

超精密切削加工特性に優れた電気めっき加工技術の検討

中村 知彦*¹

河野 大輔*²

北垣 寛*³

松延 剛*¹

【要 旨】

電気ニッケル-リン合金めっき材の超精密切削加工についてリン含有量と切削性について検討した。浴中亜リン酸濃度により膜のリン含有量制御が可能であった。リン含有量 8.7wt%以下の低リン試料とリン含有量が 12.1wt%以上の高リン試料では切削性が異なり、高リン試料では低リン試料と比較して表面粗さ、切削抵抗が共に小さく良好な切削性を示した。無電解めっきでは電気めっきと比較して高切削速度では表面粗さが大であった。膜中に存在した 100 μ m 超の欠陥密度は、電流密度が小さいほど減少する傾向にあり、電流密度による欠陥制御が可能であった。

1 はじめに

近年、CD プレイヤー用途の光ディスクピックアップレンズ光学系の非球面レンズや液晶導光板、マイクロレンズアレイ、回折格子など様々な光学素子が多く用いられるようになり、これらを大量かつ安価に製造するために、金型を用いてプラスチック材料を成型加工されている¹⁻⁶⁾。微細で複雑な形状を持つ光学素子の成型のために、金型の加工には高い加工精度が求められており、通常最も高い硬度を持ち、サブミクロンオーダーの微細な先端形状が作製可能な単結晶ダイヤモンド工具が金型の加工に用いられている¹⁾。被切削材としては、ダイヤモンドバイトとの反応性がなく、比較的高い硬度を持ち、さらにアモルファス構造を持つことにより加工の異方性がないニッケル-リン合金（以下 Ni-P 合金と称す）が用いられている³⁾。このような Ni-P 合金は工業的には無電解めっきによる厚付けにより製造さ

れているのが一般的である。一方、Ni-P 合金は無電解めっき以外に電気めっきによっても作製可能であり、電気 Ni-P 合金めっきについては様々な研究が行われている⁷⁻¹²⁾。電気めっきは無電解めっきと比較すると、めっき反応の点ではめっき速度が速く、めっき反応制御が容易であること、また、めっき工程管理上、浴組成が単純であり浴管理が容易な点や浴寿命が長いなど、いくつかの優位点があると考えられる。しかし無電解 Ni-P めっきの超精密加工特性については上述のように様々な研究がなされているが、電気めっきについての研究は多くは見られないのが現状である。

本報では被切削材として電気 Ni-P 合金めっき材に着目し、リン含有量と切削加工特性および無電解めっき材との比較を行うとともに、電気めっき材の欠陥制御について検討した結果について報告する。

2 実験方法

2. 1 めっき試料の作製

Ni-P 合金めっき浴は森河ら¹⁰⁾のクエン酸浴を用

* 1 応用技術課 主任研究員

* 2 京都大学大学院工学研究科 助教

* 3 応用技術課 主任研究員（現 基盤技術課 主任研究員）

い、表 1 に示した組成およびめっき条件を標準とした。

表 1 標準めっき浴組成とめっき条件

NiSO ₄ · 6H ₂ O	0.38M
NiCl ₂ · 6H ₂ O	0.13M
H ₃ BO ₃	0.5M
H ₃ PO ₃	1.0M
Na ₃ (C ₃ H ₅ (COO)) · 2H ₂ O	0.5M
pH	2.3
浴温度	60°C
電流密度	10A/dm ²

欠陥の評価には 20mm×30mm の片面被覆銅板を、切削試験、硬度測定には焼入れした 25mm×15mm×15mm の STAVAX 材を陰極基板とした。基板はアルカリ脱脂後、5%硫酸で活性化し、STAVAX 材は全塩化物ニッケルめっき浴で室温下、電流密度 8A/dm² で 2 分間めっき後、切削試験用には膜厚 100 μm でめっきを行った。銅材は下地めっきを行わずに直接めっきを行った。

X 線回折により膜の結晶状態を確認した。また荷重 0.048N、保持時間 10 秒でめっき膜のビッカース硬度を 5 点計測し、平均を求めた。

2. 2 切削試験

切削試験は直交3軸の送り系で構成され、X 軸にリニアモータ送り、Y・Z 軸に高精度ボールねじ+サーボモータ送りをういた3軸門型の加工機を用いた。加工中の切削抵抗を測定するために、テーブルには水晶圧電式の直交3軸動力計が設置し、工作物は動力計上に固定し、工具はZ 軸に取り付けた。工具の先端にはダイヤモンドバイトを固定した。切削条件を表 2 に示す。

表 2 切削条件

切削工具	単結晶ダイヤモンドバイト ノーズ R:0.5mm, 逃げ角:7°, すくい角:0° ----- バインダレス多結晶ダイヤモンドバイト ノーズ R:0.5mm, 逃げ角:7°, すくい角:0°
切削速度(m/min)	5,10,20,30
切込量(μm)	10
ピックフィード方向送り量(μm)	50

2. 3 形状測定

切削試験後の切削方向の表面粗さはレーザー式非接触三次元測定装置により評価長さ 0.4mm、フィルター長 0.8 μm で一条件につき 5 か所を計測し、表面粗さの平均を求めた。また微分干渉金属顕微鏡により切削試験後の 500 倍での表面形状を観察した。

3 結果及び考察

3. 1 切削試料の作製

Ni-P 合金めっきは膜中のリン含有量により物性が異なることが知られている⁶⁾。そこで、めっき浴中の亜リン酸濃度を変えてめっきを行い、膜中のリン含有量との関係を求めた。図 1 にその結果を示す。膜中のリン含有量は浴中の亜リン酸濃度が 0.3g/L

までは膜のリン含有量は 2.6wt%から 13.7wt%まで

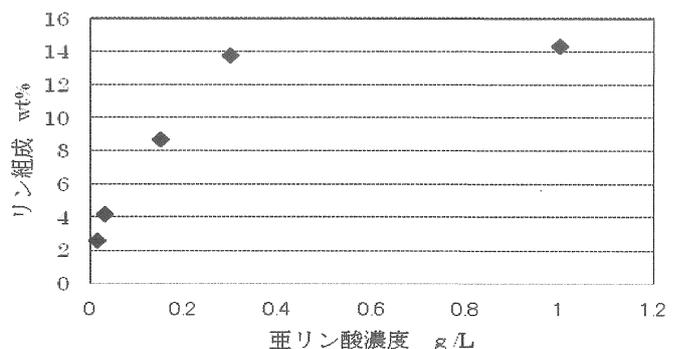


図 1 浴の亜リン酸濃度と膜のリン組成との関係

直線的に増大し、亜リン酸濃度が 1.0g/L では 14.3wt%であり、0.3g/L 以上ではほぼ一定であった。従って、浴中亜リン酸濃度制御により膜のリン含有量制御が可能であることがわかった。以上の知見をもとに表3に示す切削試料を作製した。なお表には比較のために切削試験を行った無電解 Ni-P めっき試料についても併記した。

表3 切削試料の諸元

リン含有量 (wt%)	電流密度 (A/dm ²)	浴温度 (°C)	硬度 HV0.05
4.2	10	60	647
8.7	10	60	582
12.1	10	60	515
13.6	3	40	533
無電解(8.9)	---	---	538

作製試料の X 線回折パターンを図2に示す。リン含有量 4.2wt%では回折線の半値幅は比較的小さく、

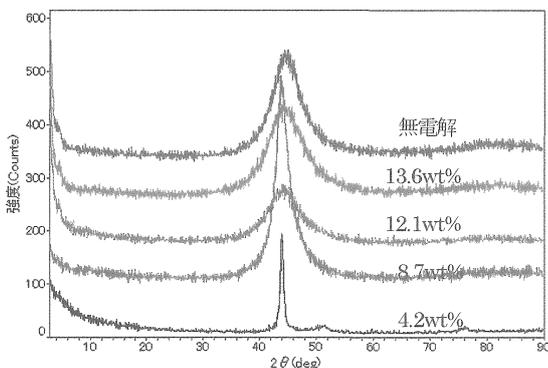


図2 作製試料の X 線回折パターン

ニッケルの (111)、(200)、(220)の各面からの回折線が認められるが、8.7wt%では半値幅が大きく広がりとともに(200)、(220)面からの回折線が消失して

いた。12wt%以上ではさらに半値幅が広がっており、8.7wt%以上では非晶質構造を取っていることがわかる。なお、リン含有量を 8.9wt%の無電解めっきは 12wt%以上の電気めっきと半値幅がほぼ等しく、8.7wt%の電気めっき膜より非晶質化が進んでいると考えられる。

3. 2 膜のリン含有量と切削性

リン含有量の異なるめっき試料について、切削速度 5m/min および 30m/min で切削試験後の切削面の微分干渉光学顕微鏡像を図3に示す。無電解めっきおよび高リン電気めっき試料は、単結晶ダイヤモンドバイトを用いて切削したが、工具の劣化が確認されたため、低リン試料はバインダレス多結晶ダイヤモンドバイトを用いて切削した。ピックフィード方向の断面曲線測定の結果、どちらのバイトもカブス高さは約 0.6 μm であり、理論値が得られていることから、両者の切削性に差異はないと考えられる。

切削速度によらず、リン 4.2wt%および 8.7wt%の試料では切削方向と平行な溝が形成されていた。また、8.7wt%の試料では切削方向と垂直な方向に微細な筋が形成されていた。一方 12.1wt%、13.6wt%の試料では 4.2wt%、8.7wt%で見られた溝や筋は形成されず、平滑な切削面が得られていた。また、電気めっき試料では切削速度の違いによる切削面形状の差異は少なかった。一方、切削速度 5m/min での無電解めっき表面は切削方向の溝は見られず、比較的平滑な切削面であったが、切削速度 30m/min では切削方向と垂直方向に微細な筋が形成されるとともに竹の節状の明瞭な筋が概ね 50 μm 間隔で現れていた。このような筋は切削速度 10m/min から認められ、20m/min 以上で顕著となっていた。

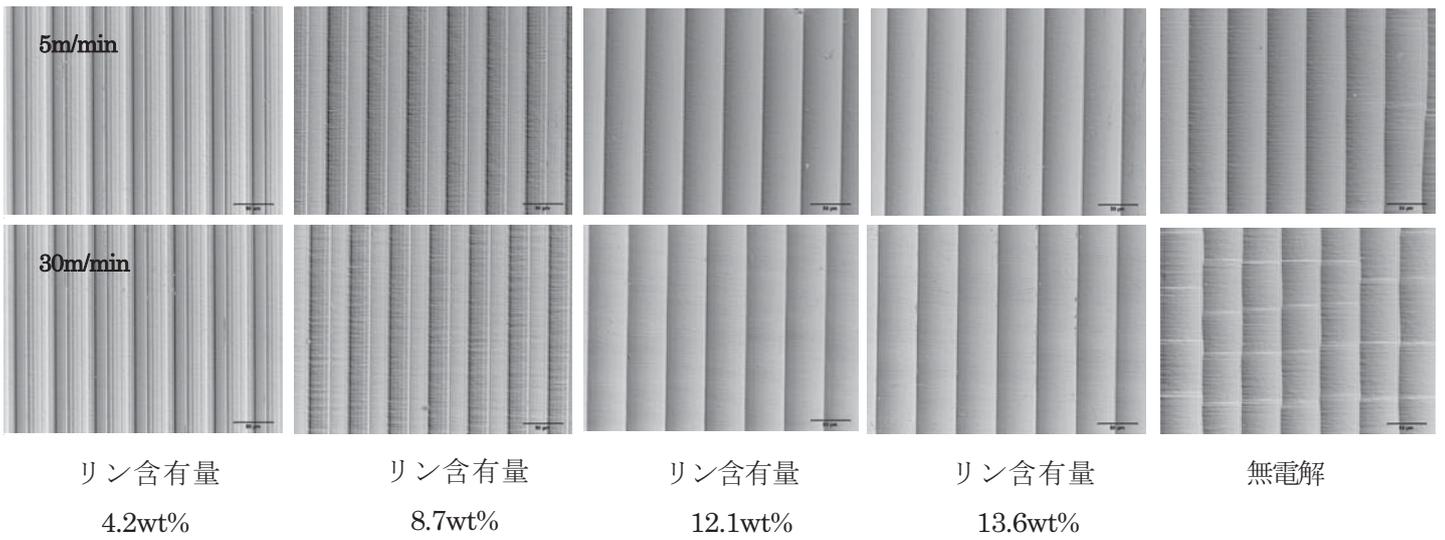


図3 切削面の光学顕微鏡写真

図4にリン含有量の異なる試料について、切削速

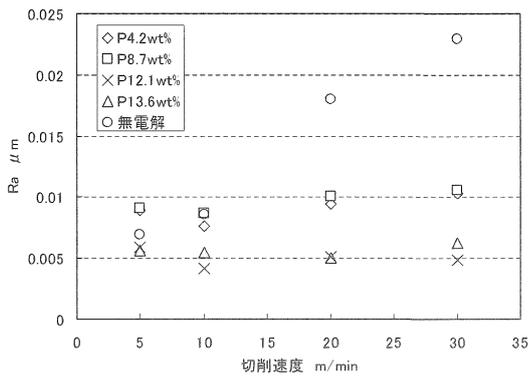


図4 切削速度と切削方向の表面粗さとの関係

度と切削方向の表面粗さ Ra との関係を示す。Ra はリン含有量によらず 10m/min までほぼ一定で、20m/min 以上で若干増加していた。また、切削速度によらずリン含有量 4.2wt%と 8.7wt%、12.1wt%と 13.6wt%の試料ではほぼ同じ値を取っており、10m/min 以下では8.7wt%以下の低リン試料の表面粗さが大きい傾向を示した。Pramanic らは無電めっきのリン含有量が高いほど切削面の表面粗さが小さいと報告しており⁶⁾、これらの結果は Pramanic らと同様の傾向を示していた。一方、無電解めっき試料は切削速度 5m/min では高リン試料と、

10m/min では低リン試料とそれぞれ同様の値を示したが、20m/min 以上で大きく増加して、電気めっき試料よりも表面粗さが大となった。

図5に各試料の切削方向での切削速度と切削抵抗との関係を示す。リン含有量が 12.1wt%以上の高リン試料では切削抵抗は切削速度によらず低リン試料および無電解めっき試料よりも低い値を示しており、高リン試料では低リン試料と比較して切削性が優れていた。またリン含有量 4.2wt%と 8.7wt%、12.1wt%と 13.6wt%ではそれぞれほぼ同じ値を取っており、試料の硬度との相関が見られた。一方で、硬度が無電解めっき試料は、高リン試料と低リン試料のほぼ中間値を取っており、硬度との相関は明ら

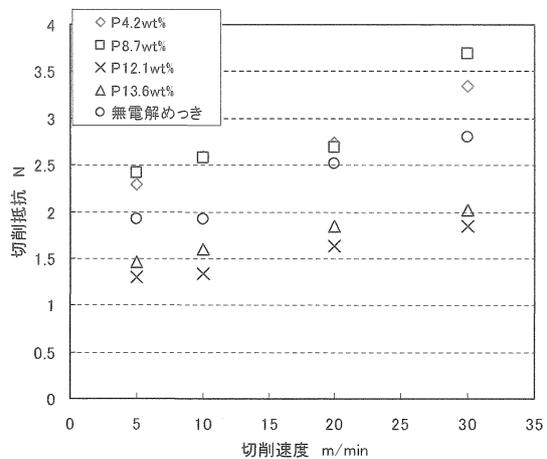


図5 切削方向での切削速度と切削抵抗との関係

かではなかった。

以上のように、リン含有量 8.7wt%以下の試料とリン含有量が 12.1wt%以上の試料では切削性が異なっており、高リン試料では低リン試料と比較して切削抵抗、表面粗さが共に小であった。Rahmanらは、リンは機械加工時に潤滑作用を持つこと、また切削加工中にダイヤモンドバイトをグラファイト変態させるニッケルの触媒作用に対するリンの抑制効果について指摘している⁷⁾。また奥田らはリン青銅の単結晶ダイヤモンド工具による切削で、結晶粒界による切削面での段差発生を報告しているが¹⁴⁾、図2に示した X 線回折の結果のとおり、リン含有量 12.1wt%以上の高リン試料はアモルファス構造を取っていた。従って、これらの要因により高リン試料では平滑な切削面が現われたものと推定される。一方無電解ニッケルの切削抵抗は、電気めっきで作製した低リン試料と比較して切削速度に依らず低い値であったが、切削面は切削速度 10m/min 以上で切削方向と垂直な方向に筋が形成されるとともに 20m/min 以上で電気めっき試料よりも表面粗さが大となっていた。リン含有量がほぼ等しい 8.7wt%の電気めっき試料と比較すると、切削面では両者とも切削方向と垂直方向に細かい筋が形成されているが、無電解めっきでは切削速度 20m/min 以上の場合、50 μ m 間隔で大きな筋が顕著に形成されているため電気めっきと比較して表面粗さが大きくなったと考えられる。電気めっきの高リン試料で見られた良好な切削性を考慮すると、リン含有量が 12wt%以上の無電解めっきでも同様の切削性が期待されることから、少なくとも電気 Ni-P 合金めっきは無電解めっきと同程度の切削性は得られることが確認された。なお、現時点では無電解めっきで形成された筋の要因は明らかではなく、また切削抵抗値が電気めっき低リン試料より小であるにもかかわらず、切削面の表面粗さが大であった要因は明らかではなく、今後の課題としたい。

3. 3 電流密度と膜欠陥制御

今回作製した電気めっき試料では、切削試験の過程で膜中に径 100 μ m 超の欠陥が存在していることがわかった。このような欠陥は、光学素子としての特性を損ない、切削工具への悪影響もあるため解消させる必要がある。

電気めっきでは、高電流密度での電析では水素の発生電位に近づくため水素発生が活発となり、膜の欠陥生成に起因すると考えられる。そこで、電析時の電流密度を 3A/dm²から 20A/dm²まで変化させて、

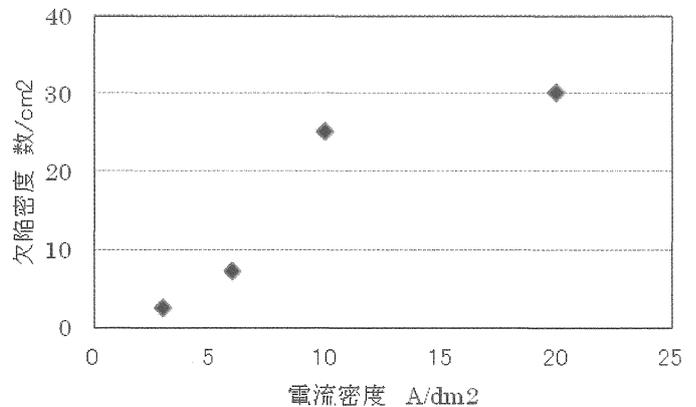


図6 欠陥密度の電流密度依存性

表面の径 100 μ m 超の欠陥の生成密度を比較した。その結果を図6に示す。欠陥密度は電流密度が小さいほど減少する傾向にあり、特に 6A/dm²以下で急激に減少していた。今回の検討では電流密度 3A/dm²でも欠陥は存在していたが、電流密度により欠陥数を制御できることが明らかとなった。

4 まとめ

電気 Ni-P 合金めっき材のダイヤモンド切削加工についてリン含有量と切削加工特性および無電解めっき材との比較を行うとともに、電気めっき材の欠陥制御について検討した結果、以下の知見が得られた。

1) めっき浴中の亜リン酸濃度を変えてめっきを行った結果、膜中のリン含有量は 2.6wt%から

14.3wt%まで変化し、浴中亜リン酸濃度により膜のリン含有量制御が可能であった。

2) 電気めっきでは高リン試料では低リン試料と比較して表面粗さ、切削抵抗が共に小さく良好な切削性を示した。リン含有量 8.9wt%の無電解ニッケルと 8.7wt%の電気めっき試料と比較した結果、無電解めっきでは切削速度が 10m/min 以上では 50 μ m 間隔で大きな筋が形成されており、電気めっきと比較して表面粗さが大であった。

3) 電流密度が小さいほど膜中の 100 μ m 超の欠陥密度が減少する傾向にあり、電流密度による欠陥制御が可能であった。

以上のように電気めっきの超精密加工では、高リン含有量では切削抵抗が低く、無電解めっきと比較して同等程度の切削特性を示すことがわかった。

(参考文献)

1) 山形 豊：精密工学会誌, 74, 1278 (2008)
2) 大和田 崇他：2009 年度精密工学会春季学術講演大会論文集, 241(2009)

3) 木曾田雄星他：日本機械学会第 8 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 159(2010)
4) 江田 弘他：精密工学会誌, 53, 132 (1987)
5) 江田 弘他：精密工学会誌, 55, 161 (1989)
6) A. Pramanik, et.al., *J. Mater.Process. Technol.*, 208, 400 (2008)
7) Rezaur Rahman, et.al., *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27, 911(2006)
8) Jose L. Carbajal. et.al., *J. Electrochem. Soc.*, 135, 2952(1988)
9) 影近 博他：表面技術, 40, 481 (1989)
10) 森河 務他：表面技術, 43, 353 (1992)
11) 増井寛二他：表面技術, 43, 195 (1992)
12) Robert. L. Zeller, III, et.al., *J. Electrochem. Soc.*, 139, 3464(1992)
13) Thomas. M. Harris, et.al., *J. Electrochem. Soc.*, 140, 3464(1992)
14) 奥田孝一他：日本機械学会第 6 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 139 (2006)