔あき腐食性が改善できることが明らか

となった。また、こうした成分調整をした鋼の孔あき腐食の進展速度は時間経過とともに減少する傾向を有するため、長期的には亜鉛めっき鋼板の耐孔あき腐食性をも上回る可能性も示された。

3.2 自動車足回り部品での耐孔あき腐食性調査

実験室での上記調査結果に基づいて、耐孔あき腐食性熱延鋼板を実ラインで試作し、さらに自動車足回り部品に加工して耐食性も評価した。対象部品は、ゴム加硫接着の面でめっき鋼板が使用しにくいモデル部品とした。試作鋼板の強度は、自動車構造部材としての適用をも考慮して引張強さ 41 kgf/mm^2 以上を目標にした。

3.2.1 試作鋼板の諸性能

試作鋼板は、Table 1 に示す No. 13 の鋼を電気炉溶製 (15 t) し、分塊、熱間圧延によって、2.0 mm 及び 2.6 mm 厚さの薄鋼板にした後、最終酸洗仕上げして用いた。C 量は、孔あき腐食の観点から 0.005% 未満とした。これは、スポット溶接性や加工性改善にも有利であると思われる。極低炭素化による強度低下を補うことを目的として Mn を 1.25%、Si を 0.25% レベルまで増量させている。これら元素の増量はともに固溶強化により鋼の強度上昇に寄与するものである。また、S は、孔食の起点となる $\text{MnS}^{(6)}$ の生成を助長させるので、0.005% 以下とした。更に、孔あき腐食を改善する上で最も顕著な効果を示した P と Cu を複合添加させている。

2.0 mm 厚鋼板の機械的性質を Table 3 に示す。45 kgf/mm^2 級の強度を有することがわかった。また、高強度でありながら、 n 値、孔拡げ率ともに通常の軟鋼板と比べて大きく (例えば、同一板厚の 38 kgf/mm^2 級低炭素系鋼板の n 値は約 0.14、孔拡げ率は約 125%)、加工性にも優れている。2.6 mm 厚鋼板についても、同等の強度レベルであった。

Table 3. Mechanical properties of the developed steel sheet.

YP (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	El (%)	n-value	Hole expanding ratio (%)
33.8	44.8	37.9	0.179	162.0

Plate thickness 2.0 mm

次に、酸洗後の試作鋼板のりん酸塩処理皮膜の表面状況について、通常の熱延軟鋼板と比較させて調べた結果をおおの Photo. 1 に示す。軟鋼板と同様の健全なりん酸亜鉛結晶が認められており、軟鋼板と同等の塗装性を有するものと思われる。続いて、Table 4 に、軟鋼板を比較に行った試作鋼板の塗装後性能試験の結果を示す。クロスカット SST 試験における塗膜ふくれ幅、及び耐水密着試験によるごばん目剝離性ともに開発鋼板は軟鋼板のそれと差異はなく、軟鋼板と同等レベルの塗装性を有することが確認された。

なお、試作鋼板の平板試験片を用いて CCT-1 試験を行い、同鋼が Fig. 4 に示した 0.003% C-P-Cu と同等

以上の耐孔あき腐食性能を有することを別途確認しているが、この耐食性能については次節の試作部品での試験結果で詳しく述べるものとする。

3.2.2 耐孔あき腐食性調査結果

Fig. 5 に、試作鋼板及び軟鋼板製試作足回り部品を用いて行った CCT-1 試験の結果を示す。

図は、両部品の最大侵食深さの経時変化を示したものであり、検鏡した 8 断面の個々の最大深さの中から深い順に 3 点をプロットしており、その値はもと板厚を 100 とした深さ率で表示している。曲げ部、平板部ともに、試作鋼板製部品は軟鋼板製部品よりも耐孔あき腐食性に優れることが明らかである。ちなみに、曲げ部、平板部ともに、軟鋼板の 60 サイクル後の最大侵食深さと試作鋼板の 120 サイクル後のそれが同等であり、後者は前者に比べて約 2 倍の孔あき寿命であるといえる。

Photo. 2 に、120 サイクル試験後の試作部品の断面状況例を示す。軟鋼板では平板部あるいは曲げ部における腐食孔の貫通が見られるが、試作鋼板では貫通までには至っていないことがわかる。

Table 4. Results of paintability tests.

Test item	Mild steel	Developed steel
Blistering test		
Adhesibility test (peeling ratio)	As painted 0/100 After water dipping 0/100	As painted 0/100 After water dipping 0/100

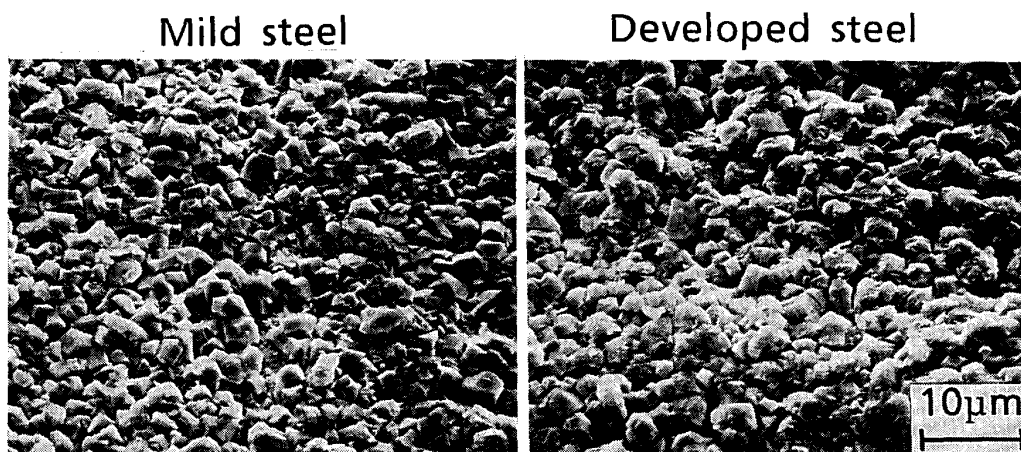


Photo. 1. SEM photographs of phosphate crystals of mild steel and developed steel.

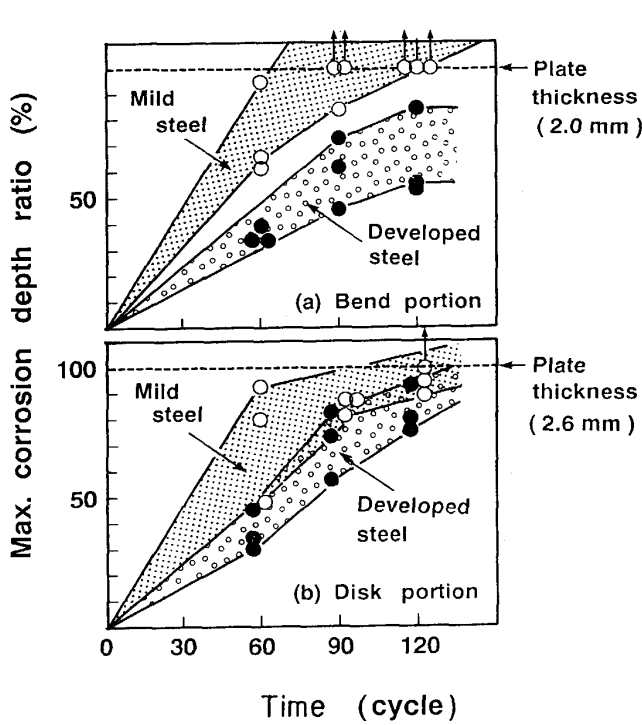


Fig. 5. Maximum corrosion depth ratio of automotive underbody parts as a function of test time (CCT-1).

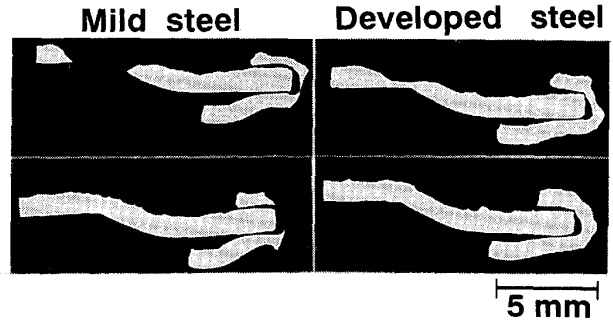


Photo. 2. Cross section of underbody parts after 120 cycles of CCT-1.

以上のように、試作足回り部品の CCT 試験で、試作鋼板は軟鋼板に比べて優れた耐孔あき腐食性を有することが確認された。次節では、この両鋼板の孔あき腐食性能の差異について、生成鋼の組成と構造の観点より若干の考察をするものとする。

3.2.3 試作鋼板の耐孔あき腐食改善機構

Fig. 6 及び Fig. 7 は、CCT-1 試験 120 サイクル後の試作鋼板及び軟鋼板製両試作部品から採取した生成錆の FT-IR スペクトル及びレーザーラマンスペクトルを示したものである。両スペクトルともに、錆の外層では、両鋼板の差異は特になく、 γ -FeOOH、 α -FeOOH、 Fe_3O_4 などが混在していることがわかる。一方、錆内

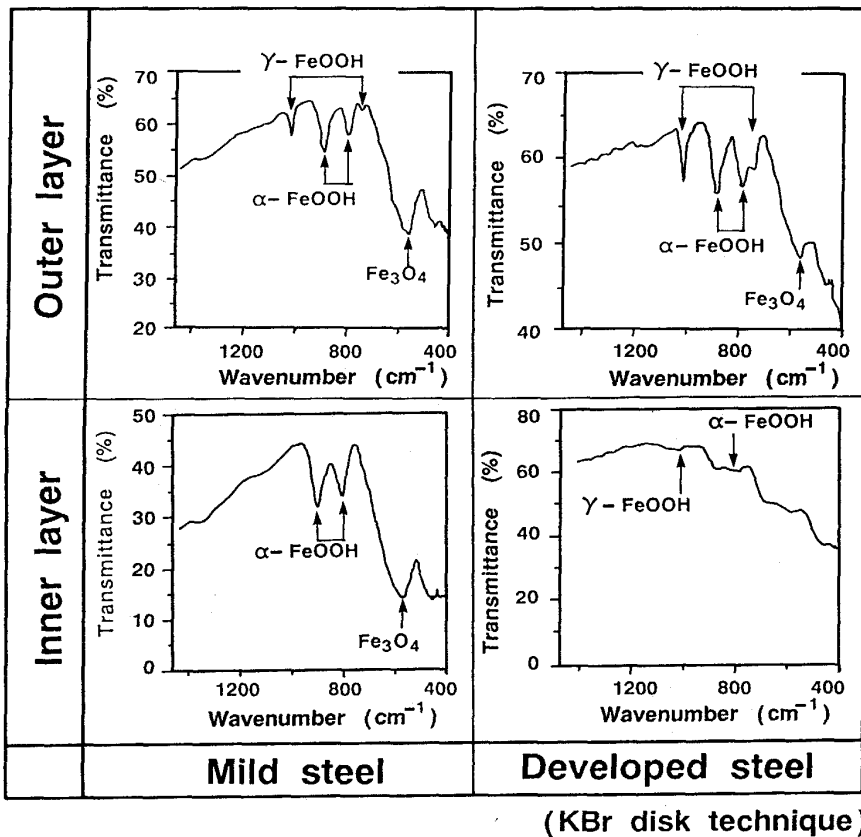


Fig. 6. FT-IR spectra of the outer and inner rust layers. The rusts were obtained from bend portions of automotive underbody parts after 120 cycles of CCT-1 (KBr disk technique).

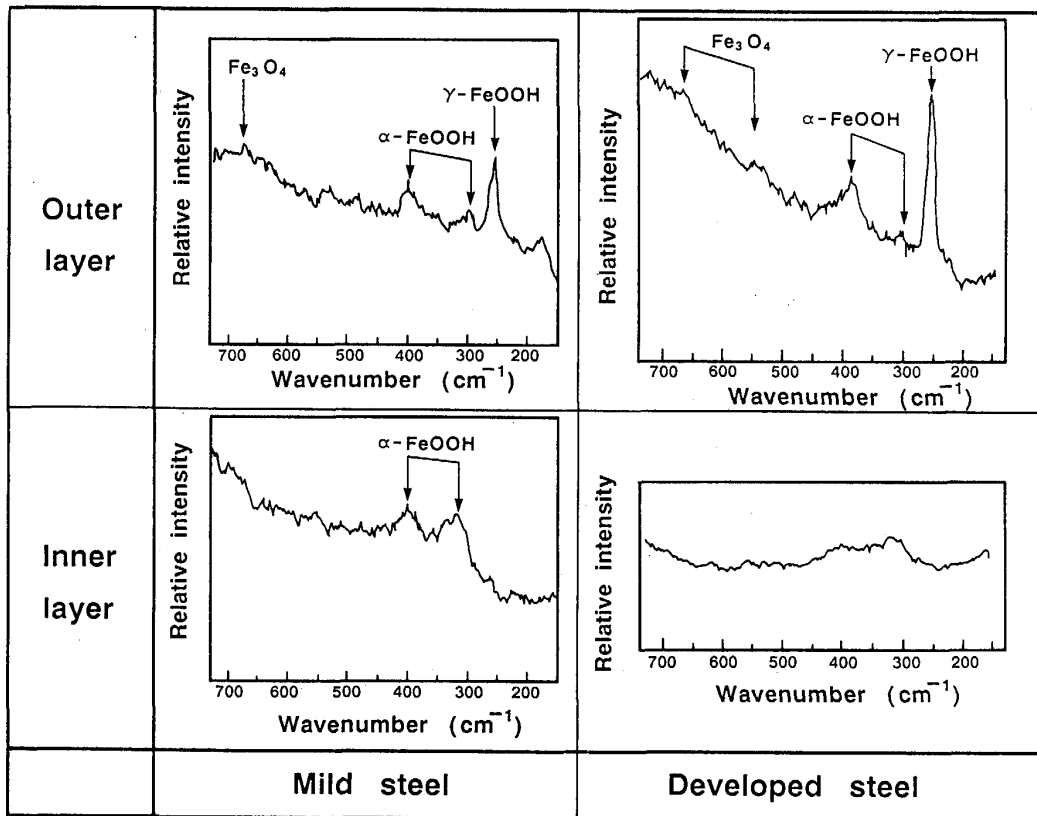


Fig. 7. Laser Raman spectra of the outer and inner rust layers. The rusts were obtained from bend portions of automotive underbody parts after cyclic corrosion test (CCT-1) for 120 cycles of CCT-1.

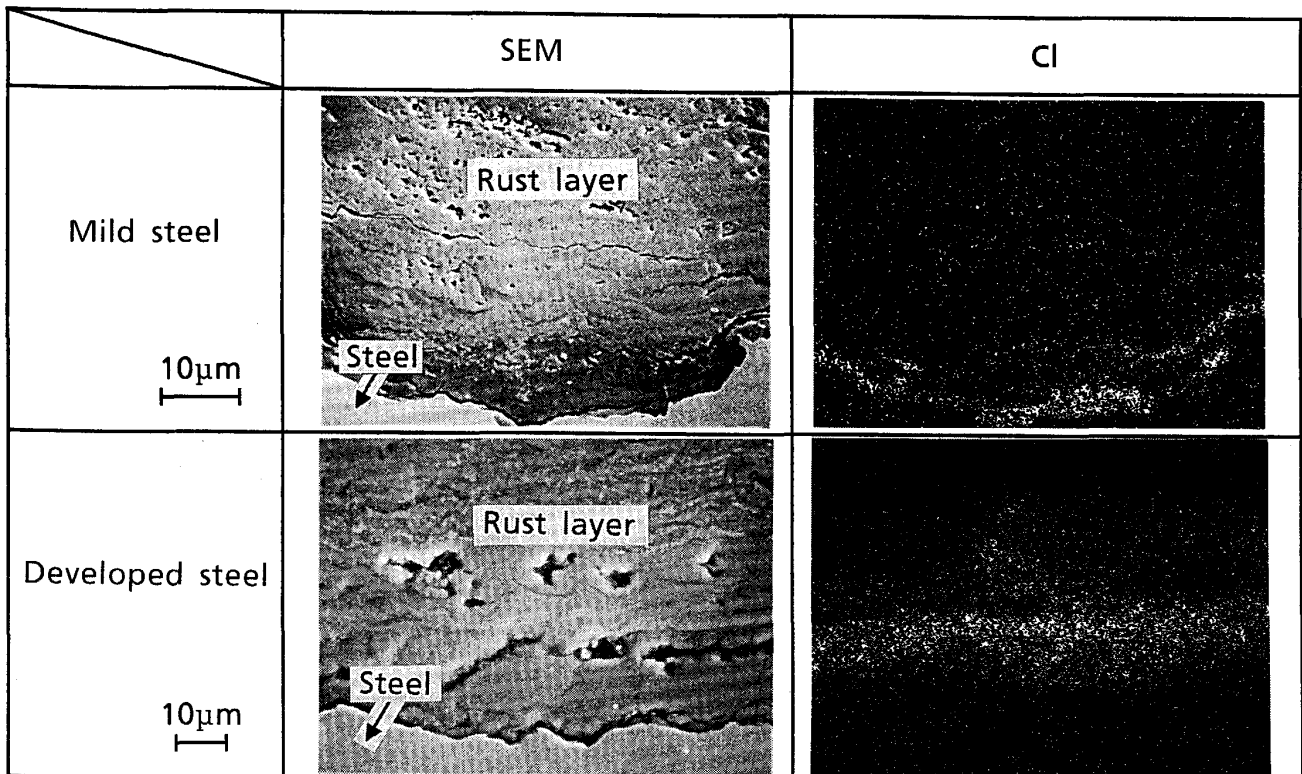


Photo. 3. SEM and X-ray images of CI of rust layers of mild steel and developed steel.

層においては、全般にこれら結晶物質に由来するスペクトル強度は弱く、特に試作鋼板ではその傾向が顕著である。また、この試作鋼板の錆内層の FT-IR 及びラマンスペクトルの全体の形は、いずれも、三沢ら⁷⁾及び KEISER ら⁸⁾がおのおの無定形オキシ水酸化鉄として報告している IR 及びラマンスペクトルの形に一致するものである。従って、試作鋼板の内層錆は非晶質的な構造に近いものと考えられる。

Photo. 3 は、試作鋼板及び軟鋼板製自動車足回り試作部品の CCT-1 試験 120 サイクル後の錆層断面(曲げ部)の SEM 像及び同視野の Cl の特性 X 線像を示したものである。軟鋼板、試作鋼板ともに、錆層中に Cl の濃縮が認められているが、濃縮位置は両者で異なっている。すなわち、軟鋼板では地鉄/錆層の界面部、試作鋼板では界面から若干離れた錆層中に Cl 濃縮が見られており、換言すれば、後者は前者に比べて環境の腐食促進物質である Cl⁻ イオンが地鉄にまで達しにくい状況を示している。先に述べた生成錆の分析結果と考え合わせると、後者の Cl⁻ イオン侵入抑制傾向は非晶質の内層錆形成によるものと思われるが、この非晶質的錆層は溶存酸素等他の腐食促進種の侵入抑制にも寄与したことが考えられる。すなわち、試作鋼ではこうした環境の腐食促進種の侵入抑制の性質により耐孔あき腐食性が高まったものと思われる。

一方で、EPMA により他の元素の濃縮・分布状況を更に詳しく調べた結果、試作鋼板においては地鉄/錆層界面部に Cu の濃縮が特徴的に認められた。増子、久松⁹⁾の人工錆形成に関する研究報告によれば、微量の Cu²⁺ の存在は Fe₃O₄ 結晶の成長を抑制して X 線的に Fe₃O₄ を非晶質化するとともに、人工錆の凝縮性を高める作用があるとしている。従って、試作鋼板に見られた非晶質的錆層は、含有成分である Cu の作用により生じた可能性がある。また、岡田ら¹⁰⁾の鋼の耐候性に及ぼす合金元素の影響に関する研究報告によれば、試作鋼板の特徴成分の一つである P についても、Cu と同様、錆内層に濃縮して錆の非晶質化を促進する作用があるとしている。本研究で実施した CCT-1 試験条件下では、特に錆中での P 濃縮は認められなかったが、P の単独あるい

は Cu との複合添加によって孔あき腐食が改善された事実等を考え合わせると、試作鋼板に添加した P も非晶質錆層形成を促進して孔あき腐食抑制に寄与した可能性がある。

以上まとめると、試作鋼板は Cu や P の作用により軟鋼板に比べて緻密な非晶質的錆層を地鉄界面に生成して Cl⁻ イオンや溶存酸素など腐食促進種の侵入を抑制する性質があり、優れた耐孔あき性を有したものと推察される。

4. 結 言

1) 自動車用熱延鋼板の孔あき腐食に及ぼす合金元素の影響を調べた結果、孔あき腐食の改善には、C 量の低減、P 添加あるいは P と Cu の複合添加が有効であることがわかった。

2) これらの結果をベースに、工場試作した 45 kgf/mm² 級熱延鋼板は、加工性にも優れ、塗装性についても現用軟鋼板と同等の性能を有した。さらに、自動車足回り部を試作し、CCT 試験を実施した結果、軟鋼板部品に比べて、孔あき寿命が 2 倍以上であった。

3) また、CCT 試験後の生成錆の分析結果より、試作鋼板は軟鋼板に比べて Cu や P の作用により緻密な非晶質錆層を地鉄界面に生成しやすく、その結果 Cl⁻ イオンや溶存酸素等の腐食促進因子の侵入を抑制して優れた耐孔あき腐食性を有したものと推察した。

文 献

- 1) R. BABOIAN: Automotive Corrosion by Deicing Salts (1981), p. 3 [NACE]
- 2) 岡 襄二: 防錆管理, 25 (1981) 12, p. 26
- 3) 三吉康彦, 門 智: 防食技術, 28 (1979), p. 645
- 4) 西原 実, 若野 茂: 住友金属, 33 (1981) 4, p. 491
- 5) 佐藤廣士, 下郡一利, 西本英敏, 三木賢二, 池田貢基, 岩井正敏, 堺 裕彦, 野村伸吾: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 1098
- 6) H. OKADA and H. SHIMADA: Corrosion, 30 (1974), p. 97
- 7) 三沢俊平, 橋本功二, 下平三郎: 防食技術, 23 (1974), p. 17
- 8) J. T. KEISER and C. W. BROWN: Corrosion Science, 23 (1983), p. 251
- 9) 増子 昇, 久松敬弘: 防食技術, 17 (1968), p. 465
- 10) 岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 355