

数値解析を用いた部分めっき膜厚分布予測法

Numerical Analysis for Predicting Partial Plating Film Thickness Distribution

川島 雅人* · 加嶋 仁** · 光武 義雄*** · 豊田 憲治***
Masato Kawashima Hitoshi Kashima Yoshio Mitsutake Kenji Toyoda

部分めっき処理において、液体と気体の界面を有する自由表面流れを考慮した流体解析とこれにより導き出された噴流形状に対し、電極の過電圧現象を考慮した電流分布解析とを連成させることによって、微細な膜厚分布状態の予測法を開発した。

典型的な電極・マスク構成における狭ピッチコネクタの部分めっき処理に対するこの予測法の結果は、膜厚実測値と比較して十分な精度が得られることを確認している。

本予測法は、従来の試作実験による検討と比較して開発コストの削減と開発期間の短縮を可能とし、新たな部分めっき工法の開発や量産ラインでの部分めっき工程の早期立上げに貢献できる。

In the partial plating process, a method of predicting the thin film thickness distribution conditions has been developed by coupling the fluid analysis for considering the free surface flow containing liquid and gas boundaries, and electric current distribution analysis for considering the overvoltage phenomenon of the electrode against the jet shape derived from the fluid analysis.

The result of applying this prediction method to the partial plating process of narrow pitch connectors using a typical electrode and mask configuration has proven to have sufficient accuracy when compared with actual measured values.

This prediction method enables the reduction of development cost and time compared with conventional prototyping experiments and contributes to the development of a new partial plating process as well as the early startup of a partial plating process in a mass-production line.

1. ま え が き

現在、設計現場において、CAE（Computer Aided Engineering：計算機支援工学）が盛んに利用されている。たとえば、製品ライフサイクルの短縮や市場での品質トラブルの多発を受け、開発リードタイムの短縮や開発コストの削減、および後工程におけるトラブル発生の未然防止のため、従来の試作品による評価を代用するあるいは補完する技術としてCAEが活用されている。さらに近年の製品の高機能・高性能化に伴い、試作実験そのものに高度な技術や技能が必要となっており、数値解析でしか評価できない場合も発生したりするなど、CAEが必要不可欠となっているケースもある。

また、近年のコンピュータ性能の向上や市販の解析ソフトウェアの発展と普及により、従来はCAE専任者が実施

していた高度な解析も設計者自らが手がけるようになり、より迅速かつ効率的にCAEが活用されている。

一方、ものづくりの現場においても種々の開発業務でCAEが利用され始めてきている。これらは生産加工CAEとも呼ばれ、塑性加工解析や樹脂流動解析などに代表される。しかし多くの場合、複雑な非線形解析の実施や、各解析に対して特有の運用ノウハウを必要とすることから、現場における活用はなかなか進んでいない。

さまざまな製品に搭載される制御機器やデバイスなどは、微細成形技術、精密組立技術、表面処理技術などの多様なものづくり技術により製品化され、さらに小型・多機能化の要求により、非常に高度な技術が必要となってきた。そのなかでも、微細かつ均一な膜厚分布形成を要求されるめっき技術では無駄の少ない効率的なめっき処理方法の確立が求められており、従来の経験的なアプローチだけでな

* 制御機器本部 制御生産技術センター Production Engineering Center, Automation Controls Business Unit

** 制御機器本部 コネクタ事業部 Connector Division, Automation Controls Business Unit

*** 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

く、数値解析を用いた理論的なアプローチが非常に有効な手段となる。

そこで筆者らは、流体解析と電流分布解析を連成することで、めっき液流路形状を考慮した部分めっき膜厚分布予測法を開発した。これにより、従来の試作実験のみによるアプローチと比較して開発コストの削減と開発リードタイムの短縮が期待され、新しい量産ラインでの部分めっき工程の早期立上げに貢献可能と考える。

本稿では、流体解析と電流分布解析を連成した部分めっき膜厚分布予測法を提案し、これを狭ピッチコネクタに適用して実測値と比較することにより、その実用性を確認したので、その内容と特徴を述べる。

2. 高精度部分めっき

部分めっきの方法は、めっきを施したい部分にノズル状の噴射口からめっき液を直接噴射する方法と、めっき膜の不要な部分をマスキングし、そのマスクを通してめっき液を噴射する方法とに大別される。

めっきの品質評価には耐腐食性など多くの項目があるが、部分めっきの場合とはくにめっき膜厚の付き回りと呼ばれる膜厚分布が重要になる。これは、部分めっきの目的には、表面のぬれ性などを必要な部分にのみその効果を発現させ、逆に不必要な部分には発現させないこと等があるためである。また、材料費の合理化の観点から、たとえば比較的高価である金めっきを必要な部分にだけ付着させる、あるいは必要な部分であってもできるだけ薄くすることが要求されている。そのため、高電流密度領域と低電流密度領域における析出度合の差が大きい金めっき液が採用されるなどの理由から、精度の高い膜厚制御が可能な部分めっきが必要となってきた。

さらに、今後より小型化する製品に対しては、今まで以上に高精度な部分めっき処理を必要とすると考えられ、それには従来にない高精度な治具の作製や調整作業など、開発コストの増大が予想されている。

本章では、高精度部分めっきが必要な事例として狭ピッチコネクタを取り上げ、膜厚分布予測法について述べる。

2.1 狭ピッチコネクタ

狭ピッチコネクタは、基板対基板、あるいは基板対FPC (Flexible Printed Circuits) の接続用コネクタである。

近年、携帯電話などのデジタルモバイル製品の小型化に伴い、それに搭載される部品類も小型化のニーズが高まっている。それらを安定生産するには非常に高度なものづくり技術を必要とし、狭ピッチコネクタも例外ではない。デジタル信号に対する接触信頼性を維持・向上させながらの狭ピッチ化や嵌合高さの低背化が図られてきている¹⁾。図1に代表的な「狭ピッチコネクタ F4S」の概観を示す。狭ピッチ化に対しては、落下衝撃時の導通の瞬断を防止す

るため、ばね幅の減少に伴う接触力低下を補うばね形状が重要であり、さらに製造面ではプレスでの微細打抜・曲げ加工での端子ピッチ不良の防止が課題になる。一方低背化に対しては、嵌合ロック長の短小化による接触信頼性の低下だけでなく、はんだのリフロー処理時に端子部のはんだが接点部にまでぬれ伝わることによる接触不良の発生を回避する方策として部分めっき技術が用いられている。電気的接続が良好な金めっきを端子部から接点部まで連続的に施すとはんだぬれ性が良好なため、端子部のはんだが接点部にまで伝わる。これを防止するため、ニッケルめっきをその間の一部に露出させる。これをニッケルバリアと呼んでいる。ニッケルめっき膜は銅合金を下地として耐腐食性向上を担っている一方で、はんだにぬれにくい表面特性を有している。このため、高精度部分めっきによるニッケルバリア形成は金属表面の部分的なぬれ性の制御に有効である。

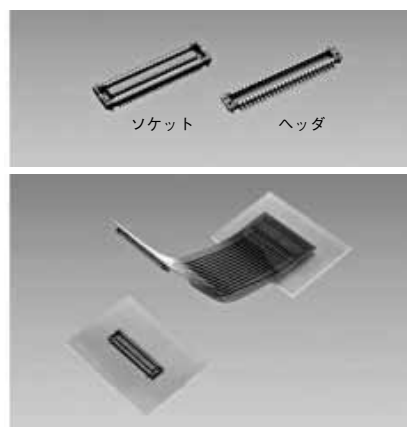


図1 「狭ピッチコネクタF4S」概観

2.2 スパージャ式部分めっき

スパージャ式部分めっきとは、スパージャマスクと呼ばれる微小穴を有する治具で非めっき部分をマスキングし、めっき膜を形成したい部分に対してのみに微小穴からめっき液を高速で吹き付ける技術である。図2にスパージャ式部分めっき処理の概要を示す。

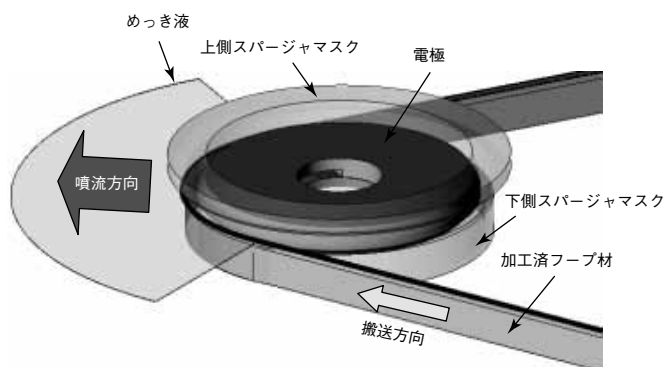


図2 スパージャ式部分めっき処理の概要

スパージャマスクは上側と下側とから構成され、内部には陽極となる電極が配置されている。プレス加工で櫛歯状に打ち抜いた後、曲げ加工でばね形状に成形したフープ材をマスクの外側に巻き付けるように固定し、リールトゥリール方式で搬送させることで連続めっき処理する。

高精度な部分めっきを実現するには上下のスパージャマスクの組立精度が重要で、試作での調整作業では多くの時間と費用を必要としており、またスパージャマスクは品種ごとに固有の設計になるため、数値解析を用いた事前予測による設計効率化が望まれている。

3. 膜厚分布予測法

開発した膜厚分布予測法は、めっき液流路形状を予測する流体解析、電極表面での過電圧現象を考慮した電流分布解析、および膜厚実測値データから得られた換算係数を用いた膜厚分布算出とから成る。

めっき自体は古くから行われてきた技術ではあるが、その物理現象は非常に複雑であり、不確定要素の多い量産めっきを想定した場合、膜の成長理論にまで踏み込んだアプローチは困難であることから、膜厚分布の算出は過去の技術蓄積データに基づく合せ込みにより行う。本予測法は、あくまで製造技術レベルとして容易に設計判断に活用でき、繰返し検討に対しても高ロバスト性の期待できる解析方法の確立を目的としている。

本膜厚予測法のフローチャートを図3に示す。

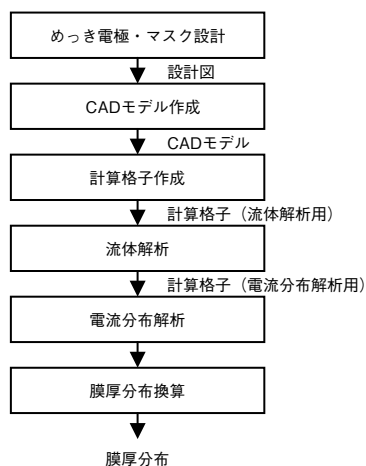


図3 膜厚分布予測法のフローチャート

めっき電極とマスクの設計図から、解析用CADモデルを作成し、さらに専用ソフトウェアを用いて計算格子を作成する。その際、流体解析だけでなく、電流分布解析まで考慮して作成する必要がある。最初の流体解析でめっき液の噴流形状を決定したあと、その節点座標値および格子構成データを抽出し、次の電流分布解析での計算格子とする。流体解析および電流分布解析には、それぞれ個別の市販ソフトウェアを用いている。膜厚分布換算では、めっき液種

ごとに実測値から決定された換算係数を電流分布解析で得られた電流密度に乗ずることで、膜厚分布を算出する。これら一連のデータ処理作業の一部は自動化をしており、業務の効率化を図っている。

本章では、狭ピッチコネクタの部分めっき処理に対し、典型的な電極・マスク構成で精度検証を行い、その結果について述べる。

3.1 流体解析

微小径ノズルからの噴流やマスクに設けられた微小穴を通過する流れなどでは、液体と気体の界面の挙動が流路の形成に重要な役割を果たすと考えられ、本膜厚分布予測法の流体解析では自由表面流れを考慮している。単一相での拡散解析によるめっき液流れの模擬も検討したが、計算格子作成の容易さや計算時間の短さなど利点はあるものの解析精度の面で現実の噴流形状と乖離しており、この結果をもとに次の電流分布解析を行っても、必要とする精度の膜厚分布予測ができないことを確認している。

自由表面問題にはさまざまな解析法が存在するが、本解析ではVOF (Volume of Fluid) 法と呼ばれる方法を用いる。これは、物理量とは異なる界面関数 (VOF 関数) を用いて自由表面を間接的に表現し、その移動方程式を解くことで界面の位置を決定するものである。VOF 関数値は、液体であれば1、気体であれば0、自由表面境界は0.5と定義される²⁾。VOF 関数値が0.5以上と計算された要素を液体の存在領域として判断することができ、本解析法において、空間領域を電界の存在するめっき液の領域と存在しない空気領域とに分けることができる。次の電流分布解析では、この電界の存在するめっき液の領域のみを抽出することになる。

図4に精度検証に用いた流体解析モデルを示す。

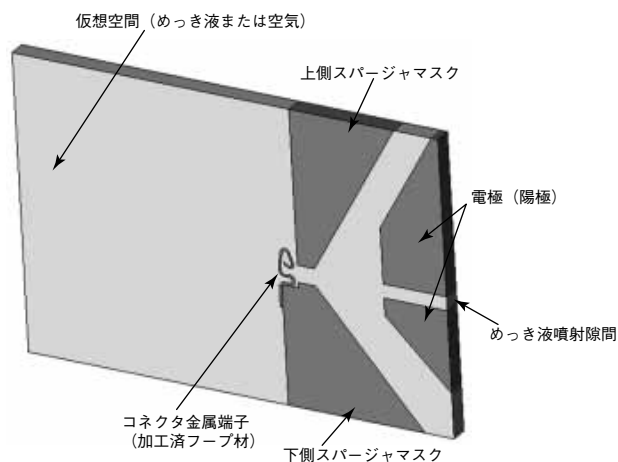


図4 流体解析モデル

コネクタ端子の接点部分への部分めっきを想定した電極およびマスクの配置になっている解析モデルである。単

純化のためにコネクタ金属端子1ピン分と1ギャップ分をモデル化している。流出境界での逆流を防ぐため、噴射抜け側の空間領域を広く設定している。流入部の境界条件は流速で設定し、その他境界部には圧力境界、対称境界または壁面境界を設定し、流れは乱流で高レイノルズ型標準K- ϵ モデルとする。また、解の精度確保には最小要素長として数 μm オーダが必要になることから、計算格子の分割はモデル全体に対して粗密を施し、実用的な計算時間で解が得られるようにその度合を調整している。

表1に解析に用いる材料物性値例を示す。本解析では、コネクタ金属端子表面のぬれ性を表現するため、表面張力および接触角を採用している。以下、その解析結果について述べる。

表1 自由表面解析に用いる物性値例

(a) めっき液	
密度 (kg/m^3)	1008
粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	8.9
表面張力 (N/m)	0.04
接触角 ($^\circ$)	73
(b) 空気	
密度 (kg/m^3)	1.205
粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.81E-05

図5に解析で得られた流速分布を示す。流れのある部分をベクトル表示している。一部にスパージャマスクでの跳ね返りがあるものの、コネクタ端子の接点部に集中的に吹き付けられ、その後は液溜りすることなく後方に抜けている。また、流出境界条件を設定した境界からの逆流もなく、安定して計算が収束終了することを確認している。

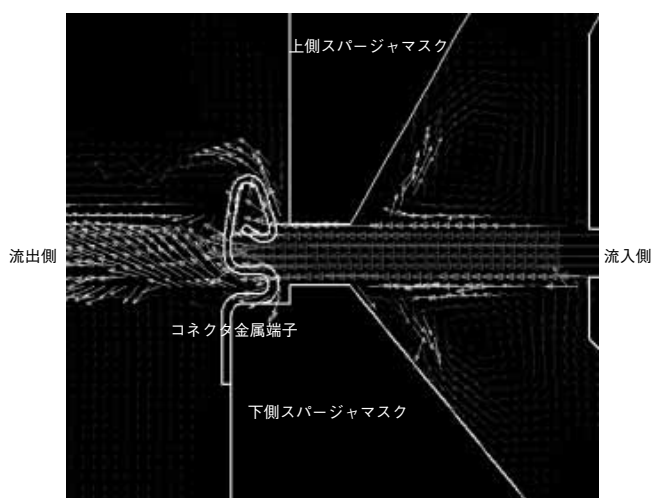


図5 流速分布結果

図6にVOF関数値分布を示す。VOF関数値の大きい計

算格子が強調表示されており、0.5以上をめっき液噴流形状に相当する部分と判断できる。

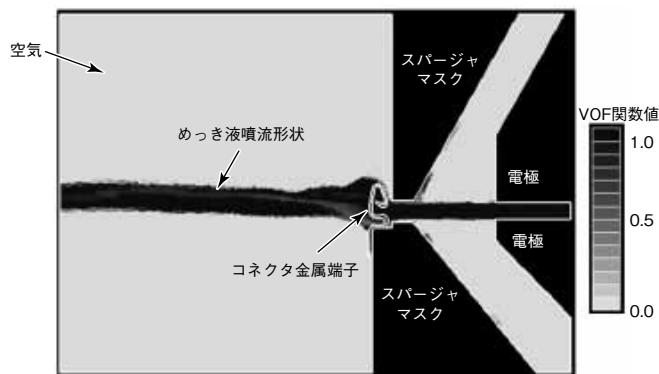


図6 VOF関数値分布結果

図7に抽出しためっき液噴流形状の計算格子を示す。この図ではめっき液と判定された計算格子だけでなく、固体部分であるコネクタ金属端子を併せて表示させている。これらの節点座標値および格子構成データが次の電流分布解析での計算格子データとなる。以下に、電流分布解析について述べる。

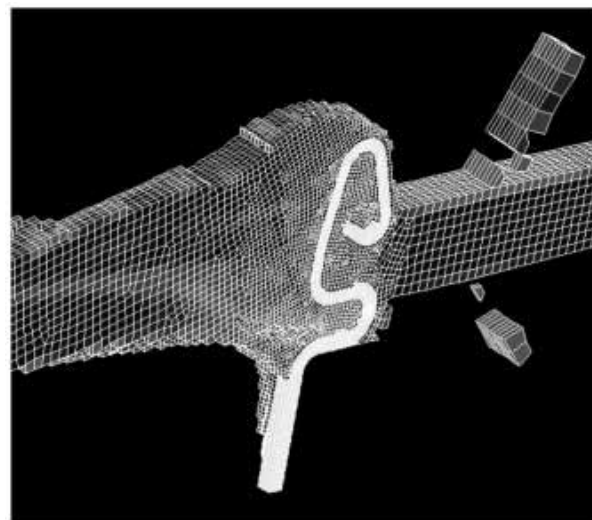


図7 めっき液噴流形状の計算格子

3.2 電流分布解析

この解析では、陽極と陰極の間に外部電圧を印加することで電解液中を電流が流れる定常電流場を計算する。基本方程式はラプラスの方程式であり、境界条件である各電極での電位は電極反応の進行による過電圧分を電源電圧に増減させて設定することで二次電流分布を計算する³⁾。一般的な条件におけるめっき時の電流密度分布の定量的判断には、この二次電流分布を用いる必要がある。過電圧は電流密度の関数になり、実測により求めることができる。図8に本検討で用いる過電圧特性を示す。同図から電流密度

が増加するに従って、過電圧が増加していることがわかる。このことは、電極近傍における電流密度の高い領域では電氣的抵抗が見掛け上増大して、電流の集中が緩和されていることを示す。過電圧を考慮しない解析の場合においては電界の集中する部分に電流が集中する結果となるが、実際のめっきにおいては電界集中部以外へのめっき膜の回り込みによる付着が生じており、過電圧の効果を考慮しなければ解析結果は大きな誤差を生じることになる。

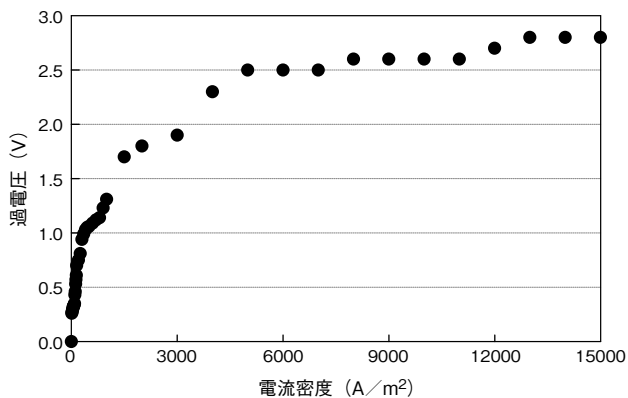


図8 電極の過電圧特性の例

図9に電流分布解析の計算格子モデルを示す。コネクタ金属端子側は陰極としての設定になる。めっき液の導電率は 4.2 S/m とする。また電流分布の初期条件として、コネクタ金属端子1ピン当りの全電流値 0.01 mA を設定する。なお、これら一連の条件設定は、計算格子作成ソフトウェアの機能を用いて自動処理し、作業の効率化を図っている。

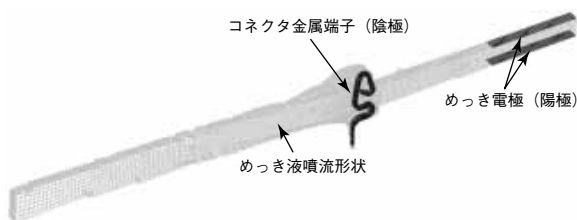


図9 電流分布解析の計算格子モデル

次に本検討により得られた電流密度分布について述べる。図10に得られた電流分布解析結果を示す。これはコネクタ金属端子の電極要素における電流密度分布である。流体解析によるVOF関数分布から、電極としての境界条件を設定していない部位には電流密度が発生しない結果になるのは当然であるが、境界条件を設定した部位では電場の幾何学的な形状で決定される電界集中だけでなく、電極の過電圧特性の影響を受けた分布形状となる。参考のため、実際に部分めっき処理したコネクタ金属端子の写真を示す。電流密度の高い部位のほかにも、金めっき膜が回り込み、付着していることがわかる。

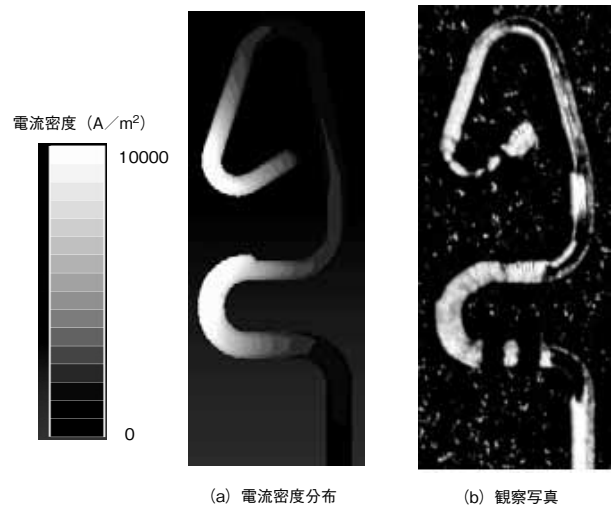


図10 電流分布解析結果

以上のことから、電極での過電圧による二次電流まで考慮した解析を行うことで、実際の部分めっきの膜厚付き回り性を検証できる。

3.3 膜厚分布換算

本予測法によってめっき膜厚分布を事前評価する場合、電流分布解析まで行ってコネクタ金属端子の電流密度分布の異なる複数案を相対比較するだけでなく、膜厚の絶対値まで予測できればより望ましい。膜厚分布は析出金属の電気化学当量などから算出されるが、本予測法では、めっき膜厚が電流密度に比例することを仮定した積算電流密度から簡易的に算出する。図2に示したように、スパージャめっきでは加工済みフープ材を連続処理しており、その搬送速度とめっき液噴出部の開口長さからめっき液の浸漬時間を算出することができ、それを得られた電流密度に乗ずることで積算電流密度を求めることができる。さらに、めっき液種ごとに膜厚の実測値から決定された膜厚換算係数を乗ずることで、膜厚分布として簡易算出できる。

図11に換算により簡易算出した膜厚分布と実測値との比較を示す。横軸はコネクタ金属端子を真直ぐに伸ばした場合の位置を表し、縦軸は膜厚である。表側を正側に、裏側は-1を乗じて負側に表示している。表裏ともにピークが存在し、裏側のピーク位置がメイン接点部分に相当する。電流分布解析による電流密度値の抽出の際、計算格子作成ソフトウェアの機能により節点のグループ化などで作業を効率化している。

この結果から、実測値と解析値とでは高低度合に多少の差はあるものの、ピーク位置はよく一致していることがわかる。膜厚の実測における分解能や測定位置精度を考慮しても、十分な精度が得られていると判断できる。

以上のことから、検討した流体解析と電流分布解析を連成させた膜厚分布予測法を用いて、部分めっきの膜厚分布の予測を実現できた。

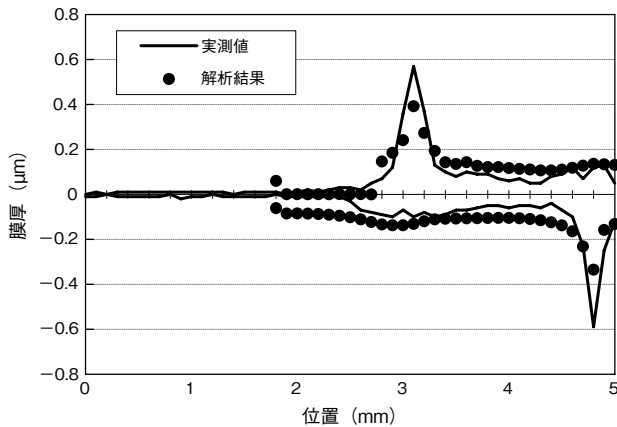


図11 膜厚分布換算値と実測値の比較

かされるようになれば、コンカレントエンジニアリングにおける強力なツールになると考えられる。

4. あとがき

部分めっき処理において、液体と気体の界面を有する自由表面流れを考慮した流体解析とこれにより導き出された噴流形状に対し、電極の過電圧現象を考慮した電流分布解析とを連成させることによって、微細な膜厚分布状態の予測法を開発した。

典型的な電極・マスク構成における狭ピッチコネクタの部分めっき処理に対するこの予測法の結果は、膜厚実測値と比較して十分な精度が得られた。

本予測法は、従来の試作実験による検討と比較して開発コストの削減と開発期間の短縮を可能とし、新たな部分めっき工法の開発や量産ラインでの部分めっき工程の早期立上げに貢献できる。

今後、適用事例の蓄積による解析条件の微修正や類似案件に対する雛形解析モデルの作成など、さらなる解析精度の向上および作業の効率化を図っていく必要がある。これら生産加工 CAE がものづくりの現場で有効活用され、さらには製品設計の初期段階における設計完成度の向上や品質の作込みといった開発のフロントローディング指向に活

*参考文献

- 1) 宮崎 洋二, 大倉 健治, 加嶋 仁: 基板対 FPC 接続用超低背狭ピッチコネクタ, 松下電工技報, Vol. 56, No. 3, p. 37-42 (2008)
- 2) 社団法人 土木学会 応用力学委員会 計算力学小委員会 編: いまさら聞けない計算力学の常識, 丸善 (2008)
- 3) 小原 勝彦: ウエムラ・テクニカルレポート, Vol. 24, p. 11-16 (1992)

◆執筆者紹介



川島 雅人
制御生産技術センター



加嶋 仁
コネクタ事業部



光武 義雄
先行技術開発研究所



豊田 憲治
先行技術開発研究所