ニッケルおよびニッケル合金の溶接割れに 関する研究(第1報)*

— Al および Ti の影響 —

足立 正博** 乾 誠**

A Study of Weld Crackings in Nickel and Nickel alloys (Report 1)*

—Effect of aluminum and titanium—

by Masahiro Adachi** and Makoto Inui**

A small amount of aluminum and titanium are generally added, so as to avoid the porosity in weld metals and improve their mechanical properties, to the nickel and monel welding electrodes.

Such addition of aluminum and titanium, however, it may be promoted the possibility of crack occurrence of the weld metals, because the content of silicon in the weld metals shall increase by reducing reaction of the aluminum and titanium to the silicates of coating flux.

The authors investigated on the effect of aluminum and titanium in nickel and monel welding electrodes on weld crackings of nickel and monel weld metals.

The results are summerized as follows.

1) In nickel weld metals, hot crackings are remarkably observed with increasing aluminum and titanium in the welding electrodes.

This is considered that some low melting substances are formed in austenite grain-boundaries with the reducing reaction of aluminum and titanium to the silicates.

On the contrary, in monel weld metals such a phenomenon was not observed.

2) Amount of aluminum and titanium in nickel weld metals was increased with aluminum and titanium contents in the welding electrodes and such elements were considered to be cause of the decrease of oxygen in the weld metals.

Therefore, micro crackings with decreasing ductilities (refers as micro crackings) in multitude nickel weld metals were remarkably decreased as the increase of aluminum and titanium in the welding electrodes.

Meanwhile, the effect of aluminum and titanium on micro crackings of monel weld metals was less than it of nickel weld metals.

The occurrence of micro crackings of monel weld metals, however, was promoted by a small amount of aluminum in the welding electrodes.

1. 緒 言

ニッケルやモネルはすぐれた耐食性を有していることから化学機器、压力容器、熱交換器などに広く用いられており、これらの溶接は主として被覆アーク溶接やティグ溶接法により母材継手やクラッド材の溶接、肉盛溶接などが行なわれている。

しかしこれらの溶接において、クラッド材の初層溶接部や多層肉盛溶接部などでの割れの発生がしばしば問題となっている。

とくにニッケルやモネル被覆アーク溶接棒(以下溶接棒という)では、溶接金属の機械的性質の改善やプロホールの防止などのために少量の Al や Ti¹⁾²⁾を含有しているが、これらの Al や Ti は溶接棒に用いられているフラックス中の珪酸塩(SiO₂)を還元して、溶接金属中に Si などの低融点偏析物を形成することが割れの原因と考えられる。

このようなことから本報では、ニッケルやモネル溶接棒中の Al や Ti 量を変化させた溶接棒を試作し、この Al や Ti 量と溶接割れに大きな影響をおよぼすと考えられる溶接金属中の Al, Ti, Si, O および N 量との関係を明らかにし、さらに U 溝割れ試験, C 型ジグ拘束割れ試験, 肉盛溶接の表曲げ試験によって溶接割れにお

*原稿受付 昭和49年6月25日(昭和43年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 日本ウェルディング・ロッド(株)技術研究所 Member,
Nippon Welding Rod. Co., Ltd. Technical
Research Inst.

よばすこれらの諸元素の影響を検討した。

2. 供 試 材

実験に用いた溶接棒は Table 1 に示す, 8 種類のニッケルおよびモネル心線 (心線径 4 mmφ) に TiO₂ 45 %, CaCO₃ 30 %, CaFe10% 残り K₂O・SiO₂ からなるフラックスを塗布して溶接棒を作成した。

Table 1 Chemical composition of Nickel and Monel core wire

core wire	Legend	Al	Ti	Si	Mn	Fe	Ni	Cu
Nickel	N-1	Tr.	0.96	0.39	0.60	0.026	Bal.	Tr.
	N-2	Tr.	1.93	0.45	0.59	0.019	Bal.	Tr.
	N-3	Tr.	2.72	0.42	0.52	0.015	Bal.	Tr.
	N-4	0.96	0.99	0.37	0.62	0.028	Bal.	Tr.
	N-5	1.00	2.00	0.38	0.58	0.028	Bal.	Tr.
	N-6	0.92	2.82	0.41	0.59	0.024	Bal.	Tr.
	N-7	1.64	1.01	0.40	0.60	0.037	Bal.	Tr.
	N-8	1.60	1.98	0.45	0.60	0.021	Bal.	Tr.
	N-9	1.65	2.80	0.42	0.60	0.029	Bal.	Tr.
Monel	M-1	Tr.	0.92	0.40	0.62	0.016	67.45	Bal.
	M-2	Tr.	1.75	0.38	0.59	0.019	67.60	Bal.
	M-3	Tr.	2.63	0.44	0.51	0.018	67.46	Bal.
	M-4	0.44	0.90	0.37	0.62	0.028	67.35	Bal.
	M-5	0.48	1.80	0.40	0.61	0.023	67.46	Bal.
	M-6	0.46	2.87	0.44	0.62	0.019	67.38	Bal.
	M-7	1.00	1.07	0.43	0.62	0.019	67.38	Bal.
	M-8	1.00	1.91	0.42	0.60	0.023	67.21	Bal.
	M-9	0.95	2.81	0.40	0.62	0.028	67.39	Bal.

Table 2 Chemical composition of test material (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS-41 (S310)	0.19	0.04	0.71	0.008	0.022

溶接割れ試験に用いた母材は 25 mm 厚の炭素鋼で, その化学成分を Table 2 に示す。

3. 実験方法

3.1 溶接金属の分析試験

供試溶接棒を用いて溶接電流 140 A, 溶接速度 200 mm/min の溶接条件で, 炭素鋼板上に 6 層 24パスの肉盛溶接を行なった。

分析は炭素鋼の稀釈の影響がない肉盛溶接部の表面を蛍光 X 線分析法および真空融解法 (定容測圧法) によって Al, Ti, Si, O および N を分析した。

3.2 溶接割れ試験

ニッケルやモネルの溶接金属に発生する割れには, 溶接金属の凝固過程に発生する凝固割れ (高温割れ)³⁾ と溶接過程では割れないが, 曲げ応力などを加えることにより割れが発生するいわゆる延性低下による割れなどがある。

本実験では凝固割れ試験として U 溝割れ試験および C 型ジグ拘束割れ試験 (FISCO) を行なった。

また延性低下による割れ試験としてニッケルやモネルの肉盛溶接部の表曲げ試験⁴⁾を行なった。

溶接割れ試験に用いた試験板の形状, 寸法および溶接条件を Table 3 に示す。

Table 3 Test procedure

Test procedure	Test plate	Welding condition	
		Current (A)	Travel speed (mm/min)
U-Groove weld cracking test		140	160
		160	200
		180	240
FISCO cracking test		140	160
face bend test		140	160

(3.2.1) U 溝割れ試験はニッケルやモネル・クラッド材の初層溶接を想定したもので, Table 3 に示す試験板の開先内に供試溶接棒を用いて, ストリンガービードを 1 パス溶接して試験板が完全に冷却したのち浸透探傷試験によりビード表面の割れを検出し, 割れ率を測定した。

(3.2.2) C 型ジグ拘束割れ試験 (FISCO) は JIS Z₃ 155 に基づき, Table 3 に示す溶接条件で試験を行ない, ビード破面の割れ率を測定した。

(3.2.3) 肉盛溶接部の表曲げ試験は Table 3 に示す炭素鋼板上に 2 層の肉盛溶接を行ない, 溶接ビードと平行方向の表曲げ試験片 (肉盛表面より 9.5 mm 厚) を採取し, JIS Z3122 に基づき型曲げ試験 (曲げ半径 = 2 × 板厚) を行なったのち, 10 倍の拡大鏡にて曲げ表面の割れを観察し割れ数を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 溶接金属中の化学成分の検討

ニッケルやモネルに発生する凝固割れや延性低下による割れに大きな影響をおよぼすと考えられる溶接金属中の Al, Ti, Si, O および N 量と供試溶接棒中の Al および Ti 量との関係を検討した。

4.1.1 溶接金属中の Al および Ti の挙動

Fig. 1 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and Al, Ti content in weld metal.

Fig. 1 はニッケルおよびモネル溶接棒中の Al および Ti 量とその溶接金属中の Al および Ti 量との関係を示したもので、溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがってニッケルおよびモネルのいずれも溶接金属中の Al および Ti 量は増加する傾向が認められた。

Fig. 2 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and recovery of Al and Ti.

Fig. 3 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and Al content in weld metal.

また溶接棒中の Al および Ti がその溶接金属中に移行する歩留は Fig. 2 に示すようにニッケルでは約80%、モネルでは約20%の歩留率を示し、ニッケル中の Al および Ti の歩留がモネルにくらべて約4倍も良好であることがわかった。

Fig. 3 はニッケルおよびモネル溶接棒中の Al および Ti 量とその溶接金属中の Al 量との関係を示したもので、溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがってニッケル溶接金属中の Al 量は増加する傾向を示した。

しかしモネルでは溶接棒中の Al および Ti 量の多少にかかわらず、溶接金属中の Al 量はいずれも約0.1%であった。また溶接金属中へ移行する Al の歩留は Ti にくらべていちじるしくわるく、ニッケルでは最大でも0.4%、モネルでは0.1%程度しか溶接金属へ移行しないことがわかった。

4.1.2) 溶接金属中の Si の挙動

Fig. 4 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and Si content in weld metal.

Fig. 5 Relation between SiO_2 content in coating flux of Nickel and Monel welding electrode and Si content in weld metal.

Fig. 4 はニッケルおよびモネル溶接棒中の Al および Ti 量とその溶接金属中の Si 量との関係を示したもので、溶接棒中の Al および Ti 量の増加にしたがって溶接金属中の Si 量はニッケルおよびモネルのいずれもいちじるしく増加することがわかった。

このように溶接棒中の Al や Ti 量が増加するにしたがってその溶接金属中の Si 量がいちじるしく増加する原因として次のようなことが考えられる。

ニッケルやモネル溶接棒中に含有されている Al や

Ti は溶接棒に用いられているフラックス中の SiO_2 などの硅酸塩を溶接過程中に (1) 式のように還元反応するために, 溶接棒中の Al や Ti 量の増加にともなってその溶接金属中の Si 量が増加するものと考えられる.

そのためにフラックス中の SiO_2 量が増加した場合にも Fig. 5 に示すように溶接金属中の Si 量はいちじるしく増加した. またティグ溶接のようにアルゴンシールドのためフラックスを用いない場合では, ニッケルやモネル溶接棒 (溶加材) に多量の Al や Ti を含有させても, 溶接金属の Si 量はまったく増加しない⁵⁾ことから, フラックス中の SiO_2 と溶接棒中の Al や Ti との関係が明らかである.

4.1.3) 溶接金属中の O の挙動

Fig. 6 はニッケル溶接棒中の Al および Ti 量と溶接金属中の O 量との関係を示したもので, 溶接棒中の Al および Ti 量の増加にしたがって溶接金属中の O 量は減少する傾向が認められ, 溶接棒中の Al および Ti 量が2.5%以上を含有した場合には溶接金属中の O 量は0.007%から0.012%の範囲であった.

Fig. 6 Relation between Al, Ti content in Nickel welding electrode and O content in Nickel weld metal.

Fig. 7 Relation between Al, Ti content in Monel welding electrode and O content in Monel weld metal.

Fig. 7 はモネル溶接棒中の Al および Ti 量と溶接金属中の O 量との関係を示したもので, 溶接棒中の Al や Ti 量にはまったく関係なく, いずれの溶接金属中の O 量も 0.007 から 0.009 %の範囲であった.

4.1.4) 溶接金属中の N の挙動

ニッケルおよびモネル溶接金属中の N 量は溶接棒中の Al および Ti 量にはまったく関係なく, ニッケルおよびモネルのいずれの溶接金属中の N 量も 0.001%であった.

4.2) 凝固割れにおよぼす Al および Ti の影響

U 溝割れ試験および C 型ジグ拘束割れ試験において発生する割れは, いずれも溶接金属の凝固過程で発生した凝固割れ (高温割れ) で, U 溝割れ試験ではビード表面およびクレータ部に, C 型ジグ拘束割れ試験ではクレータ部のみに割れは発生した.

Photo. 1 Weld cracking of Nickel and Monel weld metal on U-Groove cracking test.

Photo. 1 は U 溝割れ試験におけるニッケルおよびモネルの凝固割れの一例を示す. ニッケルに発生する凝固割れはビード表面に縦割れのみが発生したが, モネルでは Photo. 1 (b) に示すように溶接ビードのリップルに垂直な弧状割れ³⁾が発生した.

このような弧状割れを割れ率として測定しがたいので Table 4 に示すように割れ感受性として評価した.

Table 4 Expression of Monel metal weld cracking

Index of crack sensitivity	Monel metal weld bead.
0	
2	
4	
6	
8	
10

Fig. 8 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and weld cracking on U-Groove weld cracking test.

Fig. 9 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and weld cracking on FISCO cracking test.

Fig. 8 は実験計画法⁹⁾の27とおりの実験手法によるニッケルおよびモネルのU溝割れ試験の結果を示す。ニッケルの凝固割れは、溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがって割れ率は増加した。

しかしモネルの凝固割れは、溶接棒中の Al および Ti 量が増加してもニッケルとは異なり、割れ感受性にはほとんど影響がないことがわかった。

Fig. 9 はニッケルおよびモネル溶接棒によるC型ジグ拘束割れ試験の結果を示す。ニッケルでは、U溝割れ試験の結果と同様に溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがって割れ率は高くなる傾向を示した。

またモネルではニッケルにくらべて割れ感受性は低く、しかも溶接棒中の Al および Ti はモネルの凝固割れにはほとんど影響をおよぼさないことがわかった。

以上のことからU溝割れ試験やC型ジグ拘束割れ試験により発生する凝固割れは、ニッケルでは溶接棒中の Al および Ti 量の増加にともなっていちじるしい割れを発生したが、モネルでは溶接棒中の Al および Ti は凝固割れにはほとんど影響をおよぼさないことがわかった。

4.3) 凝固割れにおよぼす Si の影響

ニッケルの凝固割れは、溶接棒中の Al および Ti 量の増加にともなっていちじるしく発生するが、これは、Fig. 4 に示したように溶接棒中の Al や Ti によってフラックス中の SiO_2 などの硅酸塩が還元され、溶接金属中の Si 量がいちじるしく増加することに原因するものと考えられる。

Fig. 10 Relation between Si content in Nickel and Monel weld metal and weld cracking on FISCO cracking test and U-Groove weld cracking test.

Fig. 10 はニッケルおよびモネル溶接棒中の Al および Ti によって増加した溶接金属中の Si 量と凝固割れとの関係を示したもので、ニッケルでは U 溝割れ試験および C 型ジグ拘束割れ試験のいずれにおいても、溶接金属中の Si 量が増加するにしたがって凝固割れはいちじるしく発生しやすいことがわかった。

しかしモネルでは溶接金属中の Si 量が増加しても、ニッケルの場合ほど凝固割れには影響なく、とくに U 溝割れ試験においては溶接金属中の Si はモネルの凝固割れにまったく影響をおよぼさなかった。

さらに Al や Ti 量が増加しても溶接金属の Si 量が増加しないティグ溶接⁹⁾における溶接棒中の Al および Ti 量と凝固割れの関係を検討した。

Fig. 11 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding wire for TIG and weld cracking on FISCO cracking test.

Fig. 11 はティグ溶接における溶接棒中の Al および Ti 量と凝固割れの関係を示したもので、溶接金属中の Si 量が増加しない場合には Al や Ti 量が増加しても、ニッケルの凝固割れはモネルの場合とまったく同じように Al や Ti 量には影響されないことがわかった。

このようなことから溶接棒中の Al や Ti 量の増加が、ニッケルの凝固割れに大きな影響をおよぼすのではなく、溶接棒中の Al や Ti によって溶接金属中の Si 量の増加がニッケルの凝固割れに大きな影響をおよぼすものと考えられる。

またモネルにくらべてニッケルの凝固割れに Si の影響が大きい原因としては、ニッケルなどの γ 相組織のものはモネルのような α 相組織のものにくらべて、Si などの低融点偏析物の溶解度が小さいために γ 相の結晶粒界などに偏析物を形成しやすいためと考えている。

4.4) 延性低下によるマイクロ割れにおよぼす Al および Ti の影響

ニッケルおよびモネル溶接棒による肉盛溶接部の表曲げ試験における延性低下による割れの一例を Photo. 2 に示す。

Photo. 2

Micro cracking of Monel weld metal on face bend test.

ニッケルやモネルの肉盛溶接部の表曲げ試験で発生する割れは、いずれも凝固割れとは異なり、溶接過程では割れの発生はないが、曲げ応力を加えることにより再加熱をうけた前層ビードに沿って延性低下による多数の微小な割れ（以下マイクロ割れ⁴⁾という）が発生した。

また、とくに延性低下のいちじるしいものは表曲げ試

Fig. 12 Relation between Al, Ti content in Nickel and Monel welding electrode and cracking of face bend test.

験において多数のマイクロ割れの発生とともに破断したものもあった。

Fig. 12 はニッケルおよびモネル肉盛溶接部の表曲げ試験における溶接棒中の Al および Ti 量とマイクロ割れとの関係を示したもので、ニッケルでは溶接棒中の Al が含有されない場合には、Ti 量にかかわらず多数のマイクロ割れが発生した。

しかし溶接棒中の Al 量が増加するにしたがってマイクロ割れの発生は少なくなり、また Ti 量も増加するにしたがってマイクロ割れの発生は減少した。

モネルでは、ニッケルの場合とは異なり溶接棒中の Al がマイクロ割れにいちじるしく悪影響をおよぼし、溶接棒中の Al 量が多くなるにしたがってマイクロ割れの発生はいちじるしく多くなった。

しかしモネル溶接棒中の Ti は、ニッケルの場合と同様に、その含有量が多くなるにしたがってマイクロ割れの発生はなくなることがわかった。

以上のことから延性低下によって発生するマイクロ割れの防止には、ニッケルでは数パーセントの Al および Ti を、モネルでは Ti のみをそれぞれ溶接棒中に含有させることが望ましい。

しかしモネルでは溶接棒中に Al を含有することはマイクロ割れに非常に有害であることがわかった。

4.5) 延性低下によるマイクロ割れにおよぼす溶接金属中の Al, Ti および O の影響

ニッケルやモネル溶接棒中の Al や Ti は Fig. 1 なら

どで示したようにこれらの溶接金属中の Al, Ti, Si, O などに影響をおよぼすことから、ニッケルおよびモネルのマイクロ割れに影響があると考えられる。

Fig. 13 はニッケル溶接金属中の Al および Ti 量とマイクロ割れとの関係を示したもので、Al や Ti 量が多くなるにしたがってマイクロ割れは少なくなり、ニッケル溶接金属中の Al+Ti 量が4%以上含有する場合にはまったくマイクロ割れの発生がないことがわかった。

Fig. 13 Relation between Al, Ti content in Nickel weld metal and micro cracking on face bend test.

Fig. 14 Relation between O content in Nickel weld metal and micro cracking on face bend test.

さらにニッケル溶接棒中の Al および Ti 量の増加にともなって Fig. 6 で示したように、溶接金属中の O 量が減少することから溶接金属中の O 量とマイクロ割れとの関係を検討した。

Fig. 14 はニッケル溶接金属中の O 量とマイクロ割れとの関係を示し、O 量が少なくなるにしたがってマイクロ割れは減少することがわかった。

Fig. 15 はモネル溶接金属中の Al および Ti 量とマイクロ割れとの関係を示したもので、溶接金属中の Ti 量が増加するにしたがってマイクロ割れはいちじるしく減少した。

しかし溶接金属中の Al はニッケルの場合とは異な

り、モネルではいちじるしく有害であり、そのため溶接金属中に 0.14% の Al を含有する場合には、溶接金属中に 1% の Ti を含有させてもマイクロ割れは発生した。

Fig. 15 Relation between Ti content in Monel weld metal and micro cracking on face bend test.

マイクロ割れに有害な Al 量が少ない場合には、溶接金属に含有される Ti 量は少なくともマイクロ割れの発生はなく、たとえば溶接金属中の Al 量が 0.1% の場合には、Ti 量は 0.3% でもマイクロ割れの発生はないことがわかった。

またモネル溶接金属中の O は Fig. 7 で示したように溶接棒の Al や Ti 量にはまったく影響されないことから、モネルの場合には溶接金属中の O 量はマイクロ割れに影響がなかったものと考えられる。

Photo. 3 はマイクロ割れの 1 例を示し、ニッケルおよびモネルのいずれにおいても結晶粒界に沿ってマイクロ割れが発生していることがわかった。

さらに高倍率の金属顕微鏡でマイクロ割れを観察すると

(a) Nickel weld metal (N-2)
(b) Monel weld metal (M-8)

Photo. 3 Micro cracking of Nickel and Monel weld metal. ($\times 400 \times 1/2$)

Photo. 4 Micro cracking of Nickel weld metal. (N-2) ($\times 6000 \times 1/2$)

Photo. 4 に示すように結晶粒界に沿って酸化物と思われる析出物が観察されることから、これらの酸化物の析出が結晶粒界をいちじるしく脆弱化⁶⁾して、延性低下するために、表曲げ試験による応力により結晶粒界に割れを発生したものとする。

5. 要 約

以上ニッケルおよびモネルの凝固割れや延性低下による割れにおよぼす溶接棒中の Al および Ti の影響について検討を行なった。以下にその結果を要約する。

1) ニッケル溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがって、U 溝割れ試験などにより発生する凝固割れはいちじるしく増加した。

この原因として、溶接棒中の Al および Ti 量の増加にしたがって溶接金属中の Si 量がいちじるしく増加し、 γ 相の結晶粒界に低融点偏析物を形成することが考えられる。

2) しかしモネル溶接棒中の Al および Ti 量が増加しても、ニッケルの場合とは異なり凝固割れにはほとんど影響がなかった。

3) ニッケル溶接棒中の Al および Ti 量が増加するにしたがって、溶接金属中の Al および Ti 量は増加し、また O 量は減少することから、肉盛溶接部の表曲において発生するマイクロ割れはいちじるしく減少した。

4) しかしモネル溶接棒中の Ti 量の増加はニッケルの場合と同様にマイクロ割れを減少させるが、Al の含有はマイクロ割れにいちじるしく有害であることがわかった。

5) ニッケルやモネル肉盛溶接部に発生するマイクロ割れはいずれも結晶粒界に酸化物が観察されることから、この酸化物の析出が結晶粒界をいちじるしく脆弱化せしめるために、曲げ応力などによりマイクロ割れを発生させるものと考えられる。

6. 参 考 文 献

- 1) ASTM Standards: Nickel and Nickel Alloy Covered Welding Electrodes. (1964) B295-64T, 410 42
- 2) 栗山, 山崎, 川島他: 純ニッケルおよび純ニッケル肉盛溶接の溶接性におよぼすアルミ, チタンの影響, 溶接冶金研究委員会, (1970), 5—6
- 3) 松田: 溶接冶金学, 日刊工業新聞社, (1972), 143—144
- 4) 鈴木, 中村他: オーステナイト系ステンレス鋼の溶接割れに関する研究(第2報), 本誌, 29—11, (1960)39—44
- 5) 足立: 日本ウェルディング・ロッド(株)研究資料, 未発表
- 6) 島田: 直交配列の話, 日本規格協会, (1959), 109
- 7) 西尾, 大前他: 高純度ニッケルの溶接について, 溶接冶金研究委員会, (1968), 5