

大規模数値流体解析による流体音の予測

加藤千幸

東京大学生産技術研究所

1. はじめに

流体騒音は流れの中に存在する渦の非定常運動に起因して発生し、流速の増加にともない急激に増大するため⁽¹⁾、その予測と低減は多くの工学分野において重要な課題となっている。一方、昨今の計算機性能の向上や数値解析技術の進歩とにより、数値解析による空力音の予測に大きな期待が集まっている⁽²⁾。本稿では特に、ファン、自動車、高速車両などの機械工学分野における空力音の数値シミュレーションの現状と今後の課題を概説したい。

なお、本稿は日本ガスタービン学会誌 2005 年 11 月号に執筆し、掲載された解説記事の一部、加筆・修正したものであるため、上記解説記事と重複する点が多いことを予めお断りしておく。

2. 流体音の分離計算

流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式は音波の伝播も表すため、圧縮性も考慮したナビエ・ストークス方程式を連続の式およびエネルギー方程式と連立して解くことにより、音源の変動も含めて流体音の伝播まで予測することができる。このような方法は流体音の直接計算とよばれており、高速気流から発生する空力音の予測や、基本的な流れから流体音が発生するメカニズムの解明に適用されている。しかし、低速の流れから発生する流体音を予測するためには、音源となる流れの非定常変動と音の伝播とを別々に計算する分離計算を用いるのが一般的である。分離計算では発生した音が音源の変動に与える影響は考慮することはできないが、低速の流れから発生する音の変動は流れの変動に較べて桁違いに小さいため⁽¹⁾、音から流れへのフィードバック効果は特殊な場合を除いて無視することができる。流れ場と音場とを別々に計算することにより、音源と音波の空間スケールや変動強度の違いに起因する数値解析上の困難を排除することができる。さて、流体騒音も流れの微小変動であるため、流れの基礎方程式を変形することにより、音の伝播を表す波動方程式 (Lighthill 方程式) を得ることができる⁽¹⁾。物体の寸法に比較して波長 (正確には波長/2π) が長い、つまり、比較的低周波数の音の場合、音源は点音源とみなすことができ、音の伝播に関しては解析的な取り扱いが可能である。無限流体中 (自由音場) に置かれた物体から発生する低周波数の空力音であれば、物体表面の圧力変動から Curle の式 (1) を用いて解析的に

求めることができる⁽³⁾。

$$p_a = \frac{1}{4\pi a} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S n_i p(y, t - r/a) dS \quad (1)$$

ここに、右辺は音源となる物体表面 S における流れの静圧変動 p を表し、左辺が遠方場 x_i の音 $p_a(x_i, t)$ を表す。 a は静止流体中を伝播する音波の速度、すなわち、音速であり、 r は観測点 x_i と音源点 y との間の距離、 n_i は物体表面 S における外向き単位法線ベクトルをそれぞれ表す。

物体以外の境界における音波の反射や吸収は式 (1) では考慮されていないが、それらが問題となる場合でも、音源となる物体表面の流れの静圧変動が計算できれば、境界要素法などによる音響計算と組み合わせることにより、発生する流体音を予測することができる。また、ファンの動翼などの回転機械から発生する流体音を予測する場合は、動翼の回転の効果も考慮する必要があるが、これに対しては、Curle の式を回転がある場合にも拡張した式が導出されている⁽⁴⁾。ただし、動翼翼端の回転速度が数 10m/s 程度以下の場合には、一般に音源が回転している効果は無視でき、物体表面の静圧変動が支配的な音源となる。

分離計算においては音源領域は音波のスケールに比較して小さいことが前提となっているため、音源となる流れの変動を求める計算では、流体の圧縮性を考慮する必要はない。比較的低速の流れから発生する流体音を予測するためには、音源となる流れの渦の変動を精度良く解析することが重要であるが、このためには LES (Large Eddy Simulation) とよばれる手法⁽⁵⁾が最も有望である。工学的な乱流計算に一般的に用いられている、RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes Simulation) とよばれる手法では、原理的に乱流の非定常変動に起因する流体音のスペクトルを予測することはできない⁽⁵⁾。以下では、実用的にどの程度の予測が可能になっているかということをも具体例を示しながら概説するが、計算手法の詳細に関しては参考文献 (6) (7) を参照されたい。

3. ブラフボディから発生する空力音⁽⁸⁾

自動車のドアミラーや新幹線車両のパンタグラフなどから発生する空力音はいわゆるブラフボディ騒音であり、現状でも数百万点程度の格子を用いた LES 解析により、その周波数スペクトルの定量的な予測が可能である。ブラフボディまわりの流れにおいては、大きな渦から小さ

な渦へ比較的単純なエネルギー授受がなされていると考えられるが、物体からはく離れた直後の乱流遷移をどこまで正確に予測できるかということが、騒音スペクトルの予測精度を決定する。ブラブボディまわりの流れから発生する空力音の予測の一例として、自動車用ドアミラーの模型から発生する空力音を予測し、実測値と比較した結果を図1に示す⁽⁸⁾。

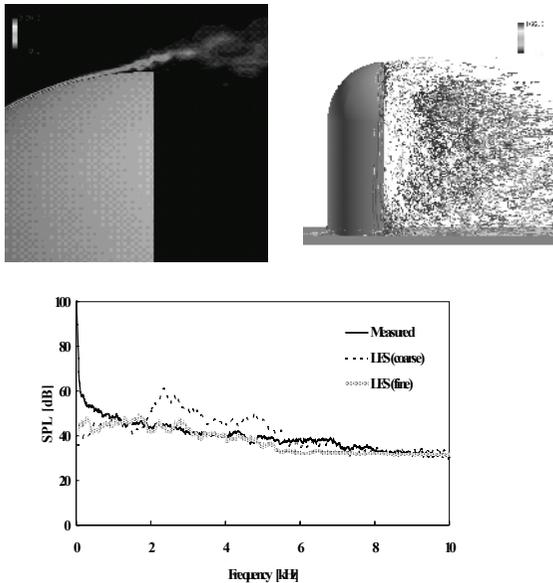


図1 ドアミラーモデルまわりの非定常流れと発生騒音の予測⁽⁸⁾。

4. ターボ機械から発生する流体音

ファンやポンプなどのターボ機械から流体の変動に起因して発生する騒音は、動翼と静翼との干渉により発生する干渉騒音、上流の乱れにより発生する騒音、および動翼や静翼自体から発生する騒音（セルフノイズ）に大別される。これ以外に、有限の厚みのある翼が回転していること自体により発生する騒音（翼厚み騒音）や負荷が掛かっている翼が回転することによる騒音（翼荷重騒音）⁽⁴⁾などもあるが、低速のターボ機械の場合、翼厚み騒音や翼荷重騒音は一般に無視でき、また、これらに関しては、翼形状や定常的な翼負荷から比較的簡単に計算することができる⁽⁴⁾ので、本稿では説明は割愛する。

4.1 干渉騒音 干渉騒音の音源はポテンシャル干渉や後流干渉に起因する圧力変動である。多段遠心ポンプの圧力変動をLESにより予測し、実測値と比較した結果を図2に示す⁽⁹⁾。設計点運転では動翼通過周波数（NZ成分）およびその高調波成分が全体の騒音のオーバーオール値

を支配するが、非設計点運転では乱流の変動に起因する広帯域成分の寄与が大きくなる。図示はしていないが、このような傾向も含めて、音源となる圧力変動の周波数スペクトルをLES解析により定量的に予測可能であることが確認されている⁽⁹⁾。なお、このケースの場合、物体表面の圧力変動により発生した音は主としてケーシング内を弾性波として伝播し、機器外に放射される。本研究では、固体内の音の伝播解析および固体表面からの放射音解析も併せて実施した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。図3に示すように、これら一連の解析により最終的に予測された騒音の周波数特性も実測値と良く一致している⁽¹¹⁾。

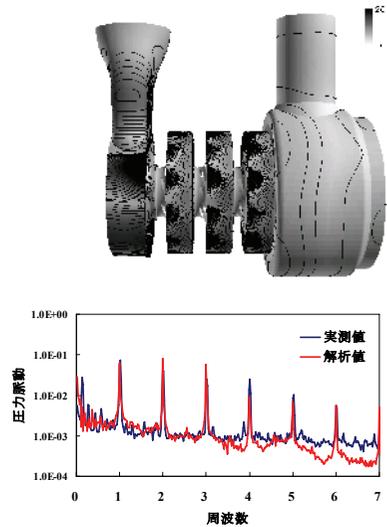


図2 産業用多段遠心ポンプの圧力脈動解析結果⁽⁹⁾。

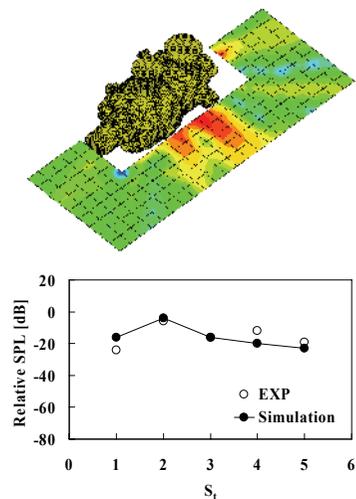
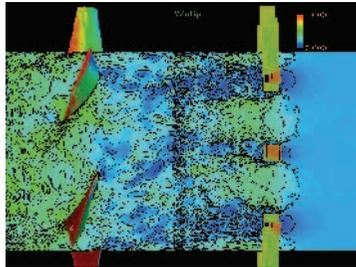
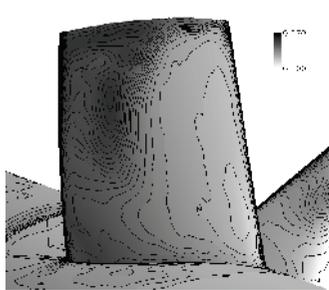


図3 産業用多段遠心ポンプの騒音解析結果⁽¹¹⁾。

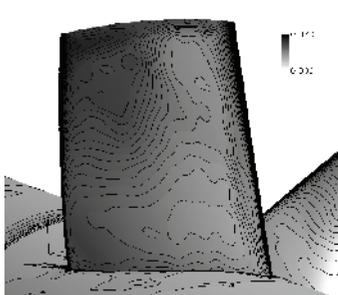
4.2 上流乱れにより発生する騒音 一般に動翼や静翼などの揚力を発生している物体に乱れが流入すると、迎角の急激な変化により、大きな揚力変動が発生し、騒音が著しく増大する原因となる。実際の機器においては、ファンの上流に熱交換器やルーバなどの乱れを発生するものが置かれることが多いため、このような場合の騒音予測も重要な課題である。



(a) 瞬時の流れ場の様子



(b) 乱れが無い場合の動翼負圧面の圧力変動



(c) 乱れが有る場合の動翼負圧面の圧力変動

図4 上流乱れにさらされる軸流ファン動翼まわりの非定常流れの解析結果⁽¹²⁾。

上流乱れにより発生する空力音に関しては、流入する乱れの空間スケールと翼の大きさとの関係が重要であるが、音の発生機構はポテンシャル的であるため、乱れのスケールを正確に予測することが騒音スペクトル予測の鍵を握っている。上流乱れにさらされる軸流ファンまわりの流れを解析した結果を図4に示す。本稿には示して

いないが、上流に置かれた乱流格子により生成された乱れの長さスケールやその強度も定量的に予測できることが確認されている。中段および下段には、動翼表面の静圧変動分布を示すが、上流乱れがある場合は前縁近傍の静圧変動が大幅に大きくなっていることがわかる。図5には簡易な音響モデルを用いて、発生する騒音の音響パワーを予測し、実測値と比較した結果を示す。音響パワーの絶対値のレベルや、上流乱れがある場合は無い場合と比較して音響パワーが10dB程度増大する傾向は定量的に予測されている。

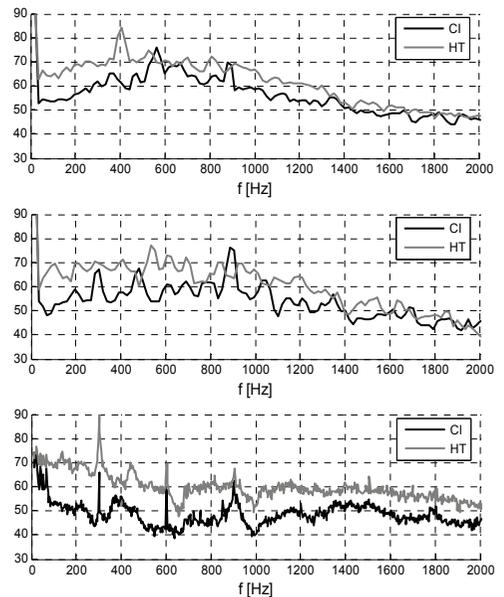


図5 上流乱れにさらされる軸流ファン動翼から発生する騒音の予測結果⁽¹²⁾。(上段は一枚の動翼に作用する変動力からの騒音を予測した結果、中段は羽根車に作用する変動力から騒音を予測した結果、下段は実測値)

4.3 翼自体から発生する騒音 翼自体から発生する空力音を予測するには、乱流境界層中の小さなスケールの渦の変動を高精度に予測する必要があるが、最近までは定量的な予測は実現されていなかったが、筆者らの最新の研究成果によれば、レイノルズ数 10^5 程度の比較的低レイノルズ数の翼まわりの流れであれば、発生する騒音の定量的な予測が可能であることが確認された。

図6は迎え角9度の一様流中に置かれたNACA0012翼まわりの境界層のはく離や遷移の様子ならびに発達した乱流境界層のストリーク構造を示す。一様流速度と翼弦長とから定義されるレイノルズ数は 2×10^5 であり、解析には約800万点の計算格子を用いている。

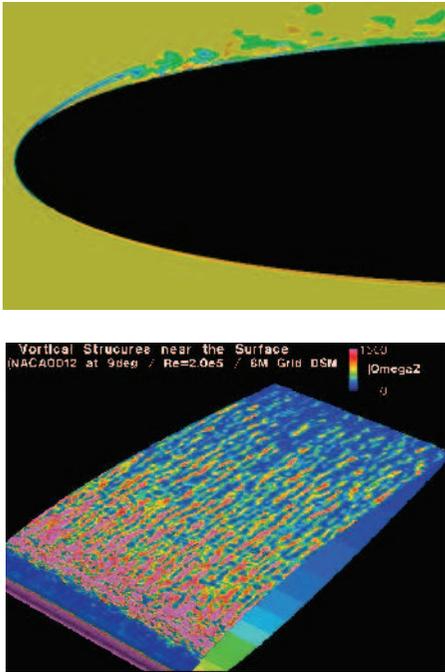


図6 翼まわりの遷移境界層の非定常解析結果⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

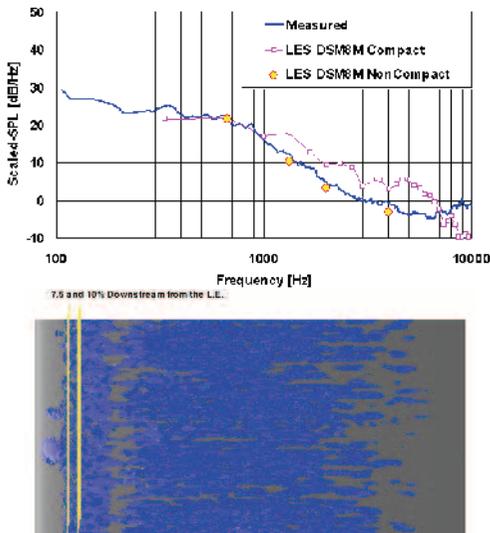


図7 翼まわりの遷移境界層から発生する騒音と騒音源の予測非結果⁽¹⁴⁾

負圧面側に境界層は前縁から翼弦長の2%程度の位置において層流はく離し、同8%程度の位置において再付着し、乱流境界層に遷移していることがわかる。本稿には示していないが、翼表面の静圧変動や後流中の流速変動の周波数スペクトルも定量的に予測されている。

図7は発生する騒音を予測し、実測値と比較した結果

であるが、騒音についても定量的な予測が実現されている。ただし、本ケースのように音源の領域に比較して波長の短い音、すなわち、高周波数の音まで予測する場合には、音源が波長に較べて小さいことを仮定している前述の Curle の式は用いることができず、渦音源から音が発生し、翼表面で反射し、観測点に到達するまでの位相差を考慮する必要があることを付記する。

5. 流体音の直接計算

音源の変動と音の伝播とを同時に解析する直接計算においては、流体中を伝播する波である流体音を正確に計算するために、数値的な散逸や位相誤差の小さい数値解法を用いる必要があり、また、人為的に設置する外部境界における非物理的な音の反射を防止する必要がある。流体音の直接計算に適した数値解析手法に関しては、欧米を中心として1990年代から盛んな研究が行われてきたが、現在では空間6次精度のコンパクトスキームを無反射境界条件と組み合わせて使用することがほぼ標準的な手法として定着しつつある。

流体音の直接計算の本質は「流れの渦運動による音の発生を計算格子により捕らえる」ことにある。このため、直接計算には、渦と音波の空間スケールの違いに起因する数値計算上の困難が伴う。これらのスケールの比はマッハ数が小さいほど大きくなるため、低速の流れから発生する流体音を直接計算することは特に困難である。たとえば、境界層から発生する流体音を直接計算する場合、境界層内の渦を捉えるための細かい計算格子上を音速で伝播する音波も同時に計算するため、計算の時間刻み幅を極端に小さくする必要がある。このため、音波の伝播を正確には考慮しない通常の圧縮性流れの計算に比較して時間ステップ数も長大化する。低速の流れから発生する流体音を直接計算する最大の利点は、分離計算では求めることができない、音から流れへのフィードバック効果を計算可能なことにあると筆者は考えている。

音と流れの直接計算の例として、低圧のタービン翼列(T106)内の遷移境界層の計算結果を図8、図9に示す⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。計算には600万点程度の格子を用い、数値解析方法としては6次精度のコンパクトスキームにLES解析のサブグリッドスケールモデルとして10次精度の高次フィルタリングを組み合わせで使用している。本計算では翼列に流入する主流が乱れを含む場合と含まない場合とで境界層のはく離や遷移のメカニズムの差異を検討した。図8において、翼負圧面近傍の比較的小さいスケールの濃淡は流れの中の渦を表し、一方、翼列内全域に広がる濃淡は渦から発生した音波を表す。また、図9は負圧面近傍の流れの三次元構造を現す。上流乱れを含まない場合(それぞれの図の上段)には翼列後縁から非常に

強い音波が発生し、それが境界層内の渦を膨張、収縮されていることがわかった。一方、乱れを含む場合（それぞれの図の下段）には前述のような二次元的な渦構造は生成されず、乱流斑点が生成される遷移過程をとる。このように流体音の直接計算は音から流れへのフィードバック効果が無視できない場合に対する、強力な現象解明ツールとして活用されることが期待される。

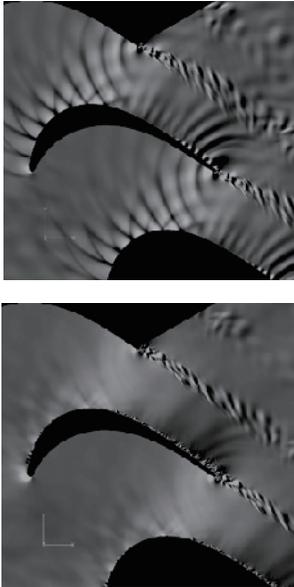


図8 上流乱れにさらされるタービン動翼まわりの遷移境界層の非定常解析結果⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

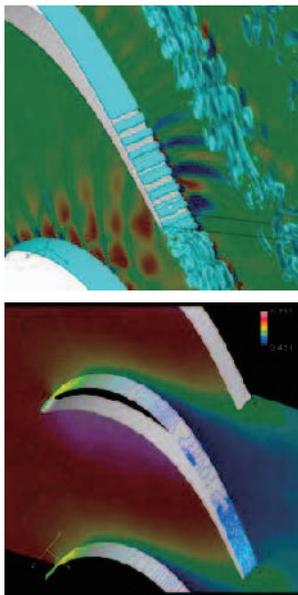


図9 上流乱れにさらされるタービン動翼まわりの遷移境界層の非定常解析結果⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾（続き）。

6. おわりに

スーパーコンピュータに代表されるハイエンド計算機の性能の飛躍的な向上に伴い、流れから発生する音を数値流体計算に基づいて予測することが可能になりつつある。特に本稿では、機械工学において重要度の高い、比較的低速な流れから発生する流体音の予測に関して、LES (Large Eddy Simulation) により音源の変動を計算し、音響解析により遠方場音を求める分離計算を中心としてその現状を概観した。ブラフポティまわりの流れから発生する音、流体機械の動静翼干渉や上流乱れにより発生する音に関してはすでに定量的な予測が実現されていることを示した。翼自体から発生する騒音に関しては実用レベルには達していないものの、比較的レイノルズ数の低い単独翼まわりの流れから発生する騒音に関しては定量的予測の目処は立っており、計算機性能のさらなる向上とともに、将来的にはこのような騒音の予測も実用化されるものと期待される。

一方、低速の流れ場から発生する音の直接計算に関しては、分離計算と比較して計算時間の長大化は避けられない。しかし、低速の流れ場から発生する音であっても、音から流れ場へのフィードバックが生じる場合もあり、直接計算はこのような場合に適用できる唯一の手法として威力を発揮するものと期待される。

謝辞

本稿の掲載した計算の実施には、東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ SR8000 ならびに SR11000、(独)宇宙航空研究開発機構の地球シミュレータの計算機資源を使用させて頂いた。本研究で計算に用いた LES プログラムは、筆者が(株)日立製作所機械研究所に在職中に開発されたものである。現在は、筆者が研究代表を務める、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の研究開発」プロジェクトにおいて、みずほ情報総研(株)山出吉伸氏、東京大学生産技術研究所 Yang Guo 博士、アドバンスソフト(株)西村香純博士らと共に、引き続き、実用化を目指した開発・改良を行っているものである。また、流体音の数値解析の実用化を目指して、多数の研究機関との共同研究を実施しているが、特に、本稿に掲載した解析結果は、(株)日立製作所、(株)日立インダストリーズ、(財)鉄道総合技術研究所、市光工業(株)およびドイツ連邦共和国の Siegen 大学との共同研究の成果である。遷移境界層の LES は元本学大学院学生 宮澤昌史君、ならびに松浦一雄君の研究成果であり、これらの研究は東京大学の 21 世紀 COE プログラム「機械システムイノベーション」から援助を受けている。さらに、工学院大学の水野明哲教授、ならびに、同飯田由明助教授には騒音計測を進めるにあ

たって貴重なご指導と多大なご協力を頂いている。それぞれここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- (1) Lighthill, M. J.: On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, **211** (1952), 564-581.
- (2) 加藤千幸: 数値解析による空力音の予測～その現状と今後の課題～, 計算工学 **10-2** (2005), 1127-1130.
- (3) Curle, N.: The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, **231** (1955), 505-514.
- (4) Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. L.: Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*, **264**-1151 (1969), 321-342.
- (5) 加藤千幸: LES 解析に関する四方山話, ターボ機械 **32-5** (2004), 267-273.
- (6) 加藤千幸, 他 4 名: LES による流体音の予測 (第 1 報, 二次元円柱からの放射音の予測, 日本機械学会論文集 B 編, **60**-569 (1994), 126-132.
- (7) Kato, C., Kaiho, M., and Manabe, A.: Finite-Element Large Eddy Simulation Method with Applications to Turbomachinery and Aeroacoustics, *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics*, **70-1** (2003), 32-43.
- (8) 王宏, 加藤千幸: ドアミラー周りの非定常流れの LES 解析と流体音の予測, 第 18 回数値流体シンポジウム講演論文集, B3-2, 東京 (2004).
- (9) 王宏, 加藤千幸: 山出吉伸, 桂裕之, 吉田哲也: 多段遠心ポンプの流体構造連成解析, 第 17 回数値流体シンポジウム講演論文集, A9-1, 東京 (2003).
- (10) Jiang, Y. Y., et al.: Investigations into noise generation mechanism from a multi stage centrifugal pump - part 2: Simulation of Vibration Propagation in Structure, 6th Thermal Fluid Engineering Conference, Jeju, Korea (2005).
- (11) Takano Y, et al.: Numerical simulation of radiated noise from a full-scale multi-stage centrifugal pump model, Proceeding of The 12th International Congress on Sound and Vibration 2005 (to be published).
- (12) Reese, H., Kato, C., and Carolus, T.: 強い主流乱れを伴う低圧軸流ファン内部流れの LES 解析, 第 18 回数値流体シンポジウム講演論文集, C1-2, 東京 (2004).
- (13) 宮澤真史, 加藤千幸, 鈴木康方, 高石武久: 二次元翼周り流れの LES 解析と空力音の予測, 第 18 回数値流体シンポジウム講演論文集, B1-2, 東京 (2004).
- (14) 宮澤真史, 東京大学学位論文 (2005).
- (15) 松浦一雄, 加藤千幸: 境界層遷移を伴う圧縮性翼列流れの LES, 日本機械学会論文集 (B) 70-700 (2004), 42-49.
- (16) 松浦一雄, 東京大学学位論文 (2005).