

(解説)

造船の建造方法を変えた片面サブマージアーク溶接法の開発と発展

長谷 薫・幸村正晴

溶接カンパニー・技術開発部

One-side Submerged Arc Welding : the Key to Modern Ship Construction

Kaoru Nagatani・Masaharu Komura

The Japanese ship building industry has long been a world leader for new developments and unique ship building technologies, such as large scale hull block construction and the use of pre-welded longitudinal panels. While reviewing developments in one-side submerged arc welding, a key technology, this paper discusses changes in welding material composition in response to advances in modern steel alloys used in the shipping industry.

まえがき = わが国の造船業界は、たえまない努力と技術革新によって飛躍的な発展をとげ、現在も設計・建造技術の両面から世界を牽引し続けている。1964年に当時の技術力を結集して当社が開発した片面サブマージアーク溶接法とその材料は、造船で生まれ育てられてきたが、まさに業界発展の原動力のひとつになったと考える。

1960年代は、タンカーで代表されるように船舶数の増加と船体の大型化が進み、建造能率の向上とりわけ溶接工数の大幅な削減が大きな課題として取り上げられていた。当時の溶接方法は鋼板の両側からおこなわれており、片側の溶接が完了した後に反転して残りを溶接するか、反転できない場合は能率の劣る上向き溶接をおこなっていたため、建屋の高さ制限などの理由によりブロックの大型化も進まず、溶接工数は増加の一途をたどっていた。

前述の課題を一気に解決したFCB法、RF法、FAB法などの片面サブマージアーク溶接法は、またたくまに国内の各造船所に広まり、単板のロンジ（船体の補強骨材）先付け工法など日本独自の新しい建造方法¹⁾を可能にした。

その後、鋼材の進歩や船体構造の変化とともに溶接材料は変遷を重ねてきたが、その基本技術は約35年後の現在でも生き続け、世界各国で実用化が進められている。

本稿では、日本におけるサブマージアーク溶接の歴史と特徴を概説するとともに、片面サブマージアーク溶接法の歴史を振り返りながら、当社が開発したFCB法、RF法、FAB法の特徴とその溶接材料の技術的変遷について紹介する。

1. 日本のサブマージアーク溶接の歴史と特徴

1934年頃、ワイヤと粉粒状フラックスを別々に送給しながら溶接をおこなう画期的な方法、すなわちサブマージアーク溶接法がアメリカで考案され、1936年には船舶の建造に適用された。当時主流であった被覆アーク溶接棒と比較して、溶接の自動化、大電流化が可能な高能率施工法として注目をあび、適用拡大が進められた。

日本のサブマージアーク溶接の歴史は、1950年にアメリカからその溶接技術・装置・材料を導入したことで

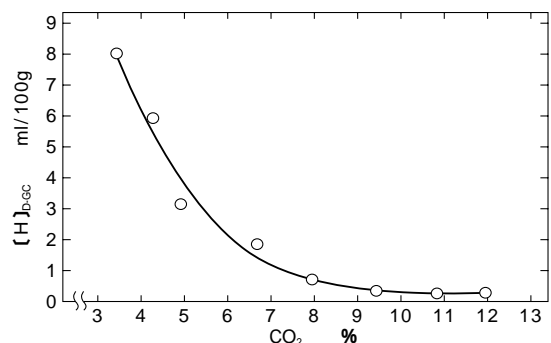
本格化し、1959年にはリンデ社との技術提携でワイヤと熔融型フラックス(Fused flux)の国産化を開始した。

そのわずか2年後の1961年には、当社の独自技術により大入熱溶接性に優れたボンドフラックス(Bonded flux)、1964年にはさらに大入熱溶接性を追求した鉄粉系ボンドフラックスの開発に成功した。

サブマージアーク溶接用フラックスは熔融型とボンドの2種類に大別できるが、わが国で生産されているボンドフラックスは、世界で広く使用されている高温焼成タイプとは異なり、400~600程度の比較的低温で焼成したものであり、1960年代前半に開発した技術が現在も活用されている²⁾。

ボンドフラックスは、熔融型や高温焼成フラックスと比較すれば、そのポテンシャル水素量は相対的に多く、吸湿もしやすいという難点を有している。しかし、第1図に示すように、多量の炭酸塩を添加することによって、アーク雰囲気中の水素分圧を抑え、溶接金属の極低水素化を実現した。さらに、炭酸塩の添加は溶接金属の極低窒素化にも有効であり、高塩基性フラックスによる極低酸素化技術やTi-B系溶接金属による組織微細化技術を合わせて活用することにより、大入熱溶接における溶接金属の強度・靱性の向上を達成した。

また、低温焼成タイプのボンドフラックスは、多量の鉄粉を添加することもでき、高溶着速度と大入熱溶接時のビード形状など溶接作業性の改善を実現した。鉄粉系



第1図 ボンドフラックス中のCO₂量と溶接金属の拡散性水素量の関係

Fig. 1 Relation between CO₂ content in bonded fluxes and diffusible hydrogen in weld metal

と非鉄粉系ボンドフラックスの生産比率は、統計がないため正確にはわからないが、溶接の高能率化に対する要請に比例して、年々鉄粉系ボンドフラックスの使用量は増加し、今日では70%近い値であると推測できる。第2図は、各種フラックスをもちいて溶接した際の溶着速度を比較した一例であるが、高溶着化に対する鉄粉系フラックスの優位性を物語っている。最近では、フラックスの組成の大幅な見直しをおこない、超大入熱溶接や高速溶接でも優れた溶接作業性を有し、かつワイヤ溶融速度が従来品より20%程度向上した鉄粉系フラックスを開発し実用化している。

このように、当社の独自技術により開発した鉄粉系ボンドフラックスは、造船の片面サブマージーク溶接法の実用化・普及に大きく貢献した。

2. 片面サブマージーク溶接法の開発の歴史

片面サブマージーク溶接法は、従来技術の両面一層溶接と比較して示す写真1の断面マクロ組織からも明らかのように、一回で溶接が完了するため非常に高能率である。本溶接法に関係する研究の歴史は意外に古く、第2次世界大戦中のアメリカではBerkeley mill法と呼ばれる銅バックング法などが一部の溶接にすでに適用されていた³⁾。しかし、裏ビードの安定性に欠けるなどの理由により、完全な実用化ということまで至らず、改良検討が世界的に進められていた。

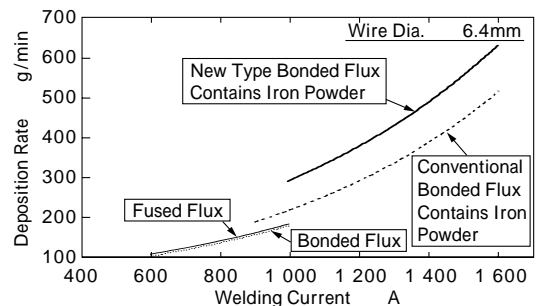
当社は、従来技術としてあった銅バックング法やフラックスバックング法のそれぞれの長所を最大限に生かす裏当て材として、溶接前は粉状で溶接中に固形状となる特性が必要と考えた。この考えを実現させるためには、当時では溶接金属の健全性に対して有害と考えられていた有機物をフラックスに添加することが有効であることが判明した。当社は、その後の研究開発の結果、100~150

で溶融固化する熱硬化性樹脂の採用と、その添加量やフラックスの組成、粒度、高密度の適正化をはかることで、薄板から厚板まで適用可能な画期的施工法を1964年に開発した。

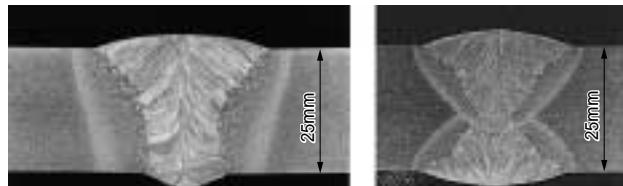
FCB法およびRF法と名付けられた二つの新施工法⁴⁾は、翌1965年には造船の板継溶接に適用されて実用化に成功した。第3図は、FCB法とRF法概念図を示したものである。銅板の上に裏当てフラックスを散布してエアホースの圧力で銅板裏面と密着させるFCB法は、大電流を使用する極厚板への適用性と裏ビード高さの均一性に優れている反面、溶接歪みが多い極薄板への適用性に多少の難がある。

いっぽう、裏当てフラックスの下に耐火フラックスを敷いてエアホースの圧力で銅板裏面と密着させるRF法は、極厚板への適用性に若干難はあるが、銅板裏面の目違いや歪みに対する追従性に優れている。

また、これらの開発過程でえられた技術を展開し、軽量かつ可とう性に富むことを設計のコンセプトにおいて1972年に開発したFAB法⁵⁾は、持ち運びが可能なマグネットの押え治具と第4図に示すような部材から構成された裏当て材をもちいて、曲り部やブロック継ぎ部の

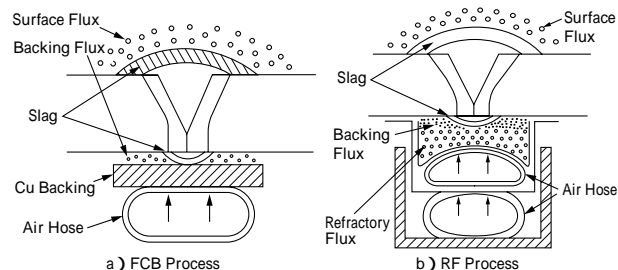


第2図 各種フラックスにおける溶着速度
Fig. 2 Deposition rate in the use of several types of fluxes

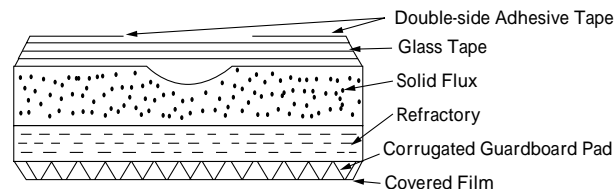


a) Triple arc one-side submerged arc welding (FCB process) b) Tandem arc both-side one-pass submerged arc welding

写真1 片面SAWおよび両面一層溶接の断面マクロ組織の一例
Photo 1 Example of macro structure for one-side welding and both-side welding



第3図 FCB法とRF法の概念図
Fig. 3 Schematic view of FCB process and RF process



第4図 FABの構成
Fig. 4 Composition of FAB

溶接に数多く適用された。

なお、本施工法開発当初の溶接装置は、写真2に示すようなごく単純なものが多かったが、しだいに改良が加えられ、板継溶接の設備更新時期を迎えた1990年代前半には溶接条件のプリセット化、電流・電圧の安定制御、フラックスの自動散布回収・乾燥などの機能を付加した新設備を開発し、溶接品質と作業能率の向上に寄与している。最新設備の外観を写真3に示す。上述したFCB法、RF法、FAB法は、現在の日本国内の中大手造船所や海外造船所などで広く適用されている。

3. 片面サブマージーク溶接用材料の技術的変遷

片面サブマージーク溶接用材料の開発・実用化の歴史は、鋼材の進歩とともに歩んできたといっても過言ではない。わが国の構造用鋼板の強度・靱性・溶接性は、

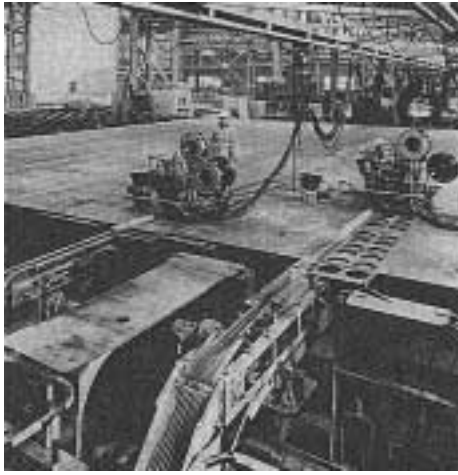


写真2 初期の片面サブマージーク溶接設備
Photo 2 Early equipment for one-side submerged arc welding (RF process)



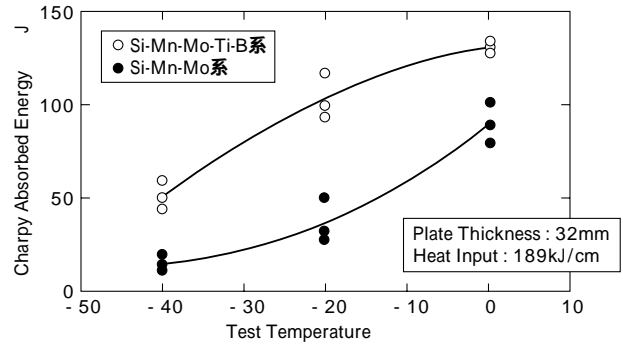
写真3 最新の片面サブマージーク溶接設備
Photo 3 The latest equipment for one-side submerged arc welding (FCB process)

製鋼技術の進歩による高純度化技術および析出物の有効活用による溶接熱影響部の性能改善技術、TMCP法の適用などによって飛躍的に向上した。これに連動するように、新しい溶接材料および施工法が次々と生みだされ、造船における溶接の合理化・コストダウンに寄与してきた。

片面サブマージーク溶接法が実用化された当初のフラックスは、大入熱溶接性と低水素化を実現するためにその組成を $MgO-CaO-SiO_2$ (鉄粉) 系とし、溶接金属の成分は軟鋼が Si-Mn 系、 $490N/mm^2$ 級の高張力鋼には Si-Mn-Mo 系を適用していた。しかし、その数年後には Si-Mn-Mo-Ti-B 系の溶接材料が開発され、適用板厚の拡大による大入熱化や靱性の安定化などの要請に対応した。第5図に、Si-Mn-Mo 系と Si-Mn-Mo-Ti-B 系の溶接金属の衝撃性能を比較して示すが、Ti-B の複合添加による溶接金属の結晶粒微細化の効果は非常に大きい⁶⁾。

1970年代になると、石油の代替エネルギーとしてLPGやLNGが注目され、液化ガス運搬船の建造が盛んに検討され始めた。しかし、片面サブマージーク溶接法の入熱量はあまりにも大き過ぎたため、溶接熱影響部(HAZ)の靱性劣化が問題視されて低温用鋼板などの溶接には適用できなかった。この問題を解決するために、当社は、大極間溶接法と呼ばれた入熱分散型の新しい溶接施工法⁷⁾を1977年にあいついで開発・実用化した。

一つは先行極にスラグ生成量の少ない大電流MIG溶接をもちいて後行極にサブマージーク溶接をもちいる



第5図 片面SAW溶接金属の化学成分とシャルピー吸収エネルギーの関係例

Fig. 5 Example of relation between chemical composition of weld metal and charpy absorbed energy (One-side welding FCB process)

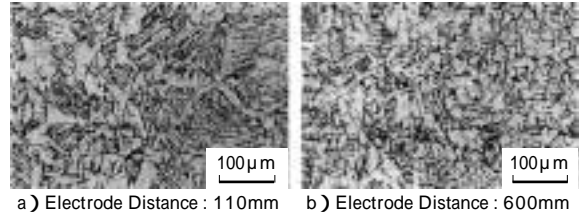


写真4 熱影響部のマイクロ組織
Photo 4 Microstructure of heat affected zone

混用施工法であり、もう一つは先行極で凝固したサブマージーク溶接のスラグに高い導電性を持たせる方法である。この大極間サブマージーク溶接法の最大の特徴は、フラックスの主成分を TiO_2 系とした点にある。

写真4は、溶接熱影響部の顕微鏡組織を比較して示した一例であるが、大極間溶接法を採用することによって組織の粗大化は、軽減されている。ただし、本施工法はその後のTi処理などを施した大入熱用鋼板の出現によって、ごく短期間で姿を消してしまっている。

1980年代に入ると、制御圧延技術と加速冷却技術を活用したTMCP鋼板が開発⁸⁾され、溶接材料も新しい時代を迎えることになった。TMCP法の採用による変態組織の改善によって、鋼板の合金添加量の低減(低 C_{eq} 化)がはかられ、大入熱溶接性や耐水素割れ感受性などは飛躍的に改善された。しかし、鋼板成分系の変更は希釈率が大きいうえで良好な靱性がえられにくい大入熱を適用するサブマージーク溶接にとって、無視できないほどの影響を及ぼした。すなわち、溶接金属の C_{eq} 低下による強度・靱性の劣化と熱影響部の軟化抑制のために添加された微量のNbやVによる靱性劣化の問題である。

前者に対しては、溶接材料からの合金添加量を単純に増加すれば解決できると考えがちであるが、ワイヤに対するフラックスの消費率が溶接条件によって変動するサブマージーク溶接においては、従来のフラックス主体の添加方式では危険性が增大するため、ワイヤからも合金成分を添加する方式を採用した。

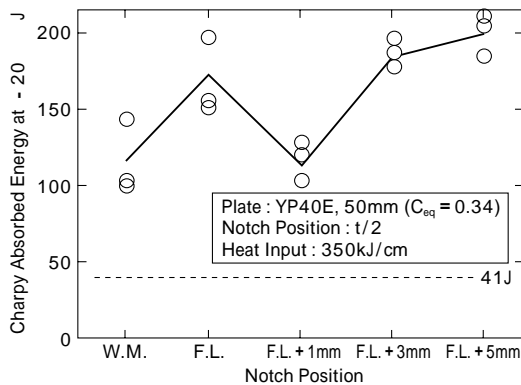
また、後者に対しては、Ti-B系の技術を活用しながら、低窒素ワイヤの適用と $Al_2O_3-MgO-CaCO_3$ (鉄粉)系の高塩基性フラックスを開発した。本技術の適用により、第1表、第6図および第7図に示すように厚板のYP40E級鋼板や低温用鋼板の片面サブマージーク溶接を可

第1表 溶接金属の引張性能例

Table 1 Typical tensile properties of weld metal

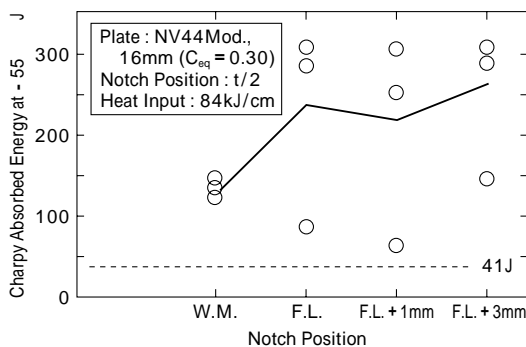
Steel Plate	Plate Thickness mm	Tensile Properties			
		σ_y N/mm ²	σ_n N/mm ²	El.%	R.A.%
YP40E	50	487	648	24	64
NV44Mod.	16	536	659	24	69

Tension Test Specimen Size : 10mm (Parallel Length : 50mm)



第6図 YP40E 溶接継手部の衝撃性能例

Fig. 6 Typical impact properties of YP40E welded joint



第7図 溶接継手部の衝撃性能例

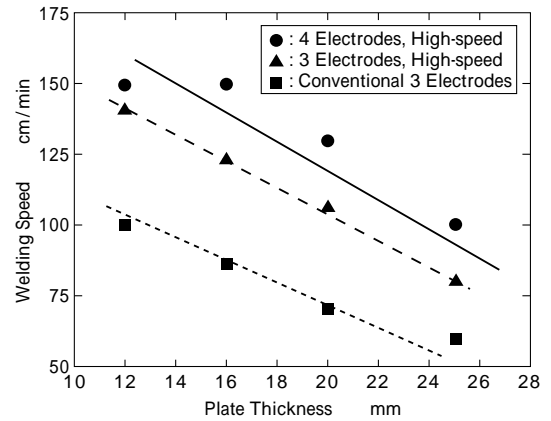
Fig. 7 Typical impact properties of NV44Mod. welded joint

能とした。

1990年代になると、アラスカ沖での原油流出事故を機に、5000DWT以上のタンカにダブルハル(二重船殻)化が義務づけられた。鋼板の進歩とは直接関係しないが、ダブルハル化にともなう板継溶接工数の増加に対応するために、スラグの融点や粘性を調整した新たなフラックスを開発し、高速溶接を実現した。第8図は、板厚ごとに溶接速度を比較して示した一例であるが、新タイプのフラックスをもちいることにより従来法と比較して同じ3電極溶接でも1.5倍程度、4電極溶接においては1.7倍程度の高速溶接を達成した⁹⁾。写真5に高速FCB片面サブマージーク溶接法(4電極)の造船・板継溶接への適用例を示す。

むすび=片面サブマージーク溶接法を世界に先駆けて導入したわが国の造船界は、溶接の合理化を進め大きな成果をあげたが、これは革新的技術の実用化に熱意をもって取組んだ造船所側の前向きな姿勢と、欧米よりはるかに優れた管理技術に負うところが大きいといえる。

今後の技術課題としては、溶接材料面からみれば高強



第8図 高速片面サブマージーク溶接の溶接速度

Fig. 8 Proper welding speeds in high speed one-side submerged arc welding

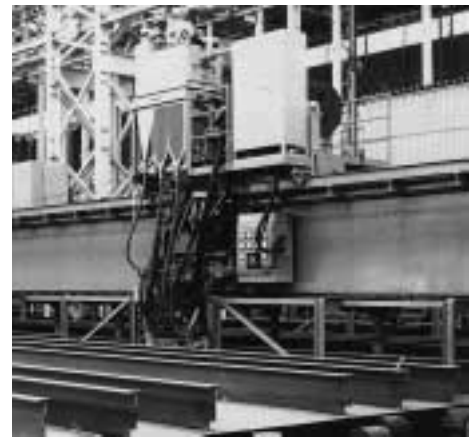


写真5 4電極片面サブマージーク装置の適用例

Photo 5 Application example of the equipment for four electrodes one-side arc welding (FCB process)

度化、厚板化、低温化へのさらなる追求が、装置・施工面からは完全無人化を目指した要素技術の開発が求められると考える。そして、21世紀は地球環境の改善が大きなテーマとして取り上げられることは疑う余地がないため、産業廃棄物である溶接スラグの再利用策の検討と実用化の推進は近い将来必要であろう。いずれもきわめてハードルの高い課題ではあるが、一歩ずつでも前進できるように研究開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) (社)日本造船学会編：日本造船技術百年史，(1997) p.256.
- 2) 長谷 薫：第159・160回西山記念講座，(1996) p.174.
- 3) 有川正康ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.20, No.4(1970) p.13.
- 4) 有川正康ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.20, No.4(1970) p.14, p.15.
- 5) 塩山 仁：R&D 神戸製鋼技報，Vol.20, No.4(1970) p.73.
- 6) 森 直道ほか：溶接学会誌，Vol.50, No.2(1981) p.54.
- 7) 奥田直樹ほか：溶接施工委員会資料，(1981) p.1.
- 8) 上田修三：構造用鋼の溶接，(1997) p.35.
- 9) 菅 哲男：溶接学会誌，Vol.67, No.8(1998) p.46.