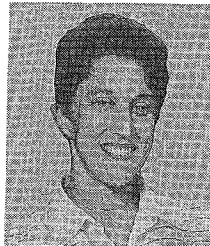


① マイクロキャストイングによる シェイプデポジション製造 SDM*

クリスチナ・アモン**, スーザン・フィンガー**,
ロバート・マーツ**, フリッツ・プリンツ***,
ケビン・シュマルツ**, リー・ワイス**, 福田 収一 (訳)



クリスチナ・アモン

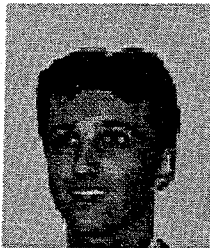


スーザン・フィンガー

Shape Deposition Manufacturing with Microcosting**

by Cristina Amon**, Susan Finger**, Robert Merz**,
Fritz Prinz***, Kevin Schmalz**, Lee Weiss**,
Shuichi Fukuda (Translator)

キーワード：ラビッドプロトタイピング，フリーフォームファブリ
ケーション，マイクロキャストイング，シェイプデポ
ジション法



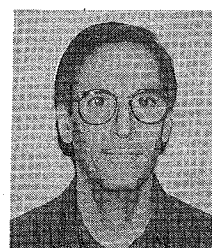
ロバート・マーツ



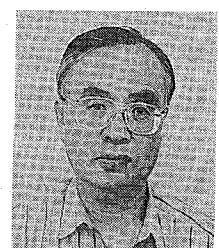
フリッツ・プリンツ



ケビン・シュマルツ



リー・ワイス



福田 収一

1. はじめに

専用のツールや人間の介入なしに，CAD モデルから直接任意の複雑な 3 次元形状を自動的に製作する方法は一般的に自由形状固体の製作 (Solid Freeform Fabrication: SFF) と呼ばれる。SFF の最新の応用例は，カスタムツーリング (例えば 射出成形のダイス) のような複雑な形状の金属構造の製作である。しかし現 SFF システムでは完全に密な鋼構造を直接には製作できない。プラスチック，ワックスのパターン，あるいはセラミックシェルを作りインベストメント鑄造法を利用した間接的な製作となる¹⁾。または粉末冶金の場合には多孔金属構造を製作し，次に低融点合金を浸透させる^{2,3)}，またはホットアイソスティックプレスを利用する⁴⁾。

マイクロキャストイングと呼ばれる新しい溶接を基礎にした方法である SDM (Prinz 1994 特許 No. 5, 278, 442, Weiss 1994 特許 No. 5, 301, 863, No. 5, 286,

573)⁵⁾ は機能的金属構造を直接製作することへの挑戦である。製作された構造は十分に密で，マイクロ組織も制御されており表面形状も許容でき，さらに寸法公差も許容範囲内である。SDM は，部品領域によって異なる材料で構造を製作できる特徴がある (Prinz 1994 特許 No. 5, 301, 415)。したがって，強度が必要な外部は鋼製シェルで，均一の加熱，冷却のために内部は銅製で，そしてツール表面の形状に応じた冷却チャンネルから構成される射出成形機のような複雑な内部をもつ加工機械の製作に適している。

マイクロキャストイングでは過熱金属小滴を溶着する。実験的，数値的手法を組み合わせて本方法の改善を行っている。実験ではマイクロキャストイングのパラメータ，例えばプラズマ電流，ワイヤ供給速度，小滴の位置，基板等の，小滴の特性や溶着層への影響を調べている。

製品の品質の定量的尺度は溶着層中のボイドの体積%である⁶⁾。マイクロキャストイングに関与する材料の組み合わせとパラメータの数が膨大なので，実験を行なうにはパラメータ設定に効率的な方法が必要になる。そこで実験計画法と最適サンプリング法を利用した多段階の

*原稿受付 平成 9 年 4 月 1 日

** カーネギーメロン大学 Carnegie Mellon University

*** スタンフォード大学 Stanford University

アプローチによりデータ収集を行なった。これにより、望む応答に関する制御因子の影響に関して、入手できるすべての知識を活用できるモデルが構築できた。

数値シミュレーションの目標は小滴の衝突時における界面の熱移動、固化する小滴の拡散挙動、そして個々の小滴の全体的な冷却過程とそれによる段階的な層形成の理解である^{7,8)}。実験により基板に衝突する小滴の寸法、温度、速度等の条件が明確となり、数値シミュレーションから基板部分的な再溶融量と冷却履歴が明らかとなった。SDM では不可避の残留応力の発生により強度の減少、歪み、公差逸脱、残留応力に起因した層間剝離を生じる⁹⁾。残留応力は熱的モデルから得られる空間-時間的な温度分布に依存し、層間の接合強度は温度により制御される基板の再溶融と本質的に結びついているので、力学モデルと熱的モデルを連成する必要がある。予測ツールは、プロセスパラメータの選択、望む基板の再溶融の実現、最終製品の残留応力の制御に役立つ。

2. SDM とマイクロキャストイング

SDM では材料の溶着と除去のプロセスの組合せにより製品を作りあげてゆく(図1)。各層のセグメントはネットシェイプに近い形で溶着され、さらに材料を溶着する前にネットシェイプに正確に加工される。各層は目的材と犠牲材で構成される。犠牲材は製品完成後で除去される。各層セグメントの溶着と加工順序は局部形状に依存する。数種の溶着法と材料の組み合わせが可能である。例えばステンレススチールと銅は種々の溶接法で溶着できる。銅は犠牲材として使用でき、硝酸で除去できる。

SDM の基本的考え方は、対応する表面の3次元形状情報は保持しながら、層状に積み上げて成形するためにCADモデルを最初層状にスライスする。層の厚さは部

品形状によって変化する。各層は更に層セグメント、または「コンパクト」に分割される。これは例えば、アングカットは機械加工できないが、前工程で加工したセグメントに溶着することで作製できるからである。各セグメントの各材料はニアネットシェイプで溶着される。溶着後各コンパクトはCNCミールングによりネットシェイプに正確に加工される。図1の例が示すような複雑な形状をした鋼/銅の製品では、まず銅を溶着し加工する。ついで銅によって形成されたキャビティに鋼を溶着する。最後にこの層を平坦に加工する。これに対し上部層は逆のシーケンスで形成される。すなわち銅を溶着する前に鋼を溶着し加工する。底部から二番目の層のような、もっと複雑な形状の層は、多相材料層を形成するために3個かそれ以上のコンパクトに分解する必要がある。

SDM はいくつかの方法で実行できる。一つの方法は、別々のCNCミールングステーションと溶着ステーションの間をロボットにより移動するパレット上に部品を構築する¹⁰⁾。別の方法はCNCマシンのZ軸ハウジングに溶着器具を直接装着する。上で述べたように、プラスチック、セラミックス、金属を含め、材料の組み合わせと溶着法にはいくつかの選択肢があり、SDM が使用できるか検討中である。金属の場合の一つの方法はマイクロキャストイングである^{11,12)}。これは過熱金属小滴を生じる溶接スプレイ法である(図2)。通常のプラズマ溶接トーチとチャージされたコンタクトチップから供給されるワイヤ間でアークが発生する。ワイヤーはアーク中で溶融し、小滴が十分溶融材を蓄積すると、その重力が、ワイヤーの表面張力に打ち勝つ。そこで、小滴はワイヤから落ち、重力で加速され、基板に衝突して平坦になる。サーマルスプレイングの小滴に比べ、マイクロキャストの小滴は直径がミリのオーダーである。プラズマトーチは相当過熱し、体積/表面の比が大きいマイクロ

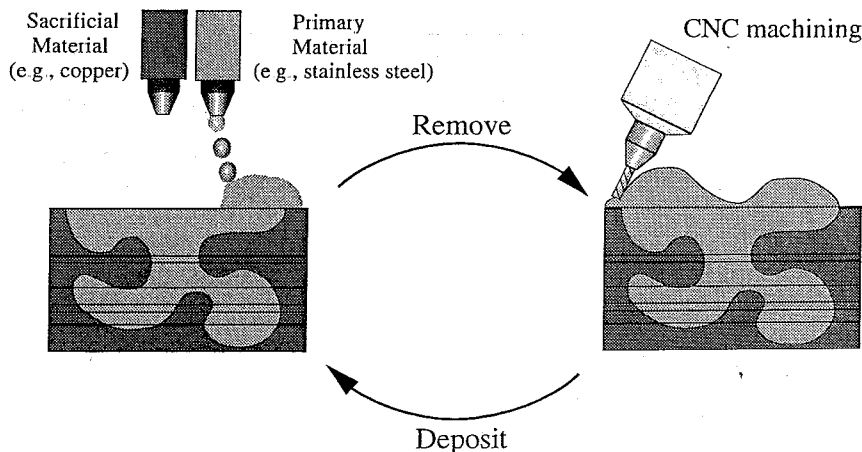


図1 SDM法

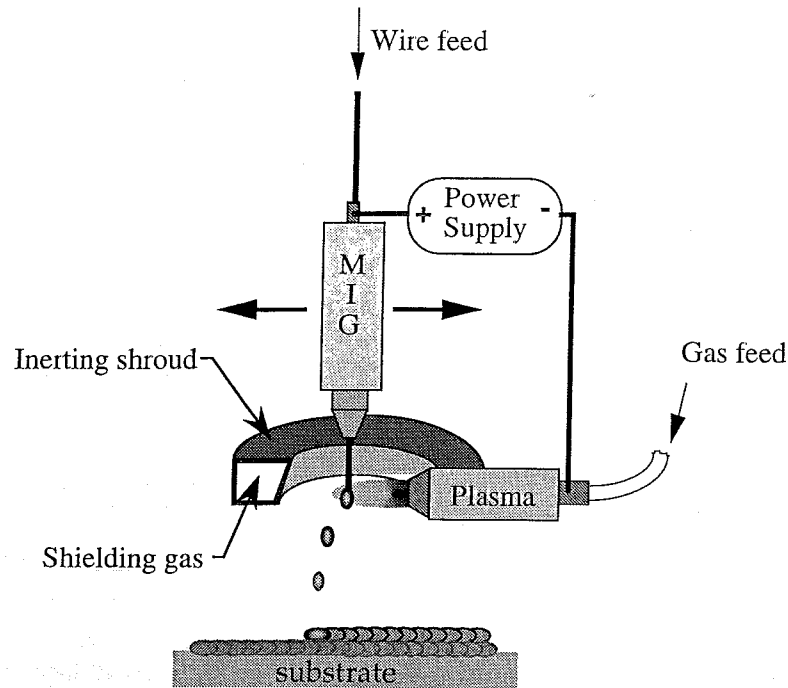
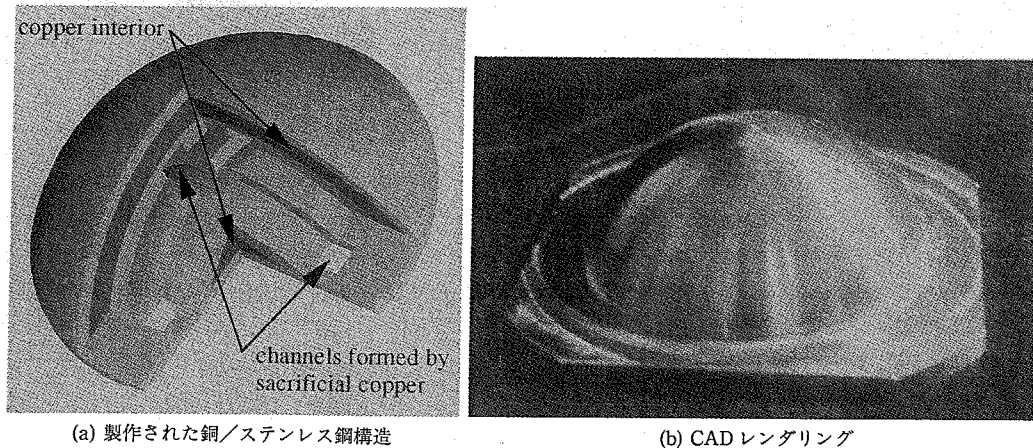


図2 マイクロキャストイング



(a) 製作された銅/ステンレス鋼構造

(b) CAD レンダリング

図3 SDMで製作した銅/ステンレス鋼構造

キャストの小滴を生成する。そこで、この小滴は落下中も過熱状態を保持し、衝突時に基板を再溶融して金属的な接合を形成する。再溶融を促進し残留応力を軽減するために基板を予熱しても良い¹³⁾。

酸化を制御するためには、小滴と基板を不活性ガスでシールドすることはきわめて重要である。マイクロキャスターを環境チャンバ中に置く方法も可能ではあるが、高価である。もっと簡単な方法は小滴と作業領域をシールドガスの層状のカーテンで局部的に覆う方法である。私達はPraxair, Inc.の市販のシールド被覆装置を利用した。マイクロキャスト法重要な利点として、運用コストが安く、プラズマトーチ、電源、ワイヤー

フィード機構、不活性ガス被覆のような器具等が市販で得られる。

機械加工だけでは製作不能な、SDMを用いて製作した部品の1例を図3に示す。この部品は半球形状構造をしており、図3(b)のCAD図面に示すように、外側シェルは308ステンレススチール製、内部は銅製で、その形状に合うチャンネルを有する。

3. 研究内容

私達のマイクロキャスト法に関する研究の一つの重要な目標は再溶融現象、プロセスの熱履歴、生成され

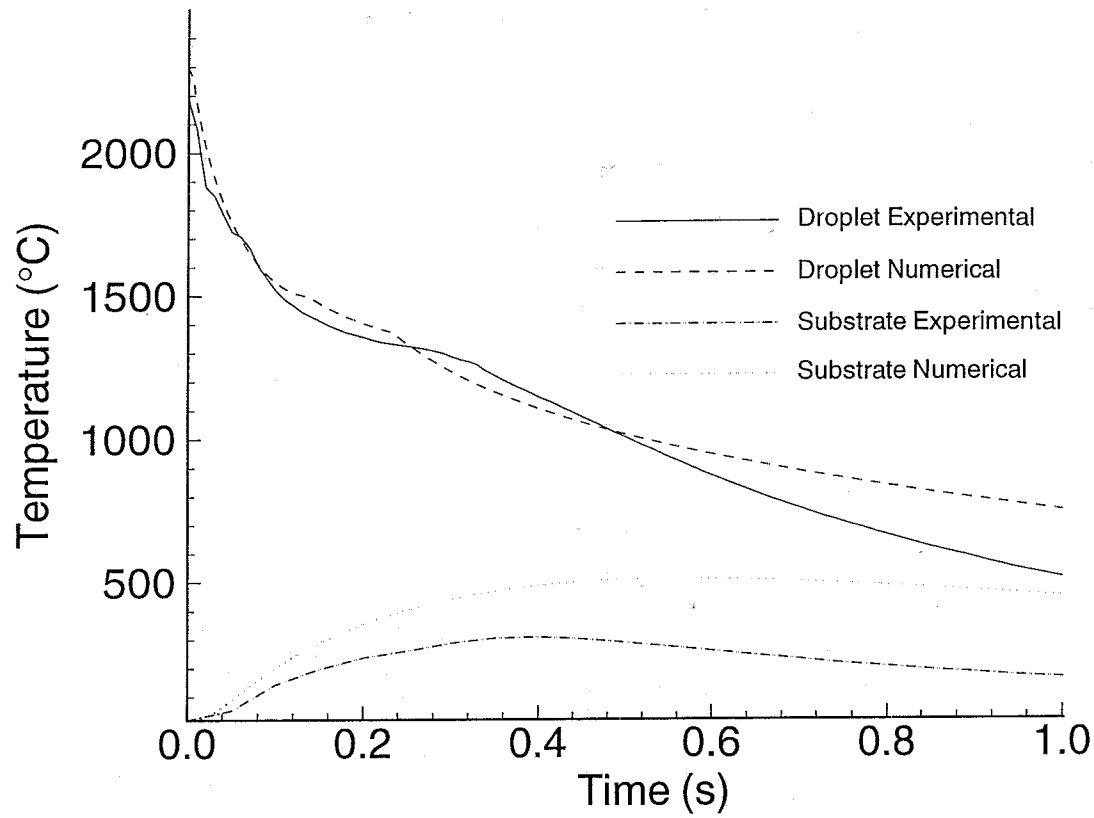


図4 炭素鋼のマイクロキャストの水滴と基板の実験と数値シミュレーションによる温度履歴

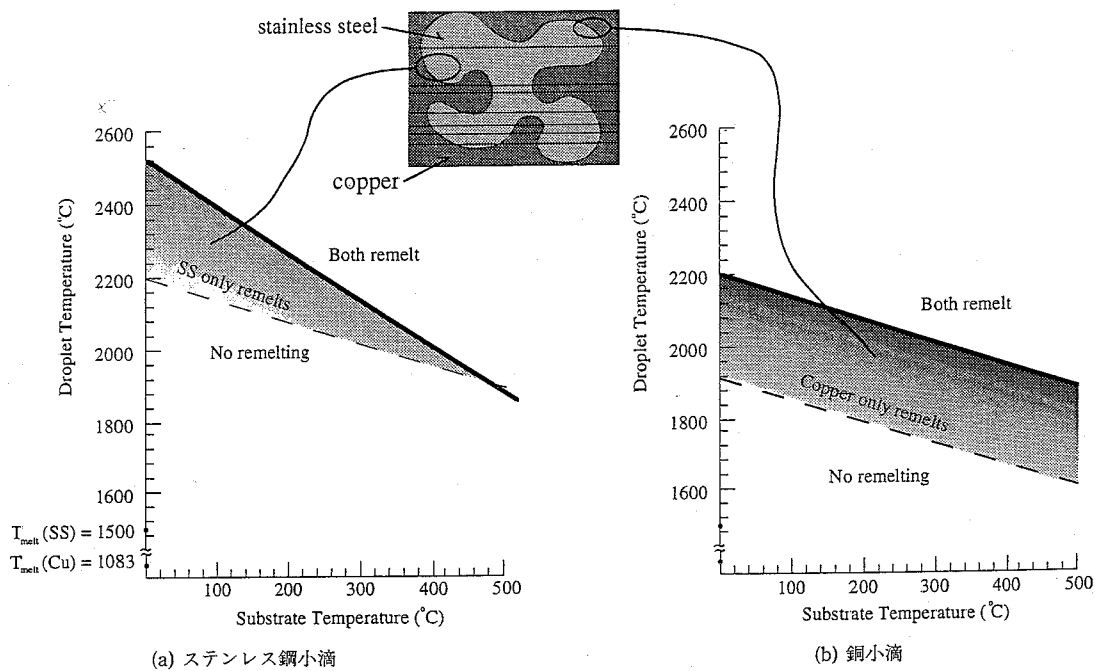


図5 溶融曲線

る力学的応力、ボイドのない高品質の層を形成する小滴の挙動の理解である。これらの事項を予測できれば最終製品の品質を最適化し、溶融条件と冷却速度を制御して材料特性を向上し、溶着材よりも低融点の犠牲支持構造を保護し、熱応力を制御するプロセス因子が選択できる。この目標を達成するために、熱量測定、熱電対、光学的全相学の技術とスチール、高速度写真を使って実験を行った。さらに、ステファン問題の解析解を使って界面の熱的初期条件を調べた。熱量測定と熱電対の実験によりモデルの初期条件が与えられ、熱モデルの検証もできた¹⁴⁾。全相学的なキャラクタライゼーションにより冷却速度の推定、結晶粒方位からの熱の流れの方向が可視化できた。図4は炭素鋼の小滴が炭素鋼の基板に衝突する場合の私達の初期の1次元モデルと熱電対の実験結果の比較である。小滴の熱履歴は当初はよく一致している。しかしその後の冷却課程では数値シミュレーションは温度を過大に予測している。基板の1次元数値シミュレーションはやはりよく合わせず、多次元モデルの必要性を示している。初期の熱モデルは単に熱移動しか考慮していない。しかし現モデルでは小滴の変形と固化まで考慮している。

4. 界面の再溶融

基板を部分的に再溶融して結合することは、セクション間で強い結合強度と非常に限定されたmmの範囲の合金ゾーンをもつ金属構造を形成するためには重要である。これに対して、支持/目的材の界面は切削力に耐えるだけの強度の結合があればよく、完全な強度の冶金的結合は必要ない。実際基板の再溶融はマイクロキャスト製品の表面の外観を保つためには最小限とする必要がある。許容できる支持/目的材の界面を創成するためには、各材料は異なる融点と異なる熱伝導率をもつ必要がある。より高い(低い)融点を持つ材料はより低い(高い)熱伝導率を有する必要がある。融点の違いが少なく、熱伝導率の違いが比較的大きい材料の組み合わせに対しては、同種材料から構成されるセクションだけを再溶融し、異材から構成されるセクションは再溶融しないマイクロキャストの条件が求められる。

銅と鋼の小滴と基板の組合せの再溶融条件を求めるために私達は解析的なステファン問題を利用して、最初の最小の小滴と基板の条件を決定した¹⁵⁾。銅とステンレススチールの小滴と基板の再溶融に必要な条件を図5に示す。実線が両基板の再溶融に必要な初期条件を示す。銅とステンレススチールの間の熱伝導率と拡散率の相違により異種材料のいずれの場合も過剰な再溶融を避けることができる。ステンレススチールの小滴は銅よりも容易にステンレススチールの基板の再溶融を引き起こす。これに対して銅の小滴はステンレススチールの基板よりも低い温度で銅の基材を再溶融する。例えば銅(溶融温度=1083°C, $K=401 \text{ w/m}^2\text{C}$)を支持材として、308ステンレススチール(溶融温度1500°C, $K=14 \text{ w/m}^2\text{C}$)で製品を製造できる。鋼の小滴はそれ以前に固化した鋼を再溶融できるが、熱伝導率の高い銅は再溶融しないのでオーバハンク形状が生成できる。銅の基板の熱伝導率がステンレススチールの基板よりはるかに大きいため小滴がより早く固化し、したがってステンレススチール基板よりも広がらない。マイクロ組織のキャラクタライゼーションによっても界面の再溶融について研究が進められている⁶⁾。

5. 小滴の挙動

私達のモデリングの精度を向上するには、小滴の流体力学的挙動の十分な理解が必要である。ボイドの最小化は、連続する小滴が前の小滴にふりかかり、それをぬらせ、それらの間の間隔をなくす能力に依存すると考えている。私達は実験を行ない平坦な基板表面に小滴が衝突し、固化する挙動についてのデータを取集している¹⁶⁾。小滴に関するデータには、飛翔中の寸法、過度的な拡散挙動、最終形状と高さ、さらに推定冷却速度等を含む。私達は高速度写真を用いて、落下する飛翔中の小滴と過度的な拡散の画像をとらえた。また固化した小滴のスチール写真を用いて、小滴の最終形状へのパラメータの影響を定量化した。

高速度写真により衝突以前の落下する小滴の直径の計測と平坦な基板表面と衝突時の小滴の動きの観察ができた。小滴の直径はプラズマ電流の関数として若干変化する。

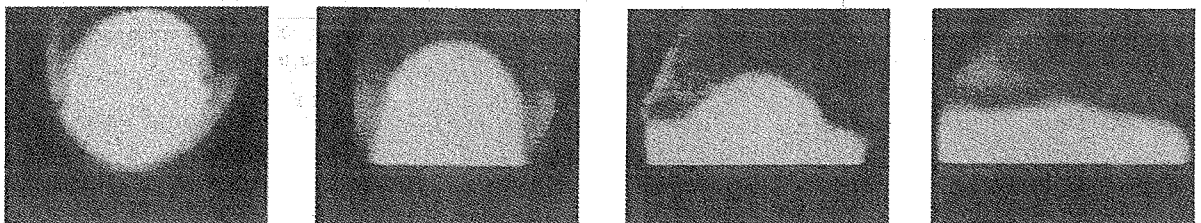


図6 高速度写真によるステンレス鋼の小滴の拡散(衝突時と衝突後0.001, 0.002, 0.003秒後の画像)

ることがわかった。銅とステンレススチールについては、小滴の直径はプラズマ電力のレベルの増加に伴ってプラズマ電力の設定値の全範囲の約5%減少する。過度的な小滴の拡散は、最終的な固化した小滴の形状以上に化する。そしてこの小滴の固化前の流体的挙動は基板の材料と基板の粗さ (Rs) に影響される。平坦な基板表面 (Ra=0.1~0.2 mm) では、粗い表面 (Ra=0.8~1.2 mm) より10%から40%多く表面上に拡散する。最終的な小滴の形状は、パラメータの変化や溶着条件にほとんど影響を受けない。これは最終的な小滴の形状に小滴の流体的な特性 (表面張力) が重大な影響を与えることを示唆している。すべての場合、ステンレススチールのほうが銅の小滴よりもはるかに過度的な最大拡散の減少が顕著であるにもかかわらず、銅の小滴はステンレススチールの小滴よりもはるかに大きく拡散する。図6に示す画像は、5000 フレーム/秒のフィルムスピードで記録された。これは、最初に基板に衝突してから0.003秒後に最初の小滴の拡散が最大となる間的小滴の約25枚の画像を示している。ステンレススチールと銅の両方とも最終的な固化の前に小滴が数回揺動し、約0.1秒でそれが終了している。この写真は、数値モデル結果に検証の根拠を与えるだけでなく、拡散中の過度的な小滴と基板の接触角に関する貴重な情報を与えている。

6. 結 論

308 ステンレススチールを目的材、銅を犠牲材として用いて、CAD モデルから複雑な形状を製造できるSDM マイクロキャスト法を開発した。溶着物中のボイドは、ベイジアン統計を用いた実験データ収集法により減少できた。この方法により実験回数を減少でき、最高品質を得るプロセスの設計空間を見出すことができた。私達はボイドの根底原因について調べ、ボイド除去の最良の方法を捜し、パラメータの設計空間の体系的な表現法の開発を行なっている。

現在進行中の研究からマイクロキャスト法に関する初期条件や、プロセスのパラメータがこれら初期条件

に与える影響に関して重要な知見を得た。冶金的結合を向上するための界面における再溶融を引き起こすための条件と、マイクロキャスト法によってこれらの条件が達成できることを解明した。異種材料を接合した時の界面での相互作用も解明した。初期の数値モデルによって熱応力、力学的応力の挙動の予測に部分的に成功した。さらに解析的な計算により予測した再溶融の挙動を確認し、冷却の早期段階における、センターラインの小滴の領域での熱モデルの結果と実験的な冷却履歴とが一致した。私達は現在、多次元モデリング、流体力学的挙動、改良した熱的モデルに基づく応力の熱力学モデルを含めてこれらのシミュレーションの改良に尽力している。

参考文献

- 1) E. Sachs, et al: Manufacturing Review, 5-2 (1992), pp. 118-126
- 2) T. Pintat, et al: Proc. 1995 Solid Freeform Fabrication Symp., (1995), pp. 72-79
- 3) E. Sachs, et al: Proc. 1995 Solid Freeform Fabrication Symp., (1995), pp. 448-467
- 4) C. C. Bampton and R. Burkett: Proc. 1995 Solid Freeform Fabrication Symp., (1995), pp. 342-345
- 5) L. E. Weiss, et al: Journal of Thermal Spray Technology, 1 (1992), pp. 231-237
- 6) I. G. Osio and C. H. Amon: Research in Engineering Design, 8-4 (1996), pp. 189-206
- 7) C. H. Amon, et al: Proc. Tenth Int. Heat Transfer Conf., 7 (1994), pp. 321-326
- 8) C. H. Amon, et al: ASME J. of Heat Transfer, 118 (1996), pp. 164-172
- 9) J. L. Beuth and S. H. Narayan: Int. J. of Solids and Structures, 33-1 (1996), pp. 65-78
- 10) R. Merz: PhD Dissertation, Technical University of Vienna, (1994)
- 11) R. Merz, et al: Proc. 1994 Solid Freeform Fabrication Symp., (1994), pp. 1-8
- 12) C. H. Amon, et al: ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, (1996)
- 13) R. K. Chin, et al: Mechanics of Materials, (1997)
- 14) K. S. Schmaltz, C. H. Amon: Proc. TMS, Metal Spinning, Strip Casting, and Slab Casting, (1996), pp. 145-158
- 15) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford, (1959), pp. 282-291
- 16) K. S. Schmaltz, et al: Proc. ASME National Heat Transfer Conf., (1997)