

直列二円柱周り流れ解析における 遠方場騒音および近傍流れ場の検証

今村太郎 (JAXA/APG), 平井亨 (菱友システムズ), 榎本俊治, 山本一臣 (JAXA/APG)

Far-field Noise and Near-field Flow Validation of Tandem Cylinder Flow Simulations

by

Taro Imamura (JAXA/APG), Tohru Hirai (Ryoyu Systems), Shunji Enomoto and Kazuomi Yamamoto (JAXA/APG)

ABSTRACT

In this paper, flow around tandem cylinder is solved using UPACS-LES code developed in JAXA. Several key issues for unsteady flow simulation are investigated by changing the parameters, such as turbulence modeling and grid density. The flow field is compared with the experiment for both far- and near-field. Current results indicate that the calculation of the boundary layer and the shear layer around the cylinders plays important role especially to the near field flow structure while it is less sensitive to the far-field noise. Using LES/RANS hybrid technique with fine grid, which consists of 70 million grid points, near-field flow structures including both steady and unsteady components, show very good agreement with the experiment. Additionally, far-field PSD shows fair agreement with the experiment.

1. はじめに

航空機機体空力騒音は、航空機が空港に着陸する際の支配的な騒音源のひとつであり、降着装置はその発生箇所の一つである。近年、非定常流体音響解析を用いた騒音予測および低減が実施されるようになってきているが、形状が複雑であることからその計算結果の信頼性については十分な検証がなされていないのが現状である。このような背景から、機体空力騒音予測技術の向上を目的とした国際的な取り組みが始まっており、2010年6月には Workshop on Benchmark problems for Airframe Noise Computations (BANC) - I¹⁾が開催されている。本ワークショップでは、4つの課題が設定され、そのうち3つが降着装置に関連した課題であり、その中の課題の1つが、流れ方向に直列配置された同サイズの二円柱周り流れ場から生じる音の解析(図1参照)であった。降着装置騒音の発生メカニズムのひとつと考えられている上流側にある物体から生じる後流と下流側物体との干渉音に着目した課題設定であり、類似の幾何形状はタイヤ周辺や支柱周囲等、現在利用されている降着装置周辺で観察できる。本課題は BANC-I 以前より NASA Langley Research Center で精力的に数値計算および風洞実験が実施されてきており²⁻⁵⁾、ワークショップでもっとも多く参加者が本課題に取り組んだ。本形態は幾何的には単純であるが、BANC-I では多くの研究者が最も多くの格子点を割いて計算していた問題であることから想像できるように、最も困難な課題であった。

本論文では、これまで行われてきた風洞試験、数値解析結果を踏まえ、JAXA で開発がすすめられている UPACS-LES コード^{6,7)}を用いて解析した結果について報告する。本コードの乱流モデルのパラメータを陽に設定することにより、上流及び下流円柱の乱流境界層の取り扱いを変化させ、それが遠方場及び近傍場に与える影響について明らかにする。

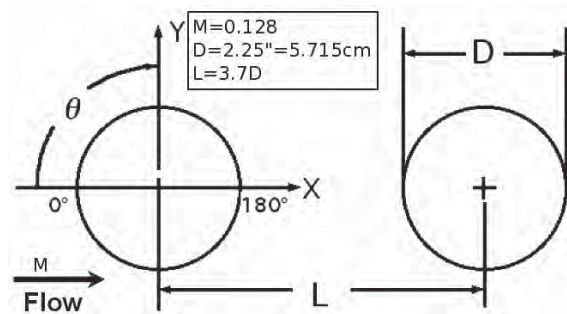


図1 直列二円柱形状

2. 数値解析手法

2.1 近傍場流体解析

CFD 解析ツールとして、JAXA で開発を進めている CFD 共通基盤プログラム UPACS⁸⁻¹¹⁾を改変した UPACS-LES を使用する。UPACS はマルチブロック構造格子に対応した有限体積法による三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式ソルバーである。Roe の近似リーマン解法を MUSCL 三次精度化した数値流束を採用、粘性項の評価には二次精度中心差分を用いる。時間積分は MFQS 陰解法¹²⁾にニュートン反復を組み合わせた時間二次精度計算である。

乱流モデルには LES/RANS hybrid 法を用いる。物体から離れた LES 領域では標準スマゴリンスキーモデル¹³⁾ ($C_s=0.2$) とし、物体近傍は Spalart-Allmaras モデル¹⁴⁾を用いる。両者の間の領域については、LES の SGS モデルと RANS の渦粘性モデルを線形につなぐ。RANS の領域の大きさは、Spalart-Allmaras モデルを用いた RANS 解析結果を元に決定する。LES/RANS hybrid 法では RANS 領域の設定が陽にできることから、円柱毎に RANS 領域の有無を設定することも可能である。

2. 2 遠方場解析手法

遠方場音圧の解析には Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H)法^{15,16)}の formulation 1A を利用する。解析対象が低マッハ数流れであることから四重極項を無視する近似を利用することで、同式の右辺項は面積分のみからなる。FW-H 法の入力データは、CFD 解析から得られる騒音源を囲い込むような面上（音響透過面）での時系列物理量である。原理的に音響透過面は音源を内包する閉局面でなければならないが、本課題のように後流がある場合には全てを囲むことができない。そこで図2に示すように、適当な下流断面位置で打ち切る。下流側面については、流体変動に伴う余分な音圧変動を除去するため、積分対象から除外する。

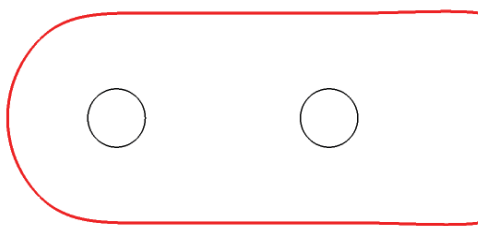


図2 FW-H法計算に利用する音響透過面

3. 計算条件及び計算格子

本論文における全ての解析結果は、Jenkins らの行った風洞試験^{3,4)}に対応し、マッハ数0.128、円柱直径Dと風速Uで無次元化したレイノルズ数が 1.66×10^5 である。またスパン方向の長さは、Lockardらの計算結果²⁾を踏まえ、円柱直径Dの18倍とする。

図3に計算格子図 (Coarse grid) を示す。計算格子はマルチブロック構造格子であり、境界層領域、LES領域、遠方場領域の3つの領域から構成されている。境界層領域は二円柱表面近傍に寄せられている格子 (図3(c), (d)参照) であり、RANS 解析を実施する時に用いられる最小格子幅、拡大比を用いて格子を作成する。その外側には、 $-1.8 < x/D < 6.3, -1.8 < y/D < 1.8$ の範囲においてLES領域を設定する。これは図3(b)中において二円柱周囲の格子密度が高い領域に相当する。LES領域の周囲には、遠方場格子があり、 $R/D=250$ の位置に設定した外部境界までの間を埋めている。

計算では格子依存性を確認するために、2つの異なる密度の格子を用いる。Coarse gridは1290万点からなる格子で、二次元断面上の格子点数は約3.6万点である。LES領域の格子幅は、流れ方向、鉛直方向、スパン方向ともに約0.05Dである。一方Fine gridは6950万点からなる格子で、二次元断面上の格子点数は約9.6万点である。LES領域の格子幅は、流れ方向、鉛直方向、スパン方向ともにCoarse gridの半分の約0.025Dである。境界層領域における最小格子幅は両格子で同値とし、遠方場領域はLES領域と接続するように作る。このように、Coarse gridはFine gridから間引いて作るのではなく、LES領域の格子解像度の着目して作成する。尚、図2で示した音響透過面は、LES領域と遠方場領域の境界面に設定されている。

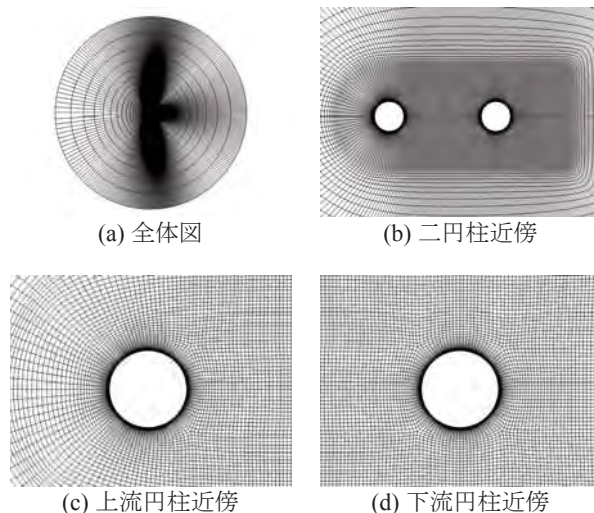


図3 計算格子図

表1が本論文で比較する計算ケースである。全部で5ケースからなり、乱流モデルの設定法および計算格子を変え、それらが遠方場音や近傍場流れに与える影響を調べる。特に、以下の点について明らかにすることを目的とする。

1) 乱流モデル設定法の影響 (Case 1-4)

物体表面の境界層部分の取り扱い方法についてLESとLES/RANS hybrid法の比較を行う。Case 1は二円柱ともLESでモデル化した場合である。使用する格子の境界層部分の最小格子幅はLESの条件を満たすが、流れ方向及びスパン方向の格子幅や壁面鉛直方向の伸長比が大きすぎるためLESとしては不十分であることから、厳密な乱流境界層計算はできない。この場合、遠方場や近傍場の予測精度がどのようになるのかを示すために実施する。Case 2は二円柱とも壁近傍のみRANSを用いるLES/RANS hybrid法の場合である。上流円柱に関しては、その更に上流に乱れがないことから妥当な仮定と考えられるが、下流円柱は上流円柱後流との干渉が生じるため、RANSに基づくモデル化が適切か検討の余地がある。そこで、Case 3では、上流円柱近傍のみをLES/RANSにより取り扱い、下流円柱をLESとして計算する。また、比較のためCase 3とは逆に上流円柱をLES、下流円柱をLES/RANSとしたCase 4を実施する。

2) 格子依存性 (Case 2,5)

二円柱ともLES/RANS hybrid法を用い乱流境界層部分をモデル化したCase 2について、格子依存性を明らかにする。

表1 計算ケース表

Case	Turb. model		Grid	dt [sec]	Time steps run
	Up	Down			
1	LES	LES	Coarse	6.7e-6	35000
2	L/R	L/R	Coarse	6.7e-6	35000
3	L/R	LES	Coarse	6.7e-6	35000
4	LES	L/R	Coarse	6.7e-6	35000
5	L/R	L/R	Fine	3.4e-6	60000

※L/R:LES/RANS hybrid

4. 計算結果

4. 1 遠方場音の比較

図4は課題で設定された遠方場の点 (Point B : (9.11D, 32.49D)) での Case 1~5 の音圧スペクトルを示す。周波数が 200Hz 弱の所に存在する狭帯域音と 200Hz 前後に山を持つ広帯域音からなり、いずれのケースでもその傾向はとらえられている。

初めに Case 1~4 の比較を行うと、上流円柱を LES として取り扱う Case 1 及び 4 では、狭帯域音のピーク周波数が実験値 (180Hz) と比較して小さい。これは後に述べる上流円柱の剥離点位置の影響のためである。また上流円柱を LES/RANS として取り扱う Case 2 及び 3 ではピーク周波数は実験と一致するものの、ピークのレベルが 10dB 近く低下している。

Case 2 について計算格子解像度を上げた Case 5 では狭帯域音のピーク周波数及びレベル、更には広帯域音のレベルも実験結果に近づく傾向がみられた。

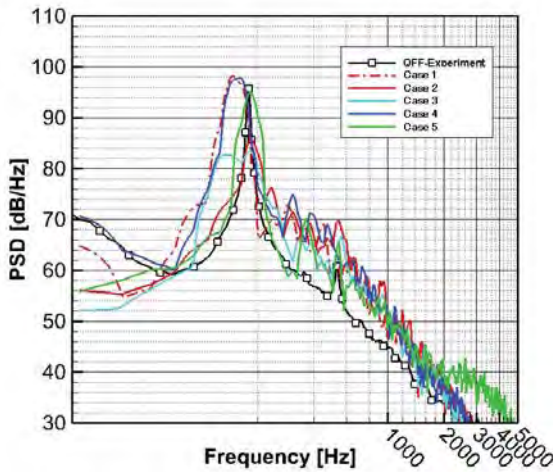


図4 遠方場における音圧比較

4. 2 近傍場流れの比較

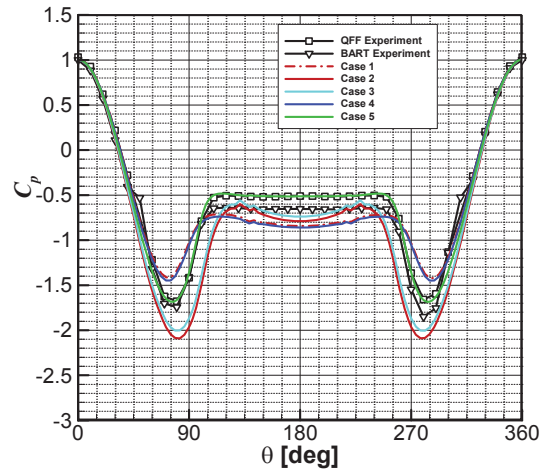
続いて近傍流れ場の検証を行う。図5は二円柱表面における時間平均圧力係数分布であり、(a), (b)はそれぞれ上下流円柱の結果を示す。尚以下に示す図では、前方よどみ点を 0 deg としている (図1参照)。

上流円柱の圧力係数分布については、実験では 75 deg 及び 285 deg 付近に負圧のピークがあり、背面側は平らな分布となっている。上流円柱を LES として取り扱っている Case 1 及び 4 については、剥離が実験より早く生じている。一方 LES/RANS を用いる Case 2 及び 3 では剥離する角度は実験より遅れ、負圧のピークも実験より大きくなっている。Case 2 について格子解像度を上げた Case 5 では負圧のピークが実験と同じ 75 deg 付近にあり、背面側の平らな圧力分布のレベルも実験結果と一致している。

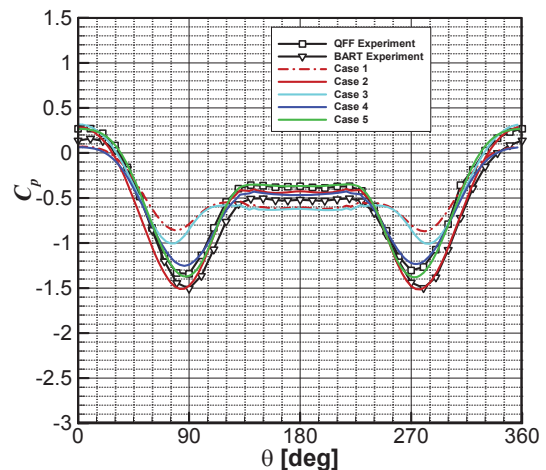
続いて下流円柱の圧力係数分布については、実験では 90 deg 及び 270 deg 付近に負圧のピークがあり、背面側は平らな分布となっている。上流円柱同様、下流円柱を LES として取り扱っている Case 1 及び 3 は、剥離が実験より早く生じている。一方 LES/RANS を利用する Case 2 及び 4 では剥離する角度は実験と一致し、負圧のピークのレベルは実験と同程度となっている。Case 2 について格子解像度を上げた Case 5 も実験結果と一致している。

以上まとめると、上流円柱だけでなく上流円柱からの後流に埋もれている下流円柱についても、LES/RANS で取り扱う方が実験結果に近い表面圧力分布が得られる。また上

流円柱に関しては Coarse grid では十分に流れ場が解像できておらず、Fine grid 以上に細かい格子が必要である。



(a) 上流円柱



(b) 下流円柱

図5 二円柱周りの時間平均圧力係数分布

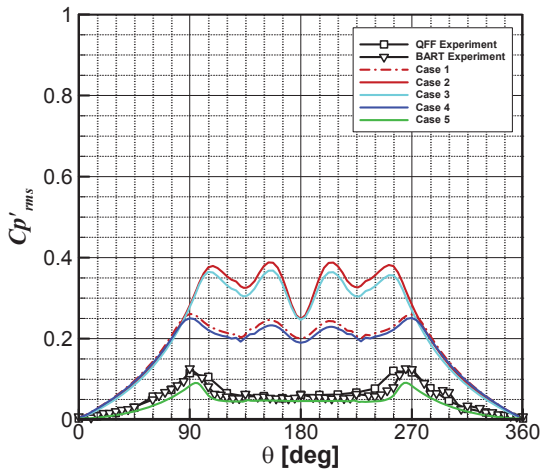
次に円柱表面における圧力変動係数の二乗平均分布の結果を図6に示す。

図6(a)に示すように上流円柱では、剥離点の下流側 (90deg, 270deg) でピークが観察され、背面側 (90 deg < theta < 270 deg) では圧力変動が一定値となる分布が実験では得られている。一方 CFD の結果は Coarse grid を用いた Case 1~4 ではいずれもレベルが高くなり、背面側で圧力変動が一定値とならず2つの小さなピークが存在する。Fine grid を用いている Case 5 の結果は実験結果と分布及びレベルが一致する。これは上流円柱後流流れ場の影響であり、詳細については後述する。

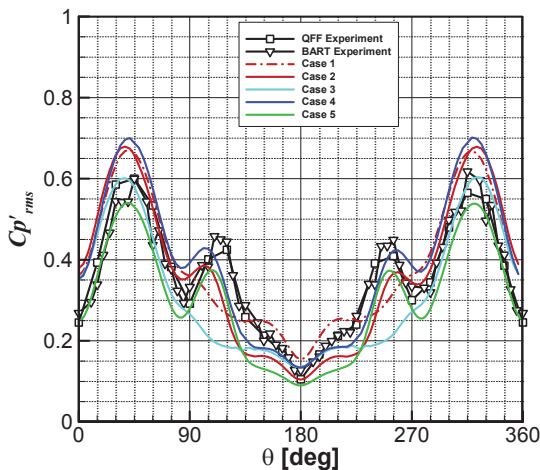
続いて下流円柱では、4つのピークが実験で観察されている。45 deg および 315 deg 近傍のピークは上流円柱後流が下流円柱に衝突するためであり、110 deg および 250 deg 近傍のピークは下流円柱表面での剥離のためである。円柱表面の乱流モデルに依存して、レベルに違いがあるものの、いずれの計算結果においても 45 deg および 315 deg 近傍のピーク位置は予測されている。一方下流円柱表面での剥離

点に関係のある 110 deg および 250 deg 近傍のピークは、下流円柱を LES としている Case 1 及び 3 では明確でない。また、LES/RANS として取り扱っている Case 2 及び 4 では再現されているが、実験と比較するとピークとなる角度が 10deg 程度早くなっている。Fine grid による Case 5 の結果では、Case 2 と比較してピークがより明確になるものの、ピークとなる角度は改善しない。

尚、上流の変動と下流の変動レベルを比較すると下流円柱の方が値が大きくなっているため、下流円柱からの放射音が大きいと予想される。



(a) 上流円柱



(b) 下流円柱

図6 二円柱周りの時間平均圧力変動係数分布

二円柱間の時間平均化された流れ方向速度分布を図7に示す。グラフ下の模式図が示すように、 $x/D=0.5$ が上流円柱の後方よどみ点、 $x/D=3.2$ が下流円柱の前方よどみ点となる。実験結果の分布では、上流円柱後方には流れ方向速度が負となる再循環領域が形成されており、その大きさは $1.2D$ 程度である。Coarse grid の計算結果を観察すると、上流円柱を LES として取り扱う Case 1 及び 4 が LES/RANS とする Case 2 及び 3 より実験に近い速度分布となっている。しかし、既に示した表面圧力分布において上流円柱後方の剥離

流れが実験と異なることが明確に分かっており、流れ場全体としては実験結果を再現していないと考えられる。Case 2 について格子を細かくした Case 5 では、他の比較図と同様、実験結果に近い分布が得られることから、流れ方向速度分布に関しても、二円柱ともに LES/RANS として取り扱う方が良いと考えられる。

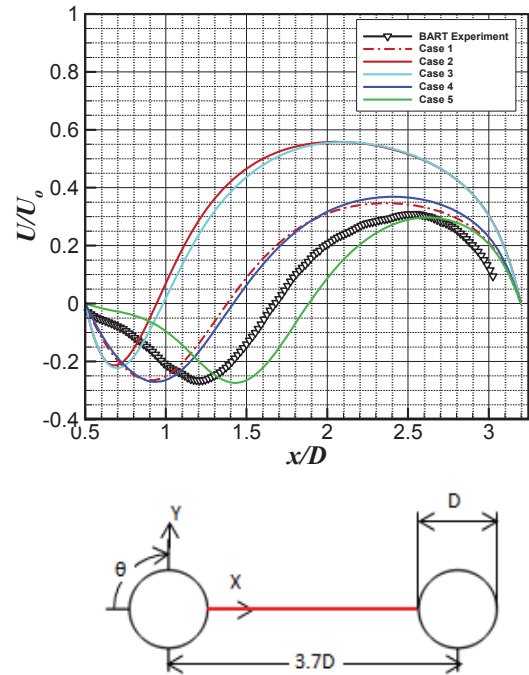


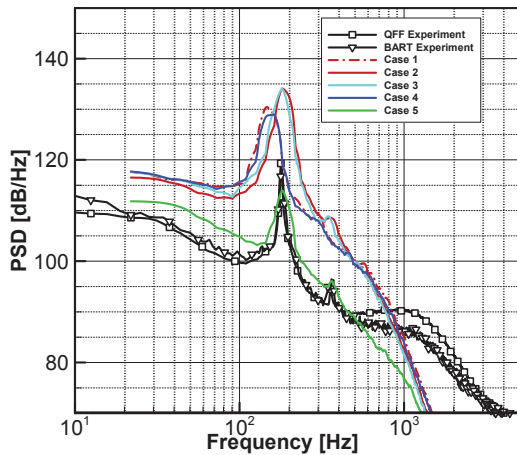
図7 二円柱間の x 軸上の流れ方向速度プロファイルの比較

図8に、二円柱上に設置された非定常圧力計測点での比較結果を示す。

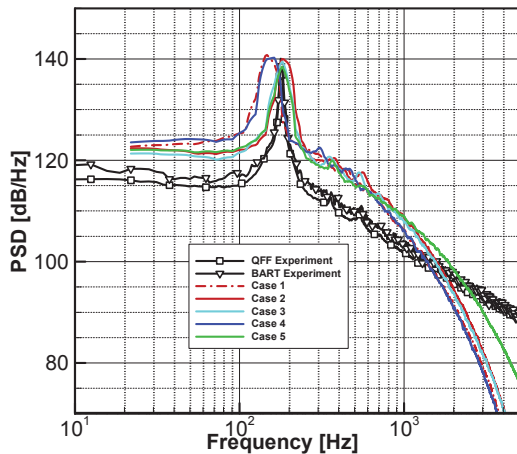
上流円柱上は 135deg の点であり、これは剥離後の非定常流れを観察することが目的である。Coarse grid の結果は、図6(a)で示した結果同様に全周波数域において PSD の値が高い。ピーク周波数は遠方場の結果と同様、上流円柱を LES として取り扱う Case 1 及び 4 では狭帯域音のピーク周波数が実験値 (180Hz) と比較して小さい。上流円柱を LES/RANS として取り扱う Case 2 及び 3 ではピーク周波数は実験と一致し、Fine grid の Case 5 の結果ではレベルも実験と一致した結果が得られる。

下流円柱については上流からの乱れた流れが衝突する 45deg の点で比較する。これは図6(a), (b)の中で変動が最大となる点である。ピーク周波数については、遠方場及び上流円柱と同じ傾向が得られている。上流円柱の傾向と異なる点は、狭帯域音や広帯域音の PSD レベルの格子依存性が小さい点である。

図8(a)と(b)を比較すると、PSD レベルが下流円柱の点で全周波数域にわたって高いことから、図6の結果からも予想されたように、遠方場音のレベルは下流円柱が支配していると考えられる。



(a) 上流円柱 ($\theta=135\text{deg}$)



(b) 下流円柱 ($\theta=45\text{deg}$)

図8 円柱表面上の点における PSD

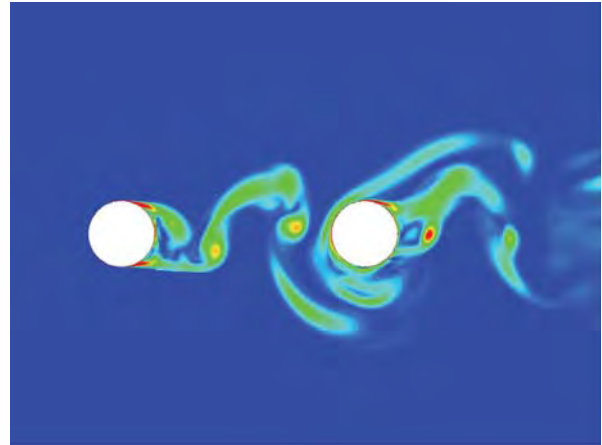
最後に断面上速度変動成分 (u' , v') のみからなる乱流エネルギー分布の瞬時値 (断面は $z/D=9$) を 図9 に示す。図9 (a) は Case 2 (Coarse grid) の結果であるが、上流円柱からの剥離せん断層が発達せず、上流円柱の直後で渦を放出している。一方 Case 5 (Fine grid) の結果である図9 (b) をみると、上流円柱からの剥離せん断層が発達し、1D 程度下流側で崩壊の後、渦を放出している。図6 (a) で、Coarse grid の圧力変動係数が Fine grid や実験と比べて大きい原因は、上流円柱直後での大きな流れ場の振動である。これは図7 において再循環領域の大きさが Fine grid や実験と比較して Coarse grid で小さくなっている事実とも一致する。

4. 3 考察

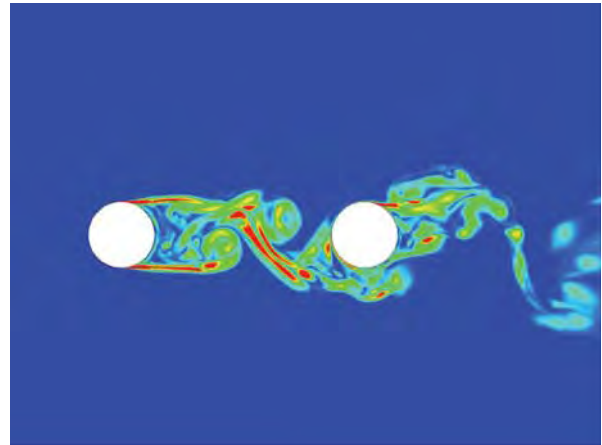
狭帯域音の周波数は上流円柱からの剥離流れが決めており、その予測のためには上流円柱境界層を LES/RANS で取り扱う必要がある。狭帯域音の音圧レベルは上流からの乱れが下流円柱に衝突することによって決定され、下流円柱境界層そのものの影響は小さい。広帯域音に関しては、今回の解析の範囲内においては大きな変化が生じていない。

近傍場はカルマン渦そのものだけでなく、物体表面の剥離位置、そこから発達する剥離せん断層をとらえることが、重要であることが明らかになった。近傍流れ場を再現する

ためには、二円柱ともに LES/RANS を用いる方が実験に近い結果が得られることが分かった。



(a) Case 2 (Coarse grid)



(b) Case 5 (Fine grid)

図9 断面上速度変動成分のみからなる乱流エネルギー分布

5. まとめ

Workshop on Benchmark problems for Airframe Noise Computations (BANC) - I で課題となった直列二円柱周りの遠方場音予測を、UPACS-LES を用いて計算した。二円柱の乱流モデルの取り扱い方や格子解像度を変化させ、遠方場音や近傍場流れに与える影響を明らかにした。

遠方場音に関しては、いずれの方法でも実験でみられるような狭帯域音と広帯域音の組み合わせからなるスペクトルが観察された。ただし上流円柱を格子解像度の不足した LES とした場合には、ピーク周波数がずれることが示された。一方近傍場を確認すると、格子解像度の不足した LES 解析では剥離点が上流側へと移動し、その結果時間平均の圧力係数、圧力変動係数、速度分布が実験結果と異なることが示された。近傍場再現の観点からは二円柱ともに LES/RANS hybrid 法で設定する法が望ましい。更に近傍場においては、上流円柱からの剥離せん断層が存在し、近傍場だけでなく、遠方場にも影響を与えていることが示された。剥離せん断層は物体表面から離れたところから、格子生成の段階から注意する必要がある。Fine grid を用いた LES/RANS hybrid 解析は遠方場のみならず、近傍場において比較した様々な値が実験に近づく傾向が確認された。このようにさまざまな物理量の比較を通じ、計算結果の検証をすることの重要性が認識できた。

今後はそのほかの LES/RANS 法（例えば delayed detached-eddy simulation (DDES)）や、高次精度スキームを用いた場合について検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会優秀若手海外派遣事業（常勤研究者）の支援の元、実施された。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) https://info.aiaa.org/tac/ASG/FDTC/DG/BECAN_files/_Workshop_June_2010_Final_problem_Statements/Contact_Information.pdf
- 2) Lockard, D. P., Khorrami, M.R., Choudhari, M.M., Hutchenson, F.V., Brooks, T.F., and Stead, D.J., "Tandem Cylinder Noise Prediction", AIAA paper 2007-3450
- 3) Jenkins, L.N., Khorrami, M.R., Choudhari, M.M. and McGinley, C.B., "Characterization of Unsteady Flow Structures around Tandem Cylinders for Component Interaction Studies in Airframe Noise", AIAA paper 2005-2812
- 4) Jenkins, L.N., Neuhart, D.H., McGinley, C.B., Choudhari, M.M., and Khorrami, M.R., "Measurements of Unsteady Wake Interference Between Tandem Cylinders", AIAA paper 2006-3202
- 5) Khorrami, M., Lockard, D., Choudhari, M., Jenkins, L., McGinley, C. and Neuhart, D., "Simulations of Bluff Body Flow Interaction for Noise Source Modeling" AIAA paper 2006-3203
- 6) Enomoto, S., Nozaki, S., Imamura, T., and Yamamoto, K., "Large-Eddy Simulation of Jet Noise using Multi-block Structured Grid", IGTC2007-ABS-148
- 7) Imamura, T., Ura, H., Yokokawa, Y., Enomoto, S., and Yamamoto, K., "Three-dimensional Unsteady Flow around Conventional Slat of High-Lift-Devices", AIAA Journal Vol. 46, Number 5, 2008, page 1045-1053
- 8) Yamane, T., Yamamoto, K., Enomoto, S., Yamazaki, H., Takaki, R., and Iwamiya, T., "Development of a Common CFD Platform - UPACS -," in Parallel Computational Fluid Dynamics - Proceedings of the Parallel CFD 2000 Conference, Trondheim, Norway, Elsevier Science B. V., 2001, pp. 257-264.
- 9) Takaki, R., Yamamoto, K., Yamane, T., Enomoto, S., and Mukai, J., "The Development of the UPACS CFD Environment," in High Performance Computing Proceedings of 5th International Symposium, ISHPC 2003, Ed. Veidenbaum et al., Springer, 2003, pp307-319.
- 10) Murayama, M., Yamamoto, K., and Kobayashi, K., "Validation of Flows on High-Lift Configurations by Structured- and Unstructured- Mesh Method", AIAA Paper 2005-1226, Jan. 2005.
- 11) Yamamoto, K., Ochi, A., Shima, E., and Takaki, R., "CFD Sensitivity of Drag Prediction on DLR-F6 Configuration by Structured Method and Unstructured Method," AIAA Paper 2004-0398, Jan. 2004.
- 12) Shima, E., "A Simple Implicit Scheme for Structured/Unstructured CFD," Proceedings of 29th Fluid Dynamics symposium, Hokkaido, Japan, 1997, pp.325-328. (in Japanese)
- 13) Smagorinsky, J., "General Circulation Experiments with the Primitive Equations", Mon. Weath. Rev., Vol.91, No.3, pp.99-164. (1963)
- 14) Spalart, P.R., and Allmaras, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 92-0439, Jan. 1992.
- 15) Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary

Motion," Phil. Trans. Roy. Soc. (London), Ser. A, 264, 321-342.

- 16) A.S.Lyrantzis, "Surface integral methods in computational aeroacoustics - From the (CFD) near-field to the (Acoustic) far-field", Inter. J. Aeroacoustics, Vol. 2, No. 2, 2003, pp.95-128.