

信州大学審査学位論文

印字高速化と高画質化の両立および長期間吐出安定化を
図ったピエゾ型インクジェットプリントヘッドに関する研究

2013 年 9 月

高島 永光

目 次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景と必要性	2
1.2 これまでの研究と課題	3
1.2.1 印字速度の向上と印字品質の両立	3
1.2.2 長期間吐出安定化の確保	4
1.3 本研究の目的と内容	4
1.3.1 高速化と高画質	4
1.3.2 吐出安定化	4
1.4 本研究の構成と研究の概要	5
1.5 本研究における工学的応用の調査	5
1.6 参考文献	9
 第2章 インクジェットプリントヘッドの多ノズル化に向けたニッケルキャビティプレートの開発	
2.1 緒言	11
2.2 プリントヘッドの構造	11
2.3 ニッケルキャビティプレートの適用	12
2.3.1 ノズルプレートに発生する反りの改善	12
2.3.2 プリント品質	17
2.4 実験	19
2.4.1 圧力室の深さとインク滴の重量の関係	19
2.4.2 圧力室の深さとインク吐出周期による インク滴の重量の変化	19
2.4.3 ドットサイズのばらつきによる 濃度むらの発生原因と抑制	20
2.5 結果と考察	20
2.5.1 圧力室の深さとインク滴の重量の相関	20
2.5.2 圧力室の深さとインク吐出周期によるインク滴の重量の変化の関係	23
2.5.3 濃度むらの発生原因と抑制の確認	23
2.6 結論	29

2.7 参考文献	31
----------	----

第3章 インクジェットプリントヘッドのインクリーク防止のためのニッケルキャビティプレートポリシング加工技術の確立

3.1 緒言	33
3.2 インクジェットプリントヘッドの構造	33
3.3 ニッケルキャビティプレートに要求される品質	34
3.4 ニッケルキャビティプレートの加工方法	34
3.5 段差削減実験	39
3.5.1 マイクロプレス後の圧力室の深さと段差の測定	39
3.5.2 研磨量と段差の測定	39
3.5.3 研磨布硬度と段差の測定	39
3.5.4 砥粒供給量と段差の測定	40
3.6 結果と考察	40
3.6.1 マイクロプレス後の圧力室の深さと段差	40
3.6.2 研磨量と段差	40
3.6.3 研磨布硬度と段差	43
3.6.4 砥粒供給量と段差変化	49
3.7 結論	49
3.8 参考文献	51

第4章 インクジェットプリンタの吐出安定化に向けたインク流路における空気浸入と気泡成長の防止

4.1 緒言	53
4.2 吐出不良現象	54
4.3 実験	57
4.3.1 樹脂材質の気体透過数の測定	57
4.3.2 ガラス材を含む複合材質の気体透過数の測定	58
4.3.3 複合材質と改良を加えた流路構造の気泡成長の測定	58
4.4 結果と考察	61
4.4.1 高バリア性材質の選択結果	61
4.4.2 ガラス材を含む複合材質の効果	62

4.4.3 気泡成長の測定結果	64
4.5 結論	70
4.6 参考文献	72

第5章 インクジェットプリントヘッド用ニッケルキャビティプレートの実用化に向けた圧力室形成パンチの寿命向上

5.1 緒言	74
5.2 プリントヘッドとその製造方法	75
5.2.1 プリントヘッドの構造	75
5.2.2 ニッケルキャビティプレートの加工プロセス	76
5.2.3 圧力室形成パンチの破壊	77
5.3 実験および検討	82
5.3.1 圧力室形成パンチの破壊要因の推定	82
5.3.2 パンチ両断部に生じる破壊挙動の FEM 解析	83
5.3.3 圧力室形成パンチの寿命試験	83
5.3.4 パンチの表面状態と寿命試験	82
5.4 結果ならびに考察	83
5.4.1 FEM による塑性流れと応力解析	84
5.4.2 パンチの弾性変形の低減	87
5.4.3 パンチの表面粗さの向上と摩擦係数の低減	88
5.6 結論	89
5.7 参考文献	93

第6章 総括

6.1 序言	95
6.2 本研究より得られた知見	95
6.3 本研究における工学的応用と将来展望	97

本研究に関する業績	99
-----------	----

謝辞	101
----	-----

第 1 章

緒論

第 1 章 緒論

1.1 研究の背景と必要性

インクジェットプリント技術は、写真のデジタル化や PC およびインターネットの普及により広い分野で活用され、飛躍的な進歩を遂げてきている。インクジェットプリント技術は、インク滴を吐出する多数のノズルをプリントヘッド内に配列して、媒体となる用紙などに非接触で文字や絵などを描くことができる。この技術は、紙メディア以外（ガラス、木材、金属、プラスチックなど）の素材へのプリントが可能で、装飾材、産業部品など多種多様なプリントに応用展開が期待されている^{1, 2)}。インクジェットプリンタ分野の主流であるシリアルインクジェットプリンタは、安価で高画質なプリントができることが大きな特徴で、ここ 10 年で飛躍的に普及してきた。近年、インクジェットプリンタはさらなる進化を続け、コンシューマー分野からオフィス・ビジネス分野に展開が進み、プリント用紙幅の長さを備えた大型化そして多ノズル化のプリントヘッドやラインプリントヘッドが、急速に実用化されてきている。

インクジェットプリンタの基本性能は、①普通紙への高画質、②高速印刷、③高速高精度な紙搬送が可能であることが挙げられる。今後、オフィス・ビジネス分野から要求される項目として、印字速度が早く高信頼性であることが挙げられ、この分野における要求レベルはますます厳しさを増している。こうした中、オフィス・ビジネス分野で使用されるインクジェットプリンタの課題の一つとして、印字速度の向上が挙げられる。競合プリンタとしてレーザープリンタが挙げられ、レーザーを凌ぐ印字速度が要求される。その解決のための一つの手段として、プリントヘッドの多ノズル化が挙げられる^{3~8)}。これまでのインクジェットプリントヘッドの小さな改良だけでは、多ノズルから吐出されるインク滴の重量のばらつきが発生すること等により、プリントヘッドの多ノズル化とプリント画像の高画質化の両立を図ることは極めて難しいと考えられる。インクジェットプリンタのもう一つの課題として、長期間にわたって不連続に印刷を行った際にインクの吐出不良を生じないようにすることが挙げられる。吐出不良とは印刷した紙等を肉眼で観察したときに、着弾したインク滴が乱れている状態である。インクジェットプリンタにとって吐出不良は大きな品質の問題であり、商品の信頼性に大きく影響を与える。これまでインクジェットプリンタの信頼性に関しては、プリントヘッドとインクを主体に、ノズル詰まり、ノズル乾燥時の噴射挙動、インクの粘性増加等に関係する研究が進められ、プリントヘッドとインクが改良され

ることで、インクジェットプリンタの信頼性が高められてきた^{9~12)}。昨今、コンシューマー分野からオフィス・ビジネス分野へ展開が進むことで、さらにインクの速乾性を高めることが要求される。インクの速乾性を高めるためには、インクに含有される水分量を少なくすること、揮発性の成分を混ぜること等いくつかの方法が挙げられる。しかしこれらの方法に対するリスクとして、インク流路上で水分が蒸発し、吐出不良を発生させる頻度が増え、長期間吐出安定化を得ることがますます難しくなると考えられる。

1.2 これまでの研究と課題

印字高速化のためには、印字速度を向上する必要がある。印字速度を向上するためには、プリントヘッドを多ノズル化が必要となる。多ノズル化を達成する手段として、ラインプリントヘッドの開発が進められている。ラインヘッドには、ヘッド内を多ノズル化していく方法と数個のヘッドを効率よく並べる方法がある。二つの方法は印字速度を高めるために有効な手段となるが、高画質化を実現することがかなり難しい。その理由として、多ノズル化により吐出されるインク滴の重量が一定でないために、プリント品質が不安定になることが挙げられる。また多ノズル化することにより、インク流路数が増えインク流路の長さが延長し、インクの滞留する時間が長くなり、そしてインク流路壁の厚さが薄くなることで低バリア性となり、短期間において吐出不良を発生させる頻度が増える。何れにしても多ノズル化して長期間吐出安定化を確保することは、かなり難しいこととなる。この研究は印字高速化の重要なキーとなるプリントヘッドについて、以下の二つの課題を取り上げる。

1.2.1 印字高速化と高画質化を両立させる課題

印字速度の向上のためには、インクを吐出するためのノズルの数を増やすことが一つの手段となる。ノズルの数増やすことは、ノズルプレートそしてプリントヘッドのサイズを大型化することに繋がる。従来構造を用いてプリントヘッドを大型化そして多ノズル化すると、各プレートを構成する部材の線膨張係数の違いによりインク吐出部を形成するノズルプレートが時間の経過と共に変形する。変形したノズルプレートはインク吐出方向を不安定にして、着弾位置をばらつかせ、プリント品質を劣化させる。変形したノズルプレートの状態では、印字速度の向上とプリント品質の関係が相反して両立しない。二つの関係を両立させるためには、インクの吐出する方向を決めるノズルプレートの変形を抑制しなければならない。

1.2.2 長期間吐出安定化の確保を図る課題

コンシューマー用インクジェットプリンタにおいて、吐出不良が製品寿命より遥かに短い段階で見られ、商品の長期間吐出安定化の観点から大きな問題を有している。コンシューマー用インクジェットプリンタでは、吐出不良が時間の経過と共に起こる。吐出不良の解決策の一つとして、プリントヘッド内のインクと一緒に気泡をノズル穴から排出するクリーニングを定期的の実施すればよいが、クリーニングはインク量の消耗を増加させてしまうという欠点を持っている。今後、プリンタの分野がコンシューマーからオフィス・ビジネス分野に急速に拡大すると、プリンタの連続と不連続の動作回数が増えプリンタの稼動時間が長くなり、吐出不良の頻度が増えることが予測される。長時間稼動における長期間吐出安定化を確保することは、オフィス・ビジネス分野のプリンタにおいて用途の拡大と有用性を見出す重要な糸口となる。

1.3 本研究の目的と内容

高速化、高画質化、吐出安定化を図った多ノズル化プリントヘッドを実現するために、構造、材料、加工方法の観点から検討を進めた。

1.3.1 高速化と高画質化

印刷速度の向上には、インク吐出用の微細なノズルをより多く備えたプリントヘッドを用いることが、高速化の有効な一つ的手段となる。プリントヘッド内における温度は、ピエゾ振動子の連続的な動作により発生する熱などから約 40℃に上昇する。そのため、接着剤はこの温度に対して耐熱性のあるものが使用される。従来の構造でプリントヘッドを大型化すると、接着加熱接合時にノズルプレートとキャビティプレートの線膨張係数の違いによって、剛性の低いノズルプレートがインク吐出方向と同方向に凸状の変形を生じる。この凸状の変形は、インク吐出の方向をばらつかせて印字品質を劣化させる。線膨張係数は、ステンレス鋼を使用したノズルプレートが $14.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ で、シリコンを使用したキャビティプレートが $2.6 \times 10^{-6}/\text{K}$ である。2つの数値差は $12.1 \times 10^{-6}/\text{K}$ となる。

凸状の変形を生じないようにするために、以下の案が考えられた。

①ノズルプレートとキャビティプレートにおいて、近い線膨張係数を持つ材料を組み合わせ使用。キャビティプレートには、ステンレス鋼と線膨張係数の近いニッケルを使用。ニッケルの線膨張係数は、 $13.4 \times 10^{-6}/\text{K}$ であり、2つの数値差は 1.3

$\times 10^{-6}/K$ でシリコンと比較してほぼ 1/10 となる．またヤング率を比較すると，シリコンが 170GPa でニッケルが 214GPa であり，約 20%の剛性を高めることが見込める．

②ノズルプレートをシリコンに変更する．

③キャビティプレートをステンレス鋼に変更する．

ここで①から③について実現性を検討した．②において，ノズルプレートをシリコンに変更することは加工方法に難度がある．シリコンは引張強さが非常に低いので，加工方法としてレーザまたはエッチング加工を使用する．しかしながら，ノズルが有するテーパ形状を高精度で加工することが難しい．③において，ステンレス鋼は引張強さが高い．高精度化と高生産性の観点から，精密金型による冷間鍛造方法を用いてキャビティプレートを製作することが一つの方法として挙げられるが，パンチとダイの破損が低寿命で生じることが予測され実現性が低い．①において，ニッケルは引張強さがステンレス鋼の約 85%であるため，ステンレス鋼と比較して塑性加工により 3 次元形状を形成し易い．従って，①のキャビティプレートにニッケルを使用して，精密金型による冷間鍛造方法を適用することを最善策として選択した．

1.3.2 吐出安定化

吐出不良の原因は，プリントヘッドのインク流路内に存在する小さなサイズの気泡が，インク流路内に滞留している間に大きなサイズに成長し，インク流路幅を狭めてインク流量が減少して，吐出安定性が損なわれることにある．

気泡が発生しないようにするためには，以下の案が考えられた．

①水蒸気と酸素の浸透を遮断する．

②発生した気泡を遮断する．

③インク中に発生している気体を，気泡として発生させない．

ここで①から③について実現性を検討した．③はインク特性の改良が必要となり，インクとインク流路の双方の成分について化学反応に関する実験と評価を必要とすることから，期間が長期に渡ることが予測される．①と②のインク流路の改良については，物理的および機械的な実験と評価となるため，短期間での実現性が高い．そこで，①と②を適用することを最善策として選択した．

1.4 本研究の構成と研究の概要

本研究では，高速化を達成するための一つ的手段として，多ノズル化したプリントヘッドの基板となるキャビティプレートをニッケルで作製し，ニッケルキャビティプ

レートの加工方法を改良した。また、プリントヘッドのインク流路に関する材料と構造を改良した。その後、改良した内容を搭載したプリントヘッドを製作して、基礎評価と改良を繰り返して行い、上述の課題を解決に導いた。本論文では、以下の順序で論を進めた。

第1章の緒論は、日進月歩変化を遂げるインクジェット技術において、印字速度の向上と長期間吐出安定化の重要性と必要性についてまとめた。

第2章は、発表論文「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プリント品質の研究」を基にまとめた。ニッケルキャビティプレート製プリントヘッドにより印字評価を行ったところ、印字したサンプルの一部分に濃度むらが確認された。濃度むらはインク滴の重量の大きなばらつきに起因するもので、インク滴の重量ばらつきが圧力室の深さのばらつきとキャビティ厚みに相関があると考えられた。実験にて、圧力室の位置と深さ、インク滴の重量、キャビティ厚みについて測定を行った。得られた測定結果より、キャビティプレートの工法を一部変更して、圧力室の深さを改善した。ドットサイズのばらつきによる濃度むらの主原因は、圧力室の深さとインク滴の重量ばらつきにあることを解明した。

第3章は、発表論文「インクジェットプリントヘッド用ニッケルキャビティプレートのポリシング加工技術の研究」を基にまとめた。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プレートの加工方法に関する研究において、マイクロプレス加工を活用することにより、シリコン製からニッケル製キャビティプレートに置き換えを試みた。その結果として、パンチの寿命について実用可能な水準まで向上させるための方法を明らかにした。しかし、マイクロプレス加工により発生した数 μm の変形については、重要な課題として未解決のままであった。プリントヘッドの組み立てでは、キャビティプレートと薄膜振動板間、キャビティプレートとノズルプレート間を数 μm の接着剤厚みで接合した。プレートの段差が大きいと均一な接着層が形成されず、密着力や封止信頼性が確保できない。密着力が確保できない状態でプリントヘッド内にインクが流れると、インク漏れという現象が発生し、プリントヘッド品質にとって致命的欠陥となる。インク漏れとは、流路以外の場所にインクが流れ出る現象を言う。キャビティプレートと薄膜振動板が複雑な形状をしていることから、二部品の接合面積はかなり小さく、インク漏れを発生しやすい構造となっている。インク漏れを発生させないために、数 μm の接着剤厚みで接合することとプレートの段差を $2\mu\text{m}$ 以下にすることが要求された。数 μm の接着剤厚みが $2\mu\text{m}$ 以下のプレートの段差を覆い

補うことで、二部品のリーク漏れを発生させない構造としている。そこでマイクロ両面ポリシング加工を用いて、その変形を低減する加工技術を調べて、プレート上の段差を $2\mu\text{m}$ 以下に平坦化した。良好な解決策として、研磨布硬度と砥液供給量がプレート上の段差に効果があることを明らかにした。

第4章は、発表論文「インクジェットプリンタのインク流路における空気の浸入と気泡の成長防止に関する研究」を基にまとめた。吐出不良の原因として、プリントヘッドのインク流路内に存在する小さなサイズの気泡がインク流路内に滞留している間に大きなサイズに成長し、インク流路幅を狭めてインク流量が減少することが知られている。そのことがノズル穴から適正なインク滴の飛翔しない現象に結び付くと推察して、それを解決するために三つの方法を検討した。一つ目の方法は、インク流路内への空気の侵入を防止することを目的に、インク流路を構成する樹脂材質に高ガスバリア性を付加し、また流路部材内の樹脂材質に鱗片状ガラス材を混ぜることで、気体分子の移動する経路を迷路化して長くするものである。二つ目の方法は、現状の流路部材の構造を基本にし、インク流路に気泡が滞留してもインクが気泡を避けて流れるように、バイパスとなる数個の溝を設置するものである。三つ目の方法は、小さいサイズの気泡をインク流速が最も速い流路中心部へ誘導することを目的として、一枚の三角板形状のリブを設置するものである。これらの解決策により、インク流量が長期間にわたって減少せず、気泡成長にかかる期間が長期化することを明らかにした。

第5章は第2章と強く関連する内容であって、第2章で十分述べることはできなかった研究について、「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」を基にまとめた。インクジェットプリントヘッドの機能部品に、ノズルプレートとキャビティプレートがある。2枚のプレートを積層して加熱接合するとき、2枚のプレートの線膨張係数の違いにより、板厚の薄いノズルプレートに変形を生じた。ノズルプレートの変形は、プリント品質を劣化させる。著者らは、キャビティプレートの材質をシリコンからニッケルに変更することにより、ノズルプレートの変形を小さくした。しかしながら、キャビティプレートを金属転写加工で作ることによって、精密金型のパンチの寿命という新たな問題が確認された。金属転写加工とは、冷間鍛造によって金型のパンチとダイの形状を金属に転写することである。パンチが低寿命のままでは、ニッケルキャビティプレートを実用化することができない。その解決策として、転写用パンチに付加される変形を小さくし、研削加工によってパンチの表面を鏡面に仕上げて、DLCによる表面処理を施した。これらの解決策によって、精密金型のパンチの寿命が向上することを明らかにした。

第 6 章の結論は，本研究の成果と今後の課題についてまとめた．

1.5 本研究における工学的応用の調査

本研究は，高速化，高画質化，吐出安定化を図った多ノズル化プリントヘッドの実現に向けて検討を進めて，近い将来のビジネスについて構想を検討した．一方，ピエゾ型インクジェットプリントヘッドの持つ潜在的な技術は，多分野における広がりが予測される．この広がりについて調査を進めて，将来のビジネス構想を検討する．その内容について，第 6 章の結論でまとめる．

1.6 参考文献

- 1) 西城泰嗣, 広沢稔明, 佐藤陽平, 真船久美子, 渡部育朋, 中島一浩, “DreamLabo 5000 のワンパスフォトリント技術”, 日本画像学会誌, 51, pp.45-50(2012)
- 2) 渡邊修, “デジタル印刷機用インクジェットラインヘッド技術”, 日本画像学会誌, 51, pp.56-61(2012)
- 3) 碓井稔, “新方式 MACH(ML-Chips タイプ)の開発”, 日本画像学会誌, Japan Hardcopy' 1996 論文集, p.166(1996)
- 4) 北原強, “MACH の開発 (3pl ドロップの吐出技術)”, 日本画像学会誌, Japan Hardcopy' 2003 論文集, pp.217-220(2003)
- 5) 角谷繁明, “誤差拡散法による閾値操作方法”, 電子写真学会誌, 37, pp.186-192 (1998)
- 6) 林 広子, “インクジェットプリンタ用インクの高性能化と色材技術”, 日本画像学会誌, 45, pp.444-450 (2006)
- 7) 村山浩一, 井上邦弘, 矢竹正弘 他, “顔料系インクジェットインクのインクジェット専用メディアへの浸透挙動の解析”, 日本画像学会誌, 46, pp.236-240 (2007)
- 8) 石橋秀夫, “金属ナノ粒子の調製とインクジェット印刷による回路・配線パターン形成への応用”, 日本画像学会誌, 47, pp.536-542 (2008)
- 9) 森田直己, 平潟進, 浜崎聡信, “噴射ノズル滴の振動挙動観察に基づくノズル目詰まり機構の検討”, 日本画像学会誌, Imaging Conference JAPAN 2009 論文集, pp.221-224(2009).
- 10) 平潟進, 森田直己, 瀬戸信二, “循環路搭載型ヘッドにおけるノズル乾燥時の噴射挙動”, 日本画像学会誌, Imaging Conference JAPAN 2009 論文集, pp.217-220(2009).
- 11) S. Hirakata, M. Okuda, H. Nakamura, T. Ishiyama, S. Seto and N. Morita, “Improvement of jetting reliability against ink viscosity increase by installation of an ink circulation path”, Journal of the Imaging Society of Japan, Pan-Pacific Imaging Conference '08, pp.200-203(2008).
- 12) W. Zapka, S. Pausch, H. Rapp, “Improved Reliability in Industrial Inkjet Printing”, Journal of the Imaging Society of Japan, Final Program and Proceeding, pp.865-868(2008).

第 2 章

インクジェットプリントヘッドの 多ノズル化に向けた ニッケルキャビティプレートの開発

第2章 インクジェットプリントヘッドの多ノズル化に向けた ニッケルキャビティプレートの開発

2.1 緒言

個人用および産業用印刷分野で使用されているインクジェットプリンタにおいては、高速化の一つの手段としてプリントヘッドの大型化が挙げられる^{1~6)}。近年、プリント用紙幅の長さを備えたラインプリントヘッドが、急速に実用化されてきている。積層構造のプリントヘッドは数種類のプレートから構成され、薄膜の接着剤を各プレート間に塗布して加熱を施すことで接合している。これらのプレートを接合すると、個々のプレートの持つ線膨張係数の違いと加熱温度の影響から、インク吐出の機能を有するノズルプレートに反りを生じる。ノズルプレートの反りは、インクの飛行方向を不安定にしてプリント品質を劣化させる。

線膨張係数の観点から、ステンレス製ノズルプレートに接合されるキャビティプレートの材質のシリコンからニッケルに変更したところ、反りは低減された⁷⁾。しかし、ニッケルキャビティプレートを使用したヘッドによって得られたプリントサンプルを肉眼で観察すると、一部にドットサイズのばらつきによる濃度むらが見られた。この濃度むらは、高解像度のインク滴をプリントする条件下で発生していた。

本研究の目的は、ニッケルキャビティプレートを使用したヘッドの場合に発生する濃度むらの主原因が、インク滴の重量のばらつきに起因するものであると考え、圧力室の深さに着眼して、濃度むらを改善するための指針を得ることにある。以下にその内容を報告する。

2.2 プリントヘッドの構造

Fig. 2.1 に代表的なプリントヘッド（以下ヘッドと表示）の基本単位構造の断面図を示す。ヘッドは、多数のノズルを金属板の平面内に配列したノズルプレート（H）、圧力室を含む多数の微細な流路を内包するキャビティプレート（F）、ピエゾを櫛歯状に加工し微小で精密な変位を作り出す振動子（A）、振動子からの変位を圧力室の容積変化に変換する薄膜振動板（E）とケースヘッド（D）、接着剤（G）、連通孔（M）から構成されている。薄膜振動板（E）は、上下方向（N）に微小量の振動を繰り返す。インクはインクタンク（B）からリザーバ（I）と供給孔（J）を経て圧力室（K）に供給され、圧力室で振動板の振動を受けて、ノズル（L）から様々なサイズのイン

ク滴として吐出される．インクの通り道をインク流路（C）で示す．ヘッドの構成要素の中で，プリント品質に深く関連する部品はノズルプレート（H）とキャビティプレート（F）である．ニッケルキャビティプレートの概略図を **Fig. 2.2** に示す．（a）に，ニッケルキャビティプレートの写真と外形寸法を示す．ニッケルキャビティプレートは 12mm×30mm のプレートにおいて，1 ライン内に 180 個の圧力室と連通孔が存在し 2 列から構成されている．1st line にはブラックが 180 ノズル（＃1～＃180）配列して，2nd line には端部のイエロー 60 ノズル（＃1～＃60），中央部のマゼンタ 60 ノズル（＃61～＃120），端部のシアン 60 ノズル（＃121～＃180）が繋がって配列している．（b）に，ニッケルキャビティプレートの圧力室と連通孔の上側から見た拡大図の一部を示す．圧力室は幅(a_l)110 μ m×長さ(l)1600 μ m，連通孔は 150 μ m×82 μ m のサイズである．連通孔と連通孔の間の栈の幅は，31 μ m である．（c）に，ニッケルキャビティプレートの圧力室と連通孔の D 側から見た C₁ から C₂ の断面拡大図を示す．1st ラインと 2nd ラインは，配列上において対称形状である．圧力室の深さ(b_l)を 95 μ m，厚み(t)を 300 μ m として，インク吐出周期をこれらの条件用に設定した．ライン内の圧力室における配列の概略図を **Fig. 2.3** に示す．（a）は，1st line と 2nd line に 180 個ずつ存在する圧力室と連通孔の正面拡大図を示す．1st line と 2nd line は同形状である．図中の Address（以下アドレスと記す）とは，1 ラインあたり 180 個存在する圧力室の位置を示し＃1～＃180 の記号で表す．

2.3 ニッケルキャビティプレートの適用

2.3.1 ノズルプレートに発生する反りの改善

主要部品であるステンレス製ノズルプレート，キャビティプレート，ステンレスと樹脂を接合した薄膜振動板の 3 部品を加熱接合すると，個々の持つ線膨張係数の違いと加熱温度の影響から，ノズルプレートが凸状の反りとなる．インクの吐出方向に発生するノズルプレートの凸状の反りは，インク滴が放射線状に吐出する要因となりプリント品質を劣化させる．キャビティプレートを従来のシリコン製からニッケル製に変更することで，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．反り量の測定エリアは，ニッケルキャビティプレートの A から B (Fig. 2.2(a)) に相当するノズルプレートの上面で行った．シリコン製に対するニッケル製ヘッドの優位点は，ノズルプレートの反り量を抑えることでインクの着弾位置のばらつきを小さくできることである．次のステップとして，プリント品質の評価を進めた．

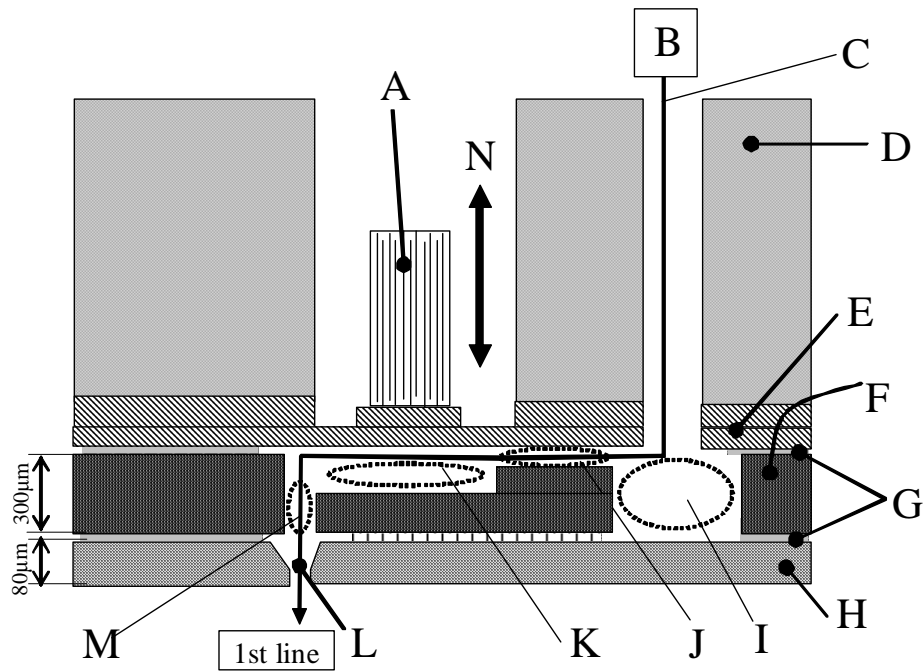


Fig. 2.1 Cross section of 1st line of inkjet print head.

A: Piezo actuator B: Ink tank C: flowing path D: Case head
 E: Thin vibrating plate F: Cavity plate G: Adhesive layer
 H: Nozzle plate I: Reservoir J: Supplying hole K: Pressure chamber
 L: Nozzle M: Hole connecting to nozzle plate
 Fig. 2.1 is a cross section when viewing from D of Fig. 2.2(a).

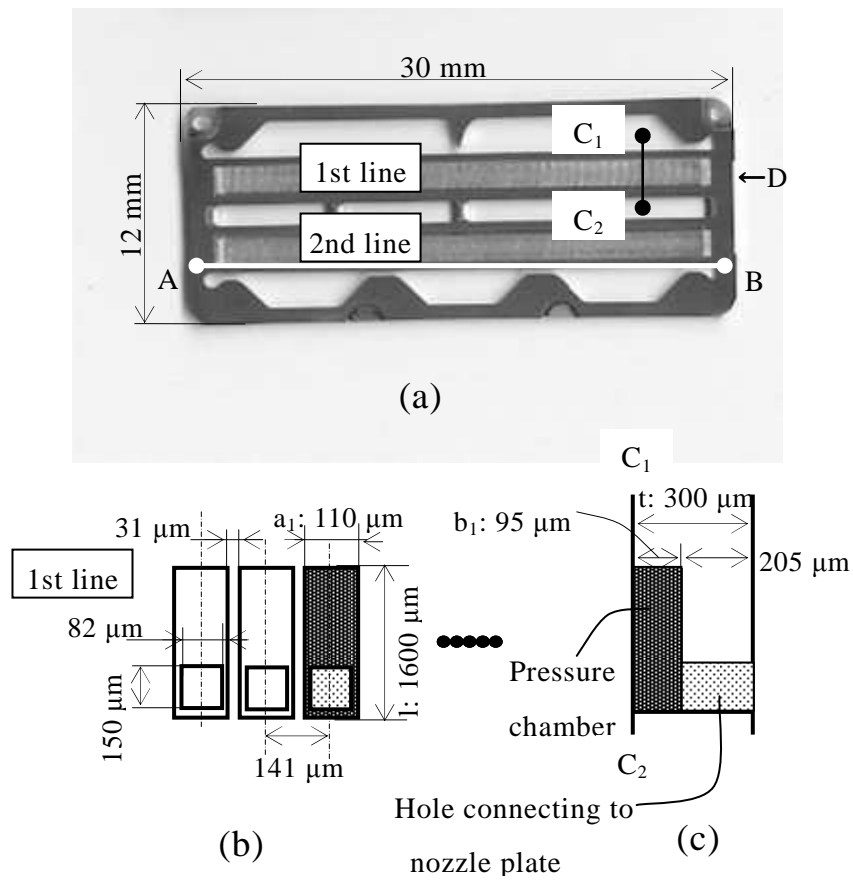


Fig. 2.2 Schematic figures of Nickel cavity plate (1).

A-B: Measuring points of longitudinal direction.

(a) Nickel cavity plate, front side.

(b) Expanding figure of top view (1).

(c) Cross section view of 1st line, lateral cross section C₁~C₂, viewing from D.

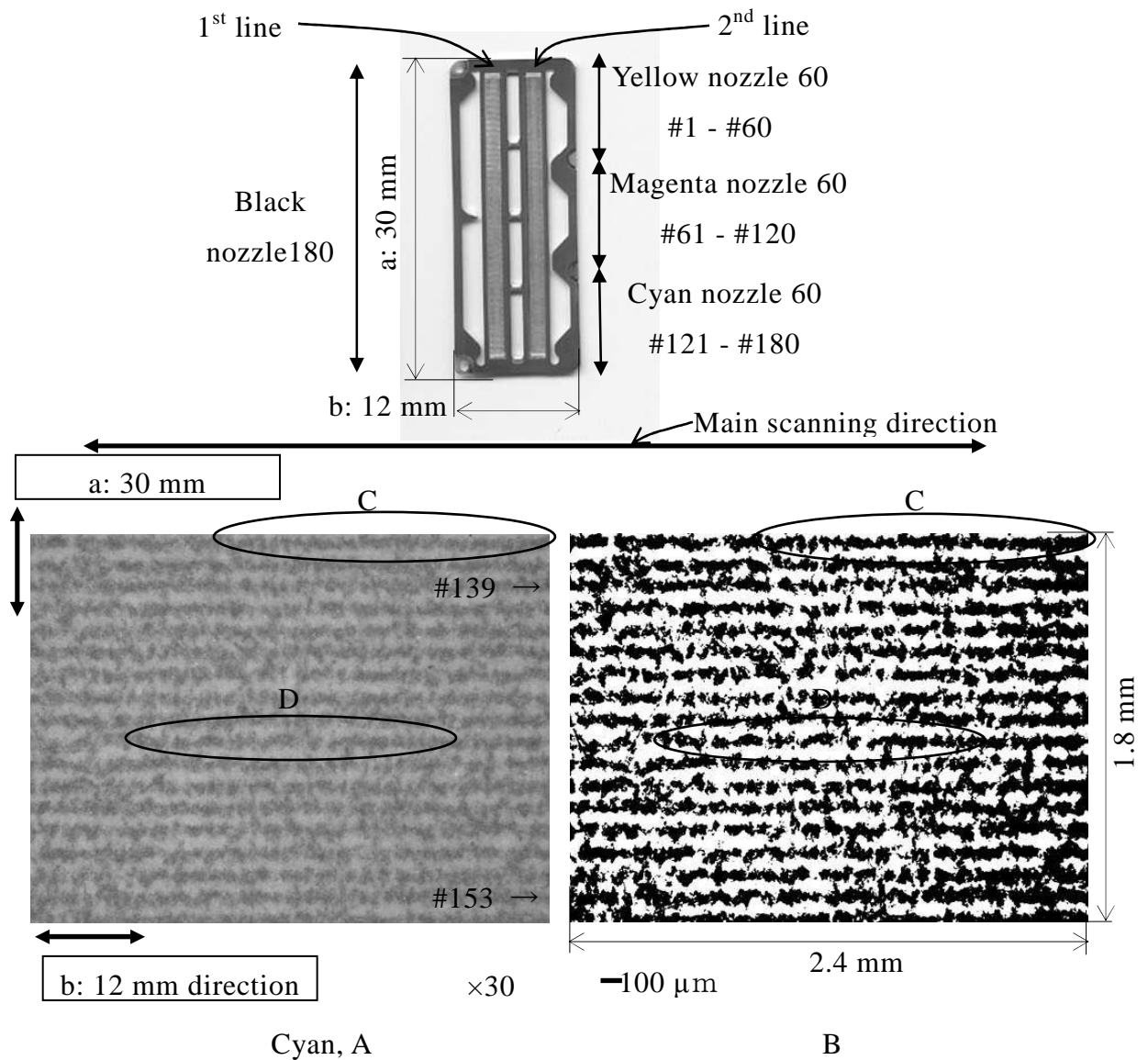


Fig. 2.4 Printed samples.
A: Photograph of original sample B: Binarized image of print one
C: Good printing D: Bad printing, size variation of ink droplets

2.3.2 プリント品質

ニッケルキャビティプレートを使用したヘッド（以下ニッケル製ヘッドと記す）のプリントサンプルを肉眼で観察すると、一部にドットサイズのばらつきによる濃度むらが見られた^{8,9)}。プリント評価は、ブラック（1st line, #1～#180）、イエロー（2nd line, #1～#60）、マゼンタ（2nd line, #61～#120）、シアン（2nd line, #121～#180）の色毎において、50 μ m ドットサイズを狙い値としてプリントを行う設定とした。50 μ m ドットサイズは、肉眼で濃度むらを判別する目安である。A4 用紙を縦にセットして、横方向へ繰り返しプリントを行った。濃度むらは、プリントしたサンプルのシアンの数ラインに目立って発生していた。濃度むらのシアンのプリントサンプルを、**Fig. 2.4** に示す。プリントサンプルに対して、a がヘッドの 30mm 方向、b がヘッドの 12mm 方向となる。プリントサンプルの b 方向が主走査方向である。ヘッドは主走査方向を、キャリッジ軸に沿って左右に往復する。ヘッド内の 2 列のノズルは、a の 30mm 方向と平行に位置している。紙は普通紙を使用した。Fig. 2.4 の A は、プリントサンプルをスキャナで読み取った画像である。画像を鮮明にするために二値化処理を施して、Fig. 2.4 の B を得た。濃度むらが発生している約 1.8mm×2.4mm の範囲を 30 倍の顕微鏡により観察すると、1 ライン中に大きなドットと小さなドットが見られた。濃度むらの実態は、約 10 μ m から 160 μ m の大きなドットと小さなドットの混在であり、#139～#153 ノズルでプリントした箇所に発生していた。C の箇所は良好なプリント品質を示し、D の箇所は濃度むらが発生しているプリント品質を示す。良好なプリント品質とは、肉眼で観察して同サイズのドットがほぼ均一に並ぶ状態を言う。濃度むらが発生しているプリント品質とは、大小サイズのドットが不均一に並ぶ状態を言う。

こうしたドットサイズのばらつきによる濃度むらの発生には、ニッケルキャビティプレートの圧力室の深さが影響していると考えられた。ニッケルキャビティプレートの圧力室の深さを Fig. 2.3(b)に示す。(b) は、ニッケルキャビティプレートの圧力室の深さの側面拡大図を示す。圧力室の深さを E で、圧力室の深さの #1 から #180 の差を F で表す。ニッケルキャビティプレートはプレス加工とポリシング加工から形成されて、塑性加工されたプレート面をポリシング加工により平坦に仕上げる。この加工方法により、ニッケルキャビティプレートの厚み（以下キャビティ厚みと記す）が薄くなり圧力室の深さの浅い箇所が発生する。ニッケル製ヘッドにおける濃度むらの原因は、キャビティ厚みが薄くなることで剛性が不足すること、圧力室の深さの浅い箇所が発生することで圧力室の深さのばらつきが大きくなることにあり、これらによりノズルから吐出するインク滴の重量ばらつきが大きくなると考えられる。

ノズルからインクが吐出する原理は以下の通りである．ピエゾ振動子の変位は，キャビティに存在する圧力室内のインクに弾性エネルギーとして変換される．弾性エネルギーは圧力波となって圧力室内を伝播し，定在波を形成する．定在波は，ノズル内インクを加圧し液滴を形成することで，ノズルからインクが吐出する．この原理とニッケルキャビティプレートにおいて関係しているパラメータが，キャビティの剛性と圧力室の体積である．①キャビティの剛性はピエゾ振動子の変位と関連して，ノズルから同時に吐出するインク滴の総重量を決める．薄いキャビティにより弾性エネルギーが減衰せずに圧力波に変わることによって，大きな圧力波が伝播して定在波を形成しインク滴の重量を大きくする．②圧力室の体積は，圧力室の深さと関連して個々のノズルから吐出するインク滴の重量を決める．インク液滴の形成はヘッドの管路を流れる流体運動であることから音響系の表現で示され，変数として体積変位 q （流路断面積を通過する流体体積）と圧力 p （インクを吐出する圧力）が用いられる．これらを機械系要素に対応させると，コンプライアンス C ，イナータンス I ，レジスタンス R の三つの成分となり，(1)式の運動方程式で表現される．

$$p = I\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q \quad (1)$$

コンプライアンス（ばねの要素）は，インクの圧縮性と柔軟性に起因する要素を示す．イナータンス（質量の要素）は，インクの質量に起因する要素を示す．レジスタンス（減衰の要素）はインクの流動に起因する要素を示す．コンプライアンスを(2)式に，イナータンスを(3)式に，レジスタンスを(4)式に示す^{10, 11)}．

$$C = \frac{a_l b_l l}{\rho v^2} \quad (2)$$

C はコンプライアンス($\text{mm}^4 \cdot \text{s}^2/\text{g}$)， a_l は圧力室の幅(mm)， b_l は圧力室の深さ(mm)， l は圧力室の長さ(mm)， ρ はインクの密度(g/mm^3)， v はインクの伝播速度(mm/s)を表す．

$$I = \frac{\rho l}{a_l b_l} \quad (3)$$

I はイナータンス(g/mm^4)を表す．

$$R = \frac{12\mu l}{a_l b_l^3} \quad (4)$$

R はレジスタンス(s^{-1}), μ はインクの体積速度(mm^3/s)を表す. コンプライアンスは圧力室の体積($a_l b_l l$)に比例する. イナータンスは圧力室の断面積: 幅(a_l) $110\mu m \times$ 深さ(b_l) $95\mu m$ に反比例する. レジスタンスは圧力室の深さ(b_l)の 3 乗に反比例する. 圧力室の深さが浅い場合は, コンプライアンスの逆数, イナータンス, レジスタンスが大きくなり, インクを吐出する圧力が大きくなり, 吐出されるインク滴の重量が増える. 圧力室の深さが浅い箇所が存在することで圧力室の深さのばらつきが大きくなり, その圧力室の深さのばらつきがインク滴の重量ばらつきを大きくして, 大きなドットと小さなドットが混在する濃度むらを発生させる要因に繋がると考えられる. 仮定を実証するために, 圧力室の深さとインク滴の重量の関係, 圧力室の深さとインク吐出周期によるインク滴の重量の変化の関係について実験を実施した.

2.4 実験

2.4.1 圧力室の深さとインク滴の重量の関係

ドットサイズのばらつきによる濃度むらを生じたニッケル製ヘッド D89 (平均圧力室深さ $89\mu m$ を示す. 以下 D89 と表す) において, 圧力室の深さとインク滴の重量との関係を知るために, ニッケルキャビティプレート内の圧力室 180 個中の 9 個の代表アドレス(#10, #30, #50, #70, #90, #110, #130, #150, #170)について, 深さのデータを取った. 圧力室の深さは, 三鷹光器製三次元レーザー測定器 NHIII (以下 NHIII と呼ぶ) で測定した. 9 個分のそれぞれの圧力室において, 1 個の圧力室内で G, H, I (Fig. 2.3) の三点を NH□により測定して三点の値を平均した. そして, ノズルプレート内の 180 ノズルを 20 ノズル毎(#1~#20, #21~#40, #41~#60, #61~#80, #81~#100, #101~#120, #121~#140, #141~#160, #161~#180)に分けて, それぞれノズルから吐出されるインク滴の総重量についてデータを取った. インク吐出周期は 1 ノズルあたり $1\mu s$ に設定して, このときのインク滴の重量は $0.75ng$ と見積もった. この設定において 20 ノズルを同時に吐出すると, インク滴の重量の狙い値は $15ng$ となる. ノズルから吐出されるインク滴の重量は, 自社製のインク飛行計測システムで測定した. 評価環境は温度が $25^\circ C$, 湿度が 30% に設定した.

2.4.2 圧力室の深さとインク吐出周期によるインク滴の重量の変化

ドットサイズのばらつきによる濃度むらを生じたニッケル製ヘッド D81 (平均圧力室深さ $81\mu m$ を示す. 以下 D81 と表す) において, インク吐出周期の変化とインク滴

の重量の関係を知るために、端部（＃1～＃20）と中央部（＃81～＃100）のそれぞれ20ノズル毎に吐出されるインク滴の重量についてインク吐出周期を変更してデータを取った．インク吐出周期の範囲は、1 μ s ～350 μ s とした．

2.4.3 ドットサイズのばらつきによる濃度むらの発生原因と抑制

濃度むらの発生の要因と考えられる圧力室の深さのばらつきを抑えるために、ニッケルキャビティプレートの工法を変更して効果を検討した．2つのニッケルキャビティプレートについて、圧力室の深さと厚みを測定した．得られたニッケルキャビティプレートを使用して、ニッケル製ヘッド2台を製作した．1台は、圧力室の深さとインク滴の重量について確認を行った．別の1台は、インク吐出周期を変化させたときの圧力室の深さとインク滴の重量について確認を行った．また濃度むらを定量的に把握するために、変更前後のプリントサンプルのドットサイズを、100箇所（10箇所/ライン×10本＝100箇所、10箇所のピッチ間隔約200 μ m）測定した．ドットサイズは、副走査方向のドット長さを代表値とした．ドットサイズの測定は、キーエンス製デジタルスコープVHX（最小単位0.01 μ m）を使用した．ヘッドは、シリコン製1台と、ニッケル製の工法変更前1台と後1台の計3台を測定した．

2.5 結果と考察

2.5.1 圧力室の深さとインク滴の重量の相関

濃度むらの生じたニッケル製ヘッドD89について、圧力室の深さ、インク滴の重量、圧力室の位置の関係を **Fig. 2.5** に、インク滴の重量と圧力室の深さの関係を **Fig. 2.6** に示す．**Fig. 2.5** は、横軸が圧力室のアドレス、縦軸が圧力室の深さとインク滴の重量を表す．**Fig. 2.6** は、横軸が圧力室の深さ、縦軸がインク滴の重量を表す．ヘッドD89に使用したニッケルキャビティプレートは、圧力室の深さが Max. 100 μ m, Min.81 μ m, Ave. 89.2 μ m , Range 19 μ m であり、キャビティ厚みが Ave.270 μ m であった．端部（＃1～20＃）と中央部（＃81～＃100）のそれぞれ20ノズルから吐出されるインク滴の総重量が 15.5ng～17.3ng, Ave. 16.8ng, インク滴の重量の Range が 1.8ng であった．**Fig. 2.5** から、圧力室の深さが深いとインク滴の重量が小さいことが確認された．**Fig. 2.6** から、圧力室の深さとインク滴の重量には負の相関があり、データが広範囲に渡って散在していることが確認された．

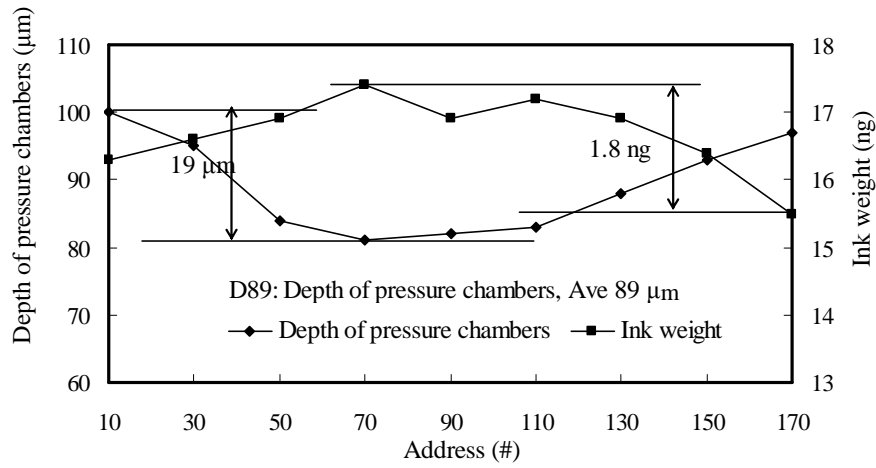


Fig. 2.5 Relation among Depth of pressure chambers, Ink weight and Address of the size variation of ink droplets.

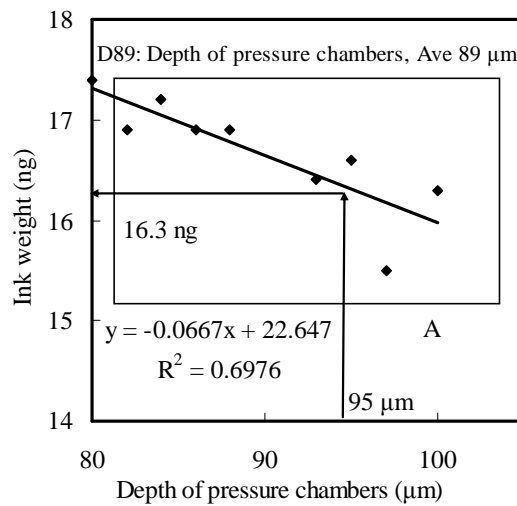


Fig. 2.6 Relation between Ink weight and Depth of pressure cambers of the size variation of ink droplets. A area is large.

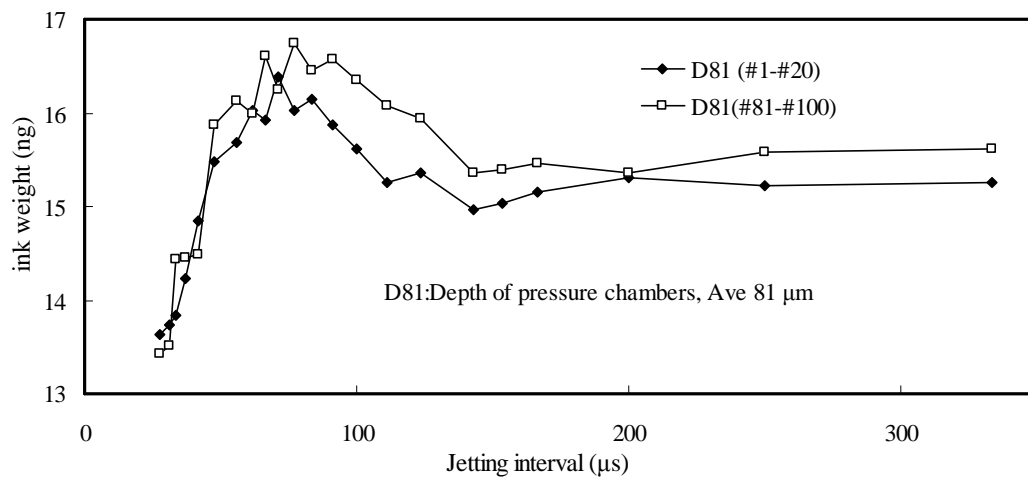


Fig. 2.7 Relation between Ink weight and Jetting interval of the size variation of ink droplets.

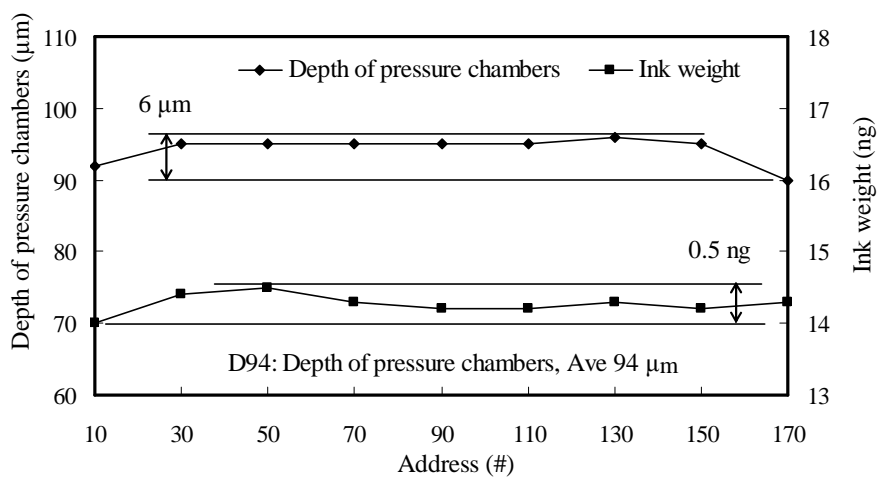


Fig. 2.8 Relation among Depth of pressure chambers, Ink weight and Address of no size variation of ink droplets.

2.5.2 圧力室の深さとインク吐出周期によるインク滴の重量の変化

濃度むらを生じたニッケル製ヘッド D81 について、インク滴の重量とインク吐出周期の関係を **Fig. 2.7** に示す。Fig. 2.7 は、横軸がインク吐出周期、縦軸がインク滴の重量を表す。#90 を中心に左右対称な形状であることから、端部（#1～#20）と中央部（#81～#100）の 40 ノズルを測定した。ヘッド D81 に使用したニッケルキャビティプレートは、圧力室の深さが Max. 82.8 μ m, Min. 78.5 μ m, Ave. 80.7 μ m, Range 3.7 μ m であり、キャビティ厚みが Ave. 273 μ m であった。インク吐出周期の 100 μ s～350 μ s の範囲内で、端部（#1～#20）と中央部（#81～#100）のそれぞれ 20 ノズルから吐出されるインク滴の総重量が 14.9 ng～16ng であった。狙い値 15ng に対してインク滴の重量が多めであり、インク滴の重量の Range が 1.1ng と大きかった。Fig. 2.7 から、端部（#1～#20）と中央部（#81～#100）においてインク吐出周期により変動しているインク滴の重量の数値に違いがあり、中央部（#81～#100）において約 0.5 ng インク滴の重量が多いことが確認された。

2.5.3 濃度むらの発生原因と抑制の確認

前述の実験により、インク滴の重量がばらつく主要原因が、圧力室の深さのばらつきが大きいことに関係していることが明らかになった。そこで新工法としてポリシングの加工方法を変更して、圧力室の深さが深く圧力室の深さのばらつきが小さいニッケルキャビティプレートを製作した。工法を変更したニッケルキャビティプレート 2 枚を、それぞれヘッドに組み込んだ。ニッケルキャビティプレートの 1 枚目は、圧力室の深さが Max. 96 μ m, Min. 90 μ m, Ave. 94.2 μ m, Range 6 μ m で、キャビティ厚みが Ave. 289 μ m であり、これを組み込んだニッケル製ヘッドが D94 である。2 枚目は、圧力室の深さが Max. 95.5 μ m, Min. 94.8 μ m, Ave. 95.2 μ m, Range 0.7 μ m で、キャビティ厚みが Ave. 288 μ m であり、これを組み込んだニッケル製ヘッドが D95 である。

ニッケル製ヘッド D94（平均圧力室深さ 94 μ m を示す。以下 D94 と表す）において、圧力室の深さとインク滴の重量について確認を行った。圧力室の深さ、インク滴の重量、圧力室の位置の関係を **Fig. 2.8** に、インク滴の重量と圧力室の深さの関係を **Fig. 2.9** に示す。20 ノズル毎に吐出されるインク滴の総重量は 14.2ng～14.5ng, Ave. 14.3ng となった。狙い値 15ng に近い数値となり、インク滴の重量の Range が 0.5ng で小さかった。Fig. 2.9 から、圧力室の深さとインク滴の重量には負の相関があり、データが狭い範囲にまとまっていることが確認された。Fig. 2.6 と Fig. 2.9 から得られた線形の傾きはほぼ同一であるため、ニッケル製ヘッドのインクを吐出する機能が同水準にあると

考えられる。プリント評価において、ニッケル製ヘッド D94 は濃度むらの発生が見られなかった。

ニッケル製ヘッド D95 (平均圧力室深さ 95 μ m を示す。以下 D95 と表す) において、インク吐出周期を変化させたときの圧力室の深さとインク滴の重量について確認を行った。インク滴の重量とインク吐出周期の関係を **Fig. 2.10** に示す。インク滴は、端部 (#1~#20) と中央部 (#81~#100) のそれぞれ 20 ノズルから吐出した。吐出周期 100 μ s~350 μ s 範囲内でノズルから吐出されるインク滴の総重量は 14.4ng~14.9ng となり、狙い値 15ng のインク滴の重量とほぼ同等となった。インク滴の重量の Range は、0.5ng と小さかった。ニッケル製ヘッド D81 の 1.1ng のばらつきと比較して 1/2 の数値を得た。プリント評価において、ニッケル製ヘッド D95 は濃度むらの発生が見られなかった。

これまでに得られたデータから D89, D81, D94, D95 について、圧力室の深さの平均値、圧力室の深さの差 (Max 値-Min 値)、キャビティ厚み、圧力室の深さの差/平均圧力室深さについて **Table 2.1** にまとめる。濃度むらの生じた D89 と D81 と濃度むらが見られなかった D94 と D95 から、濃度むらはニッケルキャビティプレートの平均圧力室深さが浅い場合に生じたことが明らかになった。D89 と D94 における圧力室の深さ、インク滴の重量、キャビティ厚みの関係を、**Fig. 2.11** に示す。Fig. 2.11 は、横軸がキャビティ厚みで縦軸が圧力室の深さとインク滴の重量である。D94 は、キャビティ厚みが厚く圧力室の深さのばらつきが小さくインク滴の重量のばらつきが小さい。D89 は、キャビティ厚みが薄く圧力室の深さばらつきが大きくインク滴の重量のばらつきが大きい。さらに、D89 と D94 におけるインク滴の重量とそのばらつきの関係をまとめた。インク滴の重量とアドレスの関係を、**Fig. 2.12** に示す。Fig. 2.12 は、横軸がアドレスで縦軸がインク滴の重量である。Table 2.1, Fig. 2.11, Fig. 2.12 から D89 と D94 を比較すると、キャビティ厚みが薄く圧力室の深さのばらつきが大きく圧力室の深さが浅い D89 が、ノズルから吐出するインク滴の重量が多くそのばらつきが大きくなる傾向にあることが確認された。

Fig. 2.6 と Fig. 2.9 から、ニッケル製ヘッド D89 と D94 の同じ圧力室深さ 95 μ m 部において、インク滴の重量を測定すると二つの間に重量の違いがあった。濃度むらの発生したヘッド D89 のインク滴の総重量が 16.3ng であり、濃度むらの発生しないヘッド D94 のインク滴の総重量が 14.3ng となった。濃度むらの発生したヘッド D89 は、インク滴の重量が 12.3% 分大きかった。インク滴の重量のばらつく現象のメカニズムを推定した。次の①と②の二つが考えられる。①キャビティ厚みが薄くなって剛性が低下

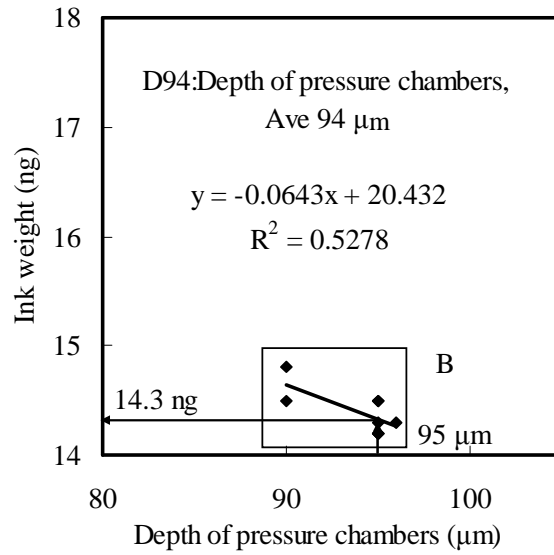


Fig. 2.9 Relation between Ink weight and Depth of pressure cambers of no size variation of ink droplets. B area is small.

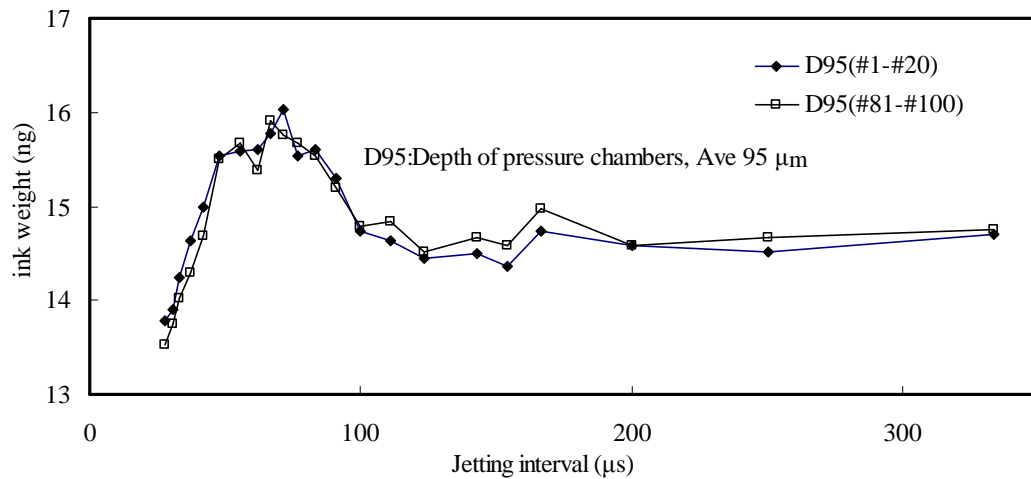


Fig. 2.10 Relation between Ink weight and Jetting interval of no size variation of ink droplets.

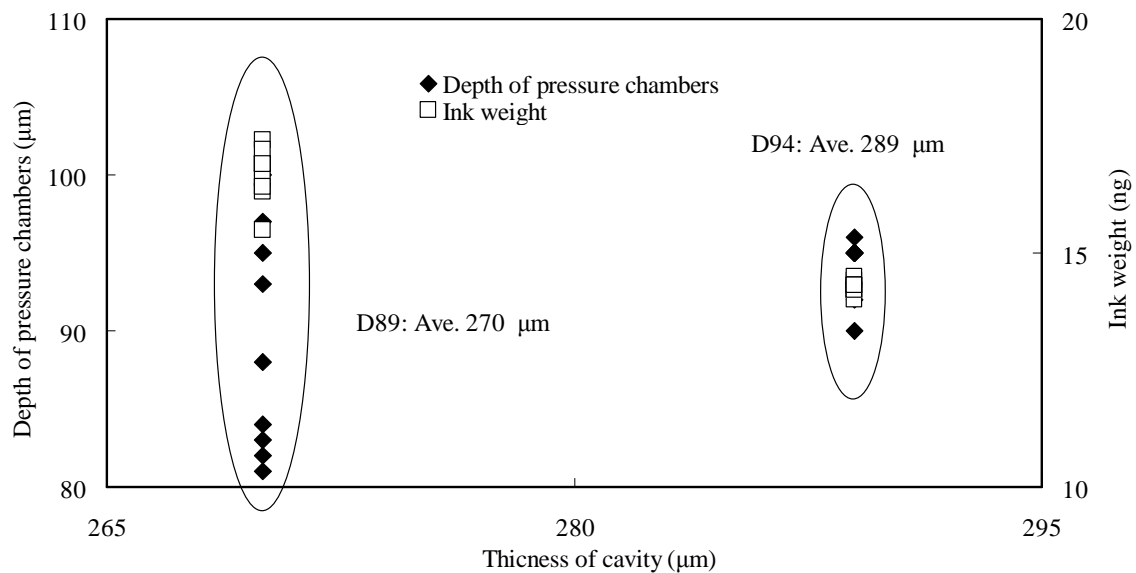


Fig. 2.11 Relation between Thickness of cavity, Depth of pressure cambers and Ink weight.

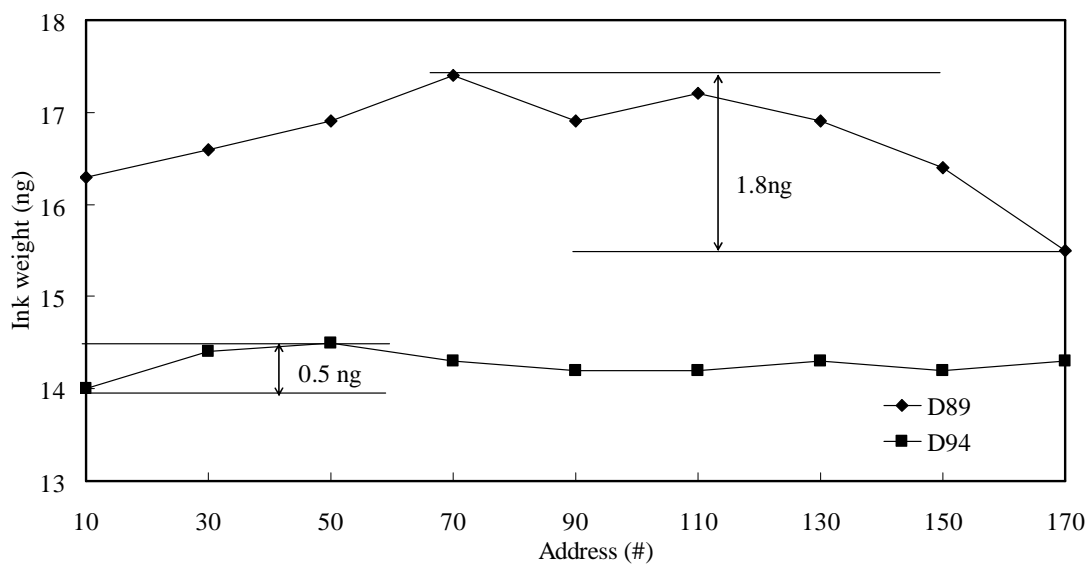


Fig. 2.12 Relation between Ink weight and Address.

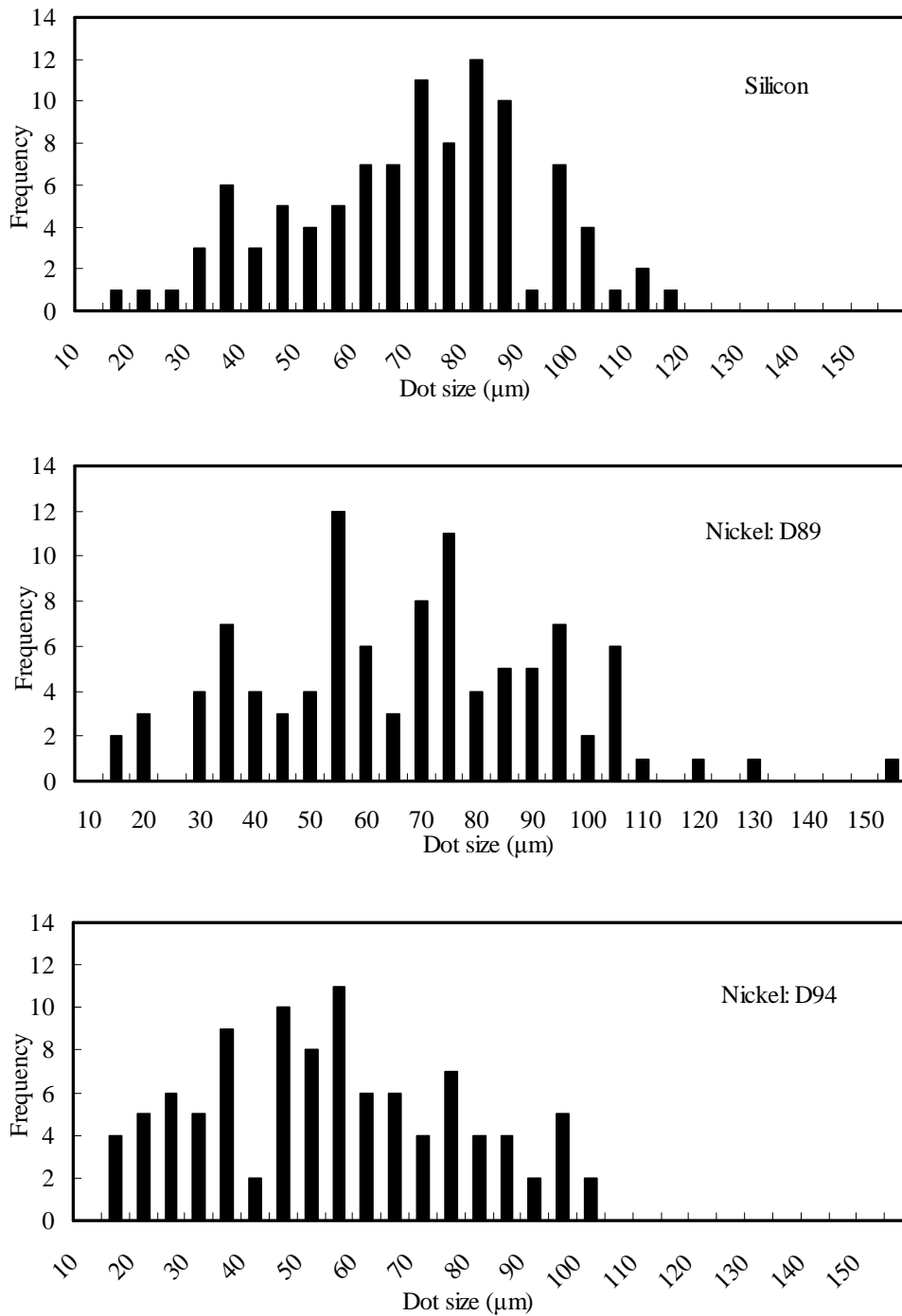


Fig. 2.13 Frequency of Dot size.

Silicon: Max. 111μm Min. 13μm Ave. 66.2μm 6σ 79.2μm,
no size variation of ink droplets

D89 : Max. 153μm Min. 13μm Ave. 65.7μm 6σ 144.8μm,
the size variation of ink droplets

D94 : Max. 97μm Min. 11μm Ave. 51.9μm 6σ 86.9μm,
no size variation of ink droplets

Table 2.1 Relation between Difference/ Ave. Depth of pressure chambers and Thickness of nickel cavity plate.

	Ave. Depth (μm)	Difference (μm)	Thickness (μm)	Difference/Ave. Depth
D89	89.2	19	270	0.21
D81	80.7	3.7	273	0.05
D94	93.6	6	289	0.06
D95	95.2	0.7	288	0.01

したこと．キャビティ厚みは D89 が Ave.270 μ m, D94 が Ave.289 μ m であった．板厚が薄いとニッケルキャビティプレートの剛性が弱くなるために，ピエゾ振動子からの弾性エネルギーによる圧力波の影響をニッケルキャビティプレート全体が受けやすくなる．圧力波がニッケルキャビティプレート全体に伝播することで全圧力室内の定在波が増幅され，ノズルから吐出するインク滴の全重量は大きくなる．定在波の増幅水準は，アドレスによって異なる．ニッケルキャビティプレートの外周の梁となる部分に対して，#1, #180 は近い位置にあり #90 は遠い位置にあるため，#90 は板厚が薄いことと梁から遠い位置にあることの影響を受けて，定在波がより増幅されることが推察される．②圧力室の深さが浅いこと．圧力室の深さが浅い箇所は，圧力室内の圧力波が設定した減衰まで到達しないことで定在波が大きな状態となる．大きな定在波は，剛性の小さい圧力室壁を通じて隣接する圧力室内に伝播する．圧力室内の定在波は伝播した定在波により増幅され，吐出するインク滴の重量が多くなる．

シリコン製ヘッドのプリントサンプル，濃度むらの発生したニッケル製ヘッド D89 のプリントサンプル，工法変更により濃度むらの発生がしなかったニッケル製ヘッド D94 のプリントサンプル 3 種について，インク滴のドットサイズとその度数分布表を Fig. 2.13 に示す．Fig. 2.13 は，横軸がドットサイズで縦軸が発生頻度である．D89 と D94 を比較して，ドットの平均サイズが 65.7 μ m から 51.9 μ m へと約 14 μ m 小さくなり，ドットサイズの分布の広がりも 144.8 μ m から 86.9 μ m へと約 58 μ m 減少した．圧力室の深さが浅く，深さのばらつきが大きく，キャビティ厚みが薄いと，ドットの平均サイズが大きくドットサイズの分布の広がりも大きい．工法を改良することで，濃度むらは肉眼で認識できない水準にまで達した．またシリコン製と D94 を比較して，D94 はドットの平均サイズが 66.2 μ m と 51.9 μ m で 21.6%小さくなり，ドットサイズの分布の広がりが 79.2 μ m と 86.9 μ m でほぼ同等であった．D89 と D94 の比較より，ドットサイズの分布の広がりが大きい場合に濃度むらが顕著に見られると考えられる．

2.6 結論

本研究の課題は，ドットサイズのばらつきによる濃度むらの主原因が圧力室の深さとインク滴の重量ばらつきにあることを解明することにあった．そこで，圧力室の深さとインク滴の重量，そして吐出周期の関係を調べた．その結果，次のことが明らかになった．

1) ニッケルキャビティプレートの圧力室の深さとインク滴の重量の関係において，濃度むらが発生したヘッドはキャビティ厚みが薄く，圧力室の深さのばらつきが大きく，

圧力室の深さが浅い状態にあり、インク滴の重量が多くばらつきが大きい状況にあった。

2) 圧力室の深さとインク吐出周期によるインク滴の重量の変化の関係において、濃度むらが発生したヘッドはインク滴の重量が多くばらつきが大きい状況にあった。

3) キャビティ厚みが厚く、圧力室の深さのばらつきが小さく、圧力室の深さが深いニッケルキャビティプレートを使用したヘッドは、狙い値に近いインク滴の重量を得た。

プリント評価の結果として、工法変更後のニッケル製キャビティプレートヘッドにおいて、濃度むらが肉眼で認められない水準にまで抑制することが可能となった。濃度むらの有無は、工法変更前後のニッケル製キャビティプレートヘッドの比較よりドットサイズの分布の広がりの違いにあると判断した。シリコン製キャビティプレートヘッドと工法変更後のニッケル製キャビティプレートヘッドを比較して、ニッケル製キャビティプレートヘッドはドットの平均サイズが小さくなり、ドットサイズの分布の広がりがほぼ同等である数値を得られた。ニッケルはシリコンと比較してヤング率が高いために、剛性を高くすることができる。ニッケルキャビティプレートは高可塑性部材の追求とさらなる工法改良を進めることで、ヘッドを多ノズル化するための有効な手段となる。

2.7 参考文献

- 1) 碓井稔, “新方式 MACH(ML-Chips タイプ)の開発”, 日本画像学会誌, Japan Hardcopy’ 1996 論文集, p.166(1996)
- 2) 北原強, “MACH の開発 (3pl ドロップの吐出技術)”, 日本画像学会誌, Japan Hardcopy’ 2003 論文集, pp.217-220(2003)
- 3) 角谷繁明, “誤差拡散法による閾値操作方法”, 電子写真学会誌, 37, pp.186-192 (1998)
- 4) 林 広子, “インクジェットプリンタ用インクの高性能化と色材技術”, 日本画像学会, 45, pp.444-450 (2006)
- 5) 村山浩一, 井上邦弘, 矢竹正弘 他, “顔料系インクジェットインクのインクジェット専用メディアへの浸透挙動の解析”, 日本画像学会誌, 46, pp.236-240 (2007)
- 6) 石橋秀夫, “金属ナノ粒子の調製とインクジェット印刷による回路・配線パターン形成への応用”, 日本画像学会誌, 47, pp.536-542 (2008)
- 7) 特許公報: 高島永光他, 特開 2004-98164, 特開 2004-98165, 特開 2004-98166, 特開 2004-98672, 特開 2004-98676, 特開 2004-122762, 特開 2004-136364, 特開 2004-136648, 特開 2005-23388, 特開 2005-41001, 特開 2006-61964, 特開 2006-68767, 特開 2006-82233, 特開 2006-88419
- 8) C. Cui, D. Cao, and S. Love. “Measuring Visual Threshold of Inkjet Banding”, Journal of the Imaging Society of Japan, PICS Conference, IS&T’s, pp.84-89(2001)
- 9) S. Kobayashi, and H. Kida, “New Drive Electronics to Improve Drop Weight Uniformity in Multi-Nozzle Inkjet Heads”, Journal of the Imaging Society of Japan, Digital Fabrication 2005, IS&T’s, pp.17-20(2005)
- 10) Edited by S. Sakai, “Developments of Analysis Method for Inkjet Print Heads and Inkjet Ink”, Dissertation of Tokyo Institute of Technology, pp.38-59(2005)
- 11) Edited by The Imaging Society of Japan and M. Fujii, “Inkjet”, TOKYO ELECTRIC University, pp.63-68(2008)

第 3 章

インクジェットプリントヘッドの
インクリーク防止のための
ニッケルキャビティプレート
ポリッシング加工技術の確立

第3章 インクジェットプリントヘッドのインクリーク防止のためのニッケルキャビティプレートポリシング加工技術の確立

3.1 緒言

情報化技術の急速な進歩に伴い、金属、ガラス、セラミックス、化合物半導体、シリコン等の多様な材料を用いて、微細かつ高精度な製品を安価に製造できる技術の重要性が増している。現在、ポリシング加工は高精度製品の二次加工として使用され、製品の付加価値を一層高めている。近年、ニッケル無電解めっきされたアルミニウム型磁気ディスク基板に、アルミナ砥粒やコロイダルシリカ砥粒を活用したポリシング加工を行い、微細で高精度な基板の生産が実現している^{1~3)}。

インクジェットプリントヘッドのキャビティプレートにおいて、マイクロプレス加工（精密冷間鍛造と精密微細穴抜き）により、シリコン製からニッケルキャビティプレート（以下プレートと表す）への置き換えを試みて、二つの問題が発生した⁴⁾。一つめは、数十 μm の V 字反りが原因で圧力室の深さが浅くなる箇所が発生したこと、二つ目は、数 μm のプレートの段差が原因で後工程となる組立の接合時に不均一な接合箇所が発生したことである。

二つめのプレートの段差については、これまで未解決のままであった。V 字反りと段差の原因は、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られた。しかし、マイクロプレス工程内のみでの解決策がなかった。本研究は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、段差を低減する方法を明らかにした。この技術は、精密塑性加工と精密研磨加工分野を密接に結び付ける、新規性のある先端加工技術である^{5,6)}。

3.2 インクジェットプリントヘッドの構造

インクジェットプリントヘッド（以下ヘッドと呼ぶ）とは、インクジェットプリンタのインクを吐出する機構体である。Fig. 3.1 にヘッドの断面構造を示す。ヘッドは、多数のノズルを金属の平面内に配列したノズルプレート、インクを一時的に蓄積しておくキャビティプレート、振動子から微小な変位を伝える薄膜振動板、ピエゾを櫛歯状に加工し微小な伸縮変位を作り出す振動子から構成される。インクカートリッジから供給孔を経て圧力室に供給されるインクは、振動子が発する微細で連続な縦型伸縮変位を圧力室にて振動波によるエネルギーとして受け、そのエネルギーはノズル部ま

で伝達され、ノズルから微小なインク滴として吐出される。

ニッケルキャビティプレートと加工方法を、**Fig. 3.2** に示す。**Fig. 3.2** の上部が加工方法を表し、**Fig. 3.2** の下部の左が両面マイクロポリシング装置の写真であり、**Fig. 3.2** の下部の右がニッケルキャビティプレートである。ニッケルキャビティプレートのサイズは、縦 30mm、横 12mm、厚み 0.3mm から成り、V 字反り (**Fig. 3.2** で a: deformation of V figure と表示)とは、プレートの縦断面において端部が高く中央部が低い反りの形状を表す。d から d'の断面図は、**Fig. 3.1** のプリントヘッドの横断面図を示す。圧力室の形状と配列を **Fig. 3.3** に示す。プレート内には、一列内に幅 0.11mm、長さ 1.6mm、深さ 95 μ m の圧力室が 0.141mm ピッチで 180 個並び、二列構成により合計 360 個の圧力室から成る。段差(**Fig. 3.3** で A: Bump of base-plate と表示)とは、圧力室基部 (**Fig. 3.3** で Frame と表示)と圧力室土手部 (**Fig. 3.3** で Bank と表示)の高さ差「A」(**Fig. 3.3** に表示)で表す。「A」値が大きいと段差が大きくなる。a は、連通孔を表す。

3.3 ニッケルキャビティプレートに要求される品質

ヘッドの組み立てでは、プレートと薄膜振動板間、プレートとノズルプレート間を数 μ m の接着剤にて接合する。段差が大きいと均一な接着層が形成されず、密着力や封止信頼性が確保できない。密着力が確保できない状態でヘッド内にインクが流れると、インク漏れという現象が発生し、ヘッド品質にとって致命的欠陥となる。インク漏れとは、流路以外の場所にインクが流れ出る現象を言う。プレートと薄膜振動板が複雑な形状をしていることから、二部品の接合面積はかなり小さく、インク漏れが発生しやすい構造となっている。またヘッドの機能として、圧力室の深さが浅いとメニスカス毛管力によるインクの再供給能力が低下し、ノズルから吐出するインク重量がばらつき、紙等の媒体へのインク付着量がばらつくことで色むらとなる。各種の実験結果から、圧力室の深さを均一にするために V 字反り量を 5 μ m 以下にすること、インク重量を安定させ色むらを発生させないために圧力室の深さを 95 μ m 以上にすること、そしてインク漏れを発生させないために段差を 2 μ m 以下にすることが要求された。

3.4 ニッケルキャビティプレートの加工方法

ニッケルキャビティプレートの加工方法は **Fig. 3.2** に示すように、マイクロプレス加工によりキャビティを形成し、片面ポリシング加工により平面上の基準面を形成し、次いでマイクロ両面ポリシングにより V 字反りと段差をポリシングにより軽減する。

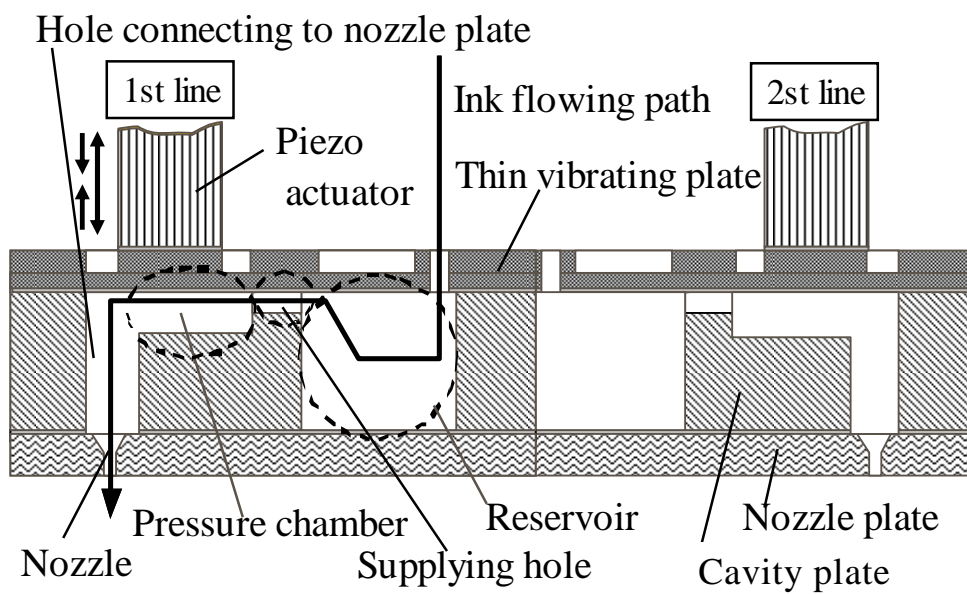


Fig. 3.1 Print head structure, in lateral cross section view.

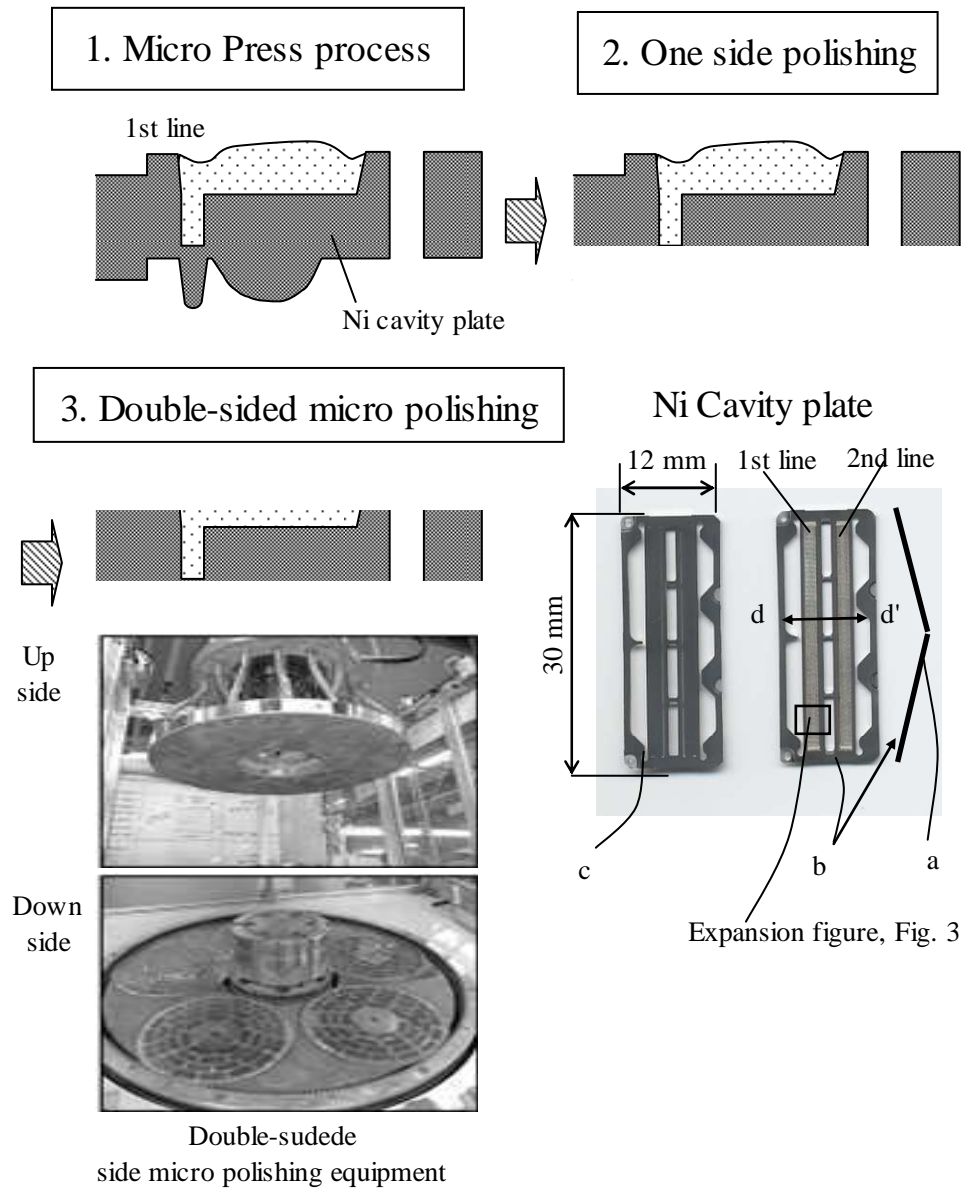


Fig. 3.2 Ni cavity plate manufacturing process.
a: Longitudinal cross section, deformation of V figure
b: Front side c: Back side
d – d': Cross section view, Fig. 3.1

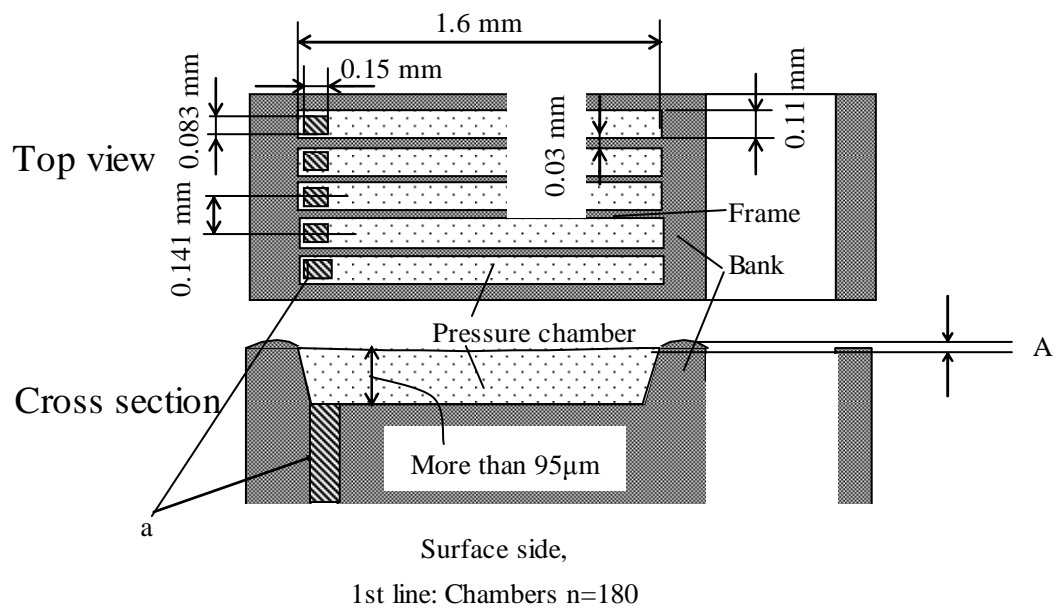


Fig. 3.3 Detail view, chamber rooms of Ni-cavity base-plate.
A: Bump of plate, less than 2μm
a: Hole connecting to nozzle plate

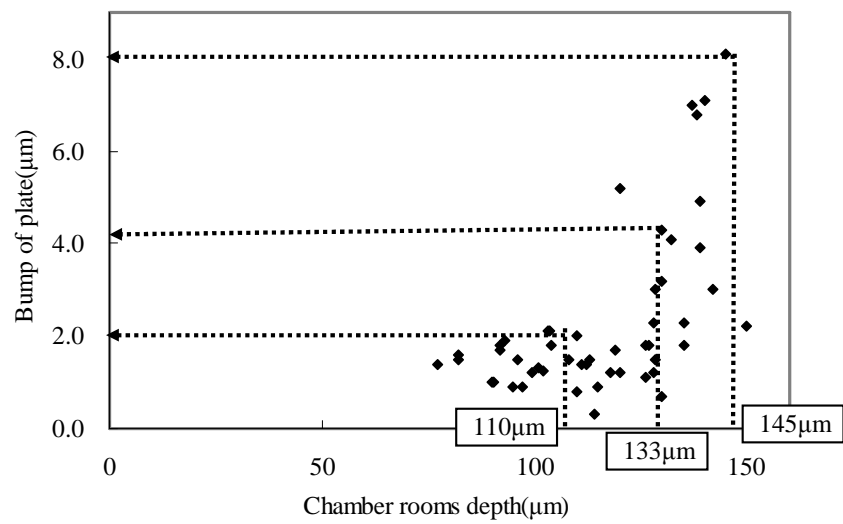


Fig. 3.4 Relation between chamber rooms depth. and Bump of plate, after Micro-press process

3.5 段差削減実験

マイクロプレス加工後に両面マイクロポリッシング加工を用い、インク漏れを発生させない条件である段差 $2\mu\text{m}$ 以下を得るための実験を行った。色むらを発生させない条件である圧力室の深さ $95\mu\text{m}$ 以上についても、プレートの段差との関連性があるため並行して実験を進めた。一方 V 字反り量については、最大値 $60\mu\text{m}$ あること、研磨量 $60\mu\text{m}$ 設定で、両面マイクロポリッシング加工にて専用治具を使用することにより、ほぼ反り量が 0 に軽減することはわかっていた。総研磨量の見積もりは、「総研磨量 = V 字反り量 + プレートの段差量 + 仕上げ研磨量」から成り立つと考えられた。機械は浜井産業製両面ポリッシング装置 9BF-2M5L、基準の回転数は上側 20 rpm、下側 60rpm、キャリアの回転数は公転数 22.2rpm、自転数 16.0rpm、ポリッシャの圧力はニッケルキャビティプレート一個当たり 91.14kPa 、研磨布は不織布 Kanebo BELLATRIX k0013（以下 C1 と表す）、砥粒は FUJIMI GC # 6000 平均粒子径 $2\mu\text{m}$ 、砥粒濃度 16%、表面粗さレーザ測定機は $0.1\mu\text{m}$ の分解能を持つ三鷹光器製 NH-III を使用した。

3.5.1 マイクロプレス後の圧力室の深さと段差の測定

マイクロプレス加工後に、プレートの圧力室の深さと段差について測定を行った。圧力室の深さと段差の測定は、 $0.1\mu\text{m}$ の分解能を持つ三鷹光器製 NH-III を使用した。

3.5.2 研磨量と段差の測定

マイクロプレス加工後に両面マイクロポリッシング加工を行い、研磨量と段差について測定を行った。一次荷重にて荒加工を行い、二次荷重にて仕上げ加工を行う設定とした。一次荷重において、加工速度 $9\mu\text{m}/\text{min}$ 、加工荷重 1.2kN 、回転数：上側 60rpm、下側 180 rpm、二次加重において、加工速度 $0.375\mu\text{m}/\text{min}$ 、加工荷重 1.2kN 、回転数：上側 10rpm、下側 30 rpm に設定した。研磨量はプレートの厚みを測定することから把握し、測定器は最小単位 $1\mu\text{m}$ のマイクロメータを使用した。

3.5.3 研磨布硬度と段差の測定

マイクロプレス加工後に硬度を変えた三種の研磨布を使用して、両面マイクロポリッシング加工を行い段差の測定を行った。三種の研磨布は、従来の軟材研磨布 C1、硬材研磨布 C2、そして硬度が二つの中間に値する中間研磨布 C3 を選定した。

3.5.4 砥粒供給量と段差の測定

マイクロプレス加工後に軟材研磨布 C1 を使用して、砥粒供給量を変えて両面マイクロポリッシング加工を行い段差の測定を行った。4 台の両面マイクロポリッシング装置を用いて、1 台毎に砥粒供給量を変えて実験を行った。

3.6 結果と考察

3.6.1 マイクロプレス後の圧力室の深さと段差

両面ポリッシングにおいて段差の研磨量の見積もりをするために、マイクロプレス後の圧力室の深さと段差の関係を調べた。マイクロプレス後の圧力室の深さと段差の関係を **Fig. 3.4** に示す。Fig. 3.4 は横軸が圧力室の深さで、縦軸が段差である。圧力室の深さが $145\mu\text{m}$ と深くなると段差が最大値約 $8\mu\text{m}$ と大きくなる。ところが、圧力室の深さが $110\mu\text{m}$ と浅くなると段差は最大値約 $2\mu\text{m}$ になる。圧力室の深さ $95\mu\text{m}$ 以上を確保するための研磨量の見積りは、以下の通りである。マイクロプレス後の段差の最大値 $8\mu\text{m}$ + ロット内とロット間のばらつきによる研磨量 $30\mu\text{m}=38\mu\text{m}$ となる。マイクロプレス後の圧力室の深さは、 $133\mu\text{m}$ 以上が必要となる。圧力室の深さが浅いと段差が小さくなる要因は、圧力室の深さ $110\mu\text{m}$ は $140\mu\text{m}$ と比較し、マイクロプレス加工時における加工力が小さいときはニッケル内の残留応力が小さく、金属変形が生じにくいことが考えられる。

3.6.2 研磨量と段差

両面マイクロポリッシング装置 (Fig. 3.2 左側下写真) を使用し、一次荷重にて荒加工を行い二次荷重にて仕上げ加工を行った。総研磨量 = V 字反り量最大値 $60\mu\text{m}$ + 段差の最大値 + 実験値から得られた研磨量におけるロットのばらつき $38\mu\text{m}$ + 仕上げ研磨量 $7\mu\text{m}=105\mu\text{m}$ となる。加工速度 $9\mu\text{m}/\text{min}$ の理由は、荒加工と V 字反りを解消すること、加工量を大きくして加工能率を向上することである。加工速度 $0.375\mu\text{m}/\text{min}$ の理由は、段差を解消すること、加工量を小さくして変形量と面粗さを小さくすることである。一次荷重は V 字反り量の最大値 $60\mu\text{m}$ と段差を小さくするために、加工荷重を 1.2kN 、回転数を上側 60rpm 、下側 180rpm に設定した。二次荷重は段差を $2\mu\text{m}$ 以下に仕上げるために、加工荷重を 0.3kN 、回転数を上側 10rpm 、下側 30rpm に設定した。上記の理由により、加工速度の設定差が 24 倍となった。**Fig. 3.5** に一次と二次荷重設定時の総板厚と段差の変化を示す。Fig. 3.5 は横軸がポリッシング時間で、縦軸の左側が段差で、右側が総板厚である。データ数は総板厚を T1, T2 で示し $n=2$ の測定を行い、

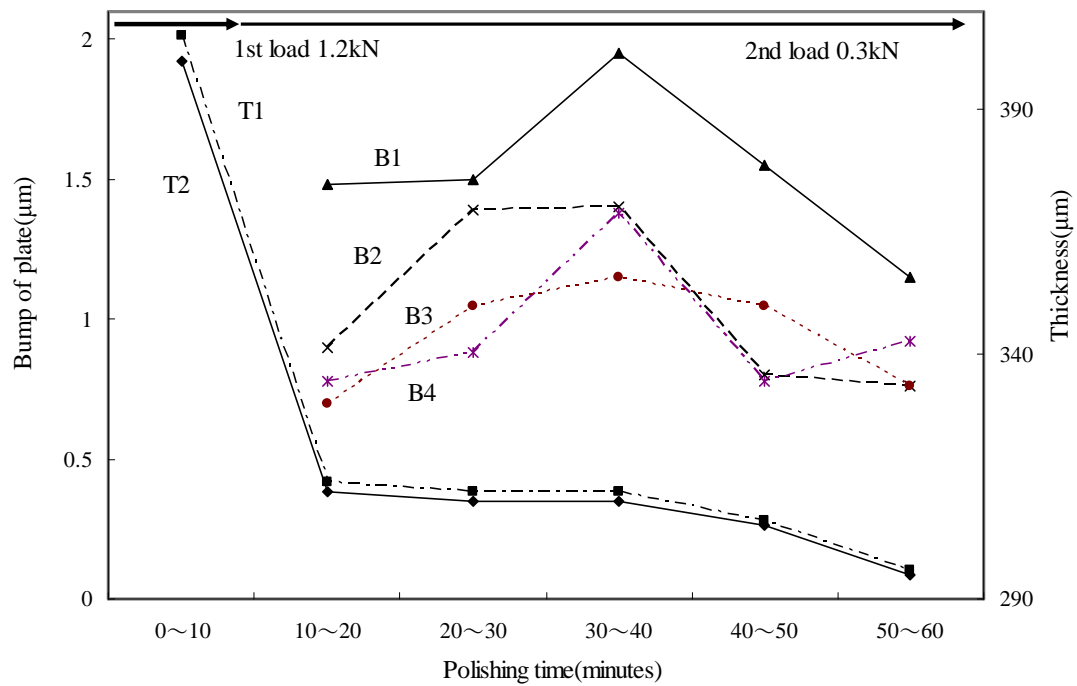


Fig. 3.5 Change in thickness and bump of plate when adding 1st and 2nd load.
Bump of base plate: B1~B4 Thickness: T1, T2

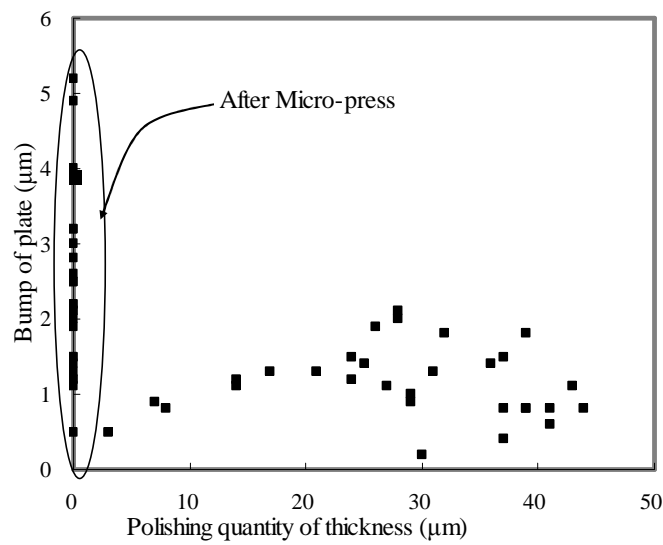


Fig. 3.6 Change in Bump of plate after double-sided polishing process.

Table 3.1 Mechanical characteristics of soft, hard and middle-polishing cloths.

No	C1	C2	C3
Polishing cloth	Soft, Conventional	Hard	Middle
Fiber	Polyester	Polyester	Polyester
Binder 1	Polyurethane+Polyestel	Polyurethane+Polyether	Polyurethane+Polyestel
Binder 2	Specialization	Specialization	Specialization
Hardness (Asker-C)	87	92	90
Resiliency (%)	75	69.1	87.9
Density of Polyester (%)	15	—	22

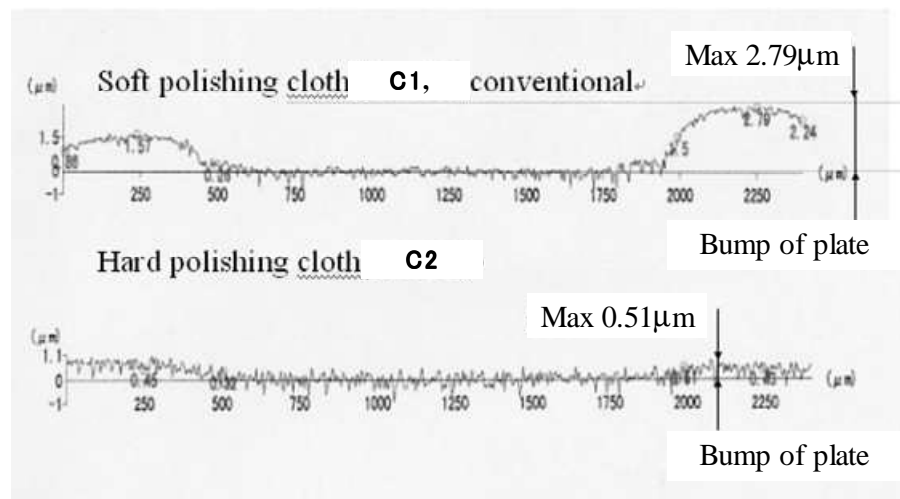


Fig. 3.7 Bump of plate utilizing soft and hard-polishing cloths.

段差を B1~B4 で示し $n=4$ の測定を行った．一次荷重 1.2kN 設定後約 10 分間において，総板厚が 400 μm から 310 μm に研磨され，研磨量 90 μm 内にて V 字反りは解消した．二次荷重 0.3kN 設定後，総板厚が 310 μm から 295 μm に減少するまで 40 分を要して研磨を行った．段差は二次荷重 0.3kN 設定時から 0.7 μm ~1.95 μm (Fig. 3.5 にて B 点，C 点と表示) のばらつきがあり，総板厚 310 μm ~295 μm 間の 15 μm を研磨しても段差の減少は確認することができなかった．更に V 字反りを簡易治具によりほぼ 0 に修正することで，段差のみのパラメータに注目し，総板厚の研磨量と段差の変化について実験を行った．測定サンプル数は $n=28$ で，研磨量 2.5 μm から 44 μm の範囲でランダムに抜き取りを行い，段差を測定した．Fig. 3.6 にその結果を示す．Fig. 3.6 は横軸が板厚上のポリシング量で，縦軸が段差である．段差は，マイクロプレス後にて 0.5 μm から最大値 5.2 μm あり，総板厚を 2.5 μm 研磨することで 2 μm 近辺に落ち着いた．2.5 μm 付近からその後 44 μm まで研磨加工を継続しても，段差量の減少は見られなかった．総研磨量は最初の研磨量 90 μm で十分であることが推定されるため，V 字反りの解消方法と荒加工と仕上げ加工の両面から，加工荷重，加工速度，総板厚，表面粗さの最適な関係を検証する実験が必要と考えられる．

3.6.3 研磨布硬度と段差

硬材研磨布を使用すれば，圧縮弾性率が低く圧縮変位量が少ないことにより，研磨布が沈み込みにくく平坦化しやすいことから，研磨布形状に倣い研磨が進み微小な段差を小さくすることが可能と考えられた⁷⁾．Table 3.1 は本研究で使用した研磨布を示す．これらの研磨布は，繊維状のポリマーと結合剤からなる不織布である．硬材が 2 μm 前後の段差を減少する効果があるということを数値的に検証するために，軟材研磨布 C1 と硬材研磨布 C2 の 2 種の研磨布を使用して段差の状態を確認した．結果を Fig. 3.7 に示す．Fig. 3.7 は横軸が段差の形状で，縦軸が段差値である．軟材研磨布の段差最大値は 2.79 μm に対し硬材研磨布の段差最大値は 0.51 μm となり，硬材研磨布は段差を小さくするために効果があった．段差が小さくなる理由は，研磨布が硬材のため，研磨布と微小段差が研磨布形状に倣い研磨が進むと考える．ここで，硬材研磨布を使用したことにより二つの問題が発生した．一つめは，キャリア板の最外周部にセットしたプレートの端部に約 5 μm のダレ形状が発生したことである．二つめは，硬材研磨布寿命が軟材研磨布寿命より約 40%低下したことである．

一つめの問題であるプレートの端部に約 5 μm のダレ形状が発生した現象を Fig. 3.8 にて説明する．プレートをガイドするキャリア板内は，プレートが 4mm 間隔毎に多

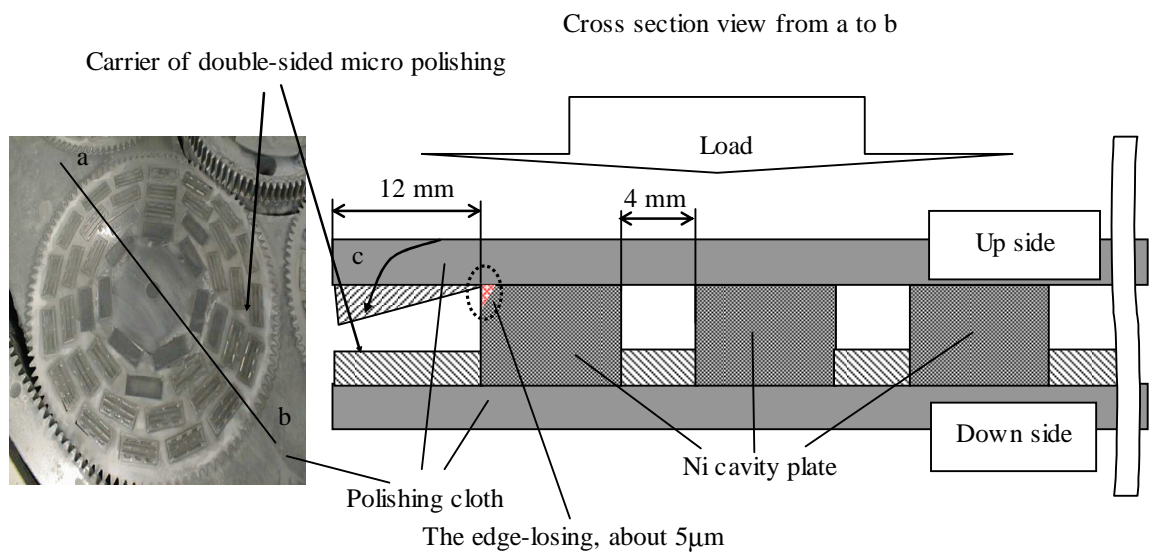
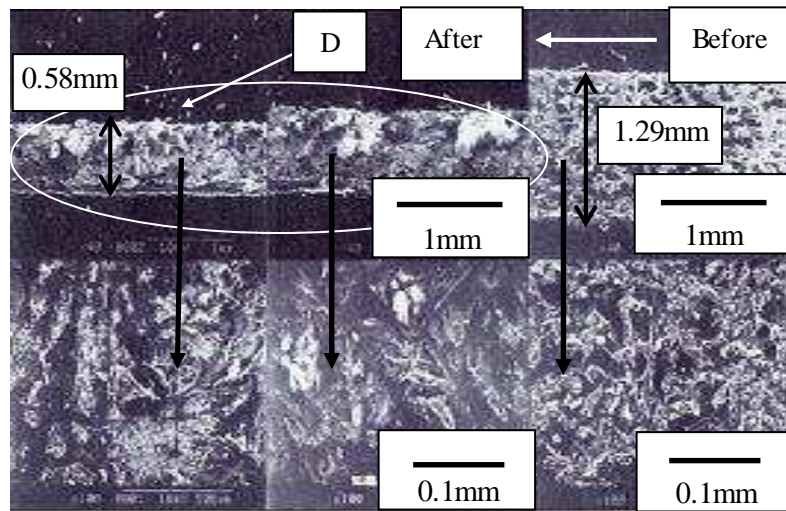
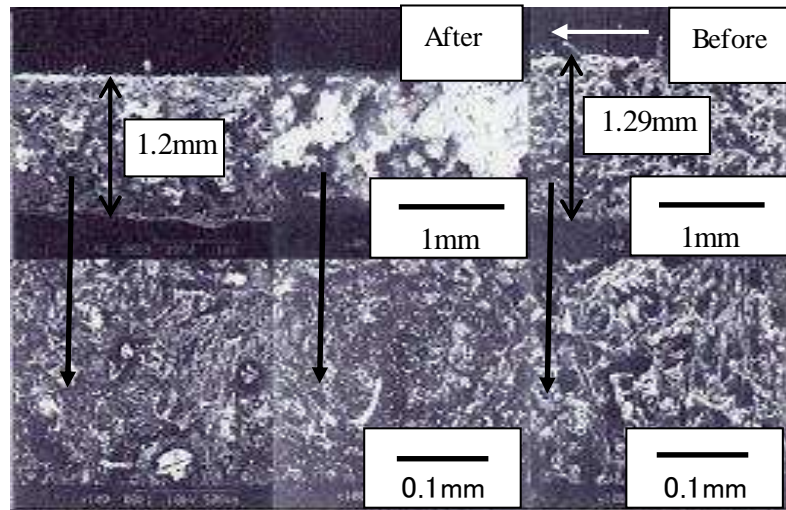


Fig. 3.8 How edge degradation when using hard-polishing cloth
 c: Free polishing cloth, no compression.



(a) Hard-polishing cloth of down side: Decrease rate of thickness 55%



(b) Soft-polishing cloth of down side: Decrease rate of thickness 7%

Fig. 3.9 Electron microscopic images of polishing cloths.

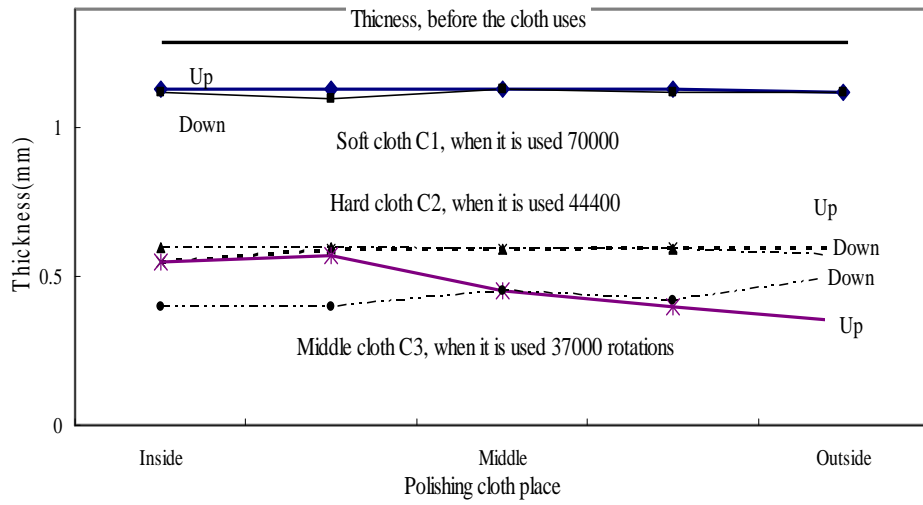


Fig. 3.10 Life time of polishing cloths.

Table 3.2 Characteristics of soft and hard-polishing cloths.

Hard-polishing cloth C2

Item	Unit	Up,after 44400 rotations	Down,after 44400 rotations	Before polishing
Thickness	mm	0.46	0.58	1.29
Pattern	g/m ²	323	506	523
Density	g/m ³	0.7	0.87	0.41
Hardness	Asker-C	90	91	92
Compressibility	%	7.9	6.1	1.4
Resiliency	%	66.8	64.1	69.1

Soft-polishing cloth C1, conventional

Item	Unit/Power	Up,after 71710rpm	Down,after 71710rpm	Before polishing
Thickness	mm	1.09	1.1	1.3
Pattern	g/m ²	764	864	488
Density	g/m ³	0.7	0.79	0.38
Hardness	Asker-C	86	87	87
Compressibility	%	5.3	3.1	2
Resiliency	%	65.7	64.6	75

数個設置されることで、プレートと研磨布自体が均一に接触し研磨が進んでいく。しかし、キャリア板の最外周部の上側は空間で支えがなく、上側研磨布は圧縮荷重がかからない状態にあることにより、プレートの外側端部と上側研磨布の接触面積が増えて研磨が進行することで $5\mu\text{m}$ のダレを発生させる。ダレ量は大小の差はあるが、軟材と硬材研磨布の両方に発生する。対応策として、キャリア板の最外周部にダミーとなるプレートを設置すること等が考えられる。

二つめの問題である約 40%の硬材研磨布寿命の低下を解明するため、下側の軟材と硬材研磨布について使用前後の断面形状の比較をした。研磨布寿命とは、研磨布の板厚が磨耗と損傷等により薄くなる時間または期間を言う。電子顕微鏡写真により、使用前一箇所と使用後二箇所について研磨布の観察を行った。その比較写真を **Fig. 3.9** に示す。Fig. 3.9「D」部から、硬材研磨布の板厚減少率が 55% (板厚 $1.29\text{mm} \rightarrow 0.58\text{mm}$) となり空間部が小さくなっていること、及び研磨布上面の凹凸が大きくなっていることを観察した。軟材研磨布の板厚減少率は 7% (板厚 $1.29\text{mm} \rightarrow 1.2\text{mm}$) である。硬材研磨布の板厚が薄くなる現象は、板厚方向の空間が加工荷重により圧縮して狭くなっていること、研磨布とニッケルキャビティプレートとの接触により研磨布が削り取られることを推定した。Table 3.1 から、繊維と結合剤 2 は同一材料を使用しているのに対し、結合剤 1 の種類だけが異なることがわかった。硬材研磨布に使用されているポリエーテル系結合剤はポリエステル系結合剤と比較し、繊維と樹脂の結合力を強くすることで高硬度を維持する反面、研磨布とニッケルキャビティプレート間の摩擦抵抗により欠損が発生すると考えられた。そこで、軟材研磨布 C1 のポリエステルの濃度を 15%から 22%に増加させ、硬度において硬材と軟材の中間の研磨布を製作し、研磨布寿命を確認する実験を行った。その結果を **Fig. 3.10** に示す。Fig. 3.10 は横軸が研磨布の場所で、縦軸が板厚である。従来の軟材研磨布 C1、硬材研磨布 C2、中間研磨布 C3 の三種を比較した。Fig. 3.8 に示すように、両面ポリシング装置の上側研磨布を Up で、下側研磨布を Down で表す。中間研磨布 C3 は硬材研磨布 C2 より板厚が薄くなり、研磨布寿命が改善されなかった。ポリエステルの濃度向上策は、中間研磨布 C3 の寿命向上対策にはならなかった。

硬材研磨布の板厚が薄くなる現象は、結合剤 1、硬度、圧縮弾性率の違いのみの原因ではないと考え、起因する別のパラメータを検討した。Table 3.2 に軟材と硬材研磨布の仕様を表す。硬材研磨布使用により研磨布自体の空間容積が狭くなり、砥粒を取り込む能力が減少していることが考えられた。前述を裏付けるパラメータとして「E」部の圧縮率データに着眼した。硬材研磨布は、研磨前後において圧縮率が 4~5 倍に増

Table 3.3 Defective rate of machines, bump of plate.

Machine No	Bump of plate defective rate(%)	Defective number/n	Load(MPa)	Revolution(rpm)	Supply quantity of slurry(g/sec)
1	6.25	1/16	14.1	60	29.8
2	46.2	6/16	14.3	60	18.7
3	0	0/24	14.2	60	45
4	12.5	1/8	14.1	60	25

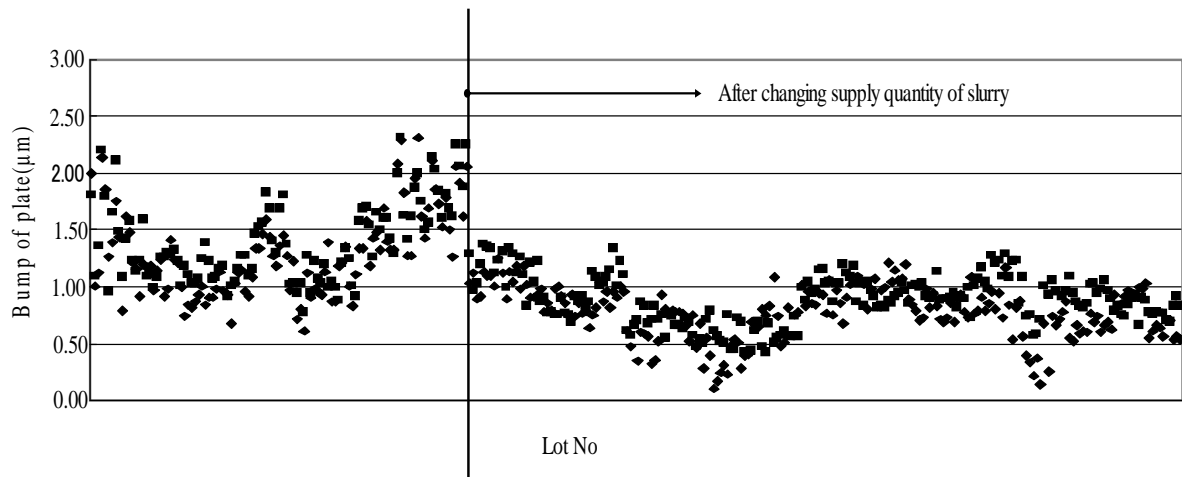


Fig. 3.11 Relation between bump of plate and supply quantity of slurry.

加している．軟材研磨布は 2～2.7 倍である．圧縮率が高まるということは，研磨布が変形し研磨布内に砥粒を取り込む空間が狭まる傾向となり，砥粒を一時的に含浸する能力に欠けることで研磨能力を維持することができなくなる．砥粒が少ない状態で研磨を続けることは，研磨布が削り取られ研磨布寿命を低下させると考えられる．数値的な実証として，Table 3.2 から硬材研磨布の板厚は，1.29mm から上側 0.46mm，下側 0.58mm まで薄くなった．板厚減少率は，上側 64%，下側 55%である．減少率の内訳は，上側 37.5%と下側 25.9%が密度変化現象であり，上側 26.5%と下側 29.1%が削り取られ現象であることがわかった．

3.6.4 砥粒供給量と段差変化

不織布として軟材研磨布 C1 を使用し，プレートの段差不良と砥粒供給量において 4 台のマイクロ両面ポリシング装置について比較する実験を行った．その結果を Table 3.3 に表す．装置 1，2，3，4 号機についてのデータから，プレートの段差不良率は装置毎に違いがあることがわかった．各パラメータを比較すると，砥粒供給量にばらつきがあった．プレートの段差の不良率が高い装置は砥粒供給量が少なかった．そこで，砥粒供給量を 45g/sec に設定しプレートの段差不良の変化を確認した．

砥粒供給量を増加した結果が Fig. 3.11 である．Fig. 3.11 の横軸が Lot No で縦軸がプレートの段差値である．従来のプレートの段差最大値 $2.7\mu\text{m}$ が $1.7\mu\text{m}$ と減少し，ロット間ばらつきが小さくなり $2\mu\text{m}$ 以下を保持した．プレートの段差を $2\mu\text{m}$ にさせるための要因は砥粒供給量にあった．砥粒が少ないと研磨布とニッケルキャビティプレート間の摩擦抵抗が大きくなり，剛性のない研磨布側が削られ，研磨布に損傷を発生しながら研磨が継続するため，プレート上の微小段差が減少しなかったと考えられる．

3.7 結論

両面マイクロポリシング加工を用い，プレートの段差を低減する方法を明らかにした．

1) 段差は，マイクロプレス後にて $0.5\mu\text{m}$ から最大値 $8\mu\text{m}$ あり，総板厚を $2.5\mu\text{m}$ 研磨することで $2\mu\text{m}$ 近辺に落ち着いた．その後， $2.5\mu\text{m}$ から $44\mu\text{m}$ まで研磨加工を継続しても段差量の減少は見られなかった．段差を $2\mu\text{m}$ にさせるための要因は研磨量ではなく，研磨布硬度と砥粒供給量が要因であることを確認した．

2) 軟材研磨布を用いた場合の段差最大値は $2.79\mu\text{m}$ に対し，硬材研磨布の段差最大値は $0.51\mu\text{m}$ となり，硬材研磨布の使用は段差の低減に効果があった．但し，研磨布の

寿命が低下したため、硬材研磨布の砥粒を一時的に包括する含浸能力を高める観点から、研究を進め対策を立てることが必要である。

3) 段差を $2\mu\text{m}$ にさせるための要因は砥粒供給量にあった。砥粒が少ないと研磨布とニッケルキャビティプレート間の摩擦抵抗が大きくなり、剛性のない研磨布側が削られ、研磨布に損傷を発生しながら研磨が継続するため、プレート上の微小段差が減少しないことを実証した。

3.8 参考文献

- 1) 藤田隆：パッド表面分析による研磨メカニズムの研究（第1報），精密工学会誌，73, 9, pp. 1014-1018(2007).
- 2) 安井平司・山口寛太・栗林生将司：新概念高能率超平滑ポリッシング盤の開発（第1報），精密工学会誌，73, 12, pp. 1325-1329(2007).
- 3) 河西敏雄：研磨加工技術，精密工学会，57, 11, pp. 2-9(2006).
- 4) 特許公報：高島永光他，特開 2004-98672，特開 2004-98166.
- 5) 安井平司・山口寛太・松川誠治・山崎穰：アルミ磁気ディスク基板の超高圧力超高速度ポリッシングにおけるポリシャ寿命の検討（第1報），精密工学会誌，73, 1, pp. 107-111(2007).
- 6) 砥粒加工研究会：超精密加工技術，工業調査会，pp. 454-480(1984).
- 7) 大嶋伸之・松村進一・河合奈緒子・朴裁弘・吉田弘一：研磨パッドの性状がシリコン研磨に及ぼす影響，精密工学会誌，2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，C23, pp. 221-222(2007).

第 4 章

インクジェットプリンタの 吐出安定化に向けた インク流路における 空気浸入と気泡成長の防止

第4章 インクジェットプリンタの吐出安定化に向けたインク流路における空気浸入と気泡成長の防止

4.1 緒言

インクジェット記録方式の応用範囲は文字記録から写真の階調のあるカラー画像、そして記録する媒体を紙からフィルム、繊維、金属等の様々な材料にまで拡大している¹⁾。インクジェットプリンタに要求される重要課題の一つに、長期間にわたって不連続に印刷を行った際にインクの吐出不良を生じないことが挙げられる。吐出不良とは印刷した紙等を肉眼で観察したときに、着弾したインク滴のサイズが一定でない状態である。吐出不良は大きな品質の問題であり、商品の長期信頼性に大きく影響を与える。これまでインクジェットプリンタの信頼性に関しては、プリントヘッドとインクを主体に、ノズル詰まり、ノズル乾燥時の噴射挙動、インクの粘性増加等に関する研究が進められ、プリントヘッドとインクが改良されることで、インクジェットプリンタの信頼性が急速に高められてきている^{2~5)}。

コンシューマー用インクジェットプリンタでは、吐出不良が時間の経過と共に起こる。吐出不良の解決策として、インクと一緒に気泡をノズル穴から排出するクリーニングを定期的実施すればよいが、クリーニングはインク量の消耗を増加させてしまうという欠点を持っている。

吐出不良の原因として、プリントヘッドのインク流路内に存在する小さなサイズの気泡がインク流路内に滞留している間に大きなサイズに成長し、インク流路幅を狭めてインク流量が減少することが知られている。著者らは、そのことがノズル穴から適正なインク滴の飛翔しない現象に結び付くと推察して、それを解決するために三つの方法を検討した。一つ目の方法は、インク流路内への空気の侵入を防止することを目的に、インク流路を構成する樹脂材質に高ガスバリア性を付加し、また流路部材内において気体分子の移動する経路を長くするために鱗片状ガラス材を混ぜるものである。二つ目の方法は、現状の流路部材の構造を基本にし、インク流路に気泡が滞留してもインクが気泡を避けて流れるように、バイパスとなる数個の溝を設置するものである。三つ目の方法は、小さいサイズの気泡をインク流速が最も速い流路中心部へ誘導することを目的として、一枚の三角板形状のリブを設置するものである。これらの方法について検討した結果、気泡の成長をほぼ完全に抑制し吐出安定性を得ることが明らかになったので、以下に報告する。

4.2 吐出不良現象

コンシューマー用インクジェットプリンタは、プリントヘッドに直接インクカートリッジを挿入するオンキャリッジ方式が主流である。オンキャリッジ方式の構造図を、**Fig. 4.1** に示す。この構造は、インクを吐出する機能を持つプリントヘッドの上側に、インクを貯蔵するインクカートリッジが設置される方式である。プリントヘッドの上側のインクカートリッジ接続部には、インク流路を有する流路部材が五箇所（イエロー、マゼンタ、シアン、ブラック、ブラック）に設置されている。これらを針部材と呼ぶ。針部材は、先の尖った円錐形状をしていて、プラスチック材質から作られる。その底面の円部には、 $\Phi 6.7\text{mm}$ のフィルターを有している。また針部材の壁厚は $0.6\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ である。針部材の先の尖った円錐形状の部分をインクカートリッジの接続部へ差し込むことで、インクカートリッジ側の封止体を破り、インクカートリッジ側のインク流路を開口して、インクカートリッジ側の流路とプリントヘッド側の流路を接続し、インクをプリントヘッド側へ流す。インクは針部材を挿入後、インクカートリッジからプリントヘッドへと流れて、プリントヘッド内の流路を通してノズルから吐出される。

針部材内と接続部内のインク流路の構成図を **Fig. 4.2** に示す。この構成図は、針部材と接続部の流路壁形状を省略して内側のインク流路を描いている。この図で針部材とは、上側の $\Phi 1.8\text{mm}$ のインク流路の上端部から下側の $\Phi 6.7\text{mm}$ のフィルターまでに相当する。針部材内のインク(C)は、インクカートリッジ側(A)からプリントヘッド側(B)に流れる。針部材内のインク流路は、インクカートリッジに接続される $\Phi 1.8\text{mm}$ のインク流路部、 $\Phi 6.7\text{mm}$ のフィルター(F)、三角錐形状のフィルター室(E)から構成される。フィルター室は、インク流路部からフィルター部までの 4mm 間で末広がりの軽度な傾斜を有する三角錐形状に形成されている。フィルター室内には、時間の経過とともに気泡(D)が滞留する。フィルターは、ステンレス製の極細の糸を編み合わせた網である。フィルターの機能は、針部材をインクカートリッジへ挿入する際に、針部材に付着している細かな異物等が外部から侵入することを防止する。また、 $\Phi 6.7\text{mm}$ の内部に約 $\Phi 20\mu\text{m}$ 相当の開口を数万個有することで、一定時間に一定量のインクを流すことが可能となる。

本研究で用いたプリントヘッド⁶⁾のフィルター室の計算上の体積値は約 40 mm^3 である。これまでの評価の中で、気泡成長体積が 40 mm^3 を超えると吐出不良の発生が多く見られた。これはフィルタ室が気泡で満たされると、インクの流れが気泡によっ

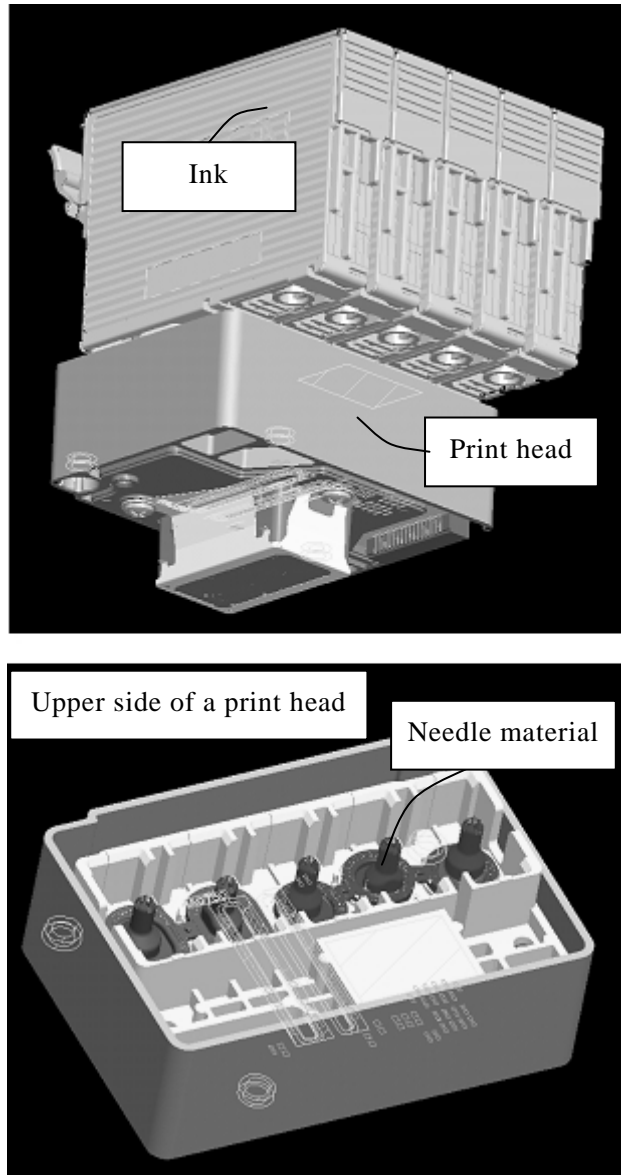


Fig. 4.1 Structure of a print head and an ink cartridge.

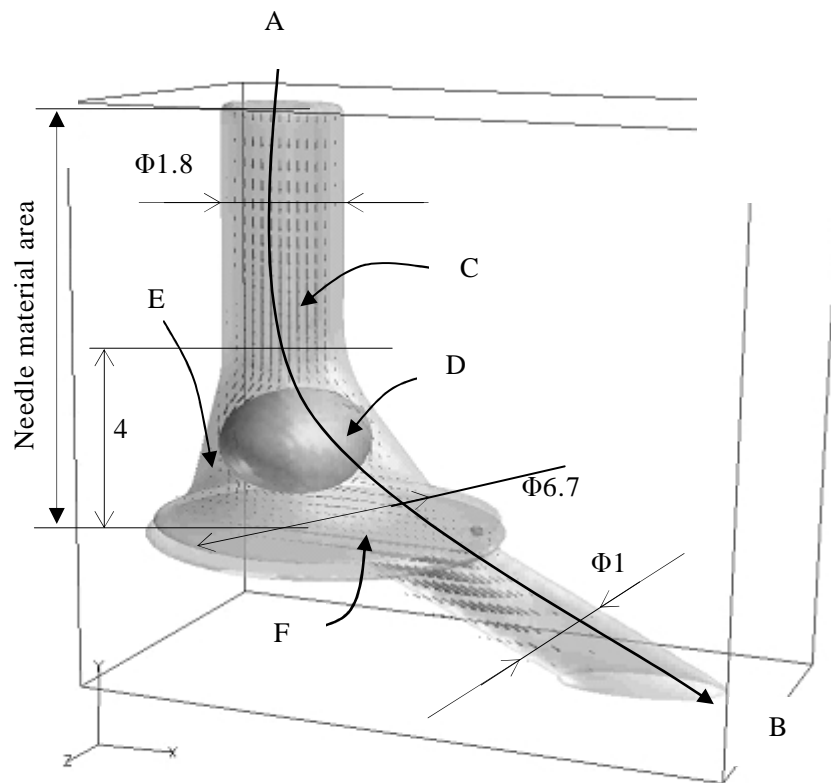


Fig. 4.2 Expansion figure of an ink flow path. (unit : mm)
 Wall thickness 0.6 mm
 A: Ink cartridge side B: Print head side C: Ink D: Bubbles
 E: Filter chamber F: Filter

て完全に妨げられるためと考えられる．そこで本研究では，気泡体積が 40mm^3 に達するまでにかかる放置時間を，気泡成長期間と定義した．気泡成長期間が短い場合は，気泡が増加し成長するスピードが速まるためにインク流れを妨げる機会が増え，吐出不良が起こりやすくなると考えられる．針部材における気泡成長の発生の原因として，針部材の流路壁厚が 0.6mm と薄いために，外部からの空気が侵入し気泡に変化しやすいことが挙げられる．別の原因として，時間の経過と環境の変化とともにインク中に溶解した空気が気泡に変化し，その後三角錐形状のフィルター室に小さな気泡が滞留して大きなサイズへ成長することが挙げられる．これらの二つの要因から気泡の成長に伴ってインク流量が減少することで，適正なインク滴がノズル穴から飛翔しない吐出不良現象が発生すると考えられる．

流路壁からの空気の侵入と気泡の発生について説明する．空気は針部材の流路壁を通して侵入するが，一方，インク中の水分も流路壁を通して蒸発する⁷⁾．温度と気圧の環境変化によってインクへ溶解する空気量に変化するため，気泡は成長したり消滅したりする．流路壁への空気の侵入経路は，空気が針部材の流路壁を通して，インク流路に侵入する．インク中に形成された小さな気泡は，結合して大きな気泡に成長する．気体の侵入のしやすさを定量的に示す指標値が，気体透過速度である．1日当たりの気体透過速度 M ($\text{cc}/24\text{hours}$) は(1)式で表わされる．この式は気液界面の分圧と濃度に関する理論をもとに，Henry 等によって提唱された⁸⁾．

$$M = \frac{DPS}{\delta} \quad (1)$$

D は流路壁における気体透過係数($\text{cc} \cdot \text{mm} / \text{mm}^2 \cdot 24\text{hours} \cdot \text{Pa}$)， P は気体密度(Pa)， S は流路壁の透過層面積(mm^2)， δ は流路壁の透過層厚み(mm)を示す．気体透過速度は個々の材質が持つ気体透過係数に比例し，透過層厚みに反比例する．この気体を空気と仮定すると，空気の侵入を抑えるためには，空気透過速度を小さくすることが求められる．気泡発生の根本的な原因である空気の侵入を抑えるためには，空気透過係数が従来の材質を凌ぐ新たな材質を開発することが一つの手段である．実験において空気の侵入を定量的に把握するために，酸素と水蒸気透過係数に注目した．

4.3 実験

4.3.1 樹脂材質の気体透過係数の測定

用いた材質は，従来の流路材質のポリフェニレンエーテル（以下 PPE と記す）とポ

リスチレン（以下 PS と記す）の合成材（以下 PPE/PS と記す），パラヒドロキシ安息香酸・6-ヒドロキシ-2-ナフトエ酸共重合体（以下 LCP と記す），ポリアミド（以下 PA と記す），ポリフェニレンサルファイド（以下 PPS と記す），ビスクロ[2.2.1]ヘプタン-2-エン・エチレン共重合体（以下 COC と記す），PPS と PPE の合成材（以下 PPS/PPE と記す）である．この検証実験には，115mm×115mm×0.5mm の試験片を用いた．酸素透過試験は JISK7126B に準拠し水蒸気透過試験は JISK7129B に準拠した．酸素透過試験機はモコン社製 OX-TRAN 2/20 を使用し，40℃，90% RH，24 時間に放置して実験を行った．水蒸気透過試験機はモコン社製 PERMATRAN W3/31 を使用し，40℃，100% RH，24 時間に放置して実験を行った．酸素と水蒸気透過係数 $Pe(\text{cc} \cdot \text{mm} / \text{mm}^2 \cdot 24\text{hours} \cdot \text{Pa})$ は，24 時間における酸素と水蒸気透過量 $Q (\text{cc} / \text{mm}^2 \cdot 24\text{hours} \cdot \text{Pa})$ を測定して，その測定値に材質の厚み $\delta (\text{mm})$ をかけた数値であり，(2)式で表わされる．

$$Pe = Q\delta \quad (2)$$

インクへの耐液性と耐オイル性の評価は，プラスチック材料をインクまたはオイル内に一定期間浸漬後，そのプラスチック材料が膨潤，劣化，化学反応による変形などを起こすかどうかを調べることを行った．

4.3.2 ガラス材を含む複合材質の気体透過係数の測定

鱗片状ガラス材を含まない PPS/PPE（以下 PPS/PPE と表す），鱗片状ガラス材 10% を含む PPS/PPE（以下 PPS/PPE-A と表す），鱗片状ガラス材 20% を含む PPS/PPE（以下 PPS/PPE-B と表す）の 3 種の材質について酸素と水蒸気透過係数を測定した^{9,10}．

3.1 の実験と同様に一定時間における酸素と水蒸気透過量を測定して，その測定値に材質の厚みをかけて各係数を算出した．

4.3.3 複合材料と改良を加えた流体構造の気泡成長の測定

評価インクは染料タイプを選定した．プリントヘッド（以下ヘッドと記す）の針部材に 20mm³ サイズの気泡を挿入し，その後 40℃環境で気泡体積の経時変化を一定期間毎に確認した．気泡体積の測定方法は以下である．経時変化前後の気泡をシリンジにより抜き取り，インクで満たしたチューブ（内径 0.79mm）にその気泡を入れた．チューブ内に挿入された気泡の長さ（ L ）を，ニコン社製工具顕微鏡（0.001mm 単位）により測定した．(3)式を使用して気泡体積 V を求めた．

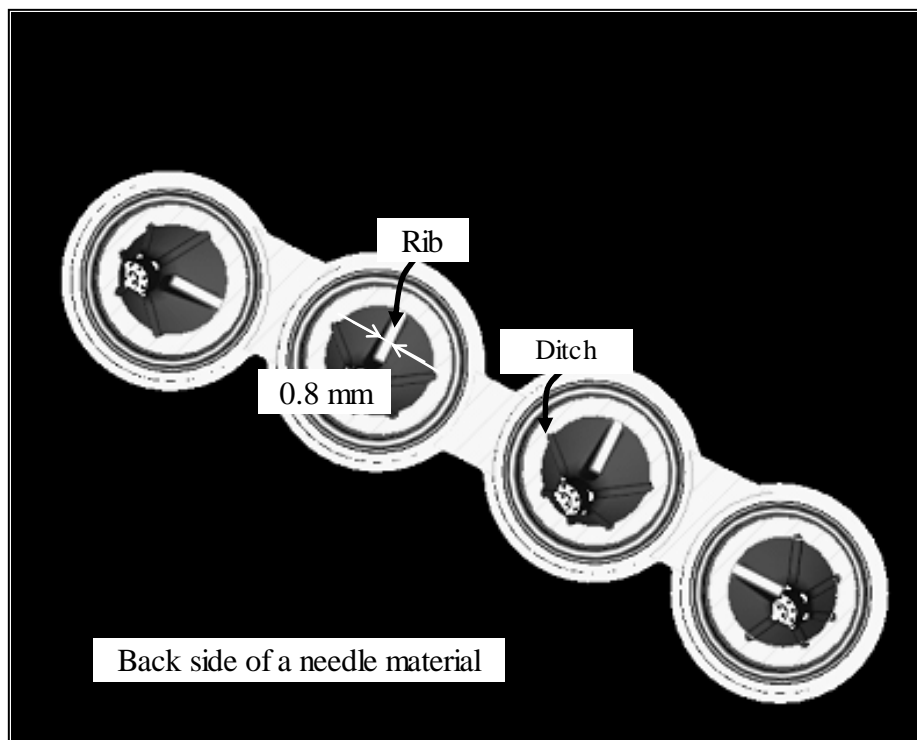


Fig. 4.3 Schematic diagram of ditches and ribs in a needle material.
Ditch: Width 0.5 mm, Depth 0.03 mm
Rib: Thickness 0.8 mm, figure is a triangular plate

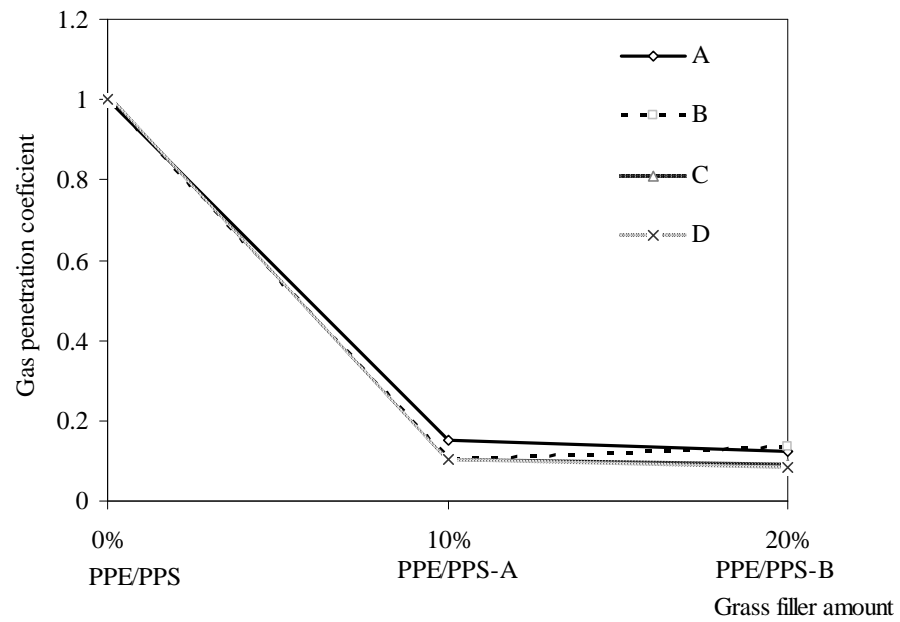


Fig. 4.4 Comparing O₂ and H₂O gas penetration coefficient with grass filler amount.
A: H₂O gas penetration coefficient: 40 degree, 90% RH
B: H₂O gas penetration coefficient: 23 degree, 90% RH
C: O₂ gas penetration coefficient: 40 degree, 90% RH
D: O₂ gas penetration coefficient: 23 degree, 90% RH

$$V = \pi(d/2)^2 L \quad (3)$$

d はチューブの内径(mm), L は気泡の長さ(mm)を示す. 評価樹脂は, PPS/PPE, PPS/PPE-B の 2 種である.

次にインクの流量を減少させない流路構造として, 針部材内部への溝とリブの形成を行った. 針部材の形状を裏側から見たときの溝とリブの概要図を, **Fig. 4.3** に表す. この実験に使用した針部材は, 先端の尖った 4 つの円錐形状 (イエロー, マゼンタ, シアン, ブラック) から形成されている. その針部材の流路内壁に, 巾が 0.5mm で深さが 0.03mm の 5 つの溝を設置した. 溝の巾 0.5mm と深さ 0.03mm によるインクが流れる流路断面積は 0.075mm^2 (巾 0.5mm×深さ 0.03mm×5 箇所) である. さらに, 針部材の内部に巾 0.8mm の三角板のリブを設置した. 溝とリブを設置した針部材について, 気泡成長に関する測定を行った.

また, アニールによる開発した樹脂の結晶化を高めることで酸素と水蒸気透過性への効果を確認するために, アニールの有り無しによる実験を行った. アニールの条件は, $110\pm 5^\circ\text{C}\times 2$ 時間に設定した.

4.4 結果と考察

4.4.1 高バリア性材質の選択結果

Table 4.1 に, 各材質において得られた酸素透過係数, 水蒸気透過係数の結果を示した. LCP は酸素と水蒸気透過係数において最小値が得られた. 従来材の PPE/PS に対して, 酸素と水蒸気透過係数の低い材質は, 二つの透過係数の平均から, LCP, PA, PPS, COC の順番である. 併せて **Table 4.1** には, 流路部材に要求される主な評価項目であるインクへの耐液性, 耐オイル性, 超音波溶着の加工性, ネジ用のタップの加工性, 成形性の結果を示した. LCP はインクの耐液性の評価でフィブリル現象が発生した. フィブリル現象とは, 繊維の軸方向に繊維が裂ける現象で, いくつかの枝毛のようなものが発生する状態である. この枝毛は, LCP 樹脂から分離して細かな樹脂となり, これが異物の発生に繋がる. PA はインクの耐液性の評価で, PA が包含する滑材や熱安定材がインクと反応することで異物となる. 発生した異物は, 流路部材内のフィルターに目詰まりを生じてインクの流れを妨げることになり, インク吐出不良を誘発する原因の一つとなる. COC は耐オイル性の評価で膨潤し劣化すること, そしてネジ用のタップの加工性の評価で材質が脆いために割れが発生した. 以上の結果から,

針部材の材質として結晶性樹脂である PPS を基本の樹脂として選択することとした。PPS の課題の一つに、高流動性であるがために成形時に薄厚のバリが発生することが挙げられる。そこで、PPS に非晶性樹脂であり低流動性の PPE を混ぜることで、バリの発生を抑制することにした。PPS/PPE は配合量を調整することにより、従来の PPE/PS の合成材を 1 とした場合に対し、酸素ガスバリア係数で 1/4.7 倍、水蒸気ガスバリア係数で 1/2.6 倍の数値を示した。

4.4.2 ガラス材を含む複合材質の効果

PPS/PPE-B, PPS/PPE-A, PPS/PPE の 3 種の評価樹脂について酸素と水蒸気透過量を測定して、(2)式から透過係数を算出した。酸素透過係数についての結果を **Table 4.2** に示す。水蒸気透過係数についての結果を **Table 4.3** に示す。PPS/PPE の酸素と水蒸気透過係数を 1 とした場合に、PPS/PPE-B, PPS/PPE-A の対比値を **Fig. 4.4** に表す。酸素透過係数において、PPS/PPE-B は PPS/PPE と比較して 40℃, 90% RH で 1/11.2 倍、23℃, 90% RH で 1/11.6 倍になった。PPS/PPE-A は PPS/PPE と比較して 40℃, 90% RH で 1/9.6 倍、23℃, 90% RH で 1/9.7 倍になった。水蒸気透過係数において、PPS/PPE-B は PPS/PPE と比較して 40℃, 90% RH で 1/8.1 倍、23℃, 90% RH で 1/9.6 倍になった。PPS/PPE-A は PPS/PPE と比較して 40℃, 90% RH で 1/6.6 倍、23℃, 90% RH で 1/7.3 倍になった。酸素と水蒸気透過係数において、開発した材質の PPS/PPE-B と PPS/PPE-A は PPS/PPE と比較して、数分の 1 倍という小さなデータが得られた。前述のデータから、鱗片状ガラス材を含むことにより、酸素と水蒸気透過係数が非常に小さな数値になった。酸素と水蒸気透過係数は、鱗片状ガラス材の含有量を増加することでさらに小さくなることが予測される。

成形加工した針部材の実物を板厚の断面方向から観察した 600 倍の電子顕微鏡写真を **Fig. 4.5** に示す。右斜め矢印は材質の流れを示す。電子顕微鏡写真から、鱗片状ガラス材の大小サイズの存在と、少し乱れた配向の状態が見られる。またガラス材が成型加工により、流路の長さ方向に整列していることが見られる。酸素と水蒸気ガスバリア性が向上する理由は、樹脂層内に分散した鱗片状ガラス材が流路の長さ方向にほぼ平行に配向することにより、気体分子が鱗片状ガラス材を迂回して樹脂内を通過することで、移動する距離が長くなるためと考えられる。また、長さ、幅、板厚方向の鱗片状ガラス材の隙間がより接近すれば、酸素と水蒸気が透過しにくくなり、ガスバリア性はさらに向上すると考えられる。PPS/PPE における鱗片状ガラス材の配向状態を、模式的に **Fig. 4.6** で表す。流路壁厚 0.6mm の樹脂層内に、約 80μm×80μm×5μm の

Table 4.1 Result of an early evaluation in some part materials.

Material	O ₂ gas barrier coefficient	H ₂ O gas barrier coefficient	Resistance to ink	Resistance to oil	Workability to supersonic wave welding	Workability to Tapping	Moldability
PPE/PS(Ref)	151.31	4.21	○	○	○	○	○
LCP	0.32	0.01	—	○	○	○	○
PA	0.43	0.07	—	○	○	○	○
PPS	0.12	0.33	○	○	○	○	—
COC	25	0.09	○	—	○	—	○
PPS/PPE	32.89	1.64	○	○	○	○	○

Table 4.2 Result of O₂ gas penetration coefficient.

Resin	Characteristic	Examination of O ₂ gas		Examination of O ₂ gas	
		Penetration coefficient: 40°C, 90% RH (cm ³ ·cm / cm ² ·s·Pa)	Ratio vs PPS/PPE	Penetration coefficient: 23°C, 90% RH (cm ³ ·cm / cm ² ·s·Pa)	Ratio vs PPS/PPE
PPS/PPE	—	4.8×10 ⁻⁷	1	3.6×10 ⁻⁷	1
PPS/PPE-B	GF20%	4.3×10 ⁻⁸	1/11.2	3.1×10 ⁻⁸	1/11.6
PPS/PPE-A	GF10%	5×10 ⁻⁸	1/9.6	3.7×10 ⁻⁸	1/9.7

サイズの鱗片状ガラス材が流路の長さ方向と平行に配向する．A は樹脂層のみにおける酸素と水蒸気の経路を示し，B は樹脂層に鱗片状ガラス材が配向する場合において酸素と水蒸気の気体分子が移動する一つの経路を示す．右矢印は材質の流れを示す．今回の実験では約 $80\mu\text{m}\times 80\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ のサイズの鱗片状ガラス材を使用した．成形性の観点から，現状サイズよりも小さいサイズを混ぜることで，部位の形状差が存在する箇所小さく軽量の鱗片状ガラス材が樹脂とともに流動して，大きな鱗片状ガラス材が行き着くことができない箇所を補うことが考えられる．但し，単に鱗片状ガラス材を増やすのではなく，鱗片状ガラス材のサイズ，形状，成形条件から最適値を追求することが必要である．

4.4.3 気泡成長の測定結果

針部材の材質と流路構造を種々変更して，気泡成長に関する測定を行った．(3)式から，気泡体積を算出した．PPS/PPE-B を選択した理由は，鱗片状ガラス材が 20% と多いため酸素と水蒸気透過量が減少して，気泡成長期間が長期化すると考えられた．気泡体積と放置時間の関係を **Fig. 4.7** に示す．Fig. 4.7 は，横軸が放置時間で縦軸が気泡体積である．A は，フィルター室の体積 40 mm^3 を表す．a は，樹脂が PPS/PPE で従来構造である．b は，開発した樹脂 PPS/PPE-B で従来構造である．c は，開発した樹脂 PPS/PPE-B と溝の組み合わせからなる新構造である．d は，開発した樹脂 PPS/PPE-B，溝そしてリブの組み合わせからなる新構造である．a, b, c, d の実験において，気泡体積は放置時間とともに増加した．気泡体積と放置時間の関係は比例関係にあった．4 種の条件において，気泡成長の速度に違いが見られた．得られた直線の傾きの数値は，a が 1.77，b が 0.37，c が 0.33，d が 0.19 となった．

a から d の効果を確認するために，4.2 で定義した気泡成長期間を見積もった．気泡成長期間の見積もりは，Fig. 4.7 の吐出不良臨界値 40 mm^3 と実験から得られた放置時間と気泡体積の相関を示す直線との交点から求めた．a の PPS/PPE は，気泡成長期間が 23 日と見積もられ，一ヶ月に満たなかった．b の PPS/PPE-B は，気泡成長期間が 108 日と見積もられた．試験片による水蒸気透過係数の結果から，PPS/PPE-B は PPS/PPE と比較して 40°C ，90% RH で 8.1 倍の数値を示したが，ヘッドを使用した針部材の気泡成長期間は，4.7 倍に留まった．針部材内において，長さ，幅，板厚方向の鱗片状ガラス材の隙間がより接近すれば，気体分子の移動する経路長さが長くなり，気泡成長期間が延びると考えられる．c の PPS/PPE-B と溝の組み合わせは，気泡成長量期間が 121 日と見積もられた．向上策の一つとして溝を設置した結果は，b の 108

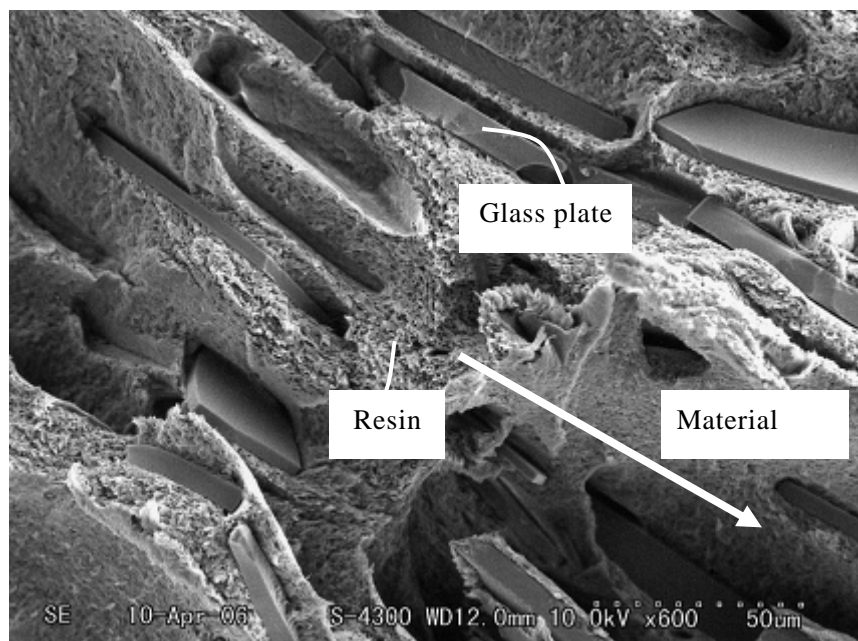


Fig. 4.5 Electron microscopic image of resin and glass plates.

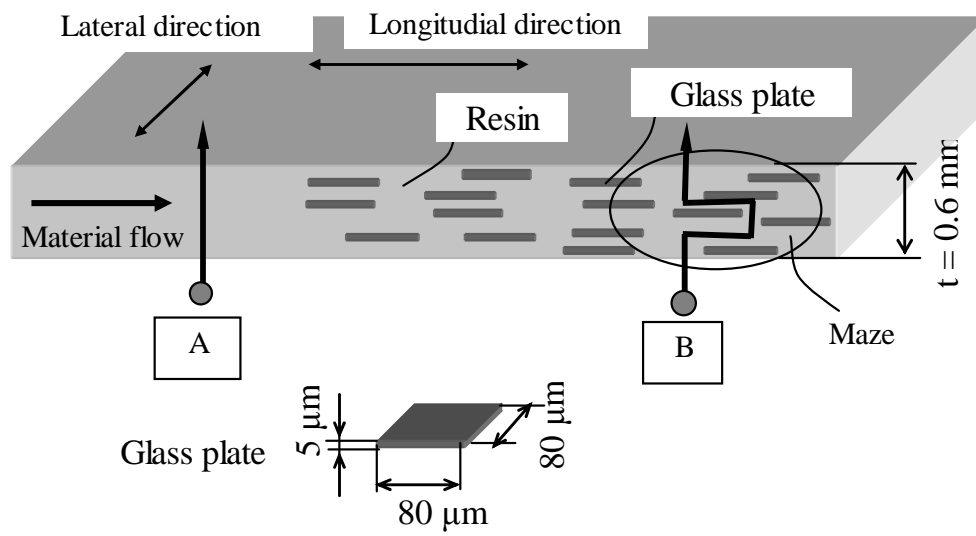


Fig. 4.6 Schematic figure of resin and glass plates.
 A: Conventional air and moisture route
 B: New ones route

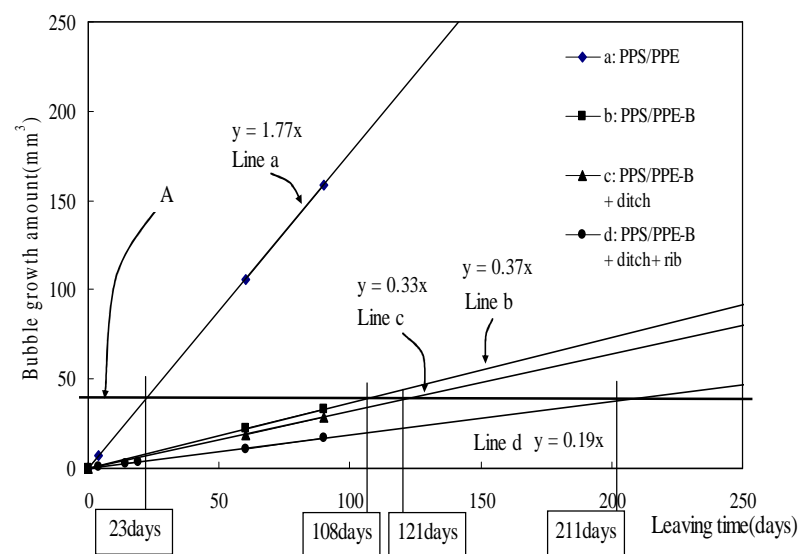


Fig. 4.7 Relation between bubbles growth amount and leaving time.
a: PPE/PPS b: PPE/PPS-B
c: PPE/PPS-B + Ditch d: PPE/PPS-B + Ditch + Rib
A: Critical volume of misfiring, more than 40 mm³

Table 4.3 Result of H₂O gas penetration coefficient.

Resin	Characteristic	Examination of H ₂ O gas		Examination of H ₂ O gas	
		Penetration coefficient: 40°C, 90% RH (g•mm / m ² •s•Pa)	Ratio vs PPS/PPE	Penetration coefficient: 23°C, 90% RH (g•mm / m ² •s•Pa)	Ratio vs PPS/PPE
PPS/PPE	—	4.93×10 ⁴	1	2.06×10 ⁴	1
PPS/PPE-B	GF20%	6.09×10 ³	1/8.1	2.14×10 ³	1/9.6
PPS/PPE-A	GF10%	7.48×10 ³	1/6.6	2.83×10 ³	1/7.3

Table 4.4 Result of bubble growth amount.

NO	Resin	Ditch	Rib	Annealing	Bubble growth amount (mm ³ /day)		Bubble growth amount (mm ³ /day)	
					Actual figure of 40°C	Vs PPE/PPS	Actual figure of 25°C	Vs PPE/PPS
a	PPS/PPE	Nothing	Nothing	Nothing	1.77	1	0.27	1
b	PPS/PPE-B	Nothing	Nothing	Nothing	0.35	1/5.1	0.09	1/3.0
c	PPS/PPE-B	Setting	Nothing	Nothing	—	—	—	—
d	PPS/PPE-B	Setting	Setting	Nothing	0.18	1/9.8	0.05	1/5.4
d'	PPS/PPE-B	Setting	Setting	Practice	0.16	1/11.1	0.04	1/6.8

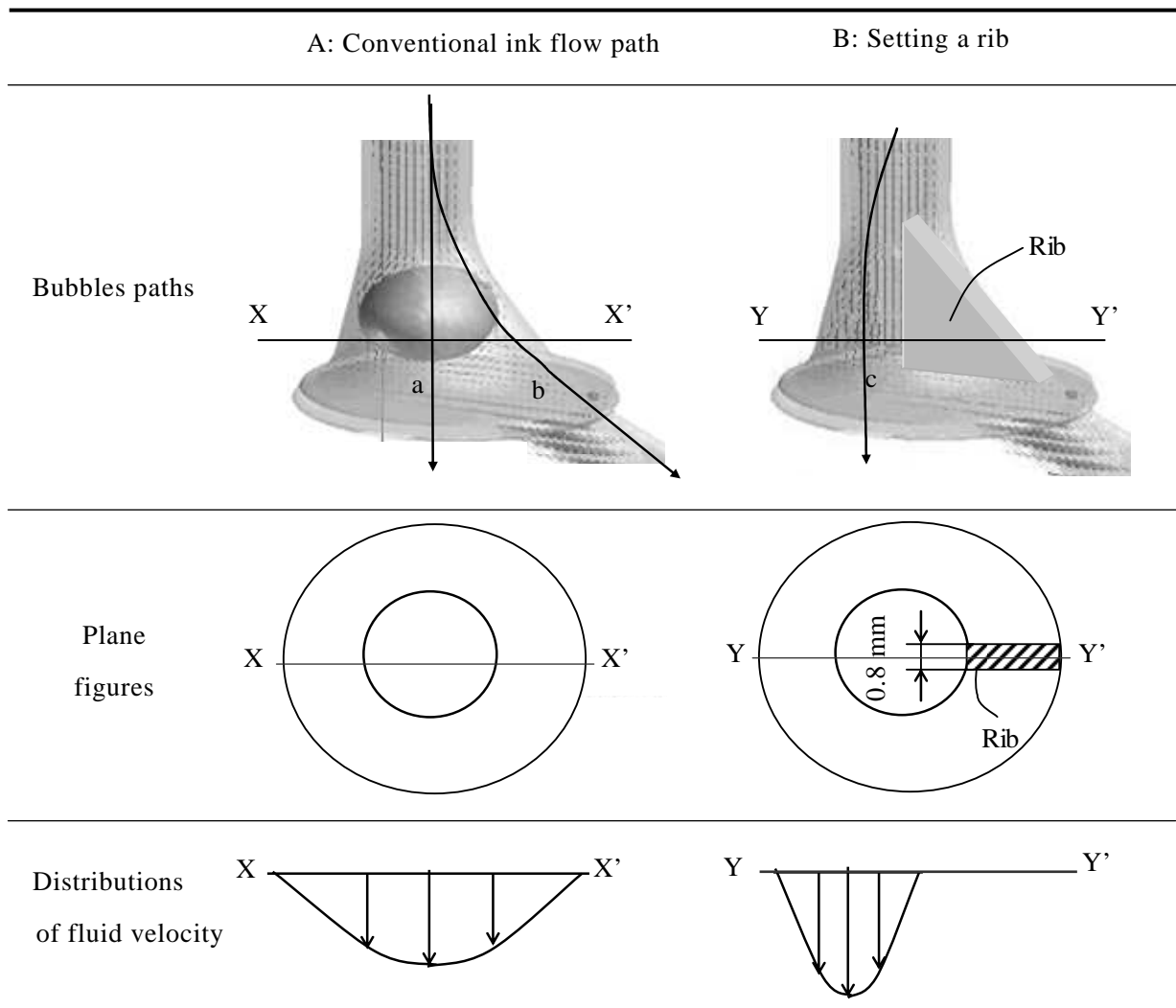


Fig. 4.8 Expansion figure of conventional and setting a rib ink flow path.
A: Conventional ink flow path
B: Setting a rib ink flow path

日に対して c では 121 日に見積もられ、約 12% の向上が予測される。その理由として数箇所の溝を設置することにより、時間の経過とともに成長する気泡を避けてインク流動が可能となることが考えられる。最後に d の PPS/PPE-B、溝そしてリブの組み合わせは、211 日に長期化して見積もられた。この見積もりを実証するために d の改良内容を適用して、プリンタによる実機評価を実施した結果、吐出不良が発生するまでの期間が 236 日と飛躍的に長期化した。主な理由は以下と考え、その説明図を **Fig. 4.8** に表す。A は従来のインク流路構造、B はリブを設置したインク流路構造を表し、A と B に関する気泡の通路と流速分布を図に示す。流路内の流速は放物線速度分布に倣い、中心が速く (a) 外側に行くほど遅くなる (b)。針部材内の流路壁付近は流速が遅いために、侵入した空気が気泡になると滞留しやすい状態にある。三角板形状のリブを設置することで、インク内に存在する小さいサイズの気泡を内側に集めてその気泡をリブの内側の最流速部へ誘導して (c)、気泡の増加と成長を抑制する。リブの設置 (Y-Y') は従来のインク流路構造 (X-X') に比較して流速が速まり、移動する気泡量も多くなると考えられる。一枚のリブによる効果を得たことから、リブの枚数を増やすことにより、気泡成長期間をさらに長期化することが考えられる。

針部材の気泡成長量の詳細結果を **Table 4.4** にまとめる。ここでは、Fig. 4.8 の結果で最も気泡成長期間が長期化した溝とリブがある場合に注目し、前述の実験 a、b と樹脂のアニール無しの d、アニール有りの d' について針部材の気泡成長量を測定した。c は、溝だけの効果が小さいために省略した。a の数値に比較して、b、d、d' の数値は一桁小さくなった。PPS/PPE-B の針部材の気泡成長量は PPS/PPE 比で、アニールがない場合は 40℃ で 1/9.8 倍 ($0.18\text{mm}^3/\text{day}$)、25℃ で 1/5.4 倍 ($0.04\text{mm}^3/\text{day}$) となった。アニールがある場合は 40℃ で 1/11 倍 ($0.16\text{mm}^3/\text{day}$)、25℃ で 1/6.8 倍 ($0.04\text{mm}^3/\text{day}$) となった。アニールがある場合の針部材の気泡成長量は、40℃ で $0.02\text{mm}^3/\text{day}$ 、すなわちアニールがない場合に対して約 11.1% 低減した。アニールをすることで気泡成長量が多少抑えられた要因は、ガスバリア性は結晶化度に依存し、結晶化度が進むとガスバリア性が向上することから、アニールによる樹脂の結晶化度が進むことにより、酸素と水蒸気が流路壁を通りにくくなり、空気は水に対して高温になるほど溶けにくいことから、40℃ で約 11.1% の気泡成長量の低減に結び付いたと考えられる。

4.5 結論

本研究の課題は、長期間において不連続に印刷を行った際にインクの吐出不良を生じないようにすることである。この問題を解決するために、新たな樹脂材質と流路構

造を開発した。

1) 材質として、酸素と水蒸気ガスに対する高バリア性を付加した。針部材に適する材質は、酸素と水蒸気透過係数、インクへの耐液性、成形性等から PPS と PPE の合成材と判断した。鱗片状ガラス材 20%を含んでいる PPS と PPE の合成材 PPS/PPE-B が、酸素と水蒸気透過係数において最小値を得た。

2) 流路構造として、流路にバイパスとなる数個の溝を設置した。PPS/PPE-B と溝の組合せは、気泡成長期間において約 12%の向上が見積もられた。溝の本数を増やすことだけでは、流路断面積向上は難しい。流路壁厚が 0.6mm という条件下で、巾と深さを大きくするためにどのような形状にするのかが課題となる。

3) さらに、小さいままの気泡を流路中心部へ導くリブを設置した。PPS/PPE-B、溝そしてリブの組合せは、気泡成長期間において飛躍的に長期化することが明らかになった。リブは今回の実験で簡単な板を設置したが、気泡の移動性、インクの流動性という観点から板の形状の追求をすることにより、さらに性能を向上した流路を作ることができる。気泡の動きをコントロールするためには、溝とリブを単独で活用するのではなく溝とリブの組み合わせが必要と考えられる。

これらの解決策により、インク流量が長期間にわたって減少せず、気泡成長にかかる期間が長期化することを明らかにした。インクジェットプリンタの信頼性の観点から、インクの吐出不良を誘発する原因となる気泡成長期間を、従来の 23 日から 211 日に延ばすことを見積りから得た。プリンタによる実機評価では、吐出不良の発生を約 30 日から 236 日に延ばすことができることを確認した。今回の実験から効果の得られた因子は、合成材 PPS/PPE-B とリブであった。合成材 PPS/PPE の鱗片状ガラス材の含有量を 20%から 40%に高めて、リブ枚数を 1 枚から 2 枚に増やして位置と形状の適正化をすることにより、高い目標値である気泡成長期間 365 日（1 年）以上に対応可能な針部材の構造を導き出すことができると考えられる。この構造が実現すれば、インク吐出不良に基づく印刷不良がさらに低減され、高いプリンタの信頼性を確保することが可能となる。但し改良のリスクとして、鱗片状ガラス材を増やすことは樹脂の流動性を低下させ射出成形加工を難しくすること、リブ数を増やすことは低流速のエリアを創り出すこととインク流量を低減させることが考えられる。改良点として、鱗片状ガラス材の含有率を 20%から 40%にして、リブ数を 1 箇所から 2 箇所にするのを挙げる。この改良が実現した場合の気泡成長期間は、約 400 日が見積られる。しかし前述の内容から、現構造の改良ではこの数値が上限値となることが予測される。

4.6 参考文献

- 1) 阿部 隆夫, “デジタルプリントシステムの現状と将来への期待”, 日本写真学会誌, 66, pp.452-457(2003).
- 2) 森田直己, 平潟進, 浜崎聡信, “噴射ノズル滴の振動挙動観察に基づくノズル目詰まり機構の検討”, 日本画像学会誌, Imaging Conference JAPAN 2009 論文集, pp.221-224(2009).
- 3) 平潟進, 森田直己, 瀬戸信二, “循環路搭載型ヘッドにおけるノズル乾燥時の噴射挙動”, 日本画像学会誌, Imaging Conference JAPAN 2009 論文集, pp.217-220(2009).
- 4) S. Hirakata, M. Okuda, H. Nakamura, T. Ishiyama, S. Seto and N. Morita, “Improvement of jetting reliability against ink viscosity increase by installation of an ink circulation path”, Journal of the Imaging Society of Japan, Pan-Pacific Imaging Conference '08, pp.200-203(2008).
- 5) W. Zapka, S. Pausch, H. Rapp, “Improved Reliability in Industrial Inkjet Printing”, Journal of the Imaging Society of Japan, Final Program and Proceeding, pp.865-868(2008).
- 6) 北原強, “MACH の開発 (3pl ドロップの吐出技術)”, 日本画像学会誌, Japan Hardcopy' 2003 論文集, pp.217-220(2003)
- 7) 内藤郁夫, 新田義喜, “インキ転移機構の検討ーインキ層中での小さい気泡の生成ー”, 日本印刷学会誌, 46, pp.27-32 (2009).
- 8) 宝沢光紀, 都田昌之他著, “拡散と移動現象”, 培風館, pp. 24-38 (1996).
- 9) 加藤誠, “ナノテクノロジーのすべてー未来の自動車材料ー”, 工業調査会, pp.252-255 (2005).
- 10) 山下義裕, 高橋利光, 春日井俊介, 田中皓, “微量のカーボンナノファイバー(VGCA)添加による樹脂材料の補強効果”, 高分子学会誌, 63, pp.593-600 (2006).

第 5 章

インクジェットプリントヘッド用
ニッケルキャビティプレート
の実用化に向けた
圧力室形成パンチの寿命向上

第5章 インクジェットプリントヘッド用ニッケルキャビティプレートの実用化に向けた圧力室形成パンチの寿命向上

5.1 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、キャビティプレート、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プレート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、キャビティプレート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弱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ということから、キャビティプレート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。ニッケルキャビティプレートは、マイクロプレス工法により製作した¹⁶⁾。第3章において、V字反りとキャビティプレートの段差の原因は、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られた。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字反りとキャビティプレートの段差について、マイクロプレス加工後に両面マイクロポリッシング加工を用い、それらを低減する方法を明らかにした。

しかし、ニッケルキャビティプレート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プレートの加工時の加工力に着目し、精密金型の転写用パンチの寿命（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。

5.2 プリントヘッドとその製造方法

5.2.1 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、**Fig5. 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プレート②、 piezo素子を櫛歯状に加工し微小な変位を作り出す piezo振動子③、 piezo振動子からの微小な変位を伝える薄膜振動板④、接着剤⑨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プレートの圧力室⑥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。

Fig. 5.2 にキャビティプレートの構造を示す。**Fig. 5.2(a)**は、キャビティプレートを、上側から見た写真である。圧力室 A(**Fig. 5.2(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。キャビティプレートは、12mm×30mm×0.3mm のサイズである。1st line における圧力室のエリアは、1.6mm×25.35mm である。**Fig. 5.2 (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、寸法が縦 1.6mm、横 0.11mm、深さ 95 μ m で、圧力室間のピッチが 0.141mm で、圧力室間の栈が 0.031mm である。連通口 B (**Fig. 5.2 (b)**の B)は、寸法が縦 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。**Fig. 5.2(b)**の C は、1 列に配列される 180 個分の圧力室と栈の全長を示す（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、キャビティプレート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 $14.7 \times 10^{-6} / \text{K}$ で、シリコンが $2.6 \times 10^{-6} / \text{K}$ で二つの係数値に $12.1 \times 10^{-6} / \text{K}$ の数値差があった。そこで、キャビティプレート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 $13.4 \times 10^{-6} / \text{K}$ 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¹⁹⁾。キャビティプレート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、 $70\mu\text{m}$ から $25\mu\text{m}$ 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²⁰⁾。

5.2.2 ニッケルキャビティプレートの加工プロセス

ニッケルキャビティプレート（以下プレートと呼ぶ）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 0.11mm 、深さ $133\mu\text{m}$ 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、窓抜き加工によりプレートの外形を加工する。工程 5 では、プレート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プレートの平坦度と面粗さを仕上げて、圧力室の深さ $95\mu\text{m}$ 以上に加工する。

工程 2 の圧力室の加工 Step の詳細を、**Fig. 5.3** に示す。**Fig. 5.3** 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、**Fig. 5.3** 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に、転写用のパンチとダイの寿命が極めて低くなる。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 (**Fig. 5.1**⑦) 内を通りノズル穴 (**Fig. 5.1**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 (**Fig. 5.3**(a)) にて $100\mu\text{m}$ を加工し、Step 2 (**Fig. 5.3** (b)) にて $133\mu\text{m}$ 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、圧力室間の栈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．Fig. 5.3(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）．

5.2.3 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 **Fig. 5.4** の電子顕微鏡写真に示す．Fig. 5.4 から，アドレス #180 において，凸状形状部が破損した．隣のアドレス #179 において，凸状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．

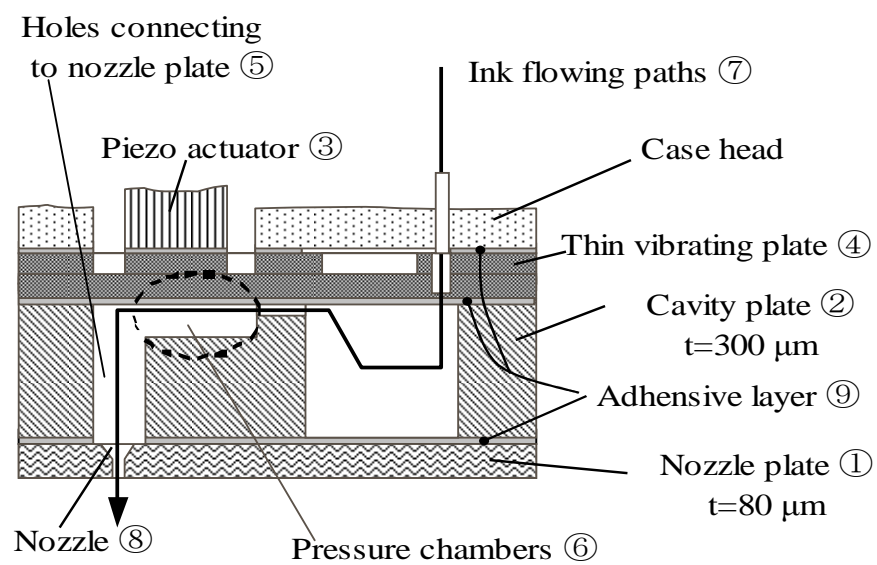


Fig. 5.1 Head Structure in cross sectional view.

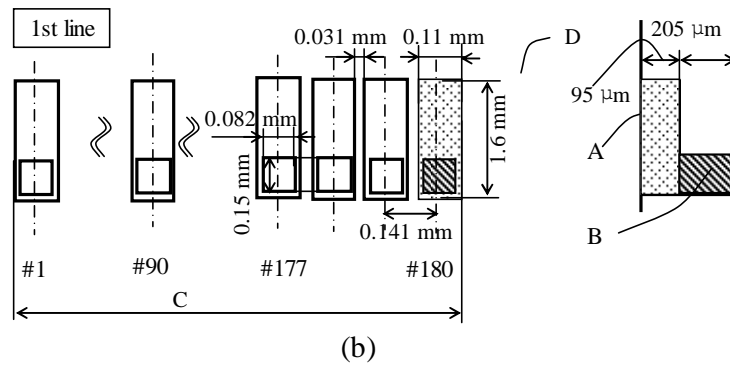
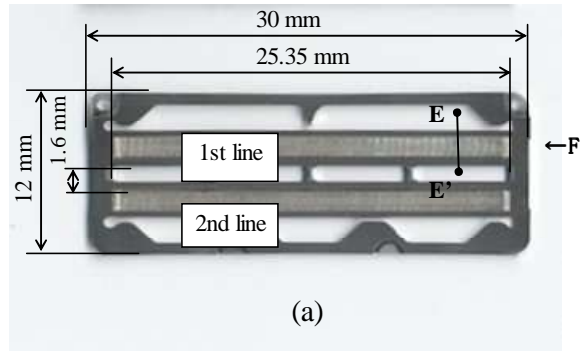




Fig. 5.2 Structure of Ni cavity base plate.
A:  Pressure chamber
B:  Hole connecting to nozzle plate
C: Total length of pressure chambers

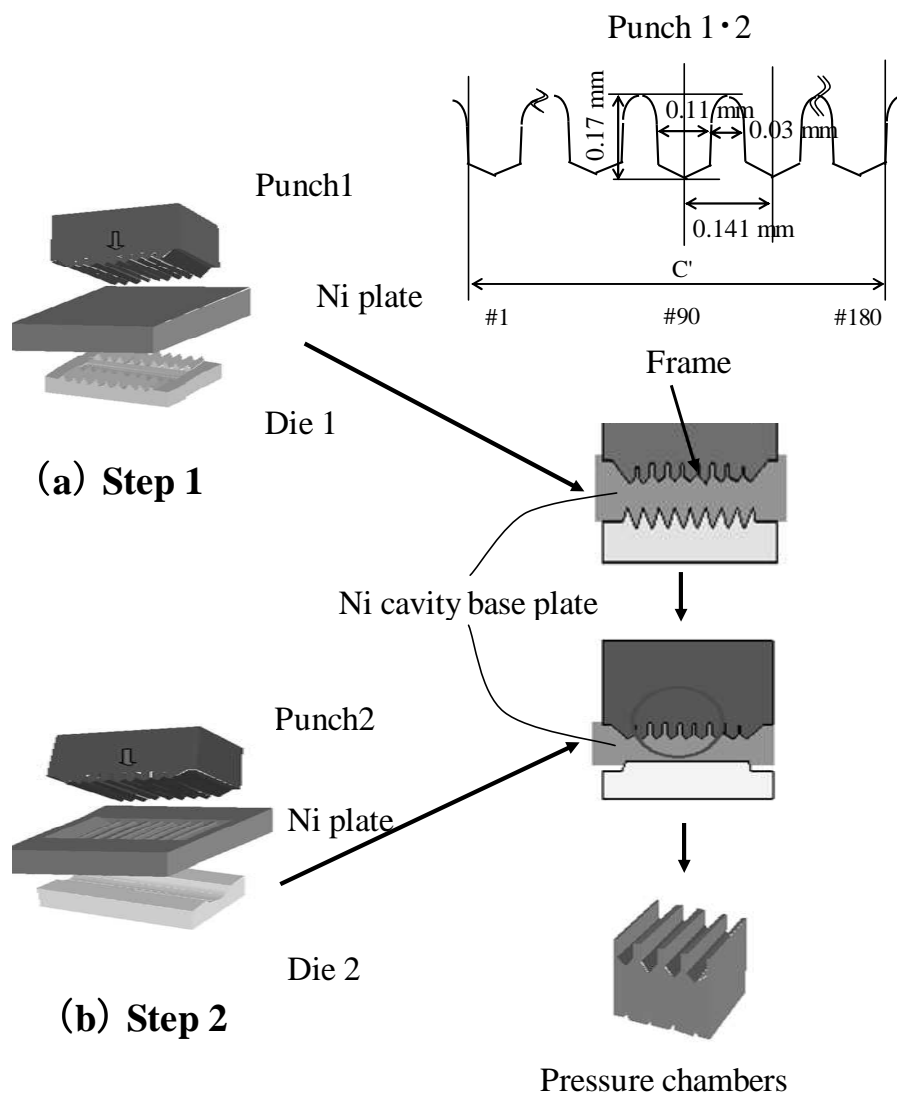


Fig. 5.3 2 manufacturing steps of pressure chambers in precision mold
C': Total length of punch 1 • 2

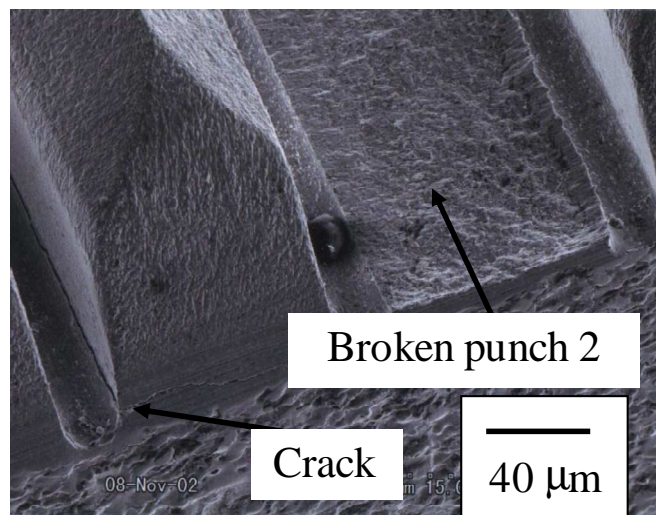


Fig. 5.4 Electron microscopic image of broken punch 2 of WEDM , 550 times of durability.

5.3 実験および検討

5.3.1 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、プレートの形成時に大きな加工力を要し、その加工力がパンチに繰り返し作用することで、パンチの剛性の弱い箇所に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に、パンチ 1 と 2 へ負荷する応力も大きい。そのために、②パンチ 1 の加工時に発生するパンチの弾性変形により、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り、パンチ 1 によりプレートに形成された加工中の圧力室の位置とパンチ 2 の凸形状部の位置がずれること(特にパンチ 2 の両端部)により、パンチ 2 の凸形状の根元部に変形が生じて高い応力が発生する。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。

$$P = l_1 \tau \quad (1)$$

360 個の圧力室の周長が $l_1=1231.2\text{mm}$ 、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 $2.5 \times 10^{-4}\text{Pa}$ の 5 倍と予想して $\tau=1.25 \times 10^{-3}\text{Pa}$ と設定した。その結果式(1)により、360 個の圧力室 (Fig. 5.3(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、圧力室のパンチの一山分の曲げ荷重を、式(2)より求めた。

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

圧力室のパンチ長さ $l_2=0.17\text{mm}$ 、パンチ幅 $h=0.11\text{mm}$ 、窒化粉末ハイスのヤング率 $E=2.17 \times 10^{11}\text{Pa}$ 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 $41\mu\text{m}$ 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、 $\delta=2.2 \times 10^{-4}\text{mm}$ を得た。その結果として式 (2) により、曲げ荷重は 273MPa となった。パンチの一山分の曲げ荷重 273MPa 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。

5.3.2 パンチ両端部に生じる破壊挙動の FEM 解析

圧力室形成パンチの破壊の要因をデータにより検証するために、パンチ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。パンチおよびダイは弾性体材料 (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が中心から外側へ変形させられることを想定した。

5.3.3 圧力室形成用パンチの寿命試験

パンチ 2 の弾性変形量とパンチの寿命との関係を確認するために、パンチ 2 の弾性変形量を小さくなるように設定して、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 $0.1 \mu\text{m}$ の分解能を持つミットヨ製非接触式三次元測定器 QV を使用し、パンチの表面粗さ測定は $0.1 \mu\text{m}$ 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。

5.3.4 パンチの表面状態と寿命試験

パンチの表面粗さとパンチの寿命との関係を確認するために、パンチの表面粗さを数種類の水準に加工した。パンチ加工の方法は、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．これらのパンチについて表面粗さを測定して，パンチ 2 の寿命を確認した (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 と対をなすものとして，その都度交換を行った．

5.4. 結果ならびに考察

5.4.1 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 **Fig. 5.5** に示す．主応力はパンチ凸形状の先端部 (圧縮応力)，側面部 (引張り応力)，根元部 (引張り応力) に発生するが，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．圧縮応力はパンチ 2 が下方向に移動する際に生じて，引張応力はパンチ 2 が上方向に移動する際に生じる．**Fig. 5.5** 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を，**Fig. 5.6** に示す．**Fig. 5.6 (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，パンチの弾性変形量を考慮しシミュレーションを実施した．**Fig. 5.6 (b)** はパンチ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．**Fig. 5.6(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わかる．**Fig. 5.6(b)** から，ニッケル素材は圧力室を形成する過程で，パンチの中央部はニッケル素材の流動が少なく，パンチの中央部から外側の方向に多くのニッケル素材

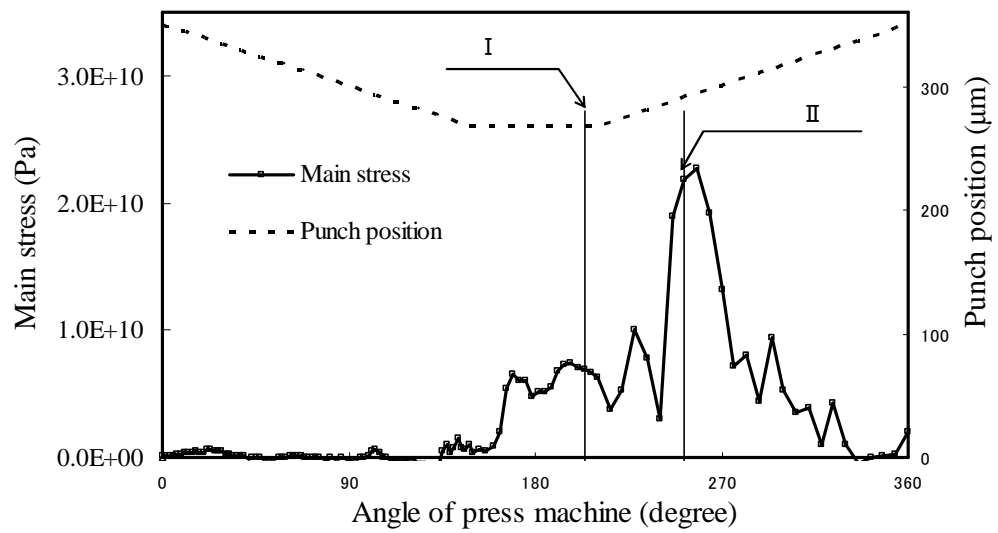
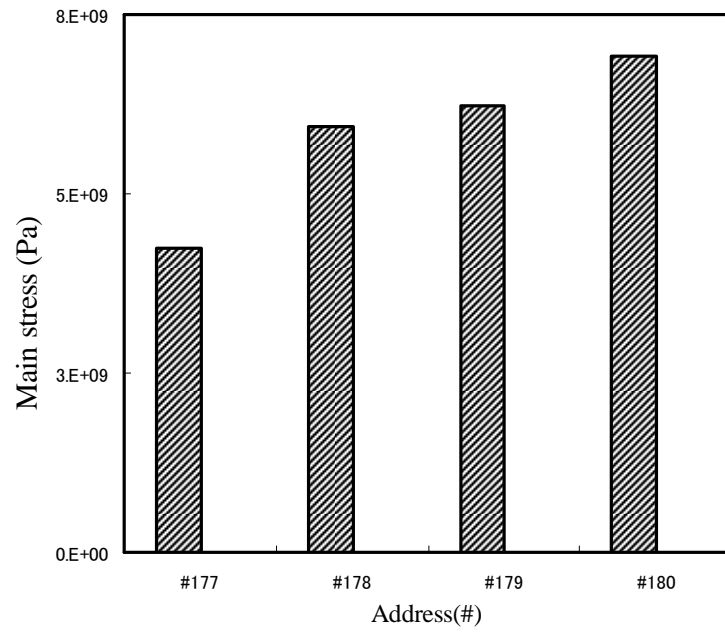


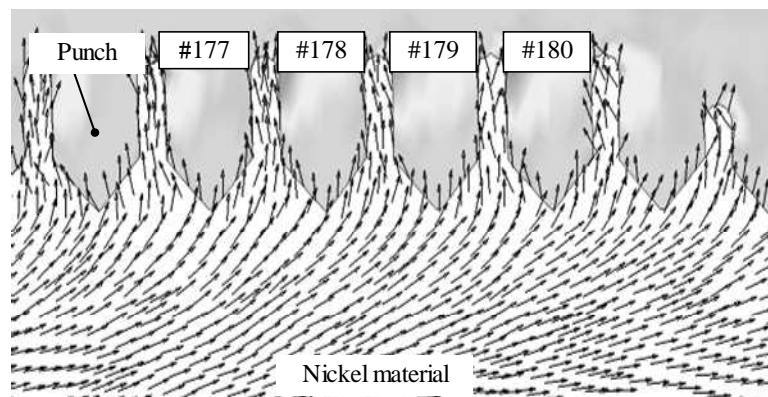
Fig. 5.5 Changing of main stress.

I : Punch places on bottom dead point

II : Punch places on separating punch from nickel material



(a)



(b)

Fig. 5.6 Flow of nickel material in cross sectional view and principal stress of punch 2.

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、パンチに圧縮応力が作用する。②加工が進むにつれ、パンチの弾性変形の影響から凸形状部が横方向に移動して、ニッケル素材がパンチの中心から両端部に流動する (Fig. 5.6 (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応力が負荷する (Fig. 5.6 (a))。④パンチ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応力が作用して、さらに加工時の応力により生じたプレート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、パンチの破壊の原因は、1) 剛性の低いパンチ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破壊に至ることが考えられる。

5.4.2 パンチの弾性変形の低減

Step 1 加工後の圧力室の全長 (Fig. 5.2 (b)の C: Total length of pressure chambers) と Step 2 のパンチ 2 の全長 (Fig. 5.3 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。パンチと圧力室の全長の実測値を Fig. 5.7 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 $22\mu\text{m}$ の差(a-b)があった。この差を小さくしてパンチの弾性変形量を抑えるために、パンチ 1 の全長 (Fig. 3 C') を短くすることにした。補正值は、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 $24\mu\text{m}$ とした。 $24\mu\text{m}$ の補正值を 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、 $-24\mu\text{m}$ 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 $5\mu\text{m}$ で従来の $22\mu\text{m}$ 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 回へと高められることが明ら

かになった. Fig. 5.7 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 $30\mu\text{m}$, パンチ 2 は $41\mu\text{m}$ で $11\mu\text{m}$ の差があった. パンチ 2 には $11\mu\text{m}$ 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.

5.4.3 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間の摩擦抵抗を小さくして, パンチに与える応力を減少するために, パンチの表面粗さを小さくして低摩擦抵抗の DLC 膜を施した. 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 **Fig. 5.8** 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 膜とパンチの素材の中間層である Si が, パンチの素材の窒化粉末ハイスに対して親和性が悪いとため, 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. Fig. 5.8 の E と F のパンチ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の寿命が向上したと考えられる. パンチの表面粗さを小さくすることが可能となった過程は, 以下の通りである. 耐用試験前の E のパンチ先端の表面状態を観察した. 電子顕微鏡写真を **Fig. 5.9(a)** に示す. パンチの先端部に凹凸があり, 厚み方向の 10 点平均表面粗さ (以下 Rz と表示) が $1\mu\text{m Rz}$ 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, 砥石の回転数と送り速度が速いことで研削時に微振動が発生していたと考えられた. 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 $1\mu\text{m Rz}$ から今回の

0.3 μ m Rz となった．この 0.3 μ m Rz のパンチが F である．パンチ先端の表面状態の電子顕微鏡写真を，**Fig. 5.9(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．転写用パンチの破壊の推定，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した．

5.5 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プレートを形成する過程において，精密金型の転写用パンチ 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プレート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．

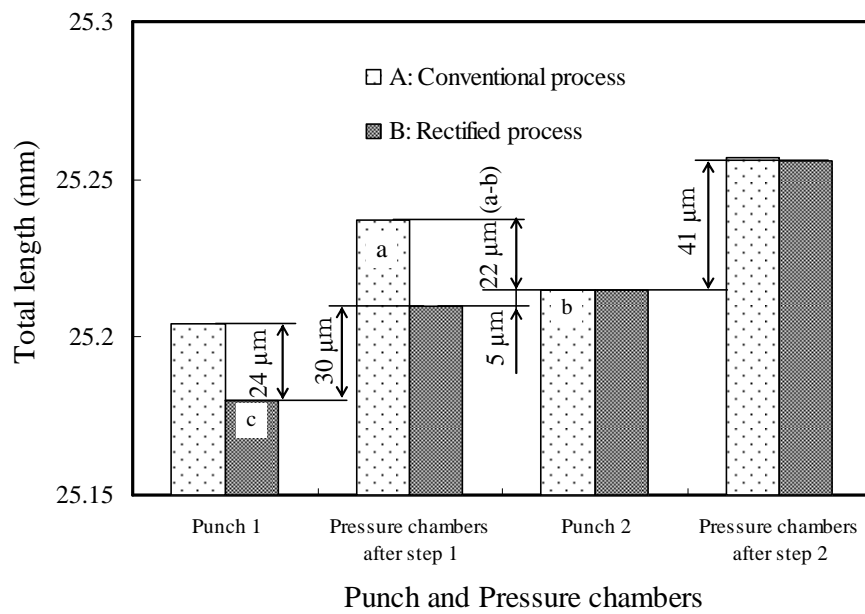


Fig. 5.7 Total length of punch and pressure chambers.

a: Total length of pressure chambers of step 1

b: Total length of punch 2

c: Rectified — 24μm, total length of punch 1

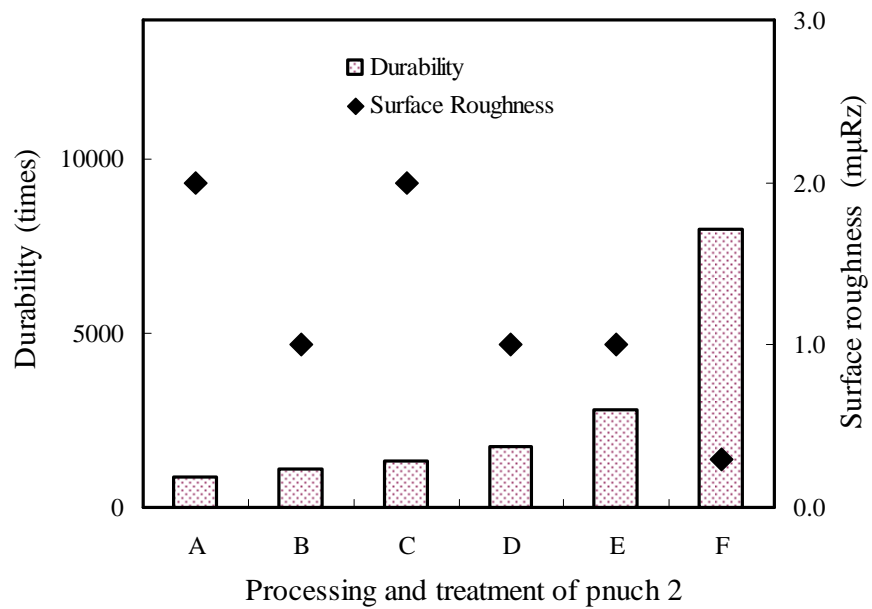


Fig. 5.8 Durability of pressure chamber punch 2.
A: WEDM B: PG C: WEDM+Si+DLC
D: PG+Si+DLC E: PG+Cr+DLC
F: PG+Cr+DLC (Changing of grindstone process method)

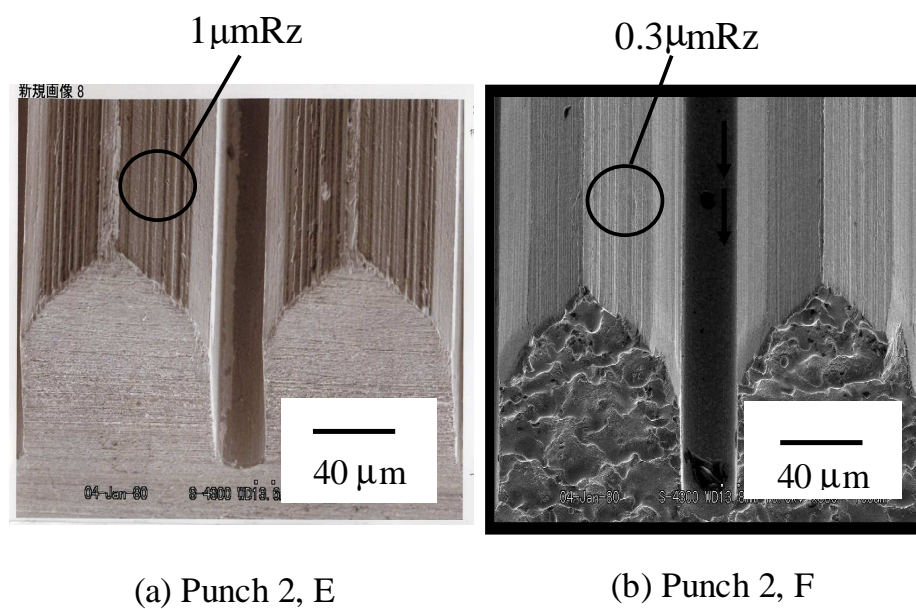


Fig. 5.9 Electron microscopic images,
two surface situations of punch 2 edges.

5.6 参考文献

- 1) 早乙女康典：マイクロ成形加工の現状と展望，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 614-617 (2008).
- 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射出成形の高品質化，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 624-628 (2008).
- 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，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp.643-648 (2008).
- 4) 平井義彦：ナノインプリントリソグラフィの基本と応用，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 664-669 (2008).
- 5) 小林道雄：電鍍金型技術の開発動向，日本塑性加工学会誌，50, 577, pp. 83-86 (2009).
- 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，日本塑性加工学会誌，50, 586, pp. 981-985, (2009).
- 7) 八木隆：サーボプレスを活用した金型技術，日本塑性加工学会誌，47, 546, pp. 564-568 (2006).
- 8) 楊明：金属材料によるマイクロポンプバルブの創成，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 654-658 (2008).
- 9) 村川正夫・野口裕之：FIB によるマイクロ金型・部品のナノ加工，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 629-633 (2008).
- 10) 青木勇・笹田昌弘：マイクロせん断加工，日本塑性加工学会誌，49, 570, pp. 619-623, (2008- 7),
- 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, pp. 22-24 (2007),
- 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, pp. 1226-1270 (2010).
- 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，精密工学会誌，76, 11, pp. 1283 -1287(2010).
- 14) 西城泰嗣，広沢稔明，佐藤陽平，真船久美子，渡部育朋，中島一浩，“DreamLabo 5000 のワンパスフォトリソ技術”，日本画像学会誌，51, pp.45-50(2012)
- 15) 渡邊修，“デジタル印刷機用インクジェットラインヘッド技術”，日本画像学会誌，51, pp.56-61(2012)
- 16) 特許公報：高島永光他，特開 2004-98672，特開 2004-98166.

第 6 章

総括

総括

6.1 序言

本学位論文の課題は、インクジェットプリントヘッドにおいて①印字速度の向上と高画質化を両立させること、②長期間における吐出安定化を確保することであった。高速化、高画質化、長期間吐出安定化の観点から多ノズル化および空気浸入と気泡成長防止のプリントヘッドを実現するために、構造、材料、加工方法の観点から検討を進めて、明らかとなった成果を以下にまとめる。

6.2 本研究より得られた知見

第1章の「緒論」では、変動するインクジェットプリンタ技術において、印字速度の向上と長期間吐出安定化の重要性と必要性について論じた。高速化、高画質、吐出安定化の向上についての課題を解決するために、構造、材料、加工方法をトリガーとしていくつの具体策を挙げて、解決に導く概要をまとめた。

第2章は、「インクジェットプリントヘッドの多ノズル化に向けたニッケルキャビティプレートの開発」について論じた。本章は、ドットサイズのばらつきによる濃度むらの主原因が圧力室の深さとインク滴の重量ばらつきにあることを解明することを目的とした。濃度むらの原因を追究するために、圧力室の深さとインク滴の重量、そして吐出周期の関係を調べた。濃度むらは圧力室の深さのばらつきに相関のあることが明らかになった。

プリント評価の結果として、工法変更後のニッケルキャビティプレート製プリントヘッドにおいて、濃度むらが肉眼で認められない水準にまで抑制することを得た。濃度むらの有無は、工法変更前後のニッケルキャビティプレート製プリントヘッドの比較よりドットサイズの分布の広がりの違いにあると判断した。シリコンキャビティプレート製プリントヘッドと工法変更後のニッケルキャビティプレート製プリントヘッドを比較して、ニッケルキャビティプレート製プリントヘッドはドットの平均サイズが小さくなり、ドットサイズの分布の広がりがほぼ同等である数値を得られた。

剛性差のある2つのプレートを加熱接合する場合において、線膨張係数の数値差の小さい材料を使用することが、剛性の低いプレートの変形を抑えて機能を確保するための方策となる。ニッケルはシリコンと比較してヤング率が高いために、剛性を高めることが見込める。ニッケルキャビティプレートは高可塑性部材の追求とさらなる工

法改良を進めることで、プリントヘッドを大型化するための有効な手段となる。

第 3 章は、「インクジェットプリントヘッドのインクリーク防止のためのニッケルキャビティプレートポリシング加工技術の確立」について論じた。本章は、マイクロプレス工程内のみで低減の解決策がなかったニッケルキャビティプレートの段差を、両面マイクロポリシング加工を用い、低減する方法を明らかにすることを目的とした。低減する方法とは、以下の通りである。①段差を $2\mu\text{m}$ にさせるための要因は研磨量ではなく、研磨布硬度と砥粒供給量が要因であること。②硬材研磨布の使用は段差の低減に効果があること。③段差を $2\mu\text{m}$ 以下にさせるための要因は砥粒供給量にあること。①から③より、要求される段差 $2\mu\text{m}$ 以下を得る方法が明確になり、インク漏れを発生させないニッケルキャビティプレートを作り上げた。

第 4 章は、「インクジェットプリンタの吐出安定化に向けたインク流路における空気浸入と気泡成長の防止」について論じた。本章では、長期間において不連続に印刷を行った際にインクの吐出不良を生じないようにすることが課題であった。この問題を解決するために、新たな樹脂材質と流路構造を開発した。

これらの解決策により、インク流量が長期間にわたって減少せず、気泡成長にかかる期間が長期化することを明らかにした。インクジェットプリンタの信頼性の観点から、インクの吐出不良を誘発する原因となる気泡成長期間を、従来の 23 日から 211 日に延ばすことを見積りから得た。プリンタによる実機評価では、吐出不良の発生を約 30 日から 236 日に延ばすことが可能となった。材質に含まれる鱗片状ガラス材数の増加、サイズの適正化、リブの枚数の増加、アニール工程の追加による効果から、高い目標値である気泡成長期間 365 日（1 年）以上に対応可能な針部材の構造を導き出すことができる。この構造が実現すれば、インク吐出不良に基づく印刷不良がさらに低減され、高いプリンタの信頼性を確保することが可能となる。

第 5 章は、「インクジェットプリントヘッド用ニッケルキャビティプレートの実用化に向けた圧力室形成パンチの寿命向上」について論じた。本章では、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プレートを形成する過程において、精密金型の転写用パンチの寿命が低いことが課題となった。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パンチの根元部に作用する弾性変形を抑え、②研削加工によってパンチの表面を鏡面に仕上げ、DLC による表面処理を施した。①と②の結果として、パンチの寿命が 550 回から 8000 回となり、15 倍の向上が見られた。以上により、ニッケルキャビティプレートの実用化が可能とな

り、プリントの高速化のための一つの手段を確立したことを明らかにした。

6.3 本研究における工学的応用と将来展望

近年、自動車、デジタル家電業界の目覚ましい技術的な進化には、目を見張るものがある。目覚ましい技術的な進化の背景には、日ごとに激しさを増す競争により、企業として最新技術を確保し続けることの難しさと厳しさがあり、その難しさと厳しさの深みについて改めて実感している。インクジェットプリント技術においても同様であり、日々の技術開発から量産までの一貫した過程において、その過程を連続してやり続けることは極めて厳しい。プリンタ市場は、コンシューマー分野からオフィス・ビジネス分野へ、そして産業分野へと急速に変動を遂げている。昨今はこの技術変動を観ながら、その技術変動のスピードを読み、タイミングよく新技術を投入することが真に必要とされている。インクジェット技術において、近い将来の技術変動を表現するキーワードが、高速化、高画質、長期間吐出安定化であると考えられる。

また産業構造がグローバル化する現在、国内外における品質、性能、価値観の違いが顕わとなり、その違いへの対応とこれに連動した価格競争は一層厳しさを増している。現在の市場は消費者からの要求によって個別化・差別化された商品が好まれ、国境を越えて様々なユーザのニーズに対応することが求められている。そうした結果として、多品種少量生産、製造サイクルの短期化がビジネスとして成功させる重要なキーとなっている。一方で、21世紀型ものづくりは、環境に優しく、最小の資源とエネルギー消費で低環境負荷型の技術を実現することが必須となる。

これまでインクジェット印刷技術は、コンシューマー、オフィス・ビジネスから産業分野への拡大を目指して発展してきた。この応用が期待される範囲は極めて広く、新たな事例が生まれてきている。いくつかの事例として、高分子インクや高分散の金属超微粒子と導電性樹脂から成るインクを用いて、三次元樹脂成形、プリント配線基板、アンテナ等の製造まで応用範囲が広まってきている。またピエゾヘッド技術の地道な改良と金属と樹脂から成るインクの安定供給が進み、工業的利用が活発となっている。一つの動きとして、インク滴の体積を現状の1~10plのレベルからさらに微量化する技術が動いている。この動きにより、捺染、パターンニング、コーティング、三次元造形、表面平滑化処理等の既存のいくつかの製造技術に対して、インクジェットプリント技術の活用化が進むことで省力化、合理化へと繋がり、低環境負荷型の技術への展開が拡大している。今後はさらに微量なものを高精度に注入する方法と噴霧する方法の研究が進み、工業用途がますます進展して市場の拡大が予測される。近い将

来，医療分野への拡がりとして，遺伝子の加工，臓器移植時の臓器の加工等に繋がっていくことが期待される．

21世紀型ものづくりは，早く，安く，個性に拘る自分だけのものを創造して作ることが原点となるだろう．この原点は，インクジェットプリントする媒体を紙メディアから他の物へと変化させることが考えられる．その媒体は，食品分野の林檎，ケーキであり，衣料分野の衣類のファッションであり，建築分野の外壁の外装であり，個々のオリジナルな要求への対応が可能となっていく．またプリントの次元が，2次元から3次元に飛躍的に遷移していく．アート，工芸から鋳物に到るまで，3Dプリンタとプロジェクタのコラボレーションにより，空間に理想とする物体を描きながらその空想とする物体を実現化していく．さらには医療分野へと発展して，細胞をプリンタで打ち出して，機械式な人口心臓を細胞式に変換することも可能となる．インクジェットプリント技術によるものづくりには，まだまだいろいろな夢が育まれている．そして，その技術が世界中の多種多様な分野において，困っている人々の助けおよび支援となり，その人々を救って，人々が幸せを得られるような技術に高めていくことが望まれる．きっと，世界の人々はそれを待ち望んでいる．

6.4 参考文献

- ・特許庁，“特許出願技術動向調査報告書インクジェット用インク”，社団法人ビジネス機械・情報システム産業協会，pp37-41(2005)
- ・山口修一・山路達也著，“インクジェットの時代がきた”，光分社新書，pp. 67-187(2012).

本研究に関する業績

1. 発表論文： レフリー制のある学術論文

- (1) 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プリント品質の研究，日本画像学会誌，52, 2, pp. 6-14 (2013).
- (2) 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ポリシング加工技術の研究，精密工学会誌，76, 4, pp448-452 (2010).
- (3) 高島 永光・高本 徹也・齋藤 和行・新井 聖・阿部 隆夫：インクジェットプリンタのインク流路における空気の浸入と気泡の成長防止に冠する研究，日本画像学会誌，52, 1, pp. 3-10 (2013).

2. 特許公報

- (1)微細穴の穿設加工方法およびそれを用いた液体噴射ヘッドの製造方法ならびに液体噴射ヘッドの製造装置，高島永光・紅林昭治，特開 2004-98164(2004.4.2).
- (2)鍛造加工方法および液体噴射ヘッドの製造方法，高島永光・紅林昭治，特開 2004-98165(2004.4.2).
- (3)鍛造加工パンチ，鍛造加工装置，微細鍛造加工方法，液体噴射ヘッドの製造方法およびそれによって得られた液体噴射ヘッド，高島永光・紅林昭治，特開 2004-98166(2004.4.2).
- (4)液体噴射ヘッドおよびその製造方法，高島永光・紅林昭治，特開 2004-98672(2004.4.2).
- (5)液体噴射ヘッドおよびその製造方法，高島永光・紅林昭治，特開 2004-98676(2004.4.2).
- (6)微細穴穿設加工装置，その加工方法およびそれを用いた液体噴射ヘッドの製造方法，赤羽富士男・上杉良治・高島永光，特開 2004-122762(2004.4.22).
- (7)鍛造加工パンチ，同パンチを用いて製造した液体噴射ヘッドおよびその製造方法，赤羽富士男・上杉良治・高島永光，特開 2004-136364(2004.5.13).
- (8)液体噴射ヘッドの製造方法，赤羽富士男・上杉良治・高島永光，特開 2004-136648(2004.5.13).
- (9)液体噴射ヘッドの製造用金型の製造方法およびその素材ブロック，高島永光・上杉良治，特開 2005-23388(2005.1.27).
- (10)液体噴射ヘッドの製造方法および装置，金型ならびにそれによって得られた液体噴射ヘッド，高島永光・上杉良治，特開 2005-41001(2005.2.17).

- (11)微細穴の穿設加工方法およびそれに用いる工具および液体噴射ヘッドの製造方法
ならびに液体噴射ヘッド製造装置，小河秀幸・斉藤功一・高島永光，特開
2006-61964(2006.3.9).
- (12)微細穴の穿設加工方法およびそれに用いる工具および液体噴射ヘッドの製造方法
ならびに液体噴射ヘッド製造装置，小河秀幸・斉藤功一・高島永光，特開
2006-68767(2006.3.16).
- (13)微細凹部の加工方法と液体噴射ヘッドの製造方法ならびに液体噴射ヘッド，
小河秀幸・斉藤功一・高島永光，特開 2006-82233(2006.3.30).
- (14)液体噴射ヘッドの製造装置および製造方法ならびに液体噴射ヘッド，
小河秀幸・斉藤功一・高島永光，特開 2006-88419(2006.4.6).

謝辞

信州大学繊維学部 阿部隆夫教授には、本研究を遂行し論文を纏め上げる期間において、その端緒から終始に到るまで、ご親切で厳しいご指導とご鞭撻を受け賜った。阿部隆夫教授は民間企業のご出身であることから、仕事に対する熱意、厳しさ、スピードについてご指導をいただくと共に、今後さらに考慮すべき人生の行き方について、改めてご教授をいただいた。一般の方が3年間で博士課程を修了する中、著者は修了するまでに約5年間の年月を必要とした。この5年間において、社会人博士課程を取得する厳しい道のりを体験するのと同時に、理論と経営の観点から、自らの潜在能力を高めて発揮する良い機会であったと感じている。ここに深謝と敬意を捧げる次第である。

長野工業高等専門学校 宮寄 敬教授、セイコーエプソン在籍時の酒井真理様には、本研究の諸論文をまとめるにあたり、数々のご教授を賜った。ここに深く感謝の意を表する次第である。

著者の所属するセイコーエプソン（株）でお力添えをいただいた、碓井 稔様、奥村資紀様、島田英輝様、北松康和様、和田高一様、新井 聖様、高本徹也様、米窪周二様、岡沢宣昭様、小池保則様、齋藤和行様、今井和佳様、中田茂樹様、小河秀幸様、等々力秋夫様、一色鉄也様、セイコーエプソンでご活躍された両角正幸様、山口修一様、梶山三男様、紅林昭治様、上杉良治様、酒井真理様そして関係者の皆様には、本研究を遂行するにあたりその都度多大なご協力とご指導をいただいた。ここに、心よりお礼を申し上げる次第である。

最後に、5年間という長期の間、父親という立場でありながら学生であった自分を寛容し、勉学と仕事に集中させてくれた本当に大切な家族に心から感謝の意を捧げる。