

ミニ特集・1  
造船用鋼材の最近の進歩

# 造船分野における最近の溶接技術の進歩と溶接部信頼性の向上

## Recent Progress in Welding Technology and Reliability of Steel Welds in Shipbuilding

小関敏彦  
Toshihiko Koseki  
大北 茂  
Shigeru Ohkita

東京大学 工学系研究科  
マテリアル工学専攻 教授

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所  
接合研究センター 主幹研究員

### 1 はじめに

造船分野においては、リパティ船などの初期の破壊事故の経験から船体用鋼板およびその溶接部の性能管理の重要性が早くから認識され、破壊力学的な検討とともに船級規格の整備が進められてきた。近年では、船舶の大型化や高性能化に伴い船体用鋼板の厚手化、高強度化が検討される中で、脆性破壊の発生特性や伝播停止特性も重要な基準として規格に取り入れられるとともに、溶接部の疲労特性や耐食性も船舶の安全性や耐久性に関わる問題として重大な関心が払われてきた。その一方で、船舶の建造では、他の溶接構造物に比べて溶接箇所が多く溶接線の総長が長いことなどから、建造コストや工期の短縮のため、溶接の高能率化や自動化が早くから取り組まれてきた。板継ぎの片面大入熱溶接やすみ肉の高能率溶接の開発は、日本造船業の競争力確保に大きな役割を果たしてきたといえる。また最近では、板厚50mmを越えるような鋼板の立向き溶接を、高能率な簡易エレクトロガスアーク溶接により1パス溶接する施工法も用いられている。しかしながら溶接入熱の増加は、溶接金属や溶接熱影響部(HAZ)における組織の粗大化や低靱性組織の生成を促進するため、溶接部の高性能化とは基本的に相反する。したがって、溶接の品質と経済性を両立しうる鋼板および溶接法の開発が、今後も造船業の競争力の鍵として重要である。本稿ではその視点から、造船分野における近年の主要な溶接の改善技術と、それに適合する溶接部性能に優れた材料開発、その基盤となる溶接部の組織制御、船舶の耐破壊性能評価の考え方を概括する。

### 2 溶接の高能率化への取り組み

船殻構造の溶接は、1960年代に片面のサブマージアーク溶接(SAW)が実用化されて板継ぎの溶接法の主流となり、

また骨材と板材の溶接は、かつての主流の被覆アーク溶接(手溶接)の大部分が、自動あるいは半自動の炭酸ガスアーク溶接によって置き換えられてきた<sup>1,2)</sup>。その変遷の概要を図1<sup>3)</sup>に示す。特に片面一層のSAWの開発は、それまでの両面一層のSAWを大幅に高能率化するものであり、片面溶接の裏ビードの安定性を確保するための銅や固形フラックスの裏当て(バックイング)法やバックイング材の改良、鉄粉や合金の添加が容易で高速・高溶着量を可能にするポンドフラックスの改良などによって確立されてきた<sup>4)</sup>。さらに高速・高能率化のために多電極化が図られ、今日では図2に示すように4電極の高速片面SAWも実用化されている<sup>4,5)</sup>。多電極化の

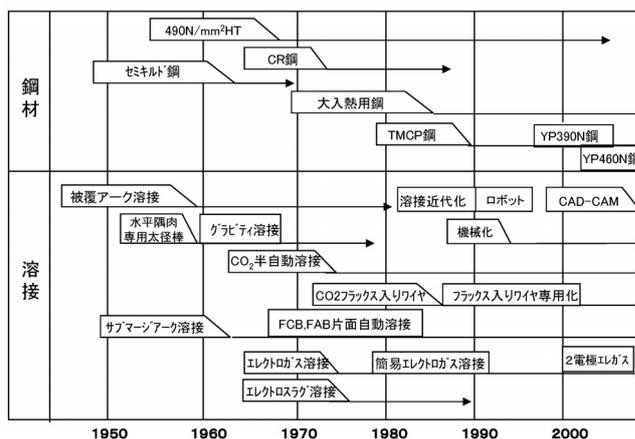


図1 造船用鋼板の開発と溶接工法の変遷<sup>3)</sup>(文献<sup>3)</sup>に加筆)

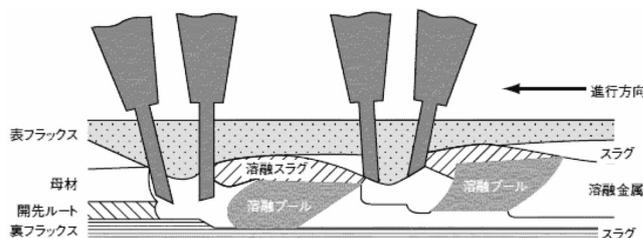


図2 4電極片面サブマージアーク溶接の模式図<sup>5)</sup>

メリットは、トータル溶着量が確保できることによって高速化が可能になるのに加え、電極ごとの電流量や角度、各電極間隔を調整することで、裏ビード、表ビードの形成の役割を各電極に振り分け、高速溶接で課題となる割れやアンダーカットなどの溶接欠陥の発生を抑制できることにもある。図3<sup>4)</sup>は多電極化による溶接速度の向上を被溶接鋼板の板厚との関係で示したもので、4電極の場合は板厚16 mmの鋼板を約1.5 m/minの高速で溶接可能となるが<sup>4,5)</sup>、このような大板継ぎの高速化とその自動化は船殻建造の大幅な能率向上、特にVLCC (Very Large Crude Carrier, 載貨重量20万トン以上の超大型タンカー) のダブルハル化のように溶接線長さの増加の中では極めて有効である。同時にこのときの溶接入熱は7kJ/mmにも及び大入熱である点は留意を要し、このような溶接技術の確立は、図1に示すように、大入熱溶接下でも特性劣化の少ない鋼板の開発、更にその後のTMCP鋼の実用化に負うところが極めて大きい<sup>3)</sup>。

骨材と板材の溶接に関しては、従来太径棒による水平すみ肉溶接が行われていたが、現在ではCO<sub>2</sub>溶接による高速・自動化に置き換わっている(図1)<sup>3)</sup>。中でも、フラックス入りワイヤ(FCW)は安価な炭酸ガスをシールドガスに使う高能率な溶接法として造船分野で確立してきた代表的なものである。骨材と板材のすみ肉溶接では、様々な姿勢でのビード形状、アンダーカットや凝固割れの抑制、脚長の要求に見合う溶着性など、様々な要求に応えなければならず、フラックス成分の検討や溶着金属のC、Mn、Pなどの組成の影響などが継続的に検討され改良されてきた<sup>6,7)</sup>。またロンジパネル組み立ての水平すみ肉溶接では疲労特性を向上させるためビードの止端部の形状と脚長の確保が重視されるが、2電極化による高速化とともにFCWの採用によりそれらの安定化が図られてきた<sup>7)</sup>。実際にはこれを多連装して自動溶接が行われるが、上記課題に加えてスパッタの減少やプライマなどによるピット発生の抑制などが求められ、FCW中のフラックスや金属成分の設計はこれらも考慮して進められてきた。

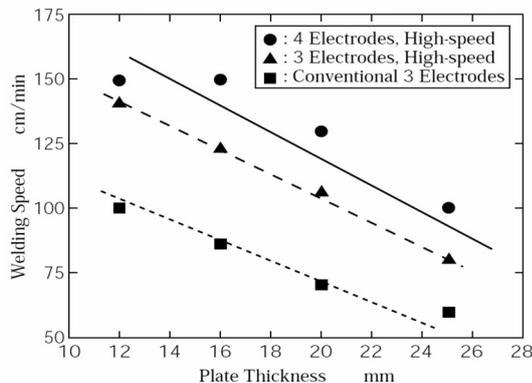


図3 造船大板継ぎ用多電極片面サブマージアーク溶接の溶接速度と板厚の関係<sup>4)</sup>

外業における船体ブロック組み立ての外板継ぎには、立向きのエレクトロガスアーク溶接(EGW)および簡易EGWがある。図4<sup>8)</sup>に簡易EGWの模式図を示すが、表開先面に摺動式の銅当て金をあて、裏面に固定式の裏当て材を用いて、ガスシールドアーク溶接(主に炭酸ガスシールドのFCW溶接)にて溶融プールを作りながら溶着していく手法である。最近の大型コンテナ船では、シアストレーキやハッチコーミングの部分の板厚は50 mm以上にもなるが、この突合せ溶接も大入熱1パス溶接で行われる。この場合溶接入熱は30~50kJ/mmにも及び、溶接金属、母材HAZ部の特性確保が特に重要である。このEGWに関しては、更なる厚手鋼板への対応、ならびに、アークの揺動幅を狭めて入熱分散や欠陥発生の抑制を目的に、近年、2電極型のEGWも開発された<sup>8,9)</sup>。この他、外板の溶接には、片面から1パス溶接できる炭酸ガス溶接法も開発され使用されている<sup>10)</sup>。これらにより外板継ぎにおいても高能率な溶接が可能となった。

片面SAW、FCW、EGWは現在の造船における溶接の大部分を占め、膨大な溶接長の高能率化を支えている<sup>1,3)</sup>。また、これらの溶接技術では、溶接部の特性の確保に加えて、本稿では十分カバーできないが、溶接性、現場での溶接作業性や能率、溶接による変形など様々な課題があり、それらも同時に考慮されながら溶接技術開発が進められてきた。他方、造船用の溶接方法の新しい流れとして、高出力レーザーによる溶接が検討され、欧州では既にスティフナのすみ肉溶接やサンドイッチパネルへ適用された実績もある<sup>11)</sup>。レーザー溶接は溶接部の清浄性が高く、高品質の溶接が可能とされているが、設備制約型であると同時に冶金的には溶接部の比較的

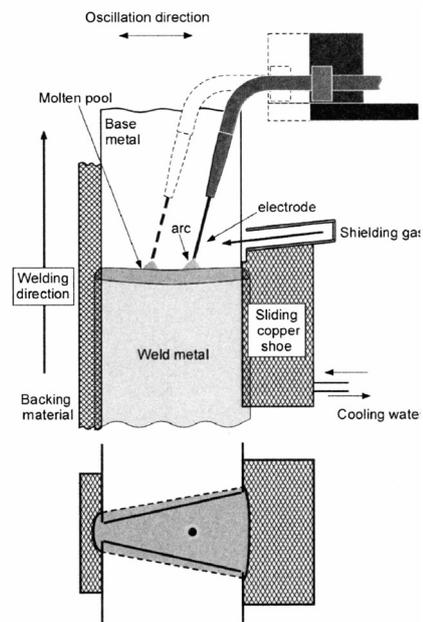


図4 簡易エレクトロガスアーク溶接の模式図<sup>8)</sup>

速い冷却速度、それによる硬化や靱性劣化、良好な溶接開先の精度の要求など、従来溶接とは異なる開発課題がある。

### 3 溶接部高性能化への取り組み

造船用の溶接構造用鋼の高強度化と溶接の大入熱化が進む中で、溶接部特性の最も重要な課題は靱性の確保と向上である。厚鋼板の開発の観点からHAZ靱性に話を絞れば、オーステナイト( $\gamma$ )粒成長が著しい粗粒HAZ (Coarse-Grained HAZ, CG-HAZ)の靱性劣化が最も顕著であり、多層溶接ではこのCG-HAZが $Ac_1$ と $Ac_3$ の間の二相域に再加熱されるIR-CG (Intercritically Reheated Coarse-Grained) HAZが、局所脆化領域 (Local Brittle Zone, LBZ) となることが知られている<sup>12)</sup>。それらの組織の模式図を図5に示す。CG-HAZの靱性劣化の組織的な要因としては、旧 $\gamma$ 粒の粗大化に伴う粗大な粒界フェライト、フェライトプレート、上部ベイナイトの生成、さらにプレートやラス間の炭化物やM-A (Martensite-Austenite Constituent、島状マルテンサイト)、フェライト周辺の擬似パーライトといった破壊の起点となる硬質相の生成などが挙げられ、これらは鋼の高強度化、すなわち鋼の炭素当量 (Ceq.) の増加とともに顕著になる<sup>13)</sup>。TMCP (Thermo-mechanical Control Process) による鋼板製造は、Ceq.低減を可能にし、これらの要因の抑制に有効である。図6<sup>14)</sup>は造船用490 MPa級鋼の溶接部HAZ靱性に及ぼす溶接入熱とCeq.の影響を造船協会SR193委員会で整理したものであるが、明らかにTMCP化によって低Ceq.化され、幅広い溶接入熱範囲でHAZ靱性が確保できるのがわかる。ただしこれには後述のTiNの効果も含まれている。またTMCPによる低Ceq.化は予熱低減・予熱フリー化にも有効で、その意味で溶接に対するTMCPの恩恵は大きい。造船用では、さらに高強度のYP390 MPaや460 MPa鋼の開発でもTMCPによる製造が大前提となっており<sup>15)</sup>、溶接部の靱性と溶接性の要求の厳しい液化ガス運搬用船舶などに使用される低温用鋼においても同様である。

しかしながら大入熱溶接の溶融境界近傍のCG-HAZでは

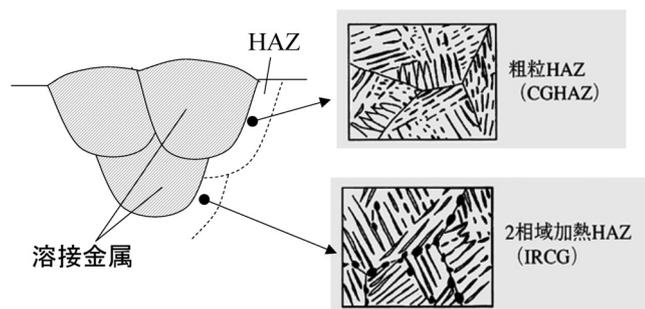


図5 鋼溶接熱影響部 (HAZ) 組織模式図 (文献12) より抜粋)

上述のTMCPによる低Ceq.化だけでは靱性向上が不十分であり、これに加えて介在物を利用した組織制御による靱性向上が検討されてきた<sup>16,17)</sup>。介在物を利用した組織制御の基本的な考え方は、

- 粗大な旧 $\gamma$ 粒内に酸化物などの介在物を核に微細な粒内フェライト (IGF, Intragranular Ferrite) を多数生成させて最終組織を微細化する
  - $\gamma$ 粒の成長を分散介在物粒子でピン止めして旧 $\gamma$ 粒径を小さくし、それに伴って変態生成組織を小さく、かつフェライト主体にする
- の2つである。

前者 (a) は鋼中に分散した1~数 $\mu$ mのTiN、Ti酸化物、それらとMnS、BN、 $Fe_{23}(C,B)_6$ などが複合化した粒子が旧 $\gamma$ 粒内で核となるもので、介在物から針状あるいは花弁状のフェライトが発達して互いに大角粒界を形成し、インターロックしあうことでへき開破壊の抵抗となり靱性を向上させる。またIGFの分率の増加は、破壊の起点や粗大な破面単位を構成する粒界フェライトなど粒界からの変態生成物の分率ならびにサイズを減少させる効果もある。最終組織の微細化はIGFの分率と個数密度に依存し、競合する粒界フェライトやフェライトプレートをいかに抑えるかにもよる。この技術そのものは溶接金属ではTi-B系としてすでに1980年代はじめから実用化されており、造船用大入熱溶接金属はこの技術を前提に溶接条件を考慮して設計されている。溶接金属では凝固 $\gamma$ 粒がCG-HAZの $\gamma$ 粒より粗大であり、かつ酸素量を数百ppm含有することから、利用できるTi酸化物の個数密度が母材の場合のそれより桁違いに多く、さらにB添加によって粒界フェライトを遅らせることで、高いIGF分率と密度を実現している<sup>17)</sup>。それに対して、母材HAZは相対的には旧 $\gamma$ 粒が小さく、介在物の個数密度も低く、TMCPも手伝って低Ceq.で焼入れ性も低いことから、IGFの分率、密度の向上は、溶接金属より難しい<sup>17)</sup>。

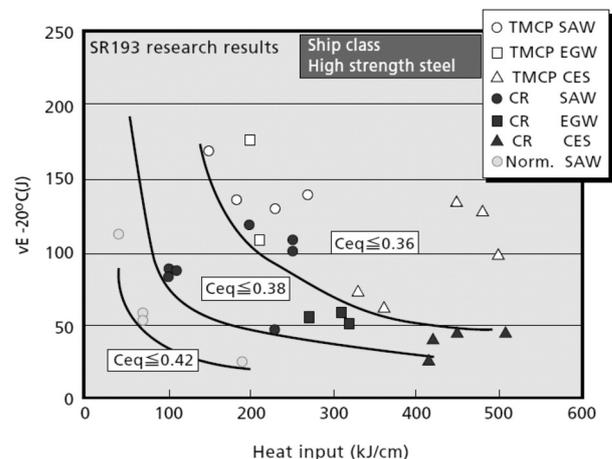


図6 造船用鋼の溶接部vE-20°Cに及ぼす溶接法、入熱、Ceq.の影響<sup>14)</sup>

介在物を核としたIGF生成の機構については、介在物とフェライトとの格子整合性、介在物周辺の $\gamma$ 安定化元素の欠乏など、様々な観点から検討が進められているが、統一的には説明されていない<sup>16)</sup>。それらを解明するための鋼と酸化物界面をモデル化した検討<sup>18, 19)</sup>、また更なる核密度の増加のための硫化物の利用の検討<sup>20)</sup>などが進められている。

他方、(b) は数10 nm～サブミクロンサイズの介在物の分散により、CG-HAZの再加熱 $\gamma$ 粒の成長をピン止めするので、ピン止め粒子としてのTiN<sup>21)</sup>は造船用鋼をはじめ広く大入熱溶接用鋼に使われてきた。しかしながら、厚手鋼のEGWのような更なる大入熱溶接のCGHAZでは、TiNが溶解する1400℃を超える高温への加熱時間が長く、TiNによる $\gamma$ 粒のピン止め効果が著しく低下する。このため、超大入熱溶接のCG-HAZの靱性改善には、より高温で安定な酸化物や硫化物の分散が検討されてきた<sup>22, 23)</sup>。図7<sup>23)</sup>にMgやCaのサブミクロンの微細酸化物を分散した鋼を1400℃で等温保持した場合の $\gamma$ 粒成長挙動をTiN鋼と比較して示す。この技術は、造船分野ではコンテナ船の厚手YP390 MPa級鋼

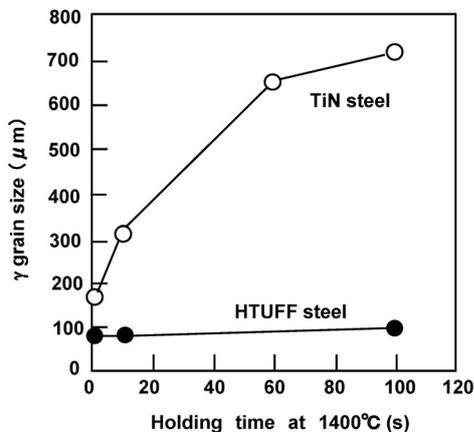


図7 Mg、Caのサブミクロン酸化物を分散した鋼 (HTUFF) の $\gamma$ 粒成長挙動<sup>23)</sup>

およびYP460 MPa級鋼の大入熱EGWの溶接部に適用されている<sup>24)</sup>。

溶接金属については、上述のように、Ti系酸化物を利用した微細なアシキュラーフェライトの生成と $\gamma$ 粒界の粗大フェライト抑制により靱性向上を達成しているが、大入熱溶接では、鋼材の成分の希釈の寄与が高くなり、溶接材料単独の成分設計では十分な特性が確保できないため、鋼材成分、溶接条件を十分配慮したトータルな溶接材料設計が重要である。

## 4 溶接部信頼性向上への取り組み

造船分野においては、他分野に先駆け、溶接部の靱性評価や靱性の要求値が早くから検討され、規格化されてきた。表1<sup>25)</sup>は船体用鋼板の日本海事協会 (NK) 船級規格であるが、鋼板および溶接部に対する靱性要求が破壊力学的検討に基づいてシャルピー値として要求されている。母材に対しては最大板厚100 mm、YP390 MPa級まで規定されており、溶接継手については最大70 mm、YP390 MPa級まで規定されている。IACS規則では板厚は50 mmまでであるが、NKでは大型コンテナ船へ対応するためそれを超える板厚を独自に規定しており、今後、コンテナ船の更なる大型化に向けて強度レベルはYP460 MPa級へ、板厚も100 mmまで拡大されようとしている。表1の要求靱性は、図8に示すような破壊力

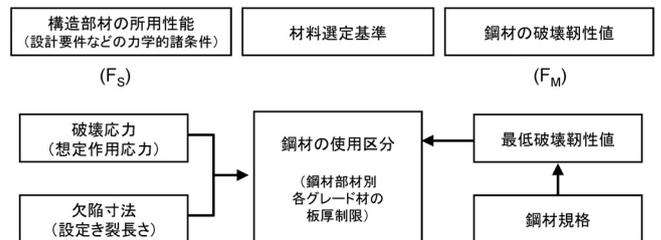


図8 船体用鋼の破壊力学的手法 (K概念) を用いた破壊力学靱性評価の概念図<sup>25)</sup>

表1 船体用高張力鋼母材および溶接継手部規格 (NK鋼船規則2005)<sup>25)</sup>

a) 母材

| 鋼種    | 引張試験                     |                           |                             | Vノッチシャルピー衝撃試験 |                      |    |    |    |
|-------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|----|----|----|
|       | 降伏点 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び (5.65 $\sqrt{S_0}$ ) (%) | 試験温度 (°C)     | 最小平均吸収エネルギー値 (J) L方向 |    |    |    |
|       |                          |                           |                             |               | 板厚 : t (mm)          |    |    |    |
| YP32鋼 | AH32                     | 315                       | 440-570                     | 22            | 0                    | 31 | 38 | 46 |
|       | DH32                     |                           |                             |               | -20                  |    |    |    |
|       | EH32                     |                           |                             |               | -40                  |    |    |    |
|       | FH32                     |                           |                             |               | -60                  |    |    |    |
| YP36鋼 | AH36                     | 355                       | 490-630                     | 21            | 0                    | 34 | 41 | 50 |
|       | DH36                     |                           |                             |               | -20                  |    |    |    |
|       | EH36                     |                           |                             |               | -40                  |    |    |    |
|       | FH36                     |                           |                             |               | -60                  |    |    |    |
| YP40鋼 | AH40                     | 390                       | 510-660                     | 20            | 0                    | 39 | 46 | 55 |
|       | DH40                     |                           |                             |               | -20                  |    |    |    |
|       | EH40                     |                           |                             |               | -40                  |    |    |    |
|       | FH40                     |                           |                             |               | -60                  |    |    |    |

b) 溶接継手部

| 鋼種    | 引張試験                      |           | Vノッチシャルピー衝撃試験    |    |
|-------|---------------------------|-----------|------------------|----|
|       | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 試験温度 (°C) | 最小平均吸収エネルギー値 (J) |    |
|       |                           |           | 板厚 : t (mm)      |    |
| YP32鋼 | 440                       | +20       | 34               | 41 |
|       |                           | 0         |                  |    |
|       |                           | -20       |                  |    |
|       |                           | -40       |                  |    |
| YP36鋼 | 490                       | +20       | 34               | 41 |
|       |                           | 0         |                  |    |
|       |                           | -20       |                  |    |
|       |                           | -40       |                  |    |
| YP40鋼 | 510                       | +20       | 41               | 47 |
|       |                           | 0         |                  |    |
|       |                           | -20       |                  |    |
|       |                           | -40       |                  |    |

学的手法 (K概念) を用いて導出されている<sup>25)</sup>。すなわち、設計要件などの力学的条件との対応を考慮し、破壊力学的手法を用いて構造部材ごとに次式が成立すれば脆性破壊に対する安全性の確保が可能と考える：

$$F_M (\text{使用鋼材の最低破壊靱性値}) \geq F_S (\text{構造部材に対する要求破壊靱性値}) \dots\dots\dots (1)$$

破壊力学のパラメータである破壊応力、欠陥寸法、および靱性値の関係をを用い、脆性破壊が発生しないようにするには、鋼および溶接継手の破壊靱性値Kcが、構造部材にかかる応力および想定される欠陥寸法から決まるKに対して

$$Kc \geq K \dots\dots\dots (2)$$

であればよい。ここでKcの評価にはディープノッチ試験などが用いられてきた。最近のYP460 MPa 鋼の検討では、図9<sup>26)</sup>に示すように、溶接金属と母材の硬さの比が1.2を超えるオーバーマッチとなると、強度の高い溶接金属が変形せずにHAZを拘束しボンド部がますます低靱性となることが判り、鋼母材と溶接金属との強度マッチングの制御がHAZの破壊靱性に対して重要であることが示された<sup>26)</sup>。

また、万一、脆性亀裂が発生した場合は、それを伝播停止させるアレスト性が必要である。従来、溶接部で発生した脆性亀裂は溶接部の残留応力等の影響で母材に逸れ、母材のアレスト性が十分であればそこで停止すると考えられてきた。ここで母材に必要なアレスト性は板厚35 mm程度までの鋼板に対しては、船舶の最低使用温度Tにおいて、

$$Kca (T) \geq 4000 \sim 6000N/mm^{1.5} \dots\dots\dots (3)$$

であると評価されてきた。しかし最近のYP460 MPa 鋼の検討では、溶接部に発生した脆性亀裂は逸れずに溶接部を貫通

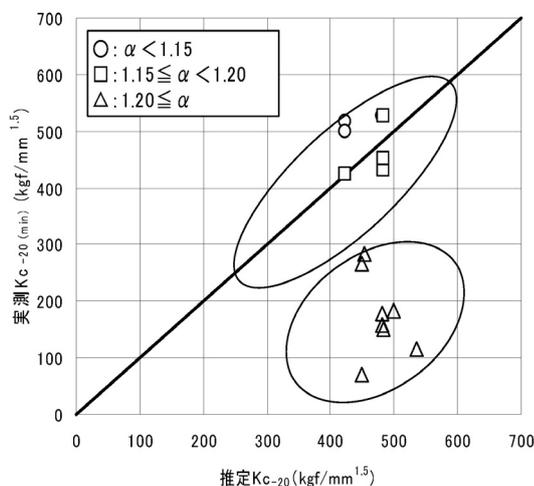


図9 YP460MPa級鋼の大入熱溶接部のKc (-20℃) に及ぼす母材と溶接金属の強度マッチングの影響 (推定はシャルピー吸収エネルギーより)<sup>26)</sup>

する結果が得られ、新たな課題として提起されている<sup>25)</sup>。このことは、高強度・厚手の造船用鋼では、溶接金属と母材の強度マッチングの制御、母材のアレスト性能、その母材に脆性亀裂を突入させる船体構造設計、の三位一体が必要であることを示している。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、近年の造船分野における厚鋼板の溶接技術の変化、様々な要求特性と高能率溶接法に対応する溶接部性能に優れた厚鋼板の進歩、その基盤となる溶接部の設計、組織制御、さらに、鋼溶接部の信頼性の評価について概括した。特に大入熱溶接部の靱性劣化について議論したが、これらについては依然多くの課題が残されている。すなわち、TMCPによる低Ceq化や介在物を活用した大入熱溶接部の靱性改善は、母材の更なる高強度化や厚手化に伴い次第に難しくなりつつある。またシャルピーレベルでは結果が出て、実構造に近い大型の破壊靱性試験では脆性亀裂の発生や伝播停止性能で劣るケースも出ており、溶接金属、HAZ、母材の三者のバランス設計が必要であることも示されてきた。

溶接部の特性向上なしには鋼構造物の性能の向上、施工や建造の能率向上・コストダウンはない。その意味で継続した研究開発が必要であり、さらに次世代の溶接部の靱性向上技術を考えるべき時期に来ているとも思われる。さらに、本稿では靱性ととも溶接部の大きな課題である疲労や耐食性については触れなかったが、構造物の安全や長寿命化の観点からはこれらも重要な課題であり、更に広範な検討の継続が必要である。

### 参考文献

- 1) 渡辺栄一：第159回・160回西山記念講座，日本鉄鋼協会，(1996)，201.
- 2) 長谷薫：第159回・160回西山記念講座，日本鉄鋼協会，(1996)，167.
- 3) 豊原力：溶接技術，48 (2000)，99.
- 4) 長谷薫，幸村正晴：神戸製鋼技報，50 (2000) 3，70.
- 5) 大山繁男，糟谷正，品田功一：新日鐵技報，385 (2006)，16.
- 6) 伊藤和彦，長岡茂雄，橋本哲哉，黒川剛志：神戸製鋼技報，54 (2004) 2，15.
- 7) 新日鐵技報，355 (1995)，62.
- 8) 笹木聖人，須田一師，元松隆一，橋場裕治，大北茂，今井嗣郎：新日鐵技報，380 (2004)，57.
- 9) 横田泰之：溶接学会誌，74 (2005)，165.
- 10) 木本勇，元松隆一：新日鐵技報，385 (2006)，10.

- 11) P.L. Harrison and R.A. Farr : *Int'l. Mater. Rev.*, 34 (1989), 35.
- 12) 粟飯原周二, 岡本健太郎, 萩原行人 : 日本造船学会誌, 723 (1989), 601.
- 13) G. Thewlis : *Mater. Sci. and Technol.*, 10 (1994), 110.
- 14) 松田穰 : 最近の鋼材製造方法概論, 土木学会鋼構造委員会鋼材基礎講座資料, (2005)
- 15) 岡野重雄, 小林洋一郎, 柴田光明, 塩飽豊明, 長谷薫, 笹倉秀司 : 神戸製鋼技報, 51 (2002) 1, 2.
- 16) 小関敏彦 : 鉄と鋼, 90 (2004), 61.
- 17) T. Koseki and G. Thewlis : *Mater. Sci. and Technol.*, 21 (2005), 867.
- 18) S. Zhang, N. Hattori, M. Enomoto and T. Tarui : *ISIJ Int.*, 36 (1996), 1301.
- 19) 加藤大樹, 堤昌則, 小関敏彦 : *CAMP-ISIJ*, 18 (2005), 1598.
- 20) G. Thewlis : *Mater. Sci. and Technol.*, 22 (2006), 153.
- 21) 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研 : 鉄と鋼, 61 (1975), 2589.
- 22) 弟子丸慎一, 平井征夫, 天野慶一, 上田修三, 上村尚志, 坪田一哉 : 川崎製鉄技報, 18 (1986), 295.
- 23) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 中島隆雄, 石田浩司, 安井洋二 : 新日鐵技報, 380 (2004), 2.
- 24) 皆川昌紀, 石田浩司, 船津裕二, 今井嗣郎 : 新日鐵技報, 380 (2004), 6.
- 25) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩 : *KANRIN 日本船舶海洋工学会誌*, 3 (2005), 70.
- 26) 大北茂 : 溶接技術, 55 (2007) 3, 65.

この特集記事は第191・192回西山記念技術講座「21世紀を拓く高性能厚板」(2007年6月)の講演内容を「ふえらむ」用にわかりやすく解説したものです。

(2007年10月11日受付)