# LES による斜流ポンプ内部流れの非定常解析 (第2報,低流量域揚程特性の予測)

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

加藤 千幸\*, 東大・生産研, 〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ckato@iis.u-tokyo.ac.jp 向井 寛, 日立・機械研, 〒300-0013 土浦市神立町 502, E-mail: poo@gm.merl.hitachi.co.jp 真鍋 明, 日立・機械研, 〒300-0013 土浦市神立町 502, E-mail: manabe@gm.merl.hitachi.co.jp 岡村 共由, 日立・産業機械システム, 〒300-0013 土浦市神立町 603, E-mail: okamura@cm.tsuchi.hitachi.co.jp Chisachi Kato, Univ. Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, 153-8505 Tokyo, E-mail: ckato@iis.u-tokyo.ac.jp Hiroshi Mukai, Hitachi, Ltd., 502 Kandatsu, Tsuchiura 300-0013, E-mail: poo@merl.hitachi.co.jp Akira Manabe, Hitachi, Ltd., 502 Kandatsu, Tsuchiura 300-0013, E-mail: manabe@gm.merl.hitachi.co.jp Tomoyoshi Okamura, Hitachi, Ltd., 603 Kandatsu, Tsuchiura 300-0013, E-mail: okamura@cm.tsuchi.hitachi.co.jp

A parallel overset LES (Large Eddy Simulation) code has been developed and applied to prediction of the internal flows of a high-specific-speed mixed-flow pump which possesses weak instability in its head-flow characteristics at low flow-rate ratio. The predicted pump heads reproduce the instability and agree with the measured value within about a few percent difference. The predicted velocity profiles at impeller inlet and exit sections also quantitatively agree with the velocity profiles measured by a two-dimensional Laser-Doppler velocimetry. The developed LES code thus can be a promising candidate of a next-decade hydraulic design tool for a high specific-speed mixed-flow pump.

## 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<sup>(1)-(3)</sup> <sup>など</sup>.現在,ターボ機械の内部流れの解析としては,k-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)大規模なはく離・逆流を 伴う流れの解析に適用することには限界がある.一方,最 近の並列計算機の速度向上に伴い,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<sup>(4)</sup>.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<sup>(4)(5)</sup>.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,

$$\frac{\mathbf{I}\,\overline{u}_{i}}{\mathbf{I}\,x_{i}}=0\tag{1}$$

$$\frac{\P}{\P_{t}}\overline{u}_{i} + \frac{\P}{\P_{X_{j}}}\overline{u}_{i}\overline{u}_{j} = -\frac{1}{r}\frac{\P}{\P_{X_{i}}} + \frac{\P}{\P_{X_{j}}}\left\{n\left(\frac{\P\overline{u}_{i}}{\P_{X_{j}}} + \frac{\P\overline{u}_{j}}{\P_{X_{i}}}\right) - \overline{u_{i}^{p}} u_{j}^{p}\right\} + f_{i}$$
(2)

ここに, $\overline{u}_i$ (*i* = 1, 2, 3) は  $X_i$ 方向の格子スケール流速成分, $\overline{D}$  は格子スケールの静圧であり,また, , はそれ

ぞれ流体の密度および動粘性係数(既知)を表す.

f<sub>i</sub> 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,

$$f_{i} = 0$$
:  $i = 1, 2, 3$  (3)

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

$$f_{1} = \Omega^{2} x_{1} + 2\Omega \,\overline{u}_{2} ; \quad f_{2} = \Omega^{2} x_{2} - 2\Omega \,\overline{u}_{1} ; \quad f_{3} = 0$$
(4)

と表される.ここに,座標系の回転軸はx<sub>3</sub>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,

$$-\overline{u_{i}^{9} u_{j}^{9}} + \frac{1}{3} d_{i} \overline{u_{k}^{9} u_{k}^{9}} = n_{scs} \left( \frac{f \overline{u_{i}}}{f x_{j}} + \frac{f \overline{u_{j}}}{f x_{i}} \right)$$
(5)

$$\boldsymbol{n}_{sGS} = \left(\boldsymbol{C}_{S} \boldsymbol{f} \; \boldsymbol{\Delta} \;\right)^{2} \left( 2 \; \overline{\boldsymbol{S}_{ij}} \, \overline{\boldsymbol{S}_{ij}} \right)^{s} \; ; \; \overline{\boldsymbol{S}_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\boldsymbol{\Pi} \; \overline{\boldsymbol{u}_{i}}}{\boldsymbol{\Pi} \; \boldsymbol{\chi}_{i}} + \frac{\boldsymbol{\Pi} \; \overline{\boldsymbol{u}_{j}}}{\boldsymbol{\Pi} \; \boldsymbol{\chi}_{i}} \right) \tag{6}$$

Copyright © 2000 by JSCFD

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

ここに, *C*<sub>s</sub> はスマゴリンスキー定数であり,本解析では大 規模なはく離乱流を想定し0.15 という値を用いる.また, 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.

#### 3.数值解析手法

数値解析手法の詳細は既報<sup>(5)</sup>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セットする.



Fig. 1 Coordinate System used for Computations

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<sup>(6)</sup>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<sup>(4)(5)</sup>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 り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.



Fig. 3 Head-Flow Characteristics predicted by LES

Copyright © 2000 by JSCFD

ポンプ内部流れの一例として,中心断面における瞬時の 子午面速度分布を図4に示す.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,流量の低下に伴い,羽根 車入口チップ側で逆流が発生すると共に出口ハプ側で剥離 が発生する典型的なプローパターンを示している.

最後に,羽根車出入口の流速分布を二次元レーザ流速計 (LDV)による実測結果と比較した結果を図5および図6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プローパターンを示している. 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すことなど, 流量の低下に伴う羽根車内フローパターンの変化が良く捕 らえられており,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.

## 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.

### 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,第13回数値流体力学シンポジウム講演 要旨集 B07-4 (1999).
- (6) 加藤,他2名,機論,58-552B,pp. 300 (1992).





Fig. 4 Instantaneous Axial Velocity Distributions at Center Plane



(b) Impeller Exit

Fig. 5 Impeller Inlet/Exit Time (Phase)-Averaged Velocity Distributions at Q/Q<sub>d</sub>=59.7% (from the left most column, meridional component measured by LDV, meridional component predicted by LES, circumferential component measured by LDV, circumferential component predicted by LES)



(b) Impeller Exit

Fig. 6 Impeller Inlet/Exit Time (Phase)-Averaged Velocity Distributions at  $Q/Q_d$ =49.1%

(from the left most column, meridional component measured by LDV, meridional component predicted by LES, circumferential component measured by LDV, circumferential component predicted by LES)