オーステナイト系ステンレス鋼 SUS310S 溶接金属の 微細粒組織形成現象とその特性*

—ホットワイヤ TIG 溶接法による溶接金属組織の微細化技術の開発—

山下正太郎**, 篠崎 賢二***, 山本 元道***, 門井 浩太***

Relationship Between Grain Refinement in Weld Metal of Type 310S Stainless Steel and Welding Conditions and Mechanical Properties* - Grain Refinement in Weld Metal by Hot-wire GTAW Process -

by YAMASHITA Shotaro **, SHINOZAKI Kenji ***, YAMAMOTO Motomichi *** and KADOI Kota ***

The aim of this study was to investigate the influence of welding parameters such as arc current, welding speed and wire feeding speed on the grain refining in weld metal of type 310S austenitic stainless steel. Besides, the effect of the grain refinement on mechanical properties such as tensile strength, hardness and ultrasonic transmission was examined. Equiaxed grains of about 15 μm formed by hot-wire GTAW in weld metal and the fine grain formed over a wide range stably. When the wire current was low, the fine grains formed at the lower part of the weld metal. On the other hand, when the wire current was high, the grains formed at the upper part. The area ratio of fine grain in weld metal corresponding to the amount of fine grain in weld metal depended on the wire current. Besides, the ratio increased with decreasing in the arc current, increasing the welding speed and wire feeding speed. The maximum area ratio of fine grain in weld metal was about 50 %.

The hardness of the weld bead including the fine grain was higher than that without the fine grains. Besides, the formation of the fine grain showed higher strength and elongation. Moreover, a transmissivity of ultrasonic wave was improved significantly by including the fine grains in multi-pass weldment.

Key Words: GTAW, Hot-wire process, Austenitic stainless steel, Grain refinement, Mechanical properties

1. 緒 言

従来より、溶接金属の機械的特性の向上¹⁻⁵⁾、溶接高温割れ感受性の低減^{6,7)}などを目的として、溶接金属組織を微細にする検討が多くなされている。微細化の方法としては、微細化元素の添加、アーク揺動やパルス、また磁気攪拌などの適用が挙げられる。中でも、アルミニウム合金等においては、これらの方法による組織の微細化が顕著であり、凝固割れ感受性が低下することも報告されている^{8,9)}。しかし、これらの方法は、添加元素の最適化、パルス電源、磁気攪拌装置など特別な装置が必要であり、実施工での適用は限定される。

一方、これらの微細化方法を鋼やステンレス鋼に適用した場合、十分な微細化組織が得られていないのが現状である¹⁰⁻¹²⁾。しかしながら、たとえばオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属において微細化組織が得られれば、溶接金属部の柱状組織による超音波の反射や透過性が低下することで、超音波探傷試験が困難な問題、高温割れの問題などを解決できる可能性があり、極めて有用となる^{6,13,14)}。

著者らは、従来の TIG 溶接に比べ極めて高速で溶接が可能な、ホットワイヤ TIG 溶接法を開発し、実施工への適用を図っている¹⁵⁾。本溶接法での実験過程において特定の条件で溶接金属中に微細な等軸晶が形成される現象が見られた。本溶接法において、微細等軸晶の形成を任意に制御することができれば、特別な組成のワイヤや特別な装置を必要とせず微細化組織を得られることとなり、実施工的にも非常に有用と考えられる。そこで本報では、ホットワイヤ TIG 溶接法により形成される微細等軸晶について、その形成状態と各種溶接条件の関係について系統的に調査し、その形成条件範囲を導出した。さらに、その微細等軸晶を有する溶接金属部の機械的特性について評価した。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供 試 材 料

母材には完全オーステナイト系ステンレス鋼である SUS310S を、添加ワイヤには JIS Z3321 YS310S ($\phi 1.2\text{mm}$) を用いた。化学組成を Table 1 に示す。母材は 2 種類使用しており、後述の 2.2 では SUS310S-(1)、2.3 の超音波透過性評価では SUS310S-(2) をそれぞれ使用した。

Fig. 1 に示すように、試験片は $100 \times 50 \times 12\text{mm}^3$ の母材試

*受付日 平成28年 10 月14日 受理日 平成28年 12 月13日

**学生員 広島大学 Student member, Hiroshima University

***正 員 広島大学 Membe, Hiroshima University

Table 1 Chemical compositions of base material and filler wire (mass%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Fe
SUS310S-(1)	0.05	0.59	0.84	0.022	<0.001	19.19	25.33	-	Bal.
SUS310S-(2)	0.02	0.66	0.90	0.021	<0.001	19.20	24.85	0.14	Bal.
YS 310S	0.048	0.39	1.60	0.018	0.002	21.49	26.09	-	Bal.

Fig. 1 Schematic illustration of specimen used for hot-wire GTAW.

Table 2 Welding conditions of hot-wire GTAW process.

Welding speed, m/min	0.3, 0.5, 0.7
Arc current, A	200, 250, 300
Arc voltage, V	9.3~11.7
Arc length, mm	3
Wire feeding speed, m/min	3.0, 5.0, 7.0
Wire feeding angle, deg.	30, 45
Wire feeding position, mm	0, +1
Power supply distance, mm	57
Wire current, A	70~155
Pulse of wire current, Hz	100
Duty, %	30
Shielding gas(Ar), l/min	20

験片を用い、開先角度40°、開先深さ6mm、開先半径2mmのU型開先加工を施した。

2.2 ホットワイヤ TIG 溶接条件

本研究で使用した溶接条件を Table 2 に、ホットワイヤ TIG 溶接法の模式図を Fig. 2 に示す。本研究では、ホットワイヤ法でジュール加熱されたワイヤを、溶融池後方から送給した。図に示すように、アーク長は開先底部から電極先端までの距離、ワイヤ送給位置は、開先底部での電極中心を原点としワイヤ先端部が開先底部に接する位置までの距離で表し、溶融池後方側を正とした。また、ワイヤ送給角度は開先底部面とワイヤ間の角度とした。アーク電流と溶接速度、ワイヤ送給速度、ワイヤ電流を適宜変化させて微細等軸晶形成に対する影響を調査した。溶接中は、高速度ビデオカメラを用いてホットワイヤの送給や溶融現象、溶融池の観察を行った。

溶接長は90mmとし、定常部より10mm間隔で3断面の組織観察用の試験片を採取した。試験片は、鏡面仕上げし

Fig. 2 Schematic illustration of hot-wire GTAW process in this study.

Fig. 3 Schematic illustration of tensile test specimen.

た後、10% シュウ酸水溶液を用いた電界腐食により組織現出を行った。組織観察では、光学顕微鏡ならびに SEM-EBSD を用いた。溶接金属中に形成された微細等軸晶形成を定量的に評価するため、微細等軸晶形成領域面積を溶接金属部面積で除すことで断面微細化率を求めた。

2.3 溶接部特性評価

ホットワイヤ TIG 溶接において得られた試験片に対してビッカース硬さ試験、引張試験および超音波透過性試験を行った。なお、いずれの試験においても、微細等軸晶の形成が認められた試験片と、微細等軸晶の形成がなかった試験片を調査した。

Fig. 1 に示した試験片を用いて、アーク電流 250A、溶接速度 0.5m/min、ワイヤ送給速度 7.0m/min、ワイヤ送給位置 +1mm、ワイヤ送給角度 45°とし、ワイヤ電流 147A の条件により1層溶接した試料について、溶接金属のビッカース硬さ試験ならびに引張試験を実施した。Fig. 3 に引張試験片形状を示す。試験片平行部断面積を $3 \times 2 \text{ mm}^2$ とし、平行部に微細等軸晶が全容着金属の 80% となる試験片を作製した。

超音波透過特性試験では、多層盛溶接継手を用いた。本プロセスにより形成された微細粒組織を含む多層盛溶接継手部と微細粒組織を有しない多層盛溶接継手に対して超音波透過特性試験を実施した。多層盛溶接継手作製に用いた試験片を Fig. 4、溶接条件を Table 3 にそれぞれ示す。板厚を 15mm とし、開先角度 20° 、開先深さ 10mm、開先半径 2mm の U 開先試験片を使用した。1 層目は溶接速度を 0.5m/min、2、3 層目は 0.3m/min として、ワイヤ送給速度は 5.0m/min と一定とした。超音波探傷の探触子は、横波中心波長 5MHz、素子寸法 10×10 mm で、溶接継手に対して斜め 45° 方向から超音波を溶接継手に対して照射した。探触子から送信された超音波の溶接継手部を通過した直後の一次波、およびその一次波が裏面に反射し再度試験体裏面に到達した二次波のそれぞれの強度を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 ホットワイヤ TIG 溶接により形成される微細等軸晶

Fig. 5 にホットワイヤ TIG 溶接により得られた微細等軸晶を有する溶接ビード断面の光学顕微鏡像ならびに EBSD 解析により得られた IPF 像を示す。なお、溶接条件は、アーク電流 250A、溶接速度 0.5m/min、ワイヤ送給速度 5.0m/min、ワイヤ送給位置 0mm、ワイヤ送給角度 30° としワイヤ電流

Fig. 4 Schematic illustration of specimen used for multi-pass welding.

Table 3 Welding conditions of multi-pass welding.

	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer
Welding speed, m/min	0.5	0.3	
Arc current, A	250		
Arc voltage, V	9.3~11.7		
Arc length, mm	3		
Wire feeding speed, m/min	5.0		
Wire feeding angle, deg.	45		
Wire feeding position, mm	+1		
Power supply distance, mm	57		
Wire current, A	120		
Pulse of wire current, Hz	100		
Duty, %	30		
Shielding gas(Ar), l/min	20		

120A である。また、Fig. 5 (a) 中の破線で示した領域は、溶接金属中に観察された微細な等軸晶を示しており、(b) の IPF 像では結晶方位差 15° 以上を結晶粒界とみなした。この等軸晶が溶接金属の中央に比較的広範囲にわたり形成していることがわかる。また、その他の領域は、柱状晶を呈していた。この断面の断面微細化率は約 30% であった。Fig. 5 (b) に示すように、微細等軸晶領域と柱状晶領域の境界 (Fig. 5 (a) 中の白線四角) を EBSD 解析したところ、微細な等軸晶は柱状晶と異なった結晶方位を有しており、平均粒径は約 $15 \mu\text{m}$ であった。なお、以後この組織を微細粒組織と呼称する。

3.2 微細粒組織形成とワイヤ電流の関係

前項において微細粒組織形成が認められたアーク電流 250A、溶接速度 0.5m/min、ワイヤ送給速度 5.0m/min の条件の基に、ワイヤ送給位置 +1mm、ワイヤ送給角度 45° としワイヤ電流を変化させて得られた溶接ビード断面写真を Fig. 6 に示す。図中の破線領域は、溶接金属中に形成された

(a) Cross-section of weld bead.

(b) OM image and IPF map at boundary between fine grain area and columnar phase area.

Fig. 5 Fine grain microstructure in weld metal by hot-wire GTAW process.

(Arc current: 250A, Welding speed: 0.5m/min, Wire feeding speed: 5.0m/min)

Fig. 6 Cross-sections of weld bead at each wire current.
(Arc current: 250 A, welding speed: 0.5 m/min, Wire feeding speed: 5.0 m/min, Wire feeding position: +1 mm)

微細粒組織領域を示している。また、溶接現象の可視化および溶接ビード外観から、いずれのワイヤ電流においても溶接現象は終始安定しており、ピットなどの溶接欠陥のない健全な溶接ビードが得られた。ワイヤ電流が105～115 Aでは、微細粒組織は溶接金属底部に形成する傾向があり、その形成領域はワイヤ電流の増加とともに僅かに減少する。120 Aになると、微細粒組織は、溶接金属上部に形成し、その形成領域は大幅に増加している。125～144 Aでは、溶接金属底部、上部のそれぞれで形成し、形成領域は120 Aに比して減少している。そして、125～144 Aでは、溶接金属の3断面観察結果から、微細粒組織の形成位置、量にばらつきがみられていた。これらの断面における断面微細化率とワイヤ電流との関係をFig. 7に示す。図中のプロットは3断面での平均値を示しており、エラーバーは最大値および最小値を示す。ワイヤ電流105～115 Aまでの領域では、ワイヤ電流の増加とともに断面微細化率は減少し、115 Aで最小の断面微細化率となる。120 Aになると断面微細化率は急激に増加し、約40%を示す。さらにワイヤ電流が増加すると、断面微細化率は減少することがわかる。125 A以降では断面微細化率のばらつきが大きくなっている。これは、ワイヤ電流の増加によりワイヤ温度が上昇したこと起因したワイヤの溶断が関係しているものと考えられる。

3.3 微細粒組織形成と各種溶接条件の関係

前項では、微細粒組織の形成位置およびその領域の広さがワイヤ電流に依存することがわかった。そこで、溶接現象に影響を与えるアーク電流、溶接速度およびワイヤ送給速度をそれぞれ変化させ、微細粒組織形成に及ぼす影響について調査した。

Fig. 8 (a), (b) および (c) に、ワイヤ送給位置 +1 mm, ワ

Fig. 7 Relationship between wire current and area ratio of fine grain in weld metal.
(Arc current: 250 A, Welding speed: 0.5 m/min, Wire feeding speed: 5.0 m/min, Wire feeding position: +1 mm)

イヤ送給角度45°とし、アーク電流、溶接速度およびワイヤ送給速度を変化させた場合のワイヤ電流と断面微細化率の関係を示す。また、いずれの溶接条件においても溶接現象は終始安定しており、溶接欠陥のない健全な溶接ビードが得られた。Fig. 8 (a) より、いずれのアーク電流においても断面微細化率は115 Aまでは僅かに減少し、120 A付近にて最大値を示し、125 A以上では低下する。また、断面微細化率の最大値は、アーク電流の増大とともに減少することがわかる。一方、Fig. 8 (b) に示すように、ホットワイヤの送給比を一定として溶接速度を変化させると、いずれの溶接速度でもワイヤ電流の増大とともに断面微細化率は増大し、最大値を示した後に低下する。最大値は0.3, 0.5, 0.7 m/minのそれぞれで97, 120, 148 Aとなり、溶接速度が大きいほど大きなワイヤ電流を示し、最大の断面微細化率も増加する傾向が確認できる。Fig. 8 (c) に示すように、ワイヤ送給

Fig. 8 Relationship between wire current and area ratio of fine grain in weld metal for each parameter.

速度を変化させた場合においても、ワイヤ電流の増大とともに断面微細化率が增大し、最大値を示した後に低下する。これは、溶接速度を変化させた場合と同様の傾向である。また、最大の断面微細化率を示すワイヤ電流は、3.0, 5.0, 7.0 m/min でそれぞれ 94, 120, 148 A であり、ワイヤ送給速度の増大とともにワイヤ電流も増大する。

アーク電流、溶接速度、ワイヤ送給速度のそれぞれでみられた断面微細化率の変化は、前項におけるワイヤ電流と断面微細化率の関係とほぼ一致していた。得られた断面微細化率を基に、ホットワイヤ TIG 溶接における微細粒組織形成のための適正溶接条件範囲を整理した結果を Fig. 9 に示す。各溶接条件にて断面微細化率が 20% を超えた領域を赤塗り、等断面微細化率領域とした。その適正範囲は、アーク電流の減少、溶接速度の増加およびワイヤ送給速度の増加とともに拡大していることがわかる。すなわち、送給されるワイヤがアークおよび溶融池から受ける熱量が減少するほど微細粒組織が形成されやすいと言える。このことより、本溶接による微細粒組織の形成には加熱されたワイヤの温度が関係すると推測できる。

4. 微細粒組織部の特性

Fig. 10 にホットワイヤ TIG 溶接法により得られた微細粒組織のビッカース硬さ試験結果を示す。微細粒組織を有する試験片の場合、溶接金属中の微細粒部の平均硬さは約 170HV であり、母材硬さ約 160HV に比してわずかに高い値を示す。一方、微細粒組織でない試験片の溶接金属は約 147HV であり、微細粒組織部は微細粒でない溶接金属に比べ約 20HV 高い硬さを示している。

Fig. 11 に通常の溶接金属と微細粒組織の引張試験結果を示す。約 80% の微細粒組織を有する溶接金属の微細粒組織の最大荷重は 3.4kN、微細粒組織を有しない試験片は 3.1kN を示し、破断伸びはそれぞれ 47.3%, 41.6% であった。これより、微細粒組織の含有によって、破断荷重、伸びともに向上することがわかる。

Fig. 12 に超音波透過性試験結果を示す。超音波特性試験

Fig. 9 Changing of adequate area of fine grain formation with each welding condition.

Fig. 10 Vickers hardness distribution.

Fig. 11 Result of tensile test.

では、試験片の板厚が要求されるため、Fig. 12 (a) に示すような微細粒組織を含む多層盛溶接試験片（断面微細化率：約20%）を作製し試験に供した。Fig. 12 (b) に示すように、微細粒組織を有しない試験片における超音波の一次透過率は31%であるのに対して、微細粒組織を有する試験片では55%を示す。また、二次透過率においても微細粒組織を有する試験片は43%、有しない試験片では8%を示すことから、いずれにおいても微細粒組織を有する試験片の方が高い超音波強度を示すことがわかる。これまでに溶接金属の柱状晶組織の形成が超音波透過性を劣化させることが知られている^{13,14)}。したがって、微細粒組織を含有することにより柱状晶の割合が減少するために超音波透過性が大幅に改善されたと考えられる。

5. 結 言

本研究では、ホットワイヤ TIG 溶接により形成する微細粒組織について、その形成範囲および特性について調査した。微細粒組織形成とワイヤ電流の関係や、アーク電流、溶接速度およびワイヤ送給速度の影響を検討した。加えて

(a) Cross-section of multi-pass weld joint.

(b) Result of ultrasonic detection test.

Fig. 12 Effect of fine grain in multi-pass weld joint on transmissivity of ultrasonic wave.

微細粒組織を有する試験片の硬さ試験、引張試験、超音波透過性試験を行い、以下の結論を得た。

- 1) TIG 溶接法とホットワイヤ法を併用することで SUS310S の溶接金属中に微細粒組織が形成することがわかった。微細粒組織形成時の溶接現象は終始安定しており、健全な溶接ビードが得られた。
- 2) 微細粒組織はワイヤ電流が低い場合では溶接金属底部付近に、高い場合では溶接金属上部に形成した。アーク電流、溶接速度、ワイヤ送給速度を変化させた場合、断面微細化率は、溶接条件に依存した特定のワイヤ電流において最大値を示し、最大で 50% 程度であった。
- 3) アーク電流の減少、溶接速度およびワイヤ送給速度の増大に伴い、断面微細化率の最大値が増加し、20% 以上の微細粒組織形成の溶接条件範囲も増大していた。
- 4) ホットワイヤ TIG 溶接法により形成した微細粒組織は、硬さ、強度、伸びが微細化していない溶接金属組織に比べて向上する傾向にあった。さらに、微細粒組織を有する多層盛溶接試験片の超音波透過性は 55% と従来 TIG 溶接により作製した試験片の 31% に比して大幅に高い値を示した。

参 考 文 献

- 1) Y. Arata, F. Matsuda, S. Mukae and M. Katoh: Effect of Weld Solidification Mode on Tensile Properties of Aluminum Weld Metal, Transaction of JWRI, 2(1973), 184-190
- 2) W. A. Petersen: Fine grained Weld Structures, Welding Research Supplement, (1973), 74-80
- 3) G.D. Janaki Ram, T.K. Mitra, V. Shankar and S. Sundaresan: Microstructural refinement through inoculation of type 7020 Al-Zn-Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile properties, Journal of Materials Processing Technology, 142(2003), 174-181
- 4) M. Hamada, S. Okaguchi and Y. Komizo: Effect of Tensile Strength and Boron Addition on Microstructure and Toughness of Weld Metal Containing Ti, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 27(2009), 1-6 (In Japanese)
- 5) P. Schempp, C. E. Cross, R. Hacker, A. Pittner and M. Rethmeier: Influence of grain size on mechanical properties of aluminium GTA weld metal, Welding in the World, 57(2013), 293-304
- 6) T. Ohmae, I. Wakamoto and M. Nagareda: Study on High Quality Welding Process by Magnetic Stirring, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 3(1985), 117-123 (In Japanese)
- 7) I. Masumoto, T. Shinoda and Y. Ueno: Effect of Pulse Welding Current on Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Weld Metal, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 7(1989), 245-249 (In Japanese)
- 8) F. Matsuda, K. Nakata, K. Tsukamoto and K. Arai: Results of Weld Crater and Bead Cracking Tests, Transaction of JWRI, 12(1983), 253-262
- 9) F. Matsuda, K. Nakata, K. Tsukamoto and T. Uchiyama: Enhancement of Beneficial Effect of Zirconium on Improvement of Crack Susceptibility by Application of Electromagnetic Stirring, Transaction of JWRI, 13(1984), 57-66
- 10) T. Watanabe, H. Nakamura and K. Ei: Grain Refinement by Pulsed TIG Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 5(1987), 16-21 (In Japanese)
- 11) T. Watanabe, H. Nakamura and K. Ei: Grain Refinement by TIG Welding with Electromagnetic Stirring, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 6(1988), 132-138 (In Japanese)
- 12) M. Malinowski-Brondnicka, G. Den Ouden and W. J. P. Vink: Effect of Electromagnetic Stirring on GTA Welds in Austenitic Stainless Steel, Welding Research Supplement, (1990), 52-59
- 13) M. Hayashi, S. Sugimura, T. Sanpei and Y. Ishii: Propagation Characteristics of Ultrasonic Longitudinal Wave in Austenitic Stainless Steel Casting, JHPI, 22(1984), 239-245 (In Japanese)
- 14) S. Nishikawa, T. Furukawa, I. Komura and Y. Horii: The Influence of Structures of Nickel Base Alloy Weld Metals on Flaw Detectability by Ultrasonic Test, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 25(2007), 179-186 (In Japanese)
- 15) K. Shinozaki, M. Yamamoto, Y. Nagamitsu, T. Uchida, K. Mitsuhashi, T. Nagashima, T. Kanazawa and H. Arashin: Melting Phenomenon during Ultra-High-speed GTA Welding Method using Pulsed-heated Hot-wire, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 27(2009), 22s-26s