

数値シミュレーション技術適用による ECM 加工技術の研究

Research on Numerical Simulation of Electrochemical Machining

野 原 隆 樹 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部
加 藤 大 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部 課長 博士（工学）
今 成 邦 之 航空宇宙事業本部防衛システム事業部航空エンジン技術部 部長代理
水 田 郁 久 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部 課長

ECM (Electrochemical Machining : 電解加工) は金属を電解溶出させて目標形状を作る加工法である。複雑な形状部材を高品質、低コストで量産でき、航空エンジン用のファンや圧縮機翼の製造に適用されている。しかし電極形状の調整に試行錯誤が必要のため、量産開発に多大なコストと期間を要する。本研究は電解溶出を予測するシミュレーションを開発し、電極形状の調整に用いることで、量産開発のコスト、期間を大幅に削減することを目的としている。本稿では最近の研究成果を紹介する。

ECM (Electrochemical Machining) is one of the processing methods using electrical metal dissolution and is applied to mass-production of fans and compressor blades for aircraft engines, because ECM can process such complex three-dimensional shapes at low cost with high accuracy. However, a long period and a high cost are required until mass-production stabilizes, because trial-and-error is needed to fix the electrode shape and processing conditions. The present research developed an efficient procedure to fix the electrode shape and processing conditions using numerical simulation technologies. This paper presents the numerical simulations of the ECM process and prediction accuracy.

1. 緒 言

航空エンジンの高性能化には、圧縮機要素の高性能化が必須とされている。その要求を満たすため、圧縮機を構成する翼は三次元の複雑な形状を要求されるようになりつつある。しかし、量産製造の面からみた場合、従来の代表的な低コスト製造法である鍛造加工では、要求される複雑な三次元翼形状を製造できない状況になりつつある。

このため、鍛造加工に代わる低コストの製造法の開発要求があり、その代表として複雑形状を低コストで精度よく加工できる ECM 加工が注目され、航空エンジン用圧縮機の翼部品製造の一部に適用が始まっている。

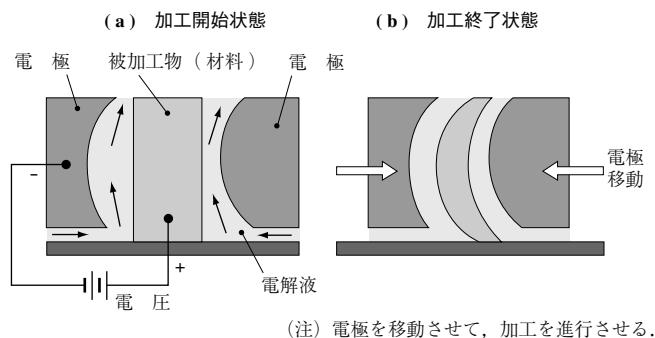
しかし、翼の形状公差を満たすため、電極形状の調整や電解液流量、電圧、加工時間などの加工条件の調整を試行錯誤しながら行っているのが現状であり、量産が軌道に乗るまでに多大な費用と時間を必要としている。このような状況において、数値シミュレーション手法を用いて電解液流れの乱れおよび被加工物（材料）の電解を予測し、コンピュータ上で最適な加工条件や電極形状を系統的に探索する手法を開発している。この手法を用いて、量産開発の初期段階における実物での試行錯誤を大幅に削減することが

できる。

なお、本研究で取り扱うシミュレーションは、電解液の流れを予測する電解液流れシミュレーションと、材料の溶出量を予測する電解加工シミュレーションの二つがあり、それぞれについて予測精度を検証した。

2. ECM 加工の原理

ECM 加工は電解加工とも呼ばれ、その原理は新しい手法ではないが、切削による金属加工方法とは根本的に異なる。第 1 図に原理の概要を示す。陰極となる電極と、陽極となる被加工物との間に電位を与え、両極のすき間を電解



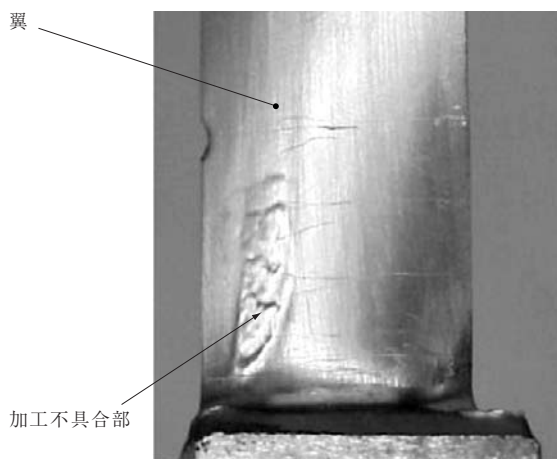
第 1 図 ECM 加工の原理
Fig. 1 Principle of Electrochemical Machining

液で満たすと両極間に電流が流れ、陽極である被加工物はファラデーの法則に従い電解溶出される。このとき、電極を被加工物側に移動することで、被加工物の最終形状は電極形状が転写された形状に漸近していく。ECM 加工はこの原理を利用して、電極形状を調整することで目標の形状を作り出す加工方法である。なお、電解過程では固形状のスラッジ（水酸化鉄など）および気泡（水素）が生成され、電解液の流れに乗って排出される。

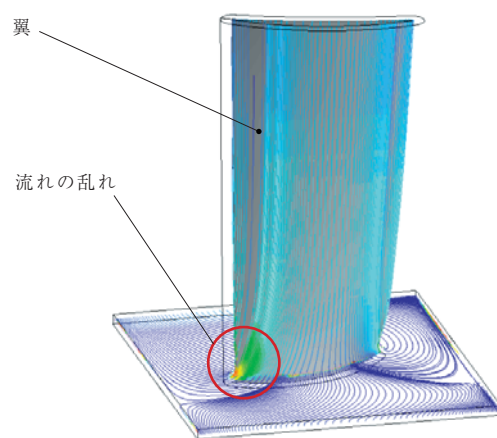
3. 電解液流れシミュレーション

ECM 加工は被加工物と電極間のすき間に電解液を充てんさせて電流を流している。また、副生成物であるスラッジおよび気泡を排出させる目的から、加工中はつねに電解液を供給し、電極と被加工物の間に流している。このとき、被加工物または電極の形状によっては、流れがはく離する場合がある。電解液の流れにはく離が生じた場合、排出すべきスラッジや気泡が滞留して電解の進行が妨げられ、加工不具合になる場合がある。流れの乱れに起因すると考えられる加工不具合例を第2図に示す。

これに対して、加工中の電解液の流れを把握することができれば、その乱れの原因を追求でき対策も容易となるが、現実には電解液は電極で囲まれているため、内部の流れ状態を把握することは困難である。この問題を解決するため、電解液の流れを数値シミュレーション解析によって予測する技術開発を進めている。解析例を第3図に示す。この結果から、流れシミュレーション解析は電解液流れの挙動を把握するうえで、有効であることを示唆しているが、この予測精度については未知であった。本章では、電解液流れシミュレーションの概要を述べた後、特に予測精度について



第2図 加工不具合例
Fig. 2 Example of ECM defect



第3図 流れシミュレーション解析例
Fig. 3 Result of flow simulation

での調査結果を述べる。

3.1 電解液流れシミュレーション解析手法

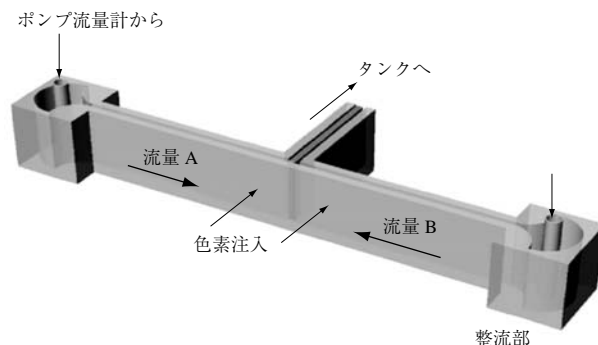
電解液は、硝酸ナトリウム、塩化ナトリウムなどの水溶液を用いているため、流れシミュレーション解析は、密度一定としたナビエ・ストーク方程式、連続の式を支配方程式とする三次元非圧縮粘性解析を行っている。数値解析法は非圧縮流体の流れ場解析に用いられる MAC 法で行った。解析スキームとして、対流項に 3 次精度風上差分、拡散項に 2 次精度中心差分、時間項に 1 次精度片側差分を用いている。

3.2 電解液流れシミュレーション予測精度検証

3.2.1 検証データ取得⁽¹⁾

電解液流れシミュレーションの予測精度を検証する目的で、電解液の流れを模擬したアクリル樹脂製のモデルを用いて水流可視化試験を実施した。本試験で使用した水流可視化試験装置は、東京理科大学工学部で所有していたものを利用した。第4図に試験装置の概略図を示す。ポンプによって加圧され、左右に分岐された流れが面積式流量計を経て、各々ベルマウス型の整流部を通り流入する。

本研究では、翼部に電解液が流入し、垂直に流れが転向



第4図 流れ可視化試験装置概略図
Fig. 4 Schematic of test channel for flow visualization

して流れが大きく乱れる現象を捉えるため、食用色素ローダミン（青、赤）を、翼部直前の静圧孔から注入して流れを可視化した。なお、電解液の物性は水と近似していることから、試験はすべて水で行っている。

3.2.2 予測精度検証結果⁽²⁾

取得した試験データと、試験条件を用いて電解液流れシミュレーション解析を実施した結果との比較を第5図に示す。なお、流れの乱れを意図的に発生させるため、左右の流量バランスを3:1に設定している。このため、水流可視化試験結果では第5図に示すように渦が生じている。

一方、シミュレーション結果においても同様の渦が見られ、その規模も正確に捉えていることが分かる。これらの結果から、電解液流れシミュレーション解析は、電解液の流れの挙動を正確に把握する手法として有効である。

4. 電解加工シミュレーション^{(2), (3)}

電解加工シミュレーションとは、時間の経過とともに金属材料の電解溶出が進んでいく過程を予測する技術であり、電解加工終了時の被加工物形状を正確に予測することを目指す。以下に解析手法と予測精度検証結果を述べる。

4.1 電解加工シミュレーション解析手法

電解加工をシミュレートするためには、ECM加工で生じる金属の電解現象を数式化する必要がある。本シミュレーションでは、金属の電解溶出量を算出するファラデーの法則を基礎式としており、以下に数式モデルを示す。

1 グラム当量の元素を溶出するのに要する電気量は F クーロンであり、原子価 n 、原子量 M の元素 1 グラムは n/M グラム当量であるから、この元素 1 グラムを溶出するのに要する電気量は $n \cdot F/M$ クーロンである。したがって I アンペアの電流が t 秒間流れることによって溶出する元素の質量 w は(1)式で求められ、ファラデーの法則と呼ばれる。

$$w = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad \dots\dots\dots (1)$$

電流は、電解液の電導度 κ 、電極と被加工物とのすき間距離 y 、電圧を E 、加工面積を S とした場合、(2)式で求まる。

$$I = \frac{E \cdot \kappa \cdot S}{y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式を電解現象の基本式とし、電極と被加工物間の三次元的な電位場分布を数値シミュレーションによって求め、翼面に生じる電流分布を求めた後、単位時間当たりの溶出量を算出する。材料密度が既知であれば、 t 秒後の被加工物の形状を求めることができる。この解析を加工開始から加工終了までステップ上に連続させることで、加工終了時の被加工物形状が予測できる。

なお、本研究では実用的な解析時間で解を得ることを目標としており、次の前提条件を仮定している。

・仮定 1

電解溶出によって生成されるイオンの原子価が確定している。すなわち、被加工物には不純物の含有がなく均質である。

・仮定 2

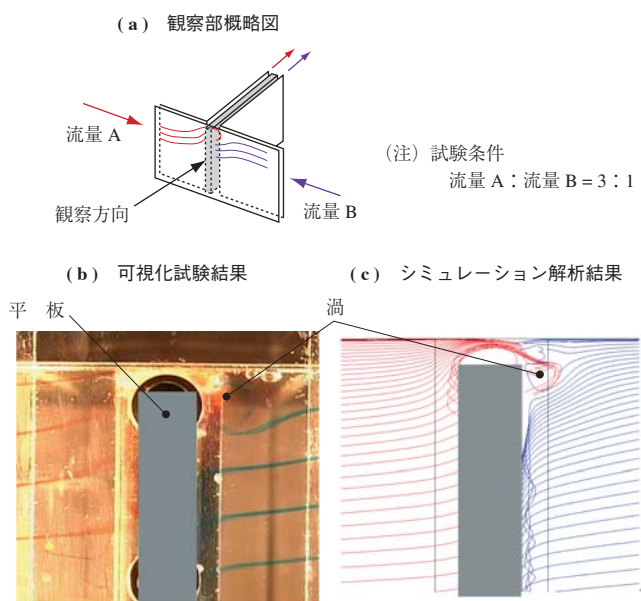
金属の電解反応が、陽極におけるただ一つの電極反応である。すなわち、陽極においてほかの副反応を伴わない。

・仮定 3

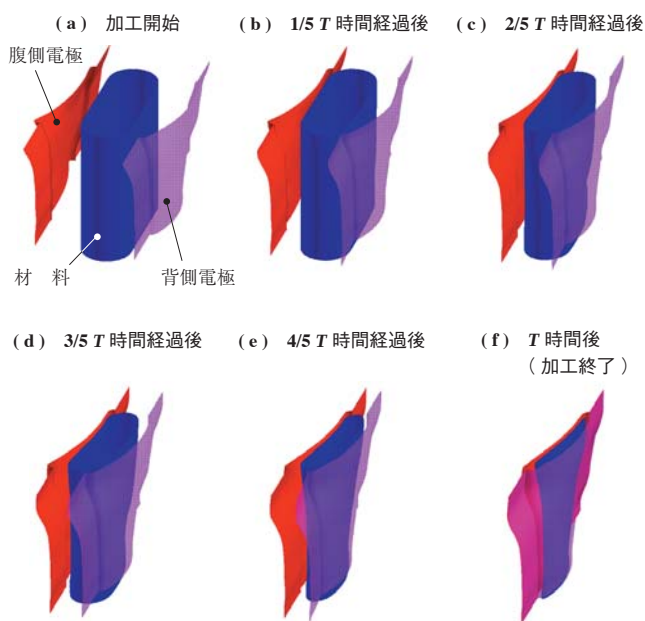
金属は電解のみによって除去され、崩壊によらない。すなわち、原子レベルで溶出するものとし、原子が集団ではなく離れ、脱落することはない。

4.2 電解加工シミュレーション予測精度検証

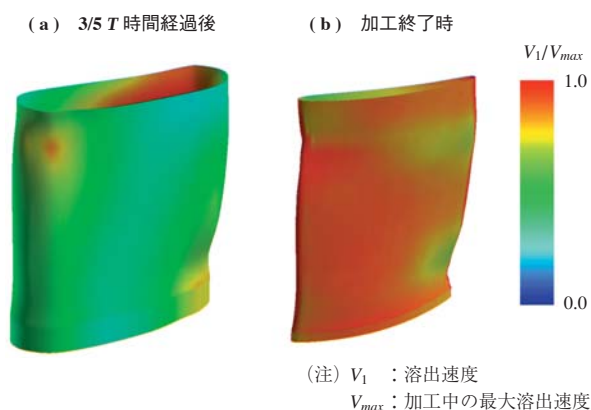
電解加工シミュレーションの予測精度を検証するため、ECM加工機械を用いた翼加工を対象として、実際の電極形状、電極送り速度、電圧などの加工条件を用いて電解加工シミュレーションを行い、加工終了時の翼形状を予測した。第6図に時間経過とともに材料が溶出していくECMによる電解過程をシミュレートした結果を示す。総加工時間を T として $1/5 T$ 時間経過ごとの電極位置と材料形状を示す。第7図に $3/5 T$ 時間経過後および加工終了時における溶出



第5図 試験結果と流れシミュレーション解析結果の比較
Fig. 5 Comparison of computed streamlines with measured pattern



第 6 図 ECM による電解過程
Fig. 6 Simulation results of dissolution process in ECM



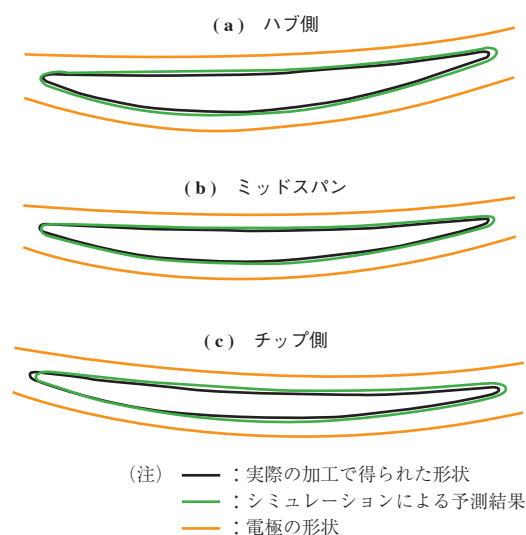
第 7 図 溶出速度分布
Fig. 7 Distribution of dissolution rate

速度分布を示す。翼面の位置によって溶出速度が大きく異なっており、電極と材料が最も近づく加工終了時に最も溶出速度が速いことが分かる。

また、第 8 図に実際の加工で得られた翼形状と電解加工シミュレーションによる予測結果の比較を示す。両者は形状公差レベルでよく一致しており、実用化レベルに近い予測精度があることが確認できた。ただしチップ近傍については予測精度に改良の余地がある。

5. 今後の課題

電解加工シミュレーションのチップ近傍の予測精度を向上させるためには、現シミュレーションでは考慮していない以下の現象をシミュレートする方策が考えられる。



第 8 図 電解加工シミュレーション予測結果
Fig. 8 Comparison of ECM simulation result with test data

- (1) ジュール熱の発生によって、電解液流れの下流にいくほど電解液温度が上昇する。このため、電解液電導度が上流側と下流側で異なり、溶出量に影響を及ぼす。
- (2) 副反応として水素気泡が生じ、液体と気体が混在しているが、電解液流れにはく離が生じる場合、気泡が滞留することがあり、電流場に影響を及ぼす。
- (3) 溶出した材料のスラッジ（固形物）が電解液中を流れているが、電解液流れにはく離が生じる場合、スラッジが滞留することがあり、電流場に影響を及ぼす。

今後は中長期的な計画のもとで、上記現象に対する具体的な方策を段階的にシミュレーションに取り込み、完成度を高めていく。

6. 結 言

研究結果を以下にまとめる。

- (1) 電解液流れシミュレーションの予測精度が実用レベルであることが確認でき、電極と材料間の電解液流れの乱れを実加工前に予測できるようになった。
- (2) 電解加工シミュレーションの予測精度が実用レベルであることが確認でき、目標の加工形状を得るための電極調整作業をシミュレーション上で行う見通しが立った。
- (3) チップ近傍における電解加工シミュレーションの予測精度は、さらに向上の余地がある。

— 謝 辞 —

本研究は、社団法人日本航空宇宙工業会（SJAC）革新航空機技術開発センターからの委託を受けて 2003 年度から 2004 年度に実施したものである。本研究を進めるに当たり、ご指導いただいた SJAC 関係各位に深く感謝の意を表します。

また、本研究の実施に当たっては、東京理科大学工学部本阿弥真治教授、山本 誠教授に多くのご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 本阿弥真治ほか：流れの可視化援用による電解加工技術の高度化 日本流体力学会年会 2004 年 8 月
- (2) 社団法人日本航空宇宙工業会：ECM 数値シミュレーション技術適用による ECM 加工技術の研究 先端航空機部品・素材研究に関する調査報告 No.1804 2004 年 3 月
- (3) 社団法人日本航空宇宙工業会：ECM 数値シミュレーション技術適用による ECM 加工技術の研究 革新航空機技術開発に関する調査報告 No.1804 2005 年 3 月