極細 K 熱電対の接合プロセスと測温特性*

－高電圧放電溶接法による極細金属線の接合－

今野 武志**, 江頭 満***, 小林 幹彦****

Welding process and characteristics of fine K-type thermocouple* - Non-contact discharge welding for fine metal wires -

by KONNO Takeshi**, EGASHIRA Mitsuru*** and KOBAYASHI Mikihiro****

K-type thermocouples are fabricated using a chromel wire and an alumel wire of 50 μm by non-contact discharge welding method. The welding is carried out at six different butt angles. The size of hot junction tends to decrease with an increase in butt angle, when the butt angle is larger than 1.4rad. The response rate is measured and it is almost proportional to reciprocal of the size of hot junction. It is shown that the size of hot junction is an important factor for response rate. Wire diameter is another important factor for temperature measurement of small objects. When temperature is measured at a same point by a thermocouple under the condition that only hot junction and its vicinity are heated, the output of electromotive force, i.e., indicated temperature will depend on the wire diameter. As the metal wire is good thermal conductor and the rate of heat transport is proportional to the area of wire cross section, deviation from true value increases with an increase in wire diameter. Our experiments showed that the indicated temperature decreased linearly with the wire diameter. Furthermore, we measured the discharge voltage and current at various setting current and discharge gap.

Key Words: Fine thermocouple, Response rate, Microwelding, Sensor, MEMS, Hot junction, Non-contact discharge welding, Smart material

1. 緒 言

現在 JIS 規格で規定されている熱電対で、最も線径が細いのは 0.65 mm である。しかし、これより細い極細熱電対と呼ばれるものが多数市販されている。極細熱電対は、長期間の使用における安定性を保証できないものの太い熱電対になく多くの利点があり、産業界からの様々な需要があるからである。例えば、ウェアの熱測定¹⁾等の電子機器の熱管理、熱移動速度を利用して測定する熱線式流量計²⁾、熱電対真空計³⁾などであり、それ以外にも微小試料の熱伝導計測^{4, 5)}、熱分析等の物性測定への応用、さらには細胞内の反応熱のモニタリングへの展開など、最先端の計測分野でも多くの利用が考えられる。

われわれは金属針に高電圧を印加して発生する放電を利用した高電圧放電溶接法と呼んでいる微小物溶接法⁶⁾を開発してきた。前報⁷⁾ではこの方法で、線径 50 μm のアルメル合金

線とクロメル合金線を溶接して極細の K 熱電対を作製したことを報告した。また試作した熱電対を市販の線径 0.65 mm の K 熱電対と一緒に炉内で加熱・放冷して市販品と同等の熱起電力があることを確認した。

試作した熱電対に温風を一定時間吹き付けるという方法で市販の線径 0.65 mm の K 熱電対と比較して、応答性がよいことを確認した。これは測温接点が小さく熱容量が小さいためである。測温接点が小さいということは、熱電対の応答性に関わる重要な因子である。しかし極細熱電対による温度測定では、測温接点の大きさはこれまで殆ど意識されていない。そこで本報では、線径が同じで測温接点の大きさが異なる熱電対を試作し、測温接点の大きさの影響を調べた。

極細熱電対は測温接点が小さく応答性がよいだけではなく、素線径が細いことによる利点も存在する。そのうちの 1 つは熱伝導が小さいことである。熱電対素線のような金属線は熱の良導体であるが、熱の移動速度は線の断面積に比例するので、細いと熱伝導が抑制される。ここでは、細い線であることが利点になるような状況を想定した実験を行い、線径が測定に及ぼす影響を調べた。

また高電圧放電溶接法は短時間に多くの放電を繰り返すために電氣的なノイズも多く、電流・電圧といった基礎的な測定も殆どなされていない。本報では高速度カメラで撮影を行い、溶接の進行状況を明らかにすると共に、放電時の電圧、

*受付日	平成25年4月17日	受理日	平成25年7月26日	平成22年度春季全国大会で発表、平成22年4月東京ビッグサイトで発表
**正 員	(独)物質・材料研究機構	Member, National Institute for Materials Science		
***	(独)物質・材料研究機構	National Institute for Materials Science		
****	(独)物質・材料研究機構	National Institute for Materials Science		

電流の測定を行った。

2. 実験方法

2.1 溶接装置および方法

高電圧放電溶接法による熱電対の作製装置とその方法は別に詳述しているのので、ここでは簡単に述べる。2本の熱電対素線をそれぞれ一端が厚さ1.5mmの軟鋼の基板上端の角から約2.5mm突き出るようにして板磁石を用いて固定する。各基板はアースに接続し、素線の先端が所定の角度を持つように取り付ける。

それぞれの基板は独立に3方向に移動することができるので、2本の素線を所定の突合せ角度で接触させ、2本の素線が互いにある程度の力で押し付けあうようにする。タングステン針（以後、W針と表記する）を下向きにして、先端が素線同士の接触点の直上になるように配置する。シールドガスのCO₂を放電開始5s前から、W針上方から流し、所定の直流高電圧をW針に印加する。そうすると針先と突合せ部の間に放電が生じるので、約0.5sの放電を行う。放電後に目視で2本の素線が溶融接合したか否かを確認して、していなければ再放電を行う。平均的に約0.5sの休止間隔を与えて溶接するまで放電を繰り返した。

溶接中は、2本の素線の接触点とW針先端の周辺を、顕微鏡に取り付けたフレームレートが30コマ/sのCCDカメラで撮影・記録している。詳細に調べるために一部の実験では、高速度カメラ（フォトロン、FASTCAM MC2.1）を用いて2,000コマ/sまたは6,000コマ/sの条件で撮影し、素線の溶接過程について観察した。

2.2 放電時の電流と電圧の測定

放電のための電源は定格の10kV、10mAまで可変に電圧・電流の設定値を変更できる高電圧電源（エレメント、EKM-10K10PLS1）を用いている。これまで線径や材質により溶接条件を決める際には、電源の設定電流やW針と溶接物との距離（電極間距離）、あるいは放電時間を、試行錯誤で経験的に決めてきた。今回、このような設定電流や電極間距離が、実際の放電にどのように影響しているかを調べた。

W針と対向電極を、所定の距離だけ離して設置し、溶接の場合と同様に、所定の設定電流で放電を行う。対向電極に実際の溶接と同じように細線を用いると、細線が溶融して電極間距離が変わる。そこで対向電極には金基板を用いた。出力電圧は電圧プローブ（Tektronix, P6015A）により1/1,000に減圧し、また電流は非接触式の電流プローブ（Bergoz, FCT-016-10:1）で電圧信号へ変換し、それぞれをデジタルオシロスコープ（Tektronix, TDS680B）で記録して測定した。デジタルオシロスコープのサンプリングレートは5.5G回/sまで28ステップで可変であるが、サンプリングレートにより記録時間の上限は変わる。

Fig. 1 Apparatus for evaluating the effects of wire diameter of thermocouple on measured values

2.3 熱応答速度の測定

前報⁷⁾と同様に、試作した熱電対に、シャッターを使って一定時間温風を吹き付けて、熱起電力の変化をデジタルオシロスコープで記録して、熱応答速度を求めた。

2.4 測定値に及ぼす線径の影響

素線径の違いによる温度測定値の違いを、Fig. 1に示す装置で調べた。内径6mmの石英管を炉心管とする縦型の電気炉を使い、通電時の石英管下部の温度を線径の異なるK熱電対で測定する。この際に熱電対を石英管の中心軸上で垂直に上下できるようにし、水平方向から見て熱電対の測温接点最上端と石英管の下縁を一致させたところから、ちょうど2mmだけ石英管の内部に挿入する。定常状態になるまで3.6ks保持してから、デジタルマルチメータ（岩通、VOAC7521A）を用いて、熱電対が示す温度を記録した。なお、石英管の上部に蓋をして、できるだけ対流が起きないようにした。

2.5 測温接点断面の組成分析

熱電対の測温接点を素線の軸が研磨面に垂直になるように樹脂埋めして、測温接点の中心まで研磨した。研磨後、断面をSEM（JEOL, JSM-5400）で観察し、エネルギー分散型X線分析装置（JEOL, JED-2140、以後、EDXと表記する）により測温接点断面の組成分析を行う。加速電圧20kV、1点あたりの取込み時間を100sとして、試料のクロメル線側からアルメル線側に向かって、Ni, Fe, Mn, Cr, Si, Alの各成分元素について線分析を行い、測温接点の均一性を調べた。

2.6 供試材

K熱電対の素線であるアルメル合金線とクロメル合金線

の素線径は $50\mu\text{m}$ のもの (OMEGA, SPAL-002 及び SPCH-002) を用いた。また線径が 0.65 mm , 0.25 mm , 0.13 mm , $80\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$ のそれぞれ市販の K 熱電対を使って、測定に及ぼす線径の影響を調べた。

放電電極となる金属針は軸径 $125\mu\text{m}$ で先端半径が $5\mu\text{m}$ 以下の市販品の W 針 (GGB, T-4-125) を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 高速度カメラによる観察

高電圧放電による溶接の進行状況を捉えるために、線径 $50\mu\text{m}$ の K 熱電対作製時に高速度カメラで $6,000\text{コマ/s}$ の条件で撮影を行った。Fig. 2 に素線が白熱し始めてから測温接点形成までの間に得られた画像から、溶接の進行具合が端的に示されるものを抜き出して、(1)~(10) まで順番に示した。なお、以下では経過時間を高速度カメラのコマ数から計算している。また上部の W 針は実際には暗くて殆ど見えないので、白く塗りつぶして判りやすくしている。

画像の左側にある素線がクロメル合金線で、右側にあるのがアルメル合金線である。Fig. 2 に示した溶接では、最初の (1) のコマから最後の (10) のコマまでの時間は 16.7 ms であった。その間に溶接 (測温接点の形成) は以下のように進むことがわかった。

放電により、2 本の素線の先端は同時に白熱する。白熱した当初は両者の長さは同じで接触しているが、低融点のアルメル合金線がクロメル合金線より短くなって両者は離れて

Fig. 2 Pictures taken by high speed camera
Welding of a chromel wire (left) and an almel wire (right) progressed from (1) to (10). Figures at the bottom of each photograph show an elapse time from (1) in units of milliseconds.

しまう。クロメル合金線の先端が大きくなっているのに対して、アルメル合金線は線の太さがあまり変わらずに短くなった。従って、アルメル合金の溶融部がクロメル合金の先端に吸収されたと思われる。クロメル合金線の先端は自重と放電圧で下のアルメル合金の先端に落ちていき一体化する。この間、アルメル合金線の先端はクロメル合金線の陰になり、大きく融け落ちることはない。

3.2 設定電流および電極間距離と放電電圧および電流の関係

高電圧放電溶接では約 0.5 s の間、電圧を印加している。高速度カメラによる撮影結果では、この間に 1 ms 以下の間隔で放電が繰り返し起きていることがわかった。電源には「設定電流」の調整つまみがあり、電流値を $0.01\sim 10.0\text{ mA}$ の範囲で調節できるようになっている。実際に繰返し放電の電流がどの程度の精度で調節されているのかを調べるために、金属針と金基板間の距離を $40\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ と変えて、また設定電流 1 mA , 2 mA , 5 mA , 9 mA と変えて、放電時の出力電圧と電流を実測した。

0.5 s の放電の間に、少なくとも 500 回以上の放電が起きており、放電時に電圧と電流は急峻に変化する。このため、デジタルオシロスコープのサンプリングレートを低くすると放電時の電圧と電流の変化を正確に記録することができない。一方、記録容量が限られているので、サンプリングレートを高くすると記録時間が短くなる。ここではサンプリングレートを 25 M回/s (サンプリング間隔 40 ns) にして、最初に起こる放電と記録時間内に起こった 2~4 回目の放電の、それぞれ電流と電圧を記録・測定した。

1 回の放電における電圧と電流の時間変化は、概略次のようになる。電圧は放物線的に上昇する。すなわち、最初急激に立ち上がりだんだん勾配が小さくなり、あるところで急峻に 0 に下がる。このとき放電が生じており、電流は 0 であったのが、電圧が急減した瞬間に上昇してすぐに降下する。電圧が上昇してからピークに達する時間は 1 ms 以内で、電流が流れているのは数 μs 程度である。電圧は 0 になった後、直ちにまた放物線的に上昇して次の放電サイクルに入る。オシロスコープに記録されたデータからそれぞれ電圧と電流のピーク値をその放電の放電電圧、放電電流とした。

Fig. 3 に 1 回目の放電の電圧と電流の関係を示した。設定電流が違ってても、電極間距離が同じデータは図中でまとまって存在しているので、破線で囲ってその左側に電極間距離を示した。放電の電圧と電流はほぼ直線関係にあり、条件にかかわらず同一直線上にあること、また電極間距離が大きくなると絶縁破壊電圧が大きくなり、放電の電圧と電流が大きくなるのが図より明らかである。電極間距離が同じデータを細かく見ると、電極間距離が $40\mu\text{m}$ および $200\mu\text{m}$ で、設定電流が 1 mA , 2 mA と小さい方が放電の電圧と電流が大きくなるという結果が得られた。しかし、電極間距離が $500\mu\text{m}$ では、 1 mA の時が最も放電電流と放電電圧が小さくなってお

Fig. 3 Relation between discharge voltage and discharge current
Data obtained at the same discharge gap are enclosed by dotted curve, and figure near the closed curve shows discharge distance.

り、設定電流を大きくすると放電電流・放電電圧が小さくなるという明確な相関は認められなかった。

2 回目以降の放電電圧と電流を調べたが、1 回目のデータと同じ傾向にある。すなわち、2 回目以降の放電電圧と電流のデータすべては Fig. 3 中の直線上に乗り、その位置はほぼ 1 回目の放電と同じところにある。例外として、電極間距離が $500\mu\text{m}$ の一部のデータで 2 回目の放電電圧が 1kV 以下に小さくなるものがあったが、電流もそれに応じて小さくなり、Fig. 3 中の直線上にある。

3.3 設定電流および電極間距離と放電密度

1 回目の放電の電圧は、電極間距離が同じでも設定電流により 0.5kV 程度変わること、設定電流と放電の電流・電圧に明確な相関がないことが Fig. 3 から明らかになった。2 回目以降の放電も、電極間距離が $500\mu\text{m}$ の場合を除き、Fig. 3 と同じになる。

高電圧放電溶接法において、放電電圧と電流が大きくなれば溶接入熱が大きくなると考えられる。設定電流の大きさと放電の電圧と電流の間に明確な相関が認められなかったが、実際には設定電流を大きくすると溶接入熱が大きくなることが報告⁷⁾されている。また電極間距離が大きいほど溶接入熱が大きくなると予想されるが、実際には素線が白熱するまでの回数は距離が大きくなると多くなると報告されており⁷⁾、溶接入熱が小さくなると思われる。

上記の矛盾の原因を調べるために、デジタルオシロスコープのサンプリング間隔を長くして放電の有無だけは確認できる条件で約 150ms 間に発生する放電を記録して、 1s 当たりの放電回数 (放電密度) を推定した。その結果は Fig. 4 のようになった。

放電密度は電極間距離が短いと大きい。また、電極間距離が一定ならば設定電流に比例して増加し、その比例係数は電極間距離が短いほど大きい。このため設定電流を大きくすると、放電密度が大きくなる。また電極間距離を長くすると 1 回の放電による入熱は大きくなるが、放電密度が小さくな

Fig. 4 Relation between number of discharge per second and setting current

り、全体として入熱が減少すると考えられる。

ここで使用した電源は、コンデンサーとダイオードを多段にスタックしたコッククロフト・ウォルトン回路で昇圧しており、電荷放出後の電圧再復帰を速めるために $5,000\text{pF}$ のコンデンサーを使用している。また、設定電流は、最終段のコンデンサーの充電割合を調整するものである⁸⁾。

本来は電位出力を目的とした電源であり、高電圧放電溶接法のような放電を行うことを目的としていない。そのため、放電を行わせると、電極間距離が一定ならば絶縁破壊電圧は一定であるのに、設定電流により違いがでたり、設定電流では電流値ではなく、放電密度を制御しているなど、予想とは異なる結果が得られた。しかし、設定電流と電極間距離により、溶接入熱を制御できることがわかった。

これまで線材の材質や線径により、経験的に電極間距離や設定電流を調整した。最適な条件を選ぶには、放電密度から入熱エネルギーを調べ、さらに線材の伝熱特性なども考慮する必要がある。これらのデータは、これまで経験的に得られた条件を含めて、新たな線材を溶接する際の溶接条件を決定する指針になる。

3.4 極細 K 熱電対の作製に及ぼす突合せ角度の影響

線径 $50\mu\text{m}$ の素線を使い、設定電流 8mA 、電極間距離 $50\mu\text{m}$ の同一溶接条件で、突合せ角度のみを $0.52\sim 1.92\text{rad}$ まで変えて熱電対を作製した。形成された測温接点の SEM 写真を Fig. 5 に示す。溶接の際に素線が加熱されると自重または放電圧力で下がるために、必ずしも最初の突合せ角度と溶接後の素線の開き角度が一致するわけではないが、最初の突合せ角度が大きいと開き角度が大きくなる傾向が認められる。さらに興味深いのは、形はいびつであるが、突合せ角度が大きいと測温接点が小さくなる傾向が認められることである。

測温接点を球で近似したときに直径に相当すると思われる線を、Fig. 5 の SEM 写真中に白線で引き、その長さを代表長さとした。誤差は大きいですが、他に測温接点の大きさを表す適当な方法がないので、以下ではこの代表長さで測温接点の

大きさを表した。なお、それぞれの熱電対の測温接点の代表長さ及び溶接前後の突合せ角度は、Table 1 にまとめて示した。また、Fig. 5 (a) の SEM 写真では、Table 1 の値に比べて開き角度が大きく見えるが、これは素線が曲がっていて、熱電対が真横からではなく、斜め上方向から撮影されているためである。Fig. 6 は突合せ角度と代表長さの関係を示したもので、突合せ角度が 1.4 rad 以下では代表長さは約 120 μm でほぼ一定であるが、突合せ角度が 1.4 rad 以上になると、代表長さは急激に低下する。

突合せ角度により測温接点の大きさが変わるの、Fig. 7 に示すような理由が考えられる。高電圧放電では、金属針と素線の間に高電圧を印加して放電を起こさせ、その熱により素線を溶接する。放電は金属針先端と素線の突合せ部の間で起こり、図中に破線で示したような放電炎が生じる。この放

電炎の横方向の広がりには突合せ角度に関係なく数百 μm 程度である。従って、突合せ角度が小さい場合には放電炎により加熱される部分が長く、角度が大きい場合には加熱される部分が小さくなる。このために、突合せ角度を大きくすると素線先端の溶融量が少なくなるので測温接点の大きさが小さくなる。

上記の仮説を検証するために、突合せ角度 0.61 rad および 1.14 rad にした素線の溶接を 2,000 コマ/s の高速度カメラで撮影した。素線の白熱した部分が最大になった時の画像を Fig. 8 (a), (b) に示した。白熱した素線の長さは突合せ角度が狭い方が長くなっている。さらに、W 針先端との距離も、溶接前はほぼ同じに 50 μm にしていたのが、(a) では (b) の 2 倍以上になっており、それだけ素線の溶融部分が多くて測温接点が大きくなったことを示しており、Fig. 7 の仮説を裏付けている。なお、上部にある W 針は Fig. 2 と同様に白く塗りつぶしており、白熱しているわけではない。

3.5 熱応答速度に及ぼす測温接点の大きさの影響

3.4 において突合せ角度を変えることで、線径が 50 μm と同一で測温接点の大きさが異なる K 熱電対が作製された。そこで、これらの熱電対を用いて応答性を調べた。354 K の温風を吹き付けると、起電力は当初はほぼ直線的に急上昇し、354 K に相当する熱起電力よりやや低い出力で直線から下方にずれて一定値に漸近する⁷⁾。そこで、熱起電力が最高値の半分に到達するまでの部分を直線で近似して、その勾配を熱応答速度とした。なお、計算においては、熱起電力を温度に換算した値を用いた。

求められた熱応答速度は、既出の Table 1 にまとめた。測温接点の大きさが小さくなると、熱応答が速くなる傾向がわかる。なお、比較のために市販の線径 0.65 mm の K 熱電対の代表長さとし熱応答速度も表に示している。

Fig. 5 SEM images of hot junction fabricated under various butt angles. Butt angle and characteristic length of hot junction (white line) of (a) to (f): see Table

Table 1 Butt angle, characteristic length of hot junction, response rate, and indicated temperature for thermocouples fabricated by non-contact discharge welding

No.	Butt angle before discharge (rad)	Butt angle after discharge (rad)	Characteristic length of hot junction (μm)	Response rate (K/s)	Indicated temperature* (K)
(a)	0.52	0.59	114	904	—
(b)	0.61	0.91	126	870	416.7
(c)	1.22	1.48	121	870	421.0
(d)	1.40	1.92	114	995	415.6
(e)	1.76	1.76	70	1010	426.3
(f)	1.92	1.66	43	1152	421.6
Ref.**	—	—	1600	22	—

*: see 3. 6

**: Commercial TC, wire diameter: 0.65mm

Fig. 6 Relation between butt angle and characteristic length

Fig. 7 Schematic explanation for controlling size of hot junction by butt angle

Fig. 8 Pictures of moment length of incandescent wires becomes maximum
Butt angles of (a) and (b) are 0.61rad and 1.14rad, respectively.

熱応答が速いということは、測温接点自身が速く環境の温度と同じになるということである。測温接点に温風を吹き付けた時に、 dt 時間に周囲から測温接点に入ってくる熱量 (dQ) は測温接点の表面積 (S) に比例し ($dQ/dt \propto S$)、その熱量による温度上昇 (dT) は測温接点の大きさ (V) に反比例する ($dT \propto dQ/V$) と仮定する。さらに、 S が代表長さ (D) の自乗に比例し、 V が D の 3 乗に比例すると仮定すると、次

Fig. 9 Relation between response rate and reciprocal of characteristic length

Fig. 10 Relation between indicated temperature and wire diameter of thermocouples
The value of thermometer was read 3.6kiloseconds after the thermocouple was placed.

式が得られる。

$$dT/dt \propto S/V \propto 1/D \quad (1)$$

すなわち熱応答速度 (dT/dt) は代表長さの逆数 ($1/D$) に比例する。これを検証するためにプロットしたのが Fig. 9 である。表中の (d) のデータはやや外れているが、直線関係となる。かなり荒っぽい代表値の決定と仮定を含む割には、寄与率 0.85 とよい相関が得られた。

3.6 測定値に及ぼす線径の影響

線径の異なる熱電対の測温接点を、縦型炉中心軸上で下端から 2 mm だけ挿入して得られた測定値を線径に対してプロットしたのが Fig. 10 である。用いた熱電対は Fig. 5 に示した線径 50 μm の試作熱電対と線径がそれぞれ 25 μm , 50 μm , 80 μm , 0.13 mm, 0.25 mm, 0.65 mm の市販品である。なお、試作熱電対による測定値は Table 1 の最終欄に記したが、(a) の熱電対は測定前のセッティングの際に壊れたのでデータはない。

同一の箇所でも測温しているにもかかわらず、測定温度は線径に比例して小さくなる傾向があり、最大で 84 K 程度の差が認められた。測定地点の温度の真値は、Fig. 10 中の回帰線

Fig. 11 Cross sectional hot junctions of thermocouples of 50 μm (a) and 0.65 mm (b) in diameters
EDX analysis is conducted along dashed and single-dotted lines. Left side of the cross section is chromel wire side and right side is alumel side in both photographs.

Fig. 12 Relative concentration variations of constituent elements on cross sectional hot junction of thermocouples of 50 μm (a) and 0.65 mm (b) in diameters
Solid lines show average concentration (see Table 2).

Table 2 Average values of EDX analysis along dashed and single-dotted lines in Fig. 11 (mass%)

	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
50 μm	0.60	0.85	3.59	1.48	0.11	93.37
0.65 mm	0.78	0.77	4.30	1.16	0.31	92.68

が小さい時にはそのようなことはできない。そしてその場合には、線径を細くするほど真値に近づくことが本実験結果より示された。

3.7 測温接点断面の EDX 分析

高電圧放電溶接法で作製した線径 50 μm の熱電対（以後、試作品と表記する）と、市販の線径 0.65 mm の熱電対（以後、市販品と表記する）の測温接点断面を Fig. 11 (a), (b) にそれぞれ示す。いずれも左がクロメル線側で右がアルメル線側である。写真から結晶粒の大きさを調べると、市販品では 100 μm オーダーであるのに対し、試作品は 10 μm オーダーであり、試作品の結晶粒の大きさは 10 分の 1 程度になっている。

測温接点の体積が試作品は市販品の 1,000 分の 1 以下と小さく、溶接後に急冷されるためと考えられる。高速度カメラの画像において、放電が終了してから測温接点が暗くなるまでの時間を、コマ数から推定すると 50 ms であった。アルメル合金の融点は約 1,600 K、クロメル合金の融点は約 1,700 K である。測温接点の温度を、放電終了時はアルメルの融点と同じ 1,600 K、暗くなった時は 1,000 K であると仮定すると、冷却速度は約 12,000 K/s と見積もられる。なおこの冷却速度は、一般にアモルファス合金が形成される 100,000 K/s 以上⁹⁾と比べると遅いが、結晶粒が微細化されるほどには充分速いといえる。

測温接点断面の EDX 分析は、Fig. 11 の写真中の一点鎖線の線で行った。この線上で、試料が小さい (a) では 5 μm 間隔、試料が大きい (b) では 50 μm 間隔で測定を行い、その結果をそれぞれ Fig. 12 (a), (b) に示す。いずれの図も左側はク

を線径 0 まで外挿した時の温度付近と推定される。すなわち、真値との差はほぼ線径に比例して増加することがわかった。また、5 本の試作熱電対間での測定温度の差は最大 10.7 K であり、測定温度と測温接点の大きさまたは熱応答速度の間には特に相関は認められなかった。

対象物の温度が変化していて、その温度変化を測定する動的な測定をする際には、熱応答が速いことが必要で、測温接点の大きさが重要となる。しかし、対象物の温度が一定で測定に時間をかけられる静的な測定では、測温接点の大きさは重要ではないということである。線径により測定値に差が出たのは、熱電対の脚を通した熱伝導が原因である。熱電対の脚は金属線で熱の良導体であり、熱移動速度は線の断面積に比例する。測温接点は環境から放射熱を得るが、一方で、熱電対の脚からの熱伝導で熱を奪われる。線径が太くて熱移動速度が大きい時の定常状態における測温接点の温度は、熱移動速度が小さい時の測温接点の温度よりも低くなるのでこのような差が出たのである。

金属線の伝熱速度は線の断面積に比例するだけでなく温度差にも比例する。測温接点近傍の脚も測温対象物と同じ程度の温度にできれば線径による差は生じないが、測温対象物

ロメル線側, 右側がアルメル線側であり, また図中の細線は目安のために引いたそれぞれの平均値である。

(b) 図の市販品は, いずれの成分もクロメル側かアルメル側のいずれかに片寄っていたり, あるいは中心部と周辺部に濃度差があるとはいえず, ほぼ均一に分散している。強いて言えば Cr がアルメル側に近いほど低くなり, 逆に Mn が高くなる傾向にある。一方, (a) 図では, 明らかに Cr が表面近くで高く中心部で低くなり, 逆に Mn は表面近くで低く中心部で高くなっている。

各成分毎の分析値の平均は Table 2 に示した。市販品と試作品で相対的に最も差が大きいのは Fe の分析値である。

熱電対の素線は, 起電力の大きさや直線性以外に, 内部構造や組成が起電力に対して鈍感であることを考慮して選択されている。一方, 作製した極細熱電対と市販熱電対との起電力差を 300 K-643 K の範囲で測定したところ, 温度差に換算して 2.6 K 以下であることが示されている⁷⁾。これらのことから, 上記の Cr, Mn の偏析も含め, 市販品との組成の差は, 熱電対の起電力に影響を与えていないと思われる。

4. 結 言

高電圧放電溶接法により素線の突合せ角度を 0.52~1.92 rad まで変え, 線径 50 μ m の 6 本の K 熱電対を作製した。その結果, 突合せ角度が 1.4 rad までは測温接点の大きさは変わらないが, それよりも大きくなると測温接点の大きさが小さくなることがわかった。

このようにして作製した線径が同じで測温接点の大きさのみが異なる熱電対の熱応答速度を求めた結果, 熱応答速度はほぼ測温接点の代表長さの逆数に比例することがわかった。

次に試作した K 熱電対と, 線径が 25 μ m~0.65 mm の市販の 6 種類の熱電対で, 縦型管状炉の下端からそれぞれの測温接点を 2 mm 挿入して温度を測定した。その結果, 342~426 K の範囲の測定値が得られ, 線径が大きいほど測定値は低くなり, これは熱抵抗の違いによるものと推定された。真値は外挿により見積もられ, 線径と真値との差は線径に逆比例することがわかった。線径が同じで測温接点の大きさの違う熱電対では, 測定値と測温接点の大きさに相関は認められなかった。

線径 50 μ m の試作熱電対と線径 0.65 mm の市販熱電対の測温接点の断面を調べたところ, 前者は急冷されており, 結晶粒の大きさが 10 分の 1 程度であった。EDX で Ni, Fe, Mn, Cr, Si, Al の各成分について線分析を行うと, 試作品では Mn

と Cr に関して, 表面部と中央部で組成の偏りが見られた。

高速度カメラで高電圧放電溶接法の様子を撮影し, 溶接の進行状況を明らかにした。また電源特性を明らかにするために, 電源の設定電流と電極間距離を変えて最初にかかる放電電圧と電流を測定して, 次のような結果が得られた。

- (1) 放電の電圧と電流は, どの条件でも比例関係にあり, 電圧と電流をプロットすると同じ直線上にのる。
- (2) 電極間距離が大きいほど放電の電圧と電流が大きい。
- (3) 電極間距離が同じで, 設定電流を大きくしても放電の電流が大きくなるとは限らない。
- (4) 1 s 当たりの放電回数(放電密度)は設定電流が大きいほど多い。
- (5) 電極間距離が同じなら放電密度は設定電流に比例する。
- (6) その勾配は電極間距離が大きいほど小さい。

これらのデータは, これまで経験的に得られた条件を含めて, 新たな線材を溶接する際の溶接条件を決定する際の指針になる。

参 考 文 献

- 1) Bandoh, K., Ohkubo, H. and Yokota, S., In-Situ Measurement and Control of Wafer Temperature Using Micro Sensor (1st Report, An Experimental Study by Using Large Model), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, Vol. 74, No. 743 (2008), pp. 1740-1748. (in Japanese)
- 2) Kim, T. H. and Kim, S. J., Development of a micro-thermal flow sensor with thin-film thermocouples, J. Micromech. Microeng., Vol. 16 (2006), pp. 2502-2508.
- 3) Duarte, CA., A thermocouple vacuum gauge for low vacuum measurement, Vacuum, Vol. 85 (2011), pp.972-974.
- 4) Nakabeppu, O. and Tokita, K., On Local Thermal Conductivity Measurement by the SThM, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B, Vol. 72, No. 722 (2006), pp. 2524-2531. (in Japanese)
- 5) Nakabeppu, O., Microscale Thermal Measurement by Scanning Thermal Microscopy, Netsu Sokutei, Vol. 28, No.1 (2001), pp.18-28. (in Japanese)
- 6) Konno, T., Egashira, M., Kobayashi, M. and Shinya, N., Micro Discharge Welding and Joint Reinforcement by Non-contact Welding Method, J. Soc. Powder Technol. Japan, Vol. 42, No. 2 (2005), pp. 758-764. (in Japanese)
- 7) Konno, T., Egashira, M. and Kobayashi, M., Fabrication of hot junction of fine K-type thermocouple - Non-contact discharge welding for fine metal wires-, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 30 (2012), pp. 158-163. (in Japanese)
- 8) Personal communication from Y. Kocho, Element Inc.
- 9) Ohnaka, I., Production of Amorphous Alloy Materials and Rapid Quenching Techniques, The Japan Soc. of Mechanical Engineers, Vol. 88, No. 802 (1985), pp. 1060-1064. (in Japanese)