



Y. Tanigawa

ステンレス箔に対する高温加熱・ガス圧成形 を利用した金型製造技術に関する研究

谷川 義博*

1. まえがき

通常、製品の量産には金型が使用される。金型の加工精度は、その金型を使用して製作される製品の要求精度により決まるため、高精度な製品を製作するには、高精度な金型が必要となる。高精度金型を製作するには、高い精度の工作機械と技術が必要となる。更に、量産性や生産コスト低減の観点から、金型は多数個取り金型となるが、その取り数は年々増加する傾向にある。多数個取り金型は、同一形状を同じ精度で多数個加工する必要があるため、多くの加工時間と精度維持のためのノウハウが必要となる。中でも、半導体関連製品や医療関連製品等の微細な製品の金型では、微細工具を使用した加工になるため、これらの金型製造には更に多くの技術やノウハウが必要となる。

一方、量産工場を海外へ移転したメーカーでも、研究開発部門や試作部門は国内に残しているメーカーも多くある。さらに、前述のような、高い精度を必要とする部品に関しては国内企業へ発注するメーカーも多い。

以上のことから、国内金型企業が今後諸外国に対し、競争力を維持し、発展していくためには、試作及び量産に対応可能で、従来工作機械による機械加工のみでは対応が困難な、高精度金型を短時間で製作する新技術を開発していく必要がある。

そこで著者らは、LED用樹脂レンズ金型を製造する技術として、高温に加熱した金型材にレンズ形状に加工したセラミックスを押し付け高精度な金型入れ子を作製する転写金型製造技術を開発した。¹⁾

しかし、この転写金型製造技術は金型ブロック材にマスター型形状を転写するため、1度の成形で軸対象形状製品を1製品形状しか成形できなかった。

そのため本研究では、高温に加熱したSUS箔を真空・圧空成形を利用することで4つの製品形状を成形する4個取り金型製造技術の開発を試みた。

2. 金属箔成形装置の開発

2・1 高温真空成形を利用した金型製造工程

本研究で開発を目指す高温真空成形を利用した金型製造技術の工程を図1に示す。

工程 1) .SUS箔と製品形状であるマスター型を真空チャンバー内にセットする。この際、真空チャンバーはSUS箔を

境にA槽(チャンバーA)とB槽(チャンバーB)に分かれた状態となる。

工程 2) .A槽を真空、B槽を不活性ガスで加圧した状態でSUS箔を軟化温度まで加熱して、A槽側に設置したマスター型を上昇させSUS箔に押し当てマスター型形状を転写する。

工程 3) .SUS箔冷却後、A槽、B槽を大気開放しSUS箔をマスター型から離型する。

工程 4) .SUS箔をチャンバーから取り出し、裏面にバックアップ材を取り付け、不要箇所を取り除き金型入れ子が完成する。

以上4工程が今回開発を目指す金型製造技術である。

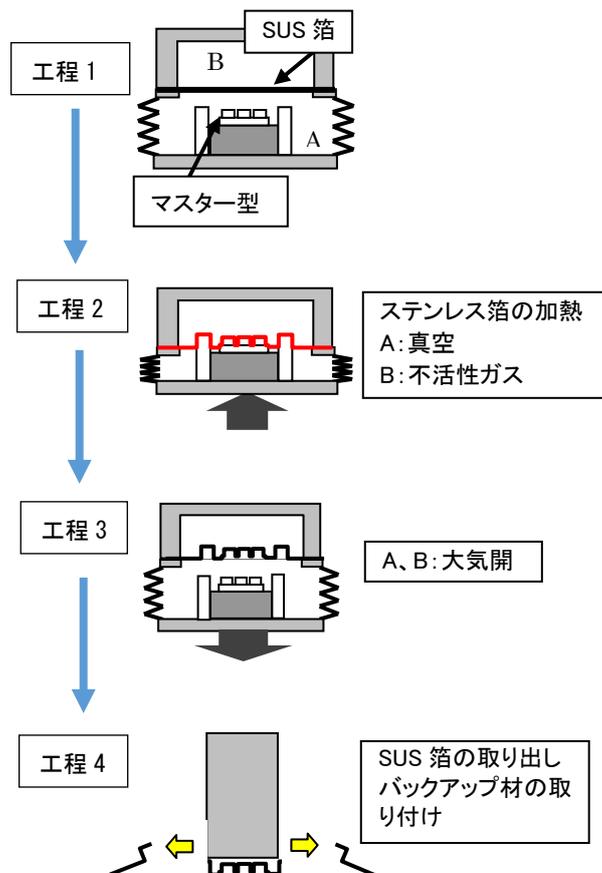


図1. SUS箔成形工程

* 福岡県工業技術センター機械電子研究所生産技術課 精密加工チーム長

2.2 SUS 箔成形装置の設計・製作

次に、SUS 箔成形装置の設計・製作を行った。装置構成及び上下チャンバー部外観をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

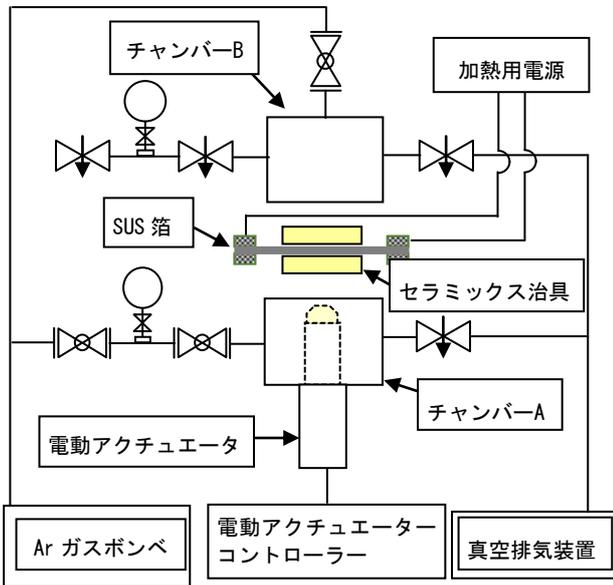


図 2. SUS 箔成形装置構成図

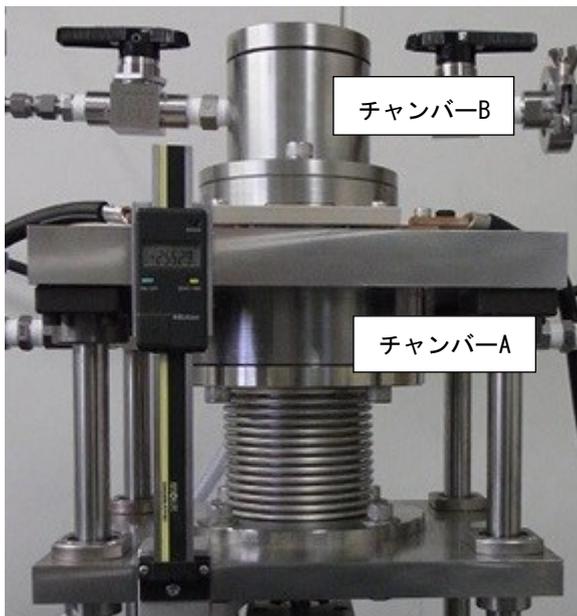


図 3. SUS 箔成形装置チャンバー部外

本技術における SUS 箔の加熱は、チャンバー内に SUS 箔をセットした状態で行う必要がある。また、SUS 箔の成形性を向上させるには、SUS 箔が十分に軟化する温度まで加熱する必要があるため、目標加熱温度を 1000℃とした。

過熱水蒸気を加圧ガスとする超塑性アルミニウム合金ブロー成形技術の開発が行われているが、成形温度は 500℃～600℃の範囲である。²⁾

しかし、今回成形する材料は SUS 箔であり、前述のように目標加熱温度を 1000℃としている。このため、SUS 箔の昇温には、短時間で目標温度に昇温可能な通電加熱方式を用いることとした。通電加熱の電源には、直流 TIG 溶接機 YC-300BZ2 (Panasonic 社製) を使用した。マスター型を設置した下部ステージの移動には、電動シリンダーユニット DRS60SG-05MKA (オリエンタルモーター社製) を用いた。

SUS 箔の加熱には通電加熱方式を使用しているため、SUS 箔はセラミックス治具で挟み込み固定しており、このセラミックス治具を上部チャンバーと下部チャンバー間に固定することで SUS 箔を境に上下チャンバー内を真空状態と加圧状態に維持した状態で SUS 箔を加熱可能な構造としている。

3. 実験方法

3.1 SUS 箔加熱実験

製作した装置に SUS 箔をセットして、通電加熱による昇温実験を行った。箔厚 50 μm、80 μm、100 μm の異なる厚さの SUS 箔を電極間距離 75mm で装置にセットし、チャンバー B を取り外した状態で、供給する電流値を 200A～260A まで変化させ、その時の SUS 箔温度を測定した。SUS 箔温度の測定は、上面からチノー社製サーモビジョン CPA-8200 を使用し行った。SUS 箔の厚さや電流値により最高温度までの到達時間は異なるが、全ての条件において加熱開始 5 秒以内に安定し最高温度まで到達した。その時の SUS 箔表面温度を図 4 に示す。昇温の際、チャンバー A は 7×10^{-3} Pa の高真空状態となっている。

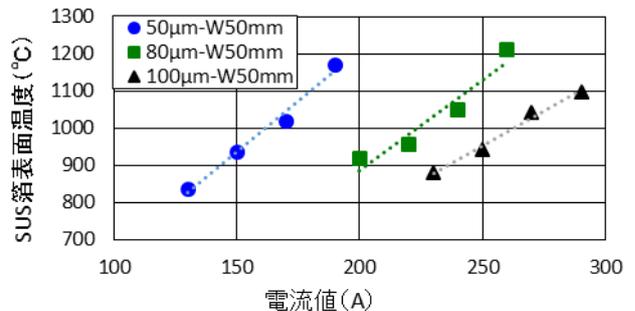


図 4. 電流値と SUS 箔表面積の関係

図 4 に示すように、SUS 箔温度を 1000℃まで上昇させるのに必要な電流値は、箔厚 50 μm で 162A、80 μm で 223A、100 μm で 262A と箔厚が薄い方が低い電流値でも高温に加熱され、グラフの傾きから電流値の変化の影響を受けやすいことが分かる。

板材を高温に加熱してプレス成形を行うホットスタンピングにおいて板材がポンチに接触した際の板材の温度低下が課題となっている。³⁾本研究においても図 1 に示すように高温に加熱した SUS 箔をガス圧を使いセラミックスマスターに押し付け形状を転写するため、温度低下が生

じると予想される。このため加熱した SUS 箔をセラミックスマスターに接触させ、その時の SUS 箔温度の変化をサーモビジョンで測定した。今回通電加熱に使用した電源の仕様は最大 290A となっており、箔厚 100 μ m の SUS 箔は図 4 に示すように 1098 $^{\circ}$ C までしか昇温できない。このため、セラミックスマスター接触時の温度低下等を考慮すると今回の実験では箔厚 100 μ m の SUS 箔の使用は厳しいと判断し今後は箔厚 50 μ m と 80 μ m の SUS 箔を使用することとした。

実験は、50 μ m と 80 μ m の SUS 箔表面の温度をサーモビジョンの測定値でそれぞれ 1165 $^{\circ}$ C、1168 $^{\circ}$ C まで加熱した状態でセラミックスマスターに接触させ、その時の温度低下について調べた。その結果を図 5 に示す。

図 5 に示すように室温から 1165 $^{\circ}$ C まで加熱した後、セラミックスマスター型が接触すると、SUS 箔表面温度はそれぞれ、箔厚 80 μ m は 696 $^{\circ}$ C、50 μ m は 698 $^{\circ}$ C に低下する。SUS 箔にセラミックスマスターが接触した状態で加熱を継続すると 25 秒で箔厚 80 μ m の SUS 箔表面温度は 881 $^{\circ}$ C、50 μ m の SUS 箔は 770 $^{\circ}$ C まで SUS 箔表面温度は上昇した。このセラミックスマスター接触後の温度上昇の差は、加熱している SUS 箔体積の違いによる熱容量の差によって生じていると思われる。

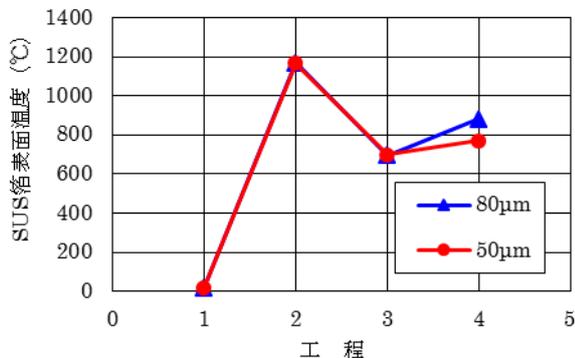


図 5. SUS 箔厚さの違いによるマスター接触後の温度状況

3.2 ガス加圧による SUS 箔変形実験

本装置を使い短時間で SUS 箔を高温まで加熱可能であることが確認できたため、次にセラミックスマスターを取り付けけない状態での SUS 箔の変形実験を実施した。チャンパー A を高真空状態にし、チャンパー B にアルゴンガスを供給することでチャンパー B 内を加圧した状態で、SUS 箔を加熱し成形させその時の変形量を調べる。SUS 箔を固定する上下のセラミックス治具には中央部に \square 20mm の貫通穴が空いており、チャンパー B 側の穴から任意の圧力で加圧した状態で、SUS 箔を加熱することで SUS 箔は A チャンパー側（下方向）に図 6 に示すような凸形状に変形する。

この際、供給する電流値とガス圧力値を変え SUS 箔の変

形量に与える影響を調べた。変形量の評価は三鷹光器社製非接触形状測定装置 NH-3SP を使い、図 6 に示すように変形した SUS 箔凸形状部中央の断面形状を測定しその高さで比較することとした。

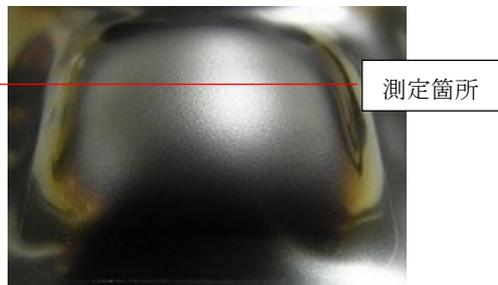


図 6. 変形した SUS 箔測定箇所

厚さの異なる SUS 箔に対し図 4 の結果を基に SUS 温度が同程度となるように、箔厚 50 μ m では電流値を 150A~170A、箔厚 80 μ m では 220A~250A とした。加熱時間は 10 秒とし、ガス圧 0.2MPa~0.5MPa で実験を行った。電流値と変形高さの関係を図 7 に示す。

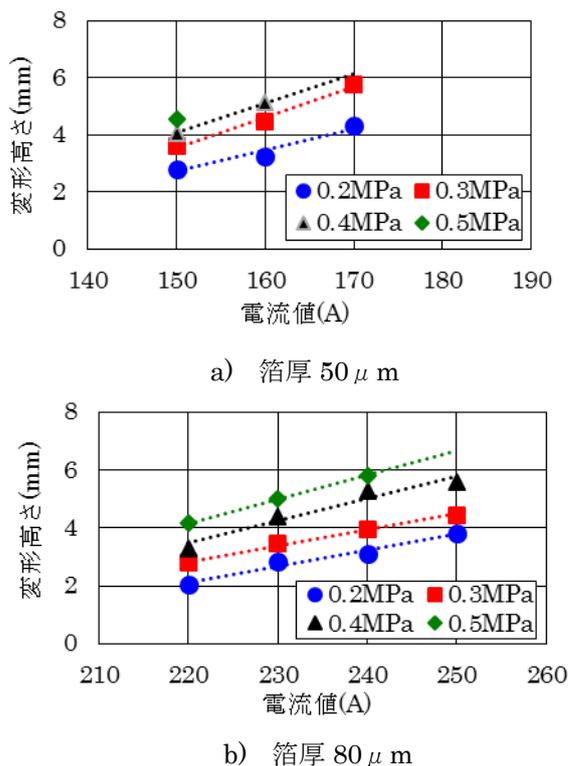


図 7. SUS 箔変形量に対する電流値とガス圧の影響

同一圧力での変形高さを比較すると、箔厚 50 μ m の方が材料強度が小さい分、変形高さは高くなっており容易に変形できることが分かる。50 μ m、80 μ m とともに変形高さ 5mm を超えると SUS 箔に小さな穴が空いたり破れたりしてしまうため、 \square 20mm ポケットの治具を使用して変形させた

場合の変形限界高さを5mmと設定した。

50μmと80μmのSUS箔を比較した場合、50μmの方が各ガス圧での電流値に対する変形高さの影響が大きいため、SUS箔が破れずに大きく変形させるための条件設定範囲が狭くなり、最適条件の設定が厳しく取り扱いが難しくなる。

図8に厚さ80μmのSUS箔に対し、ガス圧0.2MPaから0.7MPaで変化させて加圧した状態で、電流値220A(955℃)で加熱した時のSUS箔変形部の中心から半分の断面形状と、SUS箔の非定常熱伝導解析結果を示す。

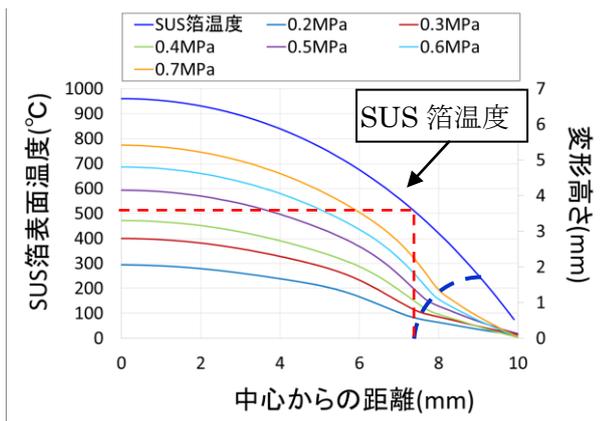


図8. SUS箔変形実験断面形状 (□20mm 治具)

ガス圧0.2MPaから0.7MPaまで変化させると、変形高さは異なるが、どの場合も図8の青色の破線で示すようにセラミックス治具の□20mmポケットエッジ部から3mm程度の箇所までと、その内側では変形状態に違いが生じており、その位置でのSUS箔温度は解析結果で500℃程度となっている。

この様にSUS箔に不均一な変形が生じたのでは高精度な成形は不可能である。この不均一な変形は、SUS箔の熱が接触しているセラミックス治具へ放熱され、SUS箔の温度が中央部に対し、セラミックス治具近傍が低くなるためだと考えられる。高精度な金型入れ子を作製するためには、金型入れ子外周寸法である□20mm範囲内のSUS箔の変形を均一にしなければならない。そのためには、□20mm範囲内のSUS箔の温度のばらつきを低減する必要がある。セラミックス治具への放熱による温度低下が接触部から3mm程度であり、□20mm範囲内の温度を均一にするためには、治具ポケット寸法を中央部から片側3mm以上大きくすれば良いと思われる。そこで、セラミックス治具ポケット寸法□30mm、□35mmの場合の電流値220AでのSUS箔表面温度の非定常熱伝導解析を行い、ポケット寸法□20mmでの解析結果と比較を行った。その結果を図9に示す。

図9に示すように、同じ電流値でもポケット中心部でのSUS箔温度解析結果は、□20mmで960℃であるのに対し、□30mmでは、1060℃、□35mmでは1090℃と高くなること

が分かる。また、中心部から10mmの位置でのSUS箔表面温度解析結果は、□30mm位置では700℃、□35mmでは、866℃と、図8における変形状態に違いが生じる箇所の温度よりも高く昇温されることが分かる。

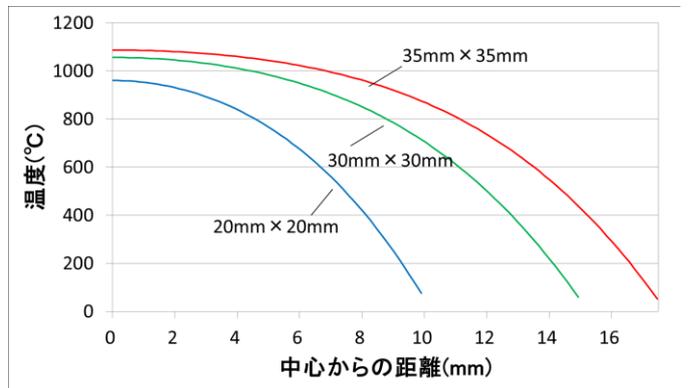


図9. 異なるポケット寸法でのSUS箔表面温度解析結果

この結果から、ポケット寸法を図10に示すように下側治具□30mm、上側治具□37mmとしたセラミックス治具を作製し、成形実験を行った。

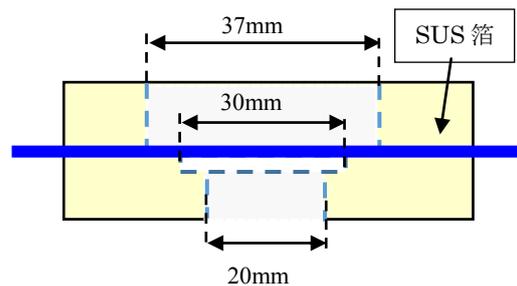


図10. ポケット寸法を拡張したセラミックス治具

図11に図10の治具を使用して、ガス圧0.2MPaと0.4MPaで加圧した状態で、電流値220A(955℃)で加熱した時のSUS箔変形断面形状を示す。

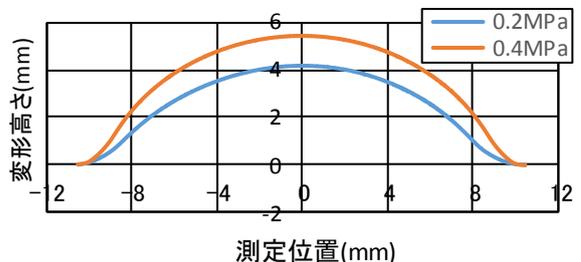


図11. SUS箔変形実験断面形状 (□30mm 治具)

図11に示すように、治具ポケット寸法を大きくすることで、治具エッジ部から3mm程度で生じる形状の変化は図8と比較して滑らかになっており、変形高さも大きくなっていることが分かる。これは、治具ポケット寸法を大きく

することで、□20mm 範囲内の SUS 箔表面温度のばらつきが低減するとともに、同領域内でセラミックス治具への放熱量が低下したことにより、到達温度が高くなったため、□20mm 範囲内での SUS 箔の変形が、□20mm ポケット治具使用時よりも均一に変形したためだと推察できる。

図 12 に□20mm ポケット治具及び 30mm ポケット治具を使用して厚さ 80 μ m の SUS 箔を加熱したときの SUS 箔表面温度を示す。200A から 260A の範囲内で、□20mm 治具での加熱より□30mm 治具を使用した方が高い温度に昇温可能なことが確認できる。

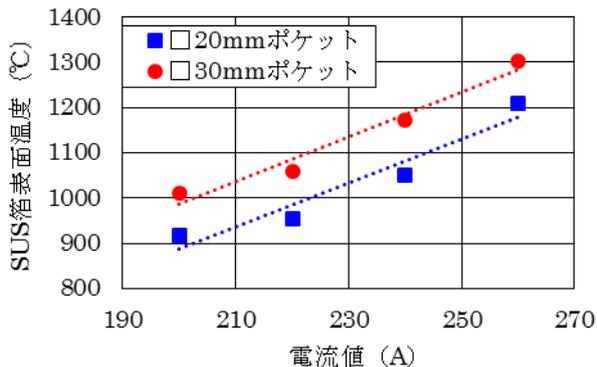


図 12. セラミックスポケット寸法の SUS 箔温度へ

3.3 平面マスターを用いた SUS 箔成形実験

これまで得られた SUS 箔変形実験の結果を基に、金型入れ子外周形状を成形する実験を実施した。入れ子外周形状はコーナーR3mm の□20mm で、高さ 1.5mm 以上とした。この形状を成形するためには、変形高さ 5mm となる変形量が確保できれば十分である。SUS 箔成形装置電動アクチュエーター上部にセラミックス平面マスターを固定し、厚さ 80 μ m の SUS 箔の変形高さが 5mm となるように、でチャンバーB 内を 0.35MPa に加圧した状態で、220A を通電し 1060 $^{\circ}$ C に加熱し SUS 箔成形実験を行った。図 13 に示す下治具□20mm ポケットから平面マスター上面までの距離 L を加熱開始前から 1.91mm で固定し、加圧、加熱を行った。断面形状を図 14 に示す。

平面マスターは加熱開始前から L=1.91mm で固定した状態で、変形高さ 5mm となる成形条件で成形しても SUS 箔は□20mm \times 1.9mm の内側に押し付け成形することができな

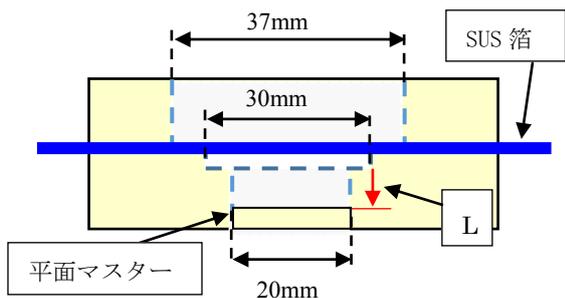


図 13. 平面マスターまでの距離 L (mm)

かった。

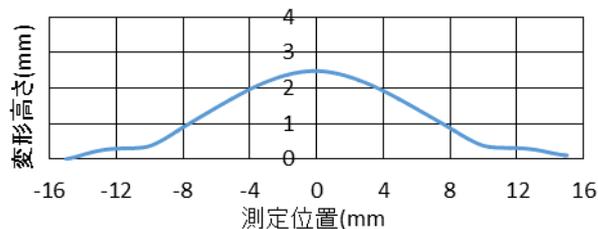
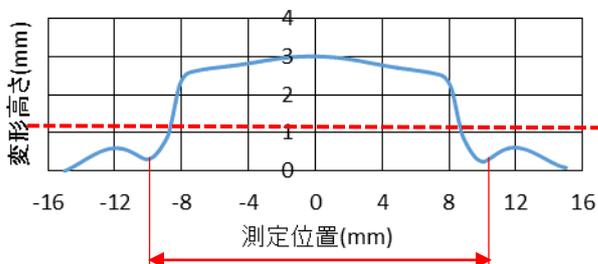


図 14. 平面マスター固定状態での成形実験

次に平面マスターを L=4.56mm に固定した状態で加圧、加熱を開始し、平面マスター上昇前に十分な表面積が確保できるように変形させた後、マスターを L=1.91mm まで上昇させて成形を行った。その結果を図 15 に示す。



セラミックス治具ポケット寸法 (20mm)

図 15. 平面マスター加熱後移動での成形実験結果

平面マスターを下げた状態で、SUS 箔を変形させた後平面マスターを上昇させることで、加熱前から平面マスターを上昇させた状態より□20mm \times 1.9mm の内側に SUS 箔を充填できることが分かる。しかし、図 13 での L=1.91mm の高さは測定位置 0 の位置から破線までの高さであるが、図 15 に示すように□20mm ポケット位置まで十分に成形できておらず、更に深い位置まで押し込まれている。これは、ポケット形状を□30mm とすることで、図 11 に示すように変形形状は滑らかになったが、□20mm 領域内での温度分布が生じているためだと思われる。今回の実験では予めチャンバーB を加圧した状態から SUS 箔を加熱するため、SUS 箔全体が目標温度に到達する前に徐々に変形し、セラミックス治具に接触した時点で放熱を開始し SUS 箔に温度分布が生じたためだと思われる。

そのため、SUS 箔を□20mm 範囲内で図 11 より更に均一に変形させるため、チャンバーB を真空にした状態で SUS 箔の加熱を開始し、□20mm 内の SUS 箔温度が目標温度に到達した後 (加熱開始 5 秒後) 加圧する実験を行った。図 16 に電流値 220A で加熱した後、ガス圧 0.4MPa で加圧した時の断面形状を示す。

加熱後に加圧することで、□20mm の治具ポケットエッジ部から段差無く変形していることが確認できる。変形高

さが図 10 の結果と比較して低くなるのは、SUS 箔が加熱された状態でチャンバーB 側にガスが流入することにより SUS 箔が冷却されたためと思われる。

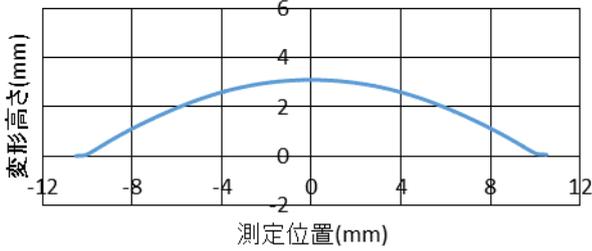


図 16. 加熱後加圧で成形した SUS 箔断面形状

そのため、加熱前の加圧と後加圧で同じ変形高さになるよう、前加圧はガス圧 0.3MPa、電流値 200A、後加圧は 220A、0.4MPa と異なる条件で成形した時の断面形状を図 17 に示す。

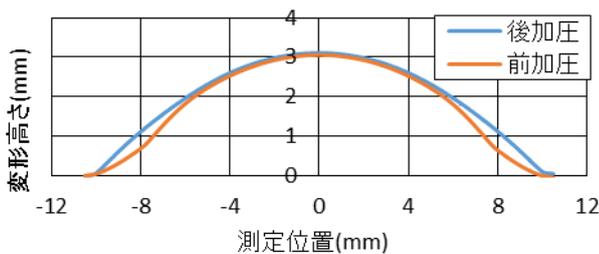


図 17. 前加圧－後加圧成形形状比較

加熱後、加圧することで、 $\square 20\text{mm}$ の治具エッジ部から均一に変形しており、前加圧とは形状が異なることが確認できる。

図 15 の平面マスターを用いた成形実験と同じ電流値 (220A) とガス圧 (0.35MPa) で加熱、加圧の順序を逆にして成形形状を比較した。その結果を図 18 に示す。

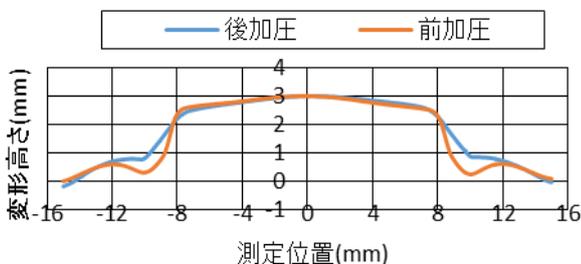


図 18. 平面マスター成形実験における加圧順序の

今回の実験条件では、前加圧も後加圧も図 18 に示すように $\square 20\text{mm} \times 1.91\text{mm}$ 内前面に SUS 箔を押し込むことはできなかったがその結果には違いが生じた。2つの工程での

成形結果を比較すると、後加圧は $\square 20\text{mm}$ ポケットのエッジ部から全面がポケット方向に変形しているのに対し、前加圧では図 15 同様エッジ部近傍は逆方向に押し込まれている。これは前加圧の方が $\square 20\text{mm}$ 内の変形量が大きいが、温度分布が生じるため平面マスターで押し込んだ際、 $\square 20\text{mm}$ ポケット内に広がらず、余分な SUS 箔が逆方向に押し込まれたためである。しかし、図 17 の結果及び図 18 からも分かるように後加圧ではポケット内側前面に SUS 箔を押し付けるだけで表面積を確保するのは加熱温度、ガス圧力の関係から困難だと思われる。そこで第一工程として前加圧で十分な表面積を確保した後、第二工程として、 $\square 20\text{mm}$ の範囲内を均一に加熱した状態でチャンバーB 内にガスを充填し、SUS 箔を均一に変形させながら横方向に広げポケット内側に押し付ける方法を用いることとした。

第一工程として平面マスターを $L=5.2\text{mm}$ で固定し 0.5MPa で加圧した状態で、210A で 10 秒加熱後 $L=3.15$ まで上昇して一旦加熱、加圧をストップし、 $L=4.06$ まで下降させる。第二工程で、230A で 5 秒加熱した状態で 1.1MPa に加圧し $L=1.67$ まで上昇させた。断面形状を図 19 に示す。

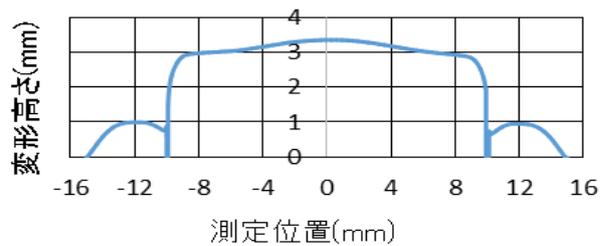


図 19. 2 工程での成形実験断面形状

前加圧成形と後加圧成形を組み合わせることで、図 19 に示すように $\square 20\text{mm}$ のエッジ部から SUS 箔が変形し凹形状の壁部に沿って成形されることが分かる。測定位置 10mm の箇所では形状が変形高さ 0mm になっているのは側面壁部が垂直であるための測定エラーによるものである。

3.4 小型電子スイッチ形状成形実験

これまでの実験結果を基に小型電子スイッチ形状 4 個取り金型をモデルとした成形実験を行った。図 20 にモデル形状を示す。製品形状部の高さは 0.19mm である。

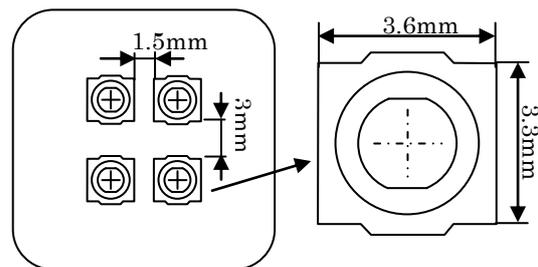
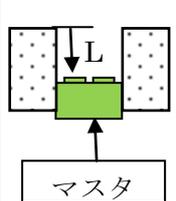


図 20. 小型電子スイッチ金型モデル

マスター型材料には黒崎播磨(株)製高純度アルミナセラミックス MA995 を使用した。成形工程を表 1 に示す。

表 1. 小型電子スイッチ成形条件・工程

工程	SUS温度	圧力	L	
0	20℃	1.1MPa	4.5mm	
1	938℃	1.1MPa	2.5mm	
2	300℃	0MPa	3.5mm	
3	1284℃	1.35MPa	2mm	
4	300℃	0MPa	2.5mm	
5	1334℃	0MPa	1.5mm	
6	1334℃	1.4MPa	1.5mm	

加熱された SUS 箔がマスター型に接触した時点で放熱により温度が低下するが、3.1 で述べたように一定時間加熱を継続すれば再度上昇することが確認できている。平面マスターを使った予備実験において、厚さ 80 μ m の SUS 箔を使用して再上昇温度が 1000℃となる条件を調べた結果 13000℃で 1 分以上の過熱が必要なことが分かった。このため表 1 の最終加熱温度及び継続時間は 1334℃で 1 分 40 秒とした。

図 21 に示すように、入れ子外周部である凹形状に関しては \square 20mm で形状転写はできたが、製品部形状である高さ 0.19mm の凸形状部は形状底面隅部まで SUS 箔を押し込めておらず、高精度に転写することができなかった。このような微細形状細部の転写ができなかったのはガス圧不足が原因と思われる。

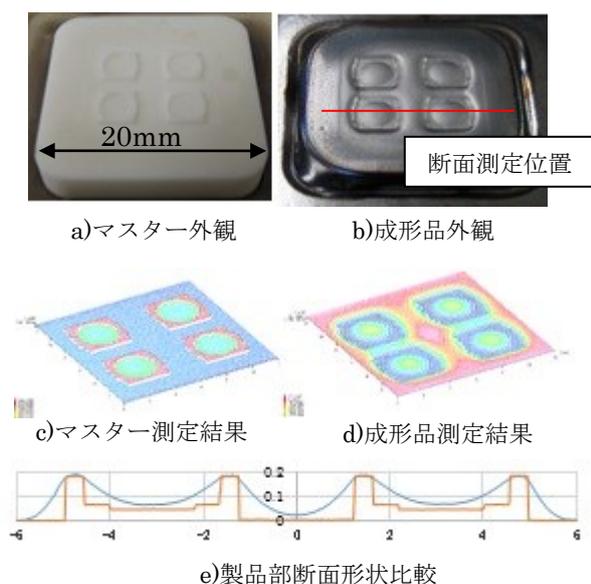


図 21. 小型電子スイッチ成形実験結果

4. まとめ

今回の研究で以下の結論を得た。

- 1) 通電加熱を利用した金属箔の真空・圧空成形装置を開発した。
- 2) 金属箔の成形には、予め成形に必要な表面積を確保する工程と確保された金属材料をマスター型表面意押し付ける工程が必要であることが分かった。
- 3) 開発装置を使った成形では凹形状は精度よく転写できるが凸形状は圧力不足のため底面隅部の形状が転写できなかった。
- 4) 高精度の成形にはSUS箔のセラミック治具及びマスター型接触時のSUS箔温度低下対策が重要であることが分かった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 谷川義博・中村憲和・他 6 名：2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，73-74(2008)
- 2) 三戸正道・小林政義・安田星季：北海道立工業試験場研究報告，No. 308，83-96
- 3) 瀬沼武秀：天田財団受精研究成果報告書，Vol. 24，52-56