参 考 文 献

- 1) 松永, 森田: 化学工場 16-12 (1972) 35-40
- 2) 須永: ステンレス鋼の損傷とその防止, 日刊工業新聞社 (1977)
- 3) 武川, 三木, 石丸: 化学工学 44-3 (1980) 128-135
- 4) K. J. Irvine et al.: J. I. S. I., 207 (1969), 1017
- 5) ASTM A412-1975
- 6) W. O. Binder, H. R. Spindelov: Trans Am. Soc. Met. 43 (1951), 759-777
- 7) R. A. Lula: Toughness of Ferritic Stainless Steels (1980), ASTM-STP No. 706
- 8) R. F. Steigerwald et al.: Corrosion 33-8 (1977), 279-295
- 9) 鈴木: 鉄と鋼 46-4 (1960) 498, 46-5 (1960) 578
- 10) 中村: 鉄と鋼 63-5 (1977) 872-882
- 11) 寺井: 第44回西山記念技術講座, ステンレス鋼技術の進歩 (日本鉄鋼協会, 1977) 220-265
- 12) A. L. Shaeffer: Metal Prog. 56 (1949), 680
- 13) W. T. Delong et al.: Welding J. 35-11 (1956), 521-528

3. 二相ステンレス鋼の溶接*

福 井

太**

Weldability of Duplex Stainless Steel*

by Futoshi Fukui**

3.1 緒 言

二相ステンレス鋼 (以下二相鋼と呼ぶ) はオーステナイト相とフェライト相の両相からなるステンレス鋼で主として耐孔食性, 耐応力腐食割れ性を目的に開発された。この二相鋼は強度が高く, 耐孔食性, 耐応力腐食割れ性, 耐スキマ腐食性が従来のオーステナイト鋼やフェライト鋼にくらべずぐれているので化学プラント機器, 船舶用熱交に実用され好結果を得ている。又そのすぐれた耐食性から他の分野でも注目されている鋼種である。

本報文では二相鋼の溶接に関連する諸現象について熱的挙動, 溶接部の特性を中心に記述した。

3.2 二相鋼の種類と特徴

二相鋼の一般的な組織はフェライト地にオーステナイト相が分散しているもので固溶化熱処理状態ではその比率はほぼ 1 : 1 に近い。

よく知られている市販鋼の種類と化学成分を表 3.1 に示す。ほとんどのものが耐孔食鋼, 耐応力腐食割れ鋼として開発されたが中には耐応力腐食割れに重点をおいて開発された NTK C-1, SANDVIK 3RE60 などがある。

AISI329 は昔からよく知られていたがわが国では 1972 年に SUS329J1 として JIS 鋼種に規格化された。市販の各鋼種には Mo, N, Si, Cu, W などが目的に応じて

添加されそれぞれ特徴をもたせている。

二相鋼の物理的機械的性質は一般にオーステナイト系とフェライト系の中間的な性質をもっているが二相鋼特有の性質もある。二相鋼の特徴を要約すると¹⁾,

- 1) オーステナイト系にくらべて熱膨脹係数が小さく, 熱伝導度が大い。
- 2) 常温付近での強度, 特に耐力が高いが, 高温強度はオーステナイト系にくらべ小さい。
- 3) 靱性, 延性はオーステナイト系よりも低い。
- 4) 熱処理による組織変化が大きく, 耐食性をはじめとする諸性質に影響を与える。
- 5) 粒界腐食, 応力腐食割れに対する抵抗性がある。特に低応力レベルでの抵抗性が大きく, 高応力レベルではオーステナイト系と同様割れやすい。
- 6) 溶接時の高温割れ感受性は小さく溶接性は良いが, 熱間冷間加工性はオーステナイト系より劣る。
- 7) 高 Cr 系で Mo, N を含むものは耐孔食性が大きい。

3.3 二相鋼の熱処理と特性変化

二相鋼は各種の熱処理によって組織変化を起こし, これにともなう耐食性や機械的性質が変化する。主な変化を要約すると,

3.3.1 組織変化

二相鋼を高温に加熱するとフェライト量が増加し結晶粒の粗大化が生ずる。また各相中の組成も変化する。し

*原稿受付 昭和55年12月26日

**正 員 日本金属工業(株) Member, Nippon Metal Industry Co., Ltd.

表 3.1 市販二相鋼の種類と化学成分

鋼 種 名	成 分 (%)							備 考
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	そ の 他	
NAS 45M	≤0.03	≤1.00	≤1.50	22.50~25.50	4.00~6.00	1.00~2.00	Cu 0.50~1.50	耐孔食，耐応力腐食割れ
NAR F	≤0.10	≤1.00	≤2.00	24.0~26.0	5.00~8.00	1.50~2.50	N 0.10~0.15	"
NSS329M1	0.025	0.39	0.57	25.82	4.96	1.50		
DP3	≤0.03	≤0.75	≤1.00	24.0~26.0	5.50~7.50	2.50~3.50	Cu, W	耐孔食，耐応力腐食割れ
NTKR-4	≤0.03	≤1.00	≤1.00	23.00~26.00	4.00~6.00	1.00~2.50	N	"
NTKC-1	≤0.04	≤1.00	≤2.00	21.00~23.00	4.00~5.50			耐応力腐食割れ
SUS329J1	≤0.08	≤1.00	≤1.00	23.00~28.00	3.00~6.00	1.00~3.00		
SANDVIK 3RE60	≤0.06	1.7	1.5	18.5	4.7	2.7		耐応力腐食割れ
Uniloy 326	0.04	0.40	0.50	26.0	6.5		Ti 0.20	
Uranus 50	0.03	0.5	0.5	20~30	7~8	2.5	Cu 1.5	耐応力腐食割れ

たがって溶接入熱により熱影響部やボンド部の組織や組成は母材部のそれらとはちがってくる。しかし固溶化熱処理によって回復する現象が見られる。

3.3.2 シグマ相の析出物および 475°C 脆化

固溶化熱処理温度以下での加熱による組織変化としては主に700~800℃付近でのシグマ相の析出およびこれよりやや低温にノーズのある炭化物の析出である¹⁾。しかしオーステナイト相の存在のためフェライト単相の鋼にくらべて脆化の程度は少ない。また475℃脆化もフェライト単相鋼より緩和され特に低Cr二相鋼では475℃脆化をおこしにくい²⁾。

3.3.3 耐食性

高温加熱によるオーステナイト量の減少は二相鋼の耐応力腐食割れ抵抗性を減少させる。図3.1は耐応力腐食割れ鋼である21Cr-5Ni二相鋼についての試験結果で加熱温度の上昇と共にフェライト量が増加し破断寿命が短かくなっている³⁾。耐孔食性も高温加熱やシグマ相の析出によって影響をうける。表3.2¹⁾に示したように10% FeCl₃溶液による浸漬試験では固溶化熱処理状態の腐食減量が1 g/m²・hr以下であるのに対し1300℃で30分間加熱すると減量は30~40 g/m²・hrにも達する。この1300℃で加熱した試料を500℃~1000℃でそれぞれ5分再加熱した場合の腐食減量を見ると500℃~900℃の再加熱の効果は殆んど見られないが1000℃の再加熱によりほぼ固溶化熱処理状態の値まで回復している。これは組織、組成の変化とも対応している。

二相鋼の耐食性に対する熱処理の影響は応力腐食割れおよび孔食に対して顕著にあらわれ、粒界腐食や全面腐食に対する影響は少ない。

3.4 二相鋼の溶接と溶接部の特性

3.4.1 溶接施工

二相鋼の溶接はオーステナイト鋼と略同条件で行なうことが出来る。通常 TIG 又は被覆アーク溶接法が適用

図 3.1 21Cr-5Ni 二相鋼の応力腐食割れに対する加熱温度の影響 (沸騰42% MgCl₂ 溶液)

されている。予熱後熱は必要としないが入熱はできる限り少なくする事が望ましい。表3.3に市販されている溶材の銘柄と全溶着金属あるいはワイヤーの化学成分を示す。表3.4には溶接施工条件例を示す。

3.4.2 溶接部の組織と組成

SUS329J1 型二相鋼の溶接継手の顕微鏡写真を図3.2および図3.3に示す。図3.2はTIG溶接継手、図3.3は被覆アーク溶接継手である。写真からも見られる通り熱影響部で結晶粒の粗大化とオーステナイトの減少が起っている。

21Cr-5Ni 型二相鋼を TIG 溶接 (溶加棒 310S) した試料の組成変化について泉⁴⁾らがマイクロアナライザーで測定した一例として次のように報告している。

表 3.2 329J1 型二相鋼の耐食性に及ぼす高温加熱の影響

	試験条件 熱処理条件	10%FeCl ₃ +N/20HCl 30°C, 24 hr (g/m ² ・hr)		5%H ₂ SO ₄ Boil, 6hr (g/m ² ・hr)	
(A)	1050°C, 10 min	0.10	0.23	2.3	1.5
(B)	(A)+1300°C, 30 min	31.7	39.1	3.2	4.5
(C)	(B)+ 500°C, 5 min	35.6	28.4	3.4	3.5
(D)	(B)+ 600°C, 5 min	26.1	28.1	8.1	9.1
(E)	(B)+ 700°C, 5 min	34.7	18.0	0.61	0.64
(F)	(B)+ 800°C, 5 min	26.5	24.9	0.29	0.36
(G)	(B)+ 900°C, 5 min	19.5	20.3	1.4	0.7
(H)	(B)+1000°C, 5 min	0.29	0.34	1.5	1.1

表 3.3 二相鋼用の溶材と化学成分

銘 柄	成 分 (溶着金属又はワイヤー) %							適 用 鋼 種
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	その他	
WEL25-5	0.038	0.48	1.58	25.28	7.98	1.87		SUS329J1
WEL25-5Cu	0.022	0.62	0.45	24.33	8.24	1.91	Cu 1.30	SUS329J1 Modify
RNY R-4	0.028	0.26	0.74	24.29	7.11	1.96		SUS329J1
NAS 45M	0.04	0.4	0.3	25.0	6.5	2.2	Cu	"
NAR-F	≤0.03	≤1.50	≤2.00	24.0~26.0	7.5~8.5	1.50~2.50		"
DP3	0.02	0.49	0.84	27.6	7.85	2.7	W Cu	"

表 3.4 二相鋼の溶接施工例

形 状	厚 さ (mm)	開 先	溶接方法	棒 径 (mm)	シールドガス	電 流 (A)	溶接速度 (cm/min)
板	10	V	被覆アーク	4.0	—	120—160	15~ 20
板	6	V	"	3.2	—	100—120	25
板	6	V	"	3.2	—	150—170	30
板	3	V	TIG	2.6	Ar	90—120	10~ 12
板	1.2~2.0	I	TIG	—	Ar	110—150	60~120

図 3.2 SUS 329J1 型鋼の TIG 溶接継手の顕微鏡組織 (×100)

図 3.3 SUS 329J1 型鋼の被覆アーク溶接継手の顕微鏡組織 (×100)

1) 素材部 Cr: 21%, Ni: 5% に対し HAZ は Cr: 20.5%, Ni: 5.3%.

2) 組成の変動は素材部より HAZ の方が小さい。

3) HAZ では素材部よりフェライト相で Cr が少なく、オーステナイト相では Cr が多くなっている。

3.4.3 溶接部の機械的性質

溶接金属の機械的性質の測定例を表 3.5 に示す。TIG 溶接および被覆アーク溶接との間に大きな差はないが、シャルピー衝撃値は TIG 溶接の方が若干良好である。溶接継手の機械的性質試験例を表 3.6⁵⁾、表 3.7⁶⁾ に示す。表 3.6 には SUS329J1 型二相鋼についてパス間温度の影響を試験した結果を示した。ビード部のシャルピー衝撃値は TIG 溶接が被覆アーク溶接にくらべ良好であるがパス間温度の影響は殆んど認められない。また母材にくらべ引張強さ、衝撃値とも大幅な低下は見られない。図 3.4⁵⁾ に溶接部の硬さ分

表 3.5 SUS329J1 型二相鋼の溶着金属の機械的性質 (R. T)

溶接方法	熱処理	溶加棒	母材板厚 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	曲げ (R=t)	硬さ (Hv)
TIG	As welded	共 金	15	8	68	25	O. K	281
被覆アーク	"	"	12	80	67	24	O. K	267
"	"	"	19	80	69	24	—	—
"	"	"	10	82	64	27	—	—

シャルピー試験結果 (As welded, 2 mmV ノッチ)

溶接方法	溶加棒	シャルピー衝撃値 (kg・m/cm ²)		
		-20°C	0°C	R. T
TIG	共金 (3.2φ)	6.1	8.7	10.8
被覆アーク	"	4.5	4.9	6.2

表 3.6 329J1 型二相鋼の溶接継手の機械的性質 (R. T)

溶接方法	バス間冷却*	引張強さ (kg/mm ²)	シャルピー衝撃値 (0°C)	
			ビード部	ボンド部
TIG	水 冷	79	12.1	10.7
	空 冷	79	12.8	10.5
	連 続	78	10.2	10.4
被覆アーク	水 冷	80	7.5	10.8
	空 冷	81	7.4	10.8
	連 続	78	7.3	10.6
母 材 (15 mm 厚)		80	圧延直角 10.3	圧延平行 14.9

*水冷 <50°C, 空冷 <100°C, 連続 100~250°C.

表 3.7 21Cr-5Ni 二相鋼の突合せ溶接部の引張強さ及び曲げ角度

溶加棒	引張強さ (kgf/mm ²)	破断位置	曲げ角度 (R=2t)
共 金	67.2	溶接金属部	180° 以上
Y 308	67.6	"	"
Y 309	68.4	"	"
Y 310	65.8	"	"
(母 材)	(67.8)		

板厚 6mm TIG

布を示す。表 3.7 から見られるように 21Cr-5Ni 系の溶接継手の強度は溶接棒の種類によって特に大きな差はないが、D310 の場合はやや強度が低くなっている。

3.4.4 溶接部の耐食性

二相鋼の母材の耐食性はかなりすぐれているが溶接部は溶接入熱の影響をうけ前述のように組織変化を生ずる。すなわち熱影響部ではフェライト相が多くなりオーステナイト相が少なくなるため耐食性が劣化しやすい。しかし溶接入熱を極力小さくすると共に冷却速度を速くする等施工上の配慮で劣化を最小限に抑えられる。材料面からは成分元素の配合を考慮し、例えば N の添加や Mo 含有量を高めることで耐食性の改善を図っている⁶⁾。各種の溶接方法を用いて耐食性への影響を X2CrNiMo

図 3.4 329J1 型二相鋼の溶接継手の硬さ分布

N225 鋼で調べた報告⁹⁾では熱影響部のフェライト量が 60%を超えることがなく、したがって熱影響部の耐食性は大きく劣化することはないといわれている。耐力力腐食割れ鋼である 21Cr-5Ni (NTK C-1) の溶接試料についての応力腐食割れ試験と 65%硝酸試験結果の一例を表 3.8⁷⁾に示す。リング状に肉盛溶接した試料の 42% MgCl₂ 溶液中での応力腐食割れ試験結果である。SUS304 に比較して初期割れ発生時間もかなり長くなっており耐力力腐食割れ鋼としてその特徴がうかがえる。表 3.9¹⁾には SUS329J1 型二相鋼の 65%硝酸試験結果を母材と溶接継手について示した。溶接のままでも耐硝酸性は劣化していない。なお溶接部の耐食性に関しては小若⁶⁾らのくわしい報告がある。

3.4.5 溶接部の疲れ強さ

Cr 21.7%, Ni 5.25%, C 0.02% の溶接試料 (溶加棒 Y310S TIG 溶接) について試験した泉⁴⁾らの結果では、片振引張疲れ試験の疲れ限度は母材で 38.4 kg/mm²、溶接材で 32~33 kg/mm² と余り大きな低下は見られない。また溶接電流の高い試料 (余盛角 37°) の方が低い試料 (余盛角 18°) よりやや疲れ限度が高くなっている。329

表3.8 21Cr-5Ni 二相鋼の溶接試料腐食試験結果

試験法 溶接棒	応力腐食割れ試験*		65%硝酸試験** (g/m ² ・hr)
	初期割れ発生時間 (hr)	割れ発生位置	
D 347	1~2	境界部	—
D 309	11~27	"	0.21
D 310	26~50	"	0.18
母材 SUS304 D 308	2~4	母材, 熱影響部	—

* リング肉盛試料 42% MgCl₂ 溶液** 65% HNO₃ 沸騰 48hr 3 period 平均

表3.9 SUS329J1 型二相鋼の65%硝酸試験結果

試料	熱処理	腐食減量 (g/m ² ・hr)
SUS329J1 型 (25Cr-5Ni- 2Mo-N)	2 mm 板	0.12
	固溶化熱処理	0.13
	475°C × 4hr	0.30
	650°C × 2hr	0.59
	1300°C × 5 min	0.15
溶接継手	TIG 15 mm 板 被覆アーク 15 mm 板	0.14

J1 型二相鋼の回転曲げ疲れ試験では母材の疲れ限度 43 kg/mm², 共金溶接材 36 kg/mm² という試験結果もある。

3.4.6 溶接部の時効特性

Cr : 17.84%, Ni : 4.87%, Mo : 2.48%, C : 0.041% の二相鋼で種々試験した村上⁹⁾らの結果では,

(1) 二相鋼の時効処理による靱性低下にはシグマ相脆化が関与している。

(2) シグマ相脆化にともなう靱性の低下は母材及び熱影響部で同様な挙動を示す。これはシグマ相がオーステナイト相の析出を伴って変態することに関係している。

(3) 475°C 脆化による靱性の低下は母材及び熱影響部で異なっている。これはフェライト相の粒徑に依存しているものと考えられる。

(4) 800~900°C の最高到達温度の熱サイクルを与えるると475°C脆化は抑制される。

3.4.7 溶接施工上の注意事項

二相鋼の溶接に際し一般的な施工基準はオーステナイト系と同様である。特に留意すべき点としては、入熱量を少なくすること、アークストライクを母材部で行わないこと、開先面を清浄にすること等であろう。その他二相鋼は水素脆化によってビード部が割れることがあるのでシールドガスに H₂ ガスを混合することはさけた方がよい。純 Ar ガスの使用が望ましい。

3.5 溶接後の熱処理

溶接部の組織変化にともなう耐食性や機械的性質の劣化は熱処理によって回復する。二相鋼の焼なまし熱処理

表3.10 SUS329J1 型二相鋼の応力腐食割れに対する応力除去熱処理の効果

熱処理温度 (°C)	加熱時間 (hr)	割れ発生時間 (hr)
溶接のまま	—	1
500	1	3
	2	8
	3	>1.000
600	5 min	>1.000
	30 min	>1.000
	1	>1.000
	2	>1.000

(42% MgCl₂ 溶液沸騰試験リング溶接試料)

は1000~1100°Cに加熱後急冷する。冷却速度は速いほど靱性、耐食性共に良好となる。尚 21Cr-5Ni 鋼 (NTK C-1) は1000°Cが最適とされている。

650~850°Cでの加熱はシグマ相の析出によって靱性、耐食性に影響をおよぼす。したがって応力除去熱処理は一般には推奨できないが必要とされる場合は900°C以上に加熱して空冷するか、600°C前後の比較的低温で処理することが望ましい。応力腐食割れの防止には600°C前後の短時間加熱でかなりの効果があり、粒界腐食の心配もない。SUS329J1 型二相鋼の応力腐食割れに対する応力除去熱処理の効果を試験した結果の一例を表3.10に示す⁹⁾。

3.6 実 用 例

二相鋼の実用例としては応力腐食割れ及び孔食に対する抵抗性を利用したものが多いが高強度をあわせもっているので遠心分離機や高圧ポンプ部品に使用されている。

淡水環境では工業用水, 河川水, 地下水など淡水を冷却水とする熱交換器に使用され好結果を得ている。実用例の塩素イオン濃度及びプロセス側の温度は最高 1150 ppm, 180°Cとなっている¹⁾。

海水熱交の伝熱管として銅合金管に代り, 1960年頃より実用化されており使用開始当初の事故を除けばほぼ満足できる結果を得ている。主として化学工業用として使用された海水熱交の使用結果を解析した水野⁹⁾の報告では,

(1) 熱交の事故は熱点腐食による局部的腐食生成物の発生, 成長, 固着により誘発されたスキマ腐食によるものである。

(2) したがって熱点腐食を生じさせぬ対策として生物発生をなくすこと, 海水中浮遊物の流入を防ぐこと, 冷却海水の流速を速め設計値として 1.5 m/sec 以上にする。

(3) 熱交使用領域としては熱交の型式にもよるが、圧力 P (kg/cm^2) $\times$ 温度 t ($^{\circ}\text{C}$) に関し

(i) コンデンサー： $P\times t$ を略60以下にする

(ii) クーラー： $P\times t$ を略100以下にする

の結果が得られている。

この他塩化物、リン酸環境などでも熱交の伝熱管としての使用実績も多い。

3.7 む す び

二相鋼のすぐれた耐食性や強度などの特徴を十分に生かすためには、溶接部をいかに劣化させないかにかかっている。本鋼種は熱影響に対して敏感であるので溶接施工に当っては材料の特性を十分理解し適切な溶接条件で行なう必要がある。材料面からの改良と共に実用データの積重ねによる利用技術の開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 原田：耐食二相ステンレス鋼，防食技術，26 (1977) 721-730
- 2) SANDVIK 社資料
- 3) M. Watanabe, T. Suzuki, G. Shinoda: Microanalysis of a two-phase Stainless Steel. Proceedings of the 6th International Conference on X-ray optics and microanalysis (1972), 713-717
- 4) 泉，砂田，篠田：二相ステンレス鋼の疲労強度について，日本金属学会誌，35 (1971) 324-330
- 5) 原田：耐海水ステンレス鋼 NTKR-4，高圧力，8-4 (1970) 40-47
- 6) 長野，小若：二相ステンレス鋼の溶接部の耐食性：鉄と鋼 66-8 (1980) 1150-1159
- 7) 鈴木：オーステナイトフェライト二相ステンレス鋼の研究，学位論文
- 8) W. Wessling, H. E. Bock: Properties and applications of recently developed Ferrite/Austenite Steel Containing 0.02%C, 22%Cr, 3%Mo and 0.12%N in Comparison with Mo-alloyed Austenite steels, Stainless Steel a Global Forum, 77, paper 16 (1977)
- 9) 村上，池内，西岡，河原：フェライトオーステナイト系二相ステンレス鋼溶接部の特効特性，本誌 49-3 (1980) 213-219
- 10) 水野：二相ステンレス鋼の海水熱交への使用とその問題，防食技術，27 (1978) 291-300

4. 高シリコンステンレス鋼の溶接*

西 間 勤**

Welding of the High Si Stainless Steels*

by Tutomu Nishima

4. 高シリコンステンレス鋼の溶接

4.1 高シリコンステンレス鋼の特性

オーステナイトステンレス鋼で耐食耐熱用として、もっとも広く使用されている鋼種は SUS304 であり、一般化学工業用の耐食用として広く汎用されている鋼種は SUS316 である。また耐熱鋼としては SUH310, SUS310S が汎用されている。これら汎用鋼に対して高シリコンステンレス鋼は当初耐応力腐食割れ (SCC) 鋼として開発され、その後耐酸化性および高温高濃度の硝酸に対する優れた耐食性等で、これらの用途に対する、いわば専用鋼種として発達して来た。

以下に該鋼種の特性についてのべ、次章で溶接上の問題点について述べることにする。

4.1.1 化学組成と機械的性質

表 4.1 に該鋼種の化学組成とメーカー各社の商品名を示す。まず耐食用では 18Cr-13Ni-4Si で代表される SUS XM 15J₁ に包含されるものが多く、メーカーによっては Cu 入りや P を規制したものも散見される。SCR-2, 3 は Si は低目であるが Ni, Cr が高目になっている。

耐熱用としての一つに SUS302B があり、各社とも 302B の記号を使用している。もう一つに SUS XM 15J₁ に包含されるものがある、また NTK309B は SUH309 に Si を高くしたものである。

常温機械的性質の規格値は、SUS304, 316と同一レベルであり耐力 21 kg/mm^2 、引張り強さ 53 kg/mm^2 以上である。また、図 4.1 に高温短時間引張り試験の一例を示し、ASME code Sect VII Div 2 に規定されている TYPE316 の耐力保証値を併記したが、これを十分に上

*原稿受付 昭和56年1月6日

**日本冶金工業(株) Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd.