

○加藤 千幸 (東大生研), 向井 寛 (日立機研), 清水 勇人 (日立機研), 岡村 共由 (日立土浦)

Chisachi Kato*, Hiroshi Mukai**, Hayato Shimizu** and Tomoyoshi Okamura***

* University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minatoku, Tokyo 106-8558

** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.

502 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki 300-0013

*** Tsuchiura Works, Hitachi Ltd.

603 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki 300-0013

Large eddy simulation of the complete stage of a mixed-flow pump is presented. The standard Smagorinsky model is adopted for the sub-grid scale model with Van-Driest damping function. The computation takes full account of the interaction between the rotating impeller and the stationary casing by using a multi-frame-of-reference dynamic overset grid approach. A streamline-upwind finite element formulation with second-order accuracy both in time and space is used for discretizing the governing equations. It is implemented in parallel by a domain decomposition programming model, and therefore, it can be applied to a large scale computation on a distributed-memory parallel computer. Internal flow of a high-specific-speed mixed-flow pump stage, which possesses mild instability in its performance curve, is simulated to test the validity of the proposed method. A preliminary comparison with the measurement is presented.

1. はじめに

高性能・低価格ワークステーションの出現と市販の流れ解析ソフトの高度化等により、ターボ機械の設計・開発分野においても数値流体解析の適用が盛んに行われている^{1)~3)}。現在、ターボ機械の内部流れの解析としては、 $k-\epsilon$ モデル等のレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS)によるものが主流となっているが、RANSは元来時間平均乱流モデルに基づくため、非定常流れの解析や(非設計点流量において生じることが多い)大規模な離・逆流を伴う流れの解析に適用することには限界がある。そこで、本研究ではターボ機械の次世代設計・開発ツールとして、非定常流れが直接計算でき、かつ、大規模な剥離を伴う流れに対しても高精度な予測が期待できる Large Eddy Simulation (LES) によるターボ機械内部流れの予測手法の開発を進めている。開発を進めているのは、移動格子法に基づく並列処理 LES 解析コードであり、PC クラスタからベクトル型超並列計算機に至る分散主記憶型の並列計算機上で大規模な解析が実現できる。現在までに、本コードにより、渦巻き斜流ポンプの全揚程や羽根車に働く流体力変動等の定量的な予測が可能であることが確認されている⁴⁾⁵⁾。本研究では、揚程曲線上の不安定特性(右上がり特性)発生の予測や、不安定特性が発生する詳細なメカニズムの解明を目指して、さらに高比速度の斜流ポンプの解析を進めている。本稿ではこれまでに得られている解析結果の一部を紹介する。

2. 基礎方程式

本研究では、直交座標系で記述された、フィルター平均ナビエ・ストークス方程式と連続の式とを基礎式として LES 解析を行う。格子サイズ以下の乱流渦の影響は、標準スマゴリンスキーモデル⁶⁾、並びに、Van-Driest の減衰関数によりモデル化する。本研究で用いる基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_j \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{sgs}) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + f_i \quad (2)$$

$$\nu_{sgs} = \left(C_s f \Delta \right)^2 \left(2 \bar{S}_i \bar{S}_i \right)^{1/2}; \quad \bar{S}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$f = 1 - \exp \left(-\frac{y^+}{A^+} \right); \quad A^+ = 25.0 \quad (4)$$

ここに、 $\bar{u}_i$ ($i=1, 2, 3$) は x_i 方向の格子スケール流速成分、 $\bar{p}$ は格子スケールの静圧であり、また、 ρ , ν はそれぞれ流体の密度及び動粘性係数(既知)を表す。 C_s はスマゴリンスキー定数であり、本研究では大規模な離乱流を想定し 0.15 という値を用いる。また、 Δ は格子フィルター幅であり、ここでは各要素体積の 3 分の 1 乗という値を用いる。

f_i は解析に用いる座標系(詳細は後述)の運動に対応する慣性力である。即ち、静止座標系に対しては、

$$f_i = 0 \quad : \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

一方、角速度 Ω で回転する回転座標系に対しては、

$$f_1 = \Omega^2 x_1 + 2\Omega \bar{u}_2; \quad f_2 = \Omega^2 x_2 - 2\Omega \bar{u}_1; \quad f_3 = 0 \quad (6)$$

なお、座標系の回転軸は x_3 軸であることを仮定している。

3. 数値解析手法

本研究では、静止したケーシングと回転する羽根車との相対運動を図 1 に示すような移動格子法により考慮する。即ち、羽根車内の流れは羽根車と共に回転する計算メッシュにより解析し、一方、入口旋回止め、ディフューザ、及び、吐出流路等の静止流路内の流れは、それぞれの部分に対して作成された静止座標系上の計算メッシュにより解析する。それぞれの計算メッシュはその上流あるいは下流に位置する計算メッシュと適切なオーバーラップ・マージンを以って重ね合わせられ、各時間ステップにおいて、オーバーラップした部分の流速及び圧力を上流あるいは下流の計算メッシュから内挿された値によりオーバセットする。

ところで、高レイノルズ数の複雑流路流れであるポンプ内部流れの LES 解析には、少なく見積っても百万～数百万格

子の解析メッシュを用いる必要がある。そこで、本研究では分散主記憶型の並列計算機を利用した大規模LES解析を実現するために領域分割法⁷⁾に基づく並列化を実施した。また、数値的離散化手法としては、以前筆者の一人が開発した上流化有限要素法⁸⁾を用いて基礎方程式を離散化するが、紙面の都合によりそれらの説明は割愛する。数値解析手法の詳細は参考文献(4)(8)を参照されたい。

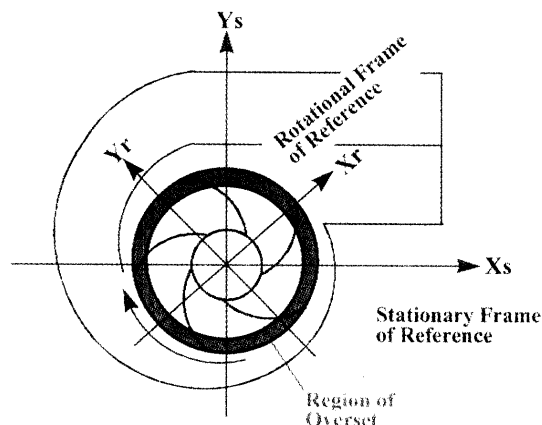


Fig. 1 Coordinate system

4. 解析結果

現在、50%~60%流量範囲に微弱な不安定特性を有する、ボウル・ディフューザ・タイプの高比速度斜流ポンプを対象にLES解析を進めている。計算メッシュは入口整流板、羽根車部、ディフューザ部、および、羽根車下部におけるメッシュの集中を除去するために設けた部分の合計4つのパートから構成され、解析に用いている要素数は合計約450万程度である。解析結果の一例として、羽根車失速が発生する直前の流量における内部流れの解析結果を図2および図3に示す。羽根車ならびにディフューザ内の複雑な剥離流れが捕らえられていることが分かる。羽根車出入口の流れを二次元レーザ流速計による計測結果と比較したものを図4に示す。羽根車入口チップ側の逆流や出口ハブ側の逆流等、羽根車内の特徴的な流れは計測結果と良く一致している。

5. おわりに

移動格子法に基づく並列LESにより、斜流ポンプ内部の非定常流れの解析を進めている。これまでに、渦巻き斜流ポンプの羽根車に作用する流体力変動やケーシング内の圧力脈動に関しては定量的に予測できる見通しを得ている。現在、不安定揚程特性の予測やその発生メカニズムの解明を目的として、高比速度斜流ポンプの内部流れの解析を行っている。予備的に実施した計算では、羽根車出入口の流速分布に関して、レーザ流速計による計測結果と定性的に良く一致する結果が得られている。今後は、さらに詳細に実験値との比較を行うと共に、不安定特性の予測やその発生メカニズムの解明を行っていく予定である。

参考文献

- (1) Goto, A., *ASME Journal of Turbomachinery*, **114** (1992), 373-382
- (2) Takemura, T., and Goto, A., *ASME Journal of Turbomachinery*, **118** (1996), 552-561
- (3) Kaupert, K. A., et al., *ASME Journal of Fluids Engineering*, **118** (1996), 685-691
- (4) Kato, C., et al., *ASME FEDSM99-7802*, (1999)

- (5) 加藤 他3名, 第13回数値流体力学シンポジウム (1999), B07-4
- (6) Smagorinsky, J., *Mon. Weath. Rev.*, **91**-3 (1963), 99-164
- (7) Simon, H., *Comput. Sys. Engrg*, **2** (1991), 135-148
- (8) 加藤・他2名, 機論, **58**-552 B (1992), 300-307

$w/U_2 = -0.01$



Fig. 2 Computed instantaneous reverse flow region

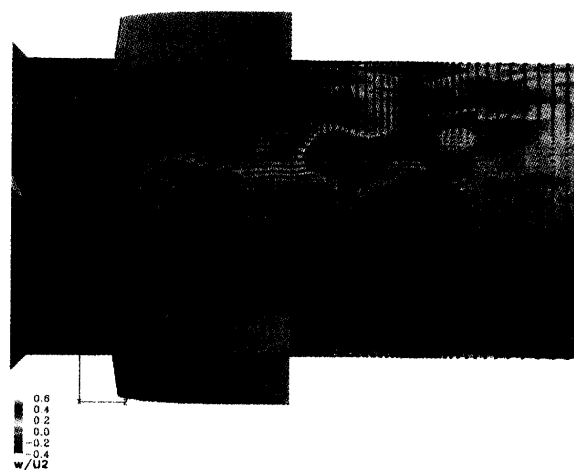


Fig. 3 Computed instantaneous axial velocity distribution

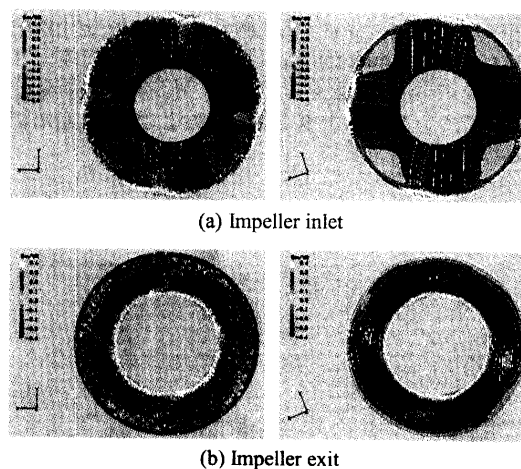


Fig. 4 Comparison of time-average velocity distributions (Left: LDV measurements, Right: LES)