

遠心圧縮機の空力騒音低減の研究

プロジェクト責任者

三浦 治雄 株式会社日立プラントテクノロジー

著者

三浦 治雄^{*1}、西田 秀夫^{*1}、小林 博美^{*1}、高野 靖^{*2}、岡部 壮志^{*3}、張 会来^{*3}、福留 肇^{*3}、
西川 憲明^{*4}

*1 株式会社日立プラントテクノロジー

*2 株式会社日立製作所機械研究所

*3 アドバンスソフト株式会社

*4 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成19年7月11日～平成20年3月31日

アブストラクト

石油精製プラントやガスパイプラインなどの幅広い分野で使われている産業用遠心圧縮機は、高い信頼性と高性能と同時に、最近では作業環境の観点から騒音低減の要求も強い。本プロジェクトでは、羽根付ディフューザを備えた遠心圧縮機の共鳴現象の解明とその予測を目的とする。

圧縮機内部流れの解析から空力騒音の知見を得るためには、遷移音速領域にある圧縮機内部の非定常流れを、時間軸を含め定量的に評価する必要がある、そのためには地球シミュレータを利用した圧縮性流れの大規模非定常（ラージエディシミュレーション、LES）解析が必要となる。

本プロジェクトでは、まず簡易モデルによる予備的解析を行い、変動圧力分布が実測値と定性的に一致することを確認した。一方で地球シミュレータ上での計算は改善の余地があることも判明した。今後、引き続き本プロジェクトを進め、騒音低減の技術革新に寄与する。

キーワード： 騒音、共鳴、遠心圧縮機、圧力変動、LES

1. はじめに

プロセス遠心圧縮機の構造例を図1に示す。プラントの心臓部として使用されるプロセス用圧縮機は高い信頼性と高効率が要求される。高効率実現のための手段として羽根付ディフューザの使用が挙げられるが、羽根車の出口直後にこのようなディフューザを配置すると、大きな騒音を生じることがある。単段の圧縮機試験設備で、実験的に騒音発生現象を調べた結果、大きな騒音が発生するとき羽根付きディフューザ内に音響的な定在波と見られる圧力変動が計測されたことが報告されている。また、解析的な騒音発生現象の検討では、ディフューザ羽根と羽根車の羽根枚数の組合せによる調和振動的な加振力と羽根車前後にあるケーシングとの平面空間の音響固有値との共鳴現象が大きな騒音発生に関係していることが報告されている^{1) 2)}。

しかしこのような共鳴現象の解明のために、圧縮機内部空間の流れや音の伝播を実験的に調べるのは容易でない。一方、これまでの解析的な騒音現象解明では、羽根車の回転や高速の流れを無視しており、圧力変動の定量的な検討や予測ができるまでには至っていない。また解析上、圧縮機の運転回転速度内に音響固有値は複数存在するが、その中でどのようなモードで強い共鳴が生じるかについても明らかでない。

そこで、本プロジェクトでは、ラージエディシミュレーション（LES）で、圧縮性流れ場の大規模解析をすることにより、圧縮機内部空間の流れを把握し、共鳴のメカニズムをより詳細に解明することを試みることにした。具体的には、大きな騒音が発生した圧縮機作動点とそうでない作動点の流れ解析を行い比較する。また羽根付きディフューザ流路の変動圧力分布を実験結果と比較する。

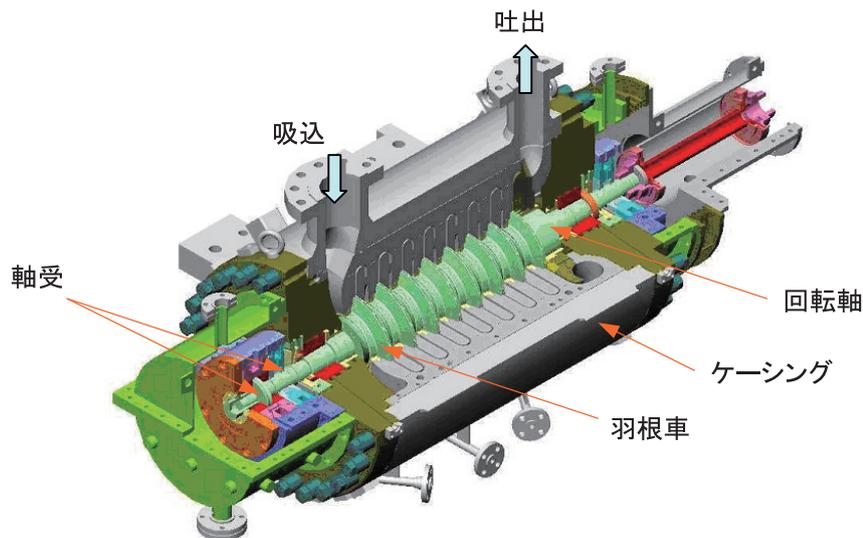


図1 プロセス用多段遠心圧縮機

2. 解析対象

本プロジェクトで解析対象とした羽根付ディフューザを備えた遠心圧縮機は、工業プラント内の騒音源の一つで、特定の運転条件下で高い騒音が発生することがある。圧縮機の効率向上を図る上で羽根付きディフューザは有効であり、その騒音低減が求められている。

騒音低減を実現するためには、より詳細な騒音の発生機構の解明が重要である。これまでの研究^{1) 2)}から、異常騒音の原因は圧縮機内部の音響共鳴と推定される。音響共鳴として(1)ディフューザ流路内の気柱共鳴、(2)動静翼干渉による流体加振による空間全体の共鳴、等のメカニズムが考えられる。従来の研究は静的な解析であり、実際の圧縮機運転中の現象を理解するためには、3次元非定常流れ場を考慮した共鳴の応答解析が必要である。

対象となる圧縮機は図1のような多段圧縮機であるが、今回はまず、図2に示す単段のモデル圧縮機について解析を行い、実測の圧力変動と比較することにした。

3. 解析手法

3.1. 遠心圧縮機の解析方法

共鳴解析は流路内流体の圧力の時系列変動データから周波数解析を行い計算する。本プロジェクトは以下の方針で進める。(1)単段のモデル圧縮機を使って、圧縮機特性や騒音特性を実測する。

- (2) モデル圧縮機と同一形状の計算格子を作成し予備的解析を行い計算コードの信頼性を確認する。
- (3) 流路内の圧力変動について周波数解析を行い、実測値と比較し、結果を考察する。

3.2. 計算コード

数値解析には、文科省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発³⁾」で開発された FrontFlow/red を元に改良を加えたソフトウェアを使用した。

本プロジェクトでは、運動方程式の解法に Adams-Moulton 法を選択し、時間、空間 2 次精度の解析を行った。サブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを使用した。

FrontFlow/red は領域分割にもとづく並列計算が可能である。地球シミュレータを用いた解析では、領域分割による Message-Passing Interface (MPI) を利用したノード間並列計算を行った。また、本プロジェクトのために圧縮性流体解析アルゴリズムならびにスライディング境界処理を開発し、地球シミュレータ向けにベクトル計算機用のチューニングを行った。ベンチマーク結果ではベクトル化率 97.67%、並列化率 99.31% を実現した。

3.3. 計算格子

遠心圧縮機形状の解析領域を図 3、図 4 に示す。これは実験に用いた図 2 の単段モデル圧縮機と同一形状である。図 2 に示すように、流れは吸込流路から流入し、羽根車、ディフューザで昇圧され、リターンチャンネルを経て流出する。羽根車は回転するが、ディフューザおよびリターンチャンネルは静止翼列である。回転する羽根車の両側には静止壁となす空間（側面空間）が存在するが、この空間も共鳴に関係する空間と考え、解析領域に含めた。計算格子は 2 種類用意し、予備的解析に簡易モデルを、本計算には詳細モデルを利用する。それぞれの詳細は表 1 にまとめた。

作動流体は空気とし、物体表面の境界条件は No Slip Wall とした。流入条件は質量流量一定、流出条件は圧力一定とし、実験条件と合わせた。またラビリンスからの漏れについては漏れ流量を見積り、補正を加えた。

表 1 解析格子

	総要素数	総節点数	要素形状
簡易モデル	90 万要素	100 万節点	6 面体
詳細モデル	970 万要素	1000 万節点	6 面体

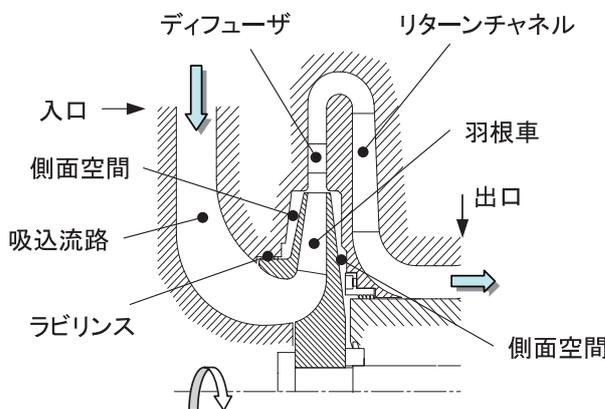


図 2 モデル圧縮機断面形状

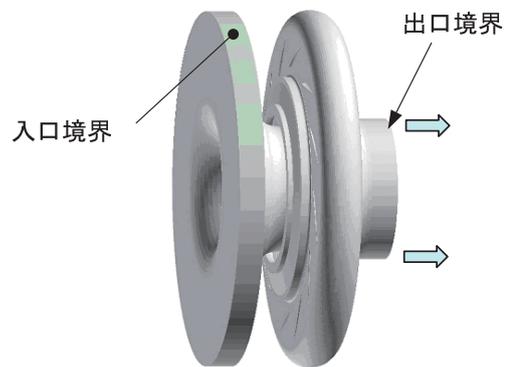


図 3 解析領域全体図

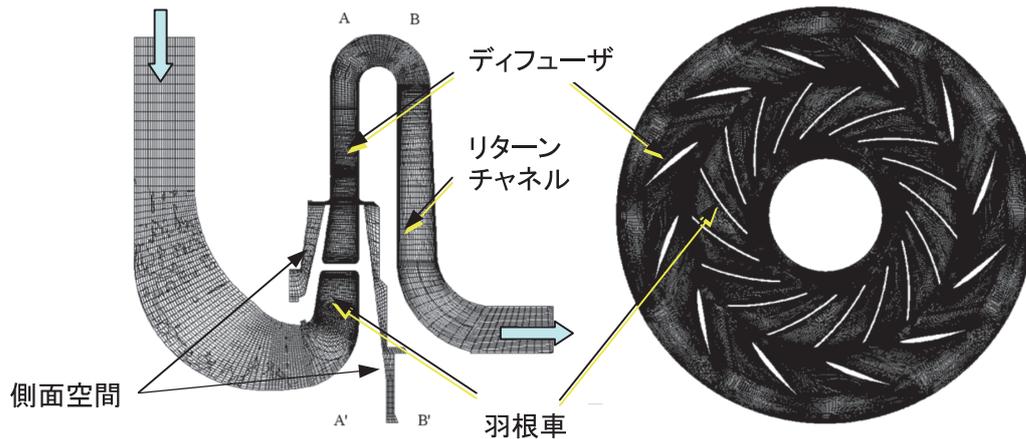


図4 解析メッシュ (左) 回転軸を含む面 (右) 回転軸に垂直な面 (A-A')

4. 解析結果

4.1. 予備的解析の結果

まず簡易モデルを用いて解析し、圧縮機の特性格線や流れ分布について実験結果と比較して、計算コードの妥当性を検討した。そして次に流路内の圧力データの時系列データを用いて周波数解析を行い、変動圧力の分布について実験結果と比較検討した。

4.1.1. 圧縮機特性と流れ分布

計算コードの検証のために、圧縮機の特性格線を計算し実験値と比較する。圧縮機の特性格線は理論圧力係数 h_{th} 、圧力係数 h_{ad} 、効率 η_{ad} で評価する。それぞれ以下の式から計算される。

$$h_{th} = \frac{1}{g} C_p (T_{out} - T_{in}) / H_{th ref.}$$

$$h_{ad} = \frac{1}{g} \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_{in} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] / H_{ad ref.}$$

$$\eta_{ad} = \frac{H_{ad}}{H_{th}} / \eta_{ad ref.}$$

ここで g は重力加速度、 C_p は定圧比熱、 κ は比熱比、 R は気体定数、 T_{in} (T_{out}) は流路入口 (出口) の全温、 P_{in} (P_{out}) は流路入口 (出口) の全圧を表す。

圧縮機の特性格線について、実験値と計算結果を図5に示す。地球シミュレータ上での計算と並行して、コードの確認のためにスカラー計算機上でも計算を行った。図5より、設計流量点ではスカラー計算機の計算結果は実験値をほぼ再現しているが、地球シミュレータの計算結果は実験値より大きくなっている。これは、地球シミュレータの計算において温度場の計算が数%実験と異なるために生じた差である。他方、速度場については速度三角形などを比較することにより、地球シミュレータ上での計算結果は実験値を再現することを確認できた。現状ではこのように地球シミュレータ上での計算コードに調整の余地があることを念頭に入れつつ予備的解析を進める。この点は、今後本プロジェクトを進める上で解決すべき点である。

また、設計流量点での圧縮機内の圧力分布を図6に示す。羽根車によって流体が下流方向へ圧縮さ

れており、全体的には妥当な結果になっていると考える。

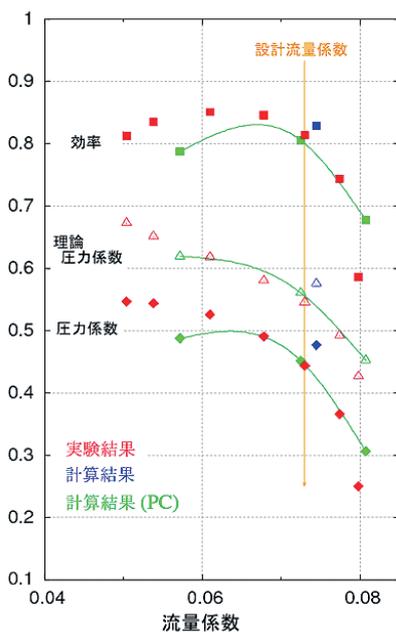


図5 モデル圧縮機の特性

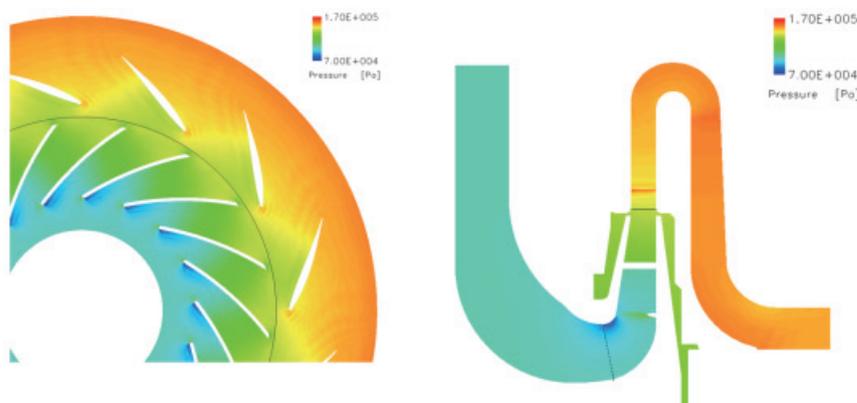


図6 圧縮機内圧力分布図

4.1.2. ディフューザ翼間の変動圧力分布

圧縮機の騒音レベルは圧縮機の回転速度に依存して変化することが分かっている。図7は圧縮機の騒音特性（実測値）を示し、回転速度を変えたときの騒音の変化を示す。回転速度の増加に伴い、騒音のオーバオール値（O.A.）は増加傾向にある。また騒音の翼（羽根）通過周波数（Blade Passing Frequency, BPF）成分はO.A. 値に比べて総じて10dB程度低い。しかし共鳴を起こす 9300min^{-1} 付近に高いピークが見られ、このようなピークではBPF成分が支配的な騒音になっている。図8はこの実験に用いたディフューザの羽根形状と、羽根間の圧力変動計測位置を示す。

ディフューザ羽根間の変動圧力の解析では、騒音レベルのピークとなる運転条件（ 9300min^{-1} 、共鳴点）と比較的穏やかな運転条件（ 11400min^{-1} 、非共鳴点）の2ケースを計算した。流路内の観測点（図8の圧力センサ位置）に対応する点で圧力変動の時系列データを記録し、周波数変換して翼通過周波数成分の圧力変動を求めた。

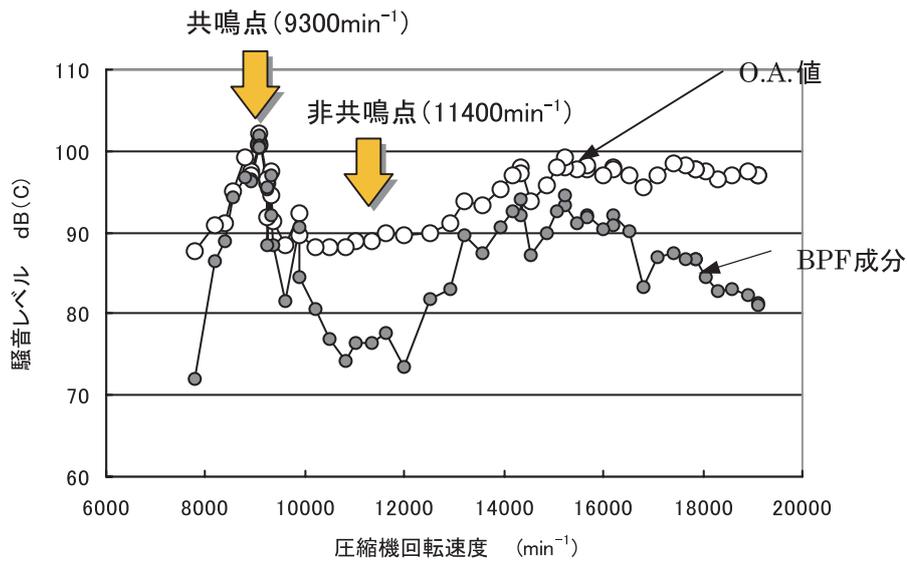


図7 圧縮機の回転数に依存した騒音レベルの変化

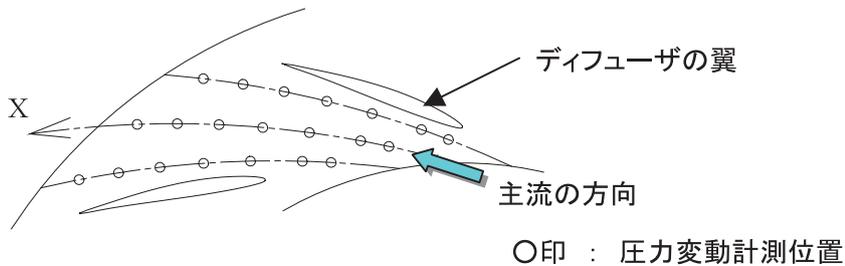


図8 圧力変動の観測点

図9に実験で得られた結果を、図10に予備的解析で計算された結果を示す。図の横軸は、図8に示した流れ方向の距離 X で、観測点は実測、解析ともに1流路内で3系統あるが、 X は全て流路中央に対して投影したときの値で整理している。

図9の左図(共鳴点)には、流れ方向距離に沿って2山の分布が認められるが、右図(非共鳴点)はフラットな分布である。これに対し、図10の計算結果は共鳴点の2山分布と非共鳴点のフラットな分布を再現している。以上より今回用いた計算コードは、定性的には圧縮機内の変動圧力の分布を正しく計算していることが分かった。計算格子の解像度を上げれば定量的にも実験結果に近づくものと期待される。

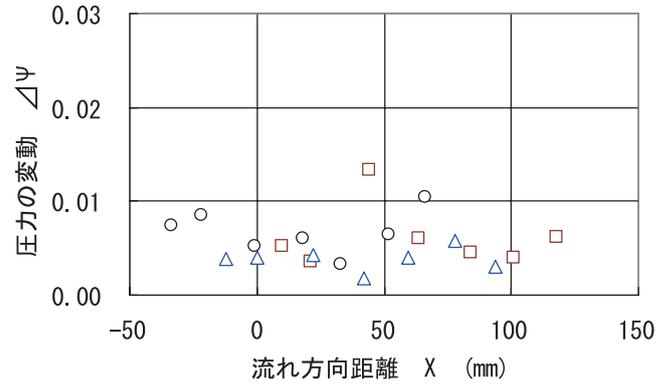
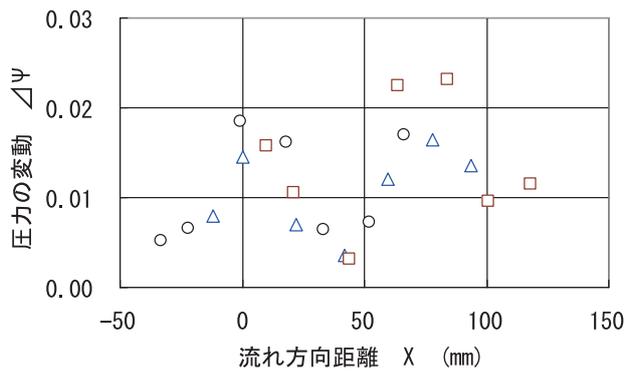


図9 ディフューザ流路内の圧力変動（実測値） 左：共鳴点 右：非共鳴点

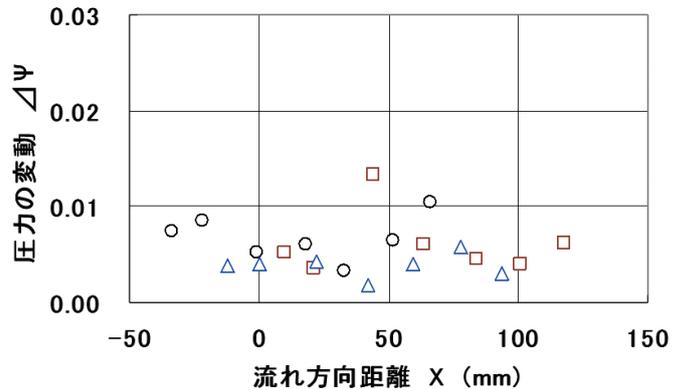
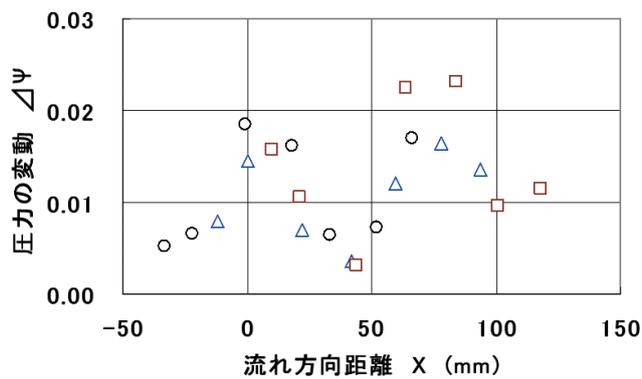


図10 ディフューザ流路内の圧力変動（計算値） 左：共鳴点 右：非共鳴点

4.2. 本解析の展望

予備的解析に使用した計算格子は格子解像度が渦構造を捉えるには大きく LES 解析には不十分である。そこで格子数を 10 倍程度多くして（表 1 の詳細モデル）計算を行う予定である。そこでは非定常乱流をより正しく計算でき、前節の定量的な結果がより実験結果に近いものになると期待される。また圧力変動についても、ディフューザ内 1 流路だけでなく圧縮機内を全面的に解析し、共鳴モード等のより詳細な検討を行う予定である。

5. まとめ

地球シミュレータによる圧縮性流れの大規模 LES 解析を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 今回改良した計算コードは、スライディング境界を含む非定常圧縮性流れを基本的に計算できることを確認した。一方で地球シミュレータ上での計算はコーディングに改善の余地があることも判明した。
- (2) 流路内の圧力変動について、予備的解析を行い共鳴・非共鳴点の圧力変動分布の違いを定性的に再現することができた。

本プロジェクトで得られた知見から本解析を通じてより詳細な共鳴現象の知見が得られるものと期待され、本プロジェクトのさらなる推進が必要である。

謝 辞

計算コード FrontFlow/red は文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの一環として、東京大学生産技術研究所で開発されたものである。

地球シミュレータの利用に際しては、独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部の平野哲 部長、北脇重宗 調査役、新宮哲 産業利用推進グループ グループリーダーから、ご指導ご協力を頂いた。

ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高野靖, 小林博美, “遠心圧縮機内部空間における共鳴現象の解明”, 日本音響学会 58 巻 4 号, pp.217 -223, 2002.
- 2) 小林博美, 西田秀夫, 三浦治雄, 吉海寛人, “遠心圧縮機の騒音に関する研究 (第 1 報、ディフューザの羽根の影響)”, 日本機械学会論文集 (B 編) 62 巻 598 号, 1996.
- 3) 文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」ホームページ、<http://www.ciiss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/index.html>