

(論文)

溶接用ワイヤの摺動接点と送給性

Sliding Contacts and Welding Wire Feedability

清水弘之*
Hiroyuki Shimizu横田泰之*
Yasuyuki Yokota

Welding wire feed can be controlled by the sliding contacts between the copper tip and wire surface. For stable arc discharge, it is very important to balance the wire feed speed with the constant speed derived from the average welding current. In this study, the copper tip temperature, voltage drop, and contact resistance of the sliding contact were measured during actual welding. The sliding contact of non-Cu-coated solid wire has a liquid state that is independent of the welding current. Solidification discontinuity at the sliding contacts causes welding wire feeding resistance. One of the most important factors for sliding contact stabilization is the contact force between copper tip and wire. A contact force of more than 1 N is suitable for stabilizing sliding contacts for welding.

まえがき = 安定した溶接を行うためには、溶接用ワイヤの送給速度は変動してはならない。ワイヤの送給速度が変動する^{1)~4)}とワイヤの溶融速度も変動し、安定したアーク放電が維持できない。ワイヤは数mから数十mの長さの細管を通り搬送され、溶接点の10~40mm直上で給電電極から電流の供給を受ける。給電電極からワイヤに、アーク放電が維持できるだけの電流(数十~数百A)が摺動接点を介して供給されると、摺動接点は高温になると予測される。

本研究では、給電安定性に優れる銅めっきなしソリッドワイヤ(軟鋼, HT490N/mm²級鋼用)を一例として取上げ、送給抵抗の発生原理に関して考察を行う。安定した溶接を行うために、給電電極とワイヤが適正な力で接触することの重要性を示す。

1. 実験方法

1.1 供試材料

使用したワイヤはJIS YGW12相当のソリッドワイヤであり、表面に銅めっきを有していない。化学成分の分析例を表1に示す。実験に使用したワイヤの直径は1.19mmであり、ワイヤには防錆を目的として室温において十分な流動性がある油脂0.2g/m²を均一に塗布している。給電電極通過後のワイヤの曲率は、内接する円の最大直径をもってワイヤフリーループ直径と定義する。すなわち、フリーループ直径の大きいワイヤは直線に近いことを示す。ワイヤのフリーループ直径は、矯正ローラを用いて550~5000mmまでの範囲で調整を行う。

給電電極は市販されている0.8%Cr銅製であり、必要に応じて加工して使用する。

1.2 接触力の計算

溶接における摺動接点現象を考察するに際して重要な因子の一つが、給電電極とワイヤの接触力である。電極の摺動溝(市販の給電電極の場合、例えば長さ43mm、直径1.35mmの穴)を通過するために、ワイヤは弾性変形する。このワイヤの弾性力によってのみ給電電極とワイヤは接触する。摺動溝とソリッドワイヤの接触状態をX線で透過し可視化した例を図1に示す。この例で、ワイヤは給電電極摺動溝の先端と後端の2点で接触していることが確認できる。

そこで、近似的にワイヤを直径1.19mmの丸棒支持梁として考え、この接触力を支持梁の弾性変形量から求める。軟鋼のヤング率を206GPaとして、給電電極先端とワイヤの接触力を弾性理論から計算する。計算に用いるモデルは図2に示す2通りである。給電電極の摺動溝長さ43mmで3点曲げを受ける場合と、給電電極の摺動溝長さの2倍86mmで3点曲げを受ける場合とを考える。本来は固有のフリーループ直径を有するワイヤが摺動溝内に強制的に押込まれ、ソリッドワイヤが弾性変形しフリ

表1 供試ワイヤの化学成分分析例
Table 1 Chemical compositions of welding wire used

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Ca	Cu
0.05	0.90	1.49	0.010	0.011	0.0001	Tr.

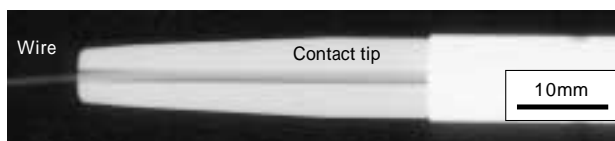


図1 給電電極とソリッドワイヤの接触状態
Fig. 1 X-ray photograph representing contact state between contact tip and solid wire

*溶接カンパニー 技術開発部

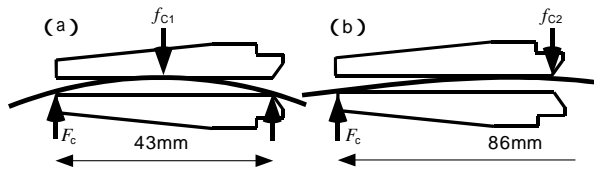


図2 給電電極摺動溝とワイヤ接触力の計算モデル

Fig. 2 Calculation model for contact force between contact tip and solid wire

フリーループ直径が大きくなるために、給電電極とワイヤ間に接触力が発生する。計算では図2に示した状態から f_{c1} , f_{c2} とは逆方向に集中荷重を負荷し、フリーループ直径までワイヤをたわませる力を求め、その半分を給電電極先端とワイヤの接触力 (F_c) とする。

1.3 溶接電流, 送給抵抗, 給電電極抵抗, 電圧降下

溶接時にソリッドワイヤが給電電極をワイヤ進行方向に引張る力学的力(以下、給電電極抵抗 T_r)とワイヤが送給ローラを押返す力学的力(以下、送給抵抗 F_r)、給電電極とソリッドワイヤ間の電圧降下 (V_d) を、図3に示す測定装置を用いて計測する。給電電極直上に取付けた中空のロードセル()で、給電電極抵抗 (T_r) を測定する。また送給用ローラ()およびモータをスライドテーブルに固定し、このスライドテーブルに加わる力すなわち送給抵抗 (F_r) をロードセル()で測定する。送給ローラ()がソリッドワイヤを挟持し送り出すことができる上限は100N程度であり、送給抵抗 (F_r) が100Nを超えるとスリ

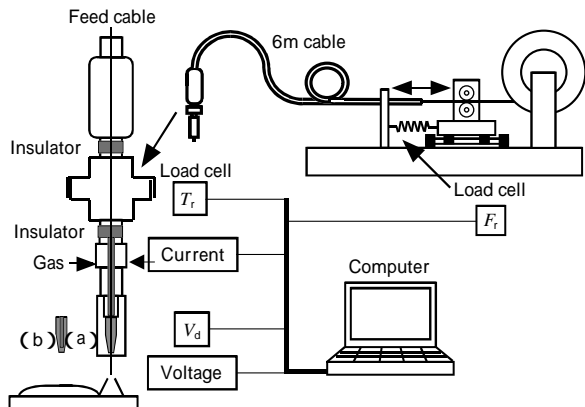


図3 溶接電流、溶接電圧、送給抵抗、給電電極抵抗、及び電圧降下の測定方法

Fig. 3 Schematic illustration representing measurement for current, voltage, feeding resistance, tip resistance, and voltage drop during welding

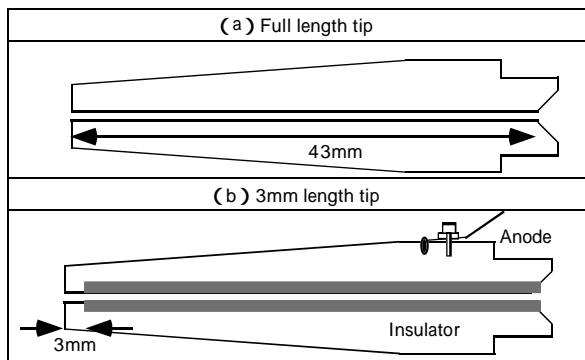


図4 (a)送給抵抗測定、(b)電圧降下測定に使用する給電電極の断面
Fig. 4 Cross section of contact tip for feeding resistance (a) and voltage drop (b) measurement during welding

ップが発生し、ワイヤの送給は停止する。中空ロードセルを溶接電流から保護するために、溶接電流は給電電極に直接供給()し、給電電極は他の金属部品から樹脂を用いて完全に絶縁する。図4に示した2種類の給電電極を使用し測定を行う。(a)の給電電極は市販品そのままであり、この給電電極を用いると、電流は複数の接点からソリッドワイヤに供給され、通常溶接を行う場合の給電電極抵抗と送給抵抗の関係を測定することができる。

(b)の給電電極は先端3mmを残し、絶縁管が挿入されている。適正なフリーループ直径のソリッドワイヤがこの給電電極を通過すると摺動接点は先端のみとなり、単一摺動接点での電圧降下を測定することができる。(b)の給電電極を用いて摺動接点の電圧降下 (V_d) を測定する場合は、スプールの終端を陰極、給電電極を陽極とする。測定すべき接触電気抵抗は数mΩと予測⁴⁾され、これに比較して給電電極本体の抵抗は10μΩと2桁小さいために、十分な精度で単一摺動接点における電圧降下量の測定が可能である。溶接電流(), 送給抵抗 (F_r), 給電電極抵抗 (T_r), および電圧降下 (V_d) を完全に時間同期してコンピュータ()に500Hz(2ms)で記録する。また電圧降下 (V_d) を溶接電流()で除することによって、給電電極とワイヤ間の接触電気抵抗を求める。6m長さのケーブル()を中間で直径300mmのドラム()に1回巻きつけた軌道を用いて溶接を行い、シールドガスは100%CO₂、溶接速度は30cm/min、給電電極先端と母材間の距離は25mmである。またケーブルに内包されるスプリングライナの内径は2.4mmであり、この2.4mmの中をソリッドワイヤは通過する。図3に示したようにソリッドワイヤを一定速度で送り出す送給ローラ()は6mケーブルの入口側に、給電電極(a)(b)は6mケーブルの出口側に設置する。なお本研究で使用した溶接機は定電圧制御のサイリスタ電源であり、使用した溶接トーチは図3に明示するようにストレートトーチである。

1.4 溶接時の給電電極温度測定

給電電極の側面、先端から2mm、30mmの位置にCA熱電対を埋込み、溶接時の給電電極温度を測定する。温度測定に使用した給電電極摺動溝の長さは43mmである。

2. 実験結果

2.1 接触力

図5に計算から求めた接触力を示す。計算値の太線は

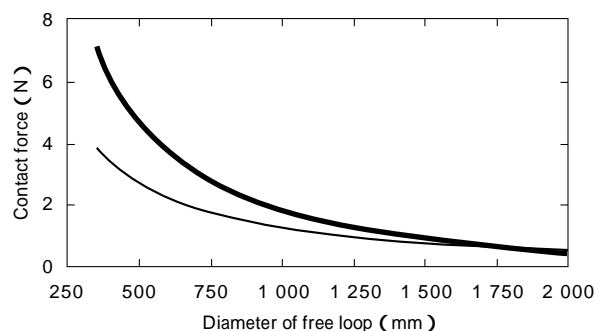


図5 フリーループ直径を変化させた場合の給電電極先端における接触力

Fig. 5 Contact force as function of free loop diameter of wire

図 2(a) 支点間距離43mm, 細線は図 2(b) 支点間距離86mmの接触力である。ワイヤのフリーループ直径を大きくすると, 給電電極先端でのワイヤの接触力が小さくなるのがわかる。ワイヤのフリーループ直径が1500mmを超えると 給電電極先端におけるワイヤの接触力は1Nを下回る。

2.2 送給抵抗

ワイヤのフリーループ直径を矯正器で調整して溶接を行い, 送給抵抗と給電電極抵抗の変動を測定した。測定結果を図 6 に示す。溶接電流は280A, シールドガスは

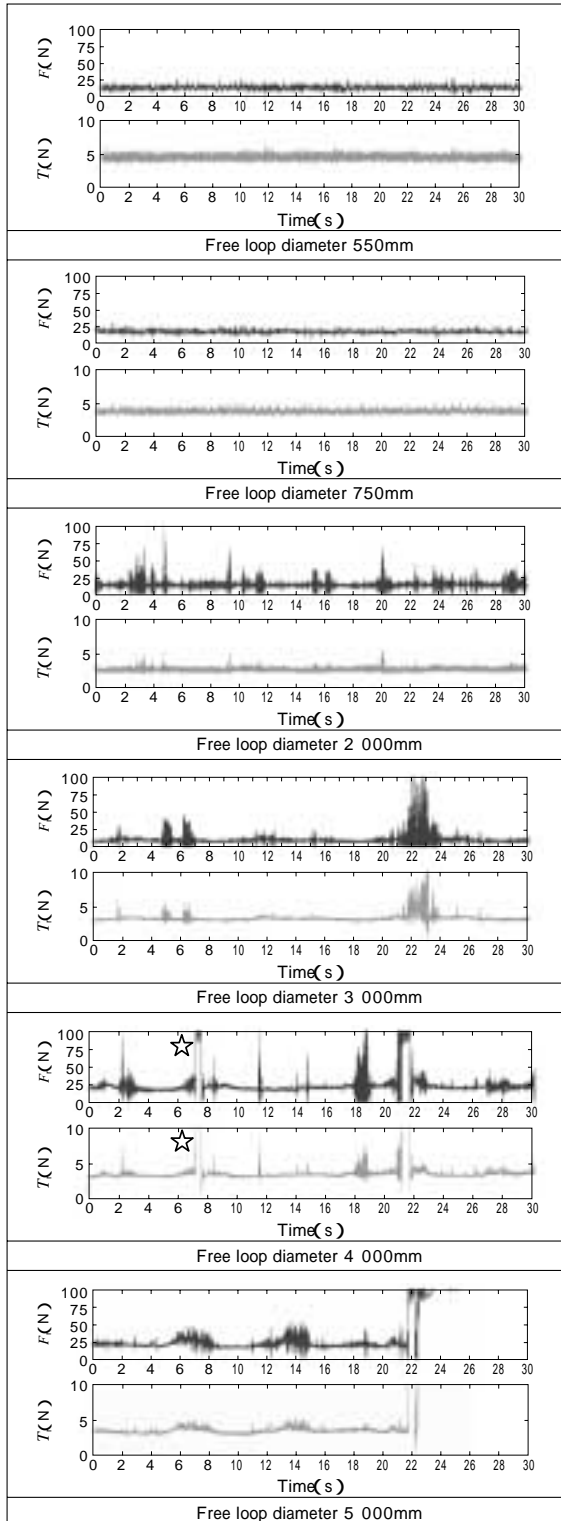


図 6 フリーループ直径を変えた場合の送給抵抗と給電電極抵抗
Fig. 6 Feeding resistance and tip resistance during welding

100%CO₂である。溶接は, 図 3 に示した溶接装置に付属するストレートトーチに図 4(a)の給電電極を取付けて溶接を行った。フリーループ直径750mmでは, 給電電極抵抗に不規則な変動はまったく発生しない。銅めっきなしソリッドワイヤ特有の良好な送給性を示す。フリーループ直径が550mmと小さくなると, 給電電極抵抗, 送給抵抗ともに若干振れ幅が大きくなるが, 安定性に不具合はまったくない。フリーループ直径が大きくなるに従って, 特に給電電極抵抗の安定部での平均値, 振れ幅ともに小さくなる。フリーループ直径が2000mm, 3000mmとなると, 給電電極抵抗の平均値は低いままで瞬間的に給電電極抵抗と送給抵抗が増大する。フリーループ直径が4000mmとなると, 給電電極抵抗, 送給抵抗ともに極大を示し瞬間的にワイヤが停止し, さらにフリーループ直径が5000mmとなると溶接途中でアーク放電が停止し, 同時にワイヤの送給も完全に停止してしまう。安定した溶接を行うためには, 適正なフリーループ直径すなわち適正な接触力が必要であることがわかる。

図 5 のフリーループ直径と接触力の関係を参照すれば, 1N以上の接触力があれば溶接時の撻動接点は安定することになる。単純な機械的摩擦抵抗であれば, 給電電極抵抗, 送給抵抗ともに, フリーループ直径が大きくワイヤの直進性が高い方が, 内直径2.4mmのスプリングライナを通過する抵抗および内直径1.35mmの給電電極を通過する抵抗ともに小さいはずである。溶接電流が給電電極からワイヤに流入することによって, 撻動接点で何らかの力が発生していることが考えられる。

2.3 電圧降下

溶接電流と完全に同期させて給電電極とワイヤの撻動接点における電圧降下と接触電気抵抗を測定した一例を, 図 7 に示す。平均溶接電流210A, 100% CO₂シールド, 突出し長さ25mmでのデータである。溶接に使用した給電電極は, 図 4(b)に示した給電長さ3mmの給電電極である。この給電電極を用いると, 一つの撻動接点における電圧降下と接触電気抵抗を測定することができる。溶接電流を210Aに設定すると, 溶滴の瞬間短絡などによって電流値は50Aから400Aまで変動し, ソリッドワイヤを用いて溶接する場合の実用電流範囲全域における電圧降下と接触電気抵抗を測定することができる。電流に対して電圧降下はほぼ一定であり, 最大0.6V, 最小値は0.2Vであるが, 大部分は0.5V以上に分布している。各時間における電圧降下量を溶接電流で逐次除すること

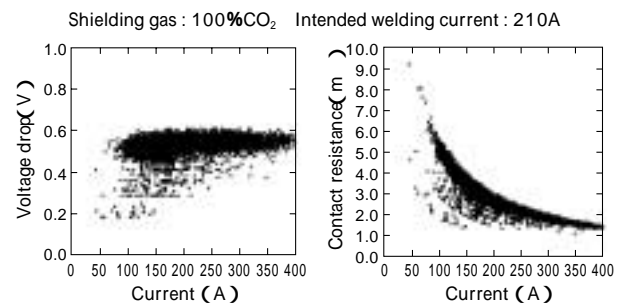


図 7 溶接時の電圧降下と接触電気抵抗
Fig. 7 Voltage drop and contact resistance during welding

で接触電気抵抗は計算できるが、電圧降下が電流に依存せずほぼ一定であるために、接触電気抵抗は溶接電流の逆数に比例して単調減少する。これより、溶接における摺動接点は電流が増加すると接触電気抵抗が低減し安定化することがわかる。この摺動接点の特性から、溶接電流がある点で流れ始めると、一気に最高許容高電流まで増加することになる。

2.4 給電電極温度

溶接電流 280A, シールドガス100%CO₂, 突出し長さ 25mm, 溶接速度30cm/minで溶接を行った場合の温度上昇曲線を図8に示す。給電電極の先端2mmおよび30mmにおける飽和温度は、600Kおよび450Kである。溶接電流, 突出し長さに応じて給電電極温度も若干変化するが、輻射熱およびジュール発熱が大きな給電電極先端がマクロ的に見て最も温度が高く、その代表値として600Kを採用する。

2.5 表面観察

図4(b)の給電電極を通過し、溶接電流を受電したワイヤ表面を走査型電子顕微鏡で観察した。図9に観察結果の一例を示す。画面左がソリッドワイヤの移動方向である。300Aの電流を受電し、300~400μmの幅で溶融凝固した痕跡(凝固痕)が画面左外のワイヤ先端まで連続的に存在している。画面中央右は、電流が遮断、すなわち強制的に電源を切った箇所に相当し、凝固痕は突然終了している。凝固痕の幅は溶接電流の影響を受け、高電流では広く、低電流では狭くなる傾向があるが、実用

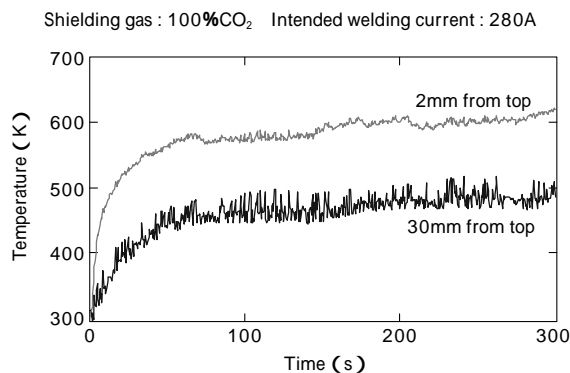


図8 溶接時の給電電極温度

Fig. 8 Temperature of contact tip with radiation of arc discharge, molten pool and Joule heating

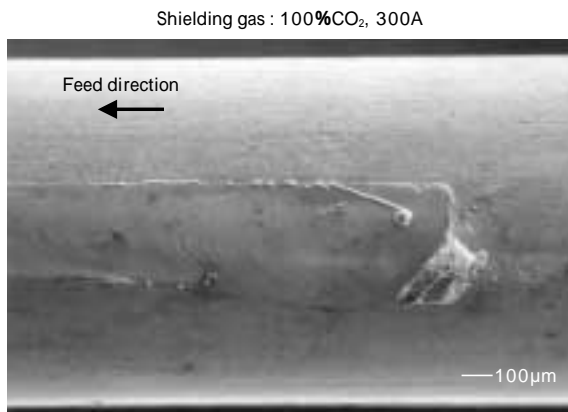


図9 受電ワイヤの表面状態

Fig. 9 Wire surface supplied welding current

的な溶接電流範囲では全て連続的な凝固痕が観察される。溶接電流が摺動接点を流れることによって、銅めっきを有しないソリッドワイヤ表面は連続的に溶融し凝固している。

3. 考察

金属において、電流および熱を運ぶキャリアは電子である。図10に示すような同一金属接点の界面における電圧降下 E_C と接触面内の最高温度 T_{max} の間には

$$E_C = \left\{ 4L(T_{max}^2 - T_{ERT}^2) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

の関係⁵⁾が成立する。ここで

- E_C : 接点における電圧降下 (V)
- L : Lorenz number = $2.45 \cdot 10^{-8}$ (V/K)²
- T_{max} : 接触面内最高温度 (K)
- T_{ERT} : 電極温度 (K)

である。これより、接点における電圧降下 E_C の値を測定することによって、接点最高温度 T_{max} を知ることができ、接点の接触状態(軟化, 溶融, 沸騰)を推定することができる。

この(1)式を用いて理論的に求められる接点温度と電圧降下の関係を、図11に示す。各曲線は、電極温度を300K, 400K, 500K, 600K, 700K, 800K, 900Kとした場合の接点温度と電圧降下の関係を示している。電極温度が高くなるに従って曲線は下方向に移動する。すなわち、接点溶融に必要な電圧降下が小さくなる。図11中に銅(1356K)および鉄(1812K)の融点を併記したが、電極温度が高くなるに従って鉄および銅の溶融電圧は低下する。輻射加熱およびジュール加熱される溶接過程にお

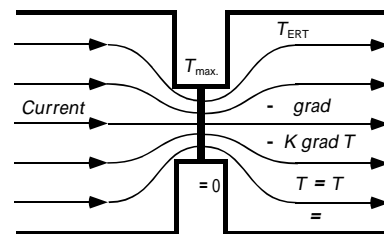


図10 電流の集中による集中抵抗と接点温度

Fig. 10 Current constriction, constriction resistance and contact temperature

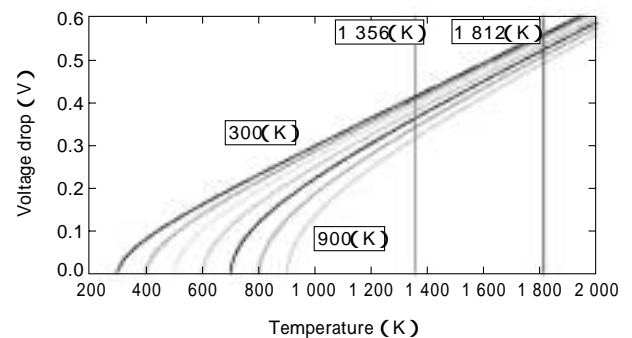


図11 接点における温度と電圧降下の関係

Fig. 11 Calculated relationship between temperature and voltage drop at contact point

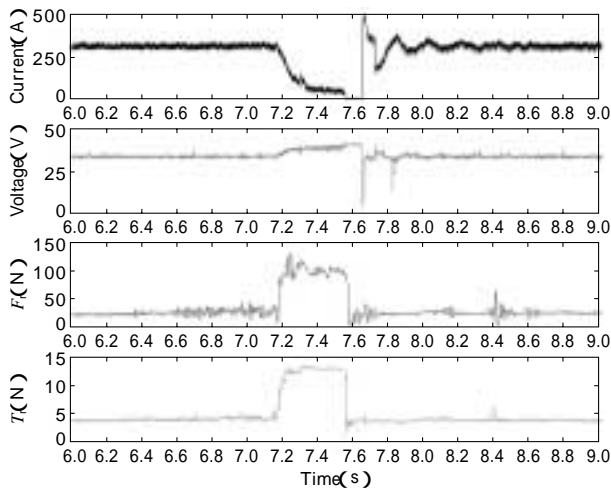


図12 フリーループ直径4 000mmにおける送給抵抗、給電電極抵抗の不安定部

Fig. 12 Unstable feeding resistance and contact tip resistance under large free-loop-diameter of solid wire

る給電電極先端の温度は600Kであり、 $T_{ERT} = 600K$ における銅・銅、鉄・鉄接点における溶融電圧はそれぞれ0.38Vと0.54Vと求められる。

受電後のワイヤ表面観察から、溶接時の摺動接点は溶融していることが明確である。溶接時の摺動接点における電圧低下量の平均値は、鉄の溶融電圧である0.54Vに等しいことから、摺動接点の溶融は理論的にも支持される。摺動接点が溶接電流で安定して溶融すれば、給電電極を溶接過程で下方向に引張る力すなわち給電電極抵抗は摩擦力のみである。摺動接点が安定して溶融するためには、ワイヤ表面が物理・化学的に均一であり、さらに最も重要な因子として給電電極とワイヤが一定の力で接触している必要がある。

図6に示したように、ワイヤのフリーループ直径が小さくなると給電電極抵抗の平均値が大きくなるが、これは接触力が大きくなって摩擦力が増えるためであろう。ソリッドワイヤの送給が停止する程の強い接触力は実用的に問題であるが、接触力が1～5Nであれば摺動接点は安定に保たれると考えられる。

逆にフリーループ直径が大きく、給電電極とワイヤの接触力が1Nを大きく下回ると、摺動接点の安定性が保てない。静止接点であれば、接触力が小さくても接触が確保されていれば、接点は機能するはずである。摺動接点の状況は静止接点と異なる。ケーブルの軌跡や溶接姿勢が変わることによって、フリーループ直径の大きさや曲がり方向は容易に変動する。フリーループ直径が大きな状態、すなわち接触力が0.5N未満の低い状態でワイヤの曲がり方向が突然変わると摺動接点が開離し、摺動接点は凝固しワイヤの送給が停止する。

図6のフリーループ直径が4 000mmにおける測定データ中の印位置を拡大して図12に示す。同一時間の溶接電流、溶接電圧波形も併記する。給電電極抵抗が振切れる1s前から給電電極抵抗と送給抵抗に変動が発生し()、接触力の低減によって摺動接点が開離し、凝固することによって給電電極抵抗が急激に増加し()、次に送給抵抗が増加する()。

給電電極内部には図1に示したように複数の摺動接点が存在するために、給電電極先端の摺動接点が開離して流ることができなくなった電流は他の接点に迂回する。複数の摺動接点が高い安定して機能していれば、給電電極先端の摺動接点から供給される電流の比率は全溶接電流の約70%であることが報告⁶⁾されている。給電電極先端におけるソリッドワイヤの送給速度が急速に低下するためアーク長が増大し、溶接電圧は上昇()し、溶接電流は低下()する。摺動接点凝固部がソリッドワイヤの送給力でせん断される()と、送給抵抗も瞬時に低下し()、ワイヤ送給が再開される。ソリッドワイヤ先端と鋼板が短絡する()ため短絡電流が流れて()、アーク放電も再開()する。アーク放電の停止に至らなくても接触力が不足すると、給電電極抵抗(T_c)と送給抵抗(F_c)が大きく変動し、ワイヤの溶融速度も変動しアーク不安定となる。これによりスパッタ、ヒュームの発生量が増加、さらには溶接欠陥の発生、ビード形状不良などの不具合が発生する。適正な接触力を保つことは安定した溶接を行うために非常に重要である。

むすび=溶接用ワイヤの送給性は、給電電極とワイヤ表面に形成される摺動接点に支配される。摺動接点が高安定して溶融することによって、送給抵抗は極小化する。摺動接点の安定化に必要な給電電極とワイヤの接触力は、1N以上と考えられる。ワイヤ表面にいかなる処理を施そうと適正な力でワイヤが給電電極と接触しないと、給電電極先端の摺動接点が一時的に凝固しワイヤの送給速度が変動し、最悪の場合アーク放電が停止する。スパッタ、ヒュームの発生量を最小にし、ビード形状が良好で、健全な溶接を行うために適正な接触力を保つことは、きわめて重要である。

参考文献

- 1) 荒谷雄ほか：溶接学会講演概要集，9(1971)，p.237
- 2) 荒谷雄ほか：溶接学会誌，41号9巻(1972)，p.1055.
- 3) 山田忠昭ほか：溶接学会論文集，2-2(1984)，p.228.
- 4) 山田忠昭ほか：溶接学会論文集，2-4(1984)，p.619.
- 5) R. Holm: Electric Contacts, Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 4th Edition (2000)
- 6) 清水弘之：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.2(2000)，p.15.