

LES による斜流ポンプ内部流れの非定常解析 (第1報, 解析手法)

Large Eddy Simulation of Unsteady Flow in a Mixed-flow Pump (1st Report, Numerical Method)

加藤 千幸*・清水 勇人**・向井 寛**・岡村 共由**

Chisachi KATO, Hayato SHIMIZU, Hiroshi MUKAI and Tomoyoshi OKAMURA

1. 緒 言

一般に、ポンプ内部流れは羽根車とケーシングとの動静翼干渉並びに境界層の大規模な渦に起因した非定常性を有する。特に、非設計流量においては、大規模な渦が生じ易いため、流れの非定常性も大きくなることが多い。また、羽根車とケーシングとの動静翼干渉は、羽根車の流体力変動やケーシングの圧力脈動の主要因であり、時としてポンプあるいはポンプ機場の振動・騒音問題を引き起こす場合もある。従って、このような非定常性を考慮して内部流れを解析することは、ポンプの設計・開発において極めて重要なことと考えられるが、現在ポンプの内部流れの解析に用いられている方法^{1)~6)}は全て時間平均流れを対象としたものであり、流れの非定常性を本格的に考慮できるものはない。このような状況の中、本研究の最終的な目標は、流れの非定常性を考慮できる数値解析技術を開発し、ポンプの性能向上やポンプ機場の更なる低振動化・低騒音化に寄与することにある。

本研究では、Large Eddy Simulation (LES) と移動格子法を用いることによりポンプ内部流れの非定常解析を行う。数値解析方法としては、時間・空間共に2次精度を有する上流化有限要素法^{7), 8)}を用いる。一般にポンプ内部流れのレイノルズ数は $10^6 \sim 10^8$ と高く、また、流路形状も複雑であるため、ポンプ内部流れのLES計算は通常大規模計算とならざるを得ない。そこで、本研究では領域分割法に基づく並列化も併せて実施する。

2. 基礎方程式

本研究で用いる基礎方程式は、格子サイズに対応する空間フィルターにより平均化されたナビエ・ストークス方程式であり、直交座標系において総和規約を用いて次式(1)、

及び(2)により表わされる。

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

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

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及び動粘性係数(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。即ち、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、

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

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⁹⁾とVan-Driestの減衰関数によりモデル化する。即ち、

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

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

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

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渦を想定し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 第2部

**(株)日立製作所

3. 数値解析方法

3.1 干渉計算方法

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ーセットする。流速や圧力の内挿が行われる要素や要素内座標値は羽根車の回転に応じて計算時間ステップ毎に変化し、この事により羽根車と静止流路との相対運動が考慮される。当然、流速成分のオーバーセットに関しては、互いの計算メッシュが用いている座標系の差を考慮して適切な変換を行う必要がある。なお、オーバーラップ・マージンの適切な設定の仕方や内挿計算方法の詳細に関しては参考文献^{10),11)}を参照されたい。

3.2 時間・空間の離散化方法

本研究では、以前筆者の一人が開発した上流化有限要素法^{7),8)}を用いて基礎方程式を離散化する。この離散化方法は基本的にはオイラー陽解法に基づいているが、空間残差項の評価点を、局所流速の大きさに計算の時間刻み幅を乗じた量の 2 分の 1 だけ流線方向上流側にシフトする点に特徴がある。このシフトにより、通常のオイラー陽解法の有する負の数値的粘性効果を補償し、安定でかつ高精度な解析が実現される。

連続の式の解法は Viecegli により提案された ABMAC 法¹²⁾に基づいている。即ち、運動量式を上述の方法により積分後、流れ場の発散の値が規定値以下となるまで流速及び圧力の値を同時補正し、次の時間ステップの計算へと進む。数値的離散化方法の詳細に関しては参考文献^{7),8)}を参照されたい。

3.3 並列計算方法

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。領域分割計算においては、解析領域全体を予め指定した数の小領域に分割し、複数の計算ノードがそれぞれの小領域の計算を担当する。この際、小領域間で必要なデータ通信を行うことにより、全体領域の計算と数学的に等価な並列計算を実現する。領域分割に関しては、各小領域の計算負荷を均一化するためにできる限り要素数を同じに

すると同時に、小領域間で発生する通信による計算効率の低下（通信オーバーヘッド）を最低限に押さえるために、小領域間の接続境界節点数の数を最小にすることが重要である。本研究では、要素数の均一化・接続境界節点数の最小化、並びに、必要な記憶容量・計算時間の観点から、グラフ理論に基づく様々な領域分割アルゴリズム^{13),14)}の評価を実施した。その結果、領域分割アルゴリズムとしては Recursive Graph Bisection (RGB) 法が本研究には最適であるとの結論を得た。

静止部と回転部とのオーバーラップ領域においては羽根車の回転と共に通信する計算ノードの組み合わせ（通信ペア）が変化する。通常の並列化方法では、この通信ペアの検索のために全小領域、即ち、全計算ノードに対する同胞通信が発生し、通信によるオーバーヘッドが無視できなくなる。そこで、本研究では予めシリアル計算において羽根車 1 回転分の通信ペアに関するデータを作成しておき、並列処理する LES 解析プログラムに入力データとして供給することにより、このオーバーヘッドの発生を防止している。

本研究では、種々の並列計算機環境において開発したプログラムの並列計算効率の評価を行ったが、上述したような様々な工夫により、通信による計算効率の低下は殆ど無視し得るものとなっている。一例として、(株)日立製作所製並列計算機 SR2201 を用いて並列計算効率を評価した結果を図 2 に示す。この計算機の単体計算ノードの理論最大性能は 300 MFLOPS であるが、ここでは 90 % 以上の並列計算効率を得られている。

4. 解析結果及び考察

以上説明した解析方法の有効性を確認するために、設計流量 ($Q/Q_d=100\%$)、及び、60 % 流量 ($Q/Q_d=60\%$) に対して、高比速度渦巻き斜流ポンプの内部流れを解析した。以下、主要な解析結果を報告する。なお、実験結果との詳細な比較や内部流れの検討に関しては次報で纏めて報告する予定である。

4.1 供試ポンプ

計算対象としたポンプの断面図を図 3 に示す¹⁵⁾。本ポンプは、入口旋回止め（図示せず）、4 枚羽根のシュラウド無し羽根車、及び、二重ポリユート・ケーシング型の吐出流路等から構成される渦巻き斜流ポンプである。設計点の比速度は 860 (rpm, m^3/min , m) であり、本ポンプは主として大容量の排水ポンプとして使用される。

4.2 計算メッシュ及び境界条件

今回の計算に使用したメッシュを図 4 に示す。このメッシュは、入口旋回止め部、羽根車部、及び、吐出ケーシング部の 3 つの部分から構成され、前述のようにそれぞれの

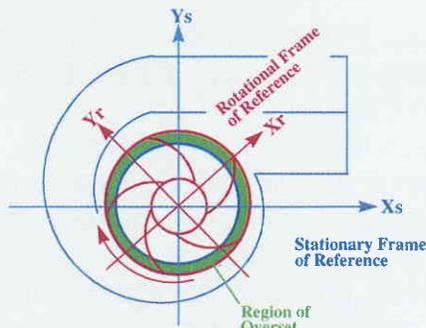


図1 解析に用いた座標系

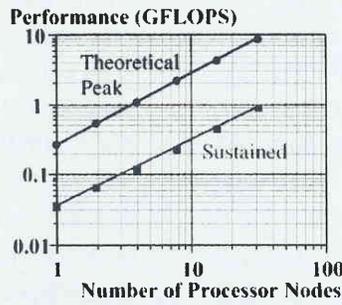


図2 並列計算効率の実測結果

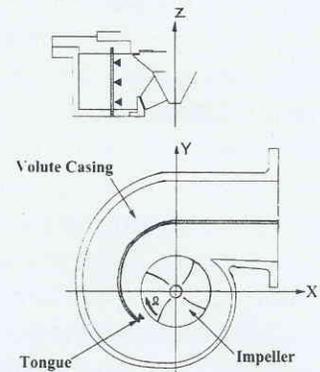


図3 モデルポンプ形状

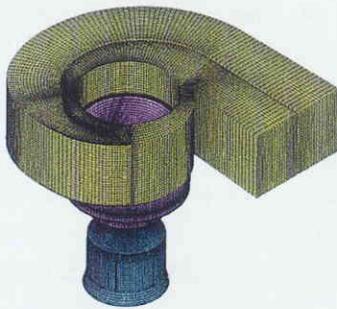


図4 計算メッシュ

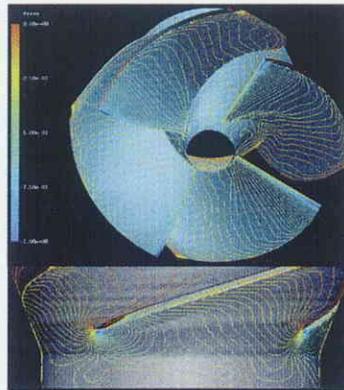


図5 羽根車表面の瞬時の静圧分布 (Q/Q_d = 100%)

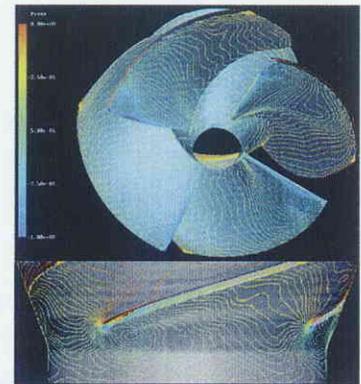


図6 羽根車表面の瞬時の静圧分布 (Q/Q_d = 60%)

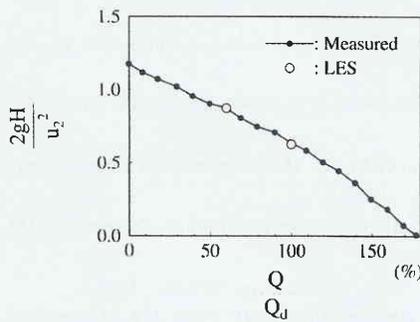


図7 ポンプ全揚程の比較

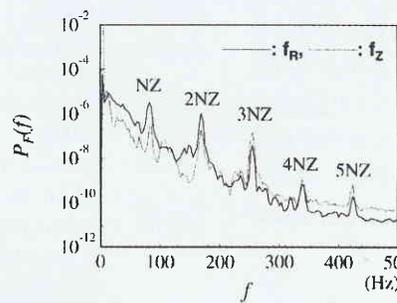


図8 計算された流体力変動のパワースペクトル (Q/Q_d = 100%)

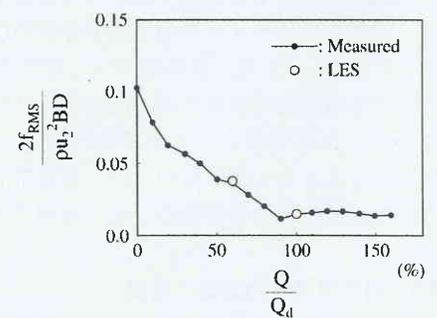


図9 羽根車流体力変動の比較

部分は適切なオーバーラップ・マージンを介してオーバーセットされている。各領域のメッシュ数は、入口旋回止め部が約15万節点、羽根車部が約50万節点、及び、吐出ケーシング部が約20万節点であり、合計約85万節点のメッシュを今回の解析に使用した。

境界条件は以下のように与えた。即ち、入口旋回止め部のメッシュの上流側境界において予旋回無しの一様流入条

件を与えた。今回の解析ではポンプ上流で発達する境界層の影響は考慮していない。一方、吐出ケーシングの下流境界においては、境界面に作用する流体の応力成分(トラクション)が零であると仮定し、所謂トラクション・フリー条件を課した。固体壁面においてはノー・スリップ条件を与え、前述のVan-Driestの減衰関数により壁面近傍のサブグリッド・スケールの渦動粘性係数 ν_{sgs} の値を減衰させ

研究速報

た. なお, 羽根車部の解析に用いている回転座標系においては, ケーシング・ライナーの内壁面は $-\Omega$ 方向に回転しているため壁面の移動速度もそのように与えている.

4.3 計算された瞬時の流れ場

計算された瞬時の流れ場の一例として, 羽根車動翼負圧面及びケーシング・ライナー表面の静圧分布を図5(設計流量の場合), 及び, 図6(非設計流量 $Q/Q_d = 60\%$ の場合)にそれぞれ示す. 設計流量(図5)においては, 羽根車の各動翼にはスパン方向にはほぼ均一な負荷が掛かっており, また, それぞれの動翼間において静圧分布の有意な差は認められない. 一方, 60% 流量の場合(図6)は, 動翼入口相対流れの(正の)迎い角が大きくなることにより, 各動翼のチップ側に大きな負荷が集中している. 動翼負圧面側の流れは, 前縁直後の領域においては離れ, 逆流領域が形成されている. しかしながら, この離れは次節で示す揚程特性からも確認されるように失速状態に結びつくものではなく, チップ側においても動翼は仕事を続けている. これは, このポンプのピッチ/コード比が比較的小さいため, 翼列効果(流路効果)により失速が抑制されたためと考えられる.

4.4 ポンプ全揚程の比較

計算されたポンプの全揚程を実験結果と共に図7に示す. 今回の解析では, 2流量点の計算しか行っていないが, 計算された全揚程は実測値と定量的に一致している. しかしながら, 動翼のリフティング効果が相対的に大きくなる, 更に比速度の高い斜流ポンプに対しては必ずしもこの程度の精度で全揚程が予測できる保証は無い. というのは, 動翼のリフティング効果は境界層のはく離に大きく影響されるが, (乱流)境界層のはく離や再付着が高精度に予測できる壁面境界条件は, LES解析に対しては提案されていないからである. 流体機械の設計にLES解析が広く用いられるようになるためには, 複雑乱流の解析に適用できる壁面境界条件の開発が必須の課題であると筆者等は考えている.

4.5 羽根車流体力変動の比較

羽根車流体力変動の一例として, 流体力変動のパワースペクトルを図8に示す. ここに, 流量条件は設計流量であり, f_r , f_z はそれぞれ半径スラスト, 軸スラストを表す. どちらの流体力成分に関しても, 動翼通過周波数 NZ の高調波成分まで計算されている. 流体力変動のRMS値を実験値と比較した結果を図9に示す. 計算された流体力変動のRMS値はどちらの流量に対しても実験値と良く一致しており, ポンプ内部流れの非定常性が正確に計算されていることが示唆される.

5. 結 言

Large Eddy Simulationと移動格子法に基づく, 斜流ポンプ内部流れの非定常解析方法を提案した. 提案する手法は, 境界層の大規模なはく離や羽根車とケーシングとの干渉等に起因する内部流れの非定常性を考慮することができる. 数値的離散化方法としては, 時間・空間共に2次精度を有する上流化有限要素法を用いており, 過度な数値粘性の影響を排除しつつ, かつ, 安定な計算が保証できる. 更に本研究では, Recursive Graph Bisectionアルゴリズムに基づく領域分割法による並列化を行い, 90% 以上の高い並列計算効率を実現した. 従って, 提案する解析方法は, 分散主記憶型の並列計算機を利用した大規模計算に適用することが可能である.

提案する手法の解析精度の検証と有効性を確認することを目的として, 比速度 860 (rpm, m^3/min , m)の渦巻き斜流ポンプの内部流れを設計流量($Q/Q_d = 100\%$), 及び, 60% 流量($Q/Q_d = 60\%$)の2流量において計算した. その結果, 両流量においてポンプ全揚程, 羽根車流体力変動, 並びに, ケーシング内圧力脈動の予測値は実験値と定量的に一致し, 本解析方法による斜流ポンプ内部流れの予測に対して有望な見通しが得られた.

(1999年11月22日受理)

参 考 文 献

- 1) Dawes, W. N., ASME Paper No. 88-GT-70 (1988).
- 2) Denton, J. D., ASME Journal of Turbomachinery, 114, pp. 18-26 (1992).
- 3) Hah, C., et al., ASME Journal of Turbomachinery, 110, pp. 303-311 (1988).
- 4) Goto, A., ASME Journal of Turbomachinery, 114, pp. 373-382 (1992).
- 5) Takemura, T., and Goto, A., ASME Journal of Turbomachinery, 118, pp. 552-561 (1996).
- 6) Kaupert, K. A., et al., ASME Journal of Fluids Engineering, 118, pp. 685-691 (1996).
- 7) 加藤・他2名, 機論, 58-552 B, pp. 300-307 (1992).
- 8) Kato, C., and Ikegawa, M., ASME FED 117, Advances in Numerical Simulation of Turbulent Flows, pp. 49-56 (1991).
- 9) Smagorinsky, J., Mon. Weath. Rev., 91-3, pp. 99-164 (1963).
- 10) Ikegawa, M., et al., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 112, pp. 149-163 (1994).
- 11) Kaiho, M., et al., Int. J. Numer. Meth. Fluids, 24, pp. 1341-1352 (1997).
- 12) Viecegli, J. A., J. of Compt. Phys., 8, pp. 119-143 (1971).
- 13) Simon, H., Comput. Sys. Engrg., 2, pp. 135-148 (1991).
- 14) Farhat, C., and Lesoinne, M., Int. J. Numer. Meth. Engrg., 36, pp. 745-764 (1993).
- 15) 清水・他3名, 機論, 63-614 B, pp. 130-137 (1997).