スーパーコンピュータを用いたステアリングシステムによる
角柱から放射される空力音の数値解析*横 野 泰 之^{*1}, 藤 田 肇^{*2}Interactive Steering of Supercomputing Simulation for
Aerodynamic Noise Radiated from Square Cylinder

Yasuyuki YOKONO and Hajime FUJITA

This paper describes extensive computer simulation for aerodynamic noise radiated from a square cylinder using an interactive steering supercomputing simulation system. The unsteady incompressible three-dimensional Navier-Stokes equations are solved by the finite volume method using a steering system which can visualize the numerical process during calculation and alter the numerical parameter. Using the fluctuating surface pressure of the square cylinder, the far-field sound pressure is calculated based on Lighthill-Curle's equation. The results are compared with those of low noise wind tunnel experiments, and good agreement is observed for the peak spectrum frequency of the sound pressure level.

Key Words: Silence Amenity, Aerodynamic Noise, Square Cylinder, Visualization, Numerical Simulation, Fluid dynamics, Supercomputing

1. は じ め に

空力音がさまざまな工学分野で問題になってきている。例えば、鉄道、自動車などの高速移動体では空力音の減少が環境問題の関係から非常に重要であり、高性能のコンピュータや電子機器では冷却用ファンから発生する空力音の問題が必ず存在する。このような問題に対応するため、これまでに、空力音に関してはさまざまな実験的研究が行われており、有益な実験の関係式⁽¹⁾⁽²⁾が報告されている。

さらに、近年のスーパーコンピュータや数値流体解析技術の発達により数値シミュレーションによる空力音予測が行われ始められている^{(3)~(5)}。数値的な予測手法を開発し、空力音発生メカニズムの解明、および制御を目的としたもので、新しい空力音研究の手法として期待されている。しかし、現在のところ、このようなシミュレーションでは非常に膨大な流体解析を行っているにもかかわらず、その結果が十分な精度をもち、実用に十分達しているとはいえない。空力音の予測に

はさらに詳細な研究とさらに大規模な解析が必要となると考えられる。このような非常に大規模な数値解析では、解析者が正しい解析結果を得るために解析プロセスを理解し、解析をコントロールすることが可能といった解析システムが重要となってくる。

本研究では、大規模解析に対応できる解析システムの開発と空力音予測の可能性を検討することを目的に、スーパーコンピュータを用いた会話形のステアリング解析システムを作成し、角柱から放射される空力音の数値シミュレーションを試みた。スーパーコンピュータとEWSによるこのシステムでは解析中に解析プロセスを画像として把握でき、解析パラメータの変更も可能である。さらに、計算中にすべてのタイムステップの解析結果の画像化を行うことができるため、すべてのタイムステップの解析結果を保存することなく、非定常シミュレーションにおけるアニメーション製作が可能である。本システムは、空力音計算のような大規模で非常に大きなタイムステップ数を必要とする三次元非定常流体解析には必要不可欠なシステムと考える。

2. 記 号

 a_0 : 音速

* 原稿受付 平成6年6月17日。

^{*1} 正員、(株)東芝研究開発センター (〒210 川崎市幸区小向東芝町1)。^{*2} 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町4259)。

f : 周波数
 n_i : 個体境界から外側に向かう単位ベクトル
 p : 圧力
 p_0 : 一様流中の圧力
 p_{ij} : 応力テンソル
 Re : レイノルズ数
 r : 音源と観測点間の距離
 T_{ij} : Lighthill の音響テンソル
 u_i : 流速の x_i 方向成分
 x_i : 空間直交座標および観測点位置
 y : 音源座標
 λ : 波長
 ρ : 密度
 ρ_0 : 一様流中の密度

3. 空力音の数値解析手法

空力音の理論研究にはさまざまな手法が報告されているが、ここでは Lighthill 理論⁽⁶⁾を用いる。Lighthill 方程式は Navier-Stokes 方程式と圧縮性の連続の式から導かれており、以下のように表せる。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_{ij} は Lighthill の音響テンソルで、以下の式で表せる。

$$T_{ij} \equiv \rho u_i u_j + p_{ij} - a_0^2 \rho \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上記の Lighthill 方程式の解は Curle⁽⁷⁾により、以下のように与えられている。

$$\begin{aligned} \rho - \rho_0 = & \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} \int \frac{T_{ij}(y, t - \frac{r}{a_0})}{r} dV \\ & + \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{n_i p(y, t - \frac{r}{a_0})}{r} dS(y) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この式中、右辺第1項の体積積分項は流れから直接発生する寄与分に相当し、四重極音と呼ばれる。一方、右辺第2項の面積積分項は流れ中の物体表面から発生する音を表し、二重極音と呼ばれる。一般に、低マッハ数流れから発生する遠距離音場では、四重極音の寄与は二重極音に比べ小さく、無視できる。

上記の式で、高レイノルズ流れを仮定すると、圧力テンソルに及ぼす粘性応力の寄与は小さい。また、流れ中の物体が音波の波長に比べ、十分小さい場合、二重極音の項は音波の平面伝播の仮定から圧力変動の時間積分として記述できる。さらに、 $(\rho - \rho_0)$ は $(p - p_0)/a_0^2$ と変形できるので、遠距離音場における空力音の音圧は、以下のように表せる。

$$p - p_0 = \frac{1}{4\pi a_0} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int n_i p(y, t - \frac{r}{a_0}) dS(y) \quad \dots\dots\dots (4)$$

このように、低マッハ数での移動物体から発生する空力音は物体に働く抗力、揚力の時間微分に比例する。また、低マッハ数の仮定から抗力、揚力は非圧縮流体として求めることができる。

4. ステアリング解析システム

大規模な流体解析では解析結果の把握には結果の画像化が不可欠であり、この結果の数値データを人間が理解できるような画像に変換する作業は科学技術計算結果の可視化(サイエンティフィックビジュアライゼーション)と呼ばれている⁽⁸⁾。大規模解析では、この可視化作業が作業時間の中で大きな割合を占める。

サイエンティフィックビジュアライゼーションには三つの段階がある。ポストプロセッシング、トラッキング、ステアリングである。ポストプロセッシングは解析が終了した後に画像処理するものである。トラッキングは解析中にリアルタイムに解析結果を画像として表示するもので、解析を途中で強制終了することができる。ステアリングではトラッキング機能に加え、解析中に解析パラメータを変更して、解析を続行することも可能となる。ここでは、空力音シミュレーションの

図1 ステアリング解析システムの構成

図2 ステアリング解析システムの流れ

ためにステアリングシステム⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を作成した。

ハードウェア構成を図1に示す。スーパーコンピュータとしてはCray Y-MP 4 E/232を用い、ワークステーションにはSun SparcStation 10を使用している。これらがイーサネットワークで結ばれた構成である。図2にはソフトウェア構成を示す。スーパーコンピュータ側では流体解析計算を行い、1タイムステップごとに得られた結果をワークステーションに転送する。転送されたデータはワークステーション側で画像化され、ムービ形式で保存される。これらのプロセスがすべてのタイムステップにわたり繰返される。したがって、すべての解析結果を保存することなく、非定常解析の結果をアニメーション化することができる。また、ここではムービ形式として、Apple QuickTimeフォーマットを用いているので、ワークステーションだけではなく、パーソナルコンピュータでも解析結果のアニメーション再生が可能である。さらに、繰返し計算中における収束残差の表示が可能であり、計算の停止、終了、続行などの命令や解析パラメータの変更ができる。スーパーコンピュータとワークステーション間の通信とワークステーション側での結果の画像処理ははん用可視化ツール AVS の機能により実現している。

5. 解析モデル

本研究で対象とした角柱から空力音実験の概略を図3に示す。実験に使用した低騒音風洞の吹き出し口は200 mm×150 mmで、測定対象の角柱の両端は吹き出し口に設置された壁で覆っている。実験条件は、角柱の一辺は10 mm、流速は15 m/sであり、角柱の一辺を代表長さとしたレイノルズ数は 1×10^4 である。空力音測定は角柱の側方1 mで行っている。Fujita-Kovaszny⁽¹¹⁾によると、Curleの式による個体モデルから放射音場は近距離場も含めると、

$$P(x, t) \sim \frac{a_0}{r} C_L \left(t - \frac{a_0}{r} \right) + \frac{d}{dt} C_L \left(t - \frac{a_0}{r} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

図3 空力音実験の概略

となる。ここで、 C_L は揚力係数で、右辺第1項が近距離場に、第2項が遠距離場に対応する。これより、遠距離場と近距離場の比は以下のように表せる。

$$\frac{\frac{dC_L}{dt}}{\frac{a_0}{r} C_L} \sim \frac{\omega C_L}{\frac{a_0}{r} C_L} \sim \frac{2\pi r}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (6)$$

遠距離場が近距離場より音圧で10 dB以上高ければ近距離場は無視できると考えられるので

$$20 \log \frac{2\pi r}{\lambda} \geq 10 \text{ [dB]} \quad \dots\dots\dots (7)$$

として、 $r=1$ mのときの臨界周波数を求めると

$$f = \frac{a_0}{\lambda} = 171 \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

実験結果によると、角柱から放射される空力音の代表的な周波数は約200 Hzで、本研究での測定は遠距離音場での測定といえる。

本研究での支配方程式は以下のとおりである。連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの式は有限体積法により離散化した。数値解法にはSIMPLE法⁽¹²⁾を使用し、対流項には三次精度の上流差分、その他の項には中心差分を使用した。本研究での解析モデルを図4に示す。解析対象は正方形断面(一辺の長さ D)の二次元角柱回りの流れで、角柱は流入口の $6D$ 下流に置かれ、解析領域幅は $12D$ 、両端は流路壁による閉そく効果が生じないように、サイクリック境界とし、現象が連続的であるとした。角柱のスパン方向長さは $5D$ で、両端は滑り壁とした。角柱の下流 $24D$ の位置にある流出口には自由流出条件を与えている。角柱の表面は非滑り壁である。角柱のスパン方向に直交する面では、角柱断面を 20×20 に分割

図4 解析領域

し、角柱近傍で格子間隔を詰め、角柱から遠ざかるにしたがい等比級数的に拡大する流れ方向に 110、流れに直角方向に 80 の格子を用い、スパン方向には等間隔に 40 の格子を使用している。本解析での総格子数は 352 000 となる。

6. 解析結果

本ステアリング解析システムのユーザインタフェースの一例を図 5 に示す。このシステムは AVS 上に構築されており、スーパーコンピュータ上の流体解析は AVS のリモートモジュールとなっており、スーパーコンピュータで解析された結果がワークステーションへ転送され、ワークステーション上で可視化作業を行う。図 5 には圧力の残差の変化のグラフ、スーパーコンピュータ上の現在のタイムステップおよび残差表示、スーパーコンピュータ上のメモリーマップ、解析結果の可視化画像、残差や解析結果を送るタイムインターバルを変更するダイヤルを示している。

対話形シミュレーションの有効性について考えると、例えば、収束判定条件を計算中に変更できる点について、従来方法と比較すると、従来では 20~30 タイムステップ程度計算し、解析をそこでやめ、その残差の変化を見て、収束判定条件を変更し、また 20~30 タイムステップ計算する。解析がうまく進んでいない場合には、また最初のタイムステップへ戻り計算してみる。これを数回繰返し、最終的な判定条件を決めていた。本システムではこのような収束判定条件が解析中に変更できるため、このような繰返し作業をほぼなくすることができる。本解析のような大規模問題では 20~30 タイムステップの計算にも多くの時間を要するため、解析時間を短縮できる。また、本解析でのグラ

フィック出力用解析データは 1 タイムステップで約 10 Mbytes となり、例えば、1 000 タイムステップのアニメーションを作成するには、10 Gbytes のデータ保存容量が必要となる。しかし、本システムでは、タイムステップごとに、グラフィック処理を行うため、このような保存容量を必要としない。このように、本システムでは解析効率が大幅に増す。さらに、このような

図 6 角柱回りの流れの可視化

(a) 角柱のスパン方向位置 $Z = 1.25D$
(圧力等高線間隔 $dp = 0.04$)

(b) 角柱のスパン方向位置 $Z = 2.5D$
(圧力等高線間隔 $dp = 0.04$)

図 5 ステアリング解析システムのユーザインタフェース

図 7 角柱近傍の圧力分布

図 8 揚力係数の無次元パワースペクトル

図 9 解析による音圧の時間変化

実際の解析時間短縮、費用圧縮のみならず、解析が進んでいく様子、収束条件を変えたときに解析結果がどのように変わるかを画像として把握できることにより、解析の中身をとらえることができるようになる点が解析者にとっては非常に有効である。

角柱近傍の非定常パーティクルトレース結果を図6に示す。これは非定常解析のそれぞれのタイムステップごとの結果に基づきパーティクルを移動させた結果を示したもので、ワークステーション側にムービー形式で保存された画像の一例である。このアニメーション観察などから角柱後流のカルマン渦の発生や複雑な三次元流れの様子がよくわかる。図7(a), (b)にはそれぞれ角柱スパン方向位置 $Z=1.25D$, $Z=2.5D$ における同時刻での圧力分布を示した。これより、角柱後流の流れが三次元性をもっていることがよくわかる。

計算された揚力係数のパワースペクトラムをとり、図8に示す。スペクトラムはカルマン渦の発生周波数に対応した鋭いピークをもっている。これより算出したストローハル数は0.12となり、また、抗力係数は2.0であり、これらの結果は報告されている実験結

図 10 音圧レベルの比較

果⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾とよく一致する。

図9には角柱から放射される音圧の時間変化を示す。計算された音圧は角柱に働く抵抗や揚力に比べ数オーダー低い。

計算された音圧のパワースペクトラムをとり、実験結果と比較し、図10に示す。数値解析では8192点の音圧データからスペクトルを算出し、実験では、1024点の音圧データのスペクトルを32回平均操作した。計算されたスペクトラムのピークを示す周波数は実験値とよい一致を示すが、ピークの値は実験値より低い。また高い周波数域では実験値と解析値の差が大きくなっている。これらの結果は、流体解析の精度不足などによると考えられるが実験の精度も考慮してさらに検討する必要がある。

7. 結 論

スーパーコンピュータによるステアリング解析システムを用いて角柱から放射される空力音の数値解析を行った。角柱回りの非定常三次元非圧縮性流体解析から角柱表面での圧力の時間変化を算出し、Lighthill-Curleの式から遠距離場での音圧を求めた。得られた音圧レベルを低騒音風洞による実験値と比較した結果、解析によるスペクトラムのピークを示す周波数は実験値とよい一致を示すが、ピークの値は実験値より低い。また、高い周波数域では実験値と解析値の差が大きくなっている。これらの結果は、実験の精度も考慮してさらに検討する必要があるが、流体解析の精度不足などによると考えられる。空力音予測の精度向上にはいっそう詳細な流体解析が必要と考えられ、この観点からもここで示したステアリング解析システムなどの解析システムの重要性が大きくなる。

本解析を行うにあたり、キヤノンスーパーコンピュ

ーティング S. I. (株)の浅井英樹氏にはステアリング解析システムを構築する際に多大な協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Fujita, H. and Yokono, Y., *Bull. Precis. Intelligence Labor.*, Tokyo Institute of Technology, No. 68(1993), 1-7.
- (2) Fujita, H., ほか 2 名, *Proc. INTER-NOISE 93*, (1993), 1787-1790.
- (3) Hardin, J. C. and Lamkin, S. L., *AIAA J.*, **22**-1(1984), 51-57.
- (4) Akishita, S., ほか 2 名, AIAA-87-2672(1987).
- (5) Kato, C., ほか 4 名, AIAA-93-0145(1993).
- (6) Lighthill, M. J., *Proc. R. Soc., Ser. A*, **211**(1951), 564-587.
- (7) Curle, N., *Proc. R. Soc., Ser. A*, **231**(1955), 505-514.
- (8) Rosenblum, L. J., *Computer*, **22**-8(1989), 68-70.
- (9) Haber, R. B., *Computer*, **22**-8(1989), 84-89.
- (10) 横野・ほか 3 名, 機論, **58**-556, B(1992), 3742-3747.
- (11) Fujita, H. and Kovasznay, L. G., *AIAA J.*, **12**-9(1974), 1216-1221.
- (12) Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (1980), 130, McGraw-Hill.
- (13) Lee, B. E., *J. Fluid Mech.*, **69**(1975), 263-282.
- (14) Bearman, P. W. and Obasaju, E. D., *J. Fluid Mech.*, **119**(1982), 297-321.