

(解説)

銅めっきなし溶接用ソリッドワイヤ

清水弘之

*溶接カンパニー 技術開発部

Non-copper-coated Solid Wire for MAG Welding

Hiroyuki Shimizu

The surface property of non-copper-coated solid wire is discussed in this paper. Specially surface treated non-copper-coated solid wire has been proven superior in terms of corrosion resistance, wire feed, current supply, and arc discharge stability to conventional copper coated solid wire. Non-copper-coated solid wire has great potential to be the new welding material of the 21st century.

まえがき = 日本国内における溶接材料の 1999 年総出荷量は 32.6 万 t であり、そのうちソリッドワイヤは 13.9 万 t (輸入材を含む) を占める主要な溶接材料である。国内溶接材料の約 4 割強がソリッドワイヤであり、特殊用途を除きこのソリッドワイヤのほとんどすべてに銅めっきが施されている。

ソリッドワイヤ表面に銅めっきが施されているのは以下の四つの理由によると考えられる¹⁾。

- 製造工程における伸線性の向上
- 最終製品の耐錆性向上
- 溶接時ワイヤ表面滑り性 (送給性) の向上
- 溶接時給電安定性の向上

銅めっきはワイヤ表面に電気化学的または化学的に施されるために、銅めっき工程は廃液の処理など環境負荷の大きな工程である。めっき工程前には必ず酸洗工程が必要であり、さらに密着性に優れる電気めっきは電解反応に多量の電力を消費する。また酸洗工程の酸は長年にわたり設備自身も腐食し、定期的に多量の保全資材が消費される。いっぽう、ワイヤ表面の銅めっきは溶接後の溶接金属中で何ら有効に機能せず、逆に過度に混入すると凝固割れなどの一因にもなる。銅めっき工程は溶接材料の生産工程でぜひとも省略したい工程である。

そこで、ワイヤ表面に着目し、銅めっきをワイヤ表面に施さず、廃液処理などの環境負荷を最小にし、銅めっきワイヤ以上の性能を有する銅めっきなしのソリッドワイヤを新たに開発した。このワイヤ表面には専用の表面処理がなされているが、表面処理剤などの詳細は製造ノウハウにかかわるために本文中での記述から割愛する。以下に表面処理の結果発現する耐錆性、給電性、送給性、およびアーク安定性に関して報告する。

1. 銅めっきされたソリッドワイヤ表面

ソリッドワイヤ表面に銅めっきを施す場合、最終製品径 (たとえば 1.2mm) に近い径でめっきしたほうがめっきの均一性が高く、ソリッドワイヤの品質は高くなる。これは、めっき後の加工率の増加によってめっき均一性が低下するからである。他方、原線に近い径でめっきしたほうがソリッドワイヤの生産性は高くなる。電気めっきを例にとると、前処理の酸洗、めっき処理、および後

処理の洗浄工程ともにワイヤの単位重量あたりの表面積が増加する、すなわちワイヤ径が細くなるほど処理時間が増加する。これはワイヤ単重あたりの銅めっき量が同じであれば、ワイヤ径が細いほど表面積は増加し、めっき処理に時間を要するからである。

ソリッドワイヤに銅めっきする場合、この品質と生産性のバランスに伸線技術を加味して銅めっきされるワイヤ径が決定される。JIS YGW11 相当 (CO₂ シールド高電流用) の銅めっきされたソリッドワイヤ (1.2mm) の表面を光学顕微鏡で観察した一例を写真 1 に示す。

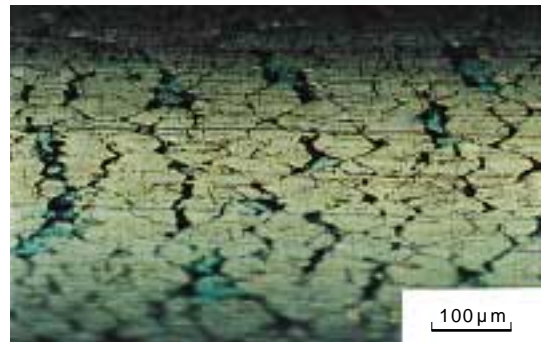


写真 1 銅めっきされたソリッドワイヤ (1.2mm) 表面の光学顕微鏡写真

Photo 1 Optical micrograph of conventional Cu-coated solid wire (1.2mm)

めっきされたときのワイヤ径は 2.4mm 程度であるが、数 10 ~ 100 μm 間隔で明確な鉄地の露出またはめっき層の裂け目が観察される。ワイヤの化学組成、焼鈍 - 酸洗条件、めっき密着性およびめっきされてからの加工率によってワイヤのめっき表面形態は大きく影響を受けるが、外観上マクロ的に均一に見える銅めっきされたソリッドワイヤ表面もミクロ的に観察すると程度の差はあれ、必ず鉄地の露出、めっき層の裂け目、またはめっき厚さの不均一が観察される。これらめっきの均一さが防錆性、送給性または給電安定性に影響を及ぼす。

2. 銅めっきなしソリッドワイヤの特徴

2.1 伸線性

はじめに述べたようにワイヤ表面の銅めっき有無によって、ワイヤの伸線性は大きく異なることが経験的に知られている。この理由は、鉄表面にめっきされた銅は適

度な凹凸を有するために潤滑剤を効果的に保持すること、さらに銅は面心立方の結晶構造を有し、塑性変形の滑り系が多く、展延性に優れるからである。しかしながら最近の冷間伸線技術の進歩はいちじるしく、従来工業的に安定して伸線することが困難であった銅めっきなしのワイヤを、潤滑剤と伸線方式を適正に選択することで、高速に伸線することが可能になった。具体的には無機物が積極的に添加され、軟化温度が高い伸線潤滑剤をもちいた。

2.2 耐錆性

JIS Z2371 の塩水噴霧試験法を参考にして JIS YGW11 相当の化学成分を有する銅めっきされた従来ソリッドワイヤと銅めっきなしソリッドワイヤの耐錆性を比較した。0.01 規定の塩化ナトリウム水溶液をワイヤに均一に噴霧した後、温度 30℃、相対湿度 80% の恒温恒湿槽に静置後、ワイヤ表面を光学顕微鏡で撮影し、発錆状態が相対比較された。写真 2 に放置 2 時間後のワイヤ外観を示す。銅めっきなしソリッドワイヤに変色は認められないが、めっきワイヤには発錆による変色が観察される。変色部を詳細に観察すると、錆は鉄地の露出部またはめっき層の裂け目から発生している。

めっきワイヤに比較して銅めっきなしソリッドワイヤの耐錆性が良好な理由は第 1 図に示す機構によるものと考えられる。めっきワイヤ表面には鉄よりも電気化学的に貴な銅が存在し、鉄と銅との境界で局部電池が形成される。銅に隣接した鉄はアノード分極され、鉄イオンとして溶出し水酸化鉄となり錆を発生する。いっぽう、銅めっきなしソリッドワイヤ表面の電気化学的特性は均一であり、さらに専用の防錆処理を施しているために発錆しにくい。塩水噴霧法以外にも長期間の放置暴露試験が実施されたが、銅めっきなしソリッドワイヤの耐錆性はきわめて良好であった。

2.3 送給性および給電性

溶接用ワイヤは写真 3 に示すような 3~10m 程度の長さのコンジットケーブル (feeder cable) を通過して溶接点まで送られる。多くの場合ワイヤを送り出すローラはこのコンジットケーブルの根元に取付けられており、ローラはモータで駆動される。コンジットケーブルの先端には写真 4 に示すような銅製チップが取付けられ、溶接電流がこのチップからワイヤに供給される。1.2mm のワイヤでは平均 300A もの電流がチップ内の長さわずか 20mm 程度の摺動穴を通過する間にワイヤに流れ込む。ワイヤの速度は 12m/min 程度であるので給電チップ摺動穴通過時間は 0.1s 程度である。

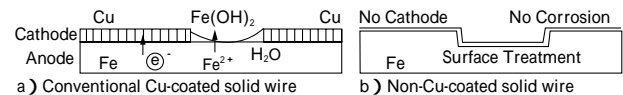
ワイヤの送給安定性は主として給電チップでの給電安定性によって決定されることを次に説明する。第 2 図はワイヤと給電チップの接触状態を模式的に示している。ワイヤは包装形態にもよるが一般に固有の曲率を有し、給電チップの摺動穴径はワイヤ直径よりも 100μm 程度大きく作られている。したがってワイヤ表面は給電チップ摺動穴と 20mm 全長にわたって全面で接触しているのではなく、基本的に 3 点のみで接触しているにすぎない。給電チップの材質は銅合金であり、ソリッドワ



(a) Conventional Cu-coated solid wire (b) Non-Cu-coated solid wire

写真 2 塩水噴霧試験後のワイヤ表面光学顕微鏡写真 (0.01N NaCl 水溶液, 30℃, RH80%, 2 時間後)

Photo 2 Optical micrograph of Wire surface after corrosion test (0.01 N NaCl solution, 30℃, RH 80%, 2 h)



第 1 図 発錆、防錆機構の比較

Fig. 1 Corrosion mechanism with Cu on wire surface



写真 3 半自動溶接用送給装置の外観

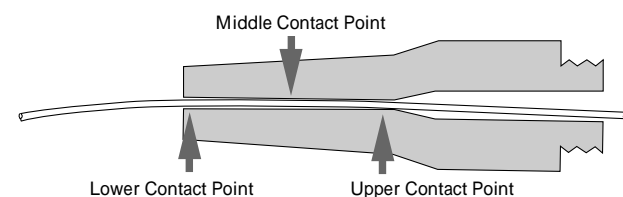
Photo 3 Semiautomatic welding power source and feeding component



写真 4 銅合金製給電チップ

(写真 3 の(3) 溶接トーチ先端に固定して使用)

Photo 4 Cu alloy contact tip that is attached to welding torch in Photo 3



第 2 図 ワイヤと給電チップ内摺動穴の接触状態

Fig. 2 Schematic illustration of contact points between wire and tip

イヤは軟鋼であるので室温におけるバルクの比抵抗値は約 6 倍程度ソリッドワイヤのほうが大きい。さらに電流の流れる断面積を考慮すると給電チップに比較してソリッドワイヤは 150 倍電気抵抗が大きい。ソリッドワイヤと給電チップの接点はマクロ的には 3 点存在するが、電気抵抗も考慮すると半分以上の電流の授受がおこなわれるのは、給電チップの先端の接点からとなり、中央および奥の接点からワイヤに流入する電流は 50% 未満である。



a) Conventional Cu-coated solid wire welded b) Non-Cu-coated solid wire welded

写真5 給電チップ先端の光学顕微鏡写真(300A, 30分溶接後)
Photo 5 Optical micrograph of contact tip inner surface after welded
(Welding current : 300A, Welding time : 30min)

写真5に300Aで30分間溶接に使用した給電チップを縦半分に割って、先端の給電部を光学顕微鏡で観察した結果を示す。a)は銅めっきされたソリッドワイヤの溶接にもちいたもの、b)は銅めっきなしソリッドワイヤの溶接にもちいたものである。両者に給電による明確な溶融痕が認められる。また溶融-凝固後に引きちぎられた痕跡も認められる。これらの観察から、

- 1) 給電チップの摺動接点では溶融状態で電流の授受がおこなわれている
- 2) 溶接電流の授受によって、給電チップとワイヤが融着し送給抵抗が発生すると考えられる。

第3図に示すような溶接時のワイヤと給電チップの融着力(Tr)と溶接時の全送給抵抗(Fr)を独立に測定できる装置をもちい、JIS YGW11相当の化学成分を有する銅めっきされたソリッドワイヤと銅めっきなしソリッドワイヤ(1.2mm)の溶接時の融着力(Tr)と全送給抵抗(Fr)を測定した。

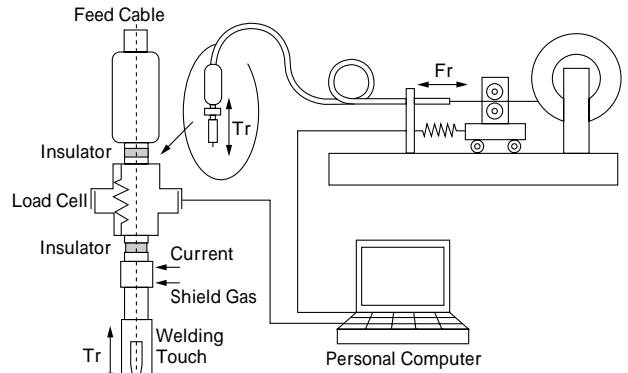
第4図に300A, 37V, ビードオンプレート溶接時の測定結果を示す。a)銅めっきされたソリッドワイヤと比較してb)銅めっきなしソリッドワイヤの送給抵抗は明らかに低く、とくに融着力(Tr)に顕著な差が見られた。

第5図に第4図a)の時間17.5秒近辺を拡大したものを示す。送給抵抗(Fr)は必ず Tr が発端となり増加している。銅めっきなしソリッドワイヤは Tr が小さいために溶接時のトーチ振動は小さくなる。また Tr が小さいために、銅めっきなしソリッドワイヤの給電チップ摩耗は実用上問題ないレベルまで低減されている。

3. アーク安定性の比較

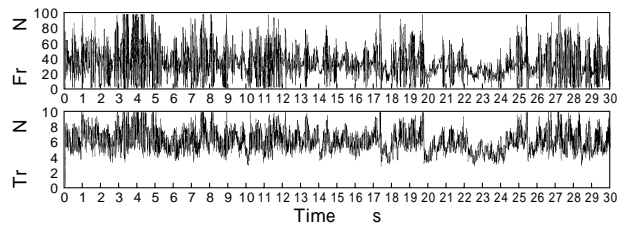
先にも述べたように給電チップからワイヤに電流が入る摺動接点は幾何学的には3カ所であり、電流の流れる経路の抵抗を考慮すると、電流の50%以上が先端からであり、残りが中央と奥からである。この溶接電流の分流状態を実測した。第6図に示すような特殊な給電チップを試作し、各摺動接点からそれぞれワイヤに流れ込む電流値の時間変動を測定した。溶接電源としては抵抗値が変化しても常時一定の電流を供給する特性を有する定電流電源を使用し、各給電チップに流れる電流を個別の電流計で計測した。実験に使用したワイヤはJIS YGW11相当の1.2mmワイヤであり、溶接電流は300A, 給電チップ-母材間距離は30mmである。

第7図にa)銅めっきされたソリッドワイヤとb)銅

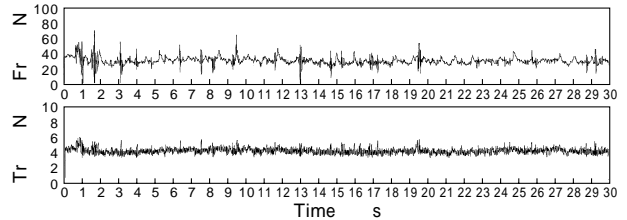


第3図 給電チップの融着力(Tr), 全送給抵抗(Fr)測定装置の構成

Fig. 3 Measurement system of tip resistance(Tr)and total feeding resistance (Fr)

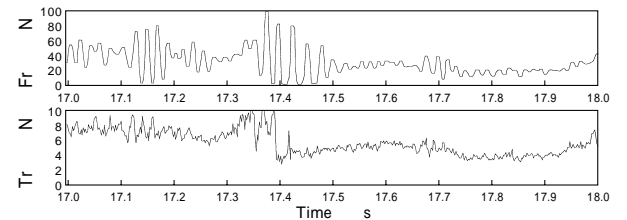


a) Conventional Cu-coated Solid Wire



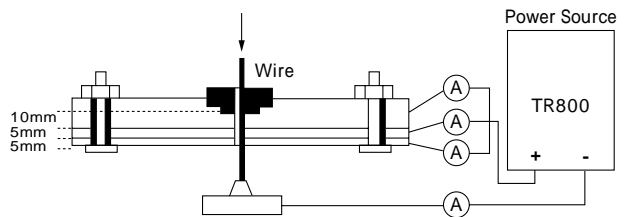
b) Non-Cu-coated Solid Wire

第4図 融着力(Tr), 全送給抵抗(Fr)の測定例(300A, 37V)
Fig. 4 Tip resistance (Tr), and total feeding resistance (Fr)
(Welding condition : 300A, 37V)



第5図 融着力(Tr)と全送給抵抗(Fr)の相互作用による振動現象

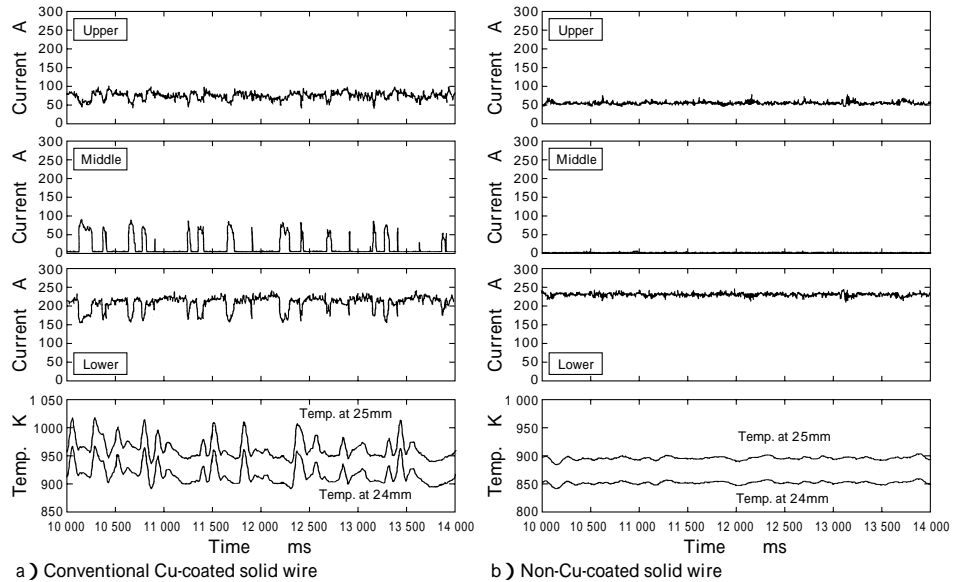
Fig. 5 Oscillation between tip resistance (Tr) and total feeding resistance (Fr)



第6図 分流状態測定用3層給電試験装置の構成

Fig. 6 Measurement system of welding current branch flow

めっきなしソリッドワイヤの測定例を示す。銅めっきされたソリッドワイヤはめっきの品質(厚さ, 鉄地露出など)によって分流状態のばらつきが大きいことが明らかになった。めっきの均一性が高いソリッドワイヤは第7図b)に示す銅めっきなしソリッドワイヤと同程度の分



第7図 溶接時の給電チップにおける分流状態実測例

定電流電源、溶接電流：300A
Fig. 7 Current branch flow at contact tip

Constant current power supply, welding current: 300A

a) Conventional Cu-coated solid wire

b) Non-Cu-coated solid wire

流安定性を示すものもあったが、多くは第7図a)のように先端(Lower)中央(Middle)および奥(Upper)の摺動接点の間で電流値が大きく変動した。

一般に知られているように、突き出し部分での温度分布は次の一次元熱伝導方程式で表現できる²⁾。温度分布を計算する座標系は第8図である。

$$T / t + V_w T / x = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + J^2 R(T) / c \quad \dots (1)$$

ここで $T(x, t)$: ワイヤの突き出し部位置 x での温度 (K), V_w : ワイヤ送給速度 (m/s), ρ : 密度 (kg/m^3), k : ワイヤの熱拡散率 (m^2/s) $k = \rho c \lambda$, λ : 熱伝導率 (W/mK), c : 比熱 (J/kgK), J : ワイヤ突き出し部分の電流密度 (A/m^2), $R(T)$: 温度 T における抵抗率 (m) である。この式は

ワイヤ供給速度が一定

給電点はチップ先端

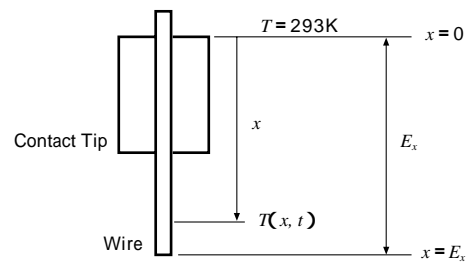
ワイヤ先端は鉄の融点

突き出し部の温度分布はワイヤ先端からの熱伝導とワイヤのジュール発熱によって決定される

という仮定のもとに成り立っている。しかしながら実際は摺動接点での電流値が変化するために実質的な突き出し長さが時間的に変化する

チップとワイヤの融着によってワイヤ送給速度 V_w が時間的に変化する

ことになる。一例としてワイヤの速度変動がないと仮定し、第7図のように電流が変動し、実質的な突き出し長さが変化した場合の溶滴直上での温度変化を計算した例を第7図最下段に並記した。給電チップ先端から24mmおよび25mmの温度が表示されている。この計算では溶滴を熱源とするワイヤ中の熱伝導よりもワイヤの送給速度が十分に大きいとして式(1)右辺の第1項は無視している。またアークからの輻射熱も無視し、ジュール発熱のみを熱源としている。銅めっきされたワイヤは給電チップ先端から25mmでジュール発熱のみによって平均960Kまでワイヤ温度は上昇し、分流状態の変動によって温度が約50K急変している。実際には給電チッ



第8図 ワイヤの温度分布を計算する座標系

Fig. 8 Coordinate system for calculation of temperature distribution at wire

プとワイヤの融着によって、銅めっきされたソリッドワイヤの場合、ワイヤに速度変動が生じ、さらに温度変化は大きくなると予測される。この温度変動は実際にはアーク長の変動となって溶接者に観察される。いっぽう銅めっきなしソリッドワイヤは分流状態が安定しているために温度変化は非常に小さい。

銅めっきなしソリッドワイヤは均質な鋼地肌に特殊な表面処理剤をきわめて均一に塗布しているために、給電安定性および送給安定性が銅めっきありソリッドワイヤに比較して格段に優れている。銅めっきなしソリッドワイヤをもちいるとアーク長変動およびトーチ振動が非常に少ないスムーズな溶接がおこなえるのである。

むすび = 銅めっきなしソリッドワイヤは給電安定性、送給安定性に優れ、その結果アーク長が安定し、スムーズに溶接作業がおこなえる。めっき工程を除くことによって、廃液処理をなくし地球環境に優しいと同時に、溶接作業にも優しい21世紀型ワイヤであるといえる。

参考文献

- 1) Welding in the World. Vol.25, No3/4, (1987) p.60.
- 2) 溶接アーク物理研究委員会：溶接プロセスの物理, p.94, 溶接学会, 黒木出版.