

「高感度・多機能マルチプローバのシステム化技術および評価」に係る成果報告

若生 進一* 青木 邦知* 佐川 克雄*

1. はじめに

本成果報告書は、平成16年度 地域中小企業支援型研究開発（技術シーズ持込型）「高感度・多機能マルチプローバの開発」に関わる受託研究「高感度・多機能マルチプローバのシステム化技術及び評価」として、（株）三友製作所が研究開発する超小型マルチプローブ駆動機構に（独）産業技術総合研究所が研究開発する高感度接触圧検知機能を実装するシステム化技術の、プローブへのカーボン付着を防止する抵抗加熱ヒータの組み込みに関する研究評価を纏めたものである。

走査型電子顕微鏡（SEM）中でマルチプローバを操作する場合に、プローブへのカーボン付着が想定される。プローブへのカーボン付着を防止するには、試料台及びプローブ近傍を120℃程度に保つ必要があることが示されている。このため試料台及びプローブ近傍に抵抗加熱ヒータを取り付けることになった。そこで、抵抗加熱ヒータの特性を調査し、マルチプローバの伝熱解析を行い、ヒータへの印加電圧と試料台及びSEMチャンバ外壁の温度の関係について評価・検討した。

2. ヒータ特性の評価

試料台の下面に貼り付けるヒータ（定格電流1A：耐熱温度200℃）を図1に示す。ヒータの構成は、導体部がSUS、フィルム部がポリイミドであり、抵抗値は $3 \pm 10\%$ （20Ω）である。

ヒータの特性評価実験は、図2に示すように、温度測定用のK型熱電対（CHINO製：型番SCHS1-0：使用温度範囲-100℃～1000℃）をヒータ上にポリイミドテープにて固定し、ヒータを直流安定化電源に接続して行った。測定は、任意の印加電圧における電流値とヒータ温度を、熱電対による温度測定値がほぼ一定となるのを確認してから測定した。



図1 ヒータ



図2 ヒータ及び熱電対

2.1 ヒータの温度と抵抗値の評価

まず始めにヒータ特性の再現性を確認した。その結果を温度と抵抗値 r について示すと図3の実線となる。この図より使用するヒータには、良好な再現性があることが確認できた。また、抵抗値 r は温度に関係することが知られている¹⁾。図3の抵抗値 r の測定結果は、ほぼ直線的に抵抗値 r が増加している。このことは、ヒータ印可電圧を一定として電流値を計測すればヒータの温度を推測できることを示している。

ヒータ1とヒータ2の抵抗値測定の結果には若干の差異が認められる。この原因は、熱電対による温度測定値がほぼ一定となるのを確認してから電流値を測定する方法を用いたための、測定方法による誤差と考えられる。

このことは、詳細には各ヒータについて温度と抵抗値 r の関係を明確にする必要があるものの、電流値によってヒータ温度をある程度推測可能であることを示す。図4には、上記の実験における入力エネルギーとヒータ温度の関係を示す。入力エネルギーに対するヒータ温度は、ヒータ間の違いがないことを示している。

ここで注意しなければならないのは、あくまでも熱電対は、ヒータ表面のポリイミドの温度を測定していることである。これらの結果は、厳密にはヒータ表面にある熱伝達部分の温度測定値である。真空中においては、図4の関係が同じ入力エネルギーに対してヒータ表面の熱伝達がなくなる分だけ、温度測定値が高くなると考えられる。

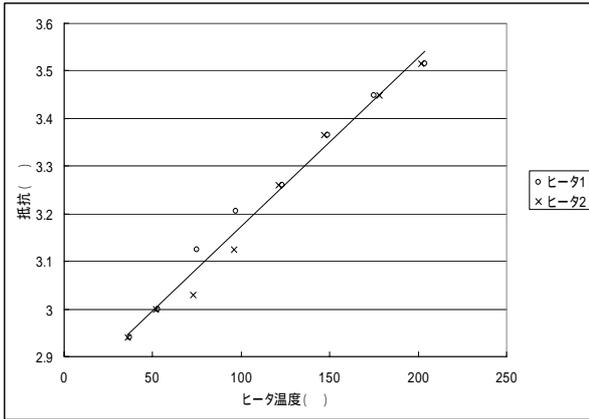


図3 抵抗値rの測定結果



加熱時間は30分
 ・左端：200 加熱，中央：150 加熱，右端：未加熱
 ・200 では、樹脂が変色した。150 でも若干変色している。
 ・物理的な破損等は認められず。

図6 加熱後の結果

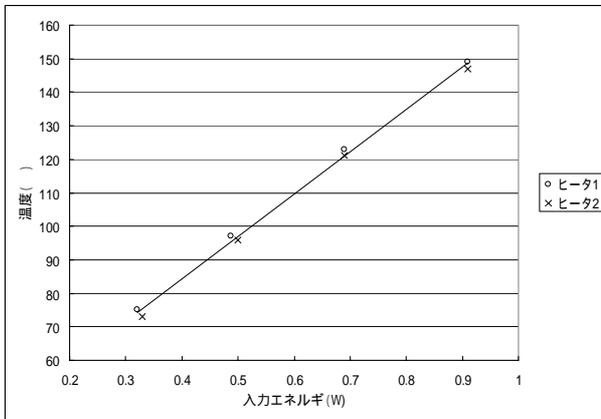


図4 入力エネルギーとヒータ温度の関係

2.2 カンチレバーユニットの温度に関する影響評価

マルチプローバの、プローブ押付力の測定には、SPM等で用いるSi製のカンチレバーユニット(カンチレバーと配線等を一体としてSPMに簡単に取り付けられるようにしたもの)を用いることも考えられるので、市販のSPM用カンチレバーユニット(SII製：型番SSI-SS-EC-ML)を用いて、昇温時の熱による配線や接続部の物理的な損傷の確認を行った。

実験は、図5に示すようにヒータ上にカンチレバーユニットを貼付け、加熱によるカンチレバーユニットへの影響について評価を行った。その結果を図6に示す。

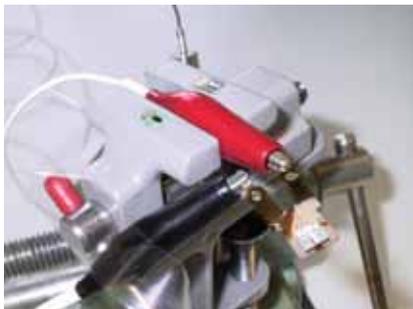


図5 ヒータ上のカンチレバーユニット

2.3 真空チャンバ内におけるヒータ特性評価

ヒータ特性の評価実験は、大気中と同様に、K型熱電対(CHINO製：型番SCYF2-0：使用温度範囲-100 ~ 1000)をヒータ上にポリイミドテープにて固定し、真空チャンバ内(真空度 10^{-4} Pa)の網状の台の上に設置したテフロンブロック(断熱材として利用)上にヒータを貼付け、直流安定化電源及び熱電対から任意の印加電圧における電流値、ヒータ温度、テフロンブロック温度及び真空チャンバ内の温度を測定した。なお真空チャンバ内の温度は、ヒータ部から15mm離れた位置におけるテフロンブロックの表面を熱電対により測定した値である。真空チャンバ内に設置したヒータ及びテフロンブロックの配置を図7に示す。

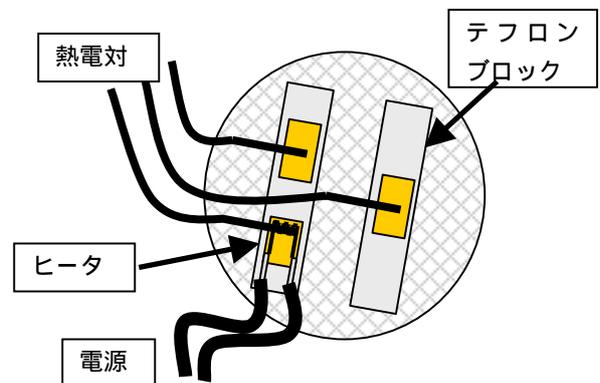


図7 実験配置図

図7に示す実験方法としたのは、真空中のヒータ表面の温度測定値が、大気との熱伝達のみで高くなること、真空チャンバ内への放射熱の影響及びヒータとヒータを貼り付ける材料の熱伝達を確認するためである。

ヒータへの入力エネルギーとヒータ表面温度の関係を図8に示す。図8と図4を比較すると、図8に示す真空チャンバ内のヒータ表面温度が若干低い値を示す。これはヒータからテフロンに熱伝達が起こったためと考えられる。

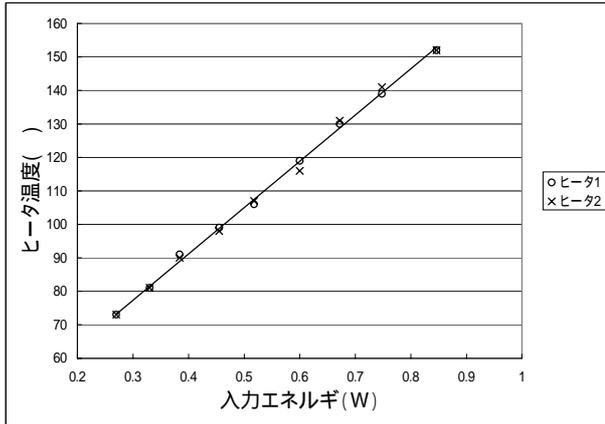


図8 真空中におけるヒータ表面温度と入力エネルギーの関係

図9は、ヒータ温度、テフロンブロック温度及び真空チャンバ内温度の関係を時系列で示したものである。図9より、ヒータを貼り付けたテフロンの温度が、時間遅れを伴いながら温度変化することが確認された。これは、ヒータからテフロンに熱伝達が起こったことを示す。また、放射熱の影響が考えられるチャンバ内の温度は、ヒータを貼り付けたテフロンブロックの温度に比べてかなり小さく、無視できる程度であることを確認した。

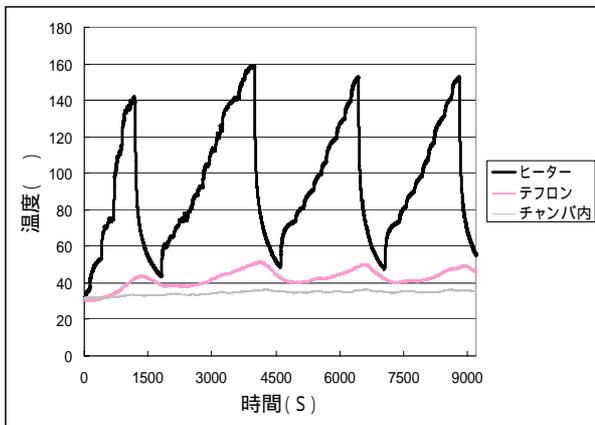


図9 チャンバ内各部温度の時系列変化

3. 伝熱解析

ヒータ単体の特性は、前章のように確認できたが、マルチプローバに組み込んだ場合には、マルチプローバからSEMチャンバへの伝熱により、ヒータ単体の温度とは異なることが予想される。そこでヒータへの印加電圧やマルチプローバの温度分布を確認するために、伝熱解析を実施した。伝熱解析を実施するにあたっては、(株)三友製作所より提供いただいた、マルチプローバに関連する部分のCADデータを基に、解析用のモデルを作成し、伝熱解析を実施した。伝熱解析は、当センターの大城靖彦主任の協力を得た。なお、前記の図9の結果は、真空チャンバ内での物体間の熱伝達に対して、放射熱の影響を無視できることを示した。このことから、真空チャンバ内の伝熱解析は、熱伝導のみを考慮することとした。

図10に伝熱解析モデルを示す。ヒータは試料台の上部プレートの裏面に張り付けられ、上部プレートと下部構造物の間に作られた空間に納められている。

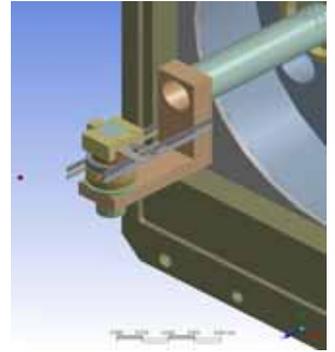


図10 伝熱解析モデル

伝熱解析は、表1に示す条件で実施した。

表1 伝熱解析条件

伝熱解析ソフト：ANSYS			
・大気側への熱伝達条件：雰囲気温度20，熱伝達率10W/m ² ・			
・ヒータよりの入力エネルギーは、1W, 2W, 3W, 5W, 10Wについて計算			
・各部件の接触部は完全接触とした。			
材 料	密 度 (kg/m ³)	比 熱 (J/kg・)	熱 伝 導 率 (W/m・)
構造用鋼	7,850.0	434.0	60.5
アルミニウム合金	2,770.0	875.0	114.0~175.0
銅合金	8,300.0	385.0	401.0
ステンレス鋼	7,750.0	480.0	15.1
ベスベル	1,430.0	1,130.0	0.34
ポリイミド	1,470.0	1,130.0	0.29

*アルミニウム合金の熱伝導率は-100 ~ 200 までの非線形データを含んでいる

伝熱解析結果を図11と図12に示す。図11は、ヒータの入力エネルギーが10Wの時の、SEMチャンバ内の試料台の温度分布である。図12は、ヒータの入力エネルギーが10Wの時の、SEMチャンバ外壁および試料台操作部の温度分布である。

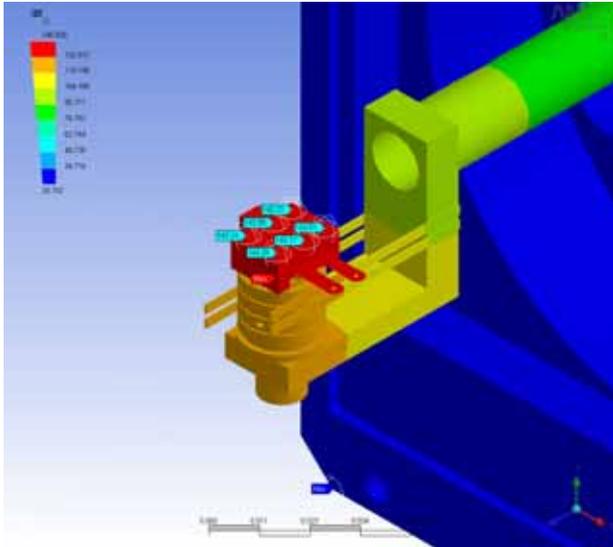


図11 試料台

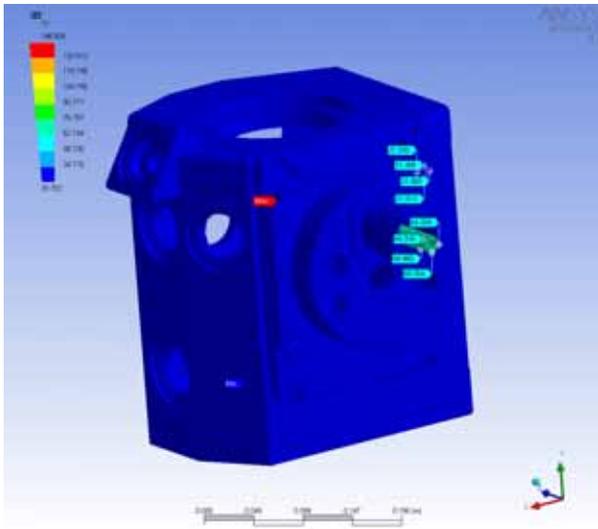


図12 SEMチャンバ外壁

図11は、試料台表面温度が約143 となり、試料台支持部に大きな温度勾配が生じることを示した。図12は、SEMチャンバ外壁の温度は室温とほぼ同じであるが、試料台操作部は試料台支持部からの伝熱により、人が操作するにはかなりの高温になることを示した。

図13は、ヒータ各入力による図11と図12に示す試料台、試料台操作部及びチャンバ外壁の3点の温度について示したものである。図12より、試料台の温度を120 に保つには、ヒータ入力を8W程度にする必要があること、その時の試料台操作部は、55 程度になると推測できる。

なおこの伝熱解析は、ヒータの入力エネルギーと放熱が拮抗した定常状態を示すものである。このためヒータ通電開始から定常状態になるまでの時間は推測できない。さらに定常状態になる前の過渡的な温度状態では、試料台各 부품の熱膨張に十分な注意が必要となると思われる。

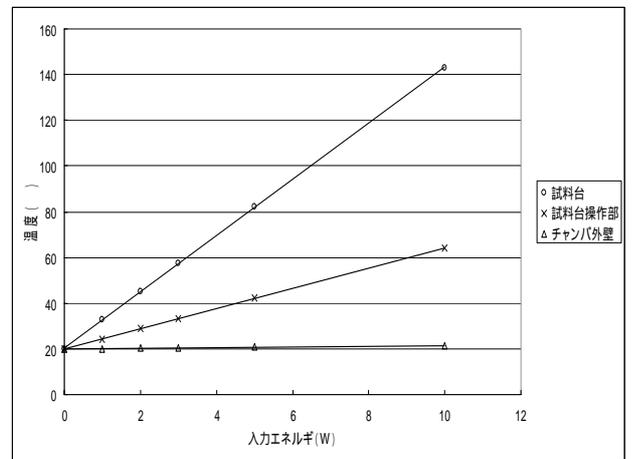


図13 伝熱解析結果

4. まとめ

ヒータの特性の評価及びマルチプローバの伝熱解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ヒータ特性の評価から、ヒータの個体差及び再現性について良好な結果が得られた。また、ヒータ温度と抵抗値の関係を明確にすることで、電流値(印加電圧一定)によるヒータ温度の推測がある程度可能であることがわかった。
- 2) 伝熱解析の結果から、試料台の温度を120 に保つにはヒータの入力エネルギーが8W程度必要であることがわかった。
- 3) 各 부품の熱膨張等にも注意が必要である。

【参考文献】

- 1) 入門 電磁気学：加藤哲男・水野正志 コロナ社