

論 文

18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb および 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N ステンレス鋼用被覆アーク溶接棒の開発

© 1984 ISIJ

藤 本 六 郎*・溝 口 修一郎*²

Development of Covered Arc-welding Electrodes for Stainless Steels of 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb and 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N

Rokurō FUJIMOTO and Shuichirō MIZOGUCHI

Synopsis:

Purpose of this study is to develop covered arc-welding electrodes for high strength stainless steel, 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb (SUS 304N2) and pitting corrosion resistant stainless steel, 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N.

0.2% proof stress and tensile strength of 20Cr-9Ni-3Mn weld metal increase in proportion to increase of N content. Columnar structure of weld metal tends to become fine-grained by addition of small amount of Nb and Ti. The same also brings about extreme increase of 0.2% proof stress and tensile strength. Addition of 0.2% N, 0.05% Nb and 0.05% Ti results in 0.2% proof stress more than 35 kgf/mm² and tensile strength more than 70 kgf/mm² (specification values of SUS 304N2). Decrease of elongation, vEo°C and crack resistant property of weld metal associated with addition of above elements is found to be small and negligible.

Weight loss by pitting corrosion test (5% FeCl₃+1/20 N HCl, 50°C, 48h) of 25Cr-14Ni-0.8Mo-0.30N weld metal (0.1~1.5 g/m²·h) is slightly greater than that of base metal (less than 1 g/m²·h). Pitting potential V'_{c100} of weld metal (0.96 V_{vc} SCE) is almost same as that of base metal. It is concluded that initiation of pitting corrosion is almost same as that of base metal, while dissolution rate of pitting corrosion is slightly higher than that of base metal. In spite of increase of Mo and N contents up to 1.8% and 0.34% respectively, there is no decrease of weight loss by pitting corrosion test. Crack ratio of weld metal decreases as ferrite content increases, while pitting corrosion resistant does not decrease by increase of ferrite content up to 5%.

Various characteristics of welded joint of above two kinds of stainless steel are also described in this article.

1. 緒 言

Cr-Ni オーステナイト鋼および溶接金属に窒素を添加すると常温の耐力, 引張強さ, 耐食性および耐熱特性などが向上し^{1)~12)}, 数種類の高窒素オーステナイト系ステンレス鋼が開発されている¹²⁾.

筆者らは, これら高窒素オーステナイト鋼の被覆アーク溶接金属のブローホール発生を防止する方策を検討し, 溶着金属の酸素量を 0.04%, 水素量を 5 ppm まで低減するとブローホールの発生が防止されることを明らかにした¹³⁾.

本研究は, 現在実用化されている高窒素ステンレス鋼の中から 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb の高強度ステンレス鋼 (SUS 304N2) および 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N の耐孔食ステンレス鋼を選び, これらの鋼種に対してブ

ローホールの発生を防止した新しい被覆剤¹⁴⁾を適用して合金系溶接棒を開発するために行つた。

すなわちまず, 溶着金属に高濃度の窒素を含有させる方法として心線中への窒素添加と被覆剤中に窒化 Ferro-Mn を配合する場合とについて検討した。

高強度ステンレス 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb 鋼用の合金系溶接棒は, 溶着金属の耐食性を母材と同程度に保つため Cr と Ni の含有量をわずかに高め, また溶着金属の窒素溶解度を少し大きくしてブローホールの発生を防ぐため Mn を約 3% に高めた 20Cr-9Ni-3Mn 系を基本組成に選定した。そしてこの溶着金属の機械的性質および溶接金属の耐割れ性におよぼす N 量の影響と Nb, Ti の単独および複合添加の影響について調べた。この研究結果から, 溶接金属の耐割れ性がすぐれかつ溶着金属の引張強さ 70 kgf/mm² 以上が得られる溶接棒を 18

昭和 59 年 1 月 23 日受付 (Received Jan. 23, 1984)

* 日鉄溶接工業(株)技術部 (Technical Department, Nippon Steel Welding Products Engineering Co., Ltd., Nakagawa-Tsukiji Bldg. 3-5-4 Tsukiji Chuo-ku 104)

*² 日鉄溶接工業(株)研究所 (Research Institute, Nippon Steel Welding Products Engineering Co., Ltd.)

Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb の高強度ステンレス鋼の溶接に用い、溶接継手の諸特性（継手引張、型曲げ性）について検討した。

また、耐孔食ステンレス 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 鋼の共合金溶接棒は、母材とほぼ同系の組成をもつ 25Cr-14Ni-0.8Mo-0.3N 系を基本組成とし、その溶着金属の耐孔食性および溶着金属の耐割れ性におよぼす Mo 量 (0.84~1.88%) およびフェライト量 (0~6%) の影響を調べた。なお、溶着金属の N 量は母材よりもやや低いので耐孔食性におよぼす N 量 (0.29~0.34%) の影響も検討した。これらの研究結果をもとにして、耐孔食性および耐割れ性がともにすぐれた溶接棒を 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N の耐孔食ステンレス鋼の溶接に用い、溶接継手の諸特性（継手引張、型曲げ、耐孔食、5% 硫酸試験による腐食減量、粒界腐食）について検討した。

2. 実験方法

供試母材は Table 1 に示す 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb の高強度ステンレス鋼および 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N の耐孔食ステンレス鋼を用いた。溶接棒の心線は Table 2 に示す 20Cr-9Ni, 20Cr-9Ni-0.2N-0.1Nb-0.1Ti および 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 鋼を用いた。供試溶接棒は、被覆剤の基本組成を 30% 石灰石-20% 螢石-11

% 珪灰石-4% ルチルのライム系¹⁴⁾とし、被覆剤中に Cr, Ni, Ferro-Mo(60%Mo), 窒化 Ferro-Mn(5.8%N, 77%Mn), Ferro-Nb(75%Nb) および Ti を添加し、溶着金属のフェライト, Mo, N, Nb および Ti 量を変化させた。これらの溶接棒の溶着金属の化学成分を Table 3 および Table 4 に示す。なお、溶接棒の被覆の外径は心線径 4mm に対し 6.3mm とした（心線重量に対する被覆剤重量の比は 0.5 である）。

窒素の歩留りは窒素の添加量に対して、JIS Z 3221 によつて溶接した母材の影響がない全溶着金属の窒素の分析値から計算によつて求めた。

溶着金属の機械的試験は JIS Z 3221 による溶接試験材から JIS Z 3111 A1 号の引張試験片および JIS Z 3112 4号の衝撃試験片を採取し、常温での引張試験および 0°C での衝撃試験を行つた。

孔食試験は、Table 5 に示す溶接条件で溶接し、溶接のままの状態で試験片を採取し、全面をエメリー研磨紙で 600 番まで研磨し、アセトンで超音波洗浄後、5% FeCl₃+1/20N HCl の溶液を用い、50°C, 48h 浸漬後の腐食減量を求め行つた。また、孔食電位の測定は JIS G 0577 (ステンレス鋼の孔食電位測定方法) によつて行つた。

溶接金属の割れ試験は JIS Z 3155 によつて行つた。

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of base metal.

Steel plate	Chemical composition (%)						Tensile properties			
	C	Cr	Ni	Mo or Nb	N	Other element	$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	El. (%)	vE0°C (kgf-m)
18Cr-8Ni-0.2N-Nb	0.05	18.45	8.00	Nb 0.11	0.21	Si 0.80 Mn 1.92 P 0.023 S 0.004	49.3	82.9	48.6	14.1 13.0 13.5
25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N	0.04	24.35	13.20	Mo 0.84	0.34	Si 0.81 Mn 1.64 P 0.021 S 0.008	42.0	80.0	48.0	—

Thickness of steel plate: 18Cr-8Ni-0.2N-Nb 30mm, 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 15mm

Table 2. Chemical composition of core wire of welding electrodes.

Core wire	Chemical composition (%)								
	C	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	N	O	Other element
20Cr-9Ni	0.04	20.10	9.44	—	—	—	0.04	0.0093	Si 0.30 Mn 1.61 P 0.009 S 0.007
20Cr-9Ni-0.2N-NbTi	0.04	20.46	8.97	—	0.08	0.12	0.21	0.0088	Si 0.62 Mn 3.46 P 0.009 S 0.007
25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N	0.03	25.03	13.54	0.85	—	—	0.32	0.0103	Si 0.70 Mn 1.59 P 0.020 S 0.005

Note: Diameter 4.0mm, Length 350mm

Table 3. Chemical composition of all-deposited weld metal of covered arc-welding electrodes (20Cr-9Ni-3Mn)

Mark	Core wire	Chemical composition (%)					Ferrite content* (%)		
		N	Si	Nb	Ti	Other element			
0.08N	20Cr-9Ni	0.08	0.42	—	—	C 0.06	4.9		
0.14N		0.14				Mn 3.5		1.8	
0.19N		0.19				P 0.01			
0.23N		0.23	S 0.007	0.8					
0.29N		0.29	Cr 20.5						
0.28N-Nb		0.28	Ni 9		0				
0.26N-Ti		0.26	Al 0.08						
0.29N-NbTi		0.29	O 0.039			0			
0.21N-NbTi		0.21	H 0.0005						
			0.49						0.56
		0.26	0.95				0.18		
		0.29	0.56				0.06		
	20Cr-9Ni-0.2N-NbTi	0.21	0.60				0.05	0.03	

Note: Testing method JIS Z 3221
*Measured by Ferrite-Scope

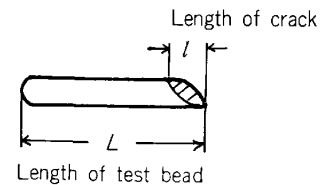
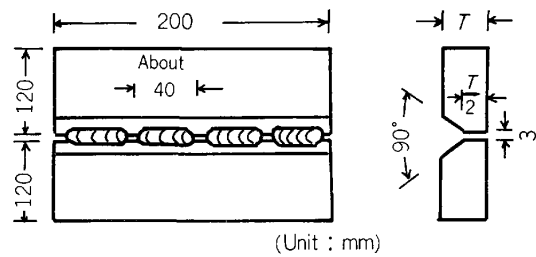
Table 4. Chemical composition of all-deposited weld metal of covered arc-welding electrode. (25Cr-13Ni-0.8Mo-0.30N)

Mark	Chemical composition (%)					Ferrite content* (%)
	Ni	Cr	Mo	N	Other elements	
0.8M-0.30N-0F	15.6	24.8	0.85	0.30	C 0.06 Si 0.7 Mn 2 P 0.025 S 0.005 Al 0.09 O 0.04 H 0.0005	0
0.8M-0.30N-1F	15.3	25.0	0.86	0.31		0.8
0.8M-0.30N-2F	14.5	25.1	0.86	0.30		2.0
0.8M-0.30N-5F	13.4	25.1	0.86	0.30		5.2
0.8M-0.34N-0F	13.9	24.1	0.87	0.33		0
0.8M-0.34N-5F	13.4	25.1	0.87	0.33		3.7
1.4M-0.30N-1F	14.4	24.3	1.23	0.29		1.5
1.4M-0.30N-5F	13.3	25.3	1.27	0.30		5.0
1.4M-0.34N-1F	13.4	24.0	1.32	0.34		0.5
1.4M-0.34N-5F	13.2	25.6	1.39	0.33		6.0
1.8M-0.30N-0F	15.1	24.5	1.71	0.31		0
1.8M-0.30N-1F	14.2	24.3	1.67	0.30		0.8
1.8M-0.30N-2F	14.3	24.5	1.70	0.30		2.4
1.8M-0.30N-5F	14.4	24.7	1.75	0.29		4.2
1.8M-0.34N-0F	13.7	24.1	1.88	0.34		0
1.8M-0.34N-5F	13.4	25.2	1.87	0.34		6

Note: Testing method JIS Z 3221
*Measured by Ferrite-Scope

Table 5. Welding conditions for pitting corrosion test specimens.

Welding position	Flat
Welding current AC (A)	135
Welding speed (cm/min.)	15 ~ 20
Pass sequence	
Sampling of pitting corrosion test specimen	 3T X 15 X 40 mm



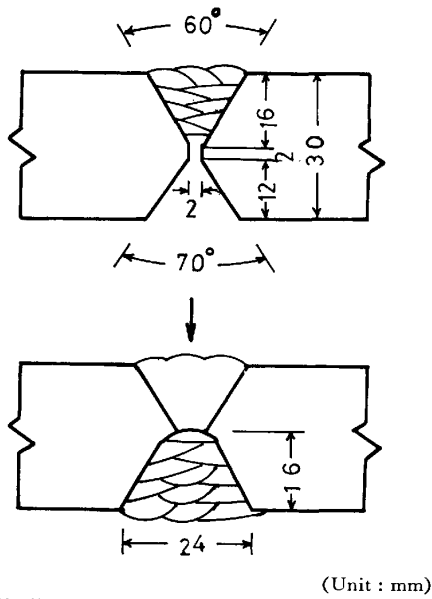
$$\text{Crack ratio (\%)} = \frac{\sum l}{\sum L} \times 100$$

Welding current : 135 A (AC)
Welding speed : 20 cm/min
Plate thickness : 30 mm (18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb)
15 mm (25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N)

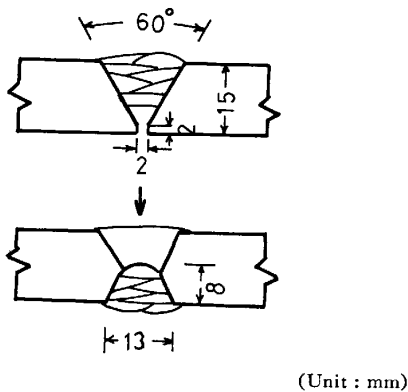
Fig. 1. Welding conditions of FISCO cracking test.

その溶接条件を Fig. 1 に示す。

18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb および 25Cr-13Ni-0.8Mo-



Welding current : 135 A(AC)
Welding speed : 14~18 cm/min
Fig. 2. Welding conditions of welded butt joint of 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb stainless steel.



Welding current : 135 A(AC)
Welding speed : 14~18 cm/min
Fig. 3. Welding conditions of welded butt joint of 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N stainless steel.

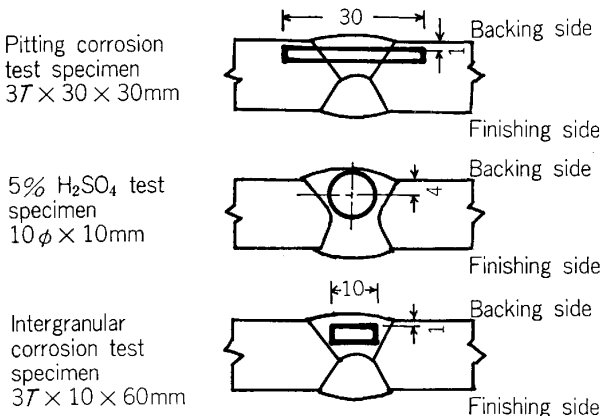


Fig. 4. Sampling of corrosion test specimens.

0.35N鋼の溶接継手の溶接条件は Fig. 2 および Fig. 3 にそれぞれ示す。これらの溶接試験材から JIS Z 3121 の継手引張試験片および JIS Z 3122 の型曲げ試験片を採取し、常温において継手引張および型曲げ試験を行った。また、25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 鋼の溶接継手試験材から Fig. 4 に示すとおり溶接金属と母材熱影響部とを含むように孔食試験片、溶接金属中から 5% 硫酸腐食試験片および粒界腐食試験片をそれぞれ採取した。5% 硫酸沸騰試験は JIS G 0591 (ステンレス鋼の 5% 硫酸腐食試験方法) によつて行つた。粒界腐食試験は JIS G 0575 (ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法) によつて行つた。

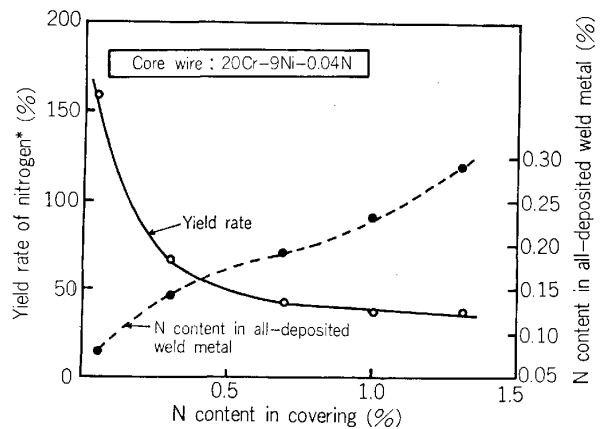
3. 実験結果とその考察

3.1 窒素の添加方法

Fig. 5 は被覆剤中の N 量と、溶着金属の N 量および窒素の歩留りの関係を示したものである。被覆剤中の N 量の増加とともに溶着金属の N 量は増加するが、窒素の歩留りは逆に減少する。溶着金属に 0.2~0.3% の高濃度の N を含有させるには窒素の歩留りが 50% 以下で低いため被覆剤中に多量の窒素を添加しなければならない。この場合は溶接作業性、特にスラグの剥離が劣るようになる。

また、溶着金属の N 量が 0.1% 以下の範囲では窒素の歩留りが 100% 以上を示している。これは大気中からの窒素の吸収によるものと考えられる。

Fig. 6 は心線の N 量と溶着金属の窒素の歩留りの関係を示したものである。この場合は、窒素の歩留りがほぼ 100% を示し、溶着金属に 0.2~0.3% の高濃度の N を添加しても溶接作業性におよぼす影響が小さい。



$$* \frac{(N\% \text{ in all-deposited weld metal}) - (N\% \text{ in core wire})}{(N\% \text{ in covering})} \times 100$$

Fig. 5. Relationship between nitrogen content in covering and yield rate, nitrogen content in all-deposited weld metal.

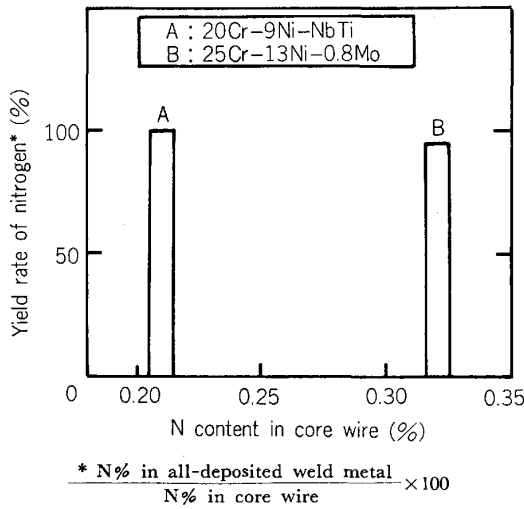


Fig. 6. Relationship between nitrogen content in core wire and yield rate of nitrogen in all-deposited weld metal.

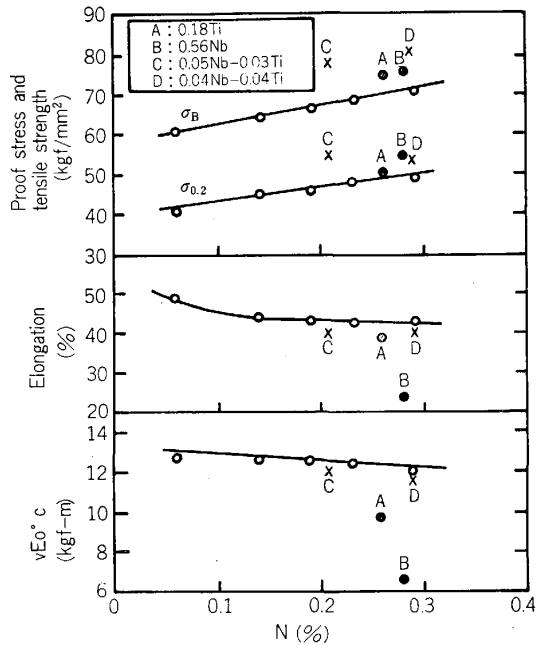


Fig. 7. Effects of nitrogen, niobium and titanium on mechanical properties of 20Cr-9Ni all-deposited weld metal.

以上の結果から、窒素の添加方法としては心線に窒素を含有させる方がもつとも適していると考えられる。

3.2 高窒素 18Cr-8Ni-0.1Nb 鋼用溶接棒

3.2.1 溶着金属の機械的性質におよぼすN量と Nb, Ti の単独添加および複合添加の影響

Fig. 7 は 20Cr-9Ni の溶着金属の機械的性質におよぼすN量の影響と、さらに Nb, Ti の単独添加および複合添加の影響を示したものである。N量の増加とともに0.2% 耐力および引張強さがN量と直線の関係にあるとして最小二乗法によりそれらの関係式を求めれば次のようになる。

$$\sigma_{0.2} (\text{kgf/mm}^2) = 39.4 + 34.1 \times (\text{N}\%)$$

$$\sigma_B (\text{kgf/mm}^2) = 57.6 + 45.1 \times (\text{N}\%)$$

すなわち N 0.1% の増加につき 0.2% 耐力は約 3.4 kgf/mm²、また引張強さは約 4.5 kgf/mm² それぞれ増加することになる。これらの増加の割合は岡本^らが 316L 型鋼で求めた値(N 0.1% 当たり、0.2% 耐力で約 5.6 kgf/mm²、引張強さで約 7 kgf/mm²) と比較して小さい。この原因は Table 3 に示すとおりN量の増加とともに溶着金属のフェライト量が減少し、これによる0.2% 耐力および引張強さの低下があるためと考えられる。

一方、伸びおよび衝撃吸収エネルギーはN量の増加とともにわずかの減少を示す。

Nb および Ti の単独添加により、溶着金属の 0.2% 耐力および引張強さはさらに増加し、逆に伸びおよび衝撃吸収エネルギーは減少する。溶着金属へ Nb と Ti をそれぞれ約 0.05% 複合添加することにより、伸びおよび衝撃吸収エネルギーを減少させないで 0.2% 耐力および引張強さが著しく増加する。すなわち、Table 3 に示す溶接棒記号 0.21N-NbTi の溶着金属の 0.2% 耐力および引張強さはそれぞれ 53 kgf/mm² および 77 kgf/mm² が得られ、SUS 304 N2 の規格値 (0.2% 耐力 35 kgf/mm² 以上、引張強さ 70 kgf/mm² 以上) を十

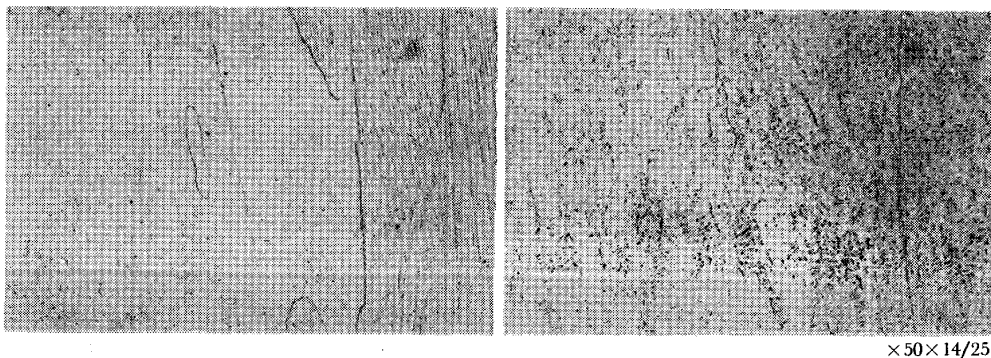


Photo. 1. Microstructures of weld metal of 0.23N and 0.21N-NbTi.

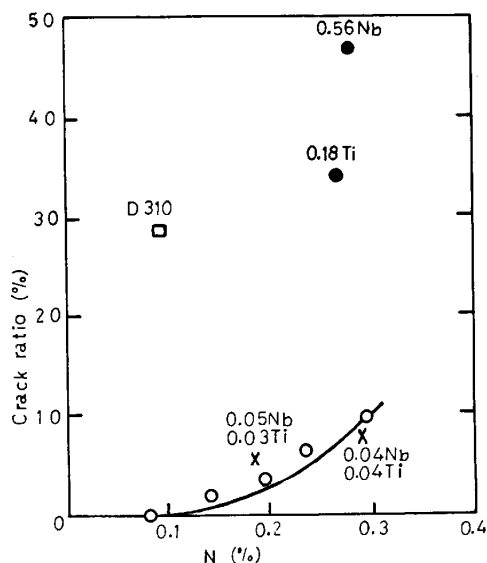


Fig. 8. Effects of nitrogen, niobium and titanium on cracking in 20Cr-9Ni weld metal.

分上回る。

Photo. 1 に 0.23N および 0.21N-NbTi の溶着金属の顕微鏡組織を示すが、Nb と Ti の複合添加により柱状晶が非常に微細化されている。

以上の事実から、溶着金属の強化機構はNによる固溶体強化および微量の Nb と Ti の複合添加による柱状晶の細粒化であると考えられる¹⁾⁸⁾¹⁰⁾。

3.1.2 溶接金属の耐割れ性におよぼすN量と Nb, Ti の単独添加および複合添加の影響

Fig. 8 は、溶接金属の高温割れにおよぼすN量の影響とさらに Nb, Ti の単独および複合添加の影響を示したもので、比較のため市販の完全オーステナイト系溶接棒 D310 の試験結果をも示す。N量の増加とともに溶接金属の割れ率は大きくなり、さらに 0.56% の Nb および 0.18% の Ti の単独添加は割れを著しく助長するが、約 0.05% の微量の Nb と Ti の複合添加は耐割れ性にはほとんど影響をおよぼさない。

また、Table 3 から明らかのようにN量の増加とともにフェライト量が減少し、0.29% のN量で完全オーステナイト組織となり、フェライト量の減少によつて割れ率は増加するが、比較材として試験した完全オーステナイト系溶接棒の D310 による溶接金属よりは割れ率が非常に小さい。このことから窒素は完全オーステナイト組織の範囲内で溶接金属の高温割れ防止に対し有効な元素であることが明らかとなった。

一方、これに対し Nb と Si は溶接金属の高温割れを著しく助長するとされている¹⁵⁾が、本研究からも Nb 単

独添加の 0.28N-Nb(0.56Nb) は溶接金属の割れ率が著しく大きいことがわかる。また、Ti 単独添加の 0.26N-Ti(0.18Ti) の溶接金属の割れ率も大きい、この原因は被覆剤中へ多量の Ti を添加しており、溶接に際して被覆剤中の SiO₂ が Ti によつて還元され、溶着金属中の Si 量が 0.95% と高くなるためであると考えられる。

以上の研究結果から、Nb あるいは Ti の単独添加は溶接金属の耐割れ性を著しく劣化させるが、微量の Nb と Ti を複合添加すると耐割れ性はあまり損なわれず、一方柱状晶は細粒化して約 0.2% の窒素添加との組み合わせ (0.21N-NbTi) で高い強度が得られ、この溶接棒は高強度ステンレス鋼 (SUS 304 N2) 用として十分な性能を有するものと考えられる。

3.2.3 溶接継手の確性

18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb の高強度ステンレス鋼 (SUS 304 N2) に対し、前節でもつともすぐれた特性を示す 0.21N-NbTi の溶接棒を用いて溶接し、継手試験を行った。その結果、継手引張強さは、約 79 kgf/mm² が得られ、SUS 304 N2 の規格値 70 kgf/mm² を十分上回る値である。型曲げ試験結果は表曲げ、裏曲げおよび側曲げのいずれの試験片とも無欠陥である。この溶接金属はフェライト量が 2% 以下と低いにもかかわらず、型曲げ試験における耐マイクロ割れ性が非常に良好である。

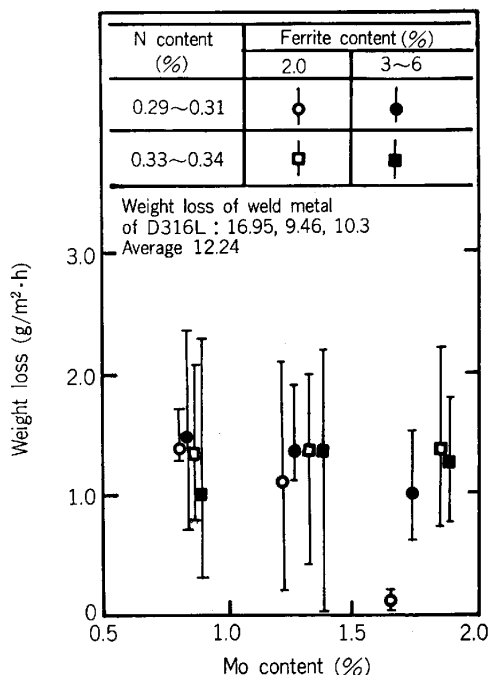


Fig. 9. Effects of molybdenum, nitrogen and ferrite content on weight loss by pitting corrosion of 25Cr-13Ni weld metal. (Corrosion: 5%FeCl₃+1/20 NHCl, 50°C, 48h)

3.3 高窒素 25Cr-13Ni-0.8Mo 鋼用溶接棒

3.3.1 耐孔食性におよぼす Mo, 窒素およびフェライト量の影響

Fig. 9 は孔食試験における腐食減量におよぼす Mo 量 (0.84~1.88%), 窒素量 (0.29~0.34%) およびフェライト量 (0~6%) の影響を示す. 安保ら³⁾が行った母材の研究結果ではオーステナイト一相に比べてフェライトの存在する二相組織で耐孔食性が劣ると報告されている. しかし本研究の Fig. 7 に示した検討範囲では, 各 3 個の試験片における腐食減量の平均値は 0.1~1.5 g/m²·h となり図に示したばらつきを考慮すると, Mo と窒素の添加量およびフェライト量の各因子の影響はほとんど認められない. また, これらの溶着金属の耐孔食性は, 母材 (腐食減量 1.0 g/m²·h 以下)³⁾ よりはやや劣るものの, D316L の溶接棒による溶着金属 (腐食減量 9.5~17 g/m²·h) と比較して非常にすぐれたものである. このことから, これらの溶着金属の耐孔食性は, 母材の場合³⁾と同様に Cr(25%), Mo(0.8%) および N(0.3~0.4%) との相乗効果によつて著しく向上しているものと考えられる.

一方, 0.8M-0.30N-2F の溶接棒による溶着金属の孔食電位を測定して母材と比較した. その結果を Table 6 に示す. これより, 溶着金属と母材の孔食電位 $V'_{0.100}$ はほとんど差異が認められない. しかし前述のように, 孔食試験による溶着金属の耐孔食性は母材よりもやや劣る. これは溶着金属の孔食進行速度が母材よりもやや大きいためと考えられる. 溶着金属は凝固のままの組織で, かつ熱サイクルを受け, ミクロ偏析および炭化物の析出などが孔食進行速度を大きくする原因と考えられる.

3.3.2 溶着金属の耐割れ性におよぼすフェライトおよび Mo 量の影響

Fig. 10 には, 溶着金属の高温割れにおよぼすフェライトおよび Mo 量の影響を示す. この図には溶着金属の

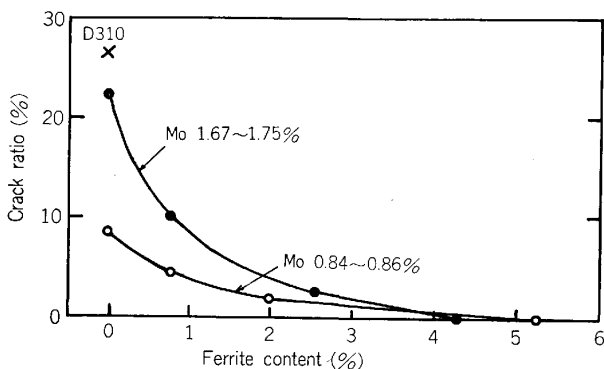


Fig. 10. Effects of molybdenum and ferrite content on cracking in 25Cr-13Ni-0.3N weld metal.

Table 6. Test results of pitting potential measurement of weld metal (0.8M-0.30N-2F) and base metal.

Material	Pitting potential (Vvs SCE)	
	$V'_{0.100}$	
Weld metal	0.96 0.96	Average 0.96
Base metal	0.95 0.97	Average 0.96

Note: Testing method JIS G 0577

Table 7. Mechanical properties of all-deposited weld metal of covered arc-welding electrode. (0.8M-0.30N-2F)

Tensile test			Impact test
$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	El. (%)	$v_{Eo}^{\circ C}$ (kgf-m)
52.8	74.0	40.6	8.9, 9.7, 8.1

耐割れ性比較のために完全オーステナイト系の溶接棒 D310 の試験結果をも併記した. フェライト量の増加とともに溶着金属の割れ率は減少し, フェライト量が 4% 以上ではほとんど割れは認められなくなる. Mo 量としては 1.8%Mo のほうが 0.8%Mo の場合よりも溶着金属の割れ率はやや大きい, これらの溶着金属の割れ率は比較材の D310 よりも小さい. この D310 はすでに広く実用されているものであり, 本実験に用いた溶接棒はそれに比べて耐割れ性がかなりすぐれ実用性が高いものと言える. なお, フェライト量が約 5% を超えると溶接に際してブローホールの発生傾向が大となる¹³⁾.

以上の研究結果から, 溶着金属の Mo 量は母材の Mo 量 (0.8%) 以上に添加しても溶着金属の耐孔食性の向上は認められず, むしろ溶着金属の割れ率は増加する傾向を示すので, 溶着金属の望ましい化学成分は 25Cr-14Ni-0.8Mo-0.3N である. また, フェライト量としては 2~5% が適量であり, Table 4 の 0.8M-0.30N-2F が最適の溶接棒であると結論される.

3.3.3 溶接継手の確性

前節の結果から 0.8M-0.30N-2F を溶接棒として選び, この溶接棒を 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.3N の耐孔食ステンレス鋼の溶接に用い, 溶接継手試験を行った.

Table 7 には供試溶接棒の溶着金属の機械的性質を示したが, 特に 0.2% 耐力と引張強さが高い.

継手引張強さは約 77 kgf/mm² が得られ, 破断位置は溶着金属である. 型曲げ試験結果は表曲げおよび裏曲げのいずれの試験片も無欠陥である.

溶接継手部の溶着金属と母材熱影響部とを含む試験片の孔食試験による腐食減量は, 3.29, 3.30, 2.10 で平

均 2.93 g/m²·h が得られ、前述した母材の値 (1 g/m²·h 以下) および溶接金属の値 (0.1~1.5 g/m²·h) よりもやや大きい。このことは母材熱影響部の耐孔食性が母材および溶接金属よりもやや劣ることを示しているが、この原因としては溶接熱サイクルにより Cr 炭化物および Cr 窒化物の析出による Cr 欠乏層の生成が考えられる。

5% 硫酸試験による腐食減量は、0.30, 0.24, 0.81 で平均 0.45 g/m²·h が得られ、JIS Z 3221 の D316L および AWS A5.4 の E310 Mo に分類される溶接棒による溶着金属 (腐食減量はそれぞれ 4 g/m²·h および 3.7 g/m²·h) と比較しても非常に小さい。

溶接金属の粒界腐食は、溶接のまま、650°C-2 h の鋭敏化処理、および 1100°C-0.5 h の固溶化熱処理後 650°C-2 h 鋭敏化処理を施したいずれの試験片にも認められない。

4. 結 論

高強度ステンレス 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb 鋼および耐孔食ステンレス 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 鋼用の共金系溶接棒を開発するため、まず窒素の添加方法について検討した。前者に対しては 20Cr-9Ni-3Mn 系の溶着金属の機械的性質および溶接金属の耐割れ性におよぼす N 量と Nb, Ti の単独および複合添加の影響について調べた。また、後者に対しては 25Cr-14Ni-0.8Mo-0.3N 系の溶着金属の耐孔食性および溶接金属の耐割れ性におよぼす Mo 量とフェライト量の影響を明らかにした。これらの結果から高強度ステンレス鋼および耐孔食ステンレス鋼用の共金系溶接棒を開発した。これらの鋼種に対してそれぞれに開発した共金系溶接棒を用いて溶接した継手の確性試験を行った。それらの結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 溶着金属に 0.2~0.3% の高濃度の窒素を含有させる方法として被覆剤よりも心線に窒素を添加する方は、窒素の歩留りが高く、かつ溶接作業性におよぼす影響が小さい。

(2) 高強度ステンレス 18Cr-8Ni-0.2N-0.1Nb 鋼用の溶接棒として開発された 20Cr-9Ni-3Mn 系の溶着金属の 0.2% 耐力および引張強さは N 量の増加とともに比例的に増加する。さらに微量の Nb と Ti の複合添加により 0.2% 耐力および引張強さはいちじるしく増加する。0.2% の N, それぞれ 0.05% の Nb と Ti の複合添加によつて、耐割れ性を損なわないで 70 kgf/

mm² 以上の引張強さが得られる。

(3) 耐孔食ステンレス 25Cr-13Ni-0.8Mo-0.35N 鋼の溶接棒として開発された 25Cr-14Ni-0.8Mo-0.3N 系の溶着金属の孔食試験による腐食減量は 0.1~1.5 g/m²·h の範囲にあり、母材 (1 g/m²·h 以下) よりもやや大きい。溶着金属の孔食電位 V'_{c100} (0.96 V_{vs} SCE) は母材とほぼ同じである。このことから溶着金属の孔食の発生特性は母材とほぼ同等であるが、孔食の溶出速度は母材よりもやや大きいと考えられる。Mo 量を 1.8% および N 量を 0.34% まで増加しても耐孔食性の向上は認められない。溶接金属の割れ率はフェライト量の増加とともに減少するが、耐孔食性はフェライト量を 5% まで増加しても劣化しない。

(4) 心線に窒素を添加したこれら 2 種類の溶接棒を用いて溶接されたそれぞれの鋼種の溶接継手の確性試験結果は、いずれも 70 kgf/mm² 以上の継手引張強さが得られ、型曲げ試験においても欠陥は認められなかった。

本研究を遂行するにあたり、種々御検討、御討議および御指導をいただきました東京工業大学 田中良平教授に深甚の謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 岡本正三, 田中良平, 藤本六郎, 内藤武志: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 123
- 2) 岡本正三, 田中良平, 藤本六郎: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 1694
- 3) 安保秀雄, 野口 栄, 林 巨幸, 上田全紀: 防食技術, 23 (1974), p. 303
- 4) 中沢崇徳, 角南達也, 安保秀雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 949
- 5) 財前 孝, 青木司郎, 鈴木克己, 樺沢 弥: 溶接学会誌, 51 (1982), p. 1020
- 6) 圓城敏男, 菊地靖志, 永田 浩: 溶接学会論文集, 1 (1983), p. 272
- 7) 長野博夫, 小林大機, 柘植宏之, 丸山信幸: 鉄と鋼, 65 (1979), S 1043
- 8) 行俊照夫, 吉川州彦, 榎木義淳, 加藤信一郎: 鉄と鋼, 65 (1979), S 1044
- 9) 長野博夫, 柘植宏之, 丸山信幸, 永田三郎: 鉄と鋼, 68 (1982), S 549
- 10) 吉川州彦, 榎木義淳, 加藤信一郎: 鉄と鋼, 68 (1982), S 550
- 11) 三浦 実: 鉄と鋼, 68 (1982), S 551
- 12) 小川忠雄, 財前 孝: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 246
- 13) 常富栄一, 青木司郎, 熊谷良平, 藤本六郎, 野田徹, 前田久雄: 溶接学会全国大会講演概要, 第20集 (1977), 4 月, 84 (論文投稿中)
- 14) 野田 徹, 青木司郎, 熊谷良平, 藤本六郎, 前田久雄: 特公昭 59-20435
- 15) 長谷川正義: ステンレス鋼便覧 (1960), p. 690 [日刊工業新聞社]