基づく音響解析

Acoustic Analysis Based on Stochastic Noise Generation and Radiation Method of Cavity Noise for Noise Reduction of Pantograph Cover

航空宇宙工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1235101 行徳 一真

1. 緒言

鉄道などの輸送機器はこれまで様々な実験や計算によっ て, 高速化に向けた設計がなされてきた. しかしこの高速化 の過程において騒音問題が多く発生している.特に空力騒音 は、高速化によって大きくなるため問題となっている.新幹 線等の鉄道から発生する空力騒音は様々な種類があるが、代 表的なものの一つとしてパンタグラフから発生する空力騒 音があげられる.パンタグラフとは鉄道上部についているも ので鉄道の動力となる電気を得るのに必要不可欠な部品で ある.このパンタグラフからの騒音を低減させるため、これ まで部材に穴をあけることや防音版の設置,そして図1にあ るような流線型のパンタグラフカバーの設置が行われてき た.しかし近年パンタグラフの素材の研究や形状の研究など が行われた結果,パンタグラフそのものから発生する騒音が 小さくなり、パンタグラフカバーの空洞凹部から発生する騒 音が無視できなくなってきた(1). そのため今後キャビティ騒 音の低減が求められる.



Fig. 1 Pantograph⁽²⁾.

このようなパンタグラフカバー等のキャビティ形状の空 力騒音の計測には風洞を用いた実験とコンピュータを用い た数値計算が用いられている. この数値計算には音源の計算 と音の伝搬の計算を別々に解く分離解法が広く用いられて いる. その際の伝播の計算方法として線形オイラー方程式 LEE(Linerlized Euler Equation)が注目されている. この手法は 音の伝播において反射や回析, 非一様流の計算が可能で, 音 源が計算領域に対して非コンパクトであっても計算が可能 であるというメリットがある.一方でその音源の導出には速 度の時間変動成分が必要になるため, 主に LES(Learge Eddy Simulation)や DNS(Direct Numerical Simulation)が用いられる. これらの手法では計算規模が大きくなってしまうが設計現 場では比較的小規模な解析手法が求められる. そこで Bechara⁽³⁾ ら は RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)の一種である k-εモデルを用いて定常計算の結果か ら乱流エネルギーと乱流散逸率を導出し, 速度の時間変動の 値を求める Stochastic Noise Generation and Radiation 法(以下

SNGR 法)を考案し,ジェット流から発生する騒音の再現をお こなった⁽³⁾.本研究ではこの SNGR 法を用いたキャビティの 騒音再現に向けて LEE⁽⁴⁾の音源を計算し,圧力擾乱の発生傾 向を捉えることを目的として研究を行った.

2. 計算モデル

本研究では音源の計算に NASA で行われたキャビティ騒音の実験⁽⁵⁾を参考に計算対象のモデルを設定した.計算対象 を図 2 に示すように,キャビティの深さは 12.7mm で幅は 19.05mm とした.本研究では計算負荷軽減のため 2 次元で計 算を行った.



3. 数値計算

まず RANS 計算を行うことで乱流エネルギーと乱流散逸 率を導出する. 次に SNGR 法で各格子点における乱流エネル ギーと乱流散逸率を用いて乱流速度を導出する. その後 SNGR 法で導出した各格子点における乱流速度を用いて LEE の音源を計算し音の伝播の計算を行う.

3.1 流体計算

本研究の流体計算には OpenFOAM⁽⁶⁾を使用した. このソフ トウェアはオープンソースの解析ソフトウェアで, C++を用 いて作成されている.

3.1.1 数值計算手法

支配方程式は非圧縮性ナビエストークス方程式を用いている.また乱流モデルには RANS の k-ω SST⁽⁷⁾を用いて計算をおこなった.離散化には有限体積法を用いている.

3.1.2 境界条件

図3に境界条件を示す.inlet は流入面で流速を89m/s で固定, 圧力は圧力勾配0とした.この89m/s は時速に換算するとおよそ320km/h となるため新幹線の最高速度と同等になる.また upperWall は速度と圧力をそれぞれ勾配0として与え,自由流入出境界とした.また lowerWall は滑りなし壁として設定した.outlet は流出面で圧力の値を固定値として,速度は速度勾配0と設定した.また計算格子は固体壁面近くでy+が1になるように設定し,壁関数は使用しなかった.



Fig. 3 Boundary conditions.

3.1.3 計算条件

本計算のレイノルズ数はキャビティ長さを代表長として 1.13×10⁵である.また流入速度は89m/sで、マッハ数は0.26 となる.また乱流強度は0.2%、乱流長さスケールはキャビテ ィ長さの0.07倍に設定した.

3.2 音響計算

音響計算には先行研究⁽⁴⁾に使用された線形オイラー方程 式を支配方程式とする計算コードを使用する.

3.2.1 数值計算手法

圧縮性オイラー方程式を線形化した線形オイラー方程式⁽⁴⁾を支配方程式とした.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}'}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}'}{\partial y} = \mathbf{S}$$
(1)

$$\boldsymbol{Q}' = \begin{bmatrix} \rho' \\ (\rho u)' \\ (\rho v)' \\ E' \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{E}' = \begin{bmatrix} (\rho u)' \\ 2\bar{u}(\rho u)' - \bar{u}\bar{u}\rho' + p'\delta_{ij} \\ \bar{v}(\rho u)' + \bar{u}(\rho v)' - \bar{u}\bar{v}\rho' \\ -\bar{u}\bar{H}\rho' + \bar{u}(\rho H)' + (\rho u)'\bar{H} \end{bmatrix}$$
(2)

$$\mathbf{F}' = \begin{vmatrix} \bar{u}(\rho v)' + \bar{v}(\rho u)' - \bar{u}\bar{v}\rho' \\ 2\bar{v}(\rho v)' - \bar{u}\bar{v}\rho' + p'\delta_{ij} \\ -\bar{v}\overline{H}\rho' + \bar{v}(\rho H)' + (\rho v)'\overline{H} \end{vmatrix}$$
(3)

式(1)内のSは生成項とで、本研究ではこの項を音源項と する.音源項Sは

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial}{\partial x} (\rho u' u' - \overline{\rho u' u'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho u' v' - \overline{\rho u' v'}) \\ -\frac{\partial}{\partial x} (\rho u' v' - \overline{\rho u' v'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho v' v' - \overline{\rho v' v'}) \\ -\frac{\partial}{\partial x} (\rho u' H' - \overline{\rho u' H'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho v' H' - \overline{\rho v' H'}) \end{bmatrix}$$
(4)

であらわされる.音源項内のu'及びv'はそれぞれx方向の流速の時間変動成分とy方向の流速の時間変動成分である.

LEE の音源項の計算に用いる流速の時間変動成分の導出 には、流体計算から得られた乱流エネルギーと乱流散逸率 から速度の変動成分を導出する SNGR 法を用いて計算し た. この手法では瞬間の乱流速度**u**_tをランダムフーリエモ ードに基づき

$$\boldsymbol{u}_t(\boldsymbol{x}) = 2\sum_{n=1}^N u_n \cos(\boldsymbol{k}_n \cdot \boldsymbol{x} + \boldsymbol{\psi}_n) \boldsymbol{\sigma}_n \tag{5}$$

とあらわす.ここで、*un*は第*n*モードにおける絶対値である.この絶対値は乱流エネルギースペクトル*E*(*kn*)を用いて

$$u_n = \sqrt{E(k_n)\Delta k_n} \tag{6}$$

とあらわす. 乱流エネルギースペクトル $E(k_n)$ は等方性乱流の場合には,

$$E(\mathbf{k}_n) = \alpha \frac{2\bar{k}}{3k_e} \frac{(k_n/k_e)^4}{[1 + (k_n/k_e)^2]^{17/6}} \exp\left(-2\left(\frac{k_n}{k_{kol}}\right)^2\right)$$
(7)

とあらわされる.この式(7)において、 k_e はエネルギースペクトルが最大になる波数、 k_{kol} は Kolmogorov 波数である. これらの値の導出は流体計算から導出された乱流エネルギー及び動粘度、乱流散逸率から導出される.

3.2.2 境界条件

本計算では音源の傾向をつかむことを目的としており, 計算の簡略化のために流体計算と変更し, inlet の流入速度 は 0m/s とし、速度の時間平均成分も 0m/s とした. また lowerWall は固体壁でそのほかの境界は外挿条件に設定し た.

3.2.3 計算条件

計算負荷軽減のために時間精度及び空間精度を1次精度 とした.また時間の刻み幅はクーラン数が0.5以下になるように設定した.計算格子はデータの受け渡し時に誤差が発 生しないよう同一のものを使用した.しかし外挿条件のみ では反射波が発生することが先行研究⁽⁴⁾において観測され ている.よって流体計算に用いた計算格子の外部に音波の 反射を抑える吸収領域⁽⁴⁾ (sponge-region)を 40 層設定した.

4. 計算結果

流体計算の結果及び音響計算の結果をそれぞれ示す.

4.1 流体計算結果

キャビティ周辺の流体計算の結果を下の図4と図5に示 す.図4の速度分布から固体壁面で境界層が発生している ことがわかる.また図5の乱流エネルギー分布からキャビ ティの下流側壁面近くで大きな乱流エネルギーが分布して おり,その領域から支配的な乱流騒音が発生することが考 えられる.



Fig. 4 Velocity magnitude.



Fig. 5 Turbulence energy.

4.2 音響計算結果

SNGR 法を用いて線形オイラー方程式の音源項を導出したのち,音響計算を1000step行った.計算結果を以下の図6及び図7に示す.先述の乱流エネルギーの分布で大きな値を示している部分にほかの部分と比較して大きな圧力擾乱が発生している.





Fig. 7 Pressure disturbance(-25Pa~25Pa).

また、図8に同キャビティ同主流条件のLES計算から導 出された、Lighthill 方程式の音源であるLighthill テンソル の大きさの分布⁽⁸⁾を示す.この分布と比較しても同様のキ ャビティ下流側エッジに大きな圧力擾乱が発生しており、 本研究でも同様の傾向がつかめていると考えられる.



Fig. 8 Lighthill tensor.

その後 75000step まで計算をした結果を図9に示す.また 同様の画像で1000stepの計算結果を図10に示す.図9より 図10にはなかった圧力擾乱が発生していることがわかる. この圧力擾乱はキャビティ周辺の空気の乱れによって発生 した圧力擾乱が上方向に伝播しているのではないかと考え られる.



P

Fig. 10 Pressure disturbance(1000step).

0

0.05

1.000e-01

-0.05

-1.000e-01

5. 結言

本研究ではキャビティ形状の騒音低減に向けてキャビテ ィの RANS 計算の結果から SNGR 法を用いて流速の時間変 動成分を導出し,音源の導出を行った.その結果 LES によっ て導出される音源分布が大きな値を示す,キャビティ下流側 のエッジ上部で大きな圧力擾乱が確認できた.またその後計 算回数を重ねることで音源からの圧力擾乱の伝播が確認さ れた.このことから今後キャビティの設計を行う際に,本研 究の方法を用いて騒音源の傾向をつかむことでトータルの 計算時間を少なくすることができる可能性がある.

今後の課題として現在はまだ音源の発生場所の傾向が得 られたのみであり、周波数や音圧等の確認はできていないた め、今後定量的な一致を目指して複数のキャビティ騒音の実 験結果との比較が必要である.また本研究では流体計算と音 響計算の格子は同様のものを使用したが、計算負荷を低減す るために流体計算と音響計算のそれぞれに適した計算格子 を使用することが必要になる.

文献

- 村田香, 栗田健, "パンタグラフの空力音対策", https://www.jstage.jst.go.jp/article/souonseigyo1977/27/5/27 _5_337/_pdf.
- (2) 湯 レジン工業株式会社, https://www.yuasar.com/media/9/4/94_210x139.bmp.
- (3) Walid Bechara, Christophe Bailly, Philippe Lafon, " Stochastic Approach to Noise Modeling for Free Turbulent Flows", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 3, March 1994.
- (4) 廣原和希, "実機形状適用を目指した線形オイラー方程 式を用いた音響計算コードの開発", 高知工科大学修士 学位論文, 2020.
- (5) K. K. Ahuja, J. Mendoza, "Effects of Cavity Dimensiond, Boundaly Layer, and Temperature on Cavity Noise With Emphasis on Benchmark Data To Validate Computational Aeroacoustic Code", NASA Contractor Report 4653, 1995.
- (6) OpenFOAM, https://openfoam.org/.
- (7) 春日悠, "Penguin", http://penguinitis.g1.xrea.com/.
- (8) JOHAN NILSSON, "IMPLEMENTATION OF ACOUSTICAL ANALOGIES IN OpenFOAM AND CALFEM".