耐溝状腐食電縫鋼管の土壌腐食*

梶山 文夫**

** 東京ガス株式会社基礎技術研究所

Underground Corrosion of Grooving Corrosion-Resistant Electric Resistance Welded Steel Pipes*

Fumio Kajiyama**

** Tokyo Gas Co., Ltd.

Recently, ERW (Electric Resistance Welded) steel pipes have been adopted in gas and oil fields, because these are economically more attractive. However, the corrosivity of ERW steel pipes in soils has not yet been examined. The objective of this paper is to ascertain the resistance to grooving corrosion at welds in four kinds of ERW steel pipes which are available on the Japanese market as of 1996. The burial testing of ERW in soils was performed, thereby the rates and form of corrosion were examined. The effects of metallurgical factors on resistance to grooving corrosion were also evaluated with regard to alloying elements and macro- and microstructure. The results indicated that all ERW steel pipes have resistance to grooving corrosion. There was no significant difference among the testing ERW steel pipes.

Key words: electric resistance welded steel pipes, grooving corrosion, underground corrosion

1. 緒 言

近年、電縫鋼管（コイル状に巻かれた長尺の帯鋼の主として低中炭素鋼を使用し、これを管状に成形して電気抵抗または電気誘導により、その継ぎ目に発生する抵抗熱を利用して溶接製管したものの総称¹⁾）が、製造工程の点から材料費のコストダウンをもたらすということで注目を浴びている。1997年パリで開催された、BHR主催の第12回パイプライン防食に関する国際会議の基調講演で、A. Quenelleは、いくつかの使用条件が満足されるのであれば、電縫鋼管は経済的に魅力あるパイプであると述べている²⁾。

1996年現在、日本のマーケットに出ている電縫鋼管を耐食性の点からみると、現在の電縫鋼管は、後述する1980年以前に製管された電縫鋼管にみられた溝状腐食を防止することを目指して、日本の各鉄鋼メーカーが開発したものとされている。しかしながら、これまで電縫

鋼管の耐食性の評価は、塩化ナトリウム水溶液や水道水中などの水溶液系で確認されているだけ³⁾で、腐食速度、腐食形態の異なる土壌中では検討されていないのが現状である。

本試験は、1996年現在、日本のマーケットに出ている電縫鋼管に電気絶縁性の高い塗覆装を施し、さらにカソード防食された状況で、上記電縫鋼管が用いられる場合を想定している。このような状況下で、何らかの原因により塗覆装に欠陥が生じた場合でも、その部位が1980年以前にみられたような非常に激しい溝状腐食が発生しないことを確認することが、試験の背景および目的になっている。

2. 溝状腐食³⁾とこれまでの対策

まず電縫鋼管の溝状腐食について述べる。1980年以前に製管された電縫鋼管の電縫部は、数mmの極めて狭い幅が非常に短時間で約1600°Cをこえる高温に加熱、溶融され、その後水冷されるため、急熱急冷を受けていた。電縫部の非金属介在物としてのMnSの融点は約1600°Cであり⁴⁾電縫部の加熱、溶融温度より低いた

* 材料と環境'97(仙台, 1997年)で発表
** 〒105-0023 東京都港区芝浦1-16-25(16-25, Sibaura 1-chome, Minato-ku, Tokyo 105-0023 Japan)

め、MnS は電縫溶接の際に溶融し、再析出する。しかし、急冷であるため MnS の周囲に S が過飽和となった領域を生じ、この S 濃化部が他のサイトよりも電位が卑であるために、土壌のような電解質中で腐食するものと考えられている。S 濃化部が MnS の周辺に存在すると、なぜ電位が卑化するのかについては明らかにされていない。さらに、電縫部は、既述したように幅が数 mm と極めて狭いものであり、一方、これに対して特に裸管の場合には母材部は非常に大きい面積を有するために、大きいカソード、小さいアノードという組合せになり、電縫部が選択的に腐食することになる。このとき V 字形に腐食が進行するためにこの腐食を溝状腐食と称する。溝状腐食には、電縫線に沿って一直線に生じるものと、錆瘤が電縫部を含む位置に生成してその下が特に腐食するものがある^{5), 6)}。1975 年頃から溝状腐食事例は多くみられるようになった。溝状腐食は極めて大きい腐食速度を種々の環境で示し、事例報告^{7)~8)}によると、10 mm/y 以上の場合もあり得るとのことである。

1980~1981 年までに、日本の鉄鋼メーカーから「耐溝状腐食（耐溝食）電縫鋼管」と称する電縫鋼管がマーケットに出るようになった。耐溝状腐食電縫鋼管の開発思想は、1) 鋼中の S 含有量の低下、2) 電縫部の熱処理を基本としている。すなわち、鋼中の S 含有量を少なくし、また電縫部を熱処理することにより、急熱急冷による S 濃化部の減少と、電縫部と母材部の組織の均一化をはかることにある。しかしながら、溝状腐食を防止するには S 含有量の低下と熱処理のみでは不十分で、さらに種々の合金元素を添加したり介在物の形状を制御したりする方法が、日本の各社のノウハウによって取られている。

3. 試験方法

3.1 供試材料

供試材料は、1996 年現在、マーケットに出ている性状の異なる 4 種の電縫鋼管である。本論文では、A, B, C および D と称することにする。Table 1 は供試材料

Table 1 Materials used in the present study.

Material	Grade	Nominal diameter (mm)	Wall thickness (mm)
A	X65	400	9.5
B	X60	200	8.5
C	X60	200	6.2
D	X70	508	12.7

の API 5L に基づくグレード、管径および母材部の管厚を示したものである。

3.2 化学成分

各供試材料の管軸方向と周方向の化学成分のバラツキを把握するために、到着時の各電縫鋼管に対して左端 (L)、中央 (C)、右端 (R) 部分から、電縫中央部より周方向に ± 5 mm、管軸方向に 20 mm の大きさと、電縫中央部より 180° 離れた位置を中心として周方向に ± 5 mm、管軸方向に 20 mm の大きさと切り出した試験片に対して化学成分分析を行った。すなわち 1 供試電縫鋼管に対し 6 個の試験片に対して化学成分分析を行ったことになる。なお、左端と右端は単に到着電縫鋼管の両端を識別する意味だけのものである。成分分析は 16 元素に対して行い、各元素の分析方法は以下の通りである。

C: JIS G1211 に準拠する赤外線吸収法

S: JIS G1215 に準拠する赤外線吸収法

Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Al, Cu, Nb, V, Ti, Ca, Co:

JIS G1258 に準拠する誘導結合プラズマ発光分光法

P: JIS G1214 に準拠するモリブデン青吸光度法

N: JIS G1228 に準拠する不活性ガス搬送融解-熱伝導度法

3.3 組織観察

各到着電縫鋼管の中央部分から、電縫中央部より周方向に ± 15 mm、管軸方向に 20 mm の大きさと、電縫中央部より 180° 離れた位置を中心とする周方向に ± 15 mm、管軸方向に 20 mm の大きさと切り出した試験片に対して、マクロとミクロの組織観察を行った。電縫中央部を含む試験片は、電縫部+熱影響部+母材部から成る。マクロ組織観察は、電縫中央部を中心に 5 倍の倍率で行った。ミクロ組織観察は、電縫中央部を含む試験片と母材部試験片に対して 200 倍の倍率で行った。電縫中央部を含む試験片では、電縫部、熱影響部 (HAZ) と母材部の各組織を観察した。ミクロ組織の観察位置は、管厚中央部とした。組織観察のための試験片の腐食には、硝酸およびピクリン酸の混合溶液を用いた。

3.4 供試土壌

供試材料の埋設試験に用いた土壌は、(1)酸性土壌、(2)海砂および(3)山砂の3種である。ここで、用いた海砂は、著者らのこれまでの研究により、炭素鋼 (SS 400) や球状黒鉛鋳鉄 (FCD 400) に対して錆瘤を形成する特性を有していること⁹⁾がわかっている。

供試土壌の色を、日本色研事業(株)発行の標準土色帖¹⁰⁾と照合することにより判定した。土質は、工学的土壌分類法¹¹⁾に基づく三角座標により決定した。土粒子の比重はノギス法¹²⁾より求めた。比抵抗は、コロージョンモニター¹³⁾で測定した。含水比、 E_h , pH, pH

(H₂O₂)と有機物、イオン、有機酸含有量に関する化学分析を標準的な手法¹⁴⁾により行った。*E*_aは、白金電極の飽和塩化カリウムの銀/塩化銀電極に対する電位差を測定し、最終的に水素電極基準に換算して求めた¹⁵⁾。嫌気性菌として硫酸塩還元菌、好気性菌として鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌の計数を最確値法により行った。硫酸塩還元菌の計数のために、PostgateのB培地¹⁶⁾を用いた。他の2種の微生物の計数は、参考文献¹⁷⁾によって行った。

3.5 土壌埋設試験

供試材料の土壌腐食性を明らかにするために、供試材料から切り出した試験片を3.4に示した土壌に自然腐食状態で埋設して試験を行った。試験片は、3.3で示した電縫中央部を含む電縫部近傍試験片と、母材部試験片で大きさも同じ30 mm×20 mmのものとした。試験片は、電縫鋼管の外面(30 mm×20 mm)のみを残して、他の部分は電気絶縁性の塗料を塗布し、露出面は1000番のエメリー紙で研磨後、アセトン脱脂し、試験に供した。同一電縫鋼管の電縫部近傍試験片、母材部試験片と飽和硫酸銅電極を1セットとして、土壌に埋設した。試験片の総数は、供試電縫鋼管が4種、土壌が3種であることから24となる。電縫中央部を中心とした試験片は、電縫部+熱影響部+母材部から成る。すなわち、電縫中央部を中心に6 cm²の塗覆装欠陥部が生じた場合を考えている。本試験では、電縫部のみの腐食性を厳密に評価したわけではなく、実際によくみられる、ある程度の大きさを有する塗覆装欠陥部を想定し、電縫部を含む塗覆装欠陥部ができた場合、組織等の差による金属学的因子によりどの位の速度で、どのような形態で腐食するのかを把握することを目的としている。試験セルは、容量1 Lのパイレックス製で水分の蒸発を防ぐためにキャップをし、これを298 Kのインキュベータ内に静置した。埋設日数は170日で、その間、各試験片の飽和硫酸銅電極に対する電位差である腐食電位をモニタリングした。最終的に電縫部近傍試験片と母材部試験片を掘り上げ、付着土壌、腐

食生成物を除去した後、重量減少量を測定し全面腐食速度を求めた。腐食が特に激しかった場合には、デップスゲージで最大腐食深さを測定し、最大腐食速度に換算した。

4. 結果および考察

4.1 化学成分

Table 2-1 および Table 2-2 は、供試材料の電縫中央部とこれより180°離れた母材部における16元素の化学成分分析結果を一覧表にして示したものである。なお、L, C, Rは、それぞれ到着電縫鋼管の左端、中央、右端部分にそれぞれ対応している。これらの表より、同一供試材料において、電縫中央部とこれより180°離れた母材部間に化学成分のバラツキはほとんどみられないことがわかった。すべての供試材料において、S含有率は0.005 wt%以下の低い値を示した。

溝状腐食防止のための合金元素の効果については、種々の見解があるものと考えられる。ここでは、以下に示す4項目による視点から、供試電縫鋼管の合金元素の効果について比較検討した。

① とにかく MnS の含有率を低下させる。そこで、

Table 2-1 Chemical composition of materials (in wt%).

Material		C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	
A	Base	L	0.074	0.004	0.46	0.015	0.005	0.026	0.15	0.022
		C	0.074	0.004	0.46	0.015	0.005	0.026	0.15	0.022
		R	0.072	0.004	0.46	0.015	0.005	0.026	0.15	0.022
	Weld	L	0.066	0.006	0.45	0.016	0.005	0.027	0.15	0.025
		C	0.065	0.006	0.45	0.015	0.004	0.026	0.15	0.023
		R	0.065	0.006	0.45	0.015	0.004	0.027	0.15	0.023
B	Base	L	0.068	0.16	1.20	0.014	0.004	0.026	0.29	0.12
		C	0.069	0.16	1.21	0.015	0.004	0.026	0.30	0.12
		R	0.068	0.16	1.21	0.015	0.004	0.026	0.30	0.12
	Weld	L	0.067	0.16	1.20	0.014	0.004	0.027	0.30	0.12
		C	0.068	0.16	1.21	0.015	0.004	0.028	0.30	0.12
		R	0.068	0.16	1.21	0.016	0.004	0.026	0.29	0.12
C	Base	L	0.057	0.18	1.31	0.010	0.001	0.048	0.22	0.022
		C	0.058	0.18	1.31	0.010	0.001	0.048	0.21	0.021
		R	0.058	0.18	1.32	0.010	0.001	0.048	0.22	0.021
	Weld	L	0.058	0.18	1.30	0.010	0.001	0.048	0.22	0.021
		C	0.057	0.18	1.31	0.011	0.001	0.048	0.22	0.021
		R	0.057	0.18	1.31	0.010	0.001	0.048	0.22	0.021
D	Base	L	0.058	0.20	1.56	0.008	<0.001	0.047	0.16	0.18
		C	0.058	0.20	1.56	0.008	<0.001	0.047	0.16	0.18
		R	0.059	0.20	1.56	0.008	<0.001	0.047	0.16	0.18
	Weld	L	0.057	0.20	1.53	0.009	<0.001	0.048	0.16	0.17
		C	0.058	0.20	1.53	0.009	<0.001	0.048	0.16	0.18
		R	0.058	0.20	1.53	0.009	<0.001	0.048	0.16	0.18

Table 2 - 2 Chemical composition of materials (in wt%).

Material		Nb	V	Cr	Mo	Ti	Ca	Co	N
A	L	<0.001	<0.001	0.022	<0.001	0.055	<0.001	0.002	0.0021
	Base C	<0.001	<0.001	0.023	0.001	0.055	<0.001	0.002	0.0018
	R	<0.001	<0.001	0.023	0.002	0.053	<0.001	0.002	0.0017
	L	<0.001	<0.001	0.021	0.001	0.049	<0.001	0.003	0.0018
	Weld C	<0.001	<0.001	0.021	0.001	0.051	<0.001	0.002	0.0015
	R	<0.001	<0.001	0.022	0.001	0.051	<0.001	0.002	0.0018
B	L	0.039	0.001	0.054	0.001	0.025	<0.001	0.006	0.0039
	Base C	0.039	0.001	0.054	0.001	0.026	<0.001	0.005	0.0040
	R	0.039	0.001	0.054	0.001	0.026	<0.001	0.005	0.0040
	L	0.039	0.001	0.054	0.001	0.025	<0.001	0.005	0.0043
	Weld C	0.039	0.001	0.054	0.001	0.026	<0.001	0.005	0.0044
	R	0.039	0.001	0.054	0.001	0.026	<0.001	0.005	0.0042
C	L	0.032	0.044	0.045	0.002	0.015	0.003	0.003	0.0034
	Base C	0.032	0.044	0.045	0.002	0.015	0.002	0.003	0.0036
	R	0.032	0.044	0.045	0.002	0.015	0.002	0.002	0.0035
	L	0.032	0.044	0.045	0.002	0.015	0.002	0.002	0.0035
	Weld C	0.032	0.044	0.045	0.002	0.015	0.002	0.002	0.0035
	R	0.032	0.044	0.046	0.002	0.015	0.003	0.003	0.0033
D	L	0.044	0.002	0.012	0.002	0.009	0.002	0.003	0.0027
	Base C	0.044	0.002	0.012	0.002	0.009	0.002	0.003	0.0026
	R	0.044	0.002	0.012	0.001	0.009	0.002	0.003	0.0026
	L	0.038	0.002	0.012	0.001	0.008	0.002	0.004	0.0022
	Weld C	0.039	0.002	0.012	<0.001	0.008	0.002	0.004	0.0022
	R	0.040	0.002	0.012	<0.001	0.008	0.003	0.004	0.0021

Mn+S の含有率に着目する。

② Larrabee¹⁸⁾ や寺前¹⁹⁾ が提唱するように、大気腐食と硫酸に耐性のある Cu を添加する。そこで、Cu 含有率に着目する。

③ Wranglén が提唱するように、Mn に代わって鋼中において不溶性の硫化物を生成させる²⁰⁾。この効果をもたらす合金元素として、Cr, Ti, V がある。そこで、Cr+Ti+V 含有率に着目する。

④ Wranglén が提唱するように、腐食性環境において、腐食進行に伴い鋼表面に不溶性の硫化物皮膜を形成させる²⁰⁾。具体的には、酸中で FeS よりも不溶性の硫化物形成元素を添加する。この効果元素として、Ni と Co があるので、Ni+Co 含有率に着目する。

以下に、上記 ① から ④ の視点について述べる。

Fig. 1 は、各供試材料の Mn と S の合計含有率をヒストグラムで示したものである。以下ヒストグラムの化学成分値は、既述したように同一供試材料において電縫中央部と母材部間に化学成分のバラツキはほとんどみられなかったのので、平均値を採用した。供試材料 A が 0.5 wt% よりも低い値を示した。他の供試材料 B, C および D は、1.0 wt% よりも高い値を示した。供試材料

A の Mn 含有率が 0.46 wt% 以下と、他の供試材料 (1.20 wt% 以上) よりも特に低かった点が注目される。Fig. 2 は、各供試材料の Cu 含有率をヒストグラムで示したものである。すべての供試材料が 0.15 wt% 以上の値を示したが、なかでも供試材料 B が 0.30 wt% と最も高い値を示した。Fig. 3 は、各供試材料の Cr, Ti および V の合計含有率をヒストグラムで示したものである。供試材料 C は 0.10 wt% 以上の最も高い値を示したのに対し、供試材料 D は約 0.02 wt% と低い値を示した。Fig. 4 は、各供試材料の Ni と Co の合計含有率を示したものである。供試材料 D が 0.183 wt% と最も高かった。特に供試材料 D の Ni 含有率が 0.18 wt% と高かった点が注目される。

Table 3 は、上記結果をまとめたものである。この表より、合金元素により耐溝状腐食性を

持たせる点では、各供試材料ごとに特徴があり、4 項目に着目する限り、大きな差違はみられないことがわかった。

4.2 金属組織

Fig. 5 は、A～D 4 種の供試材料のマクロ組織を示したものである。電縫部と母材熱影響部が均一になっていることがわかる。電縫部中央に観察されるすじは、周

Fig. 1 Histogram of Mn and S compositions in the materials used.

Fig. 2 Histogram of Cu composition in the materials used.

Fig. 3 Histogram of Cr, Ti, and V compositions in the materials used.

Fig. 4 Histogram of Ni and Co compositions in the materials used.

Fig. 5 Macrostructures for four kinds of materials.

囲の組織より比較的大きいフェライトが管厚方向に連なってみるもので、溶接欠陥ではないものと判断される。

Fig. 6 から 9 は、各供試材料の電縫部、熱影響部とその近傍の母材部および電縫中央部より 180° 離れた母材部のマイクロ組織を示したものである。これらの図より、供試材料の種類と組織観察サイトの如何にかかわらず、組織はすべてフェライト地に少量のパーライト（黒色）が析出したじん性が良好な二相組織であることがわかった。また、結晶粒は微細化しており、かなり焼ならし

効果がみられる組織であった。電縫部が 1600°C をこえる温度で加熱された後急冷されるのであれば一般的にはベーナイト組織を示すはずであるが、このようにすべての供試材料のサイトがパーライト+フェライトであったということは、焼ならしによる熱処理が十分行われていたことを裏付けるものである。

Table 3 Evaluation of materials used in the present study in terms of the resistance to grooving corrosion.

	Lower MnS	Resistance to atmospheric corrosion and sulfuric acid	Forming insoluble sulfides in the steel	Forming insoluble sulfides in the corrosive medium
Excellent material	A	B	C	D

Fig. 6 Microstructure for material A.

Fig. 7 Microstructure for material B.

4.3 供試土壌の腐食性

Table 4 は、供試土壌の腐食性評価試験結果を示したものである。この表より、以下のことがわかった。

- ・酸性土壌は pH4.0 で、土質はシルト質粘土ロームであった。比抵抗は 2400 Ω cm と、供試土壌のなかで最も低い値を示した。
- ・海砂は、土質的には砂質ロームに分類されたが、比抵抗が 2940 Ω cm と低く、硫酸塩還元菌の基質である乳酸が 23 wt ppm と高く、これに対応してこの微生物の生菌数が 1×10^5 cells/g-soil と高かったことから、通常の砂質ロームの特性を有していたとはいえない。
- ・山砂は、砂分を 91% も含み、比抵抗が 9220 Ω cm と高かったことから、典型的な砂の特性を有していたとみなされる。

たかだか 3 種の供試土壌ではあるが、腐食性の点から代表的な土壌を用いたものと考えられる。

4.4 腐食速度

Fig.10 は、供試土壌に埋設された電縫部近傍試験片と母材部試験片の全面腐食速度を比較して示したものである。試験片のうち、海砂に埋設された供試材料 B の母材部試験片が特に激しく局部腐食したほかは、電縫部近傍試験片、母材部試験片とも全面的に腐食した。そこで、腐食度を全面腐食速度で評価することは妥当であるといえる。Fig.10 および試験片の観察結果より、以下のことがわかった。

- ・電縫部のみが集中的に腐食するという現象はみられなかった。
- ・4 種の供試電縫鋼管の全面腐食速度に明確な差はみられなかった。

なお、酸性土壌であるにもかかわらず全面腐食速度が小さかったのは、鋼表面に硫化物を含むと予測される密着性の良好な物質が生成し、腐食を抑制したことによるものと考えられる。

Fig.11 は、最大腐食速度を示した、海砂に埋設された供試材料 B の母材部試験片の腐食の様相を、電縫部近

Fig. 8 Microstructure for material C.

Fig. 9 Microstructure for material D.

傍試験片と比較して示したものである。母材部の最大腐食速度は、2.51 mm/y もの大きい値を示した。しかしこの値は、炭素鋼や球状黒鉛鋳鉄でみられた値と同じレベルである⁹⁾ので、供試材料Bの母材部の耐食性が劣るというわけではない。なお Fig.11 において、電縫部近傍試験片は全面的に腐食したので、最大腐食速度は表示されていない。今回の試験で、1980 年以前に製管された電縫鋼管で発生した溝状腐食がみられなかったことは特筆に値する。

4.5 腐食電位

Fig.12 は、土壌埋設試験開始時（シンボルが白）と終了時（シンボルが黒）における各供試材料AからDの電縫部近傍試験片と母材部試験片の腐食電位を示したものである。Fig.12 より、以下のことがわかった。

- ・酸性土壌に埋設された場合、供試材料の種類と試験開始時、終了時の如何にかかわらず電縫部近傍と母材部はほとんど同じ腐食電位を示した。
- ・酸性土壌以外では、試験終了時の方が試験開始時より

Fig. 10 Comparison of uniform corrosion rate of weld+HAZ+base with that of base metal.

- も電縫部近傍と母材部間の腐食電位差は大きくなった。腐食電位差が最も大きかったのは、海砂に埋設された供試材 B の試験終了時における 44 mV で、母材部の方が電縫部近傍よりも卑であった。
- ・試験終了時でみると、全 12 ケースのうち電縫部近傍と母材部の腐食電位差が等しかったケースが 2、電縫

Table 4 Properties of the soils used in the present study.

Soil		Acid soil	Sandy marine sediment	Sand
Properties				
Color		grayish olive	brownish black	brown
Particle properties (%)	Clay ($\leq 5 \mu\text{m}$)	22	11	5
	Silt ($5 \sim 74 \mu\text{m}$)	52	15	4
	Sand ($74 \sim 2000 \mu\text{m}$)	26	70	91
	Gravel ($2000 \mu\text{m} \leq$)	0	4	0
Type		Silt clay loam	Sandy loam	Sand
Specific gravity		2.56	2.68	2.70
Soil resistivity ρ ($\Omega \text{ cm}$)		2400	2940	9220
Water concentration Wc (%)		55.5	21.2	12.1
Eh (mV vs. NHE)		524	489	394
pH		4.0	7.1	6.9
pH (H_2O_2)		2.5	6.4	5.9
Organic concentration (%)		2.23	1.57	0.30
Fe^{2+} concentration (wt ppm)		470	4	ND
Total iron concentration (wt ppm)		632	235	175
FeS concentration (wt ppm)		ND	6	48
Anion concentration (wt ppm)	SO_4^{2-}	260	800	90
	NO_3^-	23	46	29
	Cl^-	11	18	21
	HCO_3^-	6	395	165
Cation concentration (wt ppm)	Na^+	15	340	33
	NH_4^+	4	3	2
	K^+	17	27	3
	Ca^{2+}	294	95	48
	Mg^{2+}	18	31	17
Organic concentration (wt ppm)	Formic acid	1	ND	ND
	Acetic acid	2	ND	ND
	Propionic acid	ND	ND	ND
	Lactic acid	2	23	6
	Pyruvic acid	ND	ND	ND
	Malic acid	ND	ND	ND
	Succinic acid	6	ND	ND
Number of bacteria (cell/g-soil)	SRB	7×10^2	1×10^5	2×10^2
	IOB	0	0	0
	SOB	7×10	0	0

ND : Not Detected SRB: Sulfate-reducing bacteria
 IOB: Iron-oxidizing bacteria
 SOB: Sulfur-oxidizing bacteria

材部との間に材料的な差はなく、腐食電位差は土壌である環境側因子の方が決定要因になっているものと考えられる。

5. 結 論

1) 供試電縫鋼管 A から D の 4 種のうち、錆瘤形成傾向のある海砂に埋設された電縫鋼管 B の母材部が特に激しく局部腐食したほかは、電縫部近傍、母材部とも全面的に腐食した。電縫線上のみが集中的に腐食するという現象はみられなかった。同一電縫鋼管において、電縫部近傍と母材部は同レベルの腐食速度を示した。また、供試電縫鋼管間の全面腐食速度に明確な差はみられなかった。供試電縫鋼管の最大腐食速度、全面腐食速度とも炭素鋼(SS 400)や球状黒鉛鋳鉄(FCD 400)と同レベルであった。上記より、供試電縫鋼管は、高い耐溝状腐食性を同レベルで有するといえる。

2) 同一電縫鋼管において、電縫中央部とこれより 180° 離れた母材部に化学成分のバラツキはほとんどみられなかった。すべての供試電縫鋼管において、S 含有率は

0.005 wt% 以下の低い値を示した。合金元素を溝状腐食防止の 4 項目、すなわち ① MnS の低減、② 大気腐食と硫酸に対し耐性のある Cu の添加、③ 鋼中における不溶性硫化物の形成、④ 腐食性環境中における不溶性硫化物の形成、から比較検討したところ、各電縫鋼管はそれぞれ特徴があり、供試電縫鋼管間で明らかな差はなかった。

3) 同一電縫鋼管はもとより、すべての供試電縫鋼管

部近傍の方が卑のケースが 7、母材部の方が卑のケースが 3 であった。

1980 年以前に製管された MnS の周辺に存在する S 濃化部のために電縫部が母材部よりも常に腐食電位が卑であった。しかし、今回の結果のように 1996 年現在、マーケットに出ている電縫鋼管の電縫部近傍と母材部の腐食電位が等しい値を示したり、電縫部近傍と母材部の腐食電位差に断定的なことがいえなかったことは電縫部と母

Fig. 11 Appearance of material B after the burial testing in sandy marine sediment.

Fig. 12 Comparison of corrosion potential of weld + HAZ + base with that of base metal.

	initial	final
Acid soil	○	●
Sandy marine sediment	△	▲
Sand	□	■

において、電縫部、熱影響部とその近傍の母材部、および電縫中央部より 180° 離れた母材部の金属組織は、すべてフェライト地に少量のパラライトが析出した二相組織であり、かなり焼ならし効果を受けていることが確認された。すべての供試電縫鋼管において、金属組織の均一さと、特に電縫部の焼ならしによる熱処理効果が確認されたといえる。

4) 同一土壌中の同一供試電縫鋼管の電縫部近傍と母

材部の腐食電位は、材料因子よりも土壌環境因子が決定要因になっているものと考察された。

上記 2) から 4) の結果は、1) に示したように電縫部が溝状腐食せず、母材部と同様の速度で腐食した結果を支持するものである。

(Manuscript received January 16, 1998; in final form March 18, 1998)

参 考 文 献

- 1) 門 智, 乙黒靖男, 加藤忠一, 平井陽一, 川本輝明: 日本造船学会誌, 第 532 号, 8 (1973).
- 2) A. Quenelle: 12th International Conference on Pipeline Protection, Opening Address, BHR, Paris (1997).
- 3) 例えば, Nippon Steel Technical Report, No. 39, 40 (1989).
- 4) 化学大辞典編集委員会編: 「化学大辞典 9」, 共立出版 (1962).
- 5) 正村克身, 松島 巖: 防食技術, **28**, 348 (1979).
- 6) 正村克身, 松島 巖: 防食技術, **31**, 332 (1982).
- 7) 栗栖孝雄, 久野忠一, 原田俊一, 土居武雄: 川崎製鉄技報, **11**, 321 (1979).
- 8) 諸石大司, 長野博夫, 幸 英昭, 鹿島 啓: 「第 25 回腐食防食討論会予稿集」, p.98 (1978).
- 9) F. Kajiya & Y. Koyama: *Corrosion*, **53**, 156 (1997).
- 10) 小山正忠, 竹原秀雄: 「標準土色帖」, 日本色研事業 (1976).
- 11) 成瀬勝武ほか著: 「新土木設計データブック, 上巻」, p.24 (1969).
- 12) 土質工学会編: 「土質試験法」, 土質工学会 (1979).
- 13) K. Kasahara, H. Adachi & F. Kajiya: "Electrochemical Corrosion Testing with Special Consideration of Practical Applications", Vol.101, Ed. by E. Heitz, J. C. Rowlands & F. Mansfeld, p.115, Dechema(1985).
- 14) K. A. Smith: Soil Analysis, Marcel Dekker (1983).
- 15) H. H. Uhlig & R. W. Revie: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley and Sons, Third Ed., p.33 (1985).
- 16) J. R. Postgate: The Sulphate-reducing bacteria, Cambridge University Press, p. 33 (1985).
- 17) 土壌微生物研究会編: 「土壌微生物実験法」, 養賢堂 (1992).
- 18) C. P. Larrabee: *Corrosion* **14**, 501t (1958).
- 19) 寺前 章, 門 智, 乙黒靖男, 梶理市: 富士製鉄技報, **17**, 103 (1968).
- 20) G. Wranglén: *Corros. Sci.*, **14**, 331 (1974).