流体構造連成問題の分離反復型解法における安定性と効率*

吉村 忍^{*1}, 岡本 真史^{*2}, 山田 知典^{*3}Stability and Efficiency of an Iterative Partitioned Coupling
Algorithm for Fluid-Structure Interaction ProblemsShinobu YOSHIMURA, Masafumi OKAMOTO and Tomonori YAMADA^{*4}^{**} School of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

An iterative partitioned coupling algorithm for fluid-structure interaction problems is implemented and its stability and efficiency are investigated in detail in this paper. The partitioned coupling algorithms, which can treat a structural problem and a fluid dynamics one independently, seem suitable for large-scale computation in parallel environments because the approaches can utilize existing parallel analysis codes. In this paper, an optimal selection of iterative partitioned coupling algorithm, which consists of dynamic control of relaxation factor, elastic predictor and consistent time integration scheme, was proposed, and numerical examples show its accuracy.

Key Words: Fluid-Structure Interaction, Partitioned Coupling, ALE Method, Stabilized FEM, Time Integration Scheme

1. 序 論

流体構造連成問題とは流体と構造が相互作用しながら現象が進行していく問題である。ほとんどすべての人工物は何らかの流体中に存在しており、さまざまな相互作用が起こりうると考えられる。特に、相互作用が現象に対して支配的である場合には流体と構造をそれぞれ単独の系として数値シミュレーションを行うことによる現象の予測や解明は難しい。強い相互作用が人工物の破壊現象を引き起こした典型例として、1940年にアメリカで起きたタコマ橋の落下事故⁽¹⁾や1995年に起きた高速増殖実験炉もんじゅのナトリウム冷却材漏えい事故⁽²⁾が挙げられる。タコマ橋の落下事故の場合、風力を静荷重として設計を行っていたが、風によって生じた渦により、橋に与えられる周期的な力と橋のねじれ振動が共振を起こし橋が落下した。また、もんじゅの事故においてもナトリウムの流れにより温度計さや管が振動し、破損が起こった。

自然界においても昆虫の羽ばたき現象や魚のひれを使った推進などで流体構造連成現象を観察することができる。特に羽ばたき飛行に関しては近年、アメリカでMAV(Micro Air Vehicle)という小形の羽ばたき形ロボットの開発プロジェクトが進められている⁽³⁾。また、バイオメカニクスの分野でも流体構造連成問題は注目されており、特に脳動脈りゅうや動脈硬化は血行力学的要因が重要な役割を果たすと考えられている⁽⁴⁾。このようにさまざまな分野で流体構造連成問題の重要性が指摘されており、これらの連成問題を数値シミュレーションにより解析することは現象の理解、人工物の設計の見地から有用であり実際多くの解析コードが開発されつつある。

流体構造連成現象では流体の支配方程式、構造の支配方程式、メッシュ制御の支配方程式の三つを流体構造境界面での連続条件と平衡条件を満たしながら時間進行していく必要がある。これらの複雑な非線形現象を連成させるため一般的には強連成法あるいは一体型解法^{(5)~(8)}(monolithic method)と呼ばれる一体となったマトリックスを解く手法が精度と安定性のよい手法として知られている。一体型解法は流体と構造の相互依存性が強い問題、すなわち、連成効果による非線形性の強い問題において用いられることが多い⁽⁶⁾。この

* 原稿受付 2005年10月3日。

^{*1} フェロー, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 東京大学大学院新領域創成科学研究科。^{*3} 正員, 東京大学大学院工学系研究科。

E-mail: tyamada@q.t.u-tokyo.ac.jp

とき二つの系の自由度を同時に解くことになるため大規模な連立一次方程式を解くこととなるが、比較的自由度の小さい構造問題を静的縮約した多段階強連成解法も提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。一方、精度や安定性は強連成法ほど高くないものの、一体となったマトリックスを解くのではなく、それぞれの支配方程式から得られた複数のマトリックスを逐次的に解く弱連成法あるいは分離型解法^{(9)~(14)}(partitioned method)も実装や並列計算の容易さの観点から広く研究されている。それぞれの単独問題で熟成された数値解析手法、特に連立一次方程式解法が異なることが多く、既存の計算スキームの有効利用を考えた場合には分離型解法のほうが有利であると考えられる。例えば、流体問題の場合、流速、圧力同時解法では非対称行列を取扱う必要があることから BiCGSTAB 法、GMRES 法が用いられることが多く、MAC 法系の流速、圧力分離解法では前処理付き CG 法が一般に採用される。一方、構造解析では前処理付き CG 法、FETI 法⁽¹⁵⁾、BDD 法⁽¹⁶⁾と並列計算の可能性を含めると採用されている解法は多岐にわたる。このとき分離型解法ではなく一件型解法を用いると少なくとも一方の現象にとって非効率な連立一次方程式解法を採用することとなる。

さらに並列計算を考えた場合、すでに開発されたプログラム、あるいは ADVENTURE プロジェクト⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾のように公開されているプログラムを用いることにより容易に大規模並列流体構造連成解析を行うことが可能な分離型解法は非常に魅力的である。近年では分離型解法に時間ステップ内反復を導入することにより精度を高めた分離反復型解法^{(11)~(14)}が注目を集めている。

本論文では分離型解法における時間ステップ内反復の必要性、時間積分スキームの選択、メッシュ制御手法の評価を行い、安定かつ効率的な分離解法スキームの選定を目的とする。以降、2章では流体構造連成問題の支配方程式を示し、3章で既存の分離型解法について概略を述べ、本研究で選択した分離反復解法のアルゴリズムを述べる。4章では数値計算結果とともに本手法の精度と計算効率の有効性を示し、最後に5章で結論を述べる。

2. 流体構造連成問題の支配方程式

2.1 構造問題 固体の支配方程式は次式で表される。

$$\rho^s \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma^s}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ^s 、 σ^s 、 d はそれぞれ固体の質量密度、応力

テンソル、変位ベクトルを表す。

空間方向の離散化には幾何学的非線形性を取扱うため Total Lagrangian 記述に基づいた四角形一次要素による有限要素法を採用する。

2.2 流体問題 流体の支配方程式は、構造領域の移動により流体領域が変動する移動境界問題となるため、ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)記述に基づく Navier-Stokes 方程式と連続の式とする。また、流体構造連成問題では構造の変形による圧力変動が瞬時に伝播することになり数値解が発散することがあるため微圧縮性を導入する⁽¹⁹⁾。また、流体は層流状態と考え、乱流モデルの導入は行わない。空間方向の離散化には三角形一次同次補間要素による有限要素法を用いる。移流項に起因する流速場の数値振動を抑えるため SUPG(Streamline-Upwind/Petrov Galerkin)項を、流速と圧力の同次補間における圧力場の数値振動を抑えるため PSPG(Pressure Stabilized/Petrov Galerkin)項をそれぞれ導入し⁽²⁰⁾、安定化を行った。以下に支配方程式を示す。

$$\rho^f \frac{\partial u}{\partial t} + \rho^f (u - \bar{u}) \cdot \nabla u - \frac{\partial \sigma^f}{\partial x} = f \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{B} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{B} (u - \bar{u}) \cdot (\nabla p) + \nabla \cdot u = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで u は流速ベクトル、 p は圧力、 $\bar{u}$ はメッシュ速度ベクトル、 ρ^f は流体の密度、 σ^f は流体応力テンソル、 f は外力ベクトル、 B は体積弾性率を表す。

2.3 流体構造連成境界面における平衡・連続条件 流体構造境界面において平衡・連続条件が満たされる必要がある。

$$\sigma_{ij}^f \cdot n_j^f + \sigma_{ij}^s \cdot n_j^s = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$u^f = u^s \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで上付き添字 S, F はそれぞれ構造、流体の諸量を表し、 n は境界面の単位法線ベクトル、 σ は応力テンソル、 u^s は構造問題の速度ベクトルを表す。

2.4 時間積分スキームとエネルギー保存 2.3 節で述べた流体構造連成面における平衡条件は、動解析では有限な時間区間での積分値としても満たされる必要がある。すなわち式(4)、(5)を満足した分離解法スキームを選択した場合でも、連成面でのエネルギー収支が合わない場合には数値解析の安定性や長時間積分による精度が悪化するため、整合性のとれた時間積分スキームを採用することの必要性が知られている⁽²¹⁾。この確認のため構造問題では時間積分スキームとして中点法(mid-point rule)と Newmark β 法を、流体問題では Crank Nicolson 法と完全陰解法を実装し、時間積分スキームとエネルギー保存の関係に

ついて調べることとした。中点法とCrank-Nicolson法では外力の評価時間が $t^n+1/2 \cdot \Delta t$ であり、Newmark β 法と完全陰解法では $t^{n+1}(=t^n+\Delta t)$ となる。ただし、流速、圧力ともにCrank-Nicolson法を用いた場合数値振動が生じるため圧力については完全陰解法を用いる。このため厳密に整合性のとれた数値積分スキームは構造問題にNewmark β 法を流体問題に完全陰解法を用いた場合のみである。

2・5 メッシュ制御 流体領域においてALE記述を用いて構造領域の変動を追従するためにメッシュ制御が必要とされる。構造変形が微小であればメッシュスムービングを行い、構造変形が大きく、流体領域で大きなメッシュのゆがみが発生する場合にはリメッシングが必要となる。

ラプラス方程式に支配されたラプラシアンスムービングがしばしば用いられるが、本研究では擬似的に線形弾性問題を支配方程式としたスムービング⁽²²⁾を採用した。このスムービング手法では流体領域のメッシュを擬似的に線形弾性問題の支配方程式に従うものと考え、流体-構造境界面で与えられた構造の強制変位量を流体領域における擬似構造問題の境界条件として与え各節点での節点移動ベクトルを求める。この擬似的に線形弾性問題を支配方程式としたスムービングを用いることにより5章に示す数値解析例ではリメッシングが必要なほどのメッシュのゆがみは観測されなかった。

3. 単純分離型解法と分離反復形解法

3・1 分離型解法の概略 流体構造連成現象は2章で述べたように記述され、流体の支配方程式と構造の支配方程式およびメッシュ制御の支配方程式が流体構造境界面での連続条件と平衡条件を満たしながら解かれていく。ここで流体構造境界面での連続条件は、流体が構造の中にめりこまない。あるいは流体が構造の表面から離れないことを意味している。また、平衡条件は、流体構造境界面における力の釣合いがとれていることを意味している。特に、流体から構造への力が過小評価され過減衰が起こる場合、解析自体は破たんせずに進行してしまうため、解は求まるものの精度上問題がある結果となる。この二つの条件は流体と構造を同時に解く一体型解法では陰に満たされるように定式化が行われるが、流体と構造を別々に解く分離型解法では工夫しないと陰には満たされない。また2・4節で記述したように平衡条件は有限時間区間での積分値としても満たされる必要がある。

代表的な分離型解法である単純互い違い法では時刻

t^{n+1} において構造に与えられる流体力を時刻 t^n での計算結果から予測し、時刻 t^{n+1} での構造変位の更新、時刻 t^{n+1} での流体の速度、圧力の更新を行い、次の時間ステップへと計算を進める。これに対し、最初に流体力を予測するのではなく、まず構造変位を予測し互い違いに計算を行う手法として構造予測子付き互い違い法が提案されている⁽⁹⁾。この手法では構造問題の時刻 t^{n+1} における変位を予測子により求め、時刻 t^{n+1} での流体の速度、圧力の更新を行い、得られた流体力に従って時刻 t^{n+1} 構造変位を得る。このため、構造予測子の変位に対する付加質量効果を考慮することが可能となり、単純互い違い法より有効であると考えられる。また、二つの問題を同時刻において解を求めるのではなく時間ステップを $1/2$ ずらして平衡・連続条件を考慮する改良互い違い法⁽¹⁰⁾も提案されている。いずれの手法も平衡・連続条件を厳密に満たすものではないため、精度あるいは安定性の問題が残ることとなる。

分離型の計算を互い違いに一度だけ行うのではなく、時間ステップ内において計算ループを導入し、平衡・連続条件が満たされるまで反復的に計算を行う手法として分離反復型解法が提案されている^{(11)~(14)}。このとき単純に反復計算を行う手法(Block Gauss-Seidel法)⁽¹¹⁾だけでなく、3・2節で述べる構造変位を緩和する手法(relaxed Block Gauss-Seidel法)⁽¹²⁾⁽¹³⁾や連立非線形問題としてNewton法を適用する手法(Block Newton法)⁽¹³⁾も提案されている。ここでBlock Newton法を用いた場合にはNewton法の反復計算となるため連成効果を考慮した接線剛性行列を各解析プログラムにおいて取扱うこととなり、解析コードの改変が必要となる⁽¹⁴⁾。反復計算を行わない手法がLoose Couplingと呼ばれるのに対して、時間ステップ内反復計算を伴った連成解析手法はTight Couplingと呼ばれている。

3・2 時間ステップ内反復計算における緩和係数の導入

3・1節で述べた時間ステップ内反復により解が収束する場合には連成系全体の方程式が満たされ、時間方向の離散化手法の違いを除けば分離型解法を用いた場合でも強連成法と同程度の精度の解が得られることが理解できる。しかし、解が収束することは必ずしも保証されていない。連成系を分離して解く場合、例えば構造問題では本来考慮されるべき付加質量、付加粘性的な影響を無視して構造変形を予測することとなり、構造側が過大に変形し数値安定性に影響を与えることが知られている。そこで、時間ステップ内反復の安定性を高めるため、構造解析結果を緩和すること

を考える。まず時間 t^{n+1} での連成問題の解を求めるための時間内反復 $k+1$ ステップでの構造解析の結果を得る。得られた変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトルについて次式のように緩和された値を用いる。このことにより擬似的に付加質量的な影響を考え、時間ステップ内反復計算を安定化することが可能となる。

$$d_{k+1}^{n+1} = (1-\alpha)d_{k+1}^{n+1} + \alpha \bar{d}_{k+1}^{n+1} \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\bar{d}_{k+1}^{n+1}$ は構造解析の結果得られた変位ベクトル、 d_{k+1}^{n+1} は緩和された変位ベクトル、 α は緩和係数である。このようなアプローチは分離反復型解法を流体領域と構造領域の二つのブロックに分けて考え緩和計算を行っていることから、relaxed Block Gauss-Seidel 法と呼ばれている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

流体と構造の相互作用が強い場合ほど流体の付加質量的な効果が大きくなるように緩和係数 α の値を小さくする必要がある。しかし、値が小さすぎると収束するまでの反復回数が増えるため適切な α を選択することが解析の安定性、効率のうえで重要となる。

3.3 分離反復型解法の安定性と効率の向上 時間ステップ内反復における構造変位の緩和係数はそのときの流体と構造の相互作用の強さによって最適な値が決まるため、問題依存であり、また時間ステップによっても変化する。同時にこの緩和係数の値は反復回数に大きく影響する。そこで、以下の方法で緩和係数 α を動的に決定する。時間ステップ内反復での k 回めと $k+1$ 回めの反復での構造の変位の差を残差ベクトル $R(d^k)$ として以下のように決定する。これは線形問題における Aitken 補外の拡張であり Deparis によって動的緩和係数選択手法として導入された⁽¹²⁾。

$$\alpha^k = \frac{[R(d^k) - R(d^{k-1})] \cdot (x^k - x^{k-1})}{[R(d^k) - R(d^{k-1})]^2} \dots\dots\dots (7)$$

分離反復型解法の安定性と効率を高めるため、本研究では以下のアプローチをとることとする。まず安定性を高めるため relaxed Block Gauss-Seidel 法の緩和係数の決定に Aitken 補外の導入を行う。また、効率を高めるため、構造予測子の導入を行う。エネルギー保存が満たされる数値積分スキームとするため構造問題に Newmark β 法、流体問題に完全陰解法を用いる。ただし、確認のため、複数の時間積分スキームでの実装を行った。図 1 に本研究で用いる解析スキームを示す。時間ステップ内反復は時間を一定にした状態で行う反復計算であることから Fixed Point Iteration と呼ばれている。

4. 数値計算例

4.1 流体剛体連成解析 3章で述べた分離反復型解法の有効性を検証するために、円筒内で微小振動する円柱の解析において付加質量係数と付加粘性係数の算出を行い、野村ら⁽⁵⁾ による一体形解法、単純互い違い法、分離反復型解法の 3 手法の結果を比較した。図 2 に示すように円筒中心に釣合い点がある円柱を直径の 1/100 だけずらして配置し、静かに放し円柱の挙動を解析した。円柱は剛体とし直径 1.27×10^{-2} m、ばね定数 346.113 N/m、質量 3.409×10^{-3} kg とした。解析では野村らと同じ 3 種類の流体を用いた。その物性値を表 1 に示す。なお、Silicon Oil と Mineral Oil の体積弾性率に関してはアセトンの値により代用した。解析に用いた有限要素モデルの節点数は 6856、要素数は 13319 であり、時間刻みは $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ s とした。また、境界条件は円筒表面、円柱表面において no slip とした。構造予測子は次式に示すように前ステップの速度、加速度を用いて陽的に時刻 t^{n+1} で

Fig. 1 Improved partitioned coupling approach

Fig. 2 Analysis model of circular cylinder

Table 1 Material properties for fluid analysis

	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pa·s)	Bulk modulus (Pa)
Silicon Oil	0.956x10 ³	1.45x10 ⁻¹	1.87x10 ⁹
Mineral Oil	0.935x10 ³	4.1x10 ⁻²	1.87x10 ⁹
Water	1.0x10 ³	1.33x10 ⁻³	2.20x10 ⁹

Fig. 3 Comparison of the added mass coefficients and added damping coefficients between present, simple staggered and monolithic method by Nomura et al.⁽⁵⁾

の円柱位置を求めるものとした。

$$x_{\text{predict}}^{n+1} = x^n + \Delta t \cdot u^n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot a^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで x は釣合い位置を原点とした円柱の位置ベクトル, u は速度ベクトル, a は加速度ベクトルである。

流体力を付加質量, 付加粘性効果により置き換えた円柱の運動方程式は次式で与えられる。

$$(M + C_M^*)a + C_V^* \cdot u + kx = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで M は質量, k はばね定数である。また, C_M^* , C_V^* はそれぞれ付加質量, 付加粘性を表しており, 以下の式から求まる。

$$C_M^* = \frac{k}{\omega^2 + \frac{\xi^2}{T^2}} - M \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C_V^* = \frac{-2\xi(M + C_M^*)}{T} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで, T は周期, ξ は対数減衰率, ω は減衰角振動数を表しており, 解析終了後に得られる円柱の変位の時間履歴グラフから求めることができる。また, 無次元化された付加質量係数, 付加粘性係数は次式により定義される。

$$C_M = \frac{4C_M^*}{\rho\pi d^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Table 2 Total number of fixed point iterations until 200th time step with various relaxation factors

	Constant Factor				
	Aitken	1.0	0.9	0.8	0.4
Total number of fixed point iterations	822	1394	996	1400	2596

$$C_V = \frac{4C_V^*}{\rho\pi d^2 \omega} \quad \dots\dots\dots (13)$$

さらにキネマティックレイノルズ数を次式で定義する。

$$R_\omega = \frac{\omega d^2}{\nu} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(12)から式(14)において d は円柱の直径である。また, 式(14)の ν は動粘性係数である。

まず時間ステップ内反復による計算精度の確認を行った。時間積分スキームとして構造問題に Newmark β 法, 流体問題に完全陰解法を用いた解析の結果, 図3に示すように付加質量係数についてはすべての手法でほぼ同じ値が得られたものの, 付加粘性係数については単純互い違い法のみ大きくずれた結果が得られ, 分離反復型解法と野村らによる一体型解法は同程度の精度をもつことがわかった。この円筒内で微小振動する問題では流体と剛体のエネルギーのやりとりが正しく扱われていなければ, 剛体が発散応答や過減衰を行い正しい付加質量係数, 付加粘性係数を得ることができないと考えられる。このため, 平衡・連続条件を満たさず時間ステップを進めていく単純互い違い法では他の手法に比べ大きく誤差が出たと考えられる。

次に計算効率を評価するため流体側の物性値を水に固定し, 緩和係数を Aitken 補外で動的に決め解析を行った場合と, 定数で固定した場合で時間ステップ内反復回数の挙動を調べた。表2に200時間ステップまで積算した時間ステップ内反復計算回数を示す。反復回数が緩和係数の値に依存していることがわかる。この結果より緩和係数の Aitken 補外による動的な決定が安定して少ない反復回数で効率的に解析を行えたことがわかる。Aitken 補外による動的に緩和された時間ステップ内反復回数は1ステップ平均4.11回であり, Pentium 4 2.6 GHz 上において2000時間ステップの計算を8時間程度と十分実用的な時間で解析を行うことが可能であった。同じ Aitken 補外を用いた場合でも構造予測子を用いなかった場合1ステップあたりの平均時間内反復回数は5.26回であり構造予測子も計算の効率化に寄与していることがわかった。

Fig. 4 Comparison of analysis results with different combination of time integration schemes

Fig. 5 Analysis model of fluid-elastic body interaction analysis

最後に数値積分スキームによる影響を調べるため、構造問題では中点法と Newmark β 法を、流体問題では Crank-Nicolson 法と完全陰解法を用いて計算を行った。図 4 に四つの時間積分スキームの組合せによる剛体の振動軌跡を示す。エネルギー保存が満たされる数値積分スキームの組合せである Newmark β 法と完全陰解法の組合せ以外では剛体が発散応答や過減衰となることが確認できた。

4.2 流体構造連成解析 流体と構造の相互作用がより強いと考えられる流体-弾性体連成問題へ改良型分離解法を適用した。一様流中で振動運動を行っている弾性体の解析を行った。図 5 に解析形状を示す。なお、弾性体は 2.1 節で記したように幾何学的非線形性を考慮した運動を行うこととした。流体は水とし、弾性体は水と同程度の質量を有し流体力により大きく変形するように十分軟らかいものとした。解析に用いた物性値を表 3, 4 に示す。また、解析に用いた構造予測

Table 3 Material properties for fluid analysis

Viscosity (Pa·s)	Mass Density (kg/m ³)
1.33×10^{-3}	1.0×10^3

Table 4 Material properties for solid analysis

Mass Density (kg/m ³)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio
1.5×10^3	1×10^6	0.2

Fig. 6 Finite element mesh for fluid-elastic body interaction analysis

Fig. 7 Deformation of elastic body and velocity contours at 400th step

子は 4.1 節同様、前ステップの速度ベクトル、加速度ベクトルを用いて陽的に時刻 t^{n+1} での弾性体の変位ベクトルを求めるものとした。

解析に用いた有限要素モデルは節点数 5 496、要素数 10 750、時間刻み $\Delta t = 5.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ とした。流入は左端から 0.1 m/s とした。弾性体の振動運動は図 6

に示したように左端を中心とした回転運動とし次式で定義される回転角 θ を与えた。

$$\theta = \theta_{\max} \sin(2\pi\omega t) \dots\dots\dots (15)$$

ここで $\theta_{\max} = 0.25\pi$, $\omega = 3.0$ とした。解析から得られた 0.2 s 後の弾性体の変形とその周りの流速コンタを図 7 に示す。弾性体の回転運動により弾性体後部に速い流れが生成された。このとき、回転の周波数は十分高くなくジェットストリームのような渦同士の相互作用は観測されなかった。

本解析において緩和を行わない Block Gauss-Seidel 法を用いた場合第 1 時間ステップから時間内反復計算の収束を得ることはできなかった。また、4・1 節と同様に構造予測子と Aitken 補外を用いて計算を行った場合 500 ステップまで積算した時間ステップ内反復回数は 2811 回であり、1 時間ステップ当たり平均 5.62 回であった。このとき全解析時間に占める流体問題、構造問題、メッシュ制御処理、連成制御処理の割合はそれぞれ 91.8, 0.3, 7.8, 0.1% であり、流体問題が支配的であった。一方、構造予測子を採用しない場合、4030 回であり、1 時間ステップ当たり平均 8.06 と構造予測子を用いた場合の 1.4 倍近い反復回数を必要とした。計算時間で比較した場合、Pentium 4 3.2 GHz 上で計算を行った場合、500 時間ステップまで構造予測子を採用すると約 4 時間で計算を行うことができたのに対して、構造予測子を用いない場合、約 5 時間 40 分を必要とした。2・5 節に記した擬似的に線形弾性問題を支配方程式としたスージングを用いることにより構造は十分大きな変形を行うにもかかわらずメッシングが必要なほどのメッシュのゆがみは観測されなかった。

5. 結 論

分離型解法において時間ステップ内反復計算を導入することにより一体型解法と同程度の精度の解が得られることを示した。また、構造予測子の導入と、緩和係数を Aitken 補外により動的に制御することによりわずかな反復計算で平衡・連続条件を収束させることが可能であることを示した。時間積分スキームについては選択した構造 Newmark β 法、流体完全陰解法以外の選択では発散応答や過減衰が観測されることを示した。このことにより提案した組合せによる分離反復型解法は安定性および計算効率に優れた手法であることを示すことができた。また、一般的な逐次互い違い法に比べ、数倍程度の計算時間でより精度のよい解が安定して得られることがわかった。今後はさらに検討を進め、分離型解法による大規模並列流体構造連成解

析を実施する予定である。

本研究の一部を遂行するにあたり 21 世紀 COE プログラム「機械システム・イノベーション」より支援を受けた。ここに謝意を示す。

文 献

- (1) Tanaka, T. and Fukumoto, T., vibration and resonance in life, <http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~masako/exp/melde/midika.html>, (2000).
- (2) Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Overview of 5th report on Monju accident and operations of Joyo, <http://www.jnc.go.jp/pnc-news/ntopic/PT97/P9704/PEK2/siryoo02-4.htm>, (1997).
- (3) Schenato, L. et al., Attitude Control for a Micromechanical Flying Insect via Sensor Output Feedback, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 1 (2004), pp. 93-106.
- (4) Torii, R. et al., Computation of Cardiovascular Fluid-Structure Interactions with the DSD/SST Method, *Proceedings of the 6th World Congress on Computational Mechanics*, CD-ROM, (2004).
- (5) Nomura, T. and Hughes, T. J. R., An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Interaction of Fluid and a Rigid Body, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 95 (1992), pp. 115-138.
- (6) Zhang, Q. and Hisada, T., Analysis of Fluid-Structure Interaction Problems with Structural Buckling and Large Domain Changes by Ale Finite Element Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190 (2001), pp. 6341-6357.
- (7) Ishihara, D., Efficient Strong Coupling Method for Fluid-Structure Interaction Based on Explicit method for Structure and Semi-Implicit method for Fluid, *Journal of JSME, Series B*, Vol. 79, No. 700 (2004), pp. 3098-3105.
- (8) 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. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 64 (2005), pp. 167-203.
- (9) Piperno, S., Explicit/implicit fluid/structure staggered procedures with a structural predictor and fluid subcycling for 2d inviscid aeroelastic simulations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 25 (1997), pp. 1207-1226.
- (10) Lesoinne, M. and Farhat, C., Two Efficient Staggered Algorithms for the Serial and Parallel Solution of Three-Dimensional Nonlinear Transient Aeroelastic Problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 182 (1998), pp. 499-515.
- (11) Yamada, T. et al., Numerical Simulation of Interaction of Membrane and Fluid by an Iterative Coupling Algorithm, *Proceeding of the Conference on C. E. S.*, Vol. 10, No. 1 (2005), pp. 21-24.
- (12) Deparis, S., Numerical analysis of axisymmetric flows and methods for fluid-structure interaction arising in blood flow simulation, PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, (2004).
- (13) Steindorf, J. and Matthies, H. G., Partitioned Strong Coupling Algorithms for Fluid-Structure Interaction, *Computers and Structures*, Vol. 81 (2003), pp. 805-812.

- (14) Vierendeels, J., A Partitioned Procedure for Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction Problems Using a Reduced Order Model, *Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering* (2005), pp. 149, CIMNE.
- (15) Farhat, C. and Roux, F. X., Implicit parallel processing in structural mechanics, *Comp. Mech. Advances*, Vol. 2 (1994), pp. 1-124.
- (16) Mandel, J., Balancing domain decomposition, *Comm. on Numer. Meth. Engrg.*, Vol. 9 (1993), pp. 233-241.
- (17) Yoshimura, S. et al., Advanced General Purpose Computational Mechanics System for Large-Scale Analysis and Design, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 149 (2002), pp. 279-296.
- (18) Development of Computational Mechanics System for Large Scale Analysis and Design (ADVENTURE Project), <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/>
- (19) Huerta, A. and Liu, W. K., Viscous Flow with Large Free Surface Motion, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 69 (1988), pp. 277-324.
- (20) Tezduyar, T. E. and Osawa, Y., Finite Element Stabilization Parameters Computed from Element Matrices and Vectors, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190 (2000), pp. 411-430.
- (21) Tallec, P. L. and Mouro, J., Fluid Structure Interaction with Large Structural Displacements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190 (2001), pp. 3039-3067.
- (22) Tezduyar, T. E. and Johnson, A. A., Mesh Update Strategies in Parallel Finite Element Computations of Flow Problems with Moving Boundaries and Interfaces, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 119 (1994), pp. 73-94.