

[A29]赤外線照射支援によるマイクロ流体チップの精密溶着技術の開発

知能機械工学専攻 山田研究室
0534041 清水直紀

1. 緒言

生体医療分野への微細加工技術の応用の一つにマイクロ流体チップがある。マイクロ流体チップは、基板の上にマイクロメートルサイズの流路（マイクロチャネル）を形成したもので、同時並行かつ高速で多数のタンパク質や DNA 等の分析を実現するチップである。近年、プラスチック製チップがディスプレイで量産性に優れることから注目を集めている[1]。

プラスチック製マイクロチップ作製にあたっては、Fig.1 に示すように、溝が予め形成されたプラスチック基板と蓋の役割をもつプラスチック平板を接合する手法がある。主な接合技術には熱伝導加熱を利用した溶着で、熱板による熱プレス溶着、または熱したロールを用いた熱ロール溶着[2]などがある。この方法は、試料を加熱するための板などを試料と接触させた状態から加熱・冷却しなければならないため、試料を加熱する時間以外にも、型を加熱・冷却する時間を必要とする。

一方、プラスチック試料に赤外線透過性を有する透明ヒートシンク材料を接触させた状態で赤外線を照射することにより、プラスチック表面の温度上昇を抑えながら、溶着面近傍を急速加熱し溶着する手法（Fig.2）が提案されている。

本研究では、クロス型マイクロ電気泳動チップを成形モデルとした溝付き基板と平板状の蓋との溶着を対象として、透明ヒートシンクを用いたハロゲンランプふく射加熱による精密溶着を試みた。熱伝導加熱溶着と比較しつつ、溶着によるマイクロチャネル断面形状の変形に及ぼす入熱条件の影響等を調べた。

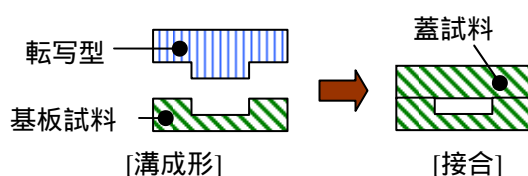


Fig.1 マイクロ流体チップの作製手順

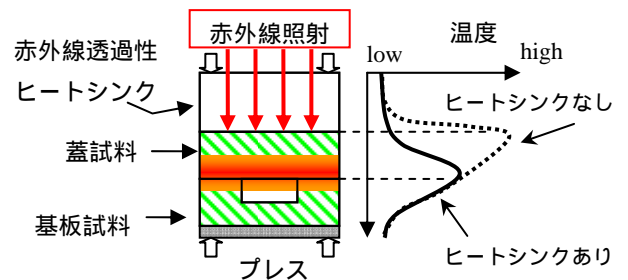


Fig.2 赤外線ふく射加熱溶着の原理

2. 実験方法

2.1 試料

溝を有する基板及び蓋の材料には、ともに非晶性環状オレフィンコポリマー（COC、 $T_g=80$ 、 $MFR(190 \cdot 2.16kgf)=30g/10min$ ）を用いた。

試料は、まず射出成形により溝が無い平坦な円板（直径 22mm、厚さ 1mm）を作製した。平坦な円板はそのまま蓋として用いた。これとは別に、平坦な円板の片面にプレス成形（Fig.1 の左図）により、Fig.3 に示すようなクロス型マイクロ電気泳動チップをモデルとした十字架パタン（幅 $120\mu m$ 、及び高さ $44\mu m$ ）の溝を形成させた。これを溝付きの基板として、溶着実験に用いた。なお、射出成形でのゲートは、図中の位置に近い試料の周縁部に位置している。

Fig.4（実線）に COC 樹脂の吸収係数スペクトルを示す。COC 樹脂は可視域の波長に対しては透明であり、赤外域では吸収が多くみられるため、ハロゲンランプによる加熱が十分可能である。

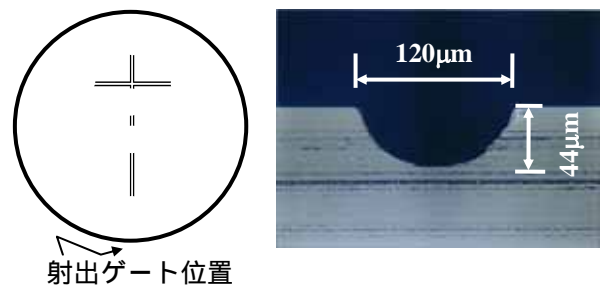


Fig.3 COC 樹脂製基板に形成した溝形状

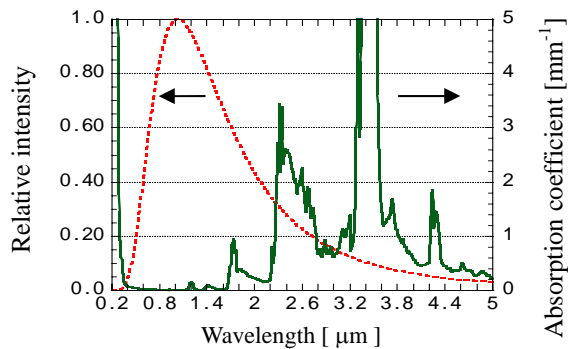


Fig.4 ハロゲンランプの放射スペクトルと
COC樹脂の吸収係数スペクトル

2.2 赤外線ふく射加熱溶着

2.2.1 装置構成

Fig.5 に赤外線ふく射加熱溶着に用いた装置の概略を示す。光源には、ハロゲンランプを用い、精密油圧プレス装置に組み込んだ。プレス機の上型には透明ヒートシンクとしてサファイア円板（厚さ10mm）を設置した。ハロゲンランプは、Fig.4（破線）に示すような放射強度スペクトルを有している。サファイアは、波長 0.4~5 μm の光に対して、高い透過性を有している。試料を保持する下型には、サファイア円板（厚さ2mm）を設置した。上下型の温度はヒーターにより制御した。また、ハロゲンランプから照射された光強度は、Fig.6 に示すように中心にピークがある空間分布を有している。

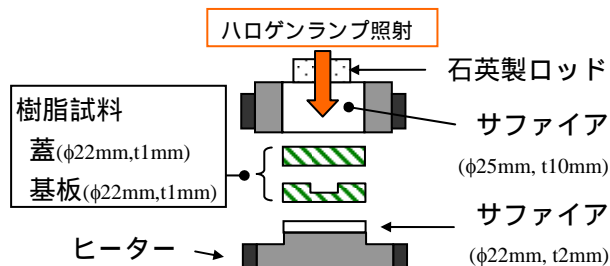


Fig.5 赤外線ふく射加熱溶着の装置構成

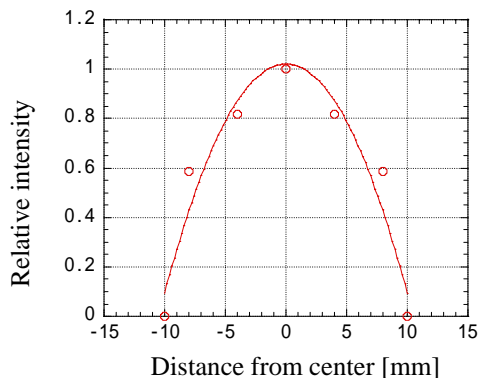


Fig.6 ハロゲンランプの照射強度の空間分布

2.2.2 溶着手順

Fig.7 に溶着手順及び Table 1 に溶着条件をそれぞれ示す。温度 60 に予め設定しておいた上下型間に試料を挿入し、圧力 0.07MPa で型締する。型締状態で、上型を通して試料上面からハロゲンランプを所定の光パワー（43.9W, 22mm）で所定時間（8~20sec）照射することにより溶着を試みた。照射後は、そのまま型締状態で 10sec 保持（冷却）する。試料は、サファイアなど周囲の型に放熱することで冷却される。その後、下型を下降させ、試料を離型した。

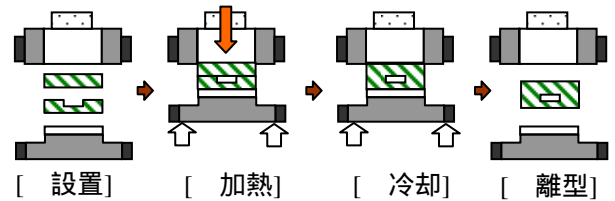


Fig.7 赤外線ふく射加熱溶着の溶着手順

Table 1 赤外線ふく射加熱溶着の条件

照射強度	43.9W, 22mm
上下型温度	60
型圧力	0.07MPa
照射時間	8~20sec
冷却時間	10sec

2.2.3 マスクの利用

赤外線ふく射により試料全面を加熱すると、マイクロチャンネル部分が熱変形することが予測される。そこで、マイクロチャンネルの大部分に対して放射強度の強い光が過度に直接照射されないように、マスクを用いて溶着を試みた。Fig.8 に示すようにマスクは、厚さ 50 μm のアルミニウム製テープでマイクロチャンネルの十字パタンの縦方向を覆う矩形形状とし、Fig.9 に示すように厚さ 8mm サファイア円板と 2mm サファイア円板の間に挿入した。マスクの寸法は長さ 14mm とし、幅 1~3mm の間で変化させ、溶着に及ぼすマスク寸法の影響を調べた。

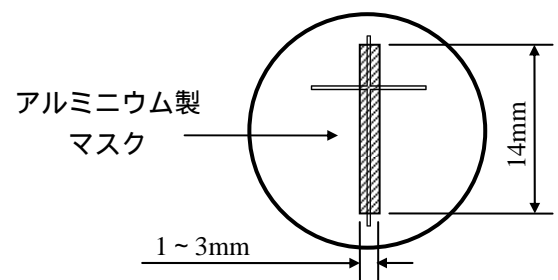


Fig.8 マスクの形状

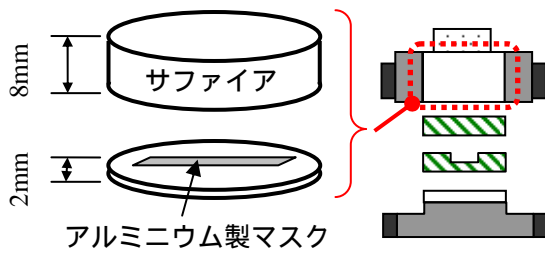


Fig.9 マスクの挿入位置

2.3 熱伝導加熱溶着

2.3.1 装置構成

熱伝導加熱溶着で用いた装置構成を説明する。短時間で加熱・冷却ができるように、加熱プレス工程と冷却プレス工程を分離した。Fig.10（左）に加熱プレス機の装置の概略を示す。赤外線ふく射溶着よりも上型を高温にする必要があるため、上型に300℃まで温度制御可能なホットプレートを設置した。加熱後の試料は、迅速に冷却工程に移すことができるように、溝付き基板と蓋を重ね合わせた上下面をサファイアで挟み込んで、試料ユニットとして扱った。Fig.10（右）に冷却プレス機の装置の概略を示す。加熱プレス機で加熱した試料ユニットを上型と下型の間には挿入する。手動式ジャッキにより下型を上昇させて試料ユニットを加圧する。

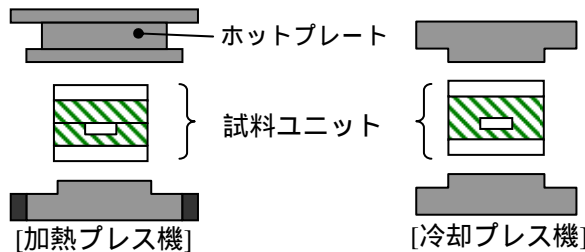


Fig.10 熱伝導加熱溶着の装置構成

2.3.2 溶着手順

Fig.11 に熱伝導加熱溶着の溶着手順の概略及びTable 2 に溶着条件をそれぞれ示す。予め上型と下型を一定の温度（上型：120～200℃、下型：60℃）に予熱しておく。そこに試料ユニットを挿入し、下型を上昇させ型締（0.07MPa）する。熱伝導加熱により試料の接合面が溶融し、溶着される。一定時間（10～1000sec）加圧後、下型を下降させ、試料ユニットを取り出す。

次に、取り出した試料ユニットを素早く冷却プレス機の上型と下型（20℃）の間には挿入する。手動ジャッキにより下型を上昇させ型締（0.07MPa）する。試料ユニットの熱を上下型に放熱することで冷却する。一定時間（10sec）保持した後、下型を下降させ試料ユニット及びサファイアを離型した。

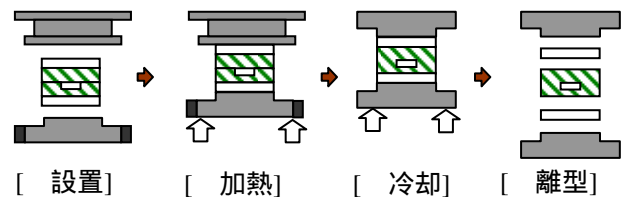


Fig.11 熱伝導加熱溶着の溶着手順

Table 2 熱伝導加熱溶着の条件

上型温度（加熱時）	120～200
上型温度（冷却時）	20
下型温度（共通）	20
型圧力	0.07MPa
加熱時間	10～1000sec
冷却時間	10sec

2.4 マイクロチャンネル断面形状の評価

マイクロチャンネルの断面形状の変形に及ぼす溶着条件の影響を調べた。マイクロチャンネル断面の形状保持率は、Fig.12 に示すように溶着前の基板試料に形成されている溝の深さ H_2 に対する、溶着後のマイクロチャンネル部の形状の厚さ H_3 の割合を形状保持率（Shape retention） $R = H_3 / H_2 \times 100[\%]$ として定義した。まず、マイクロトムを用いて溶着したCOC樹脂溶着試料のマイクロチャンネル部の断面を切り出し、表面形状測定顕微鏡を用いて溶着状態を観察し、 H_2 及び H_3 を測定した。測定位置はFig.3（左）に示す6点とし、平均値とバラツキを評価した。

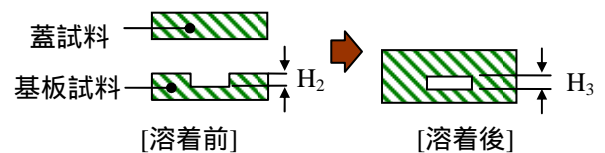


Fig.12 溶着前後の形状測定箇所

3. 結果および考察

3.1 赤外線ふく射加熱溶着

マスクがない状態で溶着を試みた結果、接合面全体を溶着するのに必要な最低照射時間は、12secであった。しかし、マイクロチャンネルの位置と形状保持率が0%になった。これは、照射するハロゲンランプからの光強度が、中心に強い空間分布を持つ結果であると考えられる。

マスクを用いて溝付き基板と蓋試料の溶着を試みた場合について、Fig.13 にマスク幅と形状保持率の関係を示す。また、Fig.14 に溶着したマイクロチャンネル（位置）の断面写真を示す。溶着条件として照射時間を12secとした。Fig.13の結果は測定位置6点の形状保持率の平均値、エラーバーは測定位置6点の最大値と最小値を表す。

マスク幅が 3mm のとき、マスクの下方にある接合面の一部が溶着できなかった。一方、マスク幅が 1mm 以下のとき、マスク部分の形状保持率が低下し、バラツキも大きくなった。マスクの下方にある接合面は、その周辺部分からの熱伝導により溶着したものと推察する。マスク幅が広いと、マイクロチャネル近傍に熱が十分に伝わらず、逆にマスクが狭いと、マスクの効果小さくなるものと考えられる。

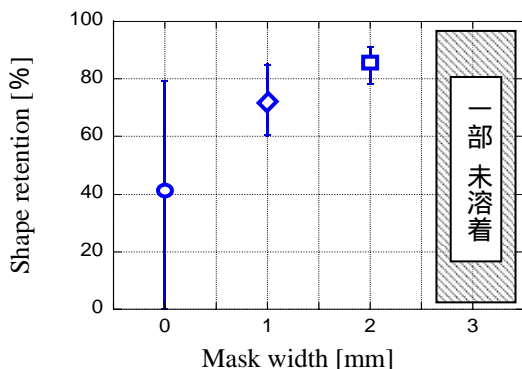


Fig.13 マスクを用いた赤外線ふく射加熱溶着での形状保持率



Fig.14 マイクロチャネルの断面写真(位置)

3.2 熱伝導加熱溶着

Fig.15 に熱伝導加熱溶着でのマイクロチャネルの断面形状の変形に及ぼす加熱時間及び型温度の影響を示す。溶着条件は、上型温度を 120、150、180、200 とし、加熱時間を 10~1000sec の間で変化させた。Fig.15 の結果は測定位置 6 点の形状保持率の平均値、エラーバーは測定位置 6 点の最大値と最小値である。各上型温度において溶着できた最短時間のみを示している。なお、上型温度が 120 のときは、加熱時間を 1000sec としても溶着できなかったためデータはない。図より上型温度が高いほど短時間で溶着できるが、形状保持率の平均値とバラツキともに悪化する傾向があった。熱伝導加熱溶着は、加熱する型の温度を高くすれば、赤外線ふく射加熱並みの加熱速度が得られる。しかし、熱伝導加熱の場合、赤外線ふく射加熱のように極短時間での微小な領域に対する選択的な加熱が困難であるため、マイクロチャネル近傍での熱膨張や、加熱時間の長時間化によって、形状保持率が悪化したものと考えられる。

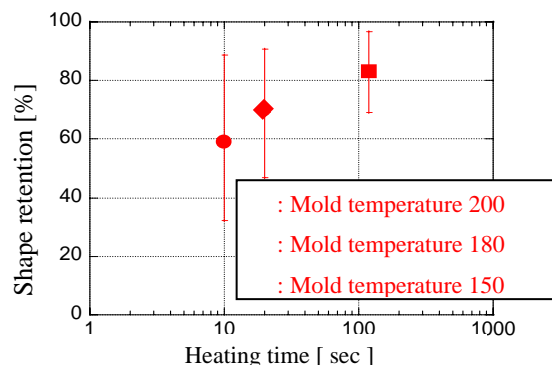


Fig.15 熱伝導加熱溶着での形状保持率

3.3 赤外線ふく射加熱溶着と熱伝導加熱溶着の比較

Fig.16 に赤外線ふく射加熱溶着と熱伝導加熱溶着における形状保持率と加熱時間の関係を比較した。図中 及び は熱伝導加熱溶着であり、それぞれ上型温度 200 及び 150 に対する最短溶着時間での形状保持率を表す。一方、 及び は赤外線ふく射加熱溶着であり、それぞれマスクなし及びマスクあり(幅 2mm)に対する最短溶着時間での形状保持率を表している。赤外線ふく射加熱溶着(マスクあり幅 2mm)が高い形状保持性を維持した上で短時間で溶着できることが明らかである。

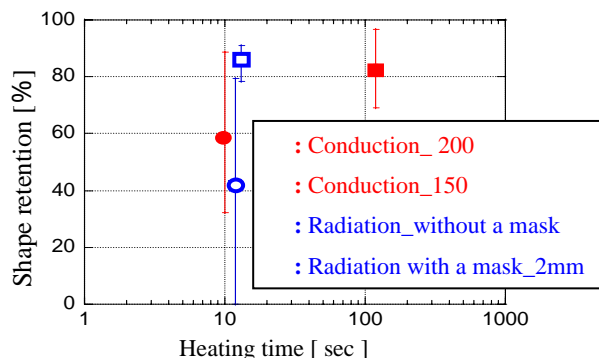


Fig.16 赤外線ふく射加熱と熱伝導加熱溶着の比較

4. 結言

クロス型マイクロ電気泳動チップをモデルとした溝を有する基板と蓋との溶着で、サファイアヒートシンクを用いたハロゲンランプふく射加熱による精密溶着を試みた。光を遮蔽するマスクを用いた精密な入熱の制御により、本手法は、熱伝導加熱と比べて、マイクロチャネル断面形状のバラツキを低く抑えつつ、基板と蓋とを高速で溶着できることを明らかにした。

参考文献

- [1] 化学とマイクロ・ナノシステム研究会, “マイクロ化学チップの技術と応用”, 丸善(2004)
- [2] 渡辺博夫, 井筒浩, 渡辺謙二, “マイクロ電気泳動解析用 i-チップ”, 日立テクニカルレポート, No.40, pp.29-32(2003)