

# 高能率 2 電極エレクトロガスアーク溶接法の開発

## Development of Two-electrode Electro-gas Arc Welding Process

笹木 聖人<sup>\*(1)</sup> 須田 一 師<sup>\*(2)</sup> 元松 隆 一<sup>\*(3)</sup> 橋 場 裕 治<sup>\*(4)</sup>  
 Kiyohito SASAKI Kazutoshi SUDA Ryu-ichi MOTOMATSU Yuji HASHIBA  
 大北 茂<sup>\*(5)</sup> 今 井 嗣 郎<sup>\*(6)</sup>  
 Shigeru OHKITA Shirou IMAI

### 抄 録

エレクトロガスアーク溶接法は、船体上部外板の高能率接合を可能とするが、極厚鋼板に対しては融合不良を招く恐れがある。板厚50から70mmまでの極厚鋼の高能率立向溶接方法として、溶接トーチの揺動機構を備えた2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法を開発した。本溶接法は従来の1電極法に比較して約2倍の溶接速度が得られ、安定した溶け込みが実現できるため、極厚鋼の船体適用に際し、施工コスト低減に大きく貢献している。また、溶接部の機械的性能は(財)日本海事協会(ClassNK)が定めるKEW53およびKEW53Y40を十分満たしている。

### Abstract

Electro-gas arc welding (EGW) is used for vertical position welding of shear-strakes of container-ships due to its higher welding efficiency. In ordinary welding processes for ultra-heavy-sectioned steel plates however, it is likely to occur defects such as lack of fusion. In order to solve this problem, we have developed two-electrode VEGA<sup>®</sup> (Vibratory Electro-gas Arc Welding) process. This paper shows outline and characteristics of this newly developed process for vertical position welding on extra-heavy-sectioned steels. It was demonstrated that VEGA<sup>®</sup> process achieves stabilised fusion-line profile for ultra-heavy-sectioned steel plates with higher welding efficiency. It was then confirmed that joint performance in this study satisfies regulations such as classNK KEW53 and KEW53Y40.

### 1. 緒 言

近年、鋼構造物の大型化に伴い、適用鋼板は極厚・高強度化の傾向にあり、厚板溶接分野においても、板厚の増大に対応した施工の高能率化、高品質化、また、溶接材料の高強度化が要求されている。

コンテナ船は輸送効率向上を目指して大型化する傾向にあり、使用鋼板の極厚化と高強度化が進んできている。ドックあるいは船台にてブロック組立てを行う際、船側外板の溶接は立向姿勢となるため、立向姿勢で高能率1パス溶接が可能なエレクトロガスアーク溶接法(以下EGW法と略す)が多用されている。

しかしながら、その上部に相当する舷側厚板(シアストレーキ、図1参照)に使用される鋼板は非常に厚いため、従来の1パスでのEGW法にて健全な溶接部、及び十分な継手特性を得ることは非常に困難であった。同じく立向姿勢で溶接されるハッチコーミング(ハッチの縁部分、図1参照)では、一般にさらに厚い鋼板が使用され、2パス溶接の適用では施工工数の増加を招く。以上のような背

景から、簡易エレクトロガスアーク溶接法であるVEGA<sup>®</sup>溶接法をベースに、溶接部の溶け込み安定化とさらなる溶接能率の向上を図ることを目的に、2電極VEGA<sup>®</sup>(Vibratory Electro-gas Arc Welding)溶接法を開発した。以下に2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の開発経過とその特長について述べる。

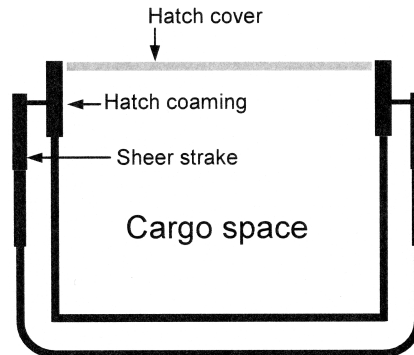


図1 コンテナ船の断面模式図  
Cross-section of container vessels

<sup>\*(1)</sup> 日鐵溶接工業(株) 研究所  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2630  
<sup>\*(2)</sup> 日鐵溶接工業(株) 品質管理部 部長  
<sup>\*(3)</sup> 日鐵溶接工業(株) 研究所 所長

<sup>\*(4)</sup> 鉄鋼研究所 接合研究センター 研究員  
<sup>\*(5)</sup> 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博  
<sup>\*(6)</sup> 厚板営業部 マネジャー

## 2. 従来技術と課題

1960年頃に開発された従来のEGW法<sup>1)</sup>は、ワイヤ径が2.4~3.2mmと太いことが主な理由となり、開先断面積が広く、結果として大入熱溶接となり、鋼板熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)のミクロ組織を粗大化させ、衝撃特性が大きく劣化することが問題であった。

その欠点を克服すべく、狭開先溶接を可能とした1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法が、1970年代に日鐵溶接工業(株)で開発され、現在まで使用されている。1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法は、入熱を小さくするために細径ワイヤを使用して溶接電流を下げ、狭開先とし、また、継手表裏面付近のビード形成を健全にするために板厚方向へのワイヤ(溶接トーチ)揺動機構を備えた溶接機を用いる方法である。また、溶接電流を検知することにより走行台車の上昇速度を制御し、ワイヤの突き出し長さを一定に保つ機構も備えている。後述する2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法と区別するため、以後「1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法」と表記する。図2に1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の概要を示した。

1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の開発により、表ビード及び裏ビードの形成が容易となり、溶接入熱、溶着金属量を低減できるようになったことから、HAZ靱性と施工能率が飛躍的に向上した。写真1のように、従来のEGW法と1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の溶接部断面マクロ組織の比較では、同板厚でも溶接金属量が少なく、熱影響幅も縮小していることが分かる。また、板厚50mmでも融合不良が生じず、健全な溶接部が得られることが確認された。

ところで、コンテナ船の大型化により、シアストレーキやハッチコーミングに使用される鋼板は、板厚が58mm、さらには65、70mmと増大傾向にある。板厚が50mmを超える場合、従来の1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法を使用しても、写真2のように開先面の溶け残り融合不良等の溶接欠陥が生じやすくなる。板厚の増大に対処するために、熱源であるアークの揺動幅を増加させたとしても、開先面を

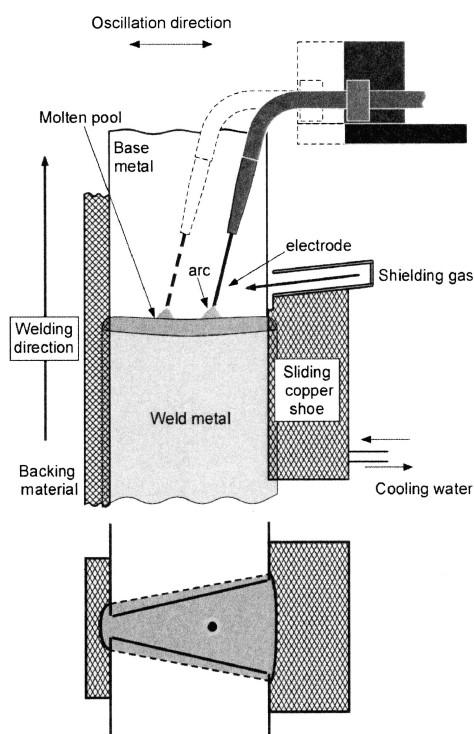


図2 1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の模式図  
Schematic illustration of single-electrode VEGA<sup>®</sup>

Welding processes	Plate thickness	Cross-sections of welds	Heat input
Conventional EGW	19mm		227 kJ/cm
Single-electrode VEGA			72 kJ/cm
		50mm	

写真1 通常EGW溶接継手および1電極VEGA<sup>®</sup>溶接継手の溶接部断面マクロ組織の比較

Comparison of cross-sections of welds by conventional EGW process and single-electrode VEGA<sup>®</sup>

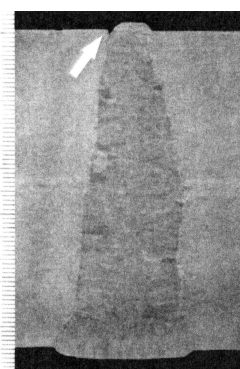


写真2 1電極VEGA<sup>®</sup>溶接継手に生じた融合不良の例(板厚70mm)  
Example of "lack of fusion" (indicated by arrow) in weld by single-electrode VEGA<sup>®</sup> (plate thickness: 70mm)

十分に溶融するために必要なアークの滞在時間が、1電極だけでは不十分であるためである。従って、板厚50mmを超える鋼板を1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法で溶接欠陥なく溶接することは、溶接作業者に非常に高度な技術が必要とされた。

## 3. 2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法の開発

### 3.1 開発目標

上記の課題解決を目的に、溶接入熱を低減すべく狭開先を前提とし、溶接入熱を安定的に一樣に開先面の板厚方向に分散させるために電極数を増やし、1電極あたりの揺動幅を減少させることが有効との仮定に立ち、2電極VEGA<sup>®</sup>溶接技術の開発に着手した。2電極化によるアーク干渉、装置構成や溶接条件の最適化を克服することを念頭に、2電極化開発の目標は以下の3点とした。

板厚50から70mmまでの鋼板を適用可能とし、溶接欠陥が無く、健全な溶接継手が得られること。

十分な溶接金属特性を得ること。

良好な溶接作業性を得て、実施工の能率向上に寄与すること。

### 3.2 2電極VEGA<sup>®</sup>溶接装置

開発した装置は、従来の1電極VEGA<sup>®</sup>溶接法と同様、生成する溶融スラグ及び溶融金属の流出を防止するために、開先表面側に走行

台車とともに自動上昇する水冷式銅板、また、開先裏面側に軽量のセラミックス製裏当材を配置した立向1パス溶接方法とした。図3に2電極VEGA®溶接装置の走行台車部構成及び図4に模式図を示す。

2電極VEGA®溶接装置は、1電極VEGA®溶接装置に電極を1つ付け加えた簡単な構造とした。第2電極の溶接トーチは簡単に着脱可能であり、溶接対象板厚に応じて1電極、2電極の装置構成の変更を容易に行うことを可能とした。

溶接電源には、アークの安定性から直流電源を使用している。複数の電極が近接する場合、両電極ともプラスあるいはマイナスの同

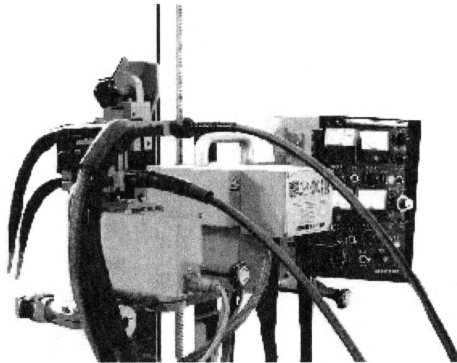


図3 2電極VEGA®溶接装置  
Two-electrode VEGA® apparatus

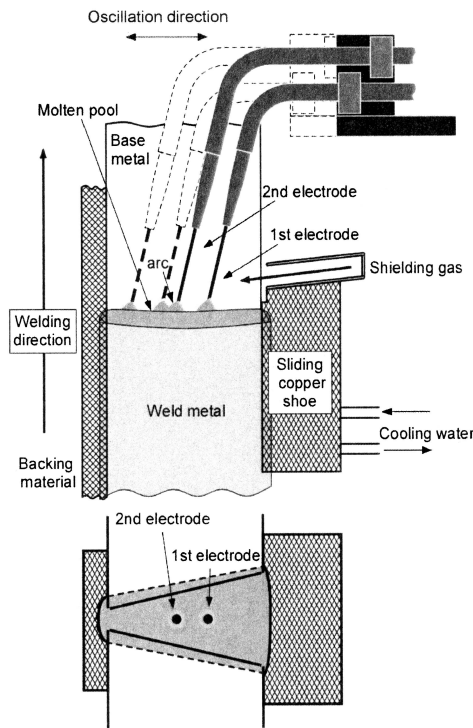


図4 2電極VEGA®溶接法の模式図  
Schematic illustration of two-electrode VEGA®

極性であると、アーク干渉のためアークが安定せずスパッタが多くなることから、2つの電極の極性を逆極性にした。また通常、電極がプラスの場合、ビード幅は広く、溶け込み深さは浅く、電極がマイナスの場合、ビード幅は狭く、溶け込み深さは深くなる<sup>2)</sup>ことから、広いV形開先を溶接するために、溶け込み幅が得られやすいプラスの電極を開先表面側に配置し、開先幅の狭い裏面側を電極マイナスとした。

3.3 溶接作業性の改善

EGW法では、溶接時に生成するスラグ量が溶接作業性に大きく影響する。本報告において溶接作業性は、スパッタ(スラグ跳ね)発生量、および、ビード外観にて評価した。

まず、1電極VEGA®溶接法専用のフラックス入りワイヤを2電極VEGA®溶接機の両電極に使用し、裏当材も同様に1電極VEGA®溶接法に対応する製品を使用した。その結果、スパッタ(スラグ跳ね)発生量が多く、長時間の溶接が困難であった。溶接中、熔融池上の熔融スラグは開先の裏面側に多く滞留する。一方、1電極VEGA®溶接用裏当材は、一般の溶接用と同様に余盛を得るために、図5(a)のように円弧状の溝が設けられているが、過剰に生成した熔融スラグの排出を促進するのに適した形状ではないためである。そこでま

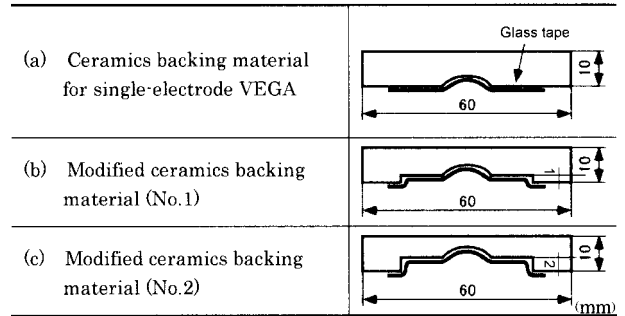


図5 裏当材形状  
Backing materials with various shapes

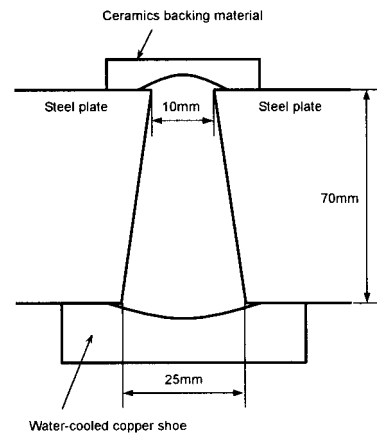


図6 開先形状  
Groove configuration

表1 溶接条件  
Welding conditions

Electrodes	Welding wire	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Electrode spacing (mm)	Oscillation width (mm)	Shielding gas	
								Composition	Flow rate (l/min)
1st	Flux-cored wire <sup>*1</sup>	420	42	5.0-5.5	366-404	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
2nd	Flux-cored wire <sup>*1</sup>	400	40						

\*1 : For single-electrode VEGA®

Base plate : EH40 (plate thickness : 70mm)

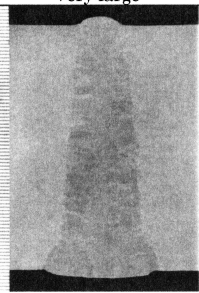
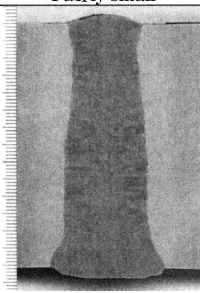
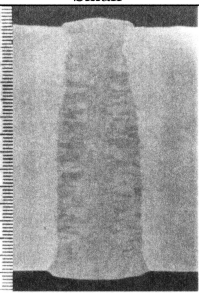
	With ceramics backing for single-electrode VEGA	With No. 1 ceramics backing	With No. 2 ceramics backing
Amount of spatter	Very large	Fairly small	Small
Cross-sections of welds			
	Good	Good	Bad
Comprehensive evaluation for actual application	Not suitable	Not suitable	Not suitable

写真3 溶接施工性に及ぼす裏当材の影響  
Weld test results by various backing materials

ず、過剰に滞留する溶融スラグを裏当材側に排出させることを目的とし、図5(b),(c)のようにスラグの排出を促すための空隙の深さを2通りにした裏当材を作製し溶接作業性を評価した。使用した溶接条件を表1に、開先形状を図6に、実験結果を写真3に示す。

スパッタ(スラグ跳ね)発生量は、1電極VEGA®溶接用、No.1およびNo.2形状(図5(b),(c)参照)の裏当材の順に少なくなり、No.2形状では、実施工に十分なスパッタ(スラグ跳ね)発生量の低減が見られた。しかし、裏ビード止端に段差が生じ、疲労破壊の起因となる恐れがあるため、No.1形状の裏当材を採用した。

裏当材の形状変更のみでは、実施工に耐えるほどのスパッタ(ス

ラグ跳ね)発生量低減が十分でない。次に、溶接ワイヤのフラックス量調整により、溶接材料から生成するスラグ量を低減し、スパッタ(スラグ跳ね)発生量の抑制を試みた。試験に供された溶接ワイヤ、鋼板及び溶接条件を表2に示す。なお、開先形状は図6と同じである。1電極VEGA®溶接法で使用されているフラックス入りワイヤ、同ワイヤのフラックス量をその1/2に減じたフラックス入りワイヤ及びソリッドワイヤJIS Z 3325 TGL1-4G(AP)をそれぞれ組み合わせ溶接し、溶接作業性を評価した結果を表3に示す。フラックス入りワイヤに比較してソリッドワイヤはスラグ生成量が少ない特性を持つことから、スラグが滞留しやすい開先裏面側のスラグ生

表2 溶接条件  
Welding conditions

Test No.	Electrodes	Welding wire	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Electrode spacing (mm)	Oscillation width (mm)	Shielding gas	
									Composition	Flow rate (l/min)
1	1st	Flux-cored wire <sup>1</sup>	420	42	5.0-5.5	366-404	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Flux-cored wire <sup>1</sup>	400	40						
2	1st	Flux-cored wire <sup>1</sup>	420	42	5.0-5.5	366-404	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>	400	40						
3	1st	Solid wire <sup>2</sup>	420	42	5.0-5.5	366-404	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>	400	40						
4	1st	Flux-cored wire <sup>3</sup>	420	42	5.0-5.5	366-404	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>	400	40						

<sup>1</sup>: For single-electrode VEGA®

<sup>2</sup>: JIS Z 3325 TGL1-4G(AP)

<sup>3</sup>: For two-electrode VEGA®(contains one-half the flux compared with the wire for single-electrode VEGA®)

Base plate: EH40(plate thickness: 70mm)

表3 作業性評価試験結果  
Test results with various welding wires

Test No.	Electrodes	Welding wire	Test results		
			Amount of spatter	Bead appearance	Comprehensive evaluation for actual constructions
A	1st	Flux-cored wire <sup>1</sup>	Very large	Good	Not suitable
	2nd	Flux-cored wire <sup>1</sup>			
B	1st	Flux-cored wire <sup>1</sup>	Large	Good	Not suitable
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>			
C	1st	Solid wire <sup>2</sup>	Very small	No good	Not suitable
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>			
D	1st	Flux-cored wire <sup>3</sup>	Small	Good	Suitable
	2nd	Solid wire <sup>2</sup>			

<sup>1</sup>: For single-electrode VEGA®

<sup>2</sup>: JIS Z 3325 TGL1-4G(AP)

<sup>3</sup>: For two-electrode VEGA®(contains one-half the flux compared with the wire for single-electrode VEGA®)

Base plate: EH40(plate thickness: 70mm)

成量低減の効果を期待し、第2電極(開先裏面)側へのソリッドワイヤの適用を検討した。

スパッタ(スラグ跳ね)発生量は、両電極に1電極VEGA®溶接用フラックス入りワイヤを用いたAのケースが最も多く、B、C、Dの順に少なく、C及びDは実施工でも十分適用可能な程度に減少した。この結果は、溶接ワイヤからのスラグ量がスパッタ(スラグ跳ね)発生量に大きく影響していることを示唆している。

以上、裏当材形状及び溶接ワイヤ組成の検討を行い、溶接作業性を総合的に評価した結果、形状No.1の裏当材を使用し、かつ第1電極に1電極VEGA®溶接専用ワイヤに対しフラックス量を半分としたフラックス入りワイヤを、第2電極にソリッドワイヤを適用することとし、実施工に十分対応可能な優れた溶接作業性が実現された。

#### 4. 2電極VEGA®溶接法の適用効果

溶接作業性に関する様々な改良を実施し、2電極VEGA®溶接法により、板厚50mmから70mmまでの鋼板の高エネルギー1パス溶接が可能となった。その効果を以下に述べる。

##### 4.1 溶接部の安定した溶込み

2電極VEGA®溶接法の開発により、良好な形状の表面側ビード及び裏面側ビードの形成が容易に実現可能となった。このことは、揺動条件(揺動幅、揺動時の両端の停止時間およびワイヤの狙い位置)や開先間隔が変動した際に、溶接作業者が溶込み不足や融合不良等の溶接欠陥をほとんど意識せずに溶接できることを意味する。従って、板厚50mm超の鋼板の溶接に対し、溶接作業者の熟練を要しない極めて汎用性の高い溶接法であると言える。写真4に、一例として板厚50、60及び70mmの溶接部断面マクロ組織を示す。開先表面、開先裏面付近及び開先面の溶込みが安定し、溶込み不足や融合不良等の溶接欠陥がなく良好な溶接部が得られている。

##### 4.2 溶接能率の向上

2電極VEGA®溶接法は1電極の場合に比較して溶着速度がほぼ2倍となるため、図7に示すように、同一開先形状における溶接速度は1電極の場合の約2倍となり、より高エネルギーな溶接が可能となった。装置の設置に要する時間は1電極VEGA®溶接法とほとんど変わらないため、施工全体を通じた能率もほぼ2倍になる。また、1電極及び2電極VEGA®溶接法では、使用される溶接ワイヤは単重20kgのスプール巻きがほとんどであるため、20kg使用ごとに溶接ワイヤを交換しなければならない。従って、2電極VEGA®溶接法では中断

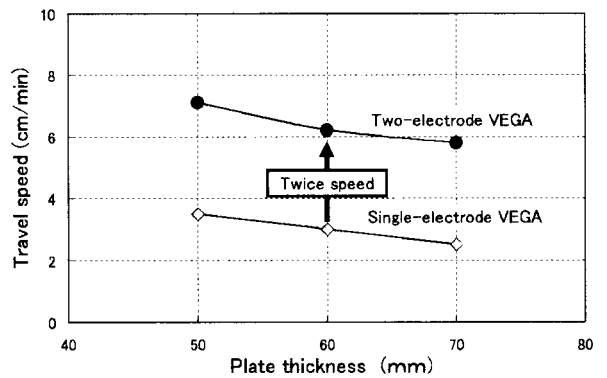


図7 1電極および2電極VEGA®溶接法の溶接速度(例)  
Comparison of travel speed with single- and two-electrode VEGA®

せずに施工可能な溶接長が1電極VEGA®溶接法の2倍となる。溶接を中断した場合は、その前後をガウジングし、被覆アーク溶接法やガスシールドアーク溶接法により補修しなければならない。そのため、2電極VEGA®溶接法の適用により施工時間の大幅な短縮が実現される。

##### 4.3 シールドガス使用量の低減

溶接速度がほぼ2倍となるため、図8に示すように単位溶接長あたりのシールドガス消費量も1電極の場合の約1/2となり経済的である。

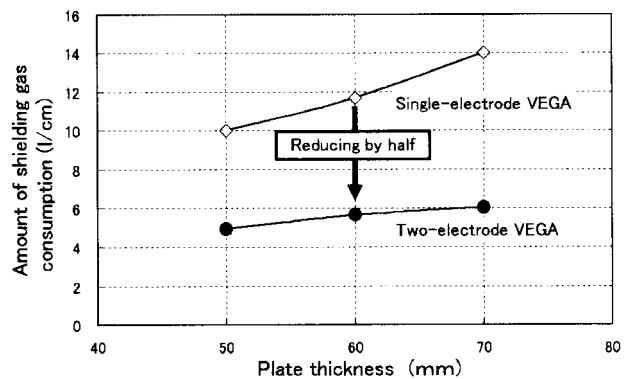


図8 シールドガス消費量の比較(例)  
Comparison of amount of shielding gas consumption with single- and two-electrode VEGA®

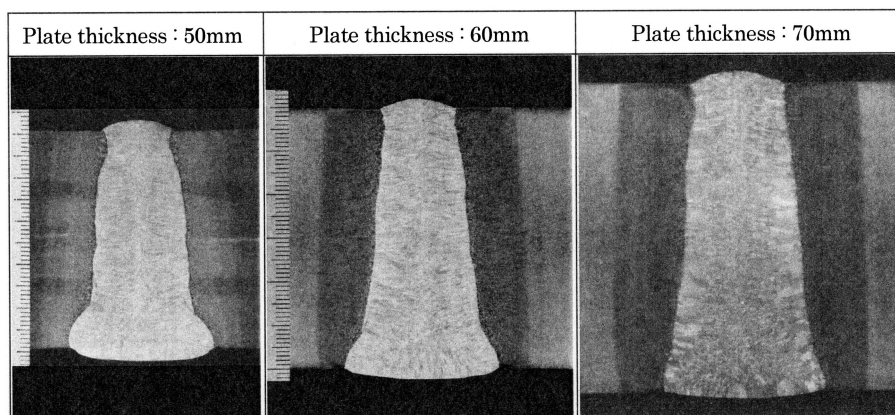


写真4 2電極VEGA®溶接継手の溶接部断面マクロ組織  
Cross-sections of welds by two-electrode VEGA®

4.4 溶接部性能と実船への適用

大入熱溶接において要求される低温韌性を得るための合金設計であるMo-Ti-B系の溶接金属<sup>3-7)</sup>を2電極VEGA<sup>®</sup>溶接方法にも適用した。試験に供された材料及び溶接条件を表4に、開先形状を図9に、試験片採取位置を図10に示す。表5に示すように日本海事協会

(ClassNK)が定めるKEW53及びKEW53Y40を満たす性能が得られた。溶接金属(中央部)のミクロ組織を写真5に示す。大入熱溶接下でも非常に微細な組織が得られている。また、適用されたEH40のHAZ特性も十分な機械的性能が得られている。

2001年より三菱重工業株式会社神戸造船所にて、大型コンテナ船

表4 溶接条件  
Welding conditions

Plate thickness (mm)	Electrodes	Welding wire	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Electrode spacing (mm)	Oscillation width (mm)	Shielding gas	
									Composition	Flow rate (l/min)
50	1st	Flux-cored wire <sup>*1</sup>	410	41	7.1	281	15	5	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>*2</sup>	400	40						
60	1st	Flux-cored wire <sup>*1</sup>	410	41	6.2	321	15	17	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>*2</sup>	400	40						
70	1st	Flux-cored wire <sup>*1</sup>	420	42	5.8	382	15	35	100% CO <sub>2</sub>	30
	2nd	Solid wire <sup>*2</sup>	460	42						

\*1: For two-electrode VEGA<sup>®</sup> (contains one-half the flux compared with the wire for single-electrode VEGA<sup>®</sup>)

\*2: JIS Z 3325 TGL1-4G (AP)

Base plate: EH40 (plate thickness: 70mm)

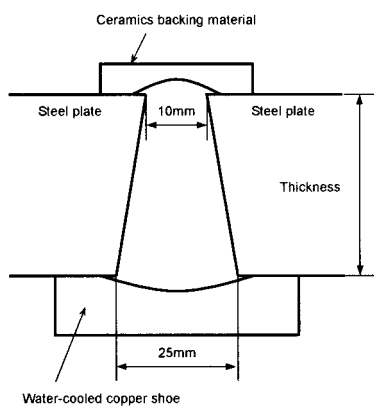


図9 開先形状  
Groove configuration

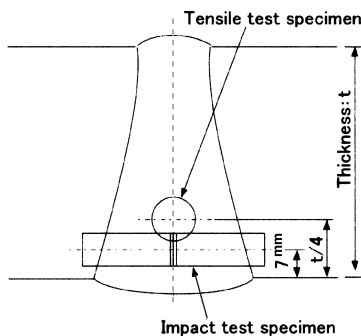


図10 試験片採取位置  
Sampling locations of test specimens

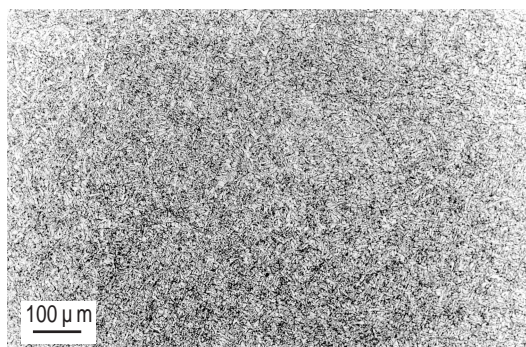


写真5 2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法による溶接金属ミクロ組織(溶接金属中央)  
Microstructure of weld metal welded by two-electrode VEGA<sup>®</sup> (center)



写真6 2電極VEGA<sup>®</sup>溶接法による溶接施工状況  
An example of construction site where two-electrode VEGA<sup>®</sup> operated

表5 溶接金属評価試験結果  
Mechanical test results of weld metal with two-electrode VEGA<sup>®</sup>

Plate thickness (mm)	Classification	Tensile test			Charpy impact test
		0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Absorbed energy at -20 (J)
50	EH36	473	610	25	89
60	EH40	471	611	23	86
70	EH40	506	656	24	79
ClassNK KEW53		375	490-660	22	34
ClassNK KEW53Y40		400	510-690	22	41

のシアストレーキ、ハッチコーミング(板厚:58mm)の溶接に2電極VEGA®溶接法の適用が開始された(写真6)。さらに2002年には板厚65mmのハッチコーミングにも適用されている。

以上のように、板厚50mmから70mmまでの鋼板立向溶接において、溶接部の安定な溶込みが得られる1パス高効率自動溶接法である2電極VEGA®溶接法の開発に成功し、コンテナ船建造に実船適用された。

## 5. 結 言

以上のように、板厚50mmから70mmまでの立向姿勢における高効率自動溶接法として、2電極VEGA溶接法の開発に成功した。2電極VEGA®溶接法は、板厚50～70mm鋼板の立向1パス溶接において、溶接部の安定した溶込みと高効率化を実現し、実船建造に適用された実績を持つ。今後は、さらに適用板厚範囲が拡大し、より汎用性の高い溶接法として普及することが期待される。

## 謝 辞

本2電極VEGA®溶接法の開発にあたり、三菱重工業株式会社神戸造船所には多大なるご協力を戴いたことを付記し、ここに謝意を表します。

(注) VEGA®は日鐵溶接工業(株)の登録商標。

## 参考文献

- 1) 稲垣道夫 ほか:立向自動溶接 エレクトロスラグ溶接/エレクトロガス溶接. 初版 東京,日刊工業新聞社,1966,151p.
- 2) 溶接学会編:溶接・接合技術 初版 東京 産報出版,1993,388p.
- 3) 森直道 ほか:製鉄研究,(307),104(1982)
- 4) 森直道 ほか:溶接学会誌,50(2),174(1981)
- 5) 森直道 ほか:溶接学会誌,50(8),786(1981)
- 6) Ohkita, S. et al.: Australian Weld. J., 29(3), 29(1984)
- 7) Ohkita, S. et al.: ISIJ Int., 35(10), 1170(1995)