

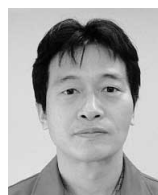
(論文)

## 溶接金属の低温じん性に及ぼすオーステナイト( $\gamma$ )粒径の影響

### Influence of Austenite ( $\gamma$ ) Grain Size on Low Temperature Toughness of Weld Metal



韓 鵬\*1  
Peng HAN



佐藤統宣\*2  
Munenobu SATO

Although much has been studied on steel materials about the influence of chemical composition on prior austenite grain size and its relationship with mechanical properties and about the technology for minimizing the austenite grain size, few has been studied on weld metals. This paper clarifies the factors affecting the austenite grain size of a weld metal for high strength steel and describes the influence of the austenite grain size on the low temperature toughness.

まえがき＝海洋構造物の大形化および使用環境の寒冷地化が進む中、より一層の高強度、高じん性が求められつつあり、当社としても高強度鋼用溶接材料の改良・開発に取り組んでいる。

溶接金属のじん性を向上させるためには、通常(1)マトリックス(素地組織)の強化、(2)マイクロ組織の微細化、および(3)アシキュラー(針状)フェライトの形成の三つの機構が利用される。この三つの機構は全てオーステナイト( $\gamma$ )から初析フェライト( $\alpha$ )への変態を制御するものである。ここで当社は、新たな溶接金属のじん性向上技術を探索するため、高温段階でのデルタフェライト( $\delta$ )から $\gamma$ への変態に着目し、 $\gamma$ 粒径を制御することによって溶接金属のじん性に及ぼす影響を調査した。

鉄鋼材料においては、 $\gamma$ 粒径に及ぼす合金成分の影響や機械的性質との関係、また $\gamma$ 粒径の微細化技術などが研究されているが<sup>1)</sup>、溶接金属についてはこれまでほとんど検討されていない。そこで本稿では、高温レーザー顕微鏡を用いて、高強度鋼用溶接金属の $\gamma$ 粒径と組織変化をその場観察により評価した。さらに、 $\gamma$ 粒径に及ぼす各影響因子(化学成分、溶接法)を明確にした上で、溶接金属の低温じん性に及ぼす $\gamma$ 粒径の影響を検討した。以下にその概要を報告する。

## 1. 試験方法

### 1.1 試験片作製

本稿では、溶接金属の $\gamma$ 粒径の制御について、溶接金属の含有酸素の量、含有アルミニウム元素の量(以下、Al量という)、および溶接法の三つの影響因子を検討した。酸素量については、溶接金属の酸素量に比例して酸化物系介在物が増え、“ピン止め効果”(溶接金属内部に

分散された介在物や不純物などは粒界移動に対してピンとして働き、結晶粒の成長を抑制する現象)により $\gamma$ 粒径が変化することを想定した。一方、Al量については、溶接金属のAl量が増えるにつれてFe-C-Alの擬二元系平衡状態図における $\gamma$ 単相領域が減少するとともに、Al添加により溶接金属の酸素量も変化して、 $\gamma$ 粒径が変化することを想定した。溶接法としてはサブマージアーク溶接(SAW)、ガスマタルアーク溶接(GMAW)、およびガスタングステンアーク溶接(GTAW)の3種類の溶接法において、溶接金属の酸素量が増えることによる $\gamma$ 粒径の変化を想定した。以上の $\gamma$ 粒径制御における各影響因子を検証するため、まず引張強さ780MPa級鋼用SAW材料(JIS Z3183-2012 S80J4-H4)をベースとして、フラックスの成分系を変化させた試験材料を用い、酸素量とAl量の異なる溶接金属を作製した。GMAWおよびGTAWの試験では、SAWで作製した溶接金属の化学成分を狙って調整したソリッドワイヤを用いて、シールドガス中のArとCO<sub>2</sub>の比率を変化させることにより低酸素系の溶接金属を作製した。各溶接法における溶接条件と開先形状を表1に示す。引張試験および衝撃試験の試験片はJIS Z3111-2005に従い、溶接金属の中央かつ板厚中央より採取した(図1)。また、 $\gamma$ 粒径測定用の試験片は、作製した多層溶接金属の最終パスの原質部から $\phi$ 5.0×1mm厚さで採取し、表面を鏡面研磨処理して作製した(図1、図2)。

### 1.2 高温レーザー顕微鏡による $\gamma$ 粒径の測定

高温レーザー顕微鏡システム(図3)の赤外線集光型加熱炉内に試験片(図2)を設置して熱サイクル(図4)を与えた。この熱サイクルは、溶接時溶接金属の再熱部粗粒域(最高温度1,300~1,400℃程度)の温度履歴を再現するものである。そしてその場で0.03秒の時間分解能で $\gamma$

\*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 \*2 阪神溶接機材(株) 製造部

表 1 溶接条件と開先形状

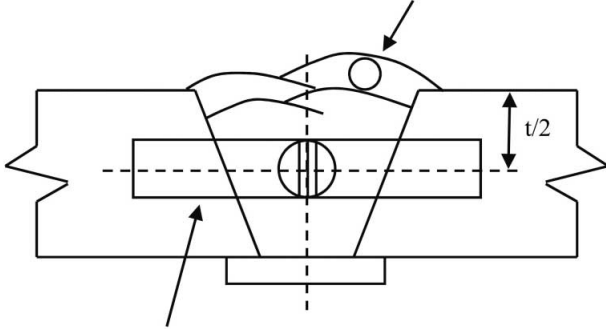
Table 1 Welding conditions and groove configuration

Welding Process	Base metal	Wire dia. (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Preheating/Interpass temperature (°C)	Current polarity	Groove configuration
SAW	JIS G3128 (2009) SHY685N	4.0	550	30	400	140~160	AC	
GMAW		1.2	290	30	300		DCEP <sup>*1</sup>	
GTAW		1.2	280	11	100	90~110	DCEN <sup>*2</sup>	

\*1) DCEP: Direct Current Electrode Positive

\*2) DCEN: Direct Current Electrode Negative

Location of test specimen for measuring  $\gamma$  grain size



Location of tensile and impact test specimen

図 1 試験片の採取位置

Fig. 1 Location of test specimen

Mirror polishing on the observation side

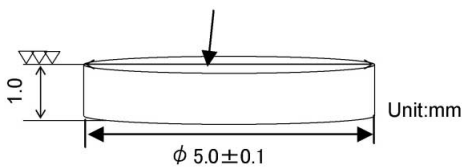


図 2  $\gamma$  粒径測定用試験片の形状

Fig. 2 Test specimen for measuring  $\gamma$  grain size

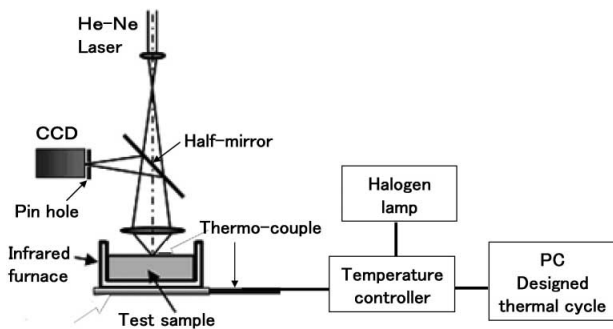


図 3 高温レーザ顕微鏡の模式図

Fig. 3 Schematic illustration of high temperature laser scanning confocal microscopy (HLSCM)

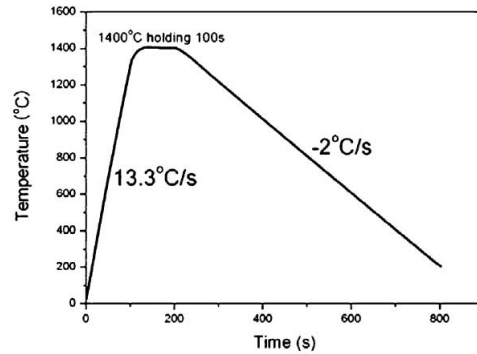


図 4 熱履歴

Fig. 4 Thermal history

粒径を測定した<sup>2)</sup>。 $\gamma$  粒径の測定にあたっては、高温レーザー顕微鏡で観察した  $\gamma$  生成時の写真 (視野:  $0.4 \times 0.3\text{mm}$ ) を用いた。観察写真上に横20本、縦20本の等間隔の直線、および斜めに2本の直線 (合計42本の直線) を引き、各線ごとに  $\gamma$  粒の数を測定して、 $\gamma$  粒径を算出する。その42本ごとに算出した値を平均して供試材の  $\gamma$  粒径とした。

### 1.3 その他の性能評価

溶接金属のミクロ組織を光学顕微鏡で観察し、介在物の大きさや個数密度をEDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) 分析およびEPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 分析により調査した。また、溶接金属の機械的性質評価は、引張試験 (JIS Z2241-2011,  $6.0\phi$ )、シャルピー衝撃試験 (JIS Z2242-2005) を実施した。

## 2. 試験結果と考察

### 2.1 酸素量の影響

酸素量を変化させたSAW材料の溶接金属の化学成分分析結果と引張試験結果を表2に示す。図5に溶接金属

表 2 溶接金属の化学成分分析結果と引張試験結果 (SAW)  
Table 2 Chemical compositions and tensile properties of weld metal

Test No.	Chemical compositions (mass%)									Tensile properties		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	O	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
A	0.09	0.18	1.72	0.007	0.001	2.46	0.71	0.008	<u>0.019</u>	847	<u>887</u>	22
B	0.08	0.29	1.68	0.007	0.002	2.48	0.72	0.008	<u>0.023</u>	813	<u>864</u>	23
C	0.07	0.24	1.57	0.008	0.002	2.38	0.71	0.008	<u>0.030</u>	760	<u>842</u>	22
D	0.10	0.17	1.26	0.007	0.005	2.49	0.73	0.008	<u>0.046</u>	778	<u>833</u>	21

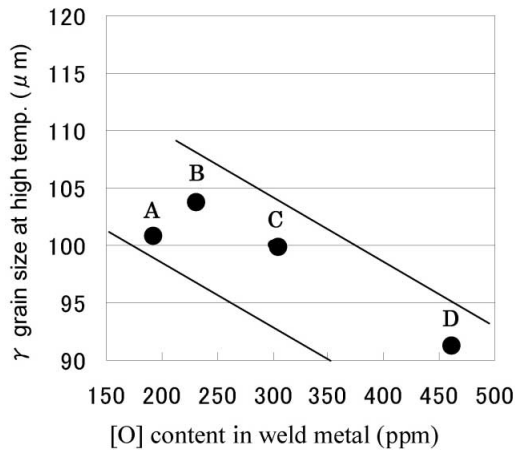


図5 溶接金属の酸素量と $\gamma$ 粒径の関係

Fig. 5 Relationship between  $[O]_{WM}$  and  $\gamma$  grain size

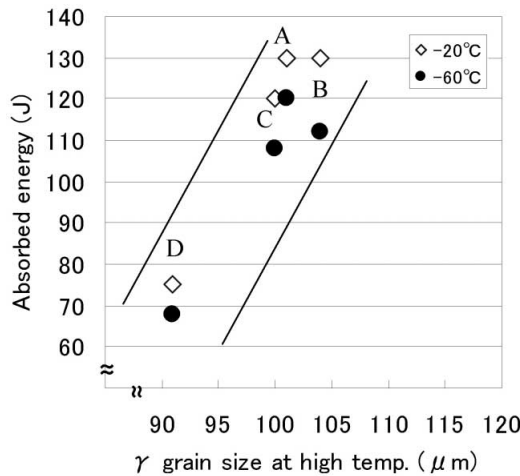


図6  $\gamma$ 粒径と吸収エネルギーの関係

Fig. 6 Relationship between  $\gamma$  grain size and absorbed energy

の酸素量と $\gamma$ 粒径の関係を示す。酸素量が減少すると $\gamma$ 粒径が大きくなる傾向が見られた。一方、図6に $\gamma$ 粒径とシャルピー吸収エネルギーの関係を示す。 $\gamma$ 粒径が大きくなると溶接金属のじん性は向上する傾向が見られた。酸素量と $\gamma$ 粒径の関係を考察するため、供試材A, C, Dにおける酸化物系介在物の大きさと個数密度を測定した(図7)。溶接金属の酸素量がD(460ppm), C(300ppm), A(190ppm)の順に減少するにしたがって酸

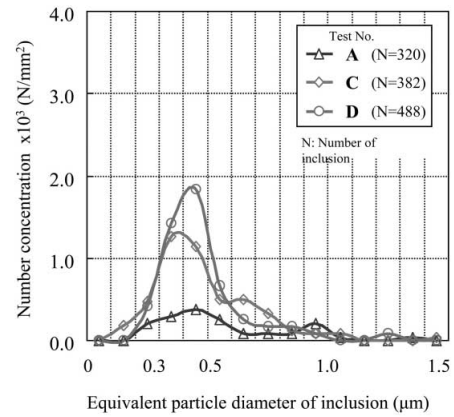


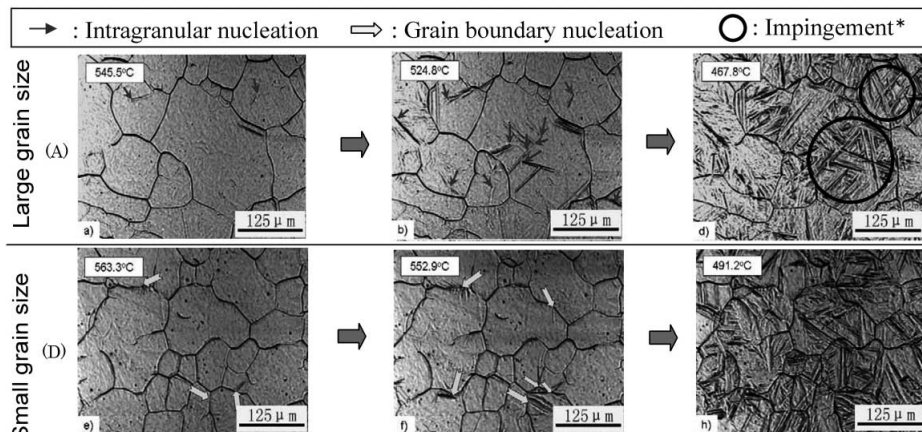
図7 酸化物系介在物の粒度分布

Fig. 7 Granularity distribution of oxygen inclusions

化物系介在物(介在物径は主に $0.3\sim 0.5\mu m$ )の数が減っている。酸化物系介在物は“ピン止め効果”があることから、酸化物系介在物が少ないと $\gamma$ 粒径が大きくなると考えられる<sup>3)</sup>。また、 $\gamma$ 粒径と相変態の関係を考察した(図8)。 $\gamma$ 粒径が大きいほど粒内の変態が促進され、粒内ベイナイト(アシキュラーフェライト)が形成されている。逆に、 $\gamma$ 粒径が小さいほど粒内変態が抑制され、粒界から粗大な粒界ベイナイト(上部ベイナイト)が形成されている(図8-h)<sup>4)~6)</sup>。

## 2.2 Alの影響

SAWの溶接金属のAl量を2水準とし、同時にそれぞれのSi量を変化させた溶接金属を作製した。溶接金属の化学成分分析結果と引張試験結果を表3に示す。また、Al量と $\gamma$ 粒径の関係を図9に示す。Al量が増えると酸素量が減少し、 $\gamma$ 粒径が大きくなる傾向が見られた。これは、Alによる脱酸効果によって酸素量(酸化物系介在物)が減少し、 $\gamma$ 粒の成長を抑制する酸化物系介在物の“ピン止め効果”が弱くなるためと考えられる。また、 $\gamma$ 粒径とじん性の関係を図10に示す。Alを少量添加し $\gamma$ 粒径が $110\mu m$ 以下の場合、 $\gamma$ 粒径が大きくなるとじん性は上昇する傾向が見られた。一方、Alを多量添加し $\gamma$ 粒径が $114\mu m$ 以上であると、 $\gamma$ 粒径は大きくなるが、じん性は劣化し、強度が大きく上昇した。これは、低Alの組織はベイナイト主体の組織であり、高Alの組織はマルテン



\*Impingement: the organization in a grain which grew so that it might collide mutually

図8  $\gamma$ 粒径と相変態の関係

Fig. 8 Relationship between  $\gamma$  grain size and phase transformation

表3 溶接金属の化学成分分析結果と引張試験結果 (SAW)  
 Table 3 Chemical compositions and tensile properties of weld metal

Test No.	Chemical compositions (mass%)										Tensile properties		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	O	Al/O	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
E	0.08	<u>0.12</u>	1.52	0.008	0.002	2.61	0.73	<u>0.010</u>	<u>0.028</u>	<u>0.36</u>	773	820	21
F	0.08	<u>0.18</u>	1.60	0.008	0.001	2.53	0.72	<u>0.011</u>	<u>0.024</u>	<u>0.46</u>	809	845	22
G	0.08	<u>0.25</u>	1.60	0.008	0.001	2.52	0.72	<u>0.012</u>	<u>0.022</u>	<u>0.55</u>	823	861	22
H	0.08	<u>0.16</u>	1.57	0.008	0.002	2.55	0.74	<u>0.018</u>	<u>0.025</u>	<u>0.72</u>	802	853	22
I	0.08	<u>0.38</u>	1.69	0.008	0.001	2.50	0.71	<u>0.031</u>	<u>0.016</u>	<u>1.94</u>	851	902	22
J	0.09	<u>0.45</u>	1.69	0.008	0.001	2.48	0.70	<u>0.033</u>	<u>0.016</u>	<u>2.06</u>	850	902	22

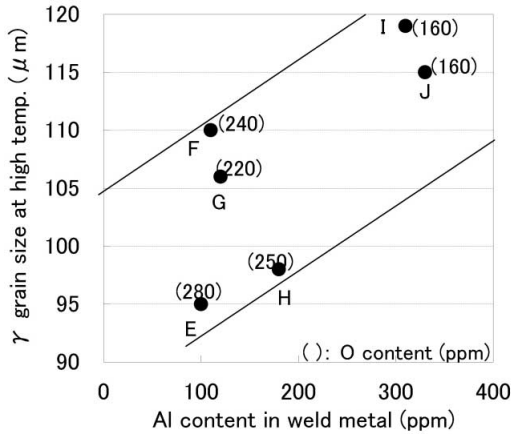


図9 溶接金属のAl量と $\gamma$ 粒径の関係  
 Fig. 9 Relationship between  $[Al]_{WM}$  and  $\gamma$  grain size

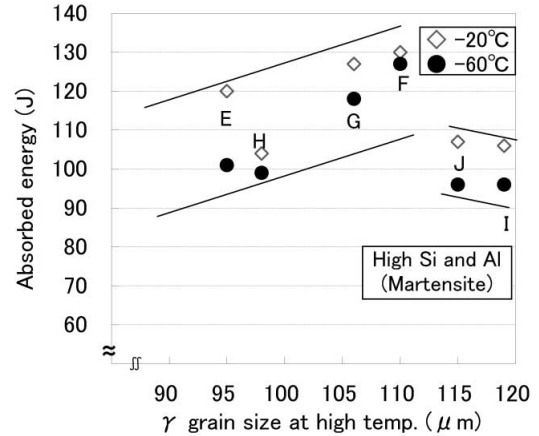


図10  $\gamma$ 粒径と吸収エネルギーの関係  
 Fig.10 Relationship between  $\gamma$  grain size and absorbed energy

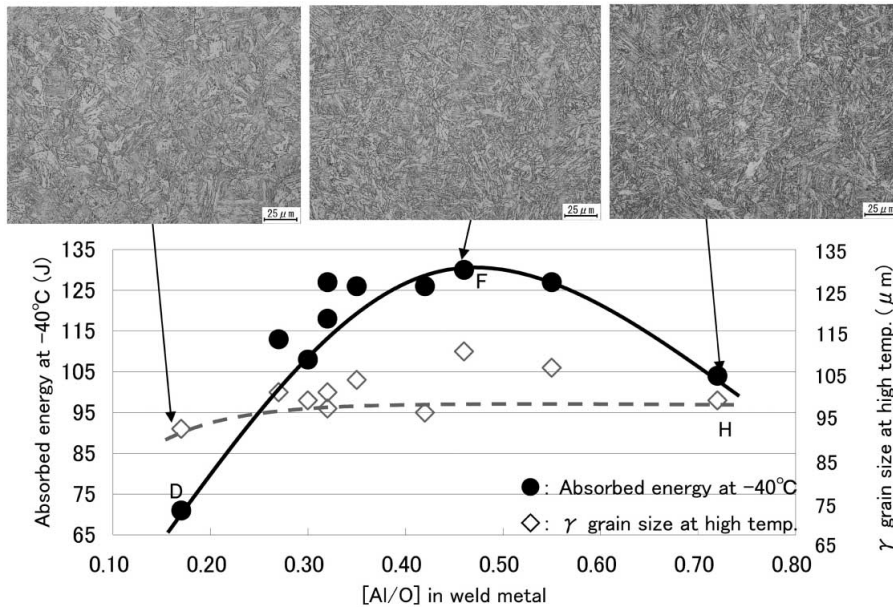


図11 溶接金属の  $[Al/O]$  と吸収エネルギーおよび $\gamma$ 粒径の関係  
 Fig.11 Relationship between  $[Al/O]_{WM}$  and absorbed energy,  $\gamma$  grain size

サイト主体と、それぞれの変態特性が異なるためと考えられる。さらに、 $\gamma$ 粒径と低温じん性に及ぼすAl量と酸素量の比率 ( $Al/O$ ) の影響を図11に示す。 $Al/O$ が高くなると $\gamma$ 粒径がやや大きくなる傾向があるが、じん性は $Al/O$ が0.46近傍が良好な値であった。この比率ではミクロ組織が最も微細化しており、じん性については、 $Al/O$ の適正範囲があることが確認された。これは、 $Al/O$ が適正な範囲の場合、溶接金属中の介在物はAl-Mn系スピ

表4 溶接金属の化学成分 (mass%)  
 Table 4 Chemical compositions of weld metals (mass%)

Welding process	C	Si	Mn	Ni	Mo	O	Shielding gas
GTAW	0.04-0.05	0.28-0.34	1.77-1.86	2.54-2.55	0.74-0.79	0.0015-0.0016	Pure Ar
	0.02-0.05	0.27-0.34	1.69-1.86	2.51-2.55	0.73-0.78	0.0026-0.013	Ar+0.1~1.0%CO <sub>2</sub>
GMAW	0.05-0.06	0.19-0.23	1.50	2.53-2.56	0.74-0.79	0.023-0.025	Ar+5%CO <sub>2</sub>
SAW	0.07-0.09	0.18-0.24	1.57-1.72	2.38-2.48	0.71-0.72	0.019-0.030	-

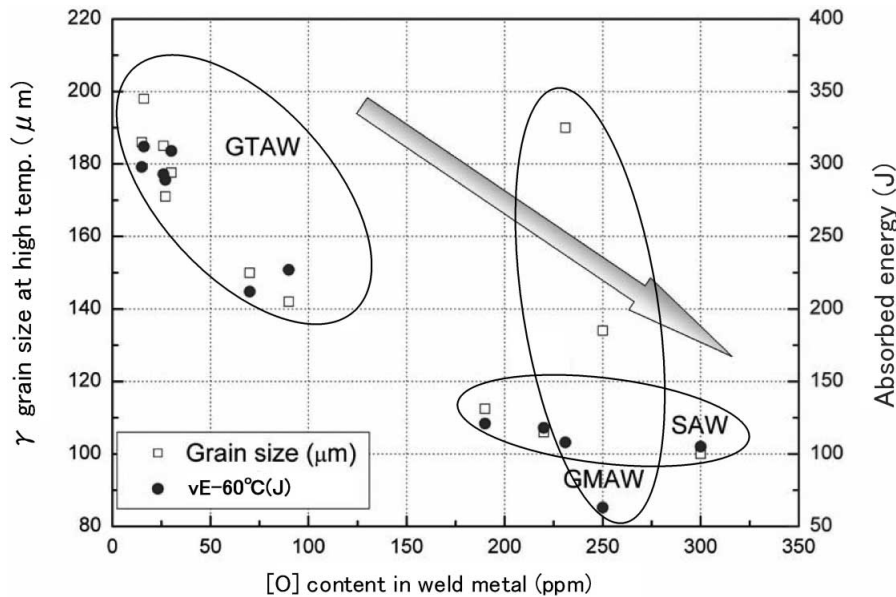


図12 溶接金属の酸素量と $\gamma$ 粒径および吸収エネルギーの関係  
 Fig.12 Relationship between  $[O]_{WM}$  and  $\gamma$  grain size, absorbed energy

ネル型酸化物が主体であり、微細なアシキュラーフェライト組織の形成を促進するためと考えられる。一方、Al/Oが低い場合、Al量の少ない溶接金属中の介在物はSi-Mn系酸化物が主体となり、Al/Oが高い場合、Al量が過剰な溶接金属中の介在物は $Al_2O_3$ が主体である。じん性の劣化については、両方ともにアシキュラーフェライトの核生成を促進するAl-Mn系スピネル型酸化物が少ないためと考えられる。

### 2.3 溶接法の影響

SAW, GMAW, GTAWの各溶接法で作製した溶接金属の化学成分を表4に示す。また、各溶接法の溶接金属の酸素量と $\gamma$ 粒径および低温じん性の関係を図12に示す。酸素量が減少すると $\gamma$ 粒径が大きくなり、じん性は向上する傾向が見られた。 $\gamma$ 粒径が大きくなるのは酸素量100ppm以下の極低酸素域の場合も同様で、酸化物系介在物の量が非常に少なくなり“ピン止め効果”が低下するためと考えられる。ただ、GMAWでは酸素量が250ppm前後と高いが $\gamma$ 粒径は大きくなっており、今後、さらなる確認が必要と思われる。

むすび＝高強度鋼用溶接金属の $\gamma$ 粒径の制御に及ぼす化学成分、溶接法の影響および溶接金属の低温じん性に及ぼす $\gamma$ 粒径の影響について調査した。その結果、以下のことが確認された。

#### (1) $\gamma$ 粒径に及ぼす酸素の影響

SAW溶接金属では、酸素量が増えると酸化物系介在物の“ピン止め効果”によって $\gamma$ 粒径が小さくなる傾向が見られた。

#### (2) $\gamma$ 粒径に及ぼすAlの影響

SAW溶接金属では、Al量が増えると溶接金属の酸素量が減少し、 $\gamma$ 粒径が大きくなる傾向が見られた。

#### (3) $\gamma$ 粒径に及ぼす溶接法の影響

GTAWでの100ppm以下の極低酸素溶接金属の場合、酸素量が減ると $\gamma$ 粒径が大きくなり、低温じん性は向上する傾向が見られた。

#### (4) $\gamma$ 粒径とじん性の関係

$\gamma$ 粒径が大きいほどじん性は向上する傾向であった。これは、 $\gamma$ 粒径が大きいほど粒内の核生成が促進されるためと推定される。

「溶接金属の $\gamma$ 粒径を制御する」という従来の知見と異なる新たな観点から高張力鋼用溶接材料における高じん性化に関して検討した。今後、高張力鋼用溶接材料の主要ユーザである海洋構造物業界におけるさらなる高強度化・高じん性化などの要求に対して、本技術の検討およびそれに基づく溶接材料の開発に取り組んでいく予定である。

本稿は、大阪大学接合科学研究所小溝研究室との共同研究成果の概要を報告したものであり、小溝裕一教授をはじめ関係各位から多大なご指導をいただいた。ここに謝辞を表します。

### 参考文献

- 1) J. W. Morris, Jr. The influence of grain size on the mechanical properties of steel. Acta Materialia. 2003, Vol.51, p.753-765.
- 2) Y. Komizo et al. Optical observation of real materials using laser scanning confocal microscopy part 1-techniques and observed examples of microstructural changes. Science and Technology of Welding & Joining. 2011, Vol.16, p.11-15.
- 3) R. D. Doherty et al. Current issues in recrystallization. Material Science & Engineering, A. 1997, Vol.238, p.219-274.
- 4) S. Ohkita et al. Recent development in controlling the microstructure and properties of low alloy steel weld metals. ISIJ International. 1995, Vol.35, p.1170-1182.
- 5) A. F. Gourgues et al. Electron backscattering diffraction study of acicular ferrite, bainite and martensite steel microstructures. Material Science & Technology. 2000, Vol.16, p.26-40.
- 6) H. K. D. H. Bhadeshia. Bainite in steels, 2nd edition. The Institute of Materials, 2001, p.237-276.