

シェアーモードインクジェットヘッドの設計

Design of Shear Mode Piezoelectric Ink Jet Head

竹内 良夫*

Takeuchi, Yoshio

Design studies on the shear mode piezoelectric ink jet were made using a computational fluid dynamics model. A print head for high-speed and photo-like image was designed by optimizing head geometry, ink properties and drive waveform. The head had capability to eject 7 pl volume droplets at 40kHz repetition cycle.

1 はじめに

最近のインクジェットプリントヘッドの技術動向として、高周波数駆動、チャンネル数増による高速化、微小ドットと低濃度インク使用や着弾精度の向上などによる高画質化、駆動効率向上による低電圧化、またメンテナンスフリーを目指した高信頼化などが挙げられる。

シェアーモードタイプの圧電素子を用いたインクジェットヘッドは低電力駆動が可能なため¹⁾多チャンネル化が容易という特徴を持ち、また各種特性のインクが使用可能なため多様な用途への適用が期待されている。

ヘッド構造は微細（数十～数百μm）であり、チャネル内での圧力や流速の時間変化が非常に高速（数μsec）であるため特性を実測することが難しい。このためヘッド特性の解析や設計には解析モデルによるシミュレーションを用いることが不可欠である。従来からよく使われている集中定数モデルによる一次元でのシミュレーション²⁾³⁾⁴⁾に加え、CFD（Computational Fluid Dynamics）を用いることにより、複雑な構造や高精度の設計が可能となった。

我々はこれまで水系インクを用いた高速高画質用ヘッド、油系インクを用いたワイドフォーマットプリンタ用ヘッド、また捺染プリンタ用ヘッド等、多種類のヘッドを設計、開発、実用化してきたが、ここではインク噴射動作を、CFDを用いた解析結果で示し、高速高画質用ヘッドを例として、基本設計についての考え方を概説する。

2 インク噴射動作の解析

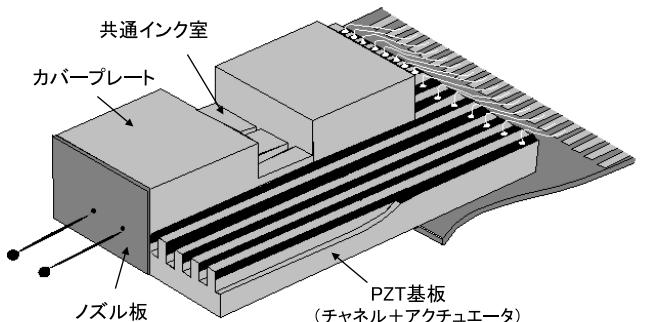


Fig. 1 ヘッド全体構成図

* IJT 事業推進センター 第2開発グループ

Fig. 1 はシェアーモードタイプ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基板に機械的に溝を形成することにより、チャネルとチャ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、チャネル内にインクが充填される。

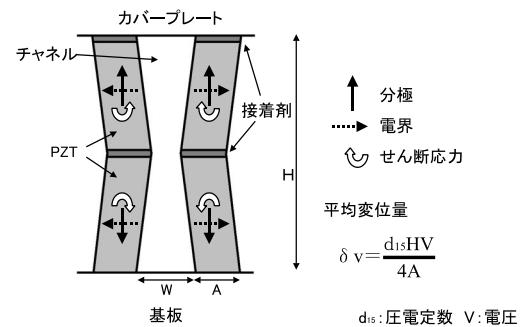


Fig. 2 アクチュエータ動作

アクチュエータ両面に形成された駆動電極に電圧を印加することにより、せん断応力が発生し、インクチャネルの容積が収縮する方向に変形し(Fig. 2)、チャネルの内圧が上がり、ノズルよりインクが液滴として噴射される。発生圧力と伝播速度は次式で表される。⁶⁾

発生圧力

$$P = \frac{d_{15}HV}{2AW(1/B + (1/S)(dS/dP))}$$

B: インク体積弾性率

S: チャネル断面積

圧力波の伝播速度

$$C_0 = \frac{1}{\sqrt{(1/B + (1/S)(dS/dP))\rho}}$$

ρ: インク密度

Fig. 3 はCFDにより噴射動作をシミュレートした結果である。駆動電極にステップ状の電圧を加えることによりチャネル内で発生した圧力は略一定の周期で振動を繰り返しながら減衰していく。この振動はチャネル内で発生した圧力波がノズルと共に共通インク室との各々の境界で反射し共振することにより生じる。⁵⁾ 共通インク室と

の境界は開放端であり、ノズルとの境界は閉端に近い反射特性を示すことが圧力分布よりわかる。また、この振動は主に粘性抵抗により減衰する。

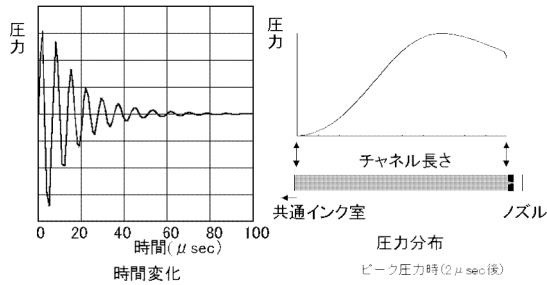


Fig. 3 発生圧力

ノズルに加わる圧力の時間変化により、最初インクがノズルから押し出され、次の減圧によりくびれが生じ成長し、切断され液滴が噴射される。ノズル内の減少したインクはノズル毛管力により共通インク室から補給され、その後次の噴射が可能となる。(Fig. 4)

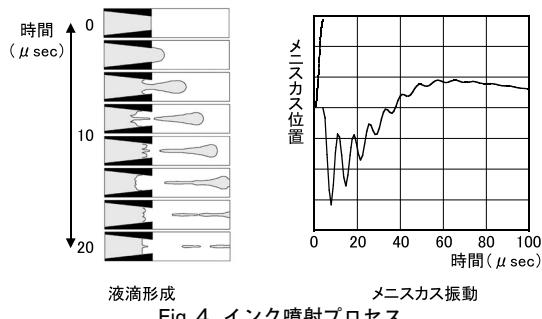


Fig. 4 インク噴射プロセス

3 高速高画質用ヘッドの設計

インクジェットヘッドに要求される仕様は用途により様々であるが、水系インクを用いた高速高画質用ヘッドを例として取り上げ設計の考え方について説明する。

3.1 共振周波数の向上

高画質画像を形成するには、最小液滴量は数 pl 程度まで減少させる必要がある。

液滴量は次式で表されるので、液滴量を少なくするにはノズル径を小さくする、液滴速度を下げる、あるいは共振周波数を上げるという方法が考えられる。⁷⁾

$$\text{液体体積} \quad Vd = \frac{r^2 v}{4f}$$

r: ノズル半径

v: メンスカス速度

f: 共振周波数

しかし、ノズル径を小さくするとインクの目詰まりの可能性が大きくなることやチャネル内に気泡が入った時の

排出が困難となるため信頼性が低下する。CFD による気泡排出性解析の結果、ノズル径とチャネル断面形状を信頼性に問題のない値に決めた。(Fig. 5)

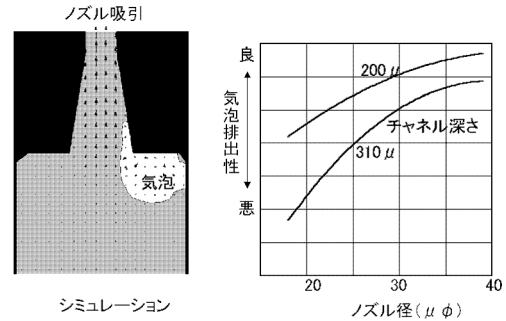


Fig. 5 ヘッド形状と気泡排出性

Fig. 6 に示すようにノズルに微小な不良があると、飛翔方向が偏向するが、液滴速度を上げると影響が少なくなる。また、速度変化による着弾位置ずれも速度が速くなると少なくなる。したがって、液滴速度を下げて、液滴を小さくすることは出来ない。

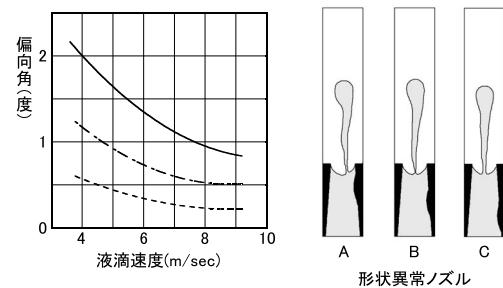


Fig. 6 飛翔方向シミュレーション

これらの結果より、画質向上のため液滴を小さくするためには、共振周波数を上げることが必須となる。

ヘッドの共振周波数はインクの特性値、チャネルの容積やコンプライアンス、ノズルの粘性抵抗等により変化する。これはチャネルが共振器を構成しているためであり、圧力波の伝播速度と両端の反射特性により共振周波数が決まる。Fig. 7 に一例としてチャネルの長さを変えたときの共振周波数の変化を示す。共振周波数が高くなるとノズルに加わる圧力の持続時間が短くなり液滴を一定速度で噴射するために必要な圧力が高くなる。

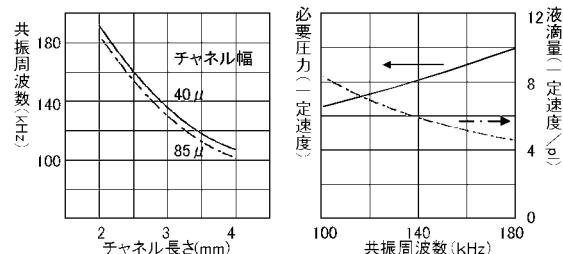
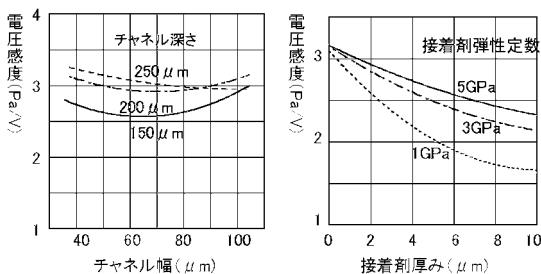


Fig. 7 共振周波数

3.2 電圧感度の向上

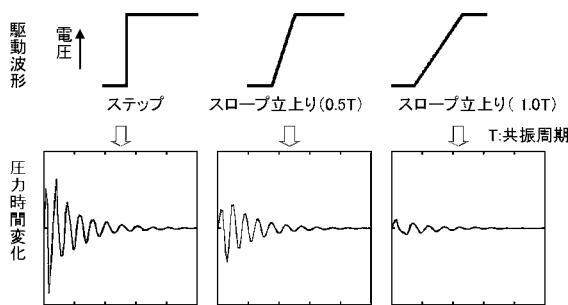
チャネル内に高い圧力を発生させるためには駆動電圧を上げる必要があり、回路への負担が大きくなる。またPZTの耐電界強度問題や駆動時の発熱による噴射特性への影響が心配される。このためアクチュエータの高感度化設計が必要となる。

アクチュエータへの電圧印加によりせん断応力が発生し、生じた変位によりインクが圧縮され圧力が発生するが、逆にこの圧力によりチャネルが変形し、発生圧力が低下する。この動作を構造解析ソフト(Nastran)を用いて解析し、構造や材料特性と電圧感度の関係を求めた。電圧感度はPZTの材料特性に大きく依存するが、アクチュエータやチャネルの形状、また接着剤層の厚みやカバーブレートの硬さも影響を与えることがわかり、材料選択や構造の最適化を行った。(Fig. 8)



3.3 駆動波形

駆動波形については様々な観点から検討されてきたが、⁸⁾ここでは高感度化を図るため、圧力波の共振を利用した駆動波形について述べる。アクチュエータに加える電圧波形の立ち上り特性により、チャネル内に発生する圧力はFig. 9のようになる。傾斜波形よりもステップ波形の方が大きな圧力を発生する。このため基本となる波形は矩形を用いた。また高速駆動のために立ち上りが早い方が有利である。



共振を利用した駆動波形をFig. 10に示す。最初チャネル容積が増加する(負圧発生)方向にアクチュエータに

電圧を加える。次に圧力波の振動周期の1/2の時間遅れでチャネル容積が減少する(正圧発生)方向に電圧を加える。最初の負圧は1/2周期後に正圧となり、次の正圧と加算され大きな圧力となる。したがって、印加電圧に対し大きな圧力が発生、つまり電圧感度が向上する。また、ノズル内のインクメニスカスを一旦引き込んでから噴射することになり、液滴量が減少し、ノズル径に対しより小さな液滴の噴射が可能となる効果もある。⁹⁾

液滴噴射後、圧力波は減衰しながら振動を繰り返すが、噴射周波数を高くしていくと次の液滴噴射開始時までに残留振動が収まらない状態で噴射を行うことになる。この場合次の液滴の速度と液滴量が変化し画質の劣化を招く。インク粘度が高いと減衰が早くなるが、水系インクの場合一般に粘度は2-4 cpと低い。このため噴射用駆動波形の後に、圧力波の残留振動をキャンセルする波形を追加する。Fig. 10にこの駆動波形を示す。噴射用駆動波形から丁度1周期遅れた逆電圧波形がキャンセル用の波形である。電圧極性が反対で1周期遅れの波形により残留圧力波は完全にキャンセルされる。キャンセル用波形の電圧値は圧力波の1周期での減衰率を噴射波形電圧に乘じた値に設定する必要がある。

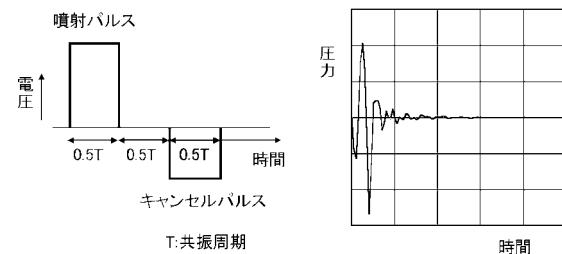


Fig. 10はこの波形で駆動した時のチャネル内圧力の時間変化をCFDでシミュレーションした結果であり、残留振動は略キャンセルされている。

3.4 インク補給振動の最適化

圧力波をキャンセルしても噴射後のメニスカス振動は残る。この振動は噴射で失ったインクの補給運動に伴うものである。インクの補給はノズルの毛管力により共通インク室からインクを引き戻すことにより行われる。

集中定数モデルでは流路のイナータンス(L 慣性)、レジスタンス(R 粘性抵抗)とキャパシタンス(C 復帰力の逆数)を定数とする微分方程式を解くことにより補給特性を求めることが出来る。

$$L \frac{dQ}{dt} + RQ + \frac{1}{C} \int Q dt = P$$

$$L = \rho \int (1/S) dl$$

$$R = \mu \int F(l) (1/S)^2 dl$$

$$C = \frac{\pi r^4}{8\sigma}$$

Q : インク流量 S : 流路断面積

F : 形状係数 r : ノズル半径

ρ : インク密度 μ : インク粘度

σ : インク表面張力

しかし、メニスカスの変位量が大きくなると線形ではなくなるためモデルが複雑となる。¹⁰⁾ これに対し、CFDでは複雑な3次元構造の流路でもシミュレーションが可能となる。¹¹⁾

CFDでのインク補給特性計算結果をFig.11に示す。流路形状やインクの特性値で補給の様子は大きく変化する。一般に粘性抵抗が大きくなるとインクの補給時間が長くなり、小さくなると補給は早くなるがノズルからインクが押し出された状態が出現する。この押し出し量が多いときに次の噴射を開始すると噴射方向が不安定となり、更に著しくなると噴射できなくなる。

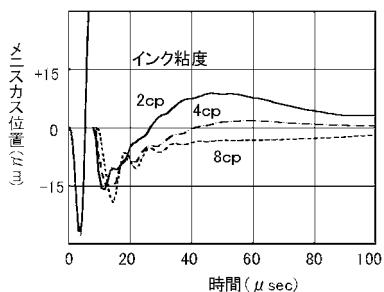


Fig.11 インク補給特性

安定な高周波数噴射を可能とするには、イナータンスを出来るだけ小さくし、イナータンスやキャパシタンスに応じた最適のレジスタンスを設定することが必要となる。

4まとめ

CFDを用いたシミュレーションにより、ヘッド形状、インク特性値と駆動波形を最適化した結果、7 plの液滴を単チャネルあたり40kHzで連続噴射可能な高速高画質プリンタ用ヘッドを開発することが出来た。(Fig. 12)

また、噴射特性の解析や設計の他、飛翔方向の安定化やヘッド内気泡の排出シミュレーション、共通インク室の形状設計、更にメディア内へのインクの浸透拡散特性の解析にもCFDを用いることにより高画質、高信頼性を達成することが出来た。(本解析にはFlow Science社のFlow-3Dを使用した。)

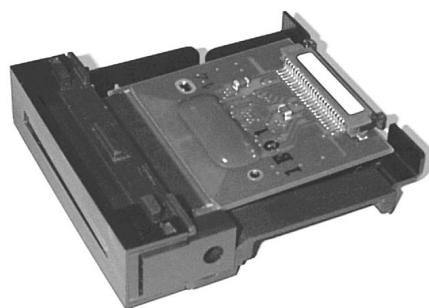


Fig.12 高速高画質ヘッド

●参考文献

- 1) Alfred Zollner, Peter Moestl : "Improving the performance of a shear-type printhead", SPIE Vol.2949
- 2) E.L.Kyser, L.F.Collins, N.Herbert : "Design of an impulse ink jet", J. of Applied Photographic Eng., 7,3, p73(1981)
- 3) 笠原正、木村凱昭、中村昌弘：“圧力制御式インクジェットプリンター”、画像電子学会誌、第10巻、第3号（1981）
- 4) 金山義雄：“オンデマンド型カラーインクジェットプリンタ”、信学研究会、IE83-64、p61 (1983)
- 5) A.D.Paton : "An acoustic wave model of drop-on-demand firing strategie", SPIE、Color Hard Copy and Graphic Arts II, p123-p132 (1993)
- 6) Francis C. Lee : "Pressure-wave generation in impulse ink-jet head using elongated fluid-filled piezoelectric transducer", SID 87 DIGEST p186-p188(1987)
- 7) 岩石晃、宮木明彦、川村匠、加藤雅之、三上知久：“粒量可変インクジェットヘッドの設計技術”、Japan Hardcopy 2000
- 8) 酒井真理：“ピエゾ方式インクジェットヘッドのインク滴微小化技術”、日本画像学会誌 第40巻 第一号 p48-p55 (2001)
- 9) 村上清貴、木村凱昭：日本国特許公報 H03-30507
- 10) 東野楠：“インクジェットヘッドの動特性シミュレーション”、Japan Hardcopy '99 Fall Meeting
- 11) Narayan V. Deshpande : "Significance of inertance and resistance in fluidics of thermal ink-jet transducer", Recent Progress in Ink Jet Technologies II, p98-p102