LES による物体まわりの音の解析 Numerical simulation of aerodynamic sound radiated from a blunted body

栗山 宜之, (株)名鉄システム開発, 〒101-0032 千代田区岩本町 3-8-15, E-mail:kuriyama@tky.msd.navel.co.jp 佐々木 良浩, (株)名鉄システム開発, 〒101-0032 千代田区岩本町 3-8-15, E-mail:sasaki@tky.msd.navel.co.jp 谷口 伸行, 東京大学情報基盤センター, 〒113-8658 文京区弥生 2-11-16, E-mail:ntani@iis.u-tokyo.ac.jp Nobuyuki Kuriyama, Meitetsu System development Corp., 3-8-15 Iwamoto-cho Chiyoda-ku Tokyo101-0032

E-mail:kuriyama@tky.msd.navel.co.jp Yoshihiro Sasaki , Meitetsu System development Corp., 3-8-15 Iwamoto-cho Chiyoda-ku Tokyo101-0032

E-mail:sasaki@tky.msd.navel.co.jp Nobuyuki Taniguchi, Information Technology Center, Univ. of Tokyo, 2-11-16 Yayoi Bunkyo-ku Tokyo 101-8658

E-mail:ntani@iis.u-tokyo.ac.jp

In this study we investigated the acoustic sound radiated from a blunted body using LES. This LES code originally had been developed in I.I.S., University of Tokyo and distributed as free software named LES-BFC. LES is a powerful tool for the calculation of law Much number flow to quantitative estimation of sound noises. We studied the sounds generated by the flow around a circular cylinder with Smagorinsky and Dynamic SGS model, and around the body of simplified door mirror.

1.はじめに

本研究は次世代乱流解析ソフトウェア研究会より配布され ている LES コードの一つである LES-BFC をもとに、ブラフ ボディ周りの乱流場から発せられる騒音の解析を行ったも のである。今回は3次元円柱、及びドアミラーを模した鈍体 を対象(Fig.8)とした計算事例を紹介する。

2.解析手法

乱流場計算の為に本研究で使用した LES-BFC⁽¹⁾は、一般座 標系によるコロケート格子系の非圧縮 LES 差分コードであ る⁽²⁾。アルゴリズムにはフラクショナルステップ法を用い、 時間進行法は対流項に二次精度 Adams-Bashforth 法、拡散項 に Crank-Nicolson スキームを用いた半陰解法である。対流項 の空間離散化は、ドアミラーモデルの計算には quick を使用 し、円柱については 2 次中心差分を用い Wiggle 抑制の為に 速度場に対する 6 次精度の陽的フィルタリング操作((1)式) も合わせて使用した。高次のフィルタリングは振動の高波数 成分のみを除去する為、解全体に影響を与えることなく 2 次 中心差分に起因する数値振動を有効に抑制する。ただし、3 次元円柱に比べより複雑な形状を有するドアミラーモデル の計算においては、フィルタリングでは数値振動を抑制しき れない事も考えられる為に、より安定な quick を用いた。

$$\overline{f_i} = \frac{f_{i-3} - 6f_{i+2} + 15f_{i+1} + 44f_i + 15f_{i-1} - 6f_{i-2} + f_{i+3}}{64}$$
(1)

乱流モデルには Dynamic SGS⁽³⁾モデル(3次元円柱について は比較の為に、Van Driest 型壁面減衰関数の補正を加えた Smagorinsky モデルによる計算も行った)を用いた。

音源の評価は、Curleの式で双極音源項のみを残し、コンパクトボディによる遠距離場音の近似を施した(2)式で行っている。

$$Pa = \frac{1}{4\pi a} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S} n_i P(y, t - r/a) dS \qquad (2)$$

3.3次元円柱の計算について⁽⁴⁾

計算対象を Fig.1 に示す。 流速 15m/s の一様流中に置かれた

直径 10mm、スパン長 500mm の円柱から放射される流体音 を計算し、実験値との比較を行った。流体音の計測位置は円 柱の真横 1m 離れた所である。円柱直径 D 及び一様流速度 u を基準としたレイノルズ数 Re は 10,000 であり、一様流速 度に対するマッハ数 M は 0.044 である。これらの条件は加 藤(1995)⁽⁴⁾を参照したものであり、実験値も同先生よりご 提供頂いた。



Fig.1 Experimental setup.

計算領域は動径方向に 20D、スパン方向に 10D とした(D は円柱直径)。境界条件は入口と側面に乱れなしの一様速度 を与え、出口は自由流出を用いている。また、スパン方向に はスリップ壁、円柱表面にはノースリップ壁の条件を課した (Fig.3)。計算格子を Fig.2 に示す。



Fig.2 Computational grid for 3-D cylinder.

格子分割数は 100×120×20(z=0.5D) である。最小格子間 隔は円柱表面における壁面垂直方向の格子間隔で 0.005D で ある。

乱流モデルは Van Driest 型壁面減衰関数による補正を加え た Smagorinsky モデルと、Dynamic SGS モデルの 2 ケースを 試した。なお、Smagorinsky モデルにおけるモデル定数 Cs は 最適値とされる 0.15⁽⁴⁾を使用した。以上の条件を Table.1 にま とめる。



Fig.3 Computational region and boundary conditions.

	SGS model	Grid	t
Case 1	Smagorinsky Cs=0.15 +Van Driest damp. func.	100 × 120 × 20	0.005
Case 2	Dynamic SGS	$100 \times 120 \times 20$	0.005

Table 1 Calculation conditions

円柱表面における圧力変動について、カルマン渦の放出に 伴う変動はスパン方向に 5D~10D のコヒーレントな構造を 持つが、その他の変動は円柱直径の高々半分程度しか相関を 持たない事が明らかにされている⁽⁴⁾。従って、スパン方向に 10D の長さを有する今回の計算においては、物体の他の領域 においては LES 計算領域の圧力変動とは無関係な圧力変動 が生じているものと仮定できる。これにより、スパン長さ 10D の解析領域から得られるスペクトル SPL(f)をもとに、 系の全領域から放射される流体音のスペクトル SPL(f)は そのエネルギー和として(3)式のように評価される⁽⁴⁾。

 $SPL(f) = SPLs(f) + 10log(\frac{L}{Ls})$ L=50D, Ls=10D (3)

4.3次元円柱の放射音解析結果



Fig.4 Plane and time averaged distribution of the model coefficient \sqrt{C} .

Dynamic SGS モデル(Case 2)によって得られた円柱後流域 におけるモデル定数の分布を Fig.4 に示す。分布は時間平均 値をスパン方向にも平均したものである。

モデル定数は円柱後方のごく近傍でピークを持ち、後流域 では概ね 0.15 前後の分布を示している。Dynamic procedure は平均的には Smagorinsky モデルにおける最適値 1.5 に近い モデル定数値を与えている。

Fig.5 に流線と x-y 平面上の圧力分布を示す。計算領域のスパン長を10Dと長く取った事により後流の3次元性が良く捕らえられている事が分かる。



Fig.5 Stream lines and pressure distribution.



Fig.6 Measured and calculated(Case1) pressure spectra.



Fig.7 Measured and calculated(Case2) pressure spectra.

LES によって得られた音圧変動を Case1 (Smagorinsky モデ ル) Case2 (Dynamic SGS モデル)につきそれぞれ Fig.6 と Fig.7 に示す。ここで 300Hz のピークはいわゆるカルマン渦 の放出周波数である。両モデルとも、大規模渦の放出周波数 域での実験値との一致は良好である。Smagorinsky モデルの ケースにおいては、カルマン渦に起因するピーク周波数以外 の特に高周波領域で 20dB 近い誤差を生じている。一方 Dynamic SGS モデルのケースでは、約 5dB 以内の誤差で実験 値との良い一致を示している。渦放出のストローハル数 St 及び時間平均抗力係数 C_D を実験値と比較した物をTable.2 に まとめる。これらは、スパン方向に非常に粗い(z=0.5D) 格子を用いた事を考慮すれば、ダイナミックモデルによる LES 計算の有効性と精度を十分示すものと言えよう。

	St	C _D (mean)
Case 1	0.21	1.11
Case 2	0.20	1.10
Exp.	0.20	1.15

Table 2Vortex shedding frequency and mean drag
coefficient.

5. **ドアミラーモデルの計算について**^{(5),(6)} ドアミラーの計算格子を Fig.8 に示す。



Fig.8 Computational grid for car's side mirror model.



Fig.9 Streamlines and pressure distribution.

これは文献^{(5),(6)}による車のサイドミラーの摸擬モデルで、平 板上の半円柱に1/4球が載せられている。入口速度は200km/h、 半円柱の高さ及び直径は0.2m、1/4球の直径も同じく0.2m である。計算格子は112×84×109で約100万点である。入 口速度と円柱直径を基準としたレイノルズ数は10,000(実験 は700,000)、乱流モデルにはDynamic SGS モデルを使用した。 対流項の離散化にはquickを用いている。床面と物体表面は no-slip 壁の条件を課した。

Fig.9 に流線と平板及び物体上の圧力分布を示す。物体の先端が有限長さで丸められている為、複雑な後流構造を有している。また、放出される渦と床面との相互作用の為に大きな圧力変動が平板上に生じている事が分かる。

放射音の音圧レベルを計算した結果、流れ場の強い三次元 により渦放出の周波数自体が時間的に変動している為、3次 元円柱の場合と比べると、際立ったピークの存在しない分布 を生じた。ただ現在の所、定量的な結果を得るには至ってい ない。

6.まとめ

3次元円柱周りの流れを2種類の乱流モデルを用いて解 き、音圧レベルを計算した。その結果、スパン方向に 非常に粗い格子を用いているにも関わらず、Dynamic SGSモデルによって計算した音圧レベルはSmagorinsky モデルと比較して実験値と良好な一致を示した。

Dynamic モデルから得られるモデル定数は、平均的に は Smagorinsky モデルで与えた Cs に近い値を取る事も 確かめられた。

以上の事から、流体音の解析に施いても、流れ場に応じて モデル定数を決定してゆく Dynamic モデルの有効性を示す 事ができた。

複雑な形状周りの流れ場では、Smagorinsky モデルの定数を アプリオリに決める事は難しい。また、モデル定数は計算さ れる音圧レベルに大きな影響を与える事も報告されている ⁽³⁾。今回の結果によって、より実用問題に近い形状を持つド アミラーモデルからの放射音の計算に対する有望な見通し を得る事ができた。

7.参考文献

- 1. 次世代乱流解析ソフトウェア研究会ホームページ http://www.fuji-ric.co.jp/ccse/atfa/
- 小垣哲也、"複雑形状乱流場解析に適した一般座標 系差 分スキームの構成とそのラージエディシミュレーション への応用"、東京大学博士論文 (1999)
- 3.Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., (1991)
 " A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model.", *Phys. Fluids*, A3(7), 1760-1765 (1991)
- 4. 加藤千幸、"低マッハ数の乱流中に置かれた物体から放射 される流体音の数値解析に関する研究"、*東京大学博士論* 文 (1995)
- Hold, R., Brenneis, A., Eberle, A., Schwarz, V., and Siegert, R., "Numerical Simulation of Aeroacoustic Sound Generated by Generic Bodies Placed on a Plate: Part1-Prediction of Aeroacoustic Sourcese. ", *AIAA Paper* 99-1896 (1999)
- 6.Siegert, R., Schwarz, V., and Reichenberger, J., "Numerical Simulation of Aeroacoustic Sound Generated by Generic Bodies Placed on a Plate: Part2-Prediction of Radiated Sound Pressure.", *AIAA Paper* 99-1985 (1999)