

「マイクロ流体デバイス開発のための流体-構造連成共振現象逆解析」

独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 松本純一

1. 研究概要

マイクロ流体デバイスは医療・情報産業への応用が期待されています。本研究は流体-構造連成問題の共振現象に着目し、共振をうまく利用して小さな変位のアクチュエータ源で固体（構造物）を動かし、流体を大きく動かすことを可能にする共振制御解析を行い、大規模並列3次元解析にてその有効性を検証するものです。本研究は、近い将来のマイクロ流体デバイスの高機能化、小型化に資する数値解析技術を開発することを目的としております。

2. 研究実施内容

近年、微細加工技術の進歩により数 μm ～数 mm サイズのマイクロマシンの開発が盛んに行われ、その関連技術の発展は急速に進んでいる。マイクロ流体デバイス内部の流体（液体）挙動は、通常スケールの流体挙動とは異なり、微小スケールの影響で粘性力が極端に卓越した独特な流れ現象となっている。粘性力の卓越した流れ場では、流れが遅く流体の挙動が緩やかであるため一般的に流体の運動効率は高くない。そこで、高効率かつ高性能なマイクロ流体デバイスを開発するための一つの考えとして、アクチュエータ（構造）部の小さな力を、いかに大きなエネルギーに変換して流体に作用させるかが重要なポイントとなる。その作用手段として、流体のもつ固有の振動数（流れの周期）と構造物のもつ固有の振動数（振動の周期）とが互いに干渉し合っって大きな振動を起こす同期現象である、流体-構造連成の共振現象の利用が考えられる。本さきがけ研究では、コンピュータを用いた3次元実モデルの数値シミュレーションにより、共振をうまく利用して小さな力のアクチュエータ源で構造物を駆動させ、流体を大きく動かすことを可能にする共振制御解析手法の開発を目的としている。

大きな共振振動の発生には、単に構造物の振動量を大きくするだけでは効果は見られないため、流体と構造物の持つ固有の振動数（固有値）を近い値となるようにコントロールしなければならない。共振振動などに代表される流体-構造連成問題特有の固有値に関する現象は非常に複雑であり、この現象をコンピュータ上に再現し、その計算結果を用いて逆解析を行う解析技術は難易度も高く、未解決の分野である。本研究ではこの複雑な固有値を制御することに着目し、共振制御解析を行い、大規模並列3次元解析にてその有効性を検証する。

流体-構造連成共振現象逆解析は、図1に示すように、通常の流体-構造連成解析に比べて計算アルゴリズムが複雑になり、数十倍～数百倍の記憶容量・計算速度を必要とする。上記の事柄が、現在のところ、流体-構造連成問題の3次元逆解析がほとんど行われていない原因の一つとなっている（図2参照）。流体-構造連成共振現象逆解析を実現させるためには、多くの記憶容量と膨大な計算時間を必要とする超大規模解析が不可欠であり、32～64プロセッサ規模のPCクラスタの使用を前提とし、図3の研究計画に則って本

プロジェクトを遂行している。

本プロジェクトでは、32～64プロセッサを使用した中規模クラスのPCクラスタ(さきがけ研究予算で購入)にて、流体-構造強連成解析、固有値解析では数千万～一億自由度、逆解析は数百自由度の計算を可能とする数値解析技術を開発することを目的としている。これまでの研究で、高精度を保ちながら計算速度の高速化、少メモリ化を実現できる直交基底気泡関数要素数値解析方法(流体解析手法)を開発し、この解法を軸として、64プロセッサを使用したPCクラスタで、流体-構造強連成問題では数千万自由度、固有値解析では一億自由度の計算を可能とするプログラム開発に成功した(図4、5参照)。

開始年度(平成14年)から昨年度までの期間で、国内特許出願を行った流体解析手法の新規的な解法(直交基底気泡関数要素安定化法)を軸とし、1)三次元流体-構造連成並列解析、2)三次元構造固有値並列解析、3)形状同定並列解析のプログラム開発を行なって来た(図4)。今年度は、最終年度であり、これまでに開発してきた1)～3)のプログラムを統合し、共振制御流体-構造連成並列逆解析シンセシス技術の構築を試み、本プロジェクトの取り纏め成果とする予定である(図5～8)。

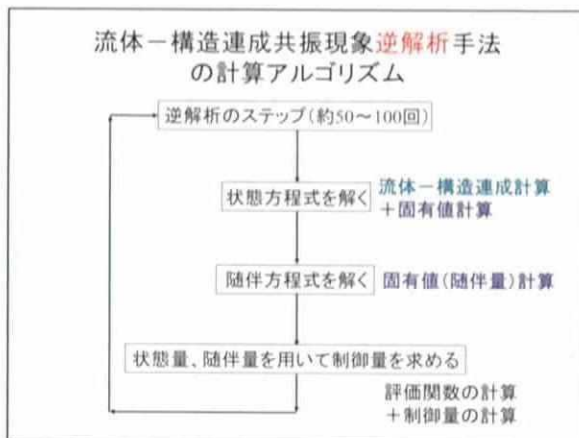


図1 計算アルゴリズム

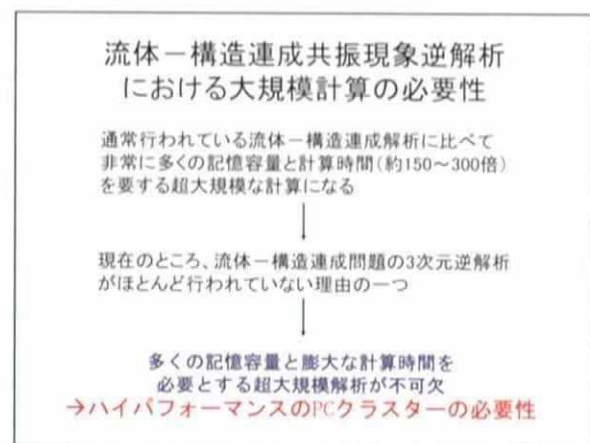


図2 大規模計算の必要性

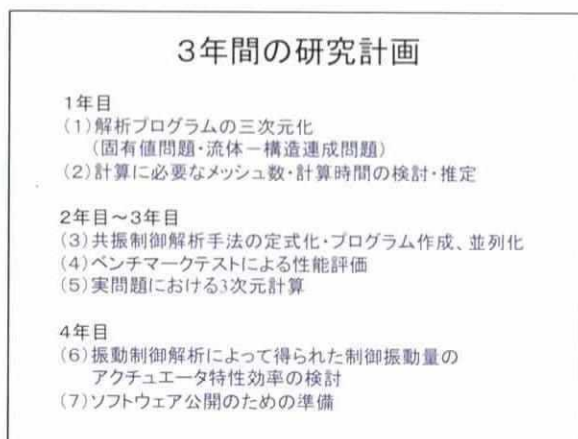


図3 3年間の研究計画

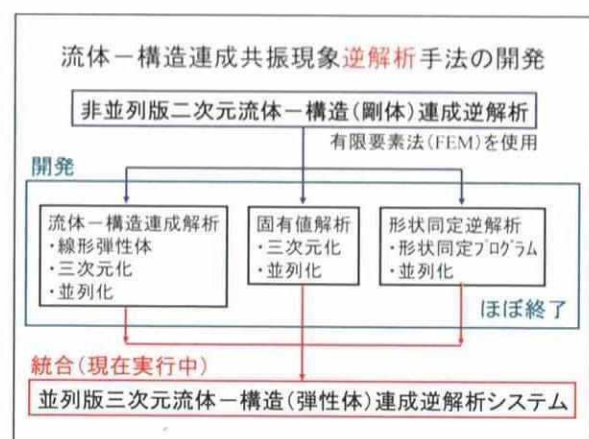


図4 共振現象逆解析手法の開発

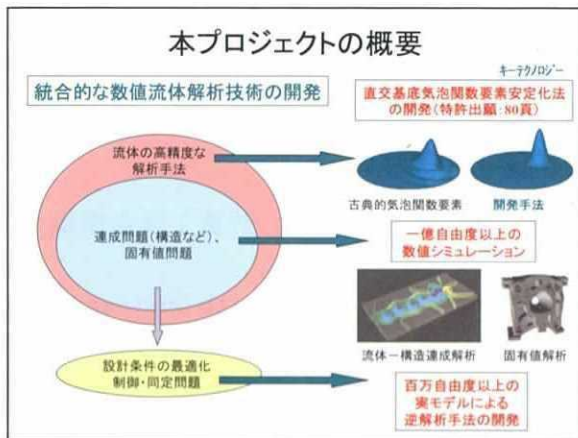


図5 本プロジェクトの概要と研究成果

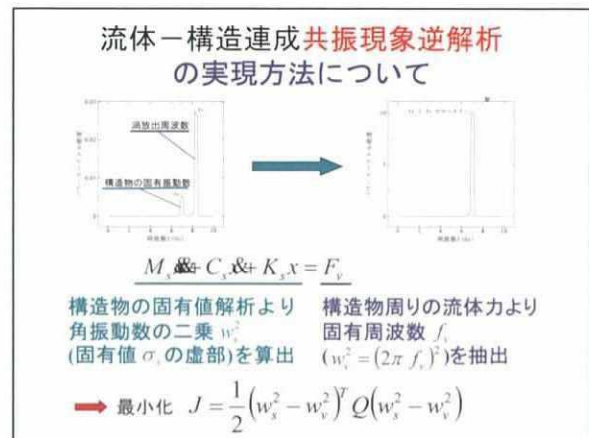


図6 実現方法について

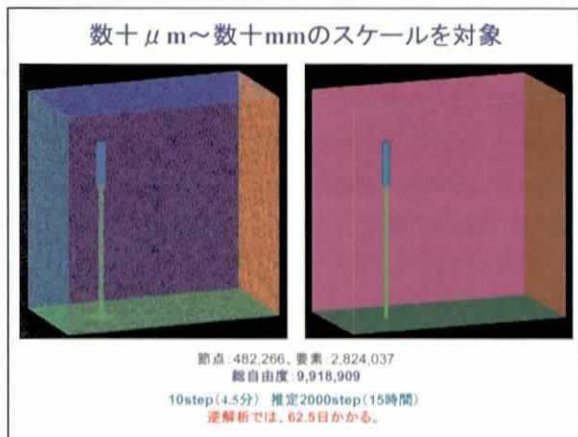


図7 計算モデルの検討

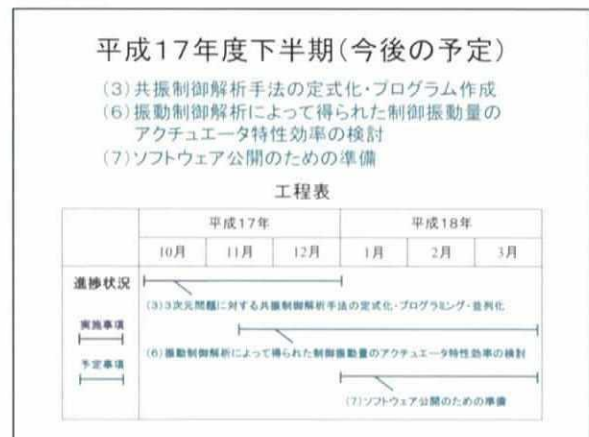


図8 平成17年度下半期計画

3. 主な研究成果

(1)特許出願

- [1] 松本純一: 直交基底気泡関数要素数値解析方法、直交基底気泡関数要素数値解析プログラムおよび直交基底気泡関数要素数値解析装置, 特願2004-343213 (51頁)。
- [2] 松本純一: 直交基底気泡関数要素数値解析方法、直交基底気泡関数要素数値解析プログラムおよび直交基底気泡関数要素数値解析装置, 特願2005-71239 (国内優先再出願: 80頁)。
- [3] 松本純一: 直交基底気泡関数要素数値解析方法、直交基底気泡関数要素数値解析プログラムおよび直交基底気泡関数要素数値解析装置, PCT出願 (2005年11月25日までに
出願予定)。

(2)論文発表

- [4] 松本純一: 安定化気泡関数有限要素法を用いた非圧縮粘性流れにおける形状同定解析, 応用力学論文集, 6, pp. 267-274, 2003.
- [5] 松本純一: 気泡関数を用いた非圧縮粘性流れ解析のための2レベル-3レベル有限要素法, 応用力学論文集, 7, pp. 339-346, 2004.

- [6] 松本純一: Krylov部分空間反復法を用いたArnoldi法による有限要素並列固有値解析, 日本応用数理学会論文誌, 15(2), pp.145-158, 2005.
- [7] J. Matsumoto: A Relationship between Stabilized FEM and Bubble Function Element Stabilization Method with Orthogonal Basis for Incompressible Flows, *Journal of Applied Mechanics, JSCE*, 8, pp.233-242, 2005.
- (3) 口頭発表
- [8] 松本純一: 気泡関数要素安定化法による熱流体-構造強連成解析, 計算工学会講演会, 9, pp.451-452, 2004.5.
- [9] J. Matsumoto: Shape Identification for Navier-Stokes Equations with Unsteady Flow Using Bubble Function Element Stabilization Method, *the Sixth World Congress on Computational Mechanics (WCCM VI) in conjunction with the Second Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics*, Proceedings in CD-ROM, 2004.9.
- [10] 松本純一: 直交基底気泡関数有限要素法による流体-構造強連成問題の形状同定, 数値流体力学シンポジウム, 19 (2005年12月15日に発表予定) .