

## COSMOS-V, an Aerodynamic Noise Simulator

Nariaki Horinouchi

## 要 旨

空力騒音解析の現状と今後の課題について、当社で開発したシミュレータCOSMOS-Vを中心に解説する。本稿では空力騒音として特に風切り音とウィンドスロップを取り上げる。また、ドアミラー鏡面の空力びびり振動も、ボディまわりの空気流の時間変動に起因して発生するという意味で空力騒音と同等な現象として扱う。

一般に、空力騒音の圧力変動は、それを発生している流れ場の圧力変動に比べると桁違いに小さい。現状の数値計算技術では、前者を直接計算することは不可能であり、後者を計算した結果から間接的に騒音を予測・評価する。したがって、信頼性の高い空力騒音解析を行うためには、まず第一に流れ場の時間変動を精度よく計算することが

肝要であり、COSMOS-Vではその目的を達成するために幾つかの特徴的な手法が導入されている。その一つが複雑な形状に対して質の良い計算格子を効率的に生成するための重合格子法である。また、物理量の保存性を十分に高い精度で満足する離散化手法としてコロケーション格子に基づく有限体積法を採用している。さらに、ウィンドスロップをとらえるために、低マッハ数で微弱な密度変動を考慮した弱圧縮性流体モデルを開発した。以上の特徴を持つCOSMOS-Vによる計算の事例として、ワンボックス車のドアミラー鏡面空力びびり振動解析と3次元オープンキャビティでのウィンドスロップ解析の結果を示す。

## キーワード

空力騒音, 風切り音, ウィンドスロップ, COSMOS-V, 非定常流れ, 重合格子, コロケーション格子, 弱圧縮性流体モデル

## Abstract

The present and future computational problems of the aerodynamic noise analysis using COSMOS-V, our in-house CFD software, are explained by focusing on the wind noise and the wind-throb phenomenon. In addition, the side-view mirror surface vibration is equivalently treated as an aerodynamic noise problem because of the similarity of their mechanisms in the sense that both phenomena are caused by flow fluctuations around an automobile body. In general, pressure fluctuations due to the aerodynamic noise are minimal compared to those of the flow field itself which generates the sound. To date, however, the present computational techniques cannot directly resolve the noise. Instead, in the present approach, the noise characteristics are often indirectly predicted by measuring the resolvable-scale fluctuation of the unsteady pressure field. Thus, the accurate

computation of the unsteady flow field is indispensable for a reliable aerodynamic noise analysis. In this regard, this paper presents three key computational techniques to attain accurate results using COSMOS-V. These include: 1. the overset grid method to generate the appropriate structured computational grid system in a complicated geometry; 2. the finite volume method (FVM) on the collocated grid system to conserve the mass and the momentum on the discretized fundamental equations; and 3. the weak compressible flow model derived through the assumption of a slight nominal density fluctuation to simulate the wind-throb phenomenon. Two computational results from COSMOS-V are shown for the side-view mirror surface vibration and the wind-throb phenomenon.

## Keywords

Aerodynamic noise, Wind noise, Wind-throb, COSMOS-V, Unsteady flow, Overset grid, Collocated grid, Weak compressible flow model

## 1. はじめに

計算流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) による流れの数値シミュレーションは、近年の計算機の発達、流れの基礎方程式を計算する上での数値計算手法の進歩、あるいは自動格子生成技術の発展などに伴い、自動車関連の幾つかの対象については実用上満足し得る精度と時間で計算結果が得られるようになってきた。

しかし、一方で、多くの計算時間を費やしても要求される精度の結果を得ることが困難な領域も未だに残っており、自動車関連では乱流・乱流伝熱、混相流などの問題がこれに含まれよう。そして、近年の自動車の静粛性に伴ってクローズアップされてきた流体騒音の問題もそのような困難な課題の一つと言える。

流体騒音とは、流れに起因し、流れの中で発生する騒音のことである。自動車に関連するものとしては、

- (A) ボディまわりの風切り音、ウィンドスロップ
- (B) エンジンの燃焼音、吸気騒音、排気騒音
- (C) エンジンの冷却ファン騒音、空調ファン騒音、空調吹出し騒音
- (D) 油圧系のキャビテーション騒音

などが挙げられる<sup>1)</sup>。このうちの(A)を「空力騒音」と総称することが多い。

以下では、当社で開発した空力騒音シミュレータ COSMOS-Vを中心にして、空力騒音解析技術の現状と今後の課題について述べる。

## 2. 空力騒音解析

### 2.1 空力騒音とは

前述のとおり、本稿で定義する空力騒音とは自動車走行時に生ずるボディまわりの空気流の時間変動に起因する騒音のことである。

その一つである風切り音は、段差や突起物の周辺に発生する渦の時間変動が原因となり発生する。さらに、これを細かく分類すると、ポールアンテナのような棒状の物体から発生するカルマン渦に起因する騒音と、フロントピラー部の段差などから発生する3次元的な剥離渦に起因する騒音に分けられる。前者は「エオルス音」とも呼ばれ、渦の周期性が強いため、発生する騒音もある特定の周波数が卓越するいわゆる「狭帯域音」である。一方、後者は特に卓越する周波数をとることがなく、数100Hz～数kHzの幅広い範囲において所々に小さなピークを持ちながら次第に減衰していくという周波数特性をも

つ「広帯域音」と呼ばれるものである。

また、ウィンドスロップとは、自動車のサンルーフやサイドウィンドウを開けて走行する場合に車室内に発生する耳を圧迫するような低周波数(10～50Hz程度)の騒音のことである。実際には、サンルーフに関しては「デフレクタ」という小さな部品により抑制されており、現実にはこの現象を感じることは少ない。一方、サイドウィンドウのどれか一つを開いて走行する場合に、ある車速域で発生する低周波の空気振動を体感することがある。これがウィンドスロップである。この騒音は車室が共鳴箱の役目を果たして発生するヘルムホルツ共鳴による音の一種である。

さらに、高速走行時にドアミラー周辺の剥離渦の変動によって、ミラー鏡面が振動し、後方の視認性が悪化するという問題があり、これを「空力びり振動」と呼んでいる。これもボディまわり(ここではミラー後部)の空気流の変動に起因して発生するという意味では空力騒音と同等な現象であり、その解析手法も風切り音に適用するものと同じであるので、本稿ではこの現象も空力騒音と同類に扱う。

### 2.2 空力騒音解析の要点

流体騒音は、流体(一般に空気)の非常に微少な密度変動により発生した音波が、一樣静止媒質中を伝わり人間の耳に到達することにより音として認識されるものであり、流体の密度の挙動を記述する圧縮性流れの基礎方程式を解くことにより、原理的にはその発生と伝播を直接とらえることができるはずである。しかし、実際に人間の耳に音として感じる圧力変動は流体の圧力変動に対して $10^{-5}$ 程度の強さしかもっておらず、このような微少な変動量は数値計算の誤差に埋もれてしまうため、現状では流体騒音を直接シミュレートすることは不可能である<sup>2,3)</sup>。

そこで、実際に空力騒音の解析を行う場合は、その源である流れ場の時間変動を精度よく計算した上で、その流れの圧力変動によって間接的に騒音の特性を予測・評価するか、あるいは得られた非定常流れ場の計算結果に後述するLighthill-Curleの理論を適用することによってある観測点での音圧を算出する、という手法が採られている。

この時、通常の自動車走行時の流速においては、空力解析などと同様にボディまわりの空気流は密度の変化を無視できる非圧縮性流れとして扱われ、この時間変動場を計算することになる。ただし、ウィンドスロップ解析に関しては、後で詳しく述べるとおり、非圧縮性流れの扱いでは不適切であり、ここでの議論は当てはまらない。

無次元化された非定常非圧縮性流れの基礎方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで

$$\tau_{ij} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式(1)が連続の式、式(2)がNavier-Stokes方程式（運動方程式）で、 $u$ 、 $p$ 、 $Re$ はそれぞれ速度、圧力、Reynolds数を表す。

また、Lighthill-Curleの理論とは、以下の式で任意の観測点での音圧 $P_a$ を求めるものである。

$$P_a = \frac{1}{4\pi c} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S n_i P dS \quad (4)$$

ここで $c$ は音速、 $x_i$ は観測点の位置ベクトル、 $r$ は観測点までの距離、 $P$ は物体表面の流体の圧力である。すなわち、式(1)(2)より時々刻々の物体表面上の流体の圧力がわかれば、式(4)に基づき物体から離れた観測点での音圧を知ることができるわけである。例えば、単純な2次元円柱まわりの流れ場から発生する風切り音は、この手法によってよい精度で予測できることが報告されている<sup>4)</sup>。しかし、式(4)は圧縮性流れの基礎方程式から、以下のような理想状態を仮定することによる簡略化を経て導出されたものであり、自動車関連の実問題に対してこれをそのまま適用し得るか否かは慎重に検討されるべきである。

- ・ 内部に物体を含む無限空間であること
- ・ 観測点までの距離が音の波長に比べて十分に大きいこと
- ・ 観測点までの距離が内部物体の大きさに比べて十分に大きいこと
- ・ 流速が音速に比べて非常に小さいこと

いずれにしても、信頼性の高い空力騒音解析を行うためには、空気流の時間変動を正しくとらえることが最も肝要となる。次章では、この目的を達成するためにCOSMOS-Vに用いられている計算技術のうち、特に特徴的なものについて説明する。

### 3. 空力騒音シミュレータCOSMOS-V

#### 3.1 重合格子法

COSMOS-Vでは、計算精度と計算効率に優れているという観点から「構造格子」と呼ばれる（少なくとも計算空間においては）碁盤の目状に規則正しく

（直交・等間隔に）並んだ計算格子を生成する。ただし、変数変換を施すことにより、物理空間では直交・等間隔でない格子を用いることができる。その各格子セルにおいて流れの基礎方程式を後述する高精度なスキームに基づき離散化することにより、各格子セル内の物理量（流体の速度や圧力等）を求める。一般的には、対象となる物体の表面に沿わせ、かつ表面近くに格子点を集中させたような境界適合格子と呼ばれる格子を用いる。

しかしながら、計算領域が複雑な形状になると、これを単一の質のよい構造格子で覆うということは非常に困難であり、格子生成に多大な時間や熟練を要する、格子点数が多くなってしまふなどの問題が生ずる。

そこで、COSMOS-Vでは「重合格子法<sup>5)</sup>」と呼ばれる手法を導入している。これは、物体や境界の局所的な形状に着目し、その形状、およびその部分の流れ場の特徴に適した部分的な格子をそれぞれ生成した上で、それら複数の格子を適当に（互いの格子間でデータの授受ができるように）重ね合わせて計算領域全体を覆う、という手法である。この手法には、

- ・ 複雑な形状への対応が容易である
- ・ ケーススタディ等による格子の変更が少なく済む

という特徴があり、工数の削減、汎用性の向上のために非常に有効であるばかりでなく、よりよい格子が生成できるという意味では計算精度の向上にもつながる。

Fig. 1に、セダン形状のボディまわりの流れ場を計算する場合に用いられる重合格子の2次元断面の例を示す。色分けされた幾つかの格子により、ボディの中心部、前端部、後端部などが個々に覆われ、それらを重ね合わせて計算領域全体の格子を生成している様子がわかる。

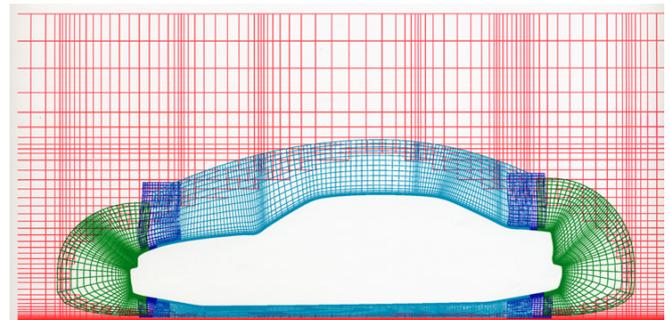


Fig. 1 Example of overset grid system.  
(For simulation of flow around sedan type automobile)

ある格子において、他の格子と重なった領域にある境界部分の格子点へは、他の格子からの補間により物理量が与えられる。

### 3.2 高精度離散化スキーム

COSMOS-Vでは構造格子上で流れの基礎方程式を離散化する手法として、「コロケーション格子<sup>6)</sup>」による有限体積法を用いている。

古くから行われている差分法などでは格子線が交わる格子点上に速度成分 $u_i$ や圧力 $p$ を定義する「レギュラー格子」が用いられ、実際にCOSMOS-Vの前のバージョンでも用いてきた。しかし、この手法では物理量の保存則（質量保存則や運動量保存則）が満たされない場合や圧力場が振動する場合が多く、計算精度上の問題があった。

一方、一般には計算精度を重視する場合に「スタガード格子」が用いられている。これは直交格子において圧力 $p$ を格子セルの中心に、各速度成分をセル界面で定義する離散化手法であり、保存則が高い精度で満たされるという長所を有している。しかし、この手法では境界適合格子などで用いられる一般座標系への拡張が困難を極め、実用性に問題がある。

そこでCOSMOS-Vでは、スタガード格子と同等の保存性を保ちながら、一般座標系への拡張も可能であるコロケーション格子を導入した。コロケーション格子ではFig. 2に示すように $u_i$ および $p$ を格子セルの中心に定義するとともに、セル界面においてコロケーション格子特有の補間法によって $u_i$ から補間される質量流束 $JU_i$ を補助的に定義する。

前述した基礎方程式(1)(2)は、座標変換

$$d\xi_j = \alpha^{ji} dx_i, \quad \alpha^{ji} = \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y & \xi_z \\ \eta_x & \eta_y & \eta_z \\ \zeta_x & \zeta_y & \zeta_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

によって、以下のような一般座標系での表記に変換される。

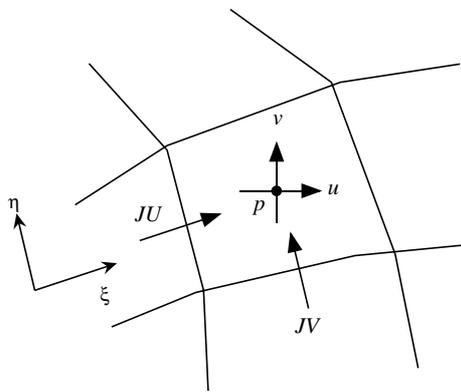


Fig. 2 Collocated grid on two dimensional plane.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_j} (JU_j) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_j} (JU_j u_i) \\ = -\alpha^{ik} \frac{\partial p}{\partial \xi_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left\{ (J\alpha^{mj}) \alpha^{mk} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_k} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$J = \frac{1}{|\alpha^{ji}|}, \quad JU_i = (J\alpha^{ki})u_k \quad (8)$$

Navier-Stokes方程式(7)は $u_i$ に対して解かれるが、連続の式(6)の左辺の速度の発散項は $JU_i$ を用いて評価される。これによって、数値上の圧力の振動を抑えながら、連続の式を高い精度で満足することが可能になる。また、式(7)の対流項（左辺第2項）においても $JU_i$ が用いられる。

これらの基礎方程式の離散化スキームとしては、式(7)の対流項にはQUICKスキームを、その他の空間微分項には2次精度中心差分を、時間積分にはCrank-Nicolson法を適用する。

### 3.3 弱圧縮性流体モデル

前述したように、ウィンドスロップはサンルーフやサイドウィンドウの開口部分での周期的な渦放出が車室内でのヘルムホルツ共鳴を誘起することによって発生する現象である。ヘルムホルツ共鳴が微弱ながらも密度変動を伴うことから、非圧縮性流れを仮定した計算ではこの現象を予測することは不可能である。

そこで、COSMOS-Vでは低Mach数の流れ場における微弱な圧縮性をモデル化した以下の基礎方程式を導出した<sup>8)</sup>。

$$M^2 \left\{ \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \right\} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

ここで $M$ がMach数であり、自動車まわりの流れでは0.1程度の値をとる。これらの弱圧縮性流れを記述する基礎方程式は、非圧縮性流れの基礎方程式(1)(2)に付加項を加えた形になる。特に、連続の式(9)の左辺第1項が弱圧縮性の効果を表すものであり、これは微小な値をもつために、その効果を数値的に正しく見積るためには、元々の連続条件を高い精度で満たす解法が必須であり、これを満たすものが前節で述べた高精度離散化スキームとなる。

4. 計算事例

以下にCOSMOS-Vで計算した代表的な事例を2件紹介する。詳細については各々の参考文献<sup>7, 8)</sup>を参照されたい。

4.1 ドアミラー空力びびり振動解析

ここでは、ワンボックス車用のドアミラーに関し、オリジナルなバイザー形状と実験によって改善が認められている改良型のバイザー形状の2種類に対してCOSMOS-Vによるケーススタディを実施し、非定常な流れ場の違いをとらえることを試みた。

Fig. 3に計算結果から得られた時間平均場の速度ベクトルと鏡面上の圧力 ( $C_p$ : 圧力係数) 分布を示す。オリジナル形状の方が、先端部における剥離が大きく、またボディ側から生じている渦も大きいことがわかる。このボディ側からの渦に伴い、オリジナル形状の方が鏡面上に圧力の低い領域がより広く分布していることもわかる。

また、この鏡面上の圧力分布の時間変動を動画にして観察すると、オリジナル形状の方が明らかに変動が激しいこともわかる。

以上のことから、改良型ではミラー先端部の剥離が小さく、ボディ側からの巻き上げ渦も小さい、という非定常な流れ場の特徴によって、びびり振動の要因となる鏡面上の圧力変動が小さくなっているということが明確になった。

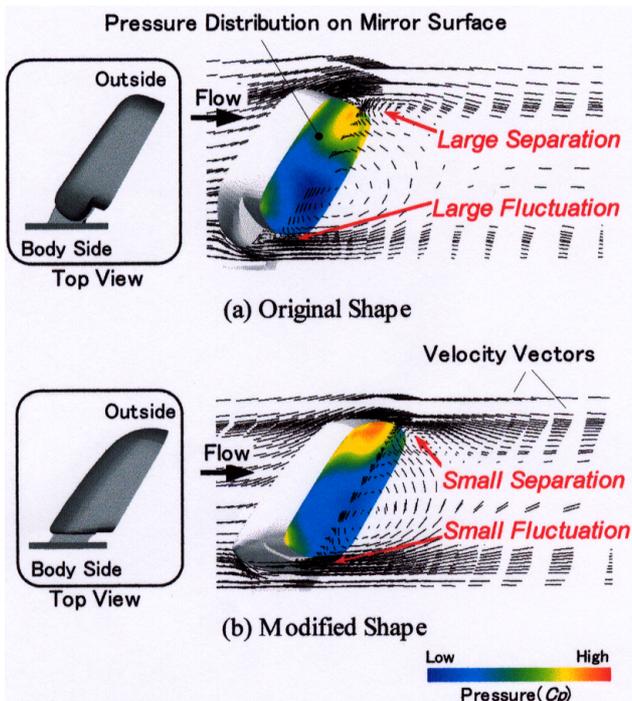


Fig. 3 Time averaged velocity vectors and pressure maps.

4.2 ウィンドスロップ解析

ウィンドスロップ解析の事例として、独自に開発した弱圧縮性流体モデルの検証のために実施した基礎実験モデルに対する計算結果を示す。

Fig. 4に示す上面に穴の開いた直方体の箱が、3次元オープンキャビティと呼ばれる基礎実験モデルであり、サンルーフ開口時の車室内を模擬している。

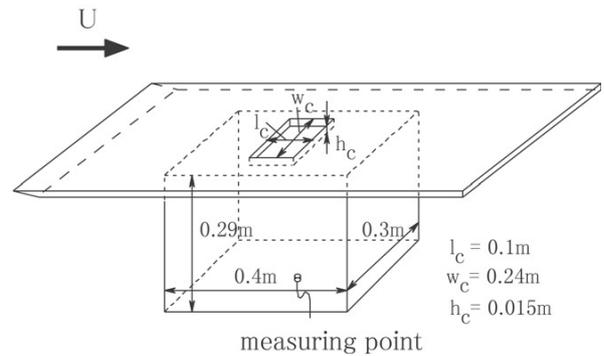


Fig. 4 Three-dimensional open cavity.

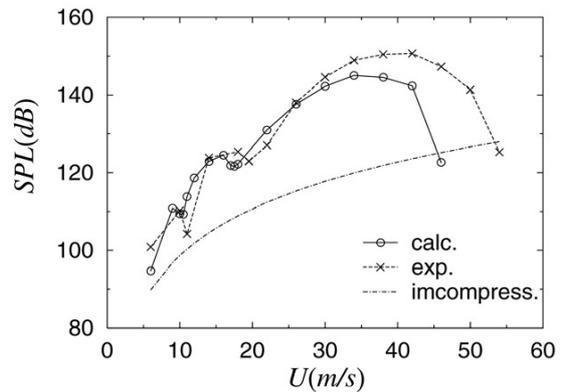


Fig. 5 Sound pressure levels.

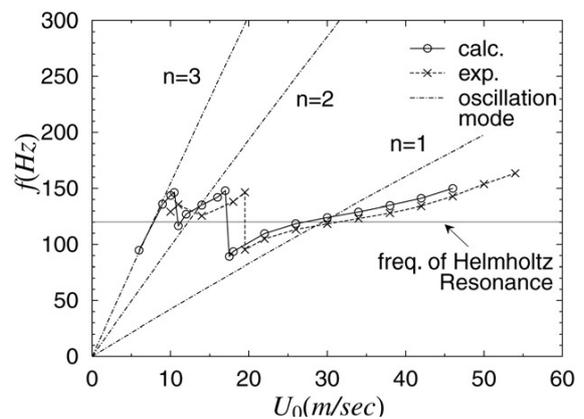


Fig. 6 Frequencies of pressure fluctuations.

上面の流速 $U$ を変えたときに発生するウィンドスロップ現象を実験と計算とで比較する。Fig. 5, 6に流速 $U$ に対する音圧レベル $SPL$ と共鳴周波数 $f$ の変化を示す。

Fig. 5から、数箇所の特定の流速で音圧レベルが極大値をとるというウィンドスロップ特有の現象が計算 (calc.) によっても、実験 (exp.) と同様にとらえられていることがわかる。一方、図中の一点鎖線は非圧縮性流れの計算手法で得られた結果であるが、この場合はそのような現象は全く再現できない。また、音圧レベルが最大になる流速も弱圧縮性を考慮した計算と実験ではよく一致している。

Fig. 6からは、流速に対して周波数が鋸歯状に変化している様子がわかる。ヘルムホルツ共鳴の影響により渦放出の周波数のモード (図中に示した $n = 1, 2, 3$ の一点鎖線) が変わるときに、このような不連続な変化が発生すると考えられる。この様子も計算と実験でよく一致している。

また、図中の細い実線は基礎実験モデルの開口部面積やキャピティ容積などから推定されるヘルムホルツ共鳴周波数の予測値であるが、流速30m/s前後でウィンドスロップ音の周波数がこの予測値に引張られるように横たわる「ロックイン現象」もとらえられている。

## 5. むすび

### 5.1 現状のまとめ

空力騒音解析の現状に関して述べてきた。現在の数値計算技術において空力騒音をはじめとする流体騒音を直接シミュレートすることは不可能であり、(1) 騒音源である非定常流れを精度よく計算した上で、(2) 流れの圧力変動から音圧変動を予測する、といった手法が現実的である。

COSMOS-Vは、上記(1)の非定常流れ場の計算に関して世界トップの精度と速度を有していると考えられる。また、空力騒音の一種であるウィンドスロップ現象のような流体共鳴音を予測できるソフトは他に類例を見ない。

上記(2)の騒音の予測に関しては、現時点ではLighthill-Curleの理論が最も信頼性が高いと考えられるが、適用範囲に限りがある。そのような場合には流れ場の圧力変動で代用せざるを得ない。

### 5.2 今後の課題

今後の流体騒音解析の実用化向上のためには解決すべき技術課題が数多く残っている。

COSMOS-Vであっても1kHz程度以上の周波数の圧力変動を予測する場合にはQUICKスキームのような

数値粘性を利用した手法では精度が低下してしまう。高周波数の圧力変動の予測にはLES (Large Eddy Simulation) などの、より高精度な非定常乱流の解析技術が必要になる。COSMOS-Vでは、このような手法への発展も視野に入れて開発しており、将来はより正確な非定常流れ場の予測が可能になると考えている。

また、前節で述べた(2)の点に関してLighthill-Curleの理論より制約が少ないモデルの開発が望まれる。我々も最近その方面の研究を進めているが<sup>9)</sup>、実用展開にはもうしばらく時間を要する。

数値計算手法の側面から課題を挙げるとすれば、何と言っても非定常流れ計算の高速化である。流体騒音解析のためには、時々刻々の流れ場を非常に多くの時間ステップにわたり計算しなければならないので、多大な計算時間を要する。例えば、前述したウィンドスロップ音の予測を3次元実車形状に対して実施する場合、ピーク性能2GFLOPSのスーパーコンピュータでも1車速あたり100時間以上のCPU時間が必要となる。実際の製品開発においては数多くのケーススタディが必要となってくるので、計算の高速化は必須である。特に、今後は多並列スカラー計算機における高速化が重要視されると思われる。

## 参考文献

- 1) 望月修, 丸田芳幸: 流体音工学入門, (1996), 朝倉書店
- 2) 加藤千幸: ターボ機械, 26-1(1998), 17
- 3) 谷一郎: 乱流, (1980), 丸善
- 4) 池川昌弘, ほか2名: 応用数理, 6-1(1996), 2
- 5) 加藤由博, ほか2名: 豊田中央研究所R&Dレビュー, 32-2(1997), 23
- 6) 稲垣昌英, 堀之内成明: 第10回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1996), 410-411
- 7) 山田智弘, ほか4名: 2001年度自動車技術会中部支部総会研究発表会前刷集, (2001), 79-82
- 8) 稲垣昌英, ほか3名: 豊田中央研究所R&Dレビュー, 36-2 (2001), 31
- 9) 加藤由博, ほか4名: 日本機械学会2000年度年次大会講演論文集, Vol.1(2000), 951-952

(2001年10月4日原稿受付)

## 著者紹介



堀之内成明 Nariaki Horinouchi

生年: 1961年。

所属: 応用数理研究室。

分野: 自動車の空力騒音解析および流体解析全般に関わる数値計算手法の研究。

学会等: SIAM, 日本応用数理学会, 情報処理学会, 自動車技術会会員。