インクジェットプリントヘッドの機能部品における 形状形成用パンチの寿命向上に関する研究*

高島 永光** 高本 徹也*** 新井 聖*** 小河 秀幸*** 阿部 隆夫†

Research on the Improvement in a Durability of the Punch
for a production in the Functional Component of an Inkjet Print Head

Nagamitsu TAKASHIMA, Tetsuya TAKAMOTO, Akira ARAI, Hideyuki OGAWA and Takao ABE

A nozzle plate and a cavity base plate are functional parts of an inkjet print head respectively. The thin nozzle plate deformed through heat and its configuration with the cavity base plate. This deformation resulted from a large gap between the linear expansion coefficient of the nozzle plate and the silicon cavity base plate, and brought the deterioration of print quality. In order to solve this problem we replaced the silicon with nickel, and the deformation of the nozzle was reduced. However, it confirmed the new issue of low punch durability of the precision mold when making the nickel cavity base plate by the material transfer processing. To solve this issue, we have decreased the deformation that is applied to the punch for transferring, made the specular surface to the tip of the punch with the grinding process and coated the surface with Diamond Like Carbon(DLC). It has been confirmed that the solutions described above increase the punch durability of the precision mold by 15 times.

Key words: deformation of nozzle plate, linear expansion coefficient, nickel cavity base plate, punch durability, surface roughness of punch

1. 緒 言

ここ数年、微細加工技術分野の進歩には目を見張るものがある。ナノプリント、電鋳、フォトリソグラフィ、成形加工、プレス加工等の分野において、数 μm から数 nm へと、高い精度の追求がかなりのスピードで進んできている。そして産業と医療分野では、この微細加工技術の必要性が益々高まってきている^{1~13)}。産業分野の微細加工技術が適用される一つの例として、インクジェットプリンタのプリントヘッドが上げられる。プリントヘッドは、ノズルプレート、キャビティ基板、ピエゾ振動子等の微細な機能部品から構成されている。今後のプリントヘッドの重要課題は、「プリントスピードの高速化と良好なプリント品質を両立させること」である¹⁴⁾¹⁵⁾。高速化に対する一つの解決策は、ノズル数を増やすことである。このためには、ノズルプレートとキャビティ基板のサイズを大きくすることが必要とされる。従来はノズルプレートにステンレス鋼、キャビティ基板にシリコンを採用していた。しかし、ヘッドのサイズを大型化した場合に、製造工程で2枚のプレートを重ねて接着加熱するため、線膨張係数の違いから板厚が薄く剛性の低いノズルプレートに反りが顕著に発生していた。

こうした反りはインク着弾位置のずれを発生させ、プリント品質を劣化させる。

そこで著者らは、線膨張係数がステンレス鋼に近い材質を選択することから、キャビティ基板を従来のシリコンからニッケルに変更した。これにより高速化と印字品質の両立が可能となった¹⁶⁾。ニッケルキャビティ基板は、マイクロプレス工法により製作した¹⁷⁾¹⁸⁾。

前報¹⁹⁾において、V字反りと基板の段差の原因は、高精度に製作されたパンチとダイの形状をニッケル材料に転写する過程で、ニッケル内に応力が残留したことにあると考えた。マイクロプレス工程内のみでの解決策ができなかったV字反りと基板の段差について、マイクロプレス加工後に両面マイクロポリシング加工を用い、それらを低減する方法を明らかにした。

しかし、キャビティ基板を形成する精密金型内のパンチが、早い段階で破壊するという課題については未解決であった。本研究は、ニッケルキャビティ基板の加工時の加工力に着目し、精密金型の形状形成用パンチの寿命(寿命とは、精密金型の加工をスタートしてパンチが破壊に至るまでの寿命を言う)を向上させる手段を確立することを目的とする。

* 原稿受付 平成 25 年 4 月 1 日

** 正 会 員 セイコーエプソン(株) (長野県塩尻市広丘原新田 80)

*** セイコーエプソン(株) (長野県塩尻市広丘原新田 80)

† 信州大学繊維学部 (長野県上田市常田 3-15-1)

2. プリントヘッドとその製造方法

2.1 プリントヘッドの構造

プリントヘッドの基本構造の断面図を、図 1 に示す。プリントヘッドは、多数のノズルを配列したノズルプレート①、インクを一時的に蓄積しておく圧力室を保有するキャビティ基板②、ピエゾ素子を櫛歯状に加工し微小な変位を作り出すピエゾ振動子③、ピエゾ振動子からの微小な変位を伝える薄膜振動板④、接着剤⑤などから構成される。インク流路を⑦で示す。インクは、振動子からの微小な変位をキャビティ基板内の圧力室⑥で微小な弾性エネルギーとして受けた後、連通口⑤からノズル⑧に圧力波として伝達して、様々なサイズのインク滴を射出する。

図 2 にキャビティ基板の構造を示す。図 2 (a)は、キャビティ基板を、上側から見た写真である。圧力室 A(図 2 (b)の A)は、1st line と 2nd line に 180 個ずつ配置され、総数 360 個から成る。キャビティ基板は、12mm×30mm×0.3mm のサイズである。1st line における圧力室のサイズは、1.6mm×25.35mm である。図 2 (b)は、1st line における圧力室と連通口の正面拡大図と圧力室と連通口の側面拡大図である。圧力室と連通口の側面拡大図は、E~E'の断面を F 方向から見ている。圧力室 A は、サイズが縦 1.6mm、横 0.11mm、深さ 95 μ m で、圧力室間のピッチが 0.141mm で、圧力室間の棧が 0.031mm である。連通口 B (図 2 (b)の B)は、サイズが縦 0.15mm、横 0.083mm、貫通長さ 0.205mm で、連通口間のピッチが 0.141mm である。図 2 (b)の C は、1 列に配列される 180 個分の圧力室と棧の全長を示す (以下、圧力室の全長と呼ぶ)。

プリントスピードを高速化させるための一つの方法は、プリントヘッドのノズル数を増加させ、同時にプリントするエリアを広めることである。一つの手段としてノズルプレートのサイズを大きくすることが有効となる。一方プリント品質を向上させるための一つの方法は、ノズルプレートの反りの抑制によるインク吐出方向の安定化が考えられる。従来からノズルプレートの材質にはステンレス鋼、キャビティ基板の材質にはシリコンを使用してきたが、線膨張係数はステンレス鋼が $14.7 \times 10^{-6}/K$ で、シリコンが $2.6 \times 10^{-6}/K$ で二つの係数値に $12.1 \times 10^{-6}/K$ の差があった。そこで、キャビティ基板の材質をシリコン製から金属製に置き換えることとし、金属材質としてニッケルを選択した。その理由は、ニッケルは線膨張係数が $13.4 \times 10^{-6}/K$ でステンレス鋼に近いこと、インクに浸漬しても腐食現象が発生しないこと、そして硬度が低めでパンチ形状が正確に転写されやすいことにある²⁰⁾。キャビティ基板を従来のシリコンからニッケルに変更することで、接合後のノズルプレートの凸状の反り量は、70 μ m から 25 μ m に小さくなった。この結果、プリント品質はシリコン製プリントヘッド以上に向上した¹⁶⁾。

2.2 ニッケルキャビティ基板の加工プロセス

ニッケルキャビティ基板 (以下基板と呼ぶ) の加工プロセスは、圧力室を形成するためのプレス工程と、プレス加工で発生した凹凸形状を平坦に仕上げるためのポリシング工程から成る。プレス工程は、マイクロプレスによる転写

加工を応用した。素材は、板厚 0.35mm の純ニッケルを使用した。工程は、[工程 1. 穴抜き → 工程 2. 圧力室形成 (Step 1+Step 2) → 工程 3. 微細穴抜き → 工程 4. 外形抜き → 工程 5. 反り修正 → 工程 6. ポリシング] から構成される。工程 1 では、形状穴などの穴抜き加工を数箇所に行う。工程 2 では、圧力室の転写加工による形成を行う。圧力室の形状は、縦 1.6mm、横 0.11 mm、深さ 133 μ m 以上に仕上げられる。工程 3 では、圧力室内の連通口の角穴抜き加工を行う。工程 4 では、窓抜き加工により基板の外形を加工する。工程 5 では、基板の縦方向と横方向の反り修正を行い平坦にする。最終の工程 6 では、ポリシング加工により基板の平坦度と面粗さを仕上げて、圧力室の深さ 95 μ m 以上に加工する。

工程 2 の圧力室の加工 Step の詳細を、図 3 に示す。図 3 の右上図は、パンチ 1 と 2 の拡大断面図である。C'は、パンチ 1 と 2 の全長長さを表す。圧力室の加工は、パンチ 1 と 2 の寿命と圧力室の品質を確保する観点から 2 つの Step に設定した。2 つの Step について、図 3 の(a) (b)に示す。理由は以下の通りである。1 つの Step では、圧力室の形成時の加工力が大きいため、形状形成用のパンチの寿命が極めて低くなることが考えられる。しかし Step 数を増やすと、圧力室の相対的な位置ズレにより、パンチ 1 と 2 とニッケル素材がこすれ微細なバリを発生する。圧力室から分離した微細なバリは、インク流路 (図 1 ⑦) 内を通りノズル穴 (図 1 ⑧) に詰まることで、インクを飛ばすことができなくなる。従って、加工力とバリの観点から 2 つの Step とした。パンチ 1 と 2 で、1st line および 2nd line の圧力室の同時成形を行った。圧力室の深さは、Step 1 (図 3 (a)) にて 100 μ m を加工し、Step 2 (図 3 (b)) にて 133 μ m を加工した。Step 1 では、複数の凸形状部を有したパンチ 1 とダイ 1 により、ニッケル素材を凸形状部の隙間に転写加工させた。Step 2 では、圧力室間の棧の形状を確保するために、Step 1 で加工したダイ側の複数の凸形状部を平らな形状を有したダイ 2 で潰し、複数の凸形状部を有したパンチ 2 により圧力室形状を仕上げた。図 3 (a)の C'は、1 列に配列される 180 個分の圧力室に相当するパンチ 1, 2 の全長を示す (以下、圧力室のパンチの全長と呼ぶ)。

2.3 圧力室形成パンチの破壊

工程 2 の Step 1 と Step 2 における圧力室形成用パンチ 1 と 2 において、量産時の目標寿命 5000 パンチ以上と比較して、パンチ 1 が 800 回、パンチ 2 が 550 回という寿命で破壊が生じた。特に、パンチ 2 が低寿命であった。圧力室形成金型の Step 2 のパンチ 2 が、550 回繰り返し加工して破壊した状態を図 4 の電子顕微鏡写真に示す。図 4 から、アドレス #180 において、凸形状部が破損した。隣のアドレス #179 において、凸形状部の根元にクラックが発生していることが観察される。パンチ 2 の破壊現象は、n=10 の検証実験からほぼアドレス #1 とアドレス #180 に発生し、400 回から 700 回の範囲で破壊していることが確認された。

Fig. 1 Head Structure in cross sectional view

Fig. 4 Electron microscopic image of broken punch 2 of WEDM, 550 times of durability

Fig. 2 Structure of Ni cavity base plate
A: Pressure chamber
B: Hole connecting to nozzle plate
C: Total length of pressure chambers

Fig. 3 2 manufacturing steps of pressure chambers in precision mold
C': Total length of punch 1・2

3. 実験および検討

3.1 圧力室形成パンチの破壊要因の推定

パンチ 2 が低寿命で破壊する主要原因を、ニッケルキャビティ基板の形成時に大きな加工力を要し、その加工力がパンチ 2 に繰り返し作用することで、パンチ 2 の剛性の低い箇所には疲労が蓄積すると推定した。メカニズムは、以下の通りに推定する。①圧力室を形成するときの加工力が大きいため、パンチ 1 と 2 へ負荷する応力も大きい。②パンチ 1 加工時に発生するパンチ 1 の弾性変形により、パンチ 1 加工後の圧力室の全長がパンチ 2 の凸形状部の全長よりも長くなる。パンチ 1 加工時において、キャビティプレートに形成された圧力室の位置とパンチ 2 の凸形状部の位置がずれる(特にパンチ 2 の両端部)。パンチ 2 加工時において、パンチ 2 の凸形状の根元部に変形が生じる。③特にパンチ 2 の両端部(圧力室のアドレス #1 とアドレス #180 付近)に高い応力が集中して、根元部で破壊が生じる。

生産設計上において圧力室形成時のおよその加工力を知るために、見積りを行った。2 列に連なる 360 個の圧力室を加工するための加工力を、式(1)により求めた。

$$P = l_t t \tau \quad (1)$$

360 個の圧力室の周長が $l_t = 1231.2 \text{ mm}$ 、板厚に相当する因子が圧力室の平均深さと考え $t = 0.15 \text{ mm}$ 、パンチ 2 の形状因子などを考慮して、冷間鍛造加工に必要な抵抗値がニッケルのせん断抵抗値 250 N/mm^2 の 5 倍と予想して $\tau = 1250 \text{ N/mm}^2$ と設定した。その結果式(1)により、360 個の圧力室(図 3(a)(b))を形成するための加工力は、 230.8 kN となった。1 個当たりの圧力室(Step 1: $0.11 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$, Step 2: $0.11 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 133 \mu\text{m}$)を形成するための加工力は 0.64 kN となった。また、圧力室のパンチ 2 の一山分の曲げ荷重を、式(2)より求めた。

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \delta h}{2 l_2^2} E \quad (2)$$

圧力室のパンチ 2 長さ $l_2 = 0.17 \text{ mm}$ 、パンチ 2 幅 $h = 0.11 \text{ mm}$ 、窒化粉末ハイスのヤング率 $E = 2.17 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ と設定した。弾性時たわみ δ は、パンチ 2 のアドレス #1 からアドレス #180 の最大弾性変形量が $41.00 \mu\text{m}$ であることがわかったため、その数値を凸部形状数 $n = 180$ で割ることで、 $\delta = 0.22 \mu\text{m}$ を得た。その結果として式(2)により、曲げ荷重は 273 MPa となった。パンチ 2 の一山分の曲げ荷重 273 MPa と抗折力

300MPa は 9%ほどの低い安全率であるため、破壊に至りやすい状態にあると考えられる。また一般的に、表面粗さが粗いとパンチ 2 加工時の摩擦抵抗が大きくなることが予測されるため、加工力を増大することに繋がると考えられる。

3.2 パンチ両端部に生じる破壊挙動の FEM 解析

圧力室形成パンチ 2 の破壊の要因をデータにより検証するために、パンチ 2 に負荷される応力について汎用 FEM プログラム LS-DYNA (ver.960) を用いて数値解析を行った。ここでは、ニッケル素材は弾塑性体材料 (MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY) とし、弾性率 2.0×10^{11} Pa, ポアソン比 0.3, 降伏応力 4.9×10^8 Pa, 降伏後の塑性硬化係数 1.3×10^8 Pa と設定した。パンチ 2 およびダイ 2 は弾性体材料 (MAT ELASTIC) とし、弾性率 2.17×10^{11} Pa, ポアソン比 0.3 と設定した。境界条件は、ダイを固定因子としパンチ 2 を上下方向の変位可能な因子として、圧力室加工時にニッケル素材の流動によりパンチ 2 が中心から外側へ変形させられることを想定した。

3.3 圧力室形成用パンチの寿命試験

4.2 節で述べるような弾性変形量を低減するために、形状補正を施したパンチ 2 について寿命試験を行った。工程 2 の圧力室形成工程の加工条件は、以下の通りとした。サーボプレス機械はコマツ産機 784kN、金型は圧力室を形成する精密金型を使用した。パンチ 2 の材質は、窒化粉末ハイス鋼を適用して硬度 880HV とした。圧力室ダイの材質は、ハイス鋼を使用して硬度 650HV とした。プレス機械の下死点精度は $\pm 5\mu\text{m}$ を確保して、パンチ 2 の形状精度は $\pm 3\mu\text{m}$ を確保した。被加工材は純ニッケルを使用した。こうした条件下で、Step 2 のパンチ 2 の寿命を確認した。パンチ 2 および圧力室の形状測定は $0.1\mu\text{m}$ の分解能を持つミツトヨ製非接触式三次元測定器 QV を使用し、パンチ 2 の表面粗さ測定は $0.1\mu\text{m}$ の分解能を持つ三鷹光器製三次元測定器 NH-III を使用した。

3.4 パンチの表面状態と寿命試験

パンチ 2 の表面粗さとパンチ 2 の寿命との関係を確認するために、パンチ 2 の表面粗さを数種類の水準に加工した。パンチ 2 加工の方法は、Wire Electrical Discharge Machining (以下 WEDM と呼ぶ) 加工と Profile Grinder (以下 PG と呼ぶ) 加工を選択した。コーティング膜には摩擦係数が 0.1 と小さい Diamond Like Carbon (以下 DLC と呼ぶ) 膜を適用し、イオン化蒸着法により成膜を行った。DLC 膜と母材との密着強度向上のために、中間層成分として Si と Cr の二種類を選択した。今回の実験は、A: WEDM のみ B: PG のみ C: WEDM + Si + DLC D: PG + Si + DLC E: PG + Cr + DLC F: PG + Cr + DLC (PG の加工条件変更) の 6 種類について進めた。WEDM 加工はマキノ製 UPH-1 を使用し、PG 加工はナガセ製超精密研削盤 SHS-80 を使用した。これらのパンチ 2 について表面粗さを測定して、パンチ 2 の寿命試験を行った (C~F は、DLC コーティング後に表面粗さを測定した)。条件は節 3.3 と同じである。パンチ 1 は A から F の実験用パンチ 2 と対であり、その都度交換を行った。

4. 結果ならびに考察

4.1 FEM による塑性流れと応力の解析

パンチ 2 の破壊現象のメカニズムを解明するために、FEM を使用して応力解析した。プレス機械の 1 ストロークに相当する 0 度から 360 度の角度間において、FEM により、凸形状の根元部の主応力の変化について解析した結果を図 5 に示す。主応力は、パンチ 2 の凸形状の先端部に生じる圧縮応力、側面部に生じる引張り応力、根元部に生じる引張り応力に発生する。今回はパンチ 2 の凸形状の破壊の起点となった根元部に着眼した。横軸はプレス機械の角度、縦軸の左は主応力、縦軸の右側がパンチ 2 の上下方向の位置を表す。I は、パンチ 2 の位置が最下位の下死点にある状態を示す。II は、パンチ 2 の位置が下死点から上方向に少し移動して、ニッケル素材から離れる状態を示す。パンチ 2 が下方向に移動する際に圧縮応力が生じて、パンチ 2 が上方向に移動する際に引張り応力が生じる。図 5 から、主応力は 250 度から 260 度付近で最も大きくなることから、パンチ 2 が上方向に移動する際に生じる引張り応力の影響があることがわかる。253 度付近において、アドレス #180 付近のパンチ 2 の根元部に発生する主応力と圧力室加工時のニッケル素材の流動の断面拡大図について、図 6 に示す。図 6 (a) は、横軸がパンチ 2 において、圧力室のアドレス #177 からアドレス #180 に相当する位置、縦軸が主応力を表す。主応力値は計算により得られた数値で、パンチ 2 の凸形状に発生する弾性時たわみを考慮して、シミュレーションを実施した。図 6 (b) はパンチ 2 とニッケル素材により、形成された圧力室 (アドレス #177 からアドレス #180 までの 4 個の圧力室) の断面拡大図を表す。図中の矢印は、圧力室加工時のニッケル素材の流動方向を示す。図 6 (a) から、アドレス #180 の圧力室は主応力が大きく、主応力はアドレス #177 からアドレス #180 にかけて、少しずつ大きくなることから、図 6 (b) から、ニッケル素材は圧力室を形成する過程で、パンチ 2 の中央部はニッケル素材の流動が少なく、パンチ 2 の中央部から外側の方向に多くのニッケル素材が流動することが考えられる。

得られたデータから、パンチ 2 が折れるメカニズムを推定した。①圧力室の加工のスタートとともに、パンチ 2 に圧縮応力が作用する。②加工が進むにつれ、パンチ 2 の弾性変形の影響から凸形状部が横および外側方向に変形して、ニッケル素材がパンチ 2 の中心から両端部に流動する (図 6 (b))。③加工時にニッケル素材が両端部に流動することにより、アドレス #180 の凸形状部に圧縮応力と引張り応力が負荷する (図 6 (a))。④パンチ 2 がニッケル素材から離れる際に、アドレス #180 の根元部に大きな引張り応力が作用して、さらに加工時の応力により生じた基板の反りが凸形状部を変形させる。特に、#1 と #180 側の反りが大きいため、凸形状部の変形も大きくなる。⑤前述の①から④を繰り返すことで、曲げ応力が大きいパンチ 2 の根元部に疲労亀裂が発生し成長することで破壊に至る。以上から、パンチ 2 の破壊の原因は、1) 剛性の低いパンチ 2 の根元部が変形すること、特に、アドレス #180 の主応力と反りによる変形が大きいこと、2) 根元部の変形が繰り返されることで疲労が蓄積して

Fig. 5 Changing of main stress
I : Punch places on bottom dead point
II : Punch places on separating punch from nickel material

Fig. 6 Flow of nickel material in cross sectional view and main stress of punch 2

Fig. 7 Total length of punch and pressure chambers
a: Total length of pressure chambers of step 1, after 800 times
b: Total length of punch 2
c: Rectified $-24.00\mu\text{m}$, total length of punch 1

破壊に至ることが考えられる。

4.2 パンチの弾性変形の低減

Step 1 加工後の圧力室の全長 (図 2 (b) の C: Total length of pressure chambers) と Step 2 のパンチ 2 の全長 (図 3 の C': Total length of punch 2) の差が小さければ、圧力室形成時におけるパンチ 2 と Step 1 加工後の圧力室との位置ずれが小さくなり、パンチ 2 の根元に作用する応力が減少すると想定した。パンチ 2 と圧力室の全長の実測値を図 7 に表す。横軸は、パンチ 1, Step 1 加工後の圧力室, パンチ 2, Step 2 加工後の圧力室, 縦軸は圧力室またはパンチの全長を示す。A は従来におけるパンチと圧力室の全長を示し、B はパンチ 1 に補正を施した場合のパンチと圧力室の全長を示す。補正とは、パンチ 1 の全長をある数値だけ短くすることをいう。a は、加工後の Step 1 の圧力室の全長を示す。b は、Step 2 のパンチ 2 の全長を示す。従来は、加工後の Step 1 の圧力室の全長とパンチ 2 の全長に $22.00\mu\text{m}$ の差 (a-b) があった。この差を小さくしてパンチ 2 の弾性変形量を抑えるために、パンチ 1 の全長 (図 3 の C') を短くすることにした。補正値は、a の加工後の Step 1 の圧力室の全長を $n=3$ 測定して、3 個の平均値である $24.00\mu\text{m}$ とした。 $24.00\mu\text{m}$ の補正値を 180 個存在する凸部形状の 1 個分に換算すると、 $0.13\mu\text{m}$ 短く補正を施したことになる。c は、 $-24.00\mu\text{m}$ を補正した Step 1 のパンチ 1 の全長を示す。補正したパンチ 1 を組み込んで、加工後、Step 1 の圧力室の全長とパンチ 2 の全長との差を測定すると、測定差 $5.00\mu\text{m}$ で従来の $22.00\mu\text{m}$ に対し 1/4 以下となった。パンチ 1 の補正の効果として、パンチ 2 の寿命を 550 回から 850 回へと高めることができた。図 7 から補正後におけるパンチ 1 とパンチ 2 の最大弾性変形量を比較すると、パンチ 1 が $30.00\mu\text{m}$ 、パンチ 2 は $41.00\mu\text{m}$ で $11.00\mu\text{m}$ の差があった。パンチ 2 には $11.00\mu\text{m}$ 分の大きな応力がかかり、厳しい加工条件にあったと考えられる。この仮定から、パンチ 2 がパンチ 1 よりも変形応力が高いことが予想される。

4.3 パンチの表面粗さの向上と摩擦抵抗の低減

ニッケル素材とパンチ 2 間の摩擦抵抗を小さくして、パンチ 2 に与える応力を減少するために、パンチ 2 の表面粗さを小さくして低摩擦抵抗の DLC 膜を施した。実験の条件として、節 4.2 で良い結果の得られたパンチ 1 の補正を施した。加工条件が異なる A~F (節 3.4) のパンチ 2 の寿命の確認結果を図 8 に表す。横軸はパンチ 2 の加工と処理、縦軸の左はパンチ 2 の寿命、縦軸の右はパンチ 2 の先端部の表面粗さを表す。A と B の比較では、B の PG の寿命が 250 回高かった。PG によって、パンチ 2 を鏡面化した効果と考えられる。A と C の結果から、DLC コーティングの効果により寿命が 500 回延びた。C と D では、WEDM 加工時に発生する劣化層を PG 加工により除去することで、パンチ 2 の素材と DLC 膜との密着性が向上して寿命が 400 回延びたと考えられる。DLC 膜とパンチ 2 の素材の中間層である Si が、パンチ 2 の素材の窒化粉末ハイスに対して親和性が悪いため、親和性が良い Cr を適用してみた。D と E の比較から見られるように、中間層成分を Si から Cr へ変更した効果として、寿命が 1050 回向上した。A と E から、PG 加工によるパンチ 2 の表面の鏡面化と DLC 膜コーティングの効果によ

り、寿命が 850 回から 2800 回に延びた。さらに E の寿命が 2800 回であったのに対し、F が 8000 回と良好な数値を示した。図 8 の E と F のパンチ 2 の表面粗さを比較すると、F の数値が 1/10 に小さくなっている。表面粗さの測定は DLC コーティング後であるが、表面粗さはコーティング前の研削面の状態による影響が大きいと考えられる。表面粗さが小さいとパンチ 2 加工時の摩擦抵抗が小さくなることが予測されるため、加工力が低減してパンチ 2 の寿命が向上したと考えられる。パンチ 2 の表面粗さを小さくすることができた過程は、以下の通りである。耐用試験前の E のパンチ 2 の先端の表面状態を観察した。電子顕微鏡写真を図 9 (a) に示す。パンチ 2 の先端部に凹凸があり、表面粗さが $1.0\mu\text{mRz}$ と粗い状態であった。この時の研削加工の条件は、砥石の回転数が 20000rpm、工作物の送り速度が $0.007\mu\text{m/s}$ であった。表面粗さが粗い原因は、砥石の回転数と工作物の送り速度が速いことで、研削力が大きいことが考えられた。そこで、研削時の回転数を 18000rpm、工作物の送り速度を $0.005\mu\text{m/s}$ に変更した。条件変更後の表面粗さは従前の $1.0\mu\text{mRz}$ から今回の $0.3\mu\text{mRz}$ となった。この $0.3\mu\text{mRz}$ のパンチ 2 が F である。パンチ 2 の先端の表面状態の電子顕微鏡写真を、図 9 (b) に示す。

最終的に、パンチ 2 の寿命は 550 回から 8000 回になり、15 倍の向上となった。形状形成用パンチ 2 の破壊の推定、そしてそれを基に実施した対策が正しかったことを実証することができた。

Fig. 8 Durability of pressure chamber punch 2
A: WEDM B: PG C: WEDM+Si+DLC
D: PG+Si+DLC E: PG+Cr+DLC
F: PG+Cr+DLC (Changing of grinding process method)

Fig. 9 Electron microscopic images, two surface situations of punch 2 edges

5. 結 言

インクジェットプリンタにおける高速化と高画質化を両立できるニッケルキャビティ基板を形成する過程において、精密金型の形状形成用パンチ 2 の寿命が低いことが課題となった。パンチ 1 が 800 回、パンチ 2 が 550 回で、パンチ 1 が耐久性に優れていた。原因は、圧力室を形成するときの加工力が大きいために、パンチ 2 へ負荷する力が大きくなっていると推定して、次の対策を検討して実施した。

- 1) パンチ 1 の形状を補正することで、パンチ 2 の根元部に作用する弾性変形を抑えた。
- 2) 研削加工によってパンチ 2 の表面を鏡面に仕上げて、DLC による表面処理を施した。

1) と 2) の結果として、パンチ 2 の寿命が 550 回から 8000 回となり、15 倍の向上が見られた。以上により、WEDM, PG, コーティングなどを各種検討した結果として、最も良好な結果が得られる条件を見出すことが可能となった。これにより、ニッケルキャビティ基板の実用化に繋がった。この手法は、多種多様な分野で適用される精密金属部品において、高精度化のための有効な工法の一つとして、展開と応用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 早乙女康典：マイクロ成形加工の現状と展望，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 614.
- 2) 田中茂雄：マイクロ犠牲樹脂型インサートを用いた金属粉末射出成形の高品質化，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 624.
- 3) 木内学：「精密部材成形用材料創製・加工プロセス技術の開発」成果の概要，精密塑性と加工，**49**, 570 (2008) 643.
- 4) 平井義彦：ナノインプリント加工の基本と応用，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 664.
- 5) 小林道雄：電鍍金型技術の開発動向，塑性と加工，**50**, 577 (2009) 83.
- 6) 古島剛，真鍋健一：金属マイクロチューブの製造加工技術，塑性と加工，**50**, 586 (2009) 981.
- 7) 八木隆：サーボプレス技術を活用した金型技術，塑性と加工，**47**, 546 (2006) 564.
- 8) 楊明：金属材料によるマイクロポンパルプの創成，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 654.
- 9) 村川正夫，野口裕之：FIB によるマイクロ金型・部品の加工，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 629.
- 10) 青木勇，笹田昌弘：マイクロせん断加工，塑性と加工，**49**, 570 (2008) 619.
- 11) 村田力：サーボプレスを前提とした金型設計，プレス技術，**45**, 12 (2007) 22.
- 12) 比田井洋史，伊東翔，戸倉和：UV レーザによるアスペクト比小径穴明け加工（第 2 報），精密工学会誌，**76**, 11(2010) 1226.
- 13) 山田啓司，加藤寛満，上田隆司，細川晃，田中隆太郎：YAG 高周波を利用したシリコンの微細加工，精密工学会，**76**, 11(2010) 1283.
- 14) Y. Saijo, T. Hirose, Y. Sato, K. Mafune, Y. Watanabe and K. Nakajima, "One-pass Photo Print Technologies of DreamLabo 5000", The Imaging Society of Japan, **51**, (2012) 45.
- 15) O. Watanabe, "Inkjet Line Head Technology for Digital Printing", The Imaging Society of Japan, **51**, (2012) 56.
- 16) 高島永光，米窪周二，新井聖，小河秀幸，阿部隆夫：インクジェットプリントヘッドのニッケルキャビティプレート加工精度と品質の研究，日本画像学会，**52**, 2(2013) 94.
- 17) 高島永光：特許公報，特開 2004-98672.
- 18) 高島永光：特許公報，特開 4-299150.
- 19) 高島永光，阿部隆夫：インクジェットプリントヘッド用ニッケル製キャビティ基板のボリシング加工技術の研究，精密工学会，**76**, 4(2010) 448.
- 20) 国立天文台編：理科年表，(2012) 473.