

シエアモードピエゾヘッドの駆動効率の向上

Improvement of Drive Energy Efficiency in a Shear Mode Piezo Inkjet Head

竹内 良夫*
Takeuchi, Yoshio

竹内 寛*
Takeuchi, Hiroshi

小松 克明*
Komatsu, Katsuaki

西 眞一*
Nishi, Shinichi

要旨

近年インクジェットプリンタの高速・高画質化が著しいが、より一層の高速化にはエネルギー効率のよい多チャンネルヘッドの開発が必要となる。コンピュータシミュレーションを用いてシエアモードピエゾヘッドの動作と液滴形成過程の解析を行った。その結果を用いてアクチュエータとインクチャンネル、ノズル形状の最適化設計を行い、漏斗型ノズルを採用した試作ヘッドを作成し駆動効率の向上を確認した。

Abstract

The recent acceleration in high print quality and high-speed inkjet printers commands the development of an energy efficient multi-channel print head to accommodate these ever-advancing printers. In response, we have computationally simulated a shear mode inkjet head in order to analyze its fluid flow dynamics and jet forming process. As a result, we have been able to optimize the shape of the actuator, channel, and nozzle of the inkjet head. In particular, a funnel type nozzle has proven to provide good energy efficiency in a prototype print head based on the results of our simulation and analysis.

1 はじめに

インクジェットプリンタの高速化にはヘッドの噴射特性向上は勿論、チャンネル数を増やす必要がある。チャンネル数の増加には加工を含めた構造上の課題以外に、液滴噴射時のヘッド温度上昇による画質や安定性の低下を抑制するため、駆動効率を向上させ液滴噴射に要するエネルギーを少なくすることが重要となる。

この課題を解決するため、シエアモードピエゾヘッドの動作をコンピュータシミュレーションにより解析した。シエアモードピエゾヘッドは圧電材料の分極方向と直交する方向に電界を加えて発生するせん断（シエア）応力により駆動するヘッドである。圧電材料で構成されるアクチュエータの特性は構造と電界の連成が可能な有限要素法シミュレーションソフトで解析し、ヘッド内のインクの運動とノズルからの液滴噴射プロセスは自由液

*コニカミノルタテクノロジーセンター(株) IJT開発センター

面解析が可能な有限差分法シミュレーションソフトを使用した。

シミュレーションによりアクチュエータに加える電気エネルギーとチャンネル内のインクに与えられる弾性エネルギー、液滴の運動エネルギーを求め、各種要因（アクチュエータとチャンネル形状、ノズル形状、圧電材料、接着剤層、インク特性、駆動電圧波形）と駆動効率の関係を解析した。ここでは主にヘッド形状と駆動効率の関係について述べる。

2 ヘッド構造と駆動エネルギー

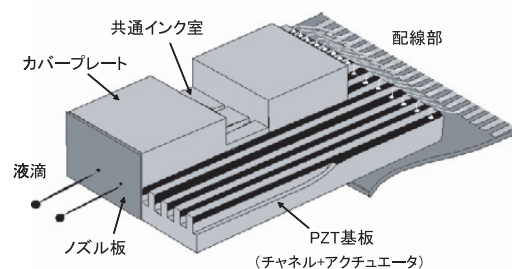


Fig.1 Structure of shear mode piezo inkjet head

Fig. 1 はシエアモードピエゾインクジェットヘッドの構成図である。圧電材料であるPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）基板に機械的に溝を形成することにより、チャンネルとチャンネル壁であるアクチュエータが形成される。その上面にカバープレート、前面にノズルプレートを接着し、チャンネル内にインクが充填される。

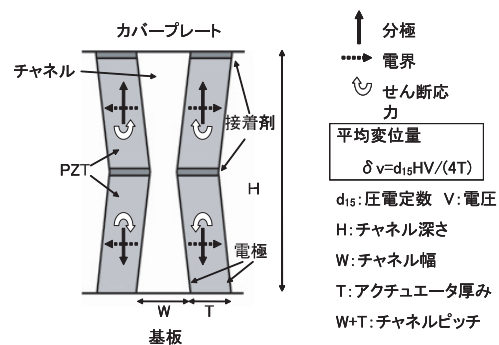


Fig.2 PZT actuator (cross section)

Fig. 2 にアクチュエータのチャンネル流路方向と直角に切断した断面図を示す。PZTの分極方向に直交する方向に

電界を加えることにより屈曲変形を与え、チャンネル内インクを加圧する。チャンネル内に発生した圧力がノズル、インク供給室との各々の境界で反射し、共振することによりノズルに加わる圧力が時間変化し、インク液滴が噴射される。

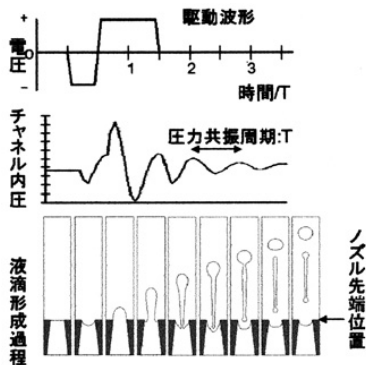


Fig.3 Droplet ejection process

液滴噴射プロセスをシミュレーションした結果をFig. 3に示す。電圧低減のためFig. 3上の駆動波形を用いる。電圧が変化するときチャンネル内に圧力が発生し、その後共振周波数で減衰振動する (Fig. 3中)。最初の電圧立ち上がりはチャンネル容積が大きくなる方向に加えるので負圧が発生する。発生した負圧が半周期後正圧のピークに達したとき、正圧が加算されるタイミングでチャンネル容積が減少する方向、つまり最初の立ち上がりと反対の極性に電圧を加える波形を用いる。このときのチャンネル内圧力の時間変化とノズルからの液滴形成プロセスのシミュレーション結果をFig. 3下に示す¹⁾。

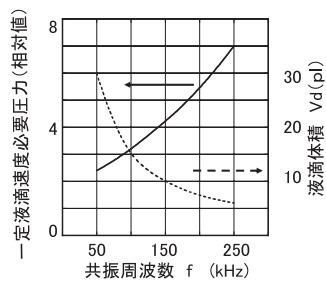


Fig.4 Resonance frequency vs. droplet ejection

高速・高画質化のためにはチャンネル内の圧力共振周波数を上げる必要がある。その理由は次式のように液滴量が共振周波数に反比例するためである²⁾。

$$Vd = \pi r^2 \times v / (2 \times f)$$

Vd: 液滴体積 r: ノズル半径

v: 液滴速度 f: 共振周波数

ノズルに加わる圧力の共振周波数と一定速度の液滴の噴射に必要な圧力の値との関係の計算結果をFig. 4に示す。周波数が高くなると急激に必要な噴射圧力が高くなる、つまり駆動電圧が上昇する。

また高速・高画質化のためにチャンネル数の増加や駆動

周波数を高くすると総発熱量 (駆動回路での発熱を含む) は急激に増加する。

$$Wa = (1/2) \times C \times V^2 \times A \times fd \times N$$

Wa: 総発熱量 C: アクチュエータ静電容量

V: 駆動電圧 fd: 駆動周波数

A: 波形係数 N: チャンネル数

この発熱量の内、アクチュエータを形成する圧電素子の誘電損失や電極の抵抗による発熱がチャンネル内インクに伝わり温度上昇を引き起こす。アクチュエータとインクが近接しているため短時間の駆動でインク温度が上昇し、インク特性値の変化により液滴速度や液滴量の変動が生じ画質の低下を招く。更に温度上昇が著しい場合は安定な噴射が出来なくなる恐れがある。

3 ヘッド形状と駆動効率

3.1 アクチュエータとインクチャンネル

電圧を加えた時のアクチュエータ変位量の計算例をFig. 5左に示す。アクチュエータのコンプライアンス (変位/力) は内圧上昇による押し戻し変位量として計算する (Fig. 5右)。1個のアクチュエータのコンプライアンスとチャンネル内インクのコンプライアンスの比をコンプライアンス比 (kcr) という。コンプライアンス比はチャンネル内圧力上昇時のアクチュエータの変形容積とインクの体積変化量の比を表す。

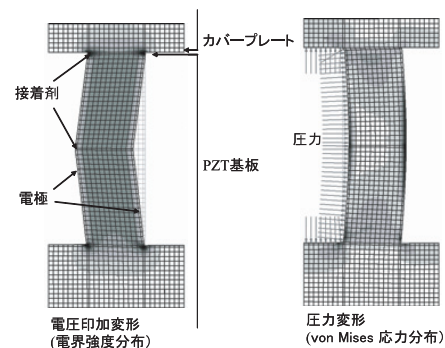


Fig.5 Actuator deformation analysis

電圧印加によるチャンネル内発生圧力Pは以下の式で計算できる。ここでλはチャンネル駆動パターンにより決まる定数である。アクチュエータがチャンネル内圧上昇により押し戻されるため発生圧力は減少する。

$$P = 2 \times (\Delta x / W) \times B \times V / (1 + \lambda \times kcr)$$

Δx: 単位電圧印加によるアクチュエータ平均変位

V: 駆動電圧

W: チャンネル幅

B: インクの体積弾性率

コンプライアンス比の値によりチャンネル内を伝播する圧力波の速度も変化する。これはチャンネル内圧によるインクの体積変化がアクチュエータの変形により実効的に大きくなる、つまりインクの体積弾性率が見かけ上小さ

くなるためである。このため形状変更が共振周波数にも影響を与えるので注意が必要である。

圧力波の伝播速度

$$C_0 = (B/\rho)^{1/2} / (1 + \lambda \times kcr)^{1/2}$$

ρ : インクの密度

圧力波の共振周波数

$$f = C_0(1 + a) / 4L$$

a : 形状補正係数

L : チャネル長さ

発生圧力はアクチュエータの変位量に比例するので単位印加電圧当りの変位量を大きくする必要がある。変位量とインクに与える弾性エネルギーの関係は次式で与えられる。

$$E = (1/2) \times B \times (x/W)^2 \times L \times H \times W$$

E : インクに与えられる弾性エネルギー

x : アクチュエータの平均変位量

L : チャネル長さ W : チャネル幅

H : チャネル深さ

またチャネル内発生圧力 P とエネルギーの関係は次の式で表される。

$$E = (1/2) \times P^2 \times L \times H \times W / B$$

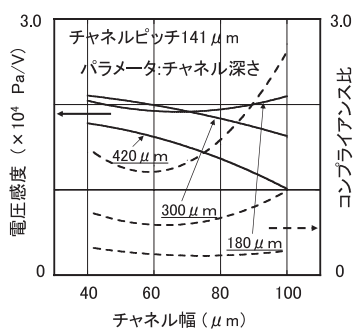


Fig.6 Voltage sensitivity vs. channel width

チャネル間ピッチ (チャネル幅+アクチュエータ厚み) 一定でチャネル幅を変えたとき電圧感度とコンプライアンス比がどのように変化するかを計算した例をFig.6に示す。チャネルが浅い場合、チャネル幅が大きくなってもコンプライアンス比 (破線) があまり大きくならないため電圧感度 (実線) は低下しない。チャネルが深くなるとコンプライアンス比が急激に大きくなり、特にチャネ

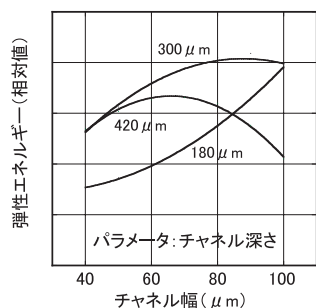


Fig.7 Ink elastic energy vs. channel width

ル幅が広がると電圧感度が低下する。Fig.7にチャネル深さをパラメータとしたチャネル幅と弾性エネルギーの関係を示す。チャネルが浅くなると電圧感度が高くてもチャネル断面積が小さくなるので弾性エネルギーは低下する。

ヘッド特性の目標仕様に対し、入力電気エネルギーからインク弾性エネルギーへの変換効率が良くなるようにアクチュエータとチャネルの形状を設計する必要があるが、アクチュエータの静電容量が形状により変化することに注意する必要がある。静電容量はチャネル長や深さに比例し、アクチュエータの厚みに反比例する。また、圧電材料の特性 (圧電定数、比誘電率、弾性定数)、インクの特性 (体積弾性率) や接着剤層により最適断面形状が変化する¹⁾。チャネルの共振周波数は断面形状の影響も受けるが、チャネル長に略反比例して変化する。チャネル長さに対し、共振周波数がどのように変化するかをFig.8に示す。

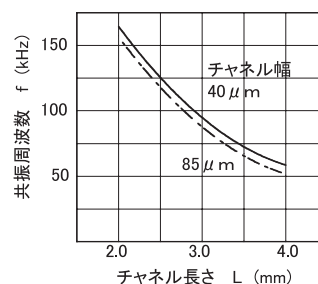


Fig.8 Channel length vs. resonance frequency

3.2 ノズル

ノズル径を小さくすれば液滴量も少なくなるが、ノズル内での粘性抵抗が非常に大きくなりエネルギー損失が大きくなる。Fig.9にインク粘度をパラメータにしたノズル径と液滴速度の関係を示す。インク粘度が高い場合、ノズル径が小さくなると速度低下が著しい。粘度の効果がチャネルとノズルの断面積比による流速向上の効果より大きいためである。

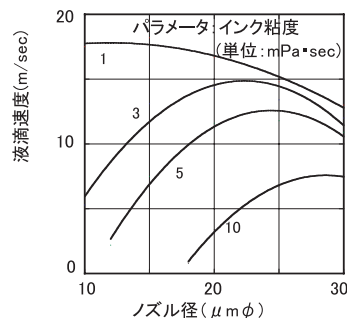


Fig.9 Nozzle diameter vs. droplet velocity

特に高粘度インクの場合ノズルの抵抗を減少させると液滴速度の増加が大きい。Fig.10にノズルのテーパ角度を変えた場合の液滴速度の変化を示す。ノズル径が小さいときにテーパ角度の影響が大きい。ノズル抵抗を減少さ

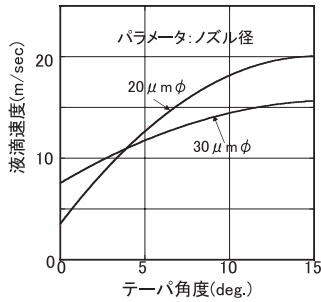


Fig.10 Taper angle vs. droplet velocity

せるにはノズル長さを短くすることも効果があるが、ノズル板の強度が低下し、コンプライアンス増加によるチャンネル内圧力の低下や飛翔方向の不安定性が増える。また、テーパ角度も飛翔方向精度の点で大きくすることが出来ない。その他ノズルの抵抗は液滴噴射後のインク補給特性や圧力波の減衰にも大きな影響を与えるので設計時に注意が必要である¹⁾。

ノズル断面拡大写真(下側:インク射出口)

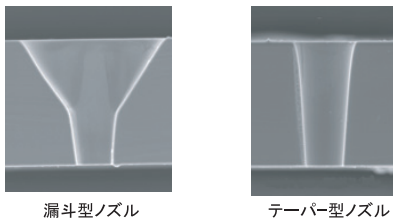


Fig.11 SEM photograph of nozzle cross section

エネルギー損失を小さくし且つ飛翔方向を安定化するためにはFig.11左に示す漏斗型ノズル形状が良い特性を示す。Fig.12はテーパ型ノズルと漏斗型ノズルでノズル径を変えたときの液滴速度を計算した例である。従来の角度の小さなテーパ型ノズルに比べて大幅な液滴速度の増加が期待できる。

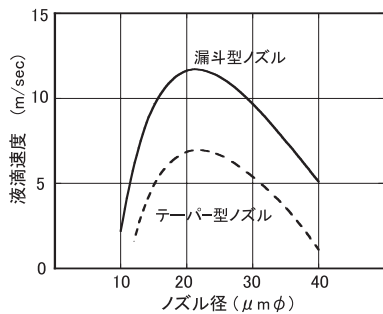


Fig.12 Nozzle shape vs. droplet velocity

4 試作ヘッドの特性

検討結果を用いてアクチュエータやチャンネルの形状を、高駆動効率を目標にしてシミュレーション設計し、ノズル形状を従来のテーパ型から漏斗型に変更したヘッドを作成した。試作ヘッドの仕様をTable 1に示す。ヘッドの駆動は、アクチュエータが隣接チャンネルと共用のた

め3チャンネル毎に噴射させ、3サイクルで全チャンネルの駆動が完了する所謂3サクル方式を用いた。またインクは比較的高粘度である油性インクを使用した。このヘッドにおける液滴一滴噴射に必要な駆動エネルギーは0.45μJであった。

Table 1 Specifications of prototype head

ノズル	漏斗型	使用インク
液滴量	15pl	粘度 10mPa・sec
駆動周波数	13kHz	表面張力 28mN/m
チャンネル数	512ch.	密度 0.89g/cm ³
チャンネル密度	180dpi	

5 考察

シエアモードピエゾヘッドの駆動エネルギーはアクチュエータを駆動する電気エネルギーとして与えられ、駆動回路で大部分のエネルギーが消費され、残りの一部がアクチュエータの変位によりチャンネル内インクに弾性エネルギーとして変換される。この弾性エネルギーは圧力波となってチャンネル内を伝播し、定在波を形成する。そして、ノズル内インクを加圧し液滴を形成し噴射させる。

インク液滴を形成するに必要なエネルギーは液滴表面を形成するに必要なエネルギーと液滴の運動エネルギーであるが、その他にノズル内でのインクの運動によりかなりの割合を消費する。また、液滴噴射後もインクの残留振動が収まるまでエネルギーは消費される。

試作ヘッドの駆動エネルギーを概算すると、電気入力エネルギー0.45μJに対し、チャンネル内インクの弾性エネルギーは6nJと2桁近く小さく、液滴表面形成エネルギーは0.08nJ、液滴運動エネルギーは0.22nJ程度である。

コンピュータシミュレーション解析を用いアクチュエータとチャンネル、ノズル形状の最適化を行った結果、従来に比べ駆動効率を2倍以上向上させることができた。

6 まとめ

シエアモードピエゾヘッドの高効率駆動化を、シミュレーションにより検討した結果、チャンネル形状やノズル形状の最適化を行い駆動効率の良いヘッドを試作することが出来た。今後、配線部等の静電容量を減少させることにより更に効率を数倍高くすることが可能である。

シエアモードピエゾヘッドはマルチチャンネル化が比較的容易であり、また高効率駆動が可能なことより³⁾、将来の高速・高画質プリンタ用のヘッドとして有望である。

●参考文献

- 1) 竹内良夫、Konica Tech.Rep.,Vol 15, 31 (2002)
- 2) 岩石晃、宮木明彦、川村匠、加藤雅之、三上知久、Japan Hardcopy 2000 論文集 (2000)
- 3) Alfred Zollner, Peter Moestl, SPIE 2949, 434 (1997)