九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

高性能演算サーバーによる並列流体構造連成解析

石原, 大輔
九州工業大学情報工学部

https://doi.org/10.15017/1467666

出版情報：九州大学情報基盤センター広報 : 全国共同利用版. 6 (2), pp.43-46, 2006-09. 九州大学情報基盤センター
バージョン：
権利関係：

高性能演算サーバーによる並列流体構造連成解析

石原　大輔 (九州工業大学情報工学部)

1. はじめに

流体構造境界面における連成条件を用いて, 連成系全体に関する方程式(連成方程式)を構成し解析する手法である一体型解法は，流体と構造の相互依存性が強い場合でも頑健に解析できることが期待できる[1,2]．しかしながら流体と構造の物性値の大きな違いやシェル要素を用いた場合に構造部分行列の条件数の悪化により，連成方程式の係数行列が悪条件となるため，反復法ソルバの利用に困難が生じる[3]．そこで連成方程式の係数行列を良条件に改善する工夫が必要となり，連成方程式に対する前処理手法や定式化の工夫による方法が提案されている．

著者らは現在，流体構造連成の有限要素解析に基づく昆虫はばたき飛行の解明[4]に取り組んでいる．本問題では翼が大変形・大移動するため，流体と構造の相互依存性がかなり強いと考えられ，また本質的に現象の 3 次元性が重要となる．従って，連成解法として一体型解法が適していると考えられ，かつ大規模計算が要求される．従って，高性能な計算機の確保が研究の成否に関わってくる．

今回, 九州大学情報基盤センターの高性能演算サーバーIMB eServer p5 を利用する機会を頂いた．そこで高性能演算サーバー上で，筆者らが開発した連成解析コードを上述の問題に適用し，PC クラスタ上で実行した場合との性能比較を行う．

2. 整合圧力ポアソン方程式に基づく一体型解法

本報告で用いる連成解法について簡単に述べる．詳細は文献(5)，(6)に譲る．有限要素離散化された ALE 表記の非圧縮性粘性流体方程式と構造方程式を流体構造境界面での連成条件により結合し，連成方程式を得る．本報告では構造をシェルとしている．通常の一体型解法ではこの(線形化された)連成方程式を直接解くが，流体と構造の物性値の大きな違いやシェル構造部分行列の条件数の悪化により，その係数行列が悪条件のものとなる．著者らは連成方程式と原理的に同じ解を与えるという意味で整合した圧力ポアソン方程式(Pressure Poisson Equation：PPE)を導出して解くことで係数行列の悪条件の問題を回避する解法を提案している．以下の解析ではこの整合 PPE に基づく解法を用いる．今回の解析では構造の解析規模が流体の解析規模に比べ，かなり小さいため，図 1 に示す領域分割を行い，CG 法により整合 PPE の求解を行った．

3. 流体中ではばたく弾性翼の並列解析

3.1 計算の諸設定

図 2，3 に問題設定を示す．本問題は流体構造連成に基づく翼の自動的な回転を考慮したハエ目のはばたき飛行の 2 次元モデル[4]を 3 次元に拡張したものである．詳細は省くが図 2，3 におけるはばたき運動の角速度の時刻歴，翼の寸法諸元，流体物性値を文献(7)と一致させている．但し，

実際のハエ目の昆虫においては翼の付け根部分のみ前縁方向の軸に関する回転剛性が低い[8]が，解析を容易にするため，図 3 に示すように，前縁付近の要素の曲げ剛性をかなり小さくすることで，それを簡易的に表現している．その曲げ剛性の低い部分の下部が剛体的に回転運動する翼面を表現するため，この部分の翼弦長さを文献(7)の翼弦長さの平均と一致させる．計算環境は高性能演算サーバーと PC クラスタ(CPU Pentium4 3.0GHz, メモリ 1GByte の PC8 台を 1000BaseT のネットワークで接続)を用いる．通信には MPI を用いる．PC クラスタの C コンパイラには icc1.2.7 を用いる．また最適化オプションは全て O3 とした．領域分割数は 8 とする．用いるメッシュは流体側：節点数 272205・要素数 1574496，構造側：節点数 240・要素数 210 である．図 4 にメッシュの流体部分を Metis[9]で 8 領域に分割した様子を示す．

3.2　結果と検討

揚力時刻歴，0.75cycle での翼前縁付近の流線をそれぞれ図 5，6 に示す．図 5 に見られる各半ストロークでの 2 つの揚力ピークの発生は，文献(7)等が示す特徴と定性的に一致する．また 2 次元解析による揚力[4]と比較すると各半ストローク中盤の揚力が 3 次元的にはばたく方がよく発生している．これは軸流による前縁渦の安定化[10]を示すものと考えられる．図 6 に見られる翼前縁付近でのらせん状の軸流の発生とそれが翼基部から長手方向に向かって 7 割付近の位置で崩壊することは，文献(10)等が示す特徴と定性的に一致する．解析の第 1 ステップ目において，整合 PPE の求解に要する時間は，高性能演算サーバーでは 755sec，PC クラスタでは 869sec であった．従って，今回の計算の範囲では両者の間に大きな差異は生じなかった．

4.　おわりに

ここでユーザーとしての要望を述べてみたい．高性能演算サーバーは複数の計算ノードを有するので，現行の制限を超えた多数の CPU 数で並列計算コードを実行できる枠があればよいのではないかと考えている．最後に高性能演算サーバーを利用する機会を頂き，謝意を表します．

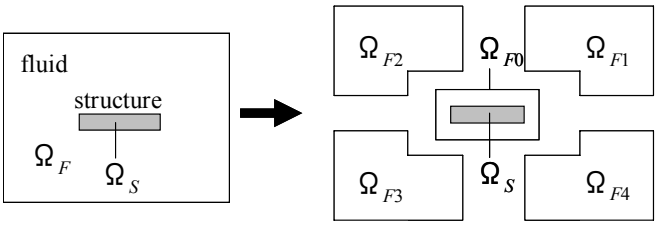

Fig. 1　Schematics of mesh decomposition.

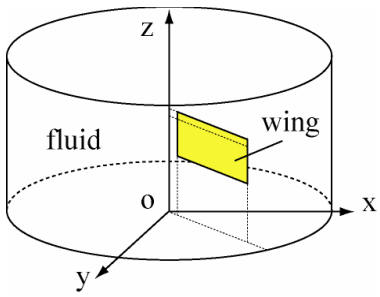

Fig. 2　Elastic flapping wing.

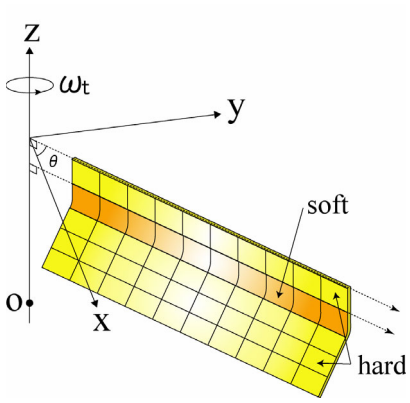

Fig. 3　The model for the insect flight, which can express the automatic wing rotation due to fluid-structure interaction.

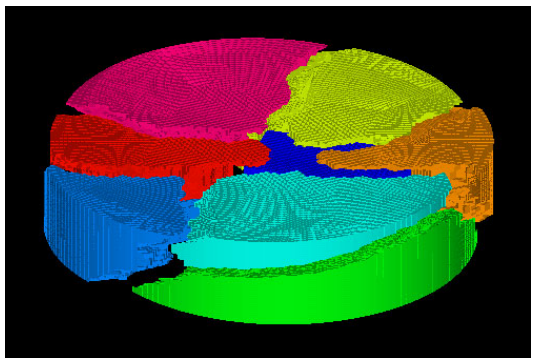

Fig. 4　Mesh decomposition in the case of N=8.

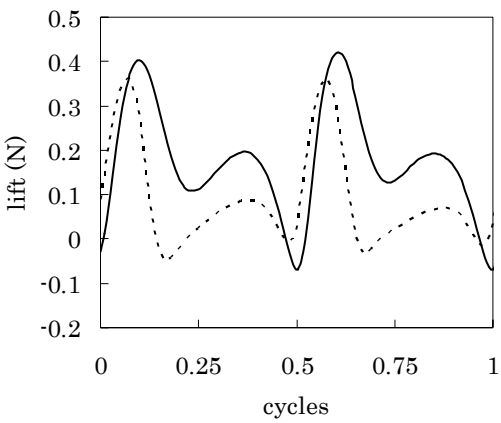

Fig .5　Time histories of lift.　Line indicates the lift given by the present three dimensional analysis and dot line indicates that given by the two dimensional analysis in our previous paper [4].

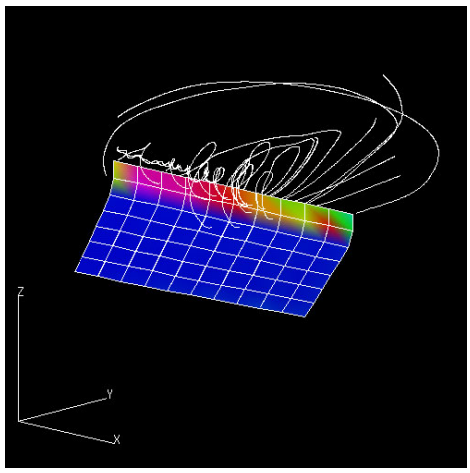

Fig .6　Stream line around the leading edge at 0.75 cycle.

参考文献

(1) Zang, Q. and Hisada, T., Investigations of the Coupling Methods for FSI Analysis by FEM,

Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, *Series A*, Vol. 67, No. 662 (2001), pp. 1555-1562.

(2) Zang, Q. and Hisada, T., Analysis of Fluid-structure Interaction Problems with Structural Buckling and Large Domain Changes by ALE Finite Element Method, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 190, (2001), pp. 6341-6357.

(3) Washio, T. et al., A Robust Preconditioner for Fluid-structure Interaction Problems, *Comput.Methods Appl.Mech.Engrg.*, Vol. 194, (2005), pp. 4027-4047.

(4) Ishihara, D. and Horie, T., Fluid-Structure Interaction Modeling of Insect Flight (1st Report, Investigation of Automatic Wing Rotation and Lift Force Generation by Two-Dimensional Numerical Analysis), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series B*, Vol. 72, No. 718 (2006), pp. 1410-1417.

(5) Ishihara, D. and Yoshimura, S, A Monolithic Approach for Interaction of Incompressible Viscous Fluid and an Elastic Body Based on Fluid Pressure Poisson Equation, *Int. Numer. Methods Eng.*, Vol. 64, (2005), pp. 167-203.

(6) Ishihara, D., Kanei, S. and Horie, T., Development of Monolithic Method for Shell-fluid Interaction Based on Consistent Pressure Poisson Equation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 72, No. 716 (2006), pp. 377-384.

(7) Ennos, A.R., A comparative study of the flight mechanism of diptera, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 127, (1987), pp. 355-372.

(8) Dickinson, M.H., Lehmann F.O. and Sane S.P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, Science, Vol. 284, (1999), pp. 1954-1960.

(9) http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/views/metis/

(10) Ellington, C.P. et al., Leading-edge vortices in insect flight, *Nature*, Vol. 384, (1996), pp. 626-630.