

LES による斜流ポンプ内部流れの非定常解析 —第 2 報, 低流量域特性の予測—

Large Eddy Simulation of Unsteady Flow in a Mixed-flow Pump
—2nd Report, Prediction of Performance Characteristics at Low Flow Rate Ratio—

加藤 千幸*・向井 寛**・真鍋 明**・岡村 共由**

Chisachi KATO, Hiroshi MUKAI, Akira Manabe and Tomoyoshi OKAMURA

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普及などにより, 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)}など. 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) 大規模な離れ・逆流を伴う流れの解析に適用することには限界がある. 一方, 最近の並列計算機の数値向上に伴い, 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可能な Large Eddy Simulation (LES) の工学的応用に対して期待が高まりつつある.

そのような状況の中, 本研究は従来の RANS による定常乱流解析では予測が困難, あるいは, 不可能であった, 羽根車流体力変動ならびに低流量域における揚程特性などを正確に予測することを目的として, ターボ機械用 LES 解析コードの開発を進めている⁴⁾. これまでに, 開発したコードを用いて, 比速度 900 程度の渦巻き斜流ポンプ内部流れの解析を行い, ポンプ全揚程や羽根車に作用する流体力変動などの定量的予測が可能であることを確認した^{4,5)}. 本報では, さらに比速度の高い斜流ポンプの内部流れ解析に LES, すなわち, 開発したコードを適用し, 低流量域における揚程特性や内部流れの予測精度を検証した結果を報告する.

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. すなわち,

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] + f_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

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および動粘性係数 (既知) を表す.

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. すなわち, 静止座標系に対しては,

$$f_i = 0 \quad ; i = 1, 2, 3 \quad \dots \dots \dots (3)$$

一方, 角速度 Ω で回転する回転座標系に対しては遠心力とコリオリ力とを考慮し,

$$f_1 = \Omega^2 x_1 + 2\Omega \bar{u}_2; f_2 = \Omega^2 x_2 - 2\Omega \bar{u}_1; f_3 = 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

と表される. ここに, 座標系の回転軸は x_3 軸であることを仮定している.

格子サイズ以下の乱流渦の効果は, 標準スマゴリンスキー・モデルと Van-Driest の減衰関数によりモデル化する. すなわち,

$$-\overline{u_i u_j} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{u_k u_k} = \nu_{sgs} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\nu_{sgs} = (C_s f \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{0.5}; \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots \dots (6)$$

$$f = 1 - \exp \left(-\frac{y^+}{A^+} \right); A^+ = 25.0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに, C_s はスマゴリンスキー定数であり, 本解析では大規模な離れ乱流を想定し 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.

*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

**株式会社日立製作所

3. 数値解析手法

数値解析手法の詳細は既報⁵⁾にて報告済みであるので、ここではその概要を簡単に説明する。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。すなわち、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(図1には図示せず)、ディフューザ、および、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され、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およ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ーセットする。

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、少なく見積っても数百万格子～一千万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⁶⁾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)(5)を参照されたい。

上述した移動格子法に基づくLES解析は、各解析メッシュ間で質量流束や運動量流束を厳密には保存しないという欠点を有する一方、各領域の計算メッシュを独立に作成することができ、必要に応じてそれらを組み合わせることが可能であるという利点を有する。実際、ここに示した手法(プログラム)は、入力データを準備すれば多段の流体機械

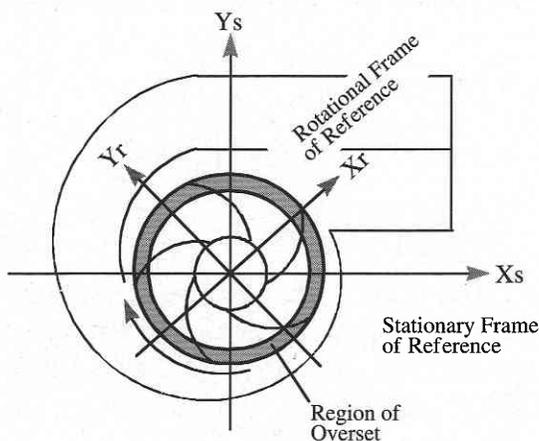


図1 解析に用いる座標系

の解析や列車のすれ違い解析等にも適用することができる。

4. 解析結果

計算対象としたのは、設計流量の50%～60%流量範囲にごく微弱な不安定揚程特性を有するディフューザ・ケーシングの高比速度斜流ポンプである。今回のLES計算では、不安定揚程特性の予測精度を検証すると共に、羽根車出入口流れを二次元レーザ流速計(LDV)により計測し、LES解析結果と比較・検討した。

計算メッシュは図2に示すとおり、入口整流板、羽根車部、ディフューザ部、羽根車下部におけるメッシュの集中を回避するために設けた部分、および、図2には図示していないが、流入条件を与えるための仮想発達流路の合計5つのパートから構成され、解析に用いている総要素数は500万程度である。

境界条件は以下のように与えた。すなわち、主流路の流入境界においては、仮想流路において発達させた乱流の瞬時の流速分布を各時間ステップにおいて与えた。一方、流出境界においては、境界面に作用する流体力が零であることを仮定し、所謂トラクション・フリー条件を課した。それ以外の固体壁面境界では、座標系の運動を考慮したノー・スリップ条件を課し、Van-Driest関数により壁面近傍の乱流粘性を減衰させた。

まず、ポンプ全揚程の予測結果を実測値と共に図3に示す。右上がり特性(不安定特性)の発生も含めて、計算された全揚程は実測値と定量的に一致しており、予測精度は良好である。

ポンプ内部流れの一例として、図3に示した流量点のうち、62%流量と44%流量における軸流速度分布を図4に示す。それぞれ(流量を低下させていった場合に)不安定特性が発生する前後の典型的なフローパターンを示している。紙面の都合上詳細な説明は割愛するが、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。特に、不安定特性発生後は、羽根車入口シュラウド側で逆流が発生し、フローパターンが遠心流れの特性を示している。この流量における羽根車出入口の流れをLDVによる計測結果と比較したものを図5および図6に示す。LES解析結果は、羽根車入口チップ側および出口ハブ側の逆流の発生など、羽根車内の流れの特徴を良く捕らえていることがわかる。

前述の図5および図6に示した、羽根車出入口の流れを周方向に平均し、実測値と比較した結果をそれぞれ図7および図8に示す。入口チップ側の逆流(全失速)の発生に起因し羽根車内部に生じている遠心流れが定量的に予測されていることがわかる。

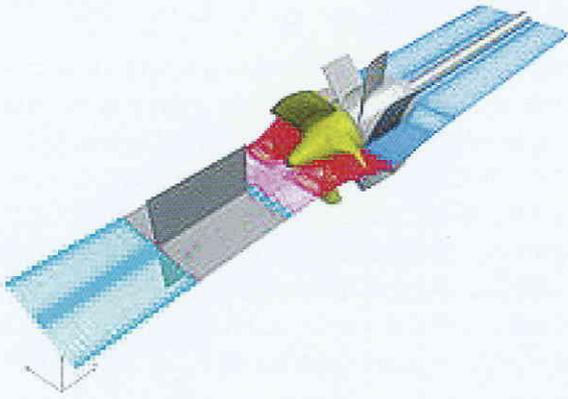


図2 斜流ポンプの解析メッシュ

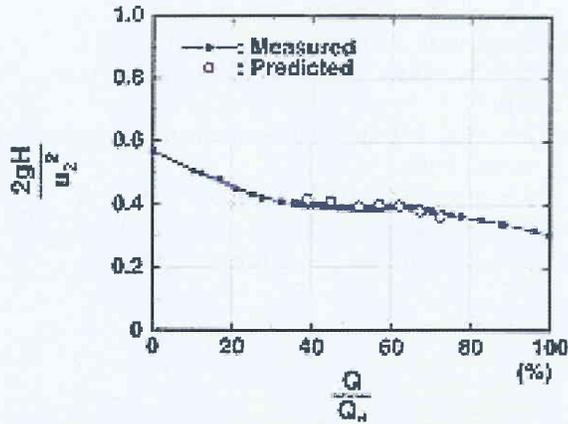


図3 全揚程の比較

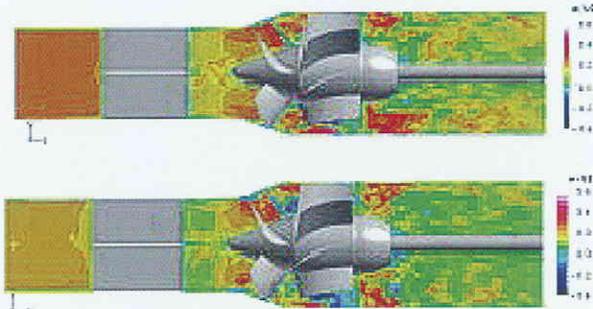


図4 瞬時の軸流速分布 (上: 62%流量, 下: 44%流量)

最後に、羽根車入口軸流速の周方向分布を実測結果と比較した結果を図9に示す。LES解析により予測された軸流速は、周方向分布に関してもレーザ流速計による実測結果と良く一致しており、羽根車内部流れの高精度な予測が実現されていることが確認される。

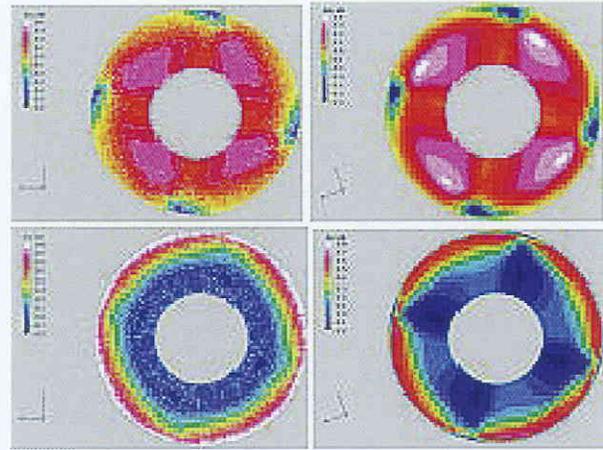


図5 羽根車入口流速分布の比較 (44%流量)
(上: 軸流速, 下: 旋回速度, 左: 実測, 右: 解析)

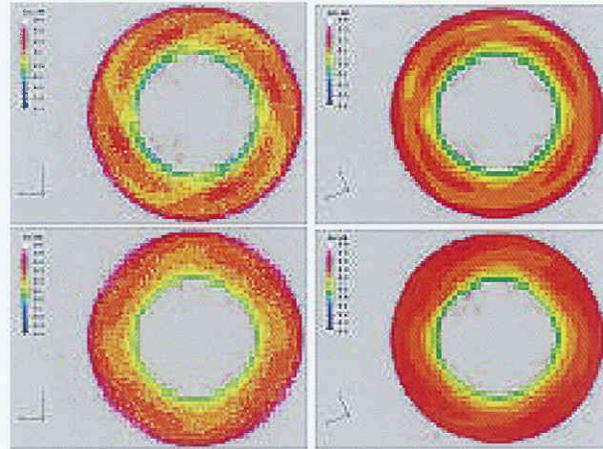


図6 羽根車出口流速分布の比較 (44%流量)
(上: 軸流速, 下: 旋回速度, 左: 実測, 右: 解析)

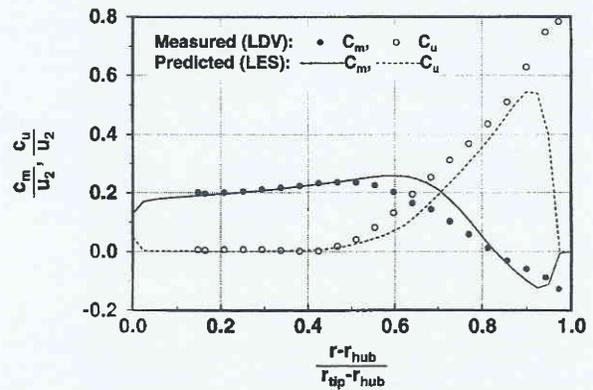


図7 羽根車入口流速分布の比較 (44%流量)

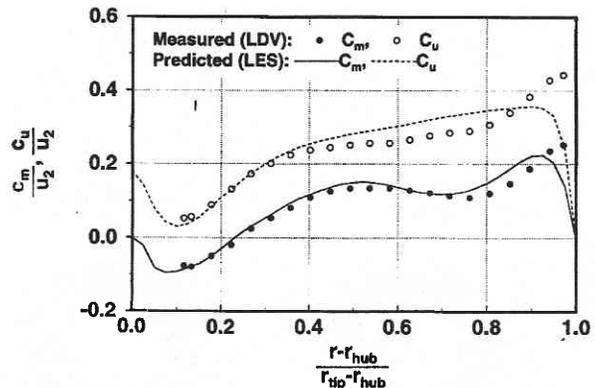


図 8 羽根車出口流速分布の比較 (44%流量)

5. お わ り に

移動格子法に基づくターボ機械用並列 LES 解析コードを開発し、高比速度斜流ポンプの内部流れの解析に適用した。計算されたポンプ全揚程、および、羽根車出入口における流速分布は実験値と定量的に一致し、開発したコードの有効性を確認することができた。今後は、開発したコードを用いて、揚程特性と内部流れとの因果関係をさらに詳細に検討し、不安定揚程特性が発生するメカニズムを解明していきたいと考えている。これにより得られる知見は、斜流ポンプの水力設計の高度化に寄与できるものと期待される。

(2000年11月20日受理)

参 考 文 献

- 1) Dawes, W. N., ASME Paper No. 88-GT-70 (1988).
- 2) Goto, A., ASME Journal of Turbomachinery, 114, pp. 373 (1992).
- 3) Kaupert, K. A., et al., ASME Journal of Fluids Engineering, 118, pp. 685 (1996).
- 4) Kato, C., et al., ASME FEDSM 99-7802, (1999).
- 5) 加藤, 他 3 名, 生産研究, 52-1, pp. 51 (2000).
- 6) 加藤, 他 2 名, 機論, 58-552 B, pp. 300 (1992).

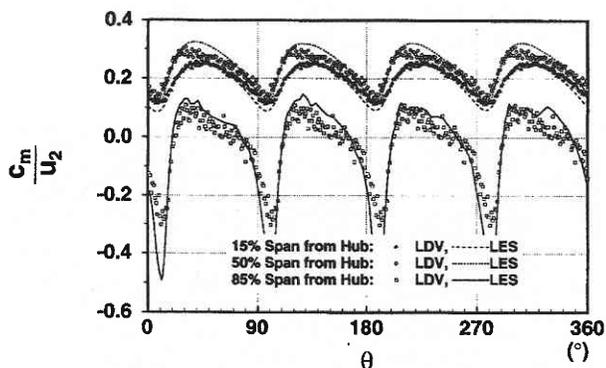


図 9 羽根車入口軸流速の周方向分布の比較 (44%流量)