

技術資料



Technical Data

耐鋭敏化性に優れた自動車排気系部品用ステンレス鋼 溶接ワイヤ

上仲明郎*

Stainless Steel Welding Wire for High Sensitization Resistance Automotive Exhaust System Components

Akio Uenaka

Synopsis

The present study investigated the effects of Nb quantity of 15.5 mass% Cr ferritic stainless steel welding wire and welding conditions on sensitization resistance in weld material.

Followings were found and confirmed from experimental works.

- (1) C and N in weld metal increase with 2 factors (① C intrusion by adhesion oil on base metal and N₂ entrainment by turbulence, ② C intrusion by using shielding gas of Ar-CO₂) deteriorate sensitization resistance. But, with increasing the amount of Nb (0.7% ~) in welding wire, high sensitization resistance is ensured in the severer environment than practical use.
- (2) When the (Ti+Nb) / (C+N) of weld metal is 8 or more, the sensitization does not occur.

2012年12月18日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

1. 緒言

自動車業界では、地球環境保護にも配慮して、排気ガス浄化や軽量化による燃費向上、車体の長寿命化に取り組んでいる。例えば、排気ガス規制の各種対応製品の中で EGR システム¹⁾を適用し、排気ガスを吸気側に環流することで、燃焼温度を下げ、高温下で生成し易い窒素酸化物 (NO_x) を抑制している。また、軽量化では、高耐熱性・高加工性フェライト系ステンレス鋼^{2)~5)}を採用し、板厚を減少させた排気系部品の開発が進められてきた。

自動車排気系部品用の溶接材料としては、被溶接物の材質と同様にフェライト系のステンレス鋼溶接ワイヤが用いられている。この溶接ワイヤについても、使用条件と被溶接物の材質の変化に応じて高度化が求められるようになってきており、組成や形態の異なる種々のワイヤが開発・市販化されている^{6)~7)}。

排気系部品への要求特性としては、上記の耐熱性以外に、EGR システムやコールドエンド (排気部品のエンジンから遠い側) における排ガス凝縮水に対する耐鋭敏化性が挙げられる。鋭敏化とは、溶接金属部に Cr リッチの炭化物 (M₂₃C₆) やクロム窒化物 (Cr₂N) が結晶粒界に析出し、粒界近傍に Cr 量の希薄帯ができることにより、そこで腐食が進行する現象である。その対策としてステンレス鋼板では、溶接金属での Cr 系の炭化物や窒化物の生成の防止を目的として、C, N の低減および Cr よりも C, N との化学的親和力の大きい Nb, Ti が添加され、耐鋭敏化性が改善されることが報告されている^{8)~9)}。また、Mo の適量添加により耐食性が改善されることが報告されている¹⁰⁾。溶接ワイヤにおいても、同様な対策として組成の C, N が低く、Nb が約 0.4 % 添加された開発溶接ワイヤが使用されている。

溶接施工においては、フェライト系ステンレス鋼のソリッドワイヤを用いた溶接では、一般的に 2~5 % の O₂ を含む Ar-O₂ 系のシールドガスが適用されている。ところが、排気系部品の溶接環境の変化により、排気系部品の鋼板に広く利用されている低 C, N 組成で Ti を含む SUH409L 製の鋼板と開発溶接ワイヤの組合せでは、十分な耐鋭敏化性が得られない事例が増えている。すなわち、排気系部品の機能を向上させるために部品形状は複雑になる傾向があり、母材に付着したプレス加工油の拭き取り残しや、狭隘な部位が増えることによるシールド不良など、溶接環境が劣悪化しつつある。また、シー

ルドガスのコストダウンを目的に Ar-CO₂ 系ガスの使用が増えている。このため、加工油や Ar-CO₂ 系ガスからの溶接金属への C の侵入、シールドガス外からの大気窒素の混入、により溶接金属の鋭敏化が懸念されている。

そこで、本報では、厳しい溶接環境下や Ar-CO₂ 系のシールドガスを選択した際の溶接金属の鋭敏化挙動を調査し、溶接ワイヤの Nb 量を増加した時の鋭敏化抑制について検討した。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本実験で用いた供試材の化学成分を Table 1 に示す。溶接ワイヤは Nb が 0.43 % 添加されているワイヤ A を基本仕様とし、Nb を 0.71 mass% と 0.98 mass% に高めたワイヤ B, ワイヤ C の計 3 鋼種である。これら 3 鋼種を真空誘導炉にて溶製し、160 mm 角の鋼片に熱間圧延した後、線材圧延、焼鈍、冷間線引き加工、焼鈍、めっき処理、冷間線引き加工を行い、線径 φ 1.2 mm の溶接ワイヤとした。なお、めっきについては、芯線の表面に予め Ni めっきを施し、さらに Cu めっきすることで、安定したコンタクトチップとの通電性およびワイヤ送給性を確保した。母材は、板厚 1.5 mm の SUH409L を使用した。

2. 2 溶接条件

溶接部の耐鋭敏化性の実験については、Fig. 1 に示す重ね継手ですみ肉溶接を行った。なお、耐鋭敏化性を阻害する因子を 2 つ取り上げ、それぞれで実験水準を設定した。

①母材に付着しているプレス加工油による C の混入と乱流による大気中の N₂ の巻き込みを想定した再現実験

排気系部品は、プレス成形を経て、アーク溶接が行われる。通常、プレス成形後には、10 ml/m² 程度以下のプレス加工油が母材に付着している。より厳しい溶接環境を想定し、不水溶性プレス加工油 (精製鉱物油が主たる構成要素) を用いて、プレス加工油の付着無し、20 ml/m² (通常範囲における最大の 2 倍)、40 ml/m² (通常範囲における最大の 4 倍) の 3 条件の付着量を設定した。

また、排気系部品の形状はより複雑になり、狭隘な部位が生じることがある。その場合、先端がテーパ形式の

Table 1. Chemical compositions of materials (mass%).

Specimen		C	Cr	Ti	Nb	N	Remarks
Welding wie	A	0.01	15.7	0	0.43	0.02	Conventional
	B	0.01	15.4	0	0.71	0.02	
	C	0.01	15.6	0	0.98	0.02	
Base metal	SUH409L	0.01	10.7	0.16	0	0.01	

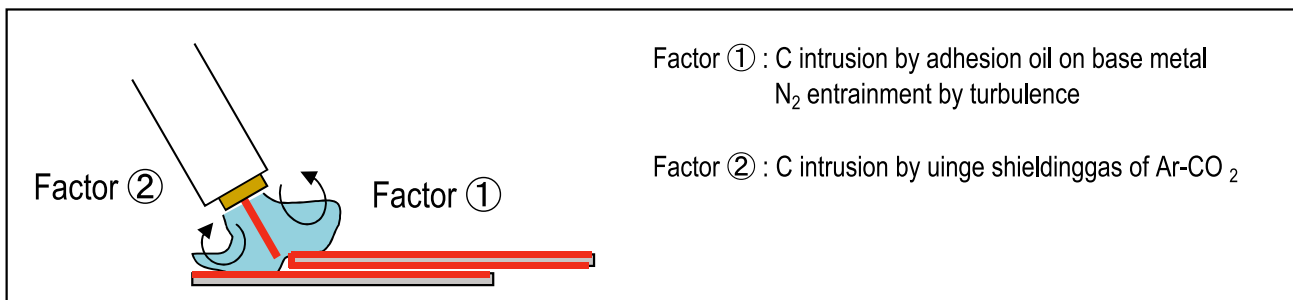


Fig. 1. Experimental setup and 2 factors inhibiting sensitization resistance.

溶接トーチを用いたり、ノズルからコンタクトチップを突き出した状態での溶接を強いられることが考えられる。そのような状況下では、溶接部で乱流が生じることによるシールド不良が起き、大気中の窒素が溶接金属に接触し、そして吸収される。そこで実験ではシールドガス中にN₂ガスを添加することで、シールド不良現象を再現した。

N₂ガスは、2.5%（一般鋼の溶接ではブローホールが発生する厳しいレベル）と5.0%の2水準に設定した。

なお、フェライト系ステンレス鋼のソリッドワイヤを用いた溶接では、一般的に2～5%のO₂を含むAr-O₂系のシールドガスが適用されているため、Ar+3.5% O₂を基本条件とした。

②Ar+20%CO₂の組成のシールドガスを選択することによるCの混入

一般鋼・高張力鋼やフラックス入りワイヤの溶接では、20%のCO₂を含むAr-CO₂系のシールドガスが一般的に用いられる。そこで、シールドガスの使用コスト維持のため、ユーザでのAr+20%CO₂のシールドガスの使用を想定し、今回の供試ワイヤでの適用性を検討した。なお、このAr+20%CO₂のシールドガスの条件下において、母材に付着しているプレス加工油および乱流によるN₂ガスの巻き込みの影響を同時に調査した。

これらの因子について、単独あるいは複数の組合せで溶接し、溶接部の横断面において、JIS G 0571に準拠したしゅう酸エッチング試験を行い、耐鋭敏化性を調査した。

3. 実験結果および考察

Table 1 の材料を, Table 2 の溶接条件で溶接後, 溶接部の耐鋭敏化性を調査した. ただし, シールドガスに N_2 ガスを 5.0 % 混合し, 母材にプレス加工油が付着している条件では, アークが不安定でビード形成が困難であったため, 外観不良として扱い, 溶接部の横断面調査からは除外した.

Table 2. Welding conditions for corrosion test.

Adhesion oil on base metal	0, 20, 40 ml/m ²
Ratio of N_2 in shielding gas	0, 2.5, 5.0 %
Shielding gas	Ar+3.5 %O ₂ , Ar+20 %CO ₂
Shielding gas flow rate	3.3×10^{-4} m ³ /s
Welding current	125 A
Arc voltage	20 V
Welding speed	13.3 mm/s
Contact tip to work distance	15 mm

3. 1 溶接部の鋭敏化について (Ar+3.5 %O₂ガスを基本条件とした プレス加工油とN₂ガス混合の影響)

Fig. 2 に, プレス加工油の付着が 20 ml/m² で N_2 ガスの混合が 2.5 % の組合せの条件における各ワイヤの断面マイクロ組織の一例を示す. ワイヤAでは鋭敏化が生じており(溝状組織), ワイヤBおよびCでは, 鋭敏化が認められなかった(段状組織).

Fig. 3 に, シールドガスが Ar+3.5 %O₂ の場合の, 耐鋭敏化性に及ぼすプレス加工油と N_2 ガス混合比率の関係を示す.

ワイヤAではプレス加工油の付着がなく, N_2 ガスの混合もない場合にのみ鋭敏化は認められなかった. 一方, プレス加工油の付着により部分的に鋭敏化が認められた(部分的に溝状の混合組織). また, N_2 ガスの混合比率が増すに従い, 鋭敏化が生じる傾向にあり, またプレス加工油の付着との組み合わせでは鋭敏化が生じていた.

ワイヤBでは, プレス加工油の付着が 40 ml/m² で N_2 ガスの混合が 2.5 % の組合せの条件においてのみ部分的に鋭敏化が認められたが, その他の条件では鋭敏化は認められなかった.

ワイヤCでは, いずれの条件においても, 鋭敏化は認められなかった.

以上より, ワイヤの Nb 量が多くなるに従い, C および N を固定する Nb が溶接金属中に十分にあるため, 鋭敏化が生じない条件範囲が広がったと考えられる.

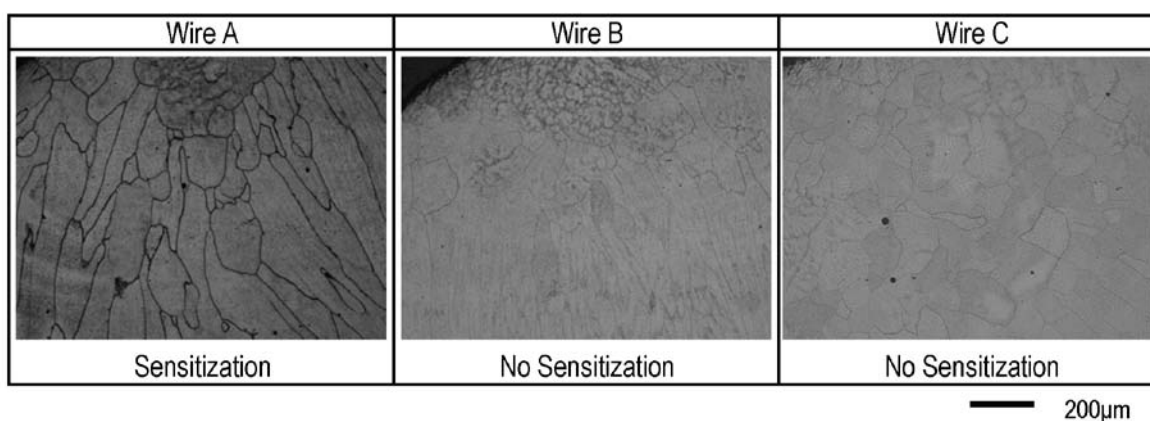


Fig. 2. Microstructures of weld metal (shielding gas: Ar+3.5 %O₂+2.5 %N₂, adhesion oil on base metal: 20 ml/m²).

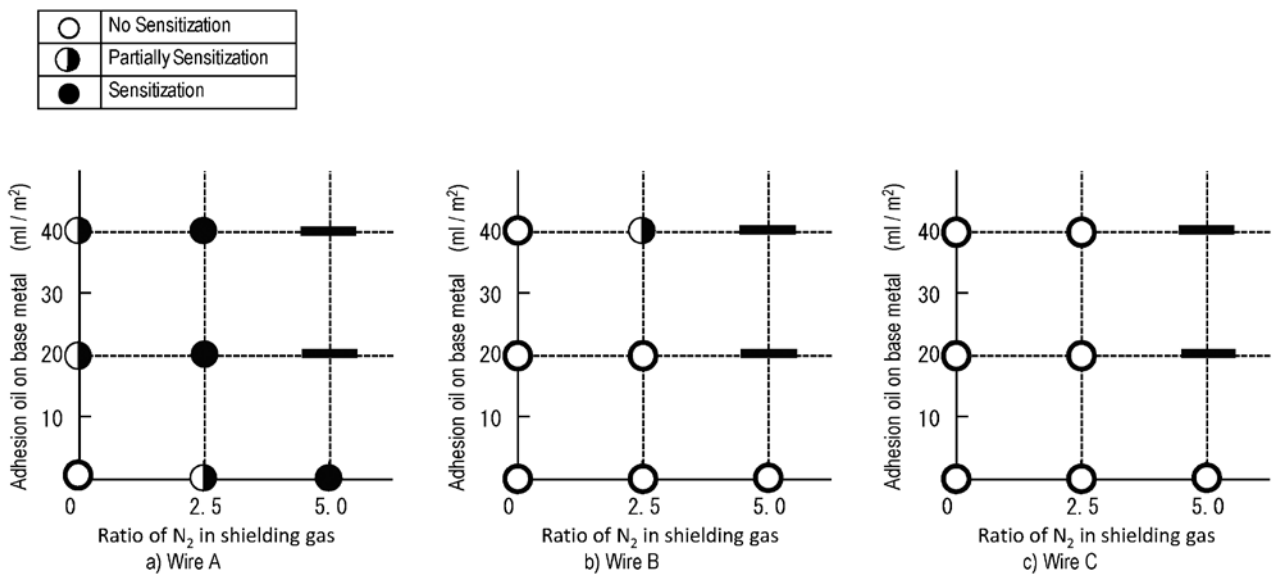


Fig. 3. Effects of adhesion oil and N₂ in shielding gas on sensitization resistance (Ar+3.5 %O₂).

3. 2 Ar+20 %CO₂ガスを用いた場合の溶接部の鋭敏化について(プレス加工油とN₂ガス混合の影響を同時調査)

Fig. 4 に、シールドガスに Ar+20 %CO₂ を用いた場合の、鋭敏化に及ぼすプレス加工油と N₂ ガス混合比率の関係を示す。

いずれのワイヤにおいても、各溶接条件において、Ar+3.5 %O₂ の場合に比べ、同等の耐鋭敏化性あるいは鋭敏化が生じる傾向にあった。これは、シールドガス中の C の溶接金属への混入により、Ti および Nb が欠乏し、Cr 炭化物の生成を抑制できなかつたためと考えられる。

ワイヤ A では、いずれの条件においても、鋭敏化が認められた。

ワイヤ B では、プレス加工油の付着が 20 ml/m² まで、また N₂ ガスの混合が 2.5 % まででは鋭敏化は認められなかった。これらの条件以外では、部分的な鋭敏化あるいは鋭敏化が認められた。

ワイヤ C では、プレス加工油の付着が 40 ml/m² で N₂ ガスの混合が 2.5 % の組合せの条件においてのみ部分的に鋭敏化が認められたが、その他の条件では鋭敏化は認められなかった。

以上より、ワイヤの Nb 量が多くなるに従い、C およ

び N を固定する Nb が溶接金属中に十分存在し、鋭敏化が生じない条件範囲が広がったものの、シールドガスが Ar+3.5 % O₂ の場合に比べると範囲は狭いことに注意が必要である。

3. 3 溶接金属の成分の変化について (Ar+3.5 %O₂を基本条件としたプレス加工油とN₂ガス混合の影響)

それぞれの溶接条件で作製した溶接試験片について、溶接金属の C, N, Ti, Nb の化学分析を実施した。一方、母材の希釈率を横断面で測定し (おおよそ 55 %), Ar+3.5 %O₂ のシールドガスで、プレス加工油の付着なしにおける溶接金属の成分を基本条件として算出した。そして、プレス加工油の付着量および N₂ ガスの混合比率の変化における各成分の変動を、基本条件での算出値との差分により調査した。Fig. 5 および Fig. 6 に、シールドガスが Ar+3.5 %O₂ を基本条件とした場合の各成分の変動を示す。

C については、いずれのワイヤにおいても、プレス加工油の付着がない場合、若干減分した。これは、シールドガス中の酸素による脱炭の影響と考えられる。また、プレス加工油の付着量が増すに従い、C は漸増した。

N については、N₂ ガスの混合がない場合、若干増分した。また、N₂ ガスの混合比率が増すに従い、N は漸

増した。

Tiについては、いずれのワイヤ、いずれの条件においても、減分は0.02%程度であった。これは、シールドガス中の酸素と一部のTiが結合し、金属蒸気として溶接金属から放出されたためと考えられる。

Nbについては、いずれのワイヤおよびいずれの条件においても、増減は認められなかった。

○	No Sensitization
◐	Partially Sensitization
●	Sensitization

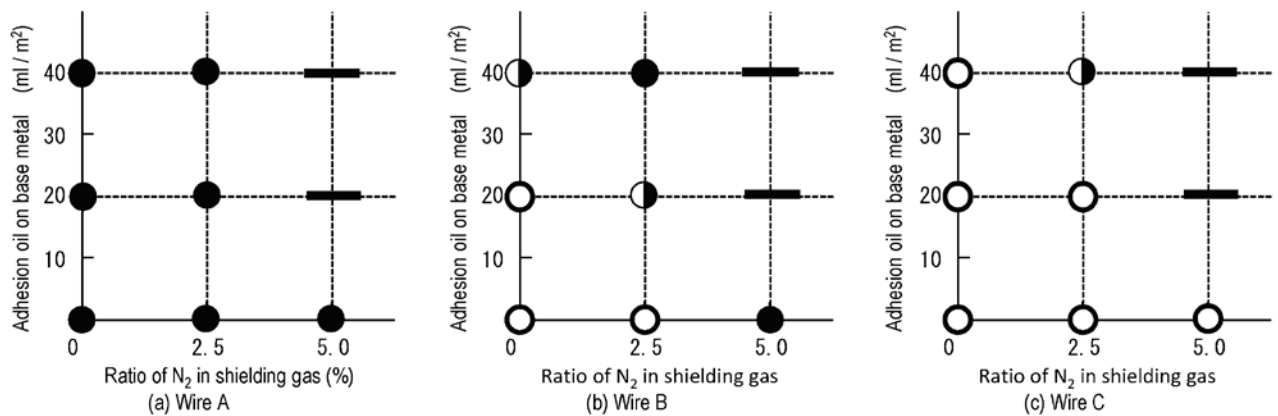


Fig. 4. Effects of adhesion oil and N₂ in shielding gas on sensitization resistance (Ar+20%CO₂).

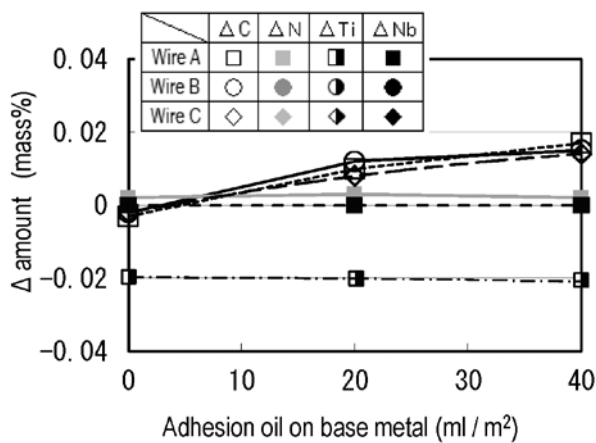


Fig. 5. Effect of fluctuations of chemical composition on adhesion oil (Ar+3.5%O₂).

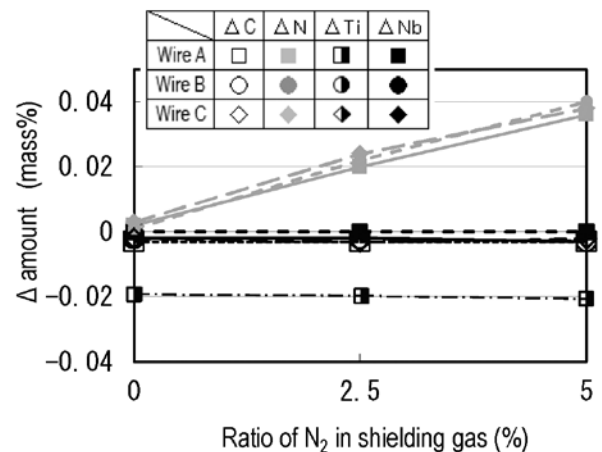


Fig. 6. Effect of fluctuations of chemical composition on N₂ in shielding gas (Ar+3.5%O₂).

3. 4 Ar+20 %CO₂ガスを用いた場合の溶接金属の成分の変化について (プレス加工油とN₂ガス混合の影響を同時調査)

Fig. 7 および Fig. 8 に、シールドガスに Ar+20 %CO₂ を用いた場合の各成分の変動を示す。

C については、いずれのワイヤにおいても、プレス加工油の付着がない場合、シールドガス中の C の取り込みにより、約 0.02 % の増分があった。また、プレス加工油の付着量が増すに従い、C は漸増した。その増分の度合いは、Ar+3.5 %O₂ の場合と同様であった。

N については、N₂ ガスの混合がない場合、若干増分した。また、N₂ ガスの混合比率が増すに従い、N は漸増した。ただし、Ar+3.5 %O₂ の場合に比べ、増分の度合いが小さかった。これは、N₂ ガスの分圧が小さくなったため、あるいは Ti, Nb に対して化学的親和力のより大きい (標準生成自由エネルギーが小さい) C が優先的に結合した影響と考えられる。

Ti については、いずれのワイヤおよびいずれの条件においても、減分は 0.02 % であった。これは、シールドガス中の酸素と一部の Ti が結合し、金属蒸気として溶接金属から放出されたためと考えられる。

Nb については、いずれのワイヤおよびいずれの条件においても、増減は認められなかった。

3. 5 溶接金属の鋭敏化と鋭敏化感受性指標 (Ti+Nb) / (C+N) の関係

溶接金属の耐鋭敏化性に及ぼす安定化元素量の影響を検討した⁸⁾。

Fig. 9 には、溶接ワイヤ別に、全ての実験組合せでの、耐鋭敏化性に及ぼす溶接金属の Ti+Nb と C+N の影響を示す。鋭敏化感受性の指標となる (Ti+Nb) / (C+N) が 8 以上の溶接金属の場合、鋭敏化は認められなかった。一方、(Ti+Nb) / (C+N) が 8 未満の溶接金属の場合、部分的あるいは溶接金属全体で鋭敏化が認められた。Ti, Nb は、C, N と 1 : 1 の原子数割合で結合するため、各元素の組合せによっては重量比で最小 3.3 から最大 7.7 となる。従って、鋭敏化感受性指標 (Ti+Nb) / (C+N) が 8 以上では、C, N に対して必要な量の Ti, Nb が確保され、良好な耐鋭敏化性が得られていると考えられる。

ワイヤの Nb 量が高いワイヤ B、特にワイヤ C では、高い耐鋭敏化性を有していることが分かった。

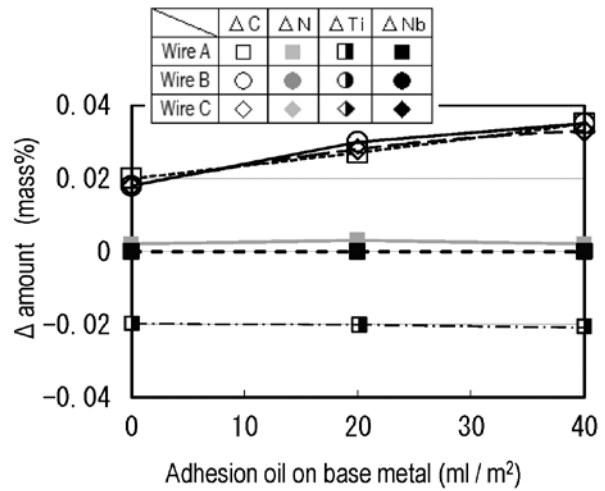


Fig. 7. Effect of fluctuations of chemical composition on adhesion oil (Ar+20 %CO₂).

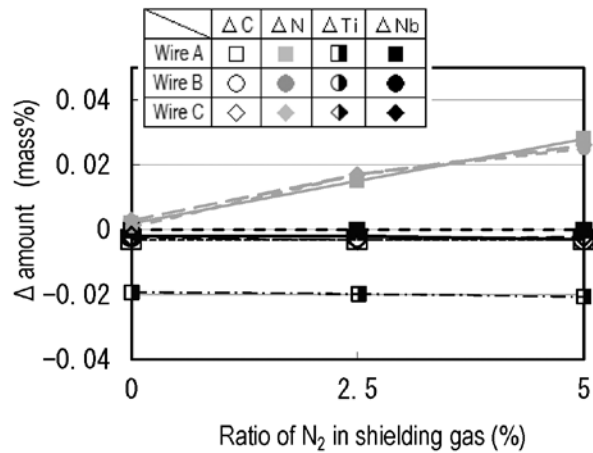


Fig. 8. Effect of fluctuations of chemical composition on N₂ in shielding gas (Ar+20 %CO₂).

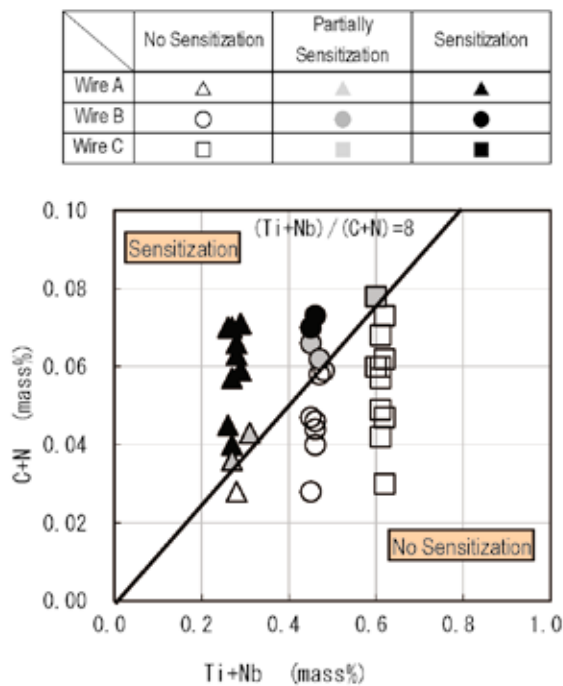


Fig. 9. Effects of C+N and Ti+Nb content on sensitization resistance.

4. 結 論

本実験では、Nbの増加量を変化させたCuめっき付きフェライト系ステンレス鋼溶接ワイヤを作製し、溶接部の鋭敏化に及ぼす耐鋭敏化性の阻害因子の影響を調査した。

以下にその結果を記す。

1) 耐鋭敏化性の阻害因子である、①母材に付着しているプレス加工油、乱流(シールド不良)、また② Ar+20%CO₂のシールドガスの選択により、溶接金属のC、Nは増分が生じ、耐鋭敏化性は低下傾向になる。しかし、Nb量を高めたワイヤでは、実用域以上の厳しい溶接環境においても高い耐鋭敏化性を有していることが分かった。

具体的には、Ar+3.5%O₂のシールドガスにおいて、0.71%のNbのワイヤでは、プレス加工油の付着が40 ml/m²でN₂ガスの混合が2.5%の組合せの条件の場合のみ部分的に鋭敏化が認められたが、その他の条件では認められなかった。また、0.98%のNbのワイヤでは、いずれの条件においても、鋭敏化は認められなかった。一

方、Ar+20%CO₂のシールドガスの施工では、Ar+3.5%O₂のシールドガスの場合に比べ、鋭敏化が生じない条件範囲が狭くなることに注意が必要である。

2) 鋭敏化感受性指標(Ti+Nb)/(C+N)が8以上の溶接金属の場合、鋭敏化が生じないことが分かった。

(文 献)

- 1) 田中真文, 真壁弘: ニチアス技術時報, 349(2007), 1, 1.
- 2) 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修: 自動車技術, 55(2001), 10, 25.
- 3) 井上宜治, 菊池正夫: 新日鉄技報, 378(2003), 55.
- 4) 奥学, 藤村佳幸, 中村定幸, 伊東健次郎, 名越敏郎, 植松美博: 日新製鉄技報, 80(2000), 32.
- 5) 藤田展弘, 大村圭一, 佐藤栄次, 山本章夫: 新日鉄技報, 361(1996), 20.
- 6) 村田義明: 溶接学会誌, 72(2003), 7, 561.
- 7) N. Renaudot, P. O. Santacreu, J. Ragot, J. L. Moiron, R. Cozar, P. Pedarre and A. Bruyere: SAE Technical Paper Series, 1(2000), 314.
- 8) 小野山征生, 辻正宣, 安保秀雄, 小川洋之, 青木司郎: 製鉄研究, 292(1977), 46.
- 9) 宇都宮武志, 古木寿之, 足立俊郎: 日新製鋼技報, 71(1995), 53.
- 10) 片山正宏, 中川大隆, 酒井潤一, 松島巖: 腐食防食. C-112(1986)