D209 非構造格子を用いたマイクロポンプ内流れの有限要素解析

Finite Element Analysis of Flow in Micro Pump using Unstructured Grid

○正 松本純一(産総研) 正 高田尚樹(産総研) 正 松本壮平(産総研)
正 市川直樹(産総研) Sven Heisig(産総研) 三原孝士(オリンパス・未来創研)

Junichi Matsumoto, Natl Inst Adv Ind Sci & Technol (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba
Naoki Takada, Natl Inst Adv Ind Sci & Technol (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba
Sohei Matsumoto, Natl Inst Adv Ind Sci & Technol (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba
Naoki Ichikawa, Natl Inst Adv Ind Sci & Technol (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba
Sven Heisig, Natl Inst Adv Ind Sci & Technol (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba
Takashi Mihara, Olympus Corp., Shinjuku Monolith 2-3-1 Nishi-Shinjuku, Shinjuku

As for the fluid problems of MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) such as micro-inkjets and micro-pumps, there are many cases of incompressible and compressible flow problems. In this paper, orthogonal basis bubble function finite element method is proposed for compressible viscous flow. As for the numerical examples, analyses of flow in a micro-pump are investigated with respect to the numerical accuracy and stability of orthogonal basis bubble function element stabilization method. By applying our scheme to compressible flow problems in micro-pumps under some collaboration with experimental researchers, it is confirmed that our method is very powerful in the micro scale simulations.

Key Words : MEMS, Micro-pump, Compressible Viscous Flow, Finite Element Method, Orthogonal Basis Bubble Function Element

1. は じ め に

本研究は、マイクロ流体デバイスにおける機械的な駆動部を全く持たない気体ポンプ(メカレスポンプ)の設計・開発のための流体解析を行っている。三角形、四面体の非構造格子で分割可能な直交基底気泡関数要素⁽¹⁾による安定化有限要素法^{(2),(3)}(直交基底気泡関数有限要素法⁽⁴⁾)を圧縮性粘性流れに適用し、マイクロポンプ内の実際形状での流れ解析を実行した。3次元実際形状での解析では、流路幅のスケール比約100倍、温度差約1000度といった条件での解析を行い、2次元モデルを用いたノズル部の解析にて流体ダイオードの効率とマイクロポンプ内の流れの性質について検討を行った。

2. 直交基底気泡関数有限要素法を用いた数値解析

本研究では、マイクロポンプ内の実際形状での流れ解析を行うにあたり、計算の効率・精度が良く、かつ数値安定性に優れた直交基底気泡関数有限要素法⁽¹⁾を圧縮性粘性流体の方程式に適用した⁽⁴⁾。気泡関数要素(Bubble function element)は三角形、四面体要素の非構造格子に適用が可能であり、Fig.1に示すように、三角形、四面体の頂点と重心点に自由度をもつ要素である。直交基底気泡関数有限要素法を適用した有限要素方程式に対して、

Fig. 1 Bubble function element

時間方向の計算を安定に行うために時間方向の2次精度を考慮した陰的解法⁽⁵⁾を採用した。

3. 3次元マイクロポンプ内の流れ解析

気体用メカレスポンプの3次元モデル数値シミュレーションを行う。このデバイスは、ポンプの役割をはたす駆動力として温度変化を気体に与え、その密度変化(膨張・収縮)を用いる。気体の温度変化を与えるチャンバーには一方向に流れやすくするノズルが取り付けられており、正味の流量として一方向へ気体を送り出すことができることが想定されている。ポンプ内の数値シミュレーションを行なうにあたり、装置の仕組みからして密度変化(膨

張)の考慮は重要な要因であるので、圧縮性粘性流体の数値解析が不可欠となる。Fig.2~4に流速(粒子)と圧力コンタの計算結果を示す。この計算は、チャンバの上部(各計算結果の中央の円筒部分)に、境界条件として20度から1000度といった非常の大きな温度差を不連続なステップ関数の波形分布で与えている。温度波形として20℃~500℃のステップ関数(Case1), 20℃~1000℃のステップ関数(Case2), 20℃~500℃のサイン関数(Case3)の3ケースの非定常計算を30 μ (3×10^{-5})秒まで行なった。直交基底気泡関数有限要素法を用いた数値解法では、

Fig. 2 The computational result of Case1

境界条件として20度から1000度といった非常の大きな温度差を不連続なステップ関数の波形分布で与えている問題に対しても安定に計算が実行できている。

4. 2次元気体ポンプ内流れ解析による流体ダイオード効率の検討と流れ現象の把握

流体ダイオード効率と流れ現象の把握を目的として、Fig.5に示すノズル形状について良好な流体ダイオード効率を得られるかについて検討を行った。流体ダイオード効率の評価にあたり、圧力差 Δp の与え方および流体ダイオード効率の算出はFig.5の計算式に従っている。雰囲気温度 $T=300\text{K}$ 、気体は窒素を仮定した。Fig.6に圧力差0.001MPa(Case1), 0.02MPa(Case2), 0.04MPa(Case3),

Fig. 3 The computational result of Case2

Fig. 4 The computational result of Case3

0.05MPa(Case4) とした場合の時間における質量流量 (Mass flow) の変化と流体ダイオード効率の計算結果を, Fig.7~Fig.10 に Case1~Case4 の流速ベクトルを示す. Case1 では, 順方向 (Forward flow), 逆方向 (Backward

Fig. 5 Computational model

flow) 共にノズル内中央部での直線的な流れになっている. Case2 では, 順方向では蛇行した流れ, 逆方向では偏って湾曲・蛇行する流れになっている. Case3 では, 順方向では蛇行した流れ, 逆方向ではノズル最小幅の部分から噴き出した流れが乱れ小さくではあるが質量流量が上下動する流れになっている. Case4 では, 順方向では蛇行した流れ, 逆方向ではノズル最小幅の部分から噴き出した流れが大きく乱れた質量流量が大きく上下動する流れ (逆方向の質量流量が順方向の質量流量よりも一時的に大きくなる場合が生じるような流れ) になっている.

0.001MPa~0.055MPa の差力圧において, さらに詳細な計算を行った時の圧力差と流体ダイオード効率が Fig.11 である. Fig.11 の計算結果では, 「中央部での直線的な流れ」から「偏って湾曲・蛇行する流れ」に遷移する差力圧は 0.002~0.003MPa の間であり, 「偏って湾曲・蛇行する流れ」から「ノズル最小幅の部分から噴き出した流れが乱れ小さくではあるが質量流量が上下動する流れ」に遷移する差力圧は 0.032~0.033MPa の間であり, 「ノズル最小幅の部分から噴き出した流れが乱れ小さくではあるが質量流量が上下動する流れ」から「ノズル最小幅の部分から噴き出した流れが大きく乱れた質量流量が大きく上下動する流れ」に遷移する差力圧は 0.041~0.042MPa の間であった. この計算結果により, Fig.5 のノズル形状について, 適切な圧力差の設定により良好な流体ダイオード効率を得ることができ, 圧力差が 0.002MPa より大きく 0.042MPa 未満とした場合に高い流体ダイオード効率を達成できることがわかった.

Fig. 6 The efficiency of the fluidic diode

Fig. 7 The velocity vectors of case1 ($\Delta p=0.001\text{MPa}$)

5. お わ り に

本研究では, 圧縮性粘性流れによる直交基底気泡関数有限要素法を用いて, 実際モデルにおける 2 次元, 3 次元のマイクロポンプ内流れ解析を行った. 3 次元実際形状での解析では, 流路幅のスケール比約 100 倍, 温度差約 1000 度といった条件での解析を行い, 2 次元モデルを用いたノズル部の解析にて流体ダイオードの効率の検討と流れ現象の把握を行った.

Fig. 8 The velocity vectors of case2 ($\Delta p=0.02\text{MPa}$)

Fig. 10 The velocity vectors of case4 ($\Delta p=0.05\text{MPa}$)

Fig. 9 The velocity vectors of case3 ($\Delta p=0.04\text{MPa}$)

文 献

- (1) Matsumoto, J. : A relationship between stabilized FEM and bubble function element stabilization method with orthogonal basis for incompressible flows, *Journal of Applied Mechanics JSCE*, Vol.8, pp.233-242, 2005.
- (2) Hauke, G., and Hughes, T.J.R. : A comparative study of different sets of variables for solving compressible and incompressible flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, Vol.153, pp.1-44, 1998.

Fig. 11 Δp and the efficiency of the fluidic diode

- (3) Tezduyar, T.E., and Senga, M. : Stabilization and shock-capturing parameters in SUPG formulation of compressible flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, Vol.195, pp.1621-1632, 2006.
- (4) Matsumoto, J., et al. : Compressible viscous flow analysis for MEMS using orthogonal basis bubble function finite element method, *The 3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07-EPMESC XI)*, pp.356 (Proceedings in CD-ROM), 2007.
- (5) Simo, J.C., and Armero, F. : Unconditional stability and long-term behavior of transient algorithms for the incompressible Navier-Stokes and Euler Equations, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, Vol.111, pp.111-154, 1994.