

航空部品とインサート用超硬金型を ペムテック社精密電解加工機で高効率加工



精密電解加工機 PEM シリーズ

1.はじめに

低炭素社会実現に向けて、機体の軽量化と、エネルギー効率に優れたジェットエンジンを持つ航空機のニーズが高まっている。燃料を燃焼させ力学的運動エネルギーに変える内燃機関は、高温・高圧化するほど燃費が向上するため、耐熱性に優れたニッケル基合金、チタン合金などの材料が多く採用されている。

これら難削材・高硬度材は材料として優れた特性を示す反面、被加工材としては加工に時間を要し、使用される工具や電極の消耗も激しい。特に量産加工においては、相対的に加工時間が長くなるため、加工機や工具、電極の数を必要とする。また、物理的に被削材を破断させる切削、電気エネルギーで被加工材を溶解させる放電加工では、被加工材の表面に加工損傷やバリ・マイクロクラックを発生させてしまうため、バリ取りや磨き等の後工程を要することが多い。そこで注目を集めているのが工具の消耗がない、加工精度に優れ、加工速度が硬度・延性に依存せず、加工後のバリ取りや磨きが不要な精密電解加工である。

2.精密電解加工のプロセスと PEMTec（ペムテック）社について

電解加工は電極の形状をワークに転写加工する点では型彫り放電加工と似ている。しかし、放電

加工が熱による溶融加工であるのに対し、電解加工は金属を電気分解する電気化学的加工である。電気分解加工は電気めっきの原理と同じであり、電解液中の陽極に銅を入れておくと、イオン化反応により、銅は電子を放出して Cu^{2+} イオンとして液中に溶解する（図 1）。陰極では Cu^{2+} イオンの $2e^-$ が還元され、金属の銅めっきが形成される。電解加工ではワーク側をイオン化反応で分解する陽極側とし、還元してめっきされる陰極側を電極とするため、原理的に電極が太ることはあっても、消耗することはない。

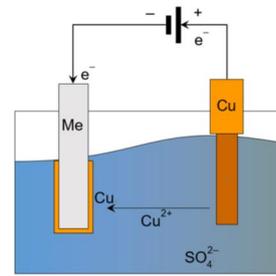


図 1 電気めっきの原理

1960 年代、工具が消耗しない魔法の加工機として電解加工の技術が注目され、国産電解加工機も登場した。しかし、電解液管理の難しさや精密加工ができないという点に加え、放電加工機の台頭もあり、日本の主要電解加工機メーカーは市場から撤退した。欧州ではロシアを中心に電解加工の研究が継続され、約 25 年前にフランスのペムテック社が、従来の電解加工より高精度な加工を実現する次世代の精密電解加工をする機械を発表した。ペムテック社は 1995 年に精密電解加工機の開発および電解加工受託加工をスタートし、2000 年に初号機を販売した。2021 年には、これまで不可能とされていた超硬加工用の精密電解加工機 PEM3.1SX CC をリリースした。

本稿ではペムテック社の精密電解加工機 PEM シリーズについて 3 つの観点から解説し、その加工事例を紹介する。

- ・精密転写を実現したワークと電極間のギャップの最小化
- ・電極消耗がなく、工具コストを大幅に削減
- ・バリ、マイクロクラックなしの加工面で後工程が不要

3.精密転写を実現したワークと電極間のギャップの最小化

微細な形状の精密な転写には、電極とワークのギャップを極限まで小さくすることが不可欠である。電極とワークの距離が離れるほど、電極の形状転写は放射的になり、逆にその距離が短くなると直線的な転写が可能となる。従来の電解加工機では電極とワークを0.2mm以上離していたため精度が得にくかったが、ペムテック社の精密電解加工機はその間隔を最小0.01mmまで接近させる。ペムテック機は電極とワークを接近させることで加工の均一性を向上させ、電極の形状や面粗さに極めて近い微細な転写を実現する。しかし、電極を接近させると、ワークの分解が促進されてしまうことになるため、電極を接近させながらも振動させることで、ワーク分解速度を抑制し転写精度を向上させている。

ペムテックが採用する精密電解加工ではまず電極とワークの隙間に電解液を流し込み、電極を振動させながらワークを極限まで接近させることで、ワーク表面を電気分解している。接近した電極がワークから離れることで、分解されたスラッジは電解液とともに排出される（図2）。



図2 電極とワークが接近および分離する様子

4.電極消耗がなく、工具コストを大幅に削減

切削であれば粗、中仕上げ、仕上げのような工程と複数の工具が求められる。放電加工においても、粗、仕上げといった工程ごとに電極を変える必要がある。一方、電解加工は電極消耗が原理上発生しないため、粗加工から仕上げ加工まで一つの電極で連続加工ができる。

さらに、ペムテック機の場合、電極の形状精度を維持するために、瞬間的に電極の極性を切替え、付着金属を除去する機能を兼ね備える。粗から仕上げまで同じ電極1つで、10万個以上のワークを連続加工した実績もある。特に難削材、高硬度材においては、工具や電極の消耗が激しいため、切削や放電加工を精密電解加工へ置き換えることで、工具コストを大幅に削減できる可能性がある。航空部品の加工では、切削を精密電解加工に置換えたことで、1,000本の工具を1つの電極にし、工具コストを1/15に削減した事例がある（図3）。

	切削加工	精密電解加工
工具	エンドミル	電極
工具単価	5,000 円	30 万円
工具必要数/10 個	1,000 本	1 個
工具代/10 個	500 万円	30 万円
加工時間 / 1 個	100 時間	10 時間

図3 航空部品での切削加工と精密電解加工の工具コストと加工時間の比較

5. バリ、マイクロクラックなしの加工面で後工程が不要

精密電解加工は非接触加工のため、バリが発生することがない。さらに、加工中の電解液の温度は20~50°Cと低温なため、基本的に加工熱によりワーク表面の結晶構造が変化したり、マイクロクラックが発生することもない。加工面の後処理は不要であり、加工面の面精度は電極の面精度に依存するが、Ra0.03 μ mも達成可能である。例えば放電加工(図4上)では熱衝撃によりワーク表面の結晶構造が熔融状態となり粗くなってしまうが、電解加工(図4下)では熔融が発生せず、加工後に素材の構造は維持されている。

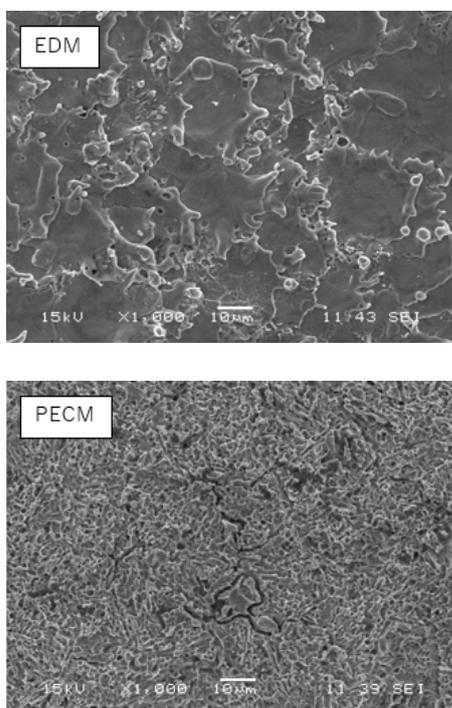


図4 ワーク表面の結晶構造の様子
放電加工(上)、精密電解加工(下)

6. 加工事例の紹介

難削材の航空部品の加工事例を図5~8で紹介し、新機種で対応が可能になった超硬の事例について図9~14で記述する。

6.1 加工事例①:タービンブレード(図5)

エンジン推力の大部分を生み出すタービンブレードは高温・高圧・高速心力が作用する。軽量化を目指すうえでブレードが薄くなり、複雑な3次元形状を求められ、厳しい公差内での精度を要求される。タービンブレードはブランクからミーリングによる削り出しにまず時間を要し、ミーリング後は翼面に残ったミーリングのスカラップハイトを磨き除去する必要がある。

ペムテック機の場合、被加工材の表面に加工損傷やバリを発生させず、また加工熱によるワーク表面の結晶構造の変化やマイクロクラックの発生がない。さらに電極の消耗がなく、粗加工から仕上げ加工まで1本の電極で連続加工に利用することが可能なため、工具コストを大幅に削減することができる。図5は精密電解加工前と加工後のタービンブレードである。翼面の正面を加工した後、ワークを上下反転し背面用の電極で加工をする。



図5 左:タービンブレードのブランク左端
右:精密電解加工後

材質:チタンアルミ合金

加工時間:186分/片面

加工深さ:26.4mm

面粗さ:Ra 0.7 μ m

6.2 加工事例②:タービンブレードルートのクリスマスツリー形状(図6)

タービンブレードをディスクに固定するルートは複雑な形状でクリスマスツリー形状と呼ばれている。切削加工では総形工具による加工が必要となり、厳しい工具管理、割高な工具コストを要する。図6に示すように電極(左)を上からワーク表

面へ接近させて振動しつつ、電極の側面を利用し加工する。被加工材の表面に加工損傷やバリを発生させず、またクリスマスツリーの形状に問わず、加工深さが加工時間になるため、加工時間の大幅な短縮も見込める。

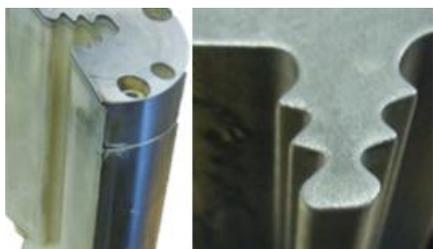


図 6 左：電極

右：ルート部のプロファイル加工

材質：インコネル
加工時間：330 分
加工深さ：67mm
面粗さ：Ra 0.7 μ m

6.3 加工事例③: ブリスク(図 7)とディスク(図 8)

ブリスクはニッケル基合金またはチタン基合金の大型ディスクをマシニングセンタの同時 5 軸制御で加工されることが多い。干渉を避けながらの加工が必要となるため、小径工具を用いた加工に時間を要す。さらに難削材の加工は、工具の摩耗が多く、多くの工具本数を必要とする。

本機では図 7 のようにブランクを縦に配置し、5 枚同時加工により生産性の飛躍的向上を実現することができ、また図 8 の場合、ブランクを横に配置しワークヘッドの C 軸と電極を同期することでねじれ形状の加工も可能である。



図 7 ブリスクを縦に配置し、5 枚同時加工

材質：インコネル
加工時間：20 分/歯 (5 枚同時加工、1 枚 6 時間)
加工深さ：20mm
面粗さ：Ra 0.14 μ m



図 8 ディスクを横に配置し加工

材質：インコネル
加工時間：45 分
加工深さ：20mm
面粗さ：Ra 0.8 μ m

6.4 加工事例④:インサート用超硬金型(図 9)

超硬は高硬度かつ高温時の硬度低下が少なく、炭化タングステンとコバルトを主とした複合材料で、両物質の電気化学特性が大きく異なるため、これまでは電解加工が大変困難とされてきた。放電加工では、加工時の熱によりコバルトが溶出し、硬度低下となるため、加工後の磨きが必要となる。これに対しペムテック社は加工を支援する専用の電解液(特許取得済)を開発し、新しいハードウェア・ソフトウェア、そして電解液処理システムを搭載した超硬加工専用機種 PEM3.1 SX CC をこの度リリースした(図 10)。これまでペムテック機は加工機と自立制御電解液循環システムをそれぞれ別々の装置として分けていたが、本機は全ての機能を一つにまとめ、コンパクトな所要床サイズ幅 1,630mm×奥行き 2,790mm となっている。



図9 インサート用超硬金型

材質：超硬

加工時間：41分

面粗さ：Ra 0.07 μ m



図10 超硬加工専用機種 PEM3.1 SX CC 外観

6.4.1 加工時間を1/3に短縮し後工程も不要

既存の加工方法である型彫放電の場合、粗・仕上げ用の電極製作に60分、放電加工では150分要し、合計210分かかっていた。これに対し、ペムテック機であれば、粗加工から仕上げ加工まで1つの電極で、チップブレイカを含む複雑形状の転写も可能である。加工時間は僅か40分であり、電極も1つの製作時間で済むことになり、加工時間で比較すると約1/3の70分に短縮することができる(図11)。形状精度も同様に、溶解やクラックのない加工面 Ra 0.03 μ m の面粗さを達成し、後工程も不要である。

型彫放電加工		精密電解加工
60分/2個	電極製作	30分/1個
粗加工 仕上げ加工 超仕上げ加工 計150分	金型製作	40分
210分	合計加工時間	70分

図11 インサート用超硬金型における型彫放電加工と精密電解加工の加工時間の比較

6.4.2 超硬の結晶構造を維持した加工

下図は精密電解加工で加工した超硬の表面と、型彫り放電加工で加工した超硬の表面を反射電子顕微鏡にて撮影し、比較したものである。精密電解加工の場合、炭化タングステンの結晶構造を維持しているのに対し、型彫り放電加工の場合は熱衝撃によるマイクロクラックとコバルトの溶出が見られる(図12)。

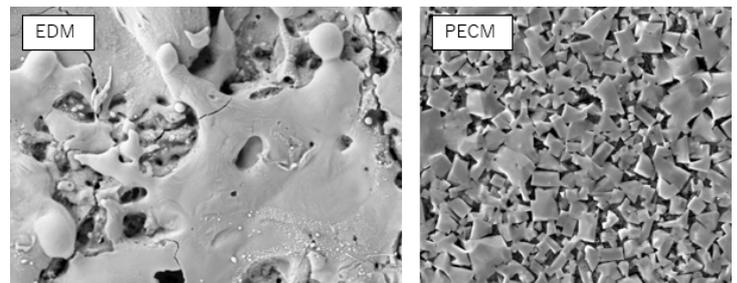


図12 反射電子顕微鏡による画像
(黒い部分：コバルト 明るい部分：炭化タングステン)

断面図から見た場合でも、ペムテック機による加工後は結晶構造が維持されているのに対し、放電加工ではコバルトの溶出によるクラックが確認できる(図13)。

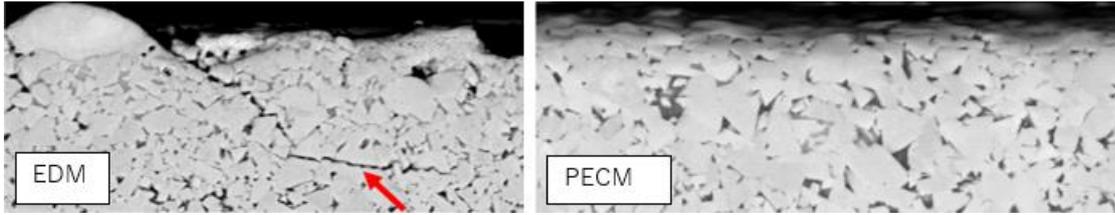


図 13 反射電子顕微鏡による断面

6.4.3 放電加工と同等の形状精度を実現

形状精度については下図のように、放電加工により同ワークを加工した場合とほぼ同等となる(図 14)。

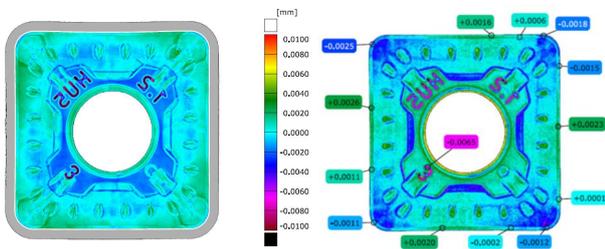


図 14 左：放電加工 右：精密電解加工
±3μm 以下の形状誤差

7.おわりに

ペムテック社精密電解加工機は電極消耗なし、バリなし、結晶構造変化なし、後工程不要の特長を持ち、放電、切削が苦手とする高硬度材、難削材のワークの加工に力を発揮する。加工が困難な航空部品の精密加工における革新的な加工時間の短縮と高効率化を実現する設備として、お客様の手掛けるものづくりの差別化の鍵となるよう努めていきたい。

以上