

## 配管自動溶接部のビード蛇行現象に及ぼすシールドガスの影響

Influence of Shielding Gases on Bead Winding Phenomenon  
made by Automatic Pipe Welding

落合利充*	五十嵐裕治*	木村裕**	佐藤豊幸*
OCHIAI Toshimitsu	IGARASI Yuuji	KIMURA Yutaka	SATOU Toyoyuki

半導体製造工場においてガスの清浄度を確保するため高純度材が使用される。これら材料に対して低電流で通常の配管自動ティグ溶接を行うと溶接ビードが蛇行する場合があります。大きな問題となっていた。蛇行現象の観察およびこの結果を元にした溶接条件の影響を検討した結果、シールドガスの組成を調整することにより、容易に溶接ビードの直進性を改善することが可能であることを見出した。また、本法を用いることにより溶接姿勢の影響低減、良好な溶け込み形状、溶接条件設定作業の省力化を図ることも可能であることを確認した。

In order to secure gas purity at semiconductor manufacturing process, a high purity piping metal is used. But, an automatic TIG welding with low current performed to the metals often causes zigzag welding beads. Therefore, by changing welding conditions, influences on the meandering phenomenon were researched. As a result, it was proved that this problem was solved by adjusting composition of the shield gas. And also, this solution was found to be insensitive to the welding operation such as worker's welding posture, effective in the weld penetration and the laborsaving.

## 1. はじめに

半導体製造などで用いられるガスを製造装置等に供給する配管としてオーステナイト系ステンレス鋼の高純度材が使用されている。配管の品質として、表面の洗浄品質や内面粗度などが厳密に規定されているほか、化学成分についても硫黄(S)、マンガン(Mn)、ケイ素(Si)等は特にJIS規格に比較して厳しい基準で規定されている。

配管の溶接には、溶加材を用いない自動ティグ溶接法によるI形突合せ溶接が広く用いられている。シールドガスとしては純アルゴン(純Ar)や、アルゴン(Ar)と数パーセントの水素(H<sub>2</sub>)とを含む混合ガスが用いられている。

溶接による問題点である不完全溶融の要因としては、溶接の入熱量不足や、電極の消耗によるアーク安定性の低下、人的ミスによる開先の狙いずれ等のほかに、溶接ビードの直進性が悪化(蛇行)する現象が挙

げられる。特に、溶接ビードの蛇行現象に関しては、溶接条件を厳密に管理した場合においても発生することがあるため、抜本的な対策が要望されていた。蛇行現象は、配管径が20mm以上、肉厚が1.2mm以上3mm以下である場合、使用する溶接電流が100A以下の低電流域にある場合に発生しやすい。また、高純度材を使用する場合にも蛇行現象が発生しやすい。

本報では、蛇行現象の原因解明のために行った蛇行現象の観察及び溶接部表面の成分分析結果と、蛇行現象を低減するために行った溶接条件の影響を検討した結果について報告する。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材

供試材としてJISG3459に規定されるSUS316LTP-S-Cを使用した。寸法は、外径60.5mm×肉厚1.65mmである。化学成分をTable 1に示す。ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)以外の成分については規格値の半分程度以下に抑えられ、特に硫黄(S)については厳しく管理されていることが分かる。

\* 開発・エンジニアリング本部山梨研究所溶接技術センター

\*\* オンサイト・プラント事業本部プラント・エンジニアリングセンター製作部

Table 1 Chemical composition. (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
JIS	≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	12.00 ~ 16.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00
Specimen	0.016	0.38	0.71	0.023	0.001	12.62	16.66	2.15

2.2 試験装置

装置の構成は、Fig. 1に示すように、溶接電流及び溶接時間を数値入力できる溶接機、配管を回転させるポジショナー、トーチ位置決め用XYZ軸テーブル、及び観察用カメラからなる。ティグ溶接電源として交直両用イナートガス溶接機を使用し、逆極性で溶加材を用いず、開先等の変動による影響をなくすためビードオンで溶接を実施した。

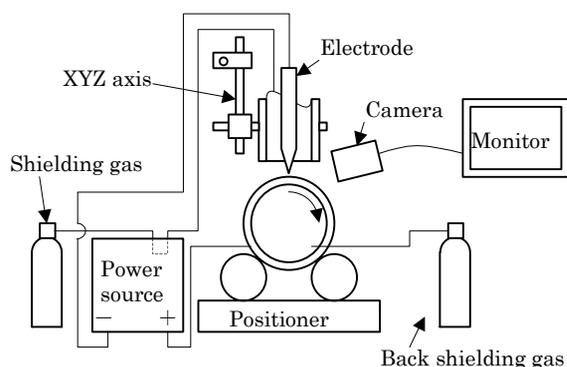


Fig. 1 Apparatus for welding experiments.

2.3 試験条件

初めに純 Ar ガスを用いて溶接電流を60Aとした状態での蛇行現象を観察した。

次に Table 2に示す溶接条件を基本条件とし、以下の調査項目毎について、アーク観察及びビード形状の測定を行った。調査項目は、電極形状(先端角度: 15°, 30°, 60°, 90°, 120°), 溶接速度(回転数: 0.2rpm, 0.4rpm, 0.6rpm, 1.0rpm), パルス条件(速度×パルス時間比×電流比), シールドガス組成 (Ar+ヘリウム (He), Ar+H<sub>2</sub>, Ar+窒素 (N<sub>2</sub>), Ar+酸素 (O<sub>2</sub>)) である。

Table 2 Basic welding condition.

Current	45A
Speed	0.4rpm
Pulse	None
Electrode	2%Th-W, φ1.6mm, 60°
Arc length	1.8mm
Inner pressure	None
Shielding gas	Ar, 10L/min
Back shielding gas	N <sub>2</sub> , 7L/min

3. 実験結果及び考察

3.1 蛇行現象の観察結果

3.1.1 ビード外観

シールドガスに純 Ar を用いた標準的な溶接条件により、蛇行量の測定、アークおよび溶融池の観察を行った。蛇行が発生した溶接サンプルの表ビード蛇行量の測定結果を Fig. 2に示す。溶接開始から80mm 付近までは大きく蛇行することなく安定したビードが得られているが、その後は急激に左右に蛇行していることが分かる。Fig. 3 (b) に蛇行が発生したサンプルの裏波ビードの外観写真を示す。Fig. 3 (a) に示す健全なビードと比較すると、大きく蛇行していることが明瞭に分かる。

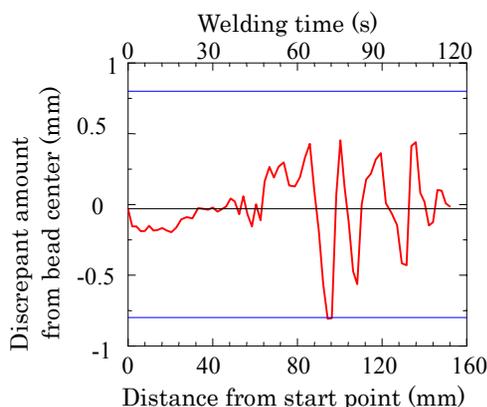


Fig. 2 Bead winding amount.

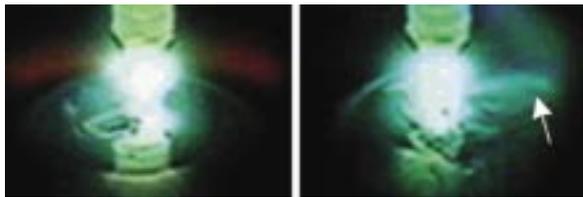


(a) Straight bead (b) Winding bead

Fig. 3 Bead track

3.1.2 溶融池

溶接直後から溶融池表面にスラグの浮遊が確認され、最終的には溶融池表面の大部分がスラグで覆われる状況が観察された。ただし、基本的に電極直下にスラグは観察されず、スラグが対流で電極直下に流された場合、消失あるいは小さくなるのが観察された。蛇行が発生しない場合には Fig. 4 (a) のようにスラグの浮遊が少なく、蛇行が発生する場合には、Fig. 4 (b) に矢印で示すように溶融池表面がスラグで覆われ、陽極点が電極の直下以外の場所へ伸びていることが確認された。アーク観察写真の説明図を Fig. 5に示す。



(a) Stable arc (b) Unstable arc

Fig. 4 Shape of the arc during welding.

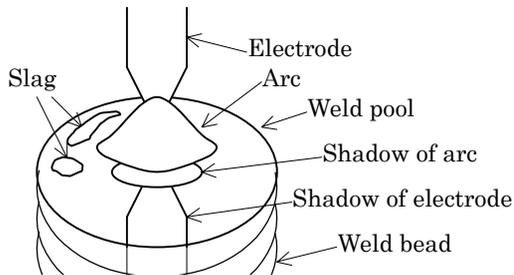


Fig. 5 Schematic of welding.

### 3.1.3 成分分析

Fig. 4 (b) のように陽極点が大きく逸れた瞬間にアークを停止し、残存したスラッグの成分分析を行った。Table 3に分析結果を、Fig. 6に分析位置を示す。

Table 3 Chemical composition. (%)

	Fe	Cr	Ni	Mo	Ca	Si	Al
Base metal	66.67	17.82	12.66	2.09	—	0.77	—
Weld bead	64.38	19.36	12.63	2.91	—	0.71	—
Slag A	37.40	16.21	6.76	1.31	20.69	15.07	2.55
Slag B	60.82	18.74	11.55	3.00	2.95	2.95	—



Fig. 6 Position of analysis.

Table 3の分析結果より、アークを誘引したと考えられるスラッグAにおいて、カルシウム (Ca)、Si、アルミニウム (Al) が多く検出された。Ca、Alは電離電圧が低く、蒸気圧が高く、また、これらの複合酸化物の融点は1165℃である。つまり、母材の主な合金成分中に電離電圧の低い元素が微量に存在し、かつ溶融池外周部の温度がそれほど高くない場所にその金属蒸気が偏在して発生したことにより電流経路が形成さ

れ、アークが誘引されたと推定される<sup>1)</sup>。

溶融池表面に鋼材中のスラッグ成分が浮上し、更に溶融池外周部に堆積したスラッグが蒸発することによりビードの蛇行が発生する。つまり、溶融池表面上にスラッグを発生させないか、もしくは発生したスラッグを効率よく消失させることが可能であれば、蛇行は発生しないものと考えられる。

### 3.2 溶接条件の影響

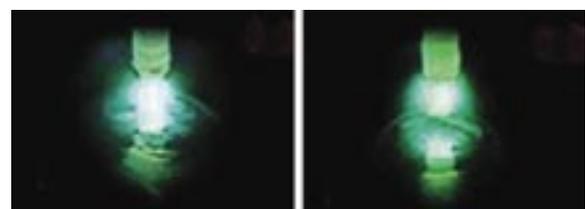
#### 3.2.1 電極形状の影響

溶融池の対流にはアーク圧力が関係しており、陽極点の変動はアーク圧力も一因であると考えられるため、電極先端形状(角度)を変化させた場合の影響を調べた<sup>2)</sup>。

蛇行の発生状況について、各サンプルでの蛇行量の比較を行うため、溶接開始位置から終了位置までの溶接線のズレ量を2 mm 間隔で測定(約70点)し、その標準偏差の値を蛇行指数として評価を行った。

外観観察より数値の目安としては、0~0.1:蛇行が認められない, 0.1~0.15:軽微な蛇行, 0.15~0.2:明瞭な蛇行, 0.2~:著しい蛇行として概ね区分できる。

ビードの蛇行指数は、電極先端角度が90°以上になると、Fig. 7 (a) の60°の場合と比較して、Fig. 7 (b) に示すように電極先端の広い範囲からアークが発生するようになり、Fig. 8に示すようにビードが安定するようになる。しかし、これはスラッグを消失させたこと



(a) 60° (b) 90°

Fig. 7 Effect of electrode shape on bead winding index and bead width ratio.

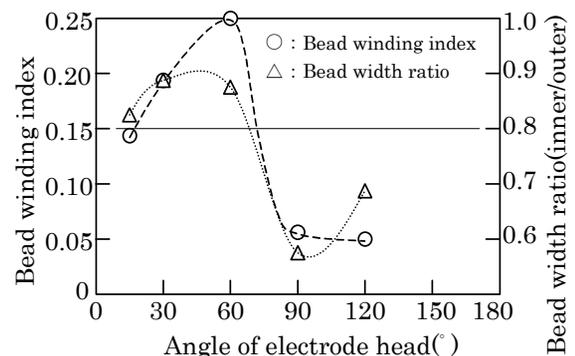


Fig. 8 Effect of electrode shape on bead winding index and bead ratio.

によるものではなく、溶融池外周部へスラグを押し出す力が弱くなったために、全体的にスラグが存在し安定しているに過ぎないことが観察された。

また、ビードは安定するものの、表ビード幅に比較して裏ビード幅が小さいために、電極先端角度90°以上での自動ティグ溶接は溶接ビードの裏波形状を制御するには適していない。

### 3.2.2 溶接速度の影響

溶接電流は設定した溶接速度に合わせて、溶接ビード幅を5～6mmになるように調整して実施した。溶接速度を速くすることにより、Fig. 9に示すようにビードの蛇行は改善されることが確認された。また、ビード幅比も1.0に近づき、裏ビード幅が十分であることが確認された。これは、溶融池表面に発生したスラグが溶接の進行についていけずにビード上に残留するためである。

しかしながら、溶接速度の調整による蛇行現象の改善効果は、固定管では必ずしも有効ではなく、水平固定管において3～9時の位置では蛇行の発生が確認された。これは、溶融池表面に生成されたスラグが立向上進姿勢の際に溶融池表面から離れないために生ずるものと推察される。

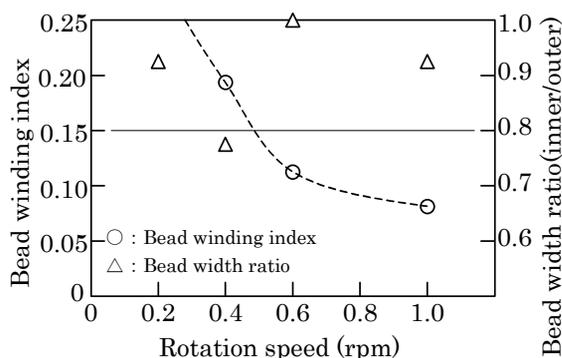


Fig. 9 Effect of welding speed on bead winding index and bead width ratio.

### 3.2.3 パルス条件の影響

下向き回転管溶接で、パルス条件を調整することにより改善効果が確認されたことから、水平固定管による全姿勢溶接による確認を行った。

結果を Fig. 10に示す。溶接速度が速いほど、パルス時間比が短いほど、電流比が大きいほど蛇行改善効果が高かったが、これに相反して溶け込みが浅くなる傾向にあり、配管施工への適用が難しいことが確認された。

## 3.3 シールドガス組成の影響

### 3.3.1 Ar-He

ArにHeを添加した場合、Fig. 11 (a)に示すよう

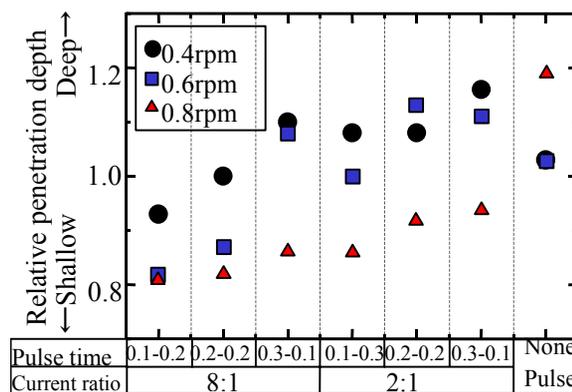


Fig. 10 Comparison of penetration depth under the welding condition.

に25%Heでは蛇行し、Fig. 11 (c)に示すように溶接中に多量のスラグが溶融プール上に確認された。これに対し、Fig. 11 (b)に示すように50%Heでは極めて安定した溶接ビードが得られ、Fig. 11 (d)に示すように溶接中のスラグの発生もほとんど見られず、溶接ビード上に残存もなかった。

Heを添加した場合、Fig. 12に示すように50%以上添加することにより、蛇行指数は0.1以下となり、蛇行防止に関して大きな効果が確認された。

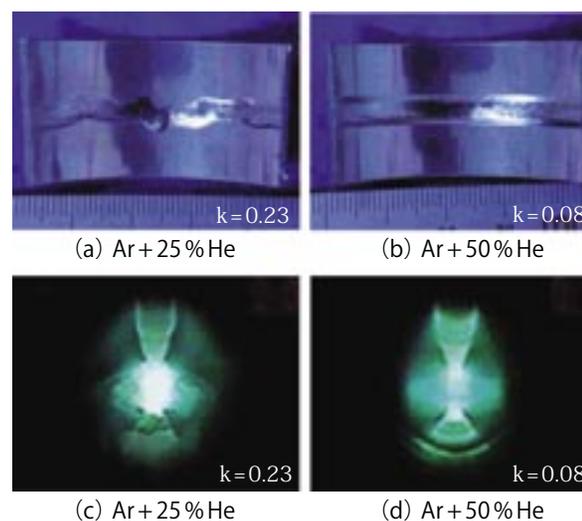


Fig. 11 Effect on helium content in shielding gas.

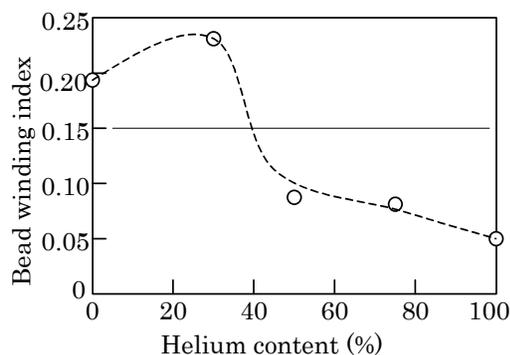


Fig. 12 Effect of helium content in shielding gas.

尚、電流値については、過大・過小な溶け込みとならないように調整する必要がある。

### 3.3.2 Ar-H<sub>2</sub>

Ar-H<sub>2</sub>では3%H<sub>2</sub>においてビード止端部に軽微な不揃いが部分的に生じているものの、Fig. 13に示すように著しい蛇行やスラグの残存などは認められなかった。(但し、当該シールドガスは実工事の配管溶接に使用されているものも含まれており、蛇行が発生したとの報告もある。)

上記の理由として、アークの観察より Fig. 14 (a-2)に示すように、溶融池の先端付近にスラグの形成が認められ、このスラグがアーク側方に移動した際に電極直下に吸い込まれて消失することが観察されており、純 Ar の場合と比較して溶融池の対流が変化しているものと推測される。つまり、H<sub>2</sub>を添加した場合、溶融池はアーク直下へスラグを移動させる対流が強くなり Fig. 14 (a-1), (b) のように比較的安定した溶接が可能であるが、配管材料および溶接条件などによっては、溶融池の対流が変化する場合があり、溶融池の外

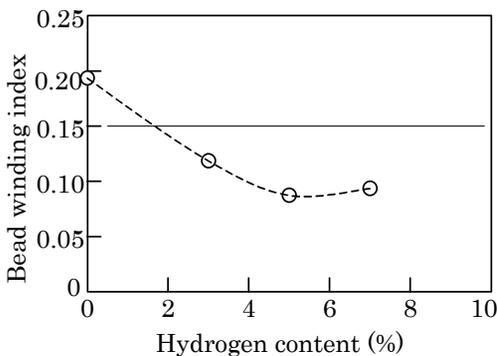
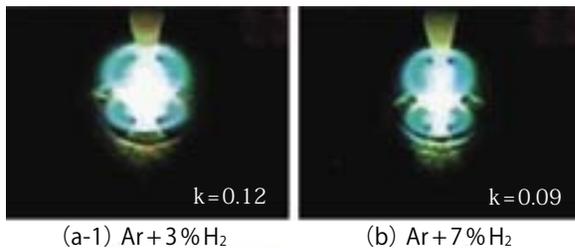
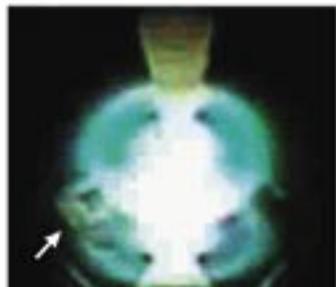


Fig. 13 Effect of hydrogen content in shielding gas.



(a-1) Ar+3% H<sub>2</sub>

(b) Ar+7% H<sub>2</sub>



(a-2) Ar+3% H<sub>2</sub>

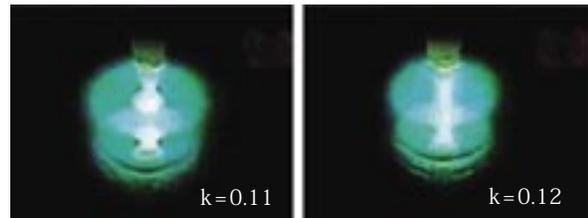
Fig. 14 Effect of hydrogen content in shielding gas.

周部にスラグが残存することにより蛇行が発生するものと考えられる。

### 3.3.3 Ar-N<sub>2</sub>

Ar に N<sub>2</sub> を添加した場合、Fig. 15 に示すようにどの条件においても蛇行やスラグの生成が確認されず、非常に安定したビードが得られた。アークの状態は He を添加した場合と類似しており、電極先端の高輝度範囲はやや小さく、純 Ar の場合と比較して陽極領域は均一・広範囲に形成された。

蛇行指数は Fig. 16 に示すように He よりやや劣るが、少量の添加でも十分な効果が得られた。



(a) Ar+10% N<sub>2</sub>

(b) Ar+25% N<sub>2</sub>

Fig. 15 Effect of nitrogen content in shielding gas.

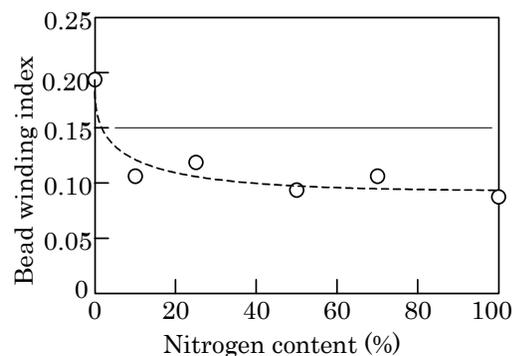


Fig. 16 Effect of nitrogen content in shielding gas.

### 3.3.4 Ar-O<sub>2</sub>

Ar に酸素を添加した場合には Fig. 17 に示すように蛇行がやや大きくなるとともに、溶け込みが深くなる傾向がある。酸素濃度0.1%までは純 Ar のアークと外観上はほとんど変わりなく、溶融池はスラグで覆われ、陽極点の大きな変動によるビードの蛇行も観察された。しかし、0.5%以上では、Fig. 18 に示すようにアークおよび溶融池の状態が一変し、溶融池表面にはスラグが全く認められなかった。これは、溶融金属への酸素の混入による対流方向の変化によるもの<sup>3)</sup>と考えられ、溶融池表面に形成されたスラグが対流(内向き)により電極直下に移動し、消失するものと推測される。

しかし、酸素濃度0.5%以上ではアークが、溶融池表面のスラグの形成を抑制し、蛇行を防止する効果が

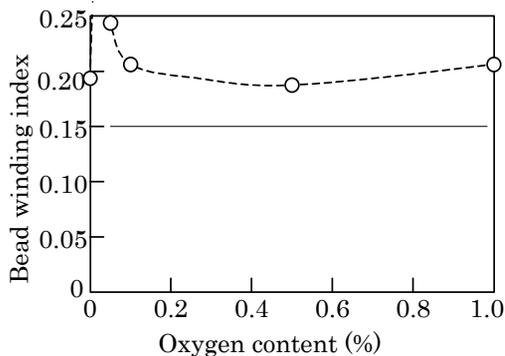
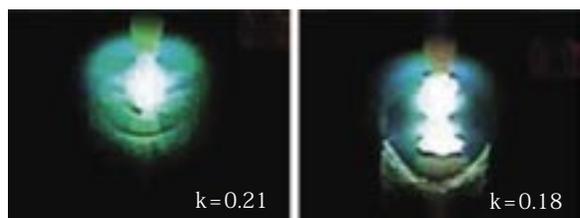


Fig. 17 Effect of oxygen content in shielding gas.



(a) Ar+0.1%O<sub>2</sub> (b) Ar+0.5%O<sub>2</sub>  
Fig. 18 Effect of oxygen content in shielding gas.

期待されるものの、電極が消耗し、アークコア自体が変動し、偏った位置からアークが発生するため、実使用には難しい。

### 3.3.5 溶接継手の品質確認

以上述べたように、ArにHe及びN<sub>2</sub>を適正量添加することにより、溶融池表面でのスラグの発生を抑え、その結果として蛇行現象を低減する効果のあることが確認された。次に、得られたシールドガスをを用いて溶接継手に関しての品質の確認を行った<sup>4)</sup>。

溶接金属中に窒素が混入することから、溶接部はやや硬化し、Ar + N<sub>2</sub>を使用した場合の溶接部は他と比較して2割程度硬化し、最大でHv 190程度となったが、実用上問題はない。また、Fig. 19に引張強度に対する各シールドガスの影響を示すが、溶接部を含む

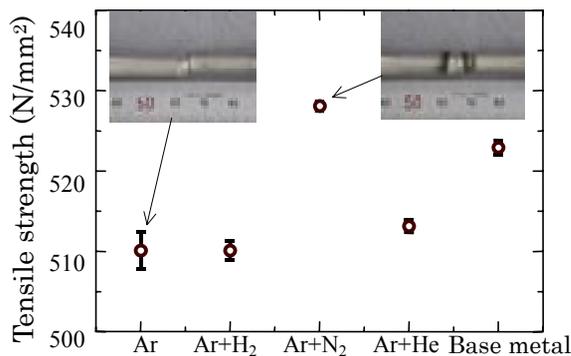


Fig. 19 Effect of shielding gas on tensile strength.

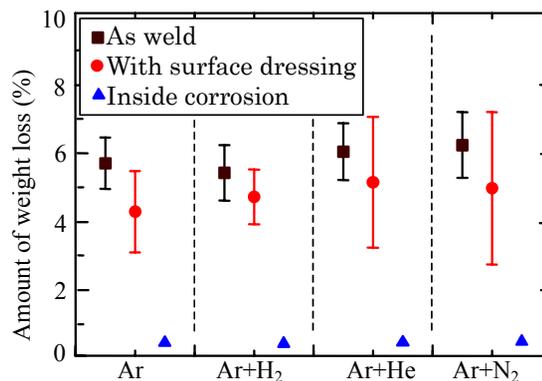


Fig. 20 Effect of shielding gas on resistance.

10 mm での伸びは母材と同程度であり、他のシールドガスを使用した場合と比較して優れている。

次に塩化第二鉄腐食試験法に準拠して耐食性の確認を行った。重量減少量の測定結果を Fig. 20 に示す。重量減少率の差も確認したが、シールドガス種による耐食性の優位差はなかった。表面研磨の有無で比較すると、研磨した方がやや耐食性は改善された。また、内面のみ腐食は大幅に少ない結果となった。

## 4. まとめ

配管自動溶接部のビード蛇行現象とシールドガスの影響を調べ、蛇行現象は溶融池表面に発生したスラグが溶融池外周部に偏析し、アークを誘引したために発生する現象であることを確認した。

Ar+N<sub>2</sub>, Ar+He については、混合比率により溶融池表面にスラグがほとんど発生せず、蛇行が起らないことが確認された。これは、アークが溶融池表面で分散しており、対流を抑制すると同時に表面に浮上したスラグを効率よく消失させているものと推察される。

更に Ar+N<sub>2</sub> においては、溶け込み形状や再現性が向上し、ロットによる溶け込み形状への影響が少ないことから、不良率の低減や溶接条件設定作業などの軽減も図られることが分かった。

### 参考文献

- 岡田明, 中村治方. 溶接学会論文集. 11 (1), 88-94 (1993).
- 平岡和雄, 岡田明, 稲垣道夫. 溶接学会論文集. 3 (2), 246-252 (1985).
- 岡田明, 中村治方. 溶接学会論文集. 12 (1), 94-100 (1994).
- 長谷川正義. 中央大学工学部紀要. 30, 1-6 (1994).