

## 4-8

## 溶接・接合技術の適用(造船)\*



奥本 泰久\*\*

Applications of Welding and Joining Technology (Shipbuilding)\*

by OKUMOTO Yasuhisa\*\*

キーワード

## 1. はじめに

我が国の造船業は2度にわたった大規模な不況の後、平成に入って(1989年～)徐々に建造量も増え、2000年以降韓国に首位の座を開け渡したものの、図1に示すようにこれ迄着実な伸びを示してきた<sup>1)</sup>。この間各造船所とも豊富な受注量を背景に、2007年問題に端を発した熟練技能者の後継者の育成、老朽建造設備の更新、3次元CADを中心としたデジタル化などを鋭意進めてきたが、2008年のリーマンショックによる受注減によって手持ち工事が減少する<sup>2)</sup>、3年後には新たな局面・転換期を迎えることになった。その時に備え、新しい生産システムの構築と合理化が今求められており、造船の主作業である溶接に関連する生産技術の革新が急務となっている。

本稿はそのような背景を見据え、現状の造船溶接技術を概説する。

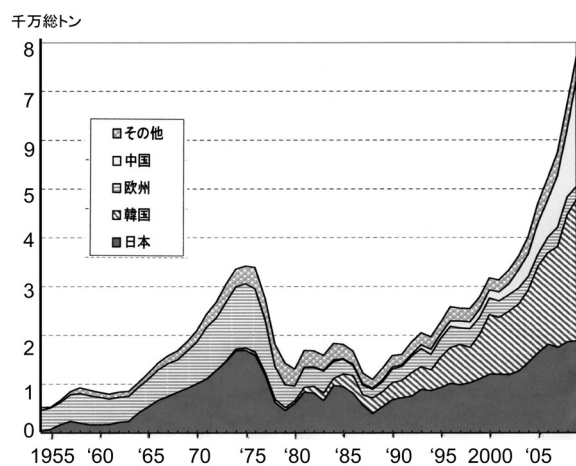


図1 船舶建造量の推移(全世界)

\*原稿受付 平成22年6月10日

\*\*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

## 2. 船の建造法

第二次世界大戦中までの船体の建造法は、ドックや船台上に鋼材を一枚ずつ運んで行き、これをリベットで順次接合する方式であったが、大戦後、建造期間の短縮、船体重量の軽減、生産性の向上などを図るため、溶接による接合法が種々試みられた。同時に、この溶接技術を生かし、船型の大型化や量産の必要性もあってブロック建造法が採用されてきた。これは、船体を工場設備能力に適した大きさのブロックで構成し、これを屋内で加工し組み立て、船台上やドック内に順次搭載していく方式である。これによって屋外作業の多くが屋内に移行し、屋内では定盤上の流れ生産方式も採用され、この溶接技術に支えられたブロック建造法は長足の発展を遂げ、今日に至っている。図2に現状の一般的な新造船建造工程を示す。図に示すように造船には多くの工程や職種があるが、大型船舶の場合、製造工数に占める溶接作業工数は30%にもなり<sup>3)</sup>、溶接が造船の主要な技術となってい

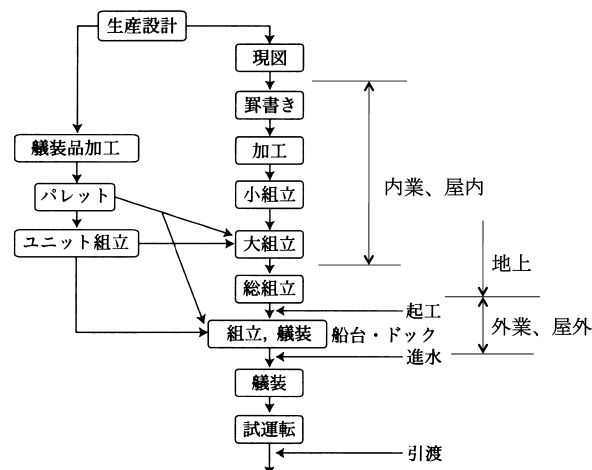


図2 新造船建造工程

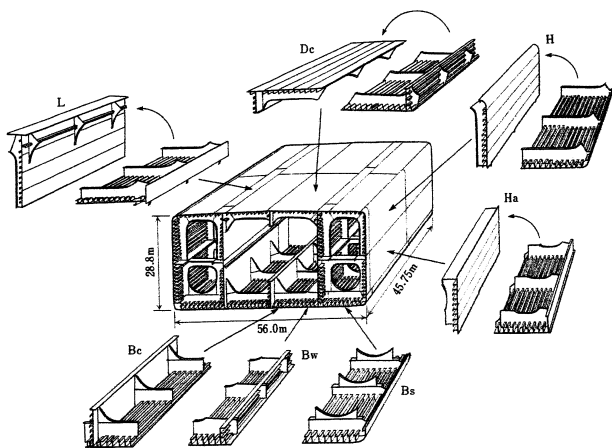


図3 ブロック建造法

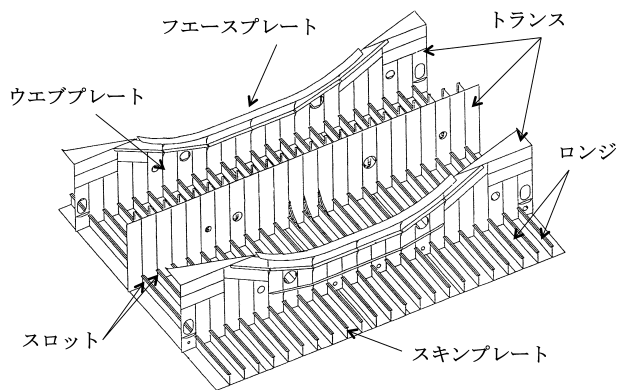
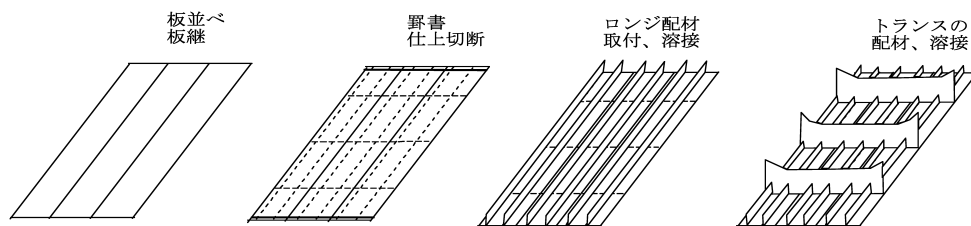
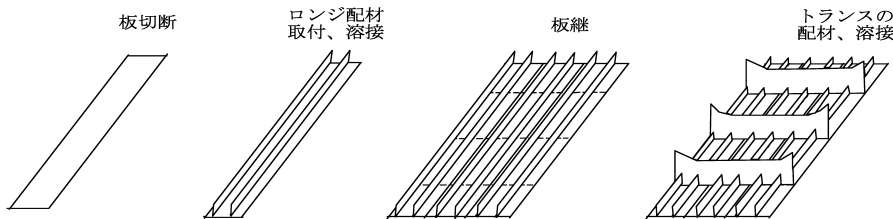


図4 ブロックの構成



(a)ロンジ先付け工法



(b)単板工法

図5 平板ブロックの組立要領

る。作業工程の内、艤装品の組立てにも溶接が使われるが、船殻作業では小組立、大組立、総組立および船台・ドック上での組立てが主たる溶接工程である。以下は船殻工事に限定して説明する。

大型タンカー（VLCC）のブロック構成の一例を図3に示す<sup>3)</sup>。最新のタンカーは原油漏れ防止のため船底部と船側部が二重殻構造となっているが、本図は従来型の構造である。1ブロックの大きさは幅、長さが20m程度、重量は3百トンに上っている。ブロックは屋内で製造されるが、工場の設備能力によってはこれより小さいサイズのブロックとし、これらを地上で複数個結合して搭載することが行われている。これを総組立と呼んでいる。総組みすることによって、搭載クレーンの吊り回数を減らし、船台やドック上での取付け・溶接工事を減らすことができる。

一つのブロックは概略を図4に示すように、ベースとなる鋼板パネル（これをスキンプレート、皮板と言う）上に小骨と大骨を格子状に配した板骨構造である。通常小骨材は船体の縦方向（Longitudinal）に配置され、これを支える大骨材は横方向（Transverse）に配置されるため、便宜上前者をロンジ、後者をトランスと呼んでい

る。二重殻の場合はトランス（厳密にはフロアと言う）の高さが同一で図の上面にスキンプレートとロンジが向き合った状態で結合している。図に示すように、トランス材はロンジ材と比べて大きく、スキン側の反対面にフェースプレートを設ける他、自身のウェブプレートにもスチフナやブラケットなどの補強材（付き部材）が配置されているため、この組立工程を小組立と呼んでいる。

平板ブロックの場合の代表的な組立法を図5に示す<sup>4)</sup>。これ以外に、ロンジとトランスを予め格子状に接合しておき、これを（スキンプレートを予め板継ぎした）パネル上に乗せる「枠組み方式」も採用されたが、現在はスキンプレートのパネル上にロンジをすべて溶接しておき、小組立されたトランスを1個ずつ上から降ろして取り付け、溶接する「ロンジ先付け工法」（または「ラインウエルダー方式」と呼ばれる）が多く採用されている。

ロンジ先付け工法はロンジをその全長さ分一気にスキンプレート上に高速溶接できるメリットがあるが、ロンジとトランスの交差部にスロットと呼ばれる開孔が必要で、この塞ぎのためのカラープレートの取付け工事が生じるデメリットがある。逆に枠組み方式では、ロンジをトランスのスリットに差し込むためスロットは不要であ

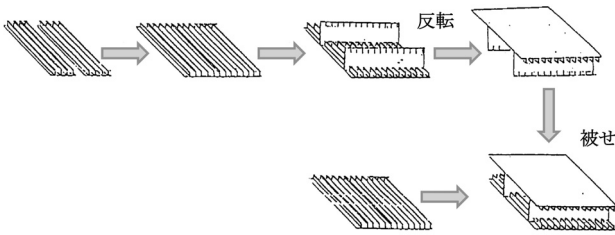


図6 二重殻ブロックの組立要領

るが、ロンジの溶接はトランスで断続となるデメリットがある。近年では、鋼板一枚に複数のロンジを予め溶接し（これを単板と称す）、これをつなぎ合わせてパネルとし、その上にトランスを順次取り付けていく単板工法<sup>5)</sup>も広く採用されている。

二重船殻の組立法を図6に示す。これらの組立てはいずれも大組立工程である。

### 3. 造船溶接の適用

#### 3.1 造船溶接の推移

前章で述べたように船殻工事は、鋼板を組み立てブロックを製作し、これを船台またはドック上で船体に仕上げることであり、必然的に溶接工事が主体となる。最近のVLCCでは全溶接長さは一船600kmを超えと言われている。

造船の溶接法（溶接材料の使用重量ベース）の推移をやや古い資料であるが図7に示す<sup>6)</sup>。1960年代後半まではほとんど手溶接棒によるアーク溶接（被覆アーク溶接）であったが、その後はグラビティ溶接、サブマージアーク溶接が普及し、次いでCO<sub>2</sub>半自動溶接が飛躍的に増加し現在全溶接の2/3に達している。手溶接は仮付け溶接や艤装品金物など小物溶接に使われる程度で全体の数%以下である。ただし、最近では仮付け溶接もCO<sub>2</sub>半自動に変わりつつある。また、他産業で広く使用されているロボットの適用はあまり進んでいない。

現在、造船分野での主な溶接法は、

- ①半自動溶接（CO<sub>2</sub>, MAG）
- ②片面自動溶接（FCBやFABなど）
- ③グラビティ溶接
- ④簡易自動溶接
- ⑤多電極すみ肉自動溶接（ラインウェルダー）
- ⑥立向き自動溶接

である。

#### 3.2 半自動溶接

1975年頃から普及したCO<sub>2</sub>半自動アーク溶接法は、従来の被覆アーク溶接の被覆フラックスを省き、代わりに溶接ワイヤ先端部にCO<sub>2</sub>を噴射しシールドするもので、細径ワイヤが自動的にリールから供給されるため、半自動と呼ばれ能率的な溶接法である。CO<sub>2</sub>にアルゴンガスなどを混合した「混合ガス」を用いるものをMAG溶接と言い、総称して半自動溶接と呼んでいる。造船では狭隘箇所や作業性の悪い箇所も多く機械化が困難であるため、また、機械が残した溶接箇所や細部などにも多用されている。

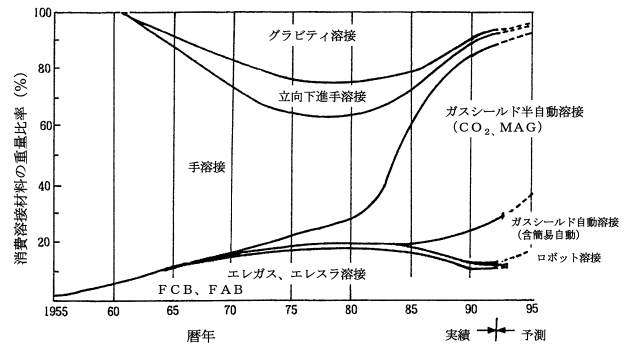


図7 造船溶接の変遷

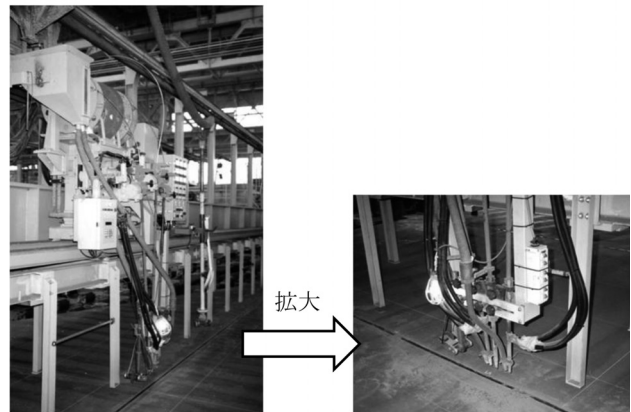


図8 FCB 溶接装置

#### 3.3 片面自動溶接

突合せ溶接は通常表裏両面から行なうが、サブマージアーク溶接法を改良し、特殊な裏当て材を用いることにより片面から自動溶接するだけで裏面まで完全な溶込みが得られるFCB（Flux Copper Backing）法が1965年前後に我が国で開発された。裏当て材として特殊な熱硬化性フラックスや銅板、あるいはこの両者を併用したものが用いられている。造船の鋼板は長さが20m程度に達し、板厚も10~40mmと比較的厚いため、溶接姿勢が下向きに限定されるものの、大電流、多電極（2~4極）で、高速、1パス溶接が可能で、高能率が得られ広く使われている。反転工程を無くすなど設備の点でも有利である。導入当初は、始末端部にビード割れ（縦割れ）が発生したり、裏面に横割れが発生するなどの問題が発生したが、タブ板の工夫や溶接施工法の改善で解決してきた<sup>7)</sup>。FCB溶接は通常継手部上方にガードを設け、トーチ移動やフラックス散布のため装置をユニットにしてこのガード上を走行させるシステムとなっており、かなり大がかりな装置である（図8）。さらに、大電流のため溶接変形も大きく溶接部を上から押さえる装置（図では形鋼支柱）も組み込まれている。

FCBは装置が大がかりとなり、しかも平面に限定されるが、曲がり外板の板継ぎや船台・ドック工事に、より簡便なFAB（Flux Asbestos Backing）法が適用されている。これは裏当てをフレキシブルなテープ状とし、任意の位置に貼り取り付けることができるため、広く使用されている。

### 3.4 グラビティ溶接

片面溶接はスキン材の突合せ溶接（板継ぎ）に使用されているが、グラビティ溶接や簡易自動溶接は内業工程での水平隅肉に利用されている。グラビティ溶接法は、我が国の造船界が開発したもので、簡単な治具上に長さ900mm程度の被覆アーク溶接棒をセットすれば、溶融に伴い溶接線に沿って溶接棒が重力によってスライドする方法である。図9に示すようにセットしておけば3～5分間自動的に溶接が進行し、すみ肉溶接ができる。被覆アーク溶接棒を使用するため、1台当たりの能率は手溶接とほぼ同様であるが、操作が簡単で、1人で4～8台の道具を同時に扱うことができるため能率的である。溶接部材に多少の倒れや曲がりがあっても適用可能であり、小組立工程での付き部材の溶接や大組立工程のロンジの溶接に多用されている。

### 3.5 簡易自動溶接

簡易自動溶接は、図10に示すように自走式台車にトーチを搭載した小型溶接機で、グラビティ溶接と同じく小組立工程での付き部材の溶接や大組立工程のロンジの溶接に用いられている。通常、CO<sub>2</sub>溶接である。手で持ち運び可能ですみ肉溶接開始部にトーチをセットすれば自動的に水平すみ肉の溶接ができ、一人で数台使用可能である。現在多くの種類が使用されているが、水平の直線溶接以外にも立向き上進隅肉溶接に向けたウィーピング



図9 グラビティ溶接

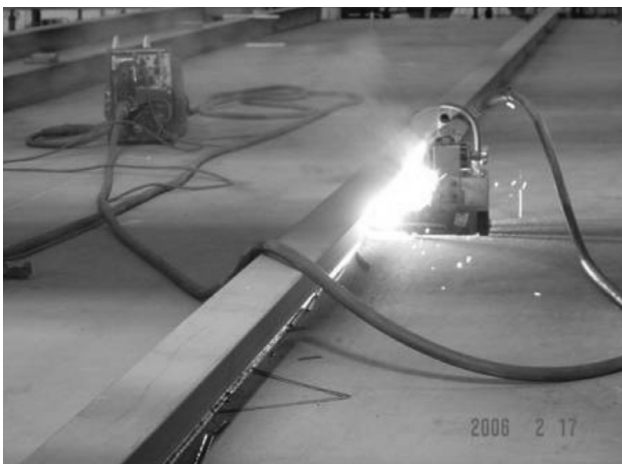


図10 簡易自動溶接

機能の付加や溶接残し最小化のための小型化、もしくはトーチスライド型などの開発がなされている。

### 3.6 その他の溶接

その他造船特有の溶接法として、図11に示す様な、複数のロンジを同時にスキンにすみ肉溶接するツインタンデム方式のラインウェルダが使われている。装置化された自動機で高能率溶接のため、ロンジ先付け工法や単板工法での複数ロンジの両面すみ肉溶接に使われている。基本的にはCO<sub>2</sub>溶接である。

FCB溶接やグラビティ溶接、簡易自動溶接やラインウェルダは下向継手に限られるが、船台や建造ドック上での厚板の船側外板継手やデッキロンジ、ボトムロンジなどの垂直の継手の溶接には立向き自動溶接が使用されている。これは水冷銅板を板の表裏面に設け継手にダムを形成し、立向継手の開先内の溶融金属の流出を防ぎつつ上進溶接を行なうもので、エレクトロスラグ、エレクトロガス、消耗ノズル式エレクトロスラグ（CES）などがある。最近では、装置の小型化を狙って裏当て材を用いた簡易エレクトロガスが主流になっており、これを図12に示す<sup>9)</sup>。

溶接ロボットについては、昭和57年（1982年）から造船用の開発研究が行われたが、適用には造船固有の困難な問題を解決する必要があった。すなわち、①素材の段階から船台・ドック作業に至るまで、溶接対象となるワークは大型大重量で、②継手も多種で、③形状も類似とはいえず寸法が毎回変わるため量産品と違って同型効果を

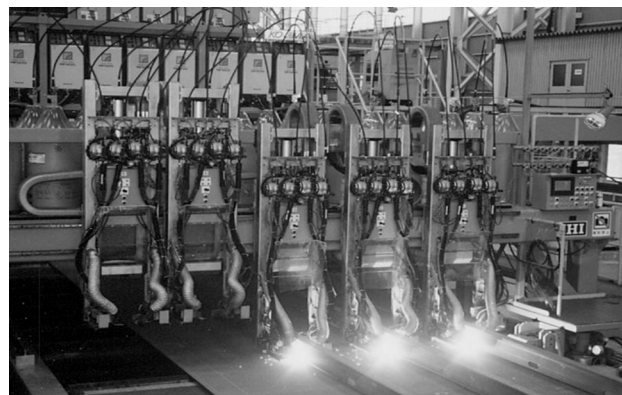


図11 ラインウェルダ

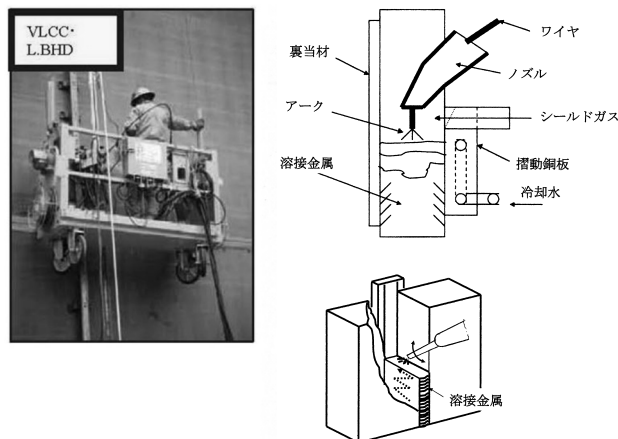


図12 立向自動溶接

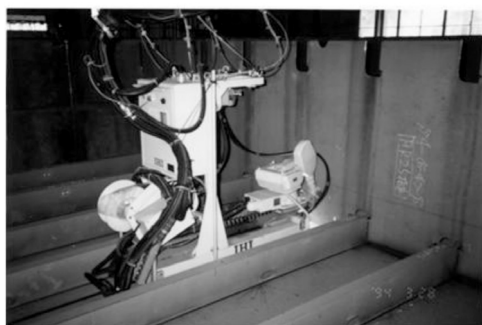


図13 大組立溶接ロボット

期待しにくく、④部品加工も機械加工の精度レベルと比較するとばらつきが大きく、開先の精度が必ずしも保証されていない、などである。

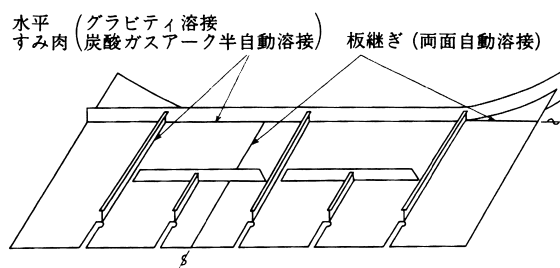
これらの課題を解決しながら当初は小組立工程の、次いで大組立工程の溶接ロボットの開発を進めてきたが、システム開発や装置開発の採算性などで一部の適用にとどまり、我が国の主要造船所27事業所の適用率（溶接材料消費重量ベース）は未だ1%に過ぎないことが報告されている<sup>9)</sup>。図13に大組立工程で使われている全自動 NC ロボットシステムを示す<sup>10), 11)</sup>。

### 3.7 溶接組立施工法

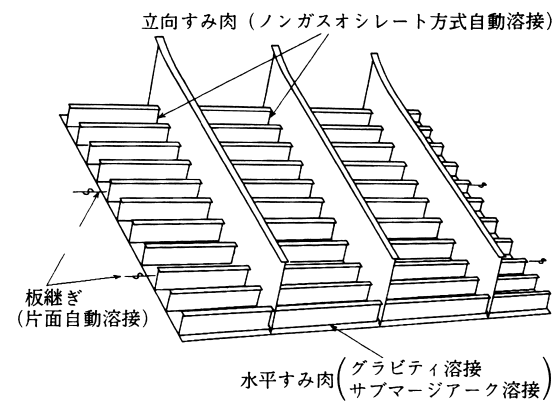
旧来の大型タンカーについて適用されている主要溶接法の一例を図14に示す<sup>9)</sup>。溶接品質、能率、経済性、安全性などを考慮し、各造船所や対象船舶に応じて施工要領が決定されている。以下に関連項目について補足説明をする。

溶接前に取付作業が行われるが、これは正規位置に部材を配置し、仮付け溶接を行うことを言う。形状を保持するため治工具で矯正したり、本溶接が可能ないように開先の補修を行っている。また、少量の溶接を局部的に与えることにより欠陥が生じないように、ショートビード対策などの管理がなされる。

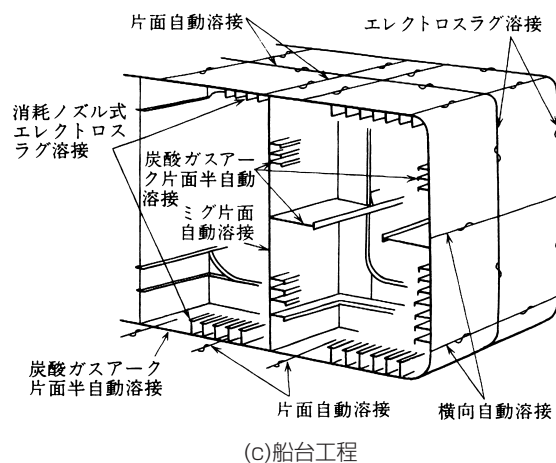
溶接すると該部が熱変形するが、これをできるだけ小さく抑さえ、形状精度を保つ必要がある。部材は溶接による収縮に見合った「伸ばし」を予めとって、設計寸法より長く切断されているが、立体的な3次元精度を保つためには溶接順序も工夫が必要である。また、アンダーカットやオーバーラップ、スラグ巻込みなどの溶接欠陥を生じないように、適正な電流や運棒法を設定し、作業標準の整備や溶接士の訓練を行っている。



(a) 小組立材



(b) ブロック組立て



(c) 船台工程

図14 各種溶接法の適用例

構造部材の継手には不連続部が多くあり、部材端部や開口、スカラップなどの巻き溶接箇所では割れが生じやすい。これらを含め、管理すべき継手精度の標準範囲と許容限界およびこれを超えた場合の処理については、日本造船学会鋼船工作法研究委員会の「日本鋼船工作法精度標準、JSQS」があり、これに各社の基準も折り込み実施している。なお、工作精度を含む船体建造技術全般については文献<sup>12)</sup>に詳述している。

## 4. 関連規格

船舶は、検査機関である船級協会の規則に基づいて設計・建造される。船級協会は主要国に存在するが、我が国では日本海事協会（NK）がある。以下、NK 規則をベースに溶接関連の規則について述べる。

### 4.1 造船用鋼材

船殻部材の鋼材は船級材と称し、軟鋼では A, B, D,

Eの4種のグレードに、高張力鋼ではA、D、Eの3種に区分されている。いずれもAからEの順に切欠き靱性が高くなり、特にE級鋼は亀裂が他所から伝播してきてもそれを停止するいわゆるクラックアレスターとして使用される。熱処理もグレード別に規定されている。どのグレードの鋼材を使用するかは、船種や構造部位、板厚によって細かく規定されている。高張力鋼（HT）は315MPa、355MPa、390MPaなど降伏応力の値で規定されており、船舶の大型化に伴い高強度の材料が使用されている。1980年代からTMCP鋼が実用化され、高強度、高靱性で溶接性も良いことから広く採用され、現在は船種にもよるが70%を超えるHT化率となっている。

#### 4.2 溶接設計

溶接継手は構造様式や強度、建造法、製造設備や作業性、安全性などを考慮して決まる。造船では、突合せ継手はスキン材の板継ぎや、船台・ドック上でのブロック継手に使われ、船級規則で板厚に応じ開先形状が規定されている。実船では突合せ継手よりもT継手の方が80-85%と圧倒的に多く<sup>9)</sup>、脚長も船級協会の規則で規定されている。T継手の大半は両面すみ肉溶接であるが、強度上重要な箇所では開先溶接（完全溶込みまたは1/3溶込み）も採用される。逆に薄板や荷重が低い箇所では片側のみや、断続の溶接も認められている。断続溶接は腐食の問題、ビードの始末端の処理、自動化の困難さなどの欠点もあるが、溶接入熱が少ないため薄板では歪み防止の観点から使用されている。

#### 4.3 溶接材料・施工

溶接材料としては、手動、自動および半自動溶接について、溶接法別、鋼材別に船級協会によって規定され、規則の定める材料認定試験に合格する必要がある。また、各造船所では船級協会の定める溶接施工法承認試験を取得していなければならない。

溶接作業には技量資格を課し、その有資格者が船体の溶接をするよう規定している。近年は熟練技能者が不足し、後継者の育成が喫緊の課題となっており、各造船所や業界団体の技能訓練所が活発に教育・訓練を行っている。

#### 4.4 溶接検査

船殻の溶接検査は、船級協会や船主監督によるブロック検査、船台・ドック工程での完成検査、水密試験、気密試験などがある。溶接部は特に、溶接忘れ、スラグ除

去忘れ、亀裂やアンダーカット、脚長不足などを綿密に検査し、これら外観検査の他特に重要な箇所には放射線透過試験などの非破壊検査が要求される。

## 5. あとがき

本稿では、現在広く建造されている一般商船の溶接技術について現状を概説した。特殊船の内、LPG船やLNG船、プロダクト船やケミカル船、フェリー、旅客船などはページ数の都合で割愛した。また材料も、一般の構造用鋼に限定し特殊鋼やアルミニウムなども対象外とした。

近年特に生産現場でのデジタル化が推進され、また、CAEによる生産シミュレーションやそれらをベースにした高精度生産が叫ばれるが、これらについては稿を改めたい。

## 参考文献

- 1) 日本造船工業会ホームページ：造船関係資料 2010. 3 [PDF版].
- 2) 神田幸雄, 馬場脩, 藤本敦生, 藤原昇：最近の溶接技術の進歩, 石川島播磨技報第39巻第2号, 1999. 3, pp.70-74.
- 3) 溶接学会：溶接・接合便覧, 1990. 9, 丸善, pp.1329-1330.
- 4) 奥本泰久：工作誤差の発生要因とその対策, 溶接学会全国大会講演概要 第67集, F9-F16.
- 5) 奥本泰久, 松崎晋一ほか：船殻の高精度加工・組立システム, 石川島播磨技報, 第32巻 第6号, 1992. 11, pp.426-452.
- 6) 新版 接合技術総覧, 産業技術サービスセンター, 1994. 11, pp.978.
- 7) Osamu Baba, and Yasuhisa Okumoto: Study on Prevention of Cracks in FCB Welding Bead, TEAM2005 Proceedings, 2007, pp.402-411.
- 8) Osamu Baba, Yasuhisa Okumoto, and Akinori Abe: Welding of Thicker Steel Joints of Container Ships, Journal of Ship Production, Vol.23, No.1, 2007, pp.46-52.
- 9) 日本溶接協会 船舶・鉄構海洋構造物部会 溶接施工委員会, 新版・造船溶接施工ハンドブック, 1999. 5, pp.57.
- 10) 奥本泰久, 柳内英治ほか：船殻大組立溶接ロボットシステムの適用と経緯, 石川島播磨技報, 第33巻 第6号, 1993. 11, pp.420-424.
- 11) Yasuhisa Okumoto: Advanced Welding Robot System to Ship Hull Assembly, Journal of Ship Production, Vol.13, No.2, 1997. 11, pp.101-110.
- 12) 奥本泰久：造船技術と生産システム, 成山堂書店, 2009. 2.