

# シミュレーションによるめっき膜厚分布の均一化

## Regulation of Thickness Distribution in Plating Process by Numerical Simulation

岩本 達志 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部  
鈴木 靖庸 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部  
栗田 聡 航空宇宙事業本部相馬第2工場生産技術部

めっき、電着塗装などの表面処理は多くの製品の製造に欠かせない工程である。しかしこれらの工程では、複雑形状の対象物に対しては膜厚分布の均一化が課題となっている。これまで、施工条件の選定を作業員や技術者の経験に頼っていたため、理論的な改善が不十分であった。本稿では銅めっき工程を実例として、有限要素法 (Finite Element Method) による膜厚分布の推定を行い、効果を試験で検証することによって、施工設計ツールとしてのシミュレーションの有効性を明らかにした。

Coating processes, such as plating and electrodeposition painting, are important and indispensable in many manufacturing industries. However, in these processes, regular plating is not easily achieved for products with a complicated shape. Until now, we have tended to depend on the experience of manufacturers and technicians in actual practice, and have not conducted enough theoretical research into effective measures to solve such problems. The present study concerns the copper plating process. In it, we tried to estimate thickness distributions by using numerical simulation that uses the Finite Element Method and to control the thickness distribution by changing anode arrangements and the impressed electric current. The results of the simulation matched the thickness distributions of plating obtained by experiment. We therefore verified that simulation is an effective tool for increasing efficiency in plating.

### 1. 緒 言

めっき、電着塗装といった表面処理は、装飾、防食、表面硬化などを用途として、多くの製品の製造に欠かせない工程である。

しかし、これらの工程においては、対象物-電極(陽極:以下、陽極と呼ぶ)間距離の遠近によってめっきにおける電流密度の大小が支配されるため、複雑形状の対象物に対しては電流密度分布のばらつきが生じやすくなる。また、対象物の凹部では電流が流れにくく、膜厚も確保しにくくなることが一般的に知られている。当社で製造しているジェットエンジン部品へのめっきにおいても、その形状の複雑さから製品の一部において膜が付きにくく、全面に目標の膜厚を付与するために必要以上の処理時間を要している。

また、めっきは不適切な電流密度条件で通電すると、生成しためっき膜に、①曇り②ピンホール③焼け、などの外観不良をきたし、めっき膜そのものに必要な性能を与えることができなくなる<sup>(1)</sup>。

従来は、陽極配置や通電条件といった施工条件の選定を作業員や技術者の経験に頼っており、理論的な施工改善は不十分であった。

そこで、有限要素法 (Finite Element Method: 以下 FEM と呼ぶ) や境界要素法などの計算手法を用いたシミュレーションによって、ウェットプロセス (湿式工程) における電流・膜厚分布の把握も試みられてきた。これらは電気防食や、電着塗装・めっき関連工程を対象としてさまざまな場面で活用されている<sup>(2) (3)</sup>。

特に近年は、計算機性能の大幅な向上もあり、自動車ボディへの電着塗装やプリント基板へのめっき工程などを対象として、より詳細かつ複雑で大規模な解析が行われ、さまざまな汎用ソフトがリリースされるなど、シミュレーション技術にも大きな進歩がみられている<sup>(4)~(6)</sup>。

そこで、複雑形状の対象物に対するめっき工程を実例として、シミュレーションを用いて陽極形状・配置、通電条件の調整を図った。この結果、めっき膜の品質を確保しつつ、膜厚分布の均一性が改善できることを確認した。以下、その取組み例について紹介する。

### 2. 試験方法

まず、シミュレーションと実測値の比較を行い、シミュレーションの有効性および精度について確認を行った。

試験は銅めっき浴で、当社で製造しているジェットエンジン部品を模擬した円筒状のテストピースを対象 (陰極:

以下、陰極と呼ぶ)として実施した。陽極には銅陽極を用い、陰極と離して配置した。

膜厚分布のシミュレーションには市販の FEM 解析ソフトを用いた。このシミュレーションでは、陰極表面および陽極での反応抵抗を考慮した (1), (2) 式と、めっき槽モデル領域での (3) 式という二つの境界条件を基に、めっき槽全体に対して (4) 式に示すラプラス方程式を解くことで、めっき槽内の電位分布を得ている。そして、この電位分布と境界条件 (5) 式によって、対象物表面での電流密度が得られる<sup>(7)</sup>。通電量に応じてめっき膜が生成するため、膜厚が算出される、という流れである。

陰極表面

$$\phi = V_c - \eta_c(i) \dots\dots\dots (1)$$

陽極表面

$$\phi = V_a + \eta_a(i) \dots\dots\dots (2)$$

めっき槽モデル領域

$$\nabla\phi \cdot n = 0 \dots\dots\dots (3)$$

めっき槽内

$$\nabla^2\phi = 0 \dots\dots\dots (4)$$

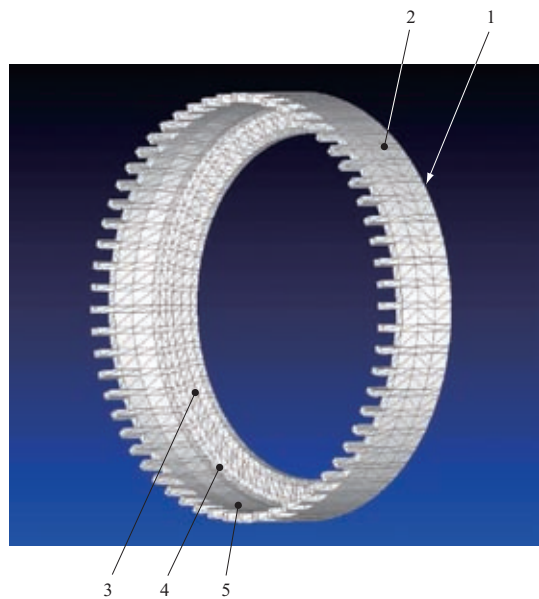
陰極および陽極表面

$$i = -\kappa\nabla\phi \cdot n \dots\dots\dots (5)$$

- $\phi$  : 電位
- $V_c$  : 陰極電位
- $\eta_c(i)$  : 陰極表面の電流 - 電位曲線
- $V_a$  : 陽極電位
- $\eta_a(i)$  : 陽極表面の電流 - 電位曲線
- $i$  : 電流密度ベクトル
- $n$  : 境界上の外向き法線単位ベクトル
- $\kappa$  : 電気伝導度

ここでは、試験時の陽極や陰極と同じ形状のモデルを作成し、通電条件も試験と同様に設定した。また、解析に必要な電気伝導度  $\kappa$ 、陰極、陽極各極表面での電流 - 電位曲線  $\eta(i)$  については、独自に実槽で採取したデータをそれぞれ導入している。

上述のとおり複雑形状の陰極においては、その凹凸に応じて膜厚分布のばらつきが生じる。そこで膜厚分布については、膜が厚く付きやすいと予想されるリング表面から、膜が付きにくいと想定されるリング凹面エッジ部まで、陰極の膜厚分布全体をとらえられるように、凹凸に応じて陰極の位置 1 ~ 5 (第 1 図) を選定し、それぞれに対して測定を行った。ここでは、このときの実測膜厚の最小値に対する比を表した (最小値 = 100 とする)。



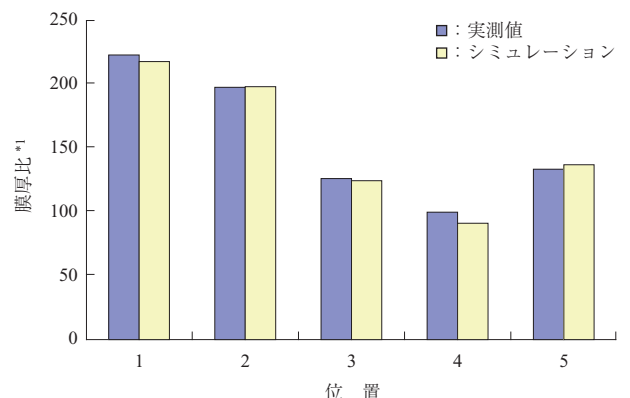
第 1 図 テストピース (陰極) の形状  
Fig. 1 Shape of test piece

最後に、シミュレーションを用いて陽極形状や配置、通電条件の調整を行うことで、膜厚分布の均一化が可能であるかどうかを検討した。

### 3. 結果と考察

試験およびシミュレーションの結果を以下に示す。

まず第 2 図を見ると、このテストピースではリングの凹面エッジ部 (位置 4) に最もめっきが付きにくいことが分かる。この位置における膜厚を 100 とすると、表面 (位置 1) では最も膜厚が厚く最小値の 2.2 倍となっており、位置によって大きく膜厚が異なることが分かる。また



(注) \*1: テストピースの位置 4 での実測値 (= 100) に対する比

第 2 図 電極を離して配置した場合のテストピースの各位置での膜厚 (同条件での実測最小値 = 100)

Fig. 2 Thickness at each position on the test piece in the case of typical anode arrangement ( minimum thickness of real distributions in the same condition by experiment = 100 )

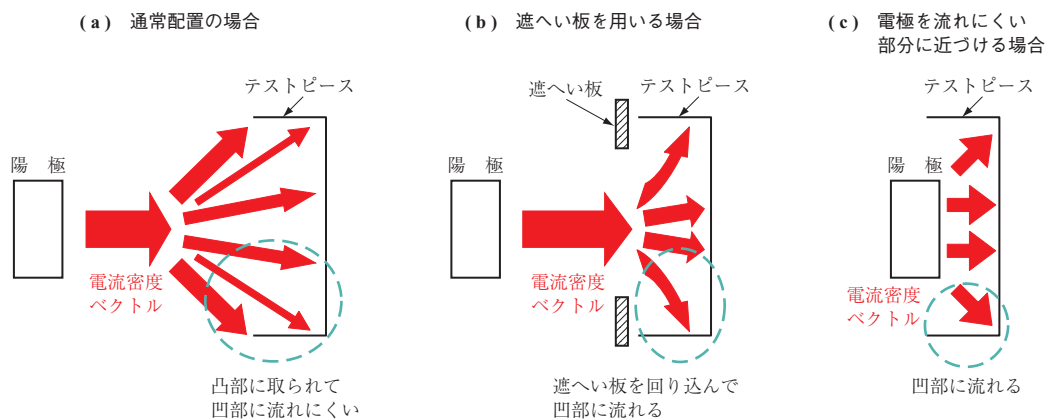
今回シミュレーションによって、膜厚のばらつきを実測分布と±10%の誤差で再現できることを確認した。

また、シミュレーション上で膜厚が均一化するような陽極配置および通電条件の変更を行った(第3図)。複雑形状に起因する陰極の膜厚のばらつきを低減する方法としては、①電流の流れやすい箇所(凹部)に絶縁材料の遮へい板もしくは補助陰極を設置して電流の集中を防ぐ(第3図-(b))②電流の流れにくい箇所(凸部)に陽極を近づけて電流を流れやすくする(第3図-(c))、などが考えられる。今回は②の考え方にに基づき、リングの凹面内部により多くの電流が流れるよう陽極形状を設計し、配置を変更した。

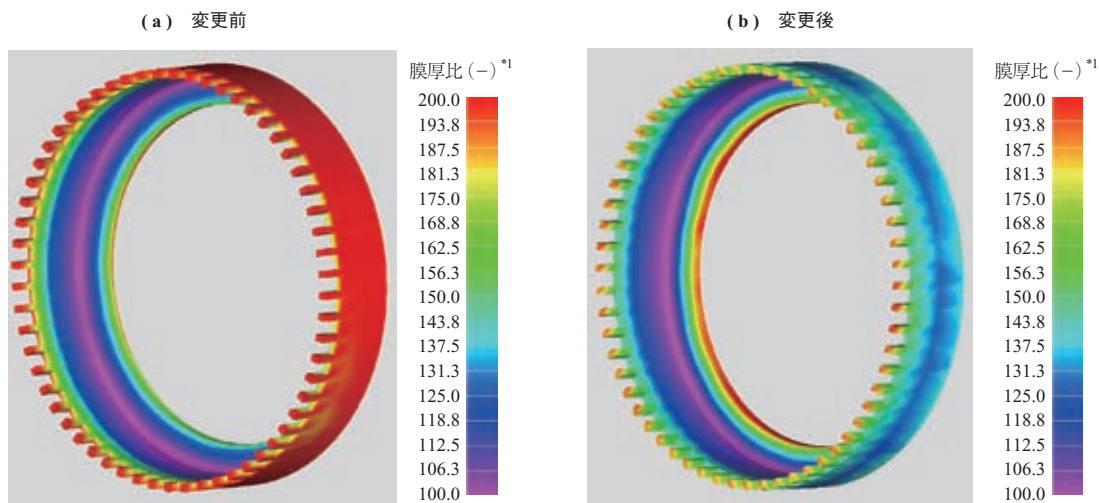
このように陽極配置を変更すると陰極の電流密度分布が変化しますが、めっき膜の品質を良好に保つためには、陽極や陰極全面の電流密度条件が適切な範囲となるよう、通電

条件や陰極-陽極間の距離を設定する必要がある。ここでは当社独自の測定によって把握した陽極、陰極各表面での最適電流密度範囲を基に、陽極の寸法や形状、陰極との位置関係、通電条件をシミュレーション上で検討・選定した。この結果、シミュレーション上で、めっき膜の品質を確保しつつ、側面に必要以上に付いていた膜厚を低減し、膜厚の均一性が改善可能な陽極配置、通電条件を見いだした(第4図)。

次に、実際にこの陽極配置および通電条件で試験を実施した結果、シミュレーションによる予測と同様に、外観不良もなく膜厚のばらつきを大きく改善することができた(第5図)。また、この陽極配置および通電条件の変更によって、実測で30%以上の陽極の金属消費削減が可能なのも確認できた。したがって、シミュレーションが工程の高効率化だけでなく、資源節約という面でも有効な設計

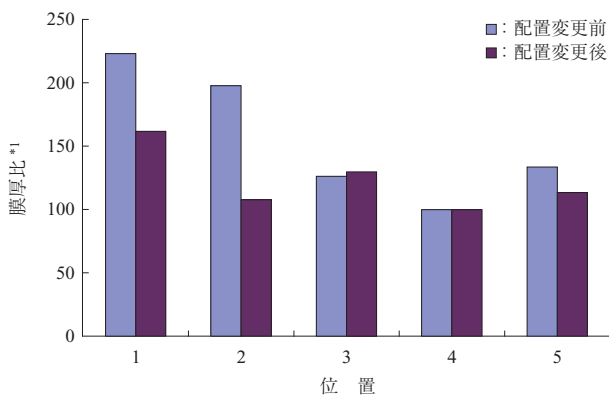


第3図 膜厚均一化のための方法  
Fig. 3 Methods for regulating thickness distribution in plating



(注) \*1: 解析最小値 (= 100) に対する膜厚の比

第4図 電極配置変更前後でのシミュレーション上の膜厚分布  
Fig. 4 Comparison of thickness distribution before and after anode arrangements in numerical simulation



(注) \*1: テストピースの位置 4 での  
実測値 (= 100) に対する比

第 5 図 電極配置変更前後での各位置での実測膜厚

Fig. 5 Comparison of real thickness at each position on the test piece in experiment

ツールであることが確認できた。

以上の結果、実槽・実材料で取得した物性値を用いれば、FEM によるシミュレーションは膜厚分布の予測に有効なツールであるといえる。また、電流密度分布の推定も可能なことから、通電条件の試験データと組み合わせることによって、各めっき工程での品質改善に当たっても実用に供し得ることが確認できた。

上述した物性値（電気伝導度や各陽極表面での電流－電位曲線）は、液組成や槽内の攪拌状態、陽極の材料などによって大きく変化するため、実槽での物性値の取得が重要である。また、陽極や治具の配置などによっては、シミュレーションの結果と実際の膜厚分布の差が大きくなることも考えられるため、以上のような対象については実測との比較、検討も必要と考えられる。

#### 4. 結 言

本研究では、複雑形状の対象物に対する銅めっき工程を実例として、FEM を用いたシミュレーションによる膜厚分布の推定を行い、試験結果との比較を通じてその妥当性を検証した。それとともに、陽極配置や通電条件の変更を行い、シミュレーションを用いて膜厚分布の均一性が改善可能なことを確認した。

膜厚のばらつきを再現可能であり、実測値との誤差は  $\pm 10\%$  以下であった。また本事例においては、シミュレーションを活用して陽極配置や通電条件の変更を行い膜厚分布の改善を試みた結果、金属の消費を実測で  $30\%$  以上削減できた。よって、FEM を用いたシミュレーションツールは複雑形状に対するめっき工程においても、膜厚分布の予測に有効であることが分かった。近年は航空宇宙産業においても部品の量産化が進められている。したがって、シミュレーションを活用した施工方法の理論的改善は、ますます重要な役割を果たしていくものと考えられる。

今後は、異なるめっき工程での物性値取得や精度検証などを課題として取り組み、施工方法の設計ツールとして数値解析の活用を進めていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 丸山 清：めっき実務読本 第 13 版 2006 年 4 月
- (2) 岩田光正, 藤本由紀夫, 黄 一, 小川量也, 松下邦幸：陰極防食下の船殻表面における電位分布の数値解析 西部造船会会報 第 82 号 1991 年 8 月 pp. 279 - 286
- (3) 上村工業株式会社：電解槽の電流分布解析ソフト“膜厚案内人” ウエムラ・テクニカルレポート 第 36 号 1996 年 3 月 pp. 12 - 19
- (4) 富士重工業株式会社：実車の塗膜厚予測方法, 実車の塗膜厚予測システムおよび記録媒体 特許公報 第 4 220 169 号 2002 年
- (5) 株式会社日立製作所：膜厚分布解析方法, 電子回路基板及び製造プロセスの設計装置 特許公報 第 3 829 281 号 2002 年
- (6) 渋谷 尚, 越智崇充, 近藤 治, 小野耕平：3 次元めっきシミュレーションシステム FabMeister-EP の開発 みずほ情報総研技報 第 2 巻 第 1 号 2010 年 3 月 pp. 13 - 19
- (7) 小原勝彦：電解槽の電流分布シミュレーション 表面技術 第 50 巻 5 号 1999 年 5 月 pp. 416 - 420