

1-7 被覆アーク溶接・サブマージアーク溶接*

幸村正晴**



Shielded Metal Arc Welding・Submerged Arc Welding*

by KOMURA Masaharu**

キーワード アーク溶接, 被覆, サブマージ, 吸湿, 水素, フラックス, 片面, 裏波, 大入熱, 横割

1. はじめに

アークは1801年に発見され、その100年後の1900年初頭には被覆アーク溶接棒が開発されて既に100年の歳月が経っている。一方、この被覆アーク溶接棒の心線と被覆剤からなる構成を元に開発されたのがサブマージアーク溶接法であり、1935年にリンデ社が米国で特許を取得し1936年に実用化されている。なお、当時はサブマージアーク溶接法は「ユニオンメルト法」と呼ばれている。これはリンデ社の親会社であるユニオン・カーバイド・アンド・カーボンの社名からとったもので、現在の溶接現場で「ユニオン」と呼ばれる由縁はここにある^{1,2)}。

近年の溶接材料の出荷動向は図1に示す通りで、被覆

アーク溶接棒の出荷量はフラックス入りワイヤの適用拡大に伴い、減少傾向にある。フラックス入りワイヤが製造現場の高効率・高品質化ニーズに一致したことに加え、溶接技量に左右され難い点が適用拡大に繋がっているものと推測される。サブマージアーク溶接材料は、過去10年を見ても国内総出荷量に占める割合は12%前後と大きな変化は見られない。他の施工法に比べれば高溶着性という特長から、主要な継手で適用が定着はしているものの、装置が大型である事や、溶接姿勢が限定されることなどの理由から適用の拡大が進んでいないものと推測される。

本稿では、この被覆アーク溶接法と被覆アーク溶接材料から派生したサブマージアーク溶接法の原理や溶接材料の特徴、施工方法について歴史を交えながら述べてい

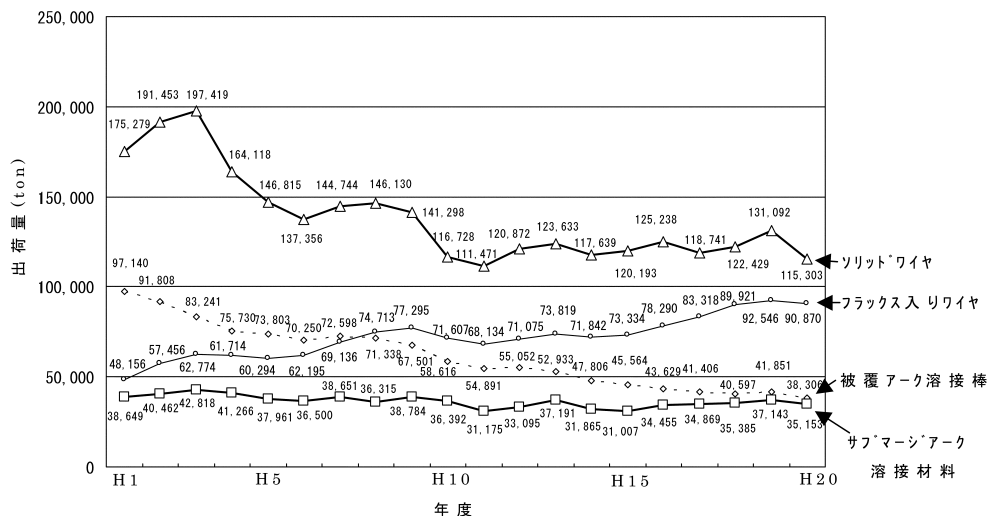


図1 溶接材料の国内品種別出荷量推移 (日本溶接棒工業会統計)

*原稿受付 平成21年12月18日

**正員 (株)神戸製鋼所 溶接カンパニー技術開発部 Member, KOBE STEEL, LTD, Welding Company Technical Development Dept.

きたい。

2. 被覆アーク溶接 (Shielded Metal Arc Welding)

2.1 原理と特徴

被覆アーク溶接は、心線に被覆剤（フラックス）を塗装した棒状の溶接棒を、被覆剤のない端部に給電部となるホルダーを挟み込み、棒の先端と母材間でアークを発生させ、そのアーク熱で心線および被覆剤が溶融し、溶滴となって溶融地へ移行する（図2）。

給電部のホルダーを人の手で保持し、運棒させてなる溶接方法から、手溶接とも言われている。

溶けた心線は溶着金属に、被覆剤の多くはスラグとなり、溶融金属と大気との遮断や脱酸精錬すると共に、ビード形状を安定化させる役割もある。また一部はシールドガスを発生させ、アーク全体を大気から遮断し、大気中の窒素や酸素の混入を防止して、健全な溶着金属の形成の役割を果たす。

溶接作業性や継手性能が被覆剤に大きく影響されることから、被覆種類によっていくつかの系統に区分されている。

給電部が簡素であるためハンドリング性が良好で、仮

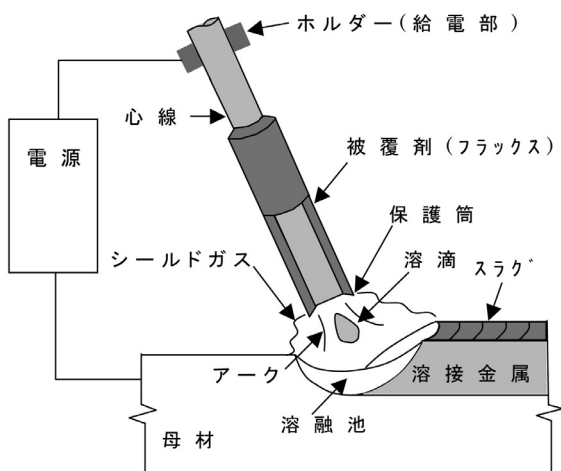


図2 被覆アーク溶接の原理

表1 被覆系別一般の特徴

被覆系および規格		イルミナイト系 E4319	ライムチタニア系 E4303	高セルロース系 E4311	高酸化チタン系 E4313	低水素系 E4316 E4916	鉄粉酸化鉄系 E4327	鉄粉低水素系 E4928	特殊系 E4940 E4340
溶接性	耐割れ性	○	○	○	△	◎ ^{*1}	△	◎ ^{*1}	△
	耐気孔性	○	○	○	△	◎ ^{*1}	△	◎ ^{*1}	△
作業の難易性	作業の難易性	◎	◎	△	◎	○	—	—	—
	立向	◎	◎	△	◎	○	◎	◎	◎
	下向	◎	◎	△	◎	○	◎	◎	◎
	水平	◎	◎	△	◎	○	◎	◎	◎
ビード外観	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
作業性	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
作業性	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
作業性	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
作業性	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
作業性	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△
	溶込み	◎	◎	◎	△	◎	△	△	△

注 ◎：優れている ○：普通 △：劣る —：できない
 ※1 ビード端ブローホールを除く ※2 立向下進専用棒の場合 ※3 開先内一層目を除く

付け溶接や現地施工、狭隘箇所の溶接などで適用されている。

2.2 被覆剤の特徴

JIS Z 3211 : 2008 では被覆剤の系統と溶接姿勢から溶接棒は16種類に分類されている。被覆系別の一般的な特徴を表1に示すが、ここでは、代表的な被覆剤について解説したい³⁾。

(1) イルミナイト系

イルミナイト鉱石、砂鉄などを被覆剤の主成分とした溶接棒である。全姿勢溶接が可能で、アーク力はやや強く、溶込みが深い特徴がある。また、スラグは流動性に富みビード表面の波目が細かく仕上がり美麗である。

昭和29年（1954年）では、溶接の約80%にこのイルミナイト系溶接棒が適用されていた。

(2) ライムチタニア系

酸化チタンを約30%以上、塩基性酸化物を約20%含有したスラグシールド型の日本で発達した独特のタイプの溶接棒である。交流、直流の両極で使用でき、イルミナイト系に比べアークはやや弱く、溶込みが浅い特徴がある。全姿勢溶接が可能であるが、中でも立向上進、下向、水平の各姿勢におけるすみ肉溶接などで特に良好な溶接作業性が得られる。また、独特な使用方法として、棒を真っ直ぐの状態で使用できない箇所に対して溶接棒を曲げて使用できる特徴もある。溶着金属の機械的性質は、低水素系の溶接棒について良好である。

表2に示す通り、現在の国内出荷量のNo1は、このライムチタニア系である。

(3) 低水素系

その名の通り、他の被覆系統に比べ溶着金属中の水素含有量が極めて少ないことを特徴とする溶接棒である（表3）。

他の被覆系統では結晶水を有する原料や有機物を多く含有しているのに対して、この系では鉱物原料と炭酸ガス発生原料などを主に使用している。被覆自体の水分量が少なく、さらに被覆から発生する炭酸ガスが溶融プール周辺の水素分圧を低下させ大気からの水素の侵入を抑制している。また、炭酸ガスは大気からの窒素や酸素の侵入も防止する役割がある。なお、炭酸ガスの効果は、後述するサブマージアーク溶接用ポンドフラックスでも

表2 被覆剤別の出荷量（溶接棒工業会統計）

被覆剤	2008年度生産量 (ton)
イルミナイト系	7,681 (26.6%)
ライムチタニア系	12,886 (44.6%)
低水素系	6,402 (22.2%)
その他	1,897 (6.6%)

表3 水素レベルの一例

被覆系統	水素レベル (ml/100g)*1
非低水素系	30~40
低水素系	≤10
極低水素系	≤8
超低水素系	≤4

*1分析方法：カスクロ法（非低水素系はグリセリン法）

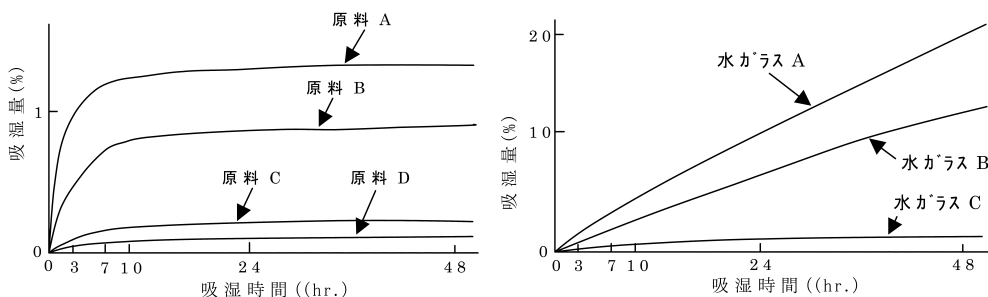


図3 被覆剤原料および水ガラスの吸湿特性の一例 (30℃×80%)

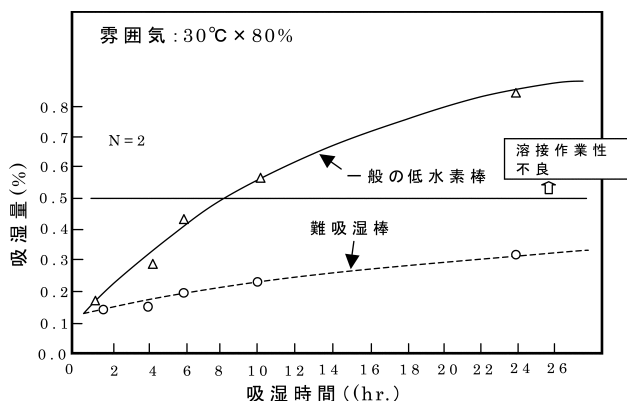


図4 難吸湿棒の吸湿特性

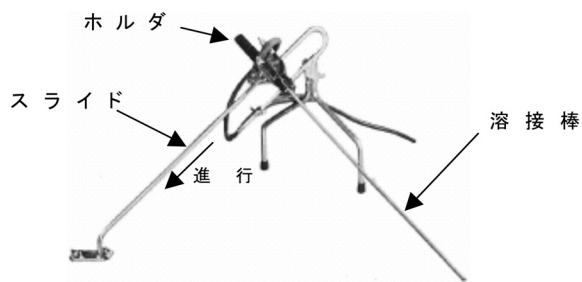


写真1 グラビティー溶接機



写真2 グラビティー適用例

活用されている技術である。

水素を嫌う極厚板の多層溶接や高強度鋼などに広く適用され、割れの防止に役立っている。

(4) 鉄粉酸化鉄系

被覆剤中に鉄粉を含有した酸化鉄系溶接棒で、鉄粉を含有しない酸化鉄系に比べ溶着速度が大きく、ビード外観も美麗である。特に造船業界では、ロンジのすみ肉溶接などで適用され、能率向上の観点から、より太径・長尺の溶接棒がグラビティー溶接機と共に適用されていた。近年は、フラックス入りワイヤに取って代わり、残念ながらグラビティー溶接を目にする機会は少なくなっている。グラビティー溶接機については2.4項で紹介する。

2.3 吸湿特性

被覆剤の単体原料は、粒子が細かく比表面積が大きいため水分は急速に吸着するが、その絶対量は少なく、かつ短時間で平衡状態に達する。また、単体原料同士を結合させるバインダーとして一般的に使用されている水ガラスは、その種類によっても異なるが、長時間に渡って吸湿が進行し、その量も単体原料に比較しても多く、被覆剤の吸湿性に対する影響が大きいことが分かる⁹⁾(図3)。

逆に、吸湿し難い原料とバインダーを組み合わせることで難吸湿の特性が得られ、図4に示す通り、一般の低水素棒では高温多湿雰囲気中で約8時間放置(実労働時間内)が溶接作業性の観点から限界であるのに対し、難吸湿棒は24時間経過してもその領域まで到達しない。

難吸湿特性を有する棒は、溶接作業性の観点からは長時間放置しても問題ないが、被覆剤の吸湿に伴い溶接金属中の水素量は確実に増加するため、乾燥不要ということではないので注意が必要である。

吸湿はいかなる被覆系統でも大なり小なり進むので、

使用前の乾燥が重要である。また、各被覆系統で適切な温度範囲があるため、誤った乾燥では溶接作業性を劣化させたり、被覆剤の水分を十分除去できなかつたりするので、乾燥条件の管理も重要である。

2.4 溶接施工法

被覆アーク溶接棒における特徴的な溶接施工法であるグラビティー溶接法と裏波溶接法について以下に説明する。

(1) グラビティー溶接法

グラビティー(Gravity:重力式)溶接法は、造船所が開発実用化し1960年代後半には国内造船所において広く適用され生産性向上に大きく貢献した溶接方法である。

グラビティー溶接機の外観を写真1に示す。溶接棒が消耗するにしたがってスライドバーに取り付けられたホルダーが自重で滑降し、一定の速度で溶接が進行する。溶接棒長がある限度(50mm程度)以下になると、ホルダーがスライドバーに沿って回転し、溶接棒の先端が溶接線から離れ自動的にアークが切断される。

アークスタート後は自動的に溶接が完了できることから、写真2の様に1台が溶接中に他の1台以上を設置して溶接でき、複数台による溶接が進行する。聞くとところによれば、1人で最大8台のグラビティー溶接機が運用

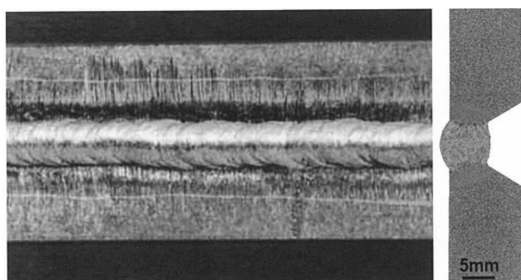


写真3 SMAWによる裏波溶接ビード外観および断面マクロ組織の一例

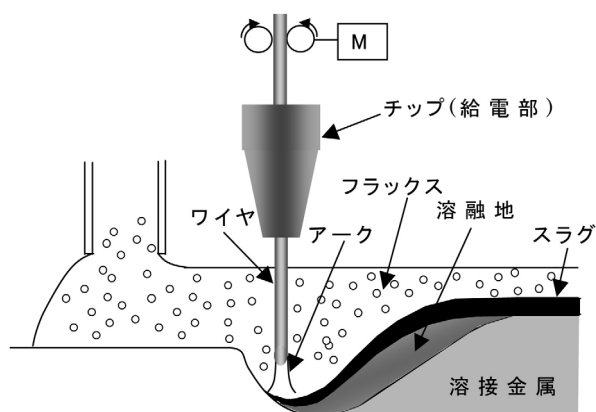


図5 サブマージアーク溶接の原理

されていたようである。

溶接材料は、高溶着性が求められるため、多量に鉄粉を含有した、太径・長尺のすみ肉棒が適用されている。

耐気孔性に優れている溶接棒の特徴と、グラビティー溶接機のような壊れ難い機器で、かつ溶接品質が安定していることなどから、現在も根強い人気がある。

難点は、溶接継部で必ずと言ってよい程形状修正の手直しが必要となることである。

(2) 裏波溶接

突合せ溶接は、両側あるいは片側から溶接する2通りの場合があり、片側から溶接する場合は、①金属裏当て金を用いる②セラミックス製の裏当て材や銅裏当てなどを用いる③裏当てを用いないの内いづれかの方法を採用することになる。国内における裏当てを用いない片面溶接では、ティグ溶接（以下、GTAW）による裏波溶接が小径パイプなどの円周溶接などで一般的に適用されている。一方、海外ではラインパイプの円周溶接や海洋構造物の格点部などで専用の被覆アーク溶接棒による裏波溶接が適用されている。裏波溶接棒は、スラグの流動性を調整した組成となっており、適度なスラグが均等に裏波の溶接ビード表面を被包するため、美しい裏波が得られる特徴がある（写真3）。なお、この裏波溶接では、一般の溶接に比べ、高い溶接技量が求められる。

3. サブマージアーク溶接 (Submerged Arc Welding)

3.1 原理と特徴⁵⁾

サブマージアーク溶接は、あらかじめ散布された粉

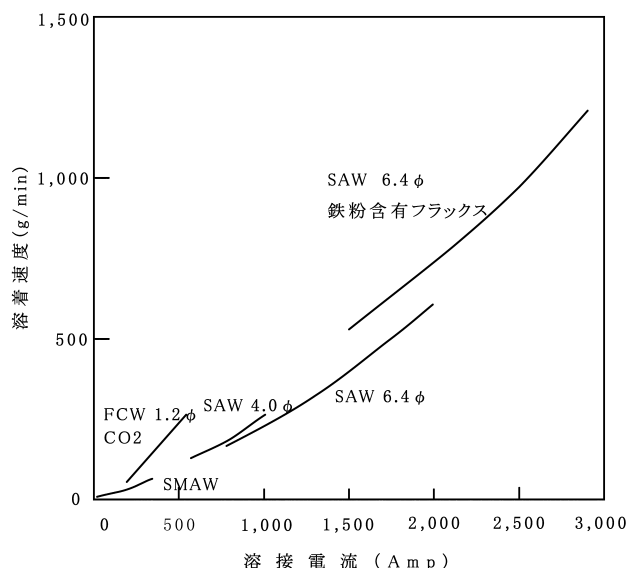


図6 各種溶接法の溶着速度の一例

粒状フラックスの中に、電極ワイヤを自動供給し、ワイヤ先端と母材との間に連続的にアークを点じ、母材、ワイヤ、フラックスを溶融して接合する方法である（図5）。

フラックス中でアークを発生させるため潜弧溶接とも言われる。

SAWの長所は、

- ① 高電流・多電極化による高溶着・高速化が可能
- ② 有害光線、ヒューム、スパッタがほとんど出ない
- ③ 溶込みが深く開先断面積を小さくすることが可能
- ④ 窒素、酸素や風などの影響を受けない
- ⑤ 溶接条件（電流・電圧・速度）が一定となるため再現性の高い高品質の継手が得られ易い

などが挙げられるが、最大の利点は高溶着性が得られることにある。図6にSMAW、フラックス入りワイヤとの比較で溶着速度の一例を示しているが、太径ワイヤと高電流の組合せで高溶着性が得られ、多量の鉄粉を含有したフラックスとの組合せで、さらに1.2倍～1.3倍能率を向上させることができる。

一方の短所は、

- ① アークが見えないため、溶接が完了するまで結果が分かり難い
- ② 開先精度の影響を受け易い
- ③ 他の施工法に比べ装置が大型であり、セッティングに時間を要する
- ④ 溶接姿勢が下向、横方向に限定される。
- ⑤ スラグ発生量が多い

などである。

3.2 フラックスの種類と特徴⁶⁾

フラックスは製造方法の違いから、①原料を溶解・粉碎したガラス状の溶融フラックス ②原料を粘結剤で造粒し400℃～600℃で焼成したボンドフラックス ③原料を粘結剤で造粒し700℃～1000℃で焼成した焼結フラックスの3種類に大別される。さらに溶融フラックスは、原料溶解後の処理の仕方で3種類に分類される（図

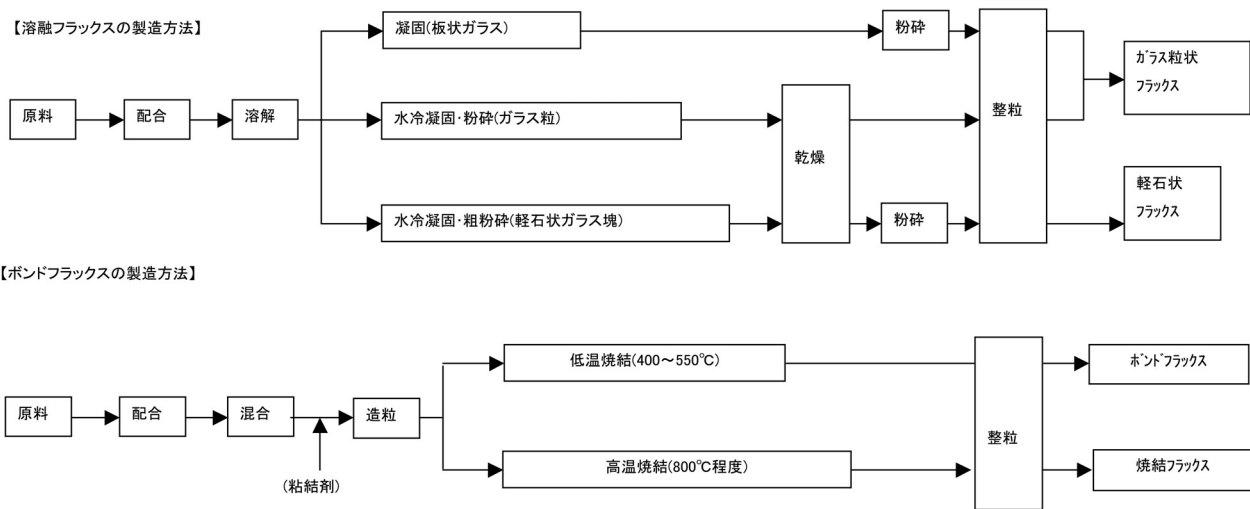


図7 フラックスの製造方法

表4 各種フラックスの特徴

種類	焼成温度	塩基度	ガス発生剤	鉄粉添加	拡散性水素量	耐吸湿性	フラックス消費量	適用入熱
熔融フラックス	≥ 1500℃	酸性 ～ 中性	無	不可	○	◎	多	小～中
焼結フラックス	700 ～ 900℃	酸性 ～ 塩基性	無	不可	△	○	少	小～中
ボンドフラックス	400 ～ 600℃	塩基性	添加	可	◎	△	少	中～大

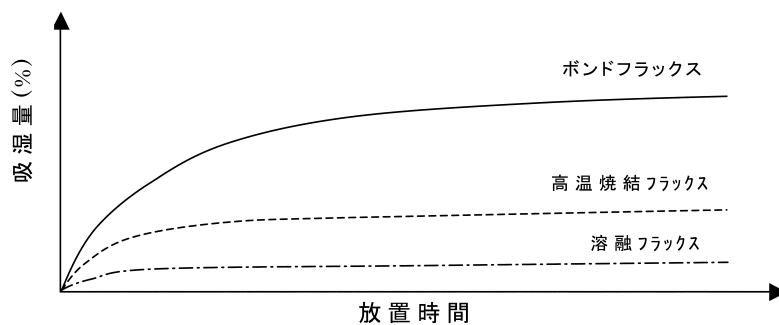


図8 各種フラックスの放置時間と吸湿量の関係

7).

それぞれのフラックスの特徴を表4に示す。

- (1) 熔融フラックスは、原料を完全に熔融させるため、合金成分やガス発生剤などは添加できず、また、組成も容易に熔融可能で、かつガラス化できる成分に限定される。フラックスの水分量が少ないため溶接金属の拡散性水素量は比較的 low、さらに耐吸湿特性は他のフラックスに比べ最良である。一般的な使用用途は、小～中電流域で極厚板の多層溶接や薄板の高速溶接、パイプの円周溶接などである。
- (2) 焼結フラックスは、原料をバインダーで造粒した後

に700℃～1000℃の高温で焼成するため合金成分やガス発生剤が添加できず、適用条件も小～中電流域で熔融フラックスの特徴と共通点が多い。国内ではあまり適用されていないが、欧米などでは一般的なタイプである。

- (3) ボンドフラックスは、400℃～600℃の低温で焼成するため他のフラックスでは添加できない合金成分や鉄粉、ガス発生剤などを含有させることができる。また、耐吸湿性は劣る(図8)が、溶接金属の拡散性水素量は最も低く抑えることができ、軟鋼・490 MPa 鋼のみならず、950 MPa 級高張力鋼や低温

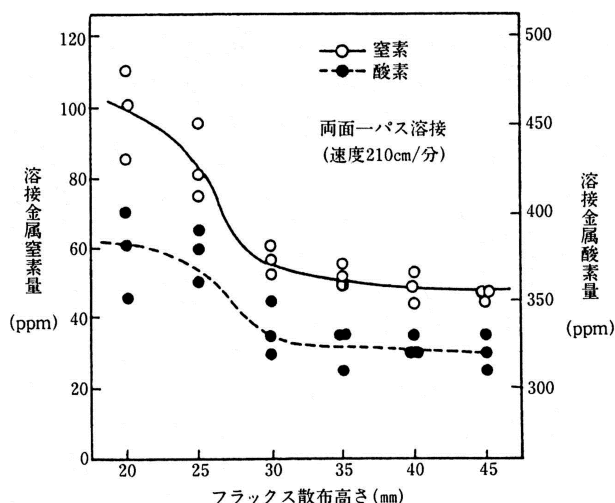


図9 溶接金属酸素・窒素量におよぼすフラックス散布高さの影響

用鋼、耐熱鋼などの溶接に幅広く適用されている。

適用条件範囲は中～大電流域であり、大入熱施工法などの日本独自の施工法などに広く適用されている。

3.3 フラックス散布高さの影響⁷⁾

フラックス内でアークを発生させるので、フラックスそのものが熔融金属を大気中の窒素や酸素からシールドする役割をもつ。そのため散布高さがシールド効果に影響をおよぼす。図9には、フラックス散布高さと溶接金属中の酸素量、窒素量の関係を示すが、極端に散布高さが低い場合は、適正散布時に比べ2倍近い酸素・窒素量となり、溶接金属の機械的性質も劣化する。一方、散布高さが過大では、フラックスの重さでビード形状が不良となったり、溶接中に発生したガスが抜け難くポックマークなどのガス欠陥につながる場合がある。

良好な溶接金属性能と欠陥の無い安定したビード形状を確保するためには散布高さも重要な因子となる。

3.4 低水素化技術⁸⁾

溶接金属の水素源は、フラックスの水分と大気中の水分が主である。図10に示す通り、フラックスポテンシャル水素量の増加に伴い溶接金属の拡散性水素量も比例して増加する。つまりフラックスの水分量を低く抑える事が低水素化に効果があり、使用前の乾燥は被覆アーク溶接棒と同様に重要である。

また、熔融フラックスや焼結フラックスはフラックスの水分量の更なる低減は困難であり、溶接金属の水素レベルの低減には限界があるとも言える。

ボンドフラックスは、短時間で吸湿しやすいため、上述のフラックスポテンシャル水素量は高くなりやすい難点があるが、これを解消するのがガス発生剤である。ガス発生剤は、アーク熱で分解して炭酸ガスを発生し、大気から熔融金属をシールドする役割を果たすと同時に、熔融プール上の水素分圧を低下させ溶接金属への水素の侵入を抑制する効果がある。

図11に示すとおり、ボンドフラックス中のCO₂量の増加に伴い溶接金属中の拡散性水素量が低下することがわかる。

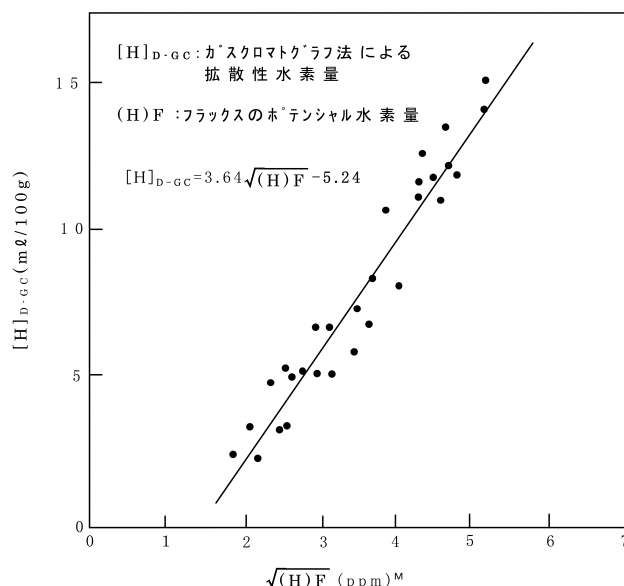


図10 熔融フラックスのポテンシャル水素量と拡散性水素量

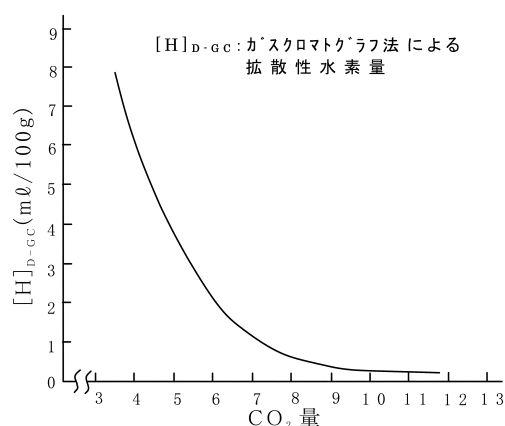


図11 ボンドフラックス中のCO₂量と拡散性水素量

また、鉄粉を含有しないボンドフラックスでは、比較的焼成温度を高く設定できるため、フラックス水分量が低く、高強度鋼でも適用できる極低水素化が達成できる。

繰り返しとなるが、ボンドフラックスは吸湿し易いという難点があるため、使用前の乾燥や保管が重要となる。管理を怠れば遅れ割れなど致命的な欠陥の原因になる。

3.5 溶接施工法

サブマージアーク溶接法の最大の特徴である高溶着性を活用し、各業界で高能率化に大きく貢献している片面溶接、大入熱溶接、横向溶接について以下に紹介する。

(1) 片面サブマージアーク溶接法

片面サブマージアーク溶接法は造船業界で育てられ、造船業界発展の原動力になった施工法のひとつとして挙げられる。

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行なわれており、大型パネルの反転作業が必要であった。船体構造の大型化にともない建屋の高さやクレーン能力などの制限から片側からの一層溶接の開発ニーズが増加していた。このニ-

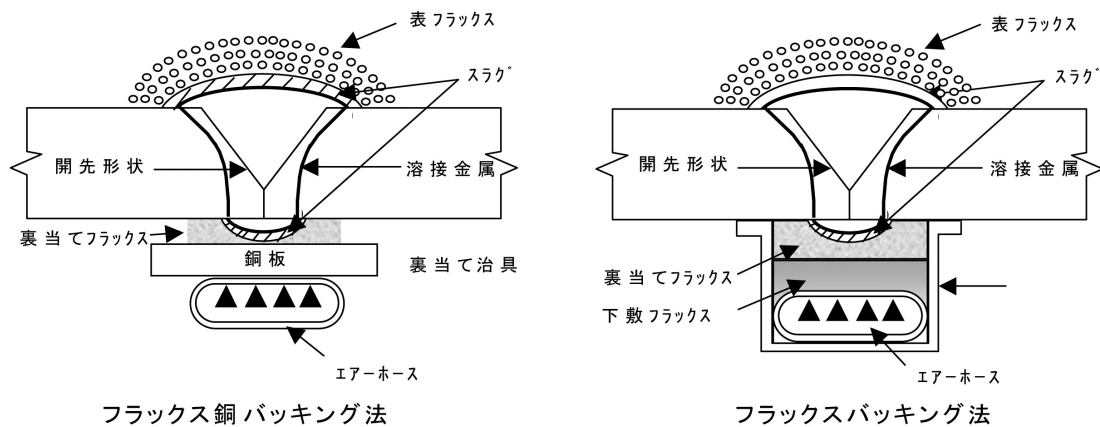


図 12 片面 SAW施工法の概略図



写真4 横向 SAWの断面マクロ組織の一例

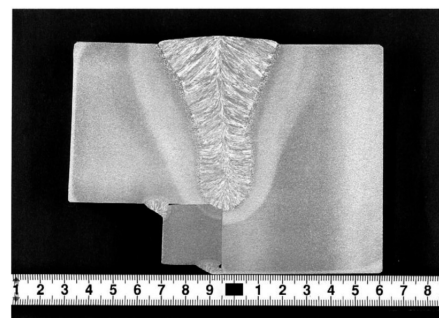


写真5 BOX 角溶接の断面マクロ組織例(板厚 60mm)

ズに対応し1964年開発され、翌1965年に実用化されたのがフラックス銅バックング法やフラックスバックング法である⁹⁾(図12)。

フラックス銅バックング法は、銅板上に裏ビードを安定形成させる裏当てフラックスを均一な厚みで散布し、銅板裏面からエア圧力で裏当てフラックスを銅板裏面と密着させて片側から一層で溶接を完了する施工方法である。

銅板が裏ビードの形状を整えるため、大電流の溶接すなわち厚板での品質が安定し易い特長がある。1990年代には、4電極による高速溶接が実用化され、さらなる高能率化を実現している¹⁰⁾。

フラックスバックング法は、下敷きフラックスの上に裏当てフラックスを均一な厚みで散布する点がフラックス銅バックングと異なり、またフラックスのみでバックングするため定電圧特性の直流電源が適用される。本法は、板厚違いや差厚鋼板などの鋼板裏面に段差がある継手や溶接歪が大きい薄板で密着性を確保し易い特徴がある。

両施工方法は、ボンドフラックスとの組合せで軟鋼・490 MPa 級高張力鋼に加え、低温用鋼の溶接にも適用されており、船舶建造の中心的な役割を現在も果たしている。

(2) BOX 柱角継手一層溶接法

建築構造物の高層化や大空間構造の採用に伴いボックス柱の肉厚は増大し、高能率な施工法として太径ワイヤを用いた多電極サブマージアーク溶接法が採用されている。

ボックス柱角継手の施工例では、2電極を用いた板厚60mmの1層1パス溶接で溶接入熱が約50kJ/mmと他の施工法に比較して超大入熱施工法となる。なお、溶接入熱が極めて高いため、大入熱溶接性に優れた鋼材が必須である。

近年は、SA440やYP385などの高強度鋼や溶接継手の高靱化(0°C≧70J)に対応した溶接材料が開発され実用化されている。

(3) 横向溶接法

主に円筒タンクの溶接に適用されている。

吊り下げ式の専用装置が用いられ、回転ベルトでフラックスを受け横向姿勢で多層溶接が行なわれる。

溶接は現地施工となるため一般的には耐吸湿特性が良好な熔融フラックスが適用されるが、高じん性あるいは耐欠陥性が要求されるタンクではボンドフラックスが使用されている。

なお、ワイヤ狙い位置によってビード形状が変化するので1.6mmφ~3.2mmφの細径ワイヤが用いられる。

4. おわりに

実施工に適用する溶接の施工法や材料は、要求される継手性能や鋼種、溶接長などを勘案し選択することが重要である。また、施工法や溶接材料の特性を把握することが、健全な溶接部を確保すると共に更なる高能率化の達成に必要と考える。

本稿では、各溶接法の主要な特徴について概説した。紙数の都合で欠陥等については多くを述べていないが、

施工法や溶接材料の選定あるいは施工管理とその考え方の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 荒田, 西口: 溶接法の基礎, 産報出版 (1979) 9-10.
- 2) 藍田: サブマージアーク溶接の基礎と応用 I, 溶接技術 (1996年 6月号) 136-137.
- 3) 神戸製鋼: 溶接棒各論 167-186.
- 4) 社団法人 日本溶接協会 溶接棒部会技術委員会: 溶接の研究 No.15 (1975) 12-14.
- 5) 溶接学会編: 新版 溶接・接合技術特論 (2007) 50-52.
- 6) 藍田: サブマージアーク溶接の基礎と応用 II, 溶接技術 (1996年 7月号) 139.
- 7) K. AKAO et al.: Trans, ISIJ, vol26 (1986) 382.
- 8) 神戸製鋼: 溶接だより, 技術ガイド (1994).
- 9) 神戸製鋼: 神戸製鋼技報, vol50, NO.3 70.
- 10) 宮崎ほか: 日立造船技報, 第54巻, 第1号 (1993).

