

航空機の脚要素と脚収納部の干渉による騒音発生 の基礎検討

山本 一臣 (宇宙航空研究開発機構), 梁 裕卓 (スカイマーク), 村山 光宏 (宇宙航空研究開発機構),
野崎 理 (高知工科大学), 平井 亨 (菱友システムズ)

Basic Investigation on Noise Generation Due to Interactions between Aircraft Landing Gear Components and Gear Bay

YAMAMOTO Kazuomi (JAXA), YAN Yutaku (Skymark Airlines), MURAYAMA Mitsuhiro (JAXA),
NOZAKI Osamu (Kochi University of Technology), and HIRAI Tohru (Ryoyu Systems)

ABSTRACT

In order to understand the noise generation due to interactions between the side-brace wake and the gear-bay shear-layer of the main landing gear, a simple numerical flow analysis on a rectangular open cavity including a circular cylinder is conducted by using two-dimensional laminar flow computations. The results show that modification of the cylinder location relative to the cavity leading edge drastically changes the oscillation modes and frequency characteristics of the cavity flow. Although the computational model is too simple to clarify the interaction noise of the real aircraft landing-gear, it provides a basic knowledge of the noise generation physics.

1. はじめに

旅客機の離着陸による空港周辺騒音は、ジェット旅客機が登場した1950年代後半に比べると、大きく低減してきたものの、航空輸送需要の増加により、特に頻繁に離発着が行われる都市圏の空港を中心に今でも重要な環境問題となっている。最近のエンジンのバイパス比向上により離陸上昇時の騒音は段階的に低減が進んでいるが、空港へ低空で進入する着陸進入時の騒音レベルは1990年代から停滞しはじめ、今後の低騒音化の技術課題となっている¹⁾。特に最近の低騒音エンジンを搭載した機体では、着陸進入時に機体騒音が顕在化しているが²⁾、その原因は主に高揚力装置(スラットとフラップ)と降着装置(前脚と主脚)の周囲で大きく乱れた気流によって生じる空力騒音である。そのうち降着装置は、特に大型旅客機において最も大きな騒音源であることが示されている³⁾。降着装置の騒音は様々な大きさの脚要素から発生するとともに、要素間の空力干渉によって発生すると考えられている²⁾。

本研究では、JAXAの機体騒音低減技術の飛行実証FQUROH⁴⁾の結果で報告された、主脚の低周波数騒音の発生の原因となり得るサイドブレースの後流と収納

部開口部のせん断層との干渉に着目する。JAXA実験用航空機「飛翔」の主脚(図1)に対する非定常CFDから得られた複雑な流れ場を踏まえ、基礎的な理解を得ることを目的に、円柱とキャビティに単純化した形状について2次元層流の非定常CFD解析を実施した。キャビティに対して相対的に円柱の位置を変化させ、騒音の原因となる、円柱後流とキャビティ開口部のせん断層の振動が大きく変化する様子を調べた。

2. 研究の動機 — 飛翔の主脚収納部の騒音発生

JAXAでは民間企業と共同で機体騒音低減技術の成熟を目的に、FQUROHプロジェクトにおいてJAXAの実験用航空機「飛翔」を用いた技術実証を行った¹⁾。主脚の低騒音化の設計に用いた、実スケール主脚模型による風洞試験結果は、騒音スペクトルを飛行試験結果と比較したとき、図2のように良い一致が得られている⁶⁾。ただし、250Hz以下の低周波数域にはその特性に違いが現れ、風洞床面の境界層厚さと主翼下面の境界層厚さの違いがその原因であることが明らかになっている⁷⁾。このことから低周波数域の主な騒音源が脚収納部であると考えている。

大きな空洞となる主脚収納部では、キャビティ開口部のせん断層がキャビティ後縁で発生する音波のフィードバックによって自励振動を起し、騒音が発生する可能性がある。しかしその周波数をRossiterの経験式⁸⁾から推定すると、飛翔の主脚収納部では50Hzのオーダーの可聴域下限となる。より大きな旅客機の脚収納部におけるキャビティ騒音はさらに低い周波数となるため、音響フィードバックを伴う典型的なキャビティ音では無く、脚要素の後流と収納部との干渉による干渉騒音の可能性が高いと考えられている。



図1. JAXA実験用航空機「飛翔」とその主脚

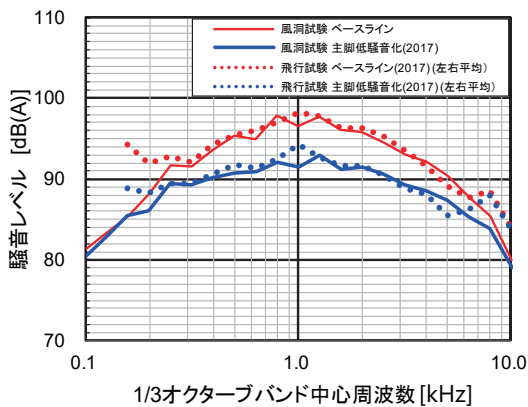


図2. 飛翔主脚の騒音スペクトルの飛行試験と風洞試験との比較

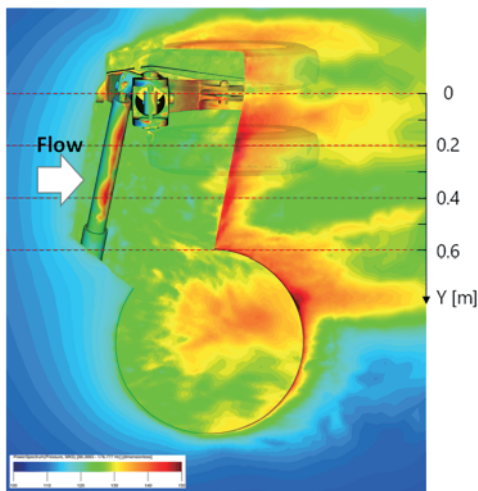


図3. VLESによる収納部周辺の表面圧力変動

飛翔の主脚の場合、図1のように、収納部と干渉する要素として支柱（トラニオンとオレオ・ストラット）、サイドブレースの3つがある。支柱の後流が収納部の後縁で誘起する速度変動は、主に後縁に平行な方向であることにに対し、サイドブレースは主に垂直方向成分を誘起することから、サイドブレースの後流が干渉騒音の発生に大きな影響を与えている可能性がある。

図3は格子ボルツマン法（PowerFLOW）を用いた Very Large Eddy Simulation（村山ら⁹⁾と同様の計算により得た、主脚収納部とサイドブレース、トラニオン表面の圧力変動成分を可視化したものである。空力騒音発生メカニズムとしては双極子音¹⁰⁾に分類され、表面の圧力変動レベルの高い箇所が主な音源になりやすい。図3からは、サイドブレースと収納部のキャビティ後縁の上面がそのような箇所であることが分かる。

図3に示すY座標一定の断面における瞬間の速度分布と圧力変動分布をそれぞれ図4、図5に示す。Y = 0.3 m, 0.4 m 位置では、サイドブレース周囲の流れと収納部のせん断層が干渉し、収納部後縁に大きな速度と圧力の変動をもたらしているように見える。また、図2における飛行試験データは、160Hz以下でさらに騒音レベルが増える傾向もみられるが、仮に円形断面のサイドブレースによって発生するカルマン渦のストローハ

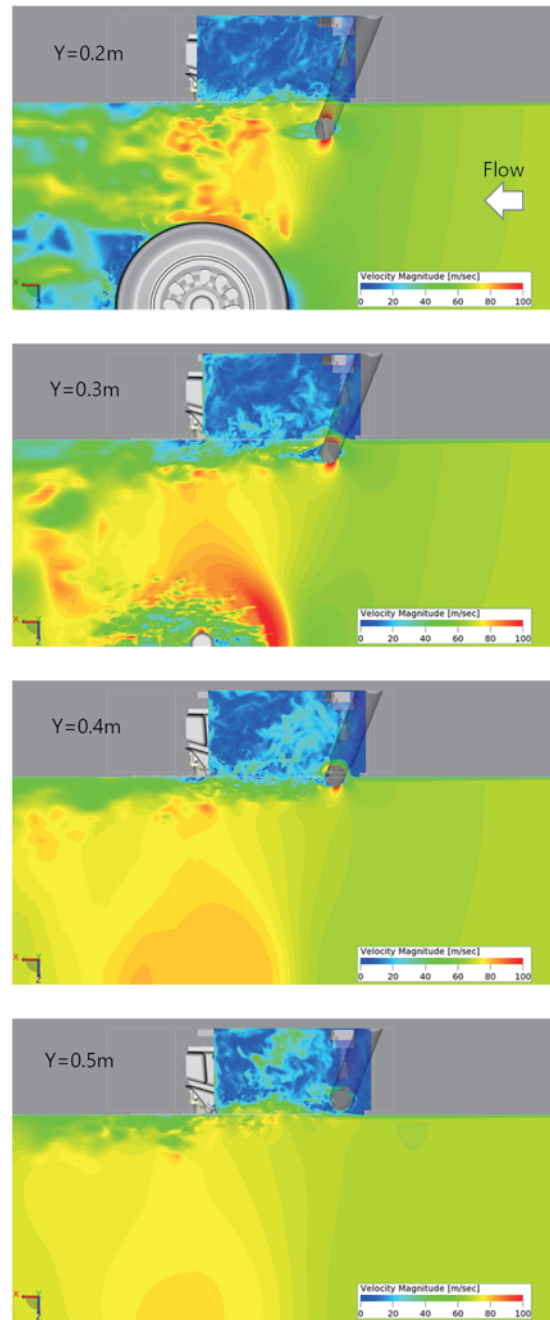


図4. Y座標一定断面上の瞬間の速度分布

ル数を0.2と仮定すると周波数は160Hzとなり、周波数のオーダーが合っている。サイドブレース単独の音とともに、その下流に位置する収納部後縁にサイドブレースの後流が変動を与えることで、収納部から騒音が発生している可能性もある。

このような飛翔の主脚収納部に関連する低周波数騒音の発生メカニズムを理解するために、飛翔の主脚の形状を直接扱って検討を進めることもできるが、Y = 0.2 m の断面の可視化図を見ると明らかなように、車輪や支柱の影響を受けた3次元的な流れ場で、同時に他の要素からの騒音が含まれているため現象の理解は容易ではない。

そこで本研究では、その3次元形状と高レイノルズ数

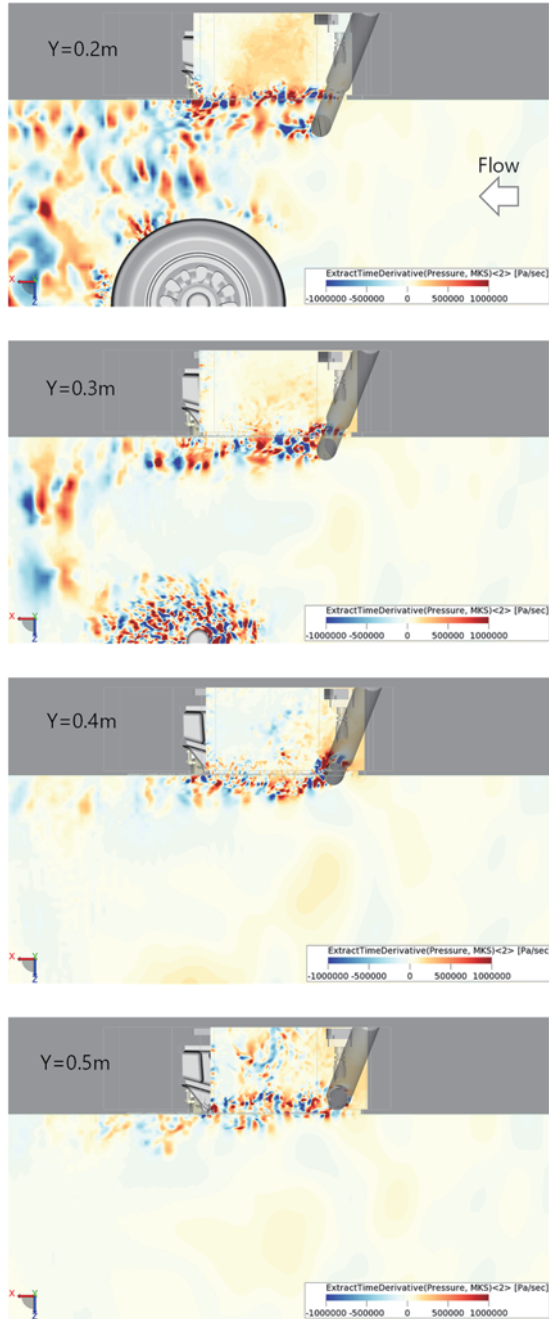
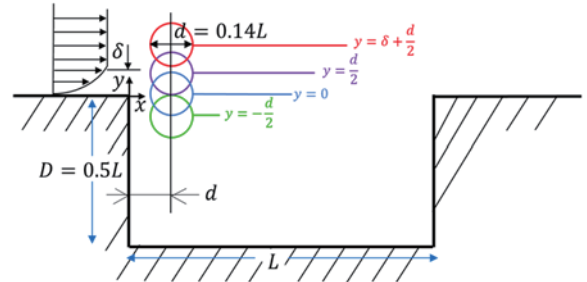


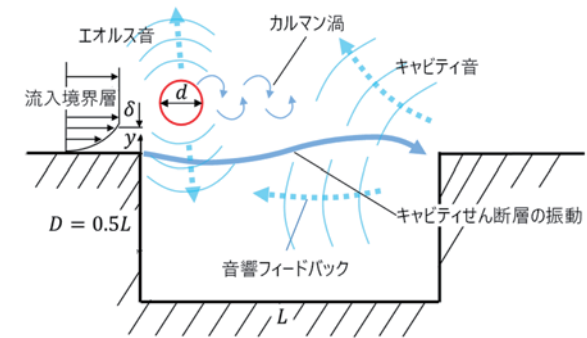
図5. Y座標一定断面上の瞬間の圧力変動分布

の複雑な流れを分析する前段階として、まず、円柱とキャビティという単純な形状ではどのような干渉が起こり得るか、2次元層流まで単純化したCFD解析により基礎的な物理現象を理解することを試みる。以下に示すように、レイノルズ数は実機の約1/300であるため、得られた結果をそのまま図3から図5に示した流れ場の解釈に使うことはできないが、キャビティ開口部のせん断層（以下、キャビティせん断層と呼ぶ）と円柱後流の干渉ではどのような事が起こり得るかを知らぬことに役立つと考えた。

以下、まず脚収納部とサイドブレースを単純化した2次元形状と計算手法について説明し、設定した気流条件とともに、キャビティ、円柱それぞれの流れの振動



(a) キャビティ形状と円柱の配置



(b) 干渉する変動流れの要素

図6. 脚収納部とサイドブレースを単純化した2次元モデル形状

と音の発生について述べた後、円柱位置をキャビティに対して相対的に変化させた時の特性の変化について結果を示し、得られた知見をまとめる。

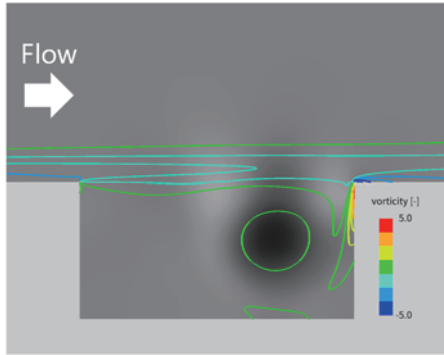
3. 対象とした2次元形状

解析対象とした2次元形状を図6(a)に示す。飛翔の主脚収納部とサイドブレースの寸法比を参考に、それぞれを単純な矩形キャビティと円柱に置き換える。キャビティ長さ L を代表長にした時、キャビティ深さは $D = 0.5L$ 、サイドブレースを模した円柱の直径は $d = 0.14L$ である。主流マッハ数は航空機の着陸進入速度を想定し $M = 0.2$ とする。

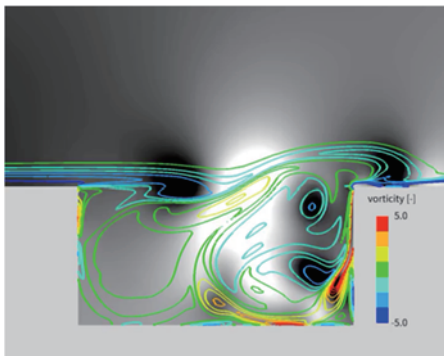
2次元層流を仮定したキャビティ流れについてはRowleyら¹¹⁾が詳しく調べている。キャビティせん断層の振動モードには、キャビティ内に音波のフィードバックが存在することでキャビティせん断層が自励振動を起し、Rossiterの経験式⁹⁾が示す特定の周波数の近くでピーク音が見られるshear-layerモードと、キャビティ内にフィードバックが存在せず、不規則な振動で広帯域音となるwakeモードがあることが示されている。

図7(a)-(c)は、主流マッハ数が0.2の時に、キャビティに流入する境界層の運動量厚さ θ によってキャビティせん断層の振動モードが変化の様子を示している。図7(d)はキャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトル密度を、キャビティ長さ L を用いたストローハル数 St_L に対して示しているが、境界層が薄くなるに従い、定常状態から音響フィードバックを伴うShear-layerモード、不規則な振動となるWakeモードに変わっていく。

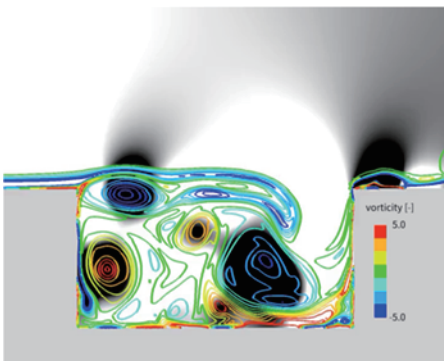
本研究では、矩形キャビティ流れが音響フィードバックによってShear-layerモードを生じる境界層厚さ $\theta/L = 1/80$ の条件に対して、図6(a)に示すように円柱の位置を移動させることにより、両者の干渉とそれによ



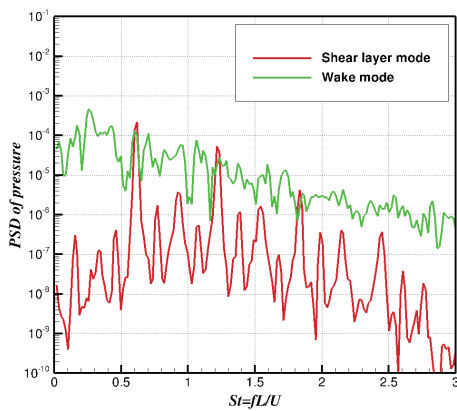
(a) $\theta/L = 1/50$, 定常状態



(b) $\theta/L = 1/80$, Shear-layerモード

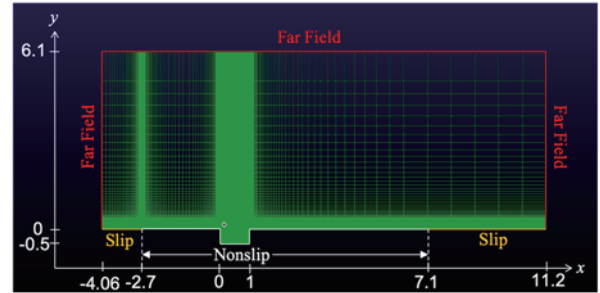


(c) $\theta/L = 1/150$, Wakeモード

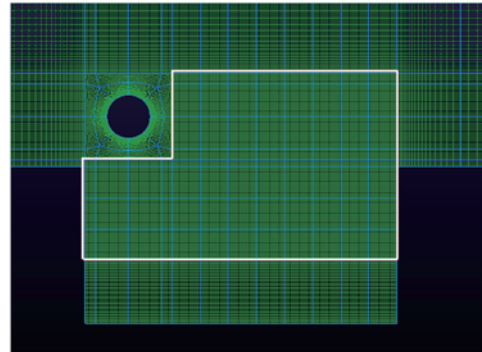


(d) 圧力変動のパワースペクトル密度

図7. 運動量厚さに対するキャビティ流れの振動モードの変化 ; (a)-(c) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線, (d) キャビティ底面中央の圧力変動のパワースペクトル密度.



(a) 計算格子全体



(b) キャビティと円柱周辺拡大

図8. 計算格子と境界条件

る流れ場の振動の変化を調べることにした. 具体的には図6(b)に示すような, キャビティせん断層の振動とそれに伴う音響フィードバック, 円柱後流のカルマン渦とそれに伴うエオルス音が干渉するときどのような振動現象が生じるのかに注目していく.

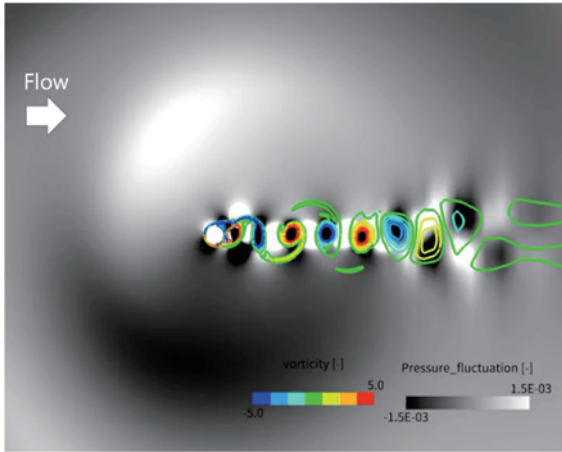
円柱の位置は, 飛翔のサイドブレースの位置を参考にして, 流れ方向はキャビティ前縁から円柱の直径 d だけ離れた位置に中心を置き, 高さ方向は次の4ケースについて計算を行った.

- A: 円柱上面がせん断層に接している ($y = -d/2$)
- B: 円柱中心がキャビティ上端にある ($y = 0$)
- C: 円柱がせん断層に被っている ($y = d/2$)
- D: 円柱下面がせん断層に接する高さ ($y = \delta + d/2$)

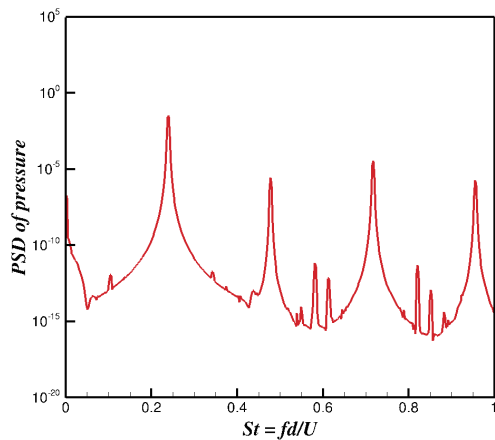
4. 計算方法

CFD解析にはマルチブロック構造格子での有限体積法を基礎にした Navier-Stokes 方程式計算コード UPACS¹²⁾を用いた. 対流項スキームには低速流れで数値粘性が少ないSLAU¹³⁾を用い, 3次精度風上差分によって計算を行った. 粘性項は2次精度中心差分, 時間積分は3次精度Runge-Kutta法による陽解法によって計算を行った.

計算格子, 境界条件は図8のように設定している. 計算格子点数は12.8万点, キャビティ前縁の境界層は y 方向に約30点の等間隔格子で捉えている. 特に図8 (b)の白枠で示すキャビティと円柱後流の領域は, 流入境界層の格子幅と同じ幅の等間隔格子とし, せん断層の振動と音波の発生を精度良く捉えられるようにした. キャビティ上流の境界層は, 飛翔の主翼とキャビティの寸法比を参考にキャビティ長さ L の2.7倍の距離から発達させた. この寸法でキャビティ前縁位置での境界層



(a) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線



(b) 円柱上面の圧力変動パワースペクトル密度
図9. 円柱単独の流れ

の運動量厚さを $\theta/L = 1/80$ とするため、キャビティ長さ L を基準にしたレイノルズ数は7600 (円柱直径 d を基準にしたレイノルズ数は1064) となった。

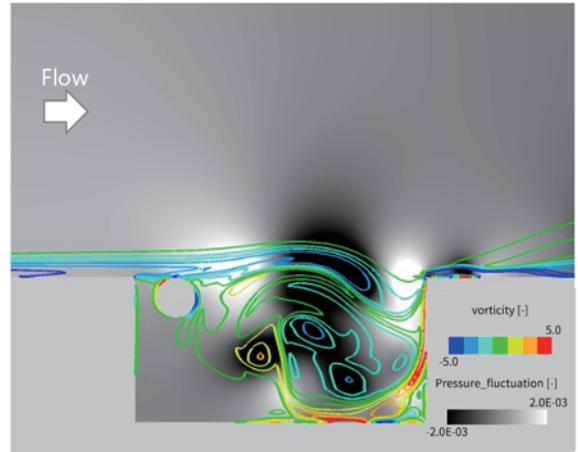
遠方境界条件には外部流の計算に使われるマッハ数を合わせる流入・流出境界条件⁴⁾を用いた。特に積極的に音波を減衰させるバッファゾーンや無反射境界条件を用いていないが、遠方境界で反射波が減衰し、計算領域で共鳴などが起きないことを確認した上で計算を進めた。

2章で述べたように低周波数域 ($St_L = 0.5 \sim 2.0$) に注目するため、一様流 U とキャビティ長さ L を基準にしたとき、非定常データをサンプリングした時間は $T = 87.6L/U$ 、スペクトルを求めるためのサンプリング周波数は $f_s = 35.1U/L$ 、周波数分解能は $\Delta f = 0.017U/L$ である。

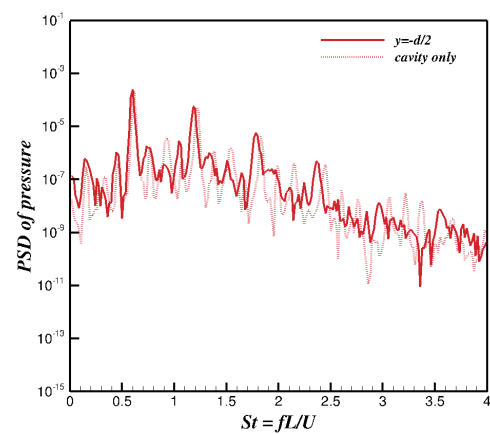
5. 計算結果と考察

5.1. キャビティ、円柱単独のときの流れの特性

続いて説明するキャビティと円柱の干渉を含む計算との比較のために、最初にキャビティと円柱それぞれ単独の特性について述べる。キャビティ単独の場合、3章で述べたように、流入する境界層の厚さによって図7に示すShear-layerモードとWakeモードが発生する。Shear-layerモードではキャビティせん断層の振動によってキャビティ後縁側で発生する音がせん断層の振動



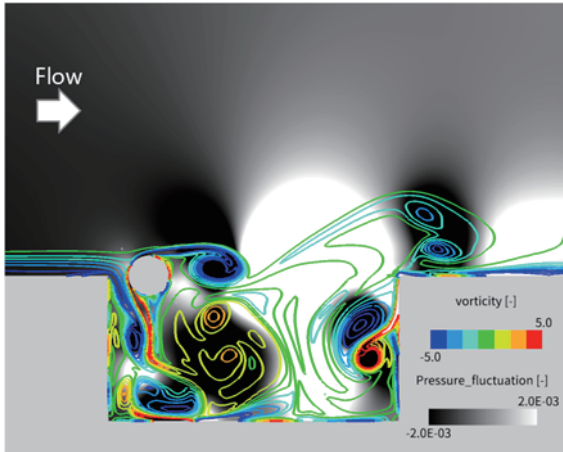
(a) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線



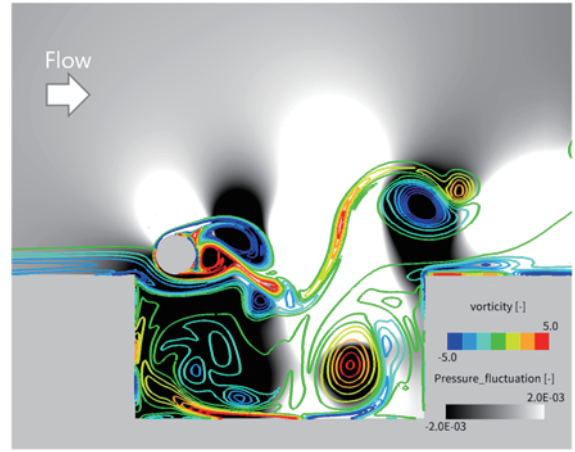
(b) キャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトル密度
図10. ケースA ($y = -d/2$) の流れ

を励起する音響フィードバックが存在する。図7(d)のキャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトルに現れている強いピークは、せん断層の振動がキャビティ開口部に一波長を持つ1次モードの基本周波数 $St_L = 0.61$ とその高調波成分である。 $St_L = 0.93$ のやや低いピークが二波長となる2次モードに対応している。流入境界層が薄くなるとせん断層はより不安定になり、2次元層流計算では、せん断層がキャビティ内で大きく渦巻くとともに不規則に振動するWakeモードとなる。このときShear-layerモードとは異なり、図7(d)に示すように圧力変動パワースペクトルは広い周波数域で変動レベルが増える。

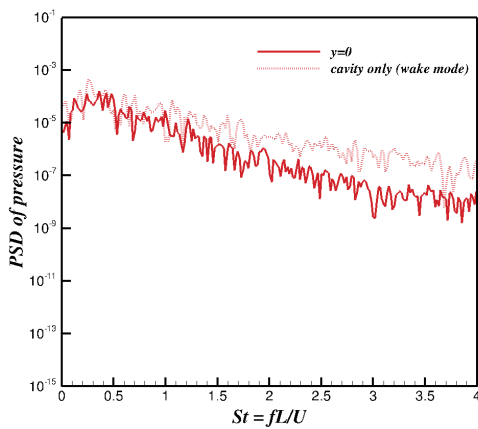
次に円柱の流れの計算結果を図9に示す。図9(a)のようにカルマン渦によりエオルス音が発生していることが分かる。図9(b)の円柱上面の圧力変動スペクトルが示すように、基本周波数は円柱直径 d を基準にしたストローハル数では $St_d = 0.24$ となり、一般に知られている0.2より高めになっている。これは2次元層流を仮定しているため、レイノルズ数が1000になっても、せん断層のスパン方向の不安定性が作られず、2次的に大きな振動になることが原因と考えられる。なお、この基本周波数はキャビティ長さ L を基準にした場合は $St_L = 1.7$ となる。



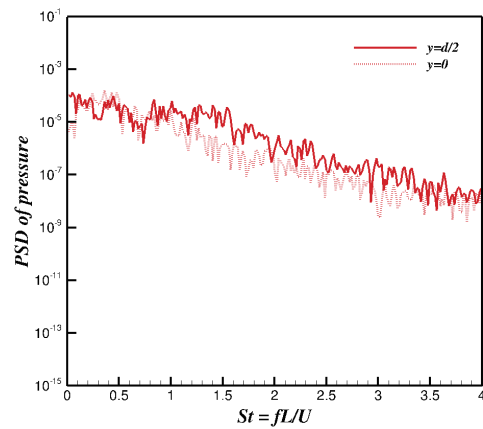
(a) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線



(a) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線



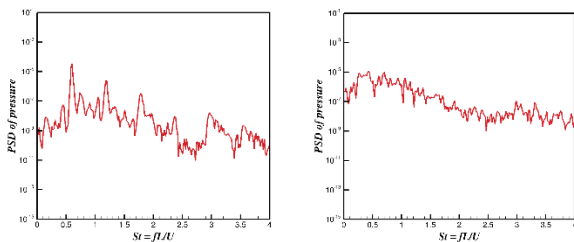
(b) キャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトル密度



(b) キャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトル密度

図11. ケースB ($y = 0$) の流れ

図13. ケースC ($y = d/2$) の流れ



(a) ケースA ($y = -d/2$) (b) ケースB ($y = 0$)
 図12. 円柱の上方(x, y) = (d, L)の位置における圧力変動のパワースペクトル密度.

5.2. ケースA ($y = -d/2$)

まず、円柱がキャビティせん断層の下に隠れる条件での結果を図10に示す. 図10(b)に示す, キャビティ底面中央の圧力変動スペクトルには図7(b)のキャビティ単独のShear-layerモードも重ねている. 円柱とせん断層の干渉が少ないため, ストローハル数2.5以下の特徴的な1次モードのピーク周波数は, キャビティ単独の場合より僅かに低い周波数になるだけでほとんど違いが現れない.

5.3. ケースB ($y = 0$)

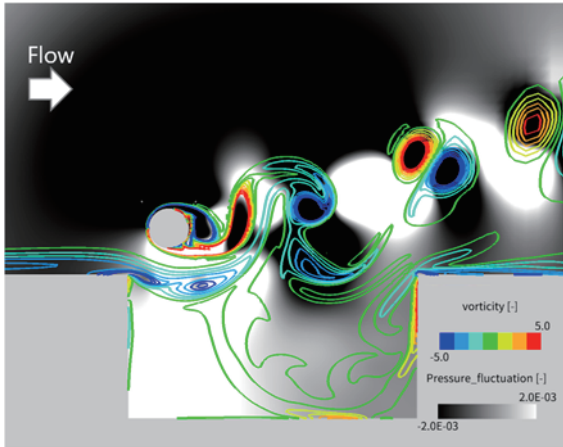
中心位置がキャビティ前縁高さになった場合には, 円柱上部位置は流入境界層の99%厚さ δ よりは低いが,

図11(a)に示すように, 流入境界層の大半はキャビティ前縁と円柱の隙間を通過してキャビティ内部に流れ込む. 円柱上面側から新たに薄いせん断層が発達することで, 図11(b)に重ねたキャビティ底面中央の圧力変動スペクトルの比較のように, キャビティ単独のWakeモードと同様の流れになる.

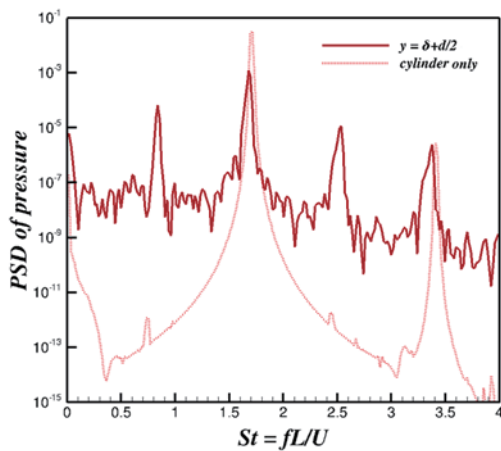
なお, 図12にケースAとケースBを例として, 円柱上方の音響場における圧力変動のパワースペクトルを示す. 図10および図11のキャビティ底面中央のパワースペクトルと比較して分かるように, $St_L < 2.5$ ではそれらの特徴に大きな違いは無い. したがって, 以降の説明でも圧力変動の代表点としてキャビティ底面中央の値を用いて比較する.

5.4. ケースC ($y = d/2$)

円柱上部が流入境界層より若干外側に出ると, 図13(a)に示すように, 不安定ながら円柱の下流にはカルマン渦が形成されるようになる. 図13(b)の圧力変動スペクトルはケースB同様にWakeモードの不規則な振動を示しているが, ケースBと比較した時にストローハル数 $St_L = 1.7$ 周辺の $St_L = 1.3 \sim 2.0$ でレベルが増えており, 円柱のカルマン渦の影響が出始めていることを示している.



(a) 瞬時の圧力変動分布と渦度の等高線

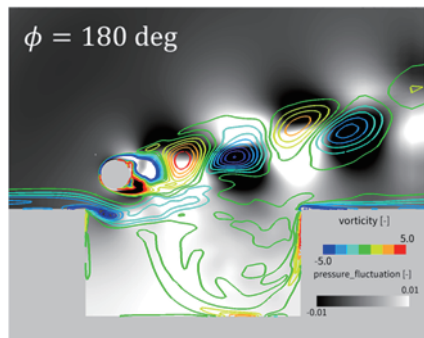
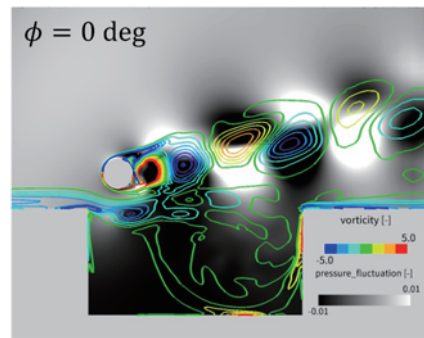


(b) キャビティ底面中央の圧力変動パワースペクトル密度

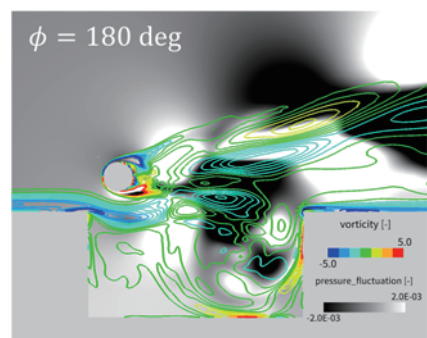
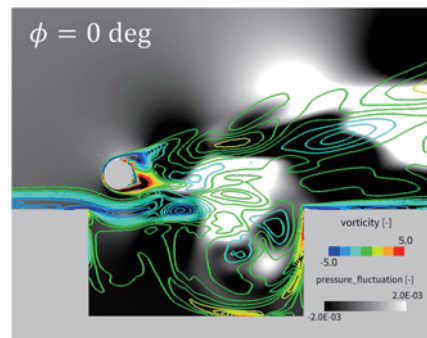
図14. ケースD ($y = \delta + d/2$) の流れ

5.5. ケース D ($y = \delta + d/2$)

さらに円柱を移動し、キャビティせん断層厚さの高さに円柱下面が接する位置に置いた時の結果を図14に示す。図14(a)でわかるように、実際にはせん断層は円柱に接触することなく円柱の下側を流れるようになる。そのためカルマン渦が明確に現れるようになるが、図14(b)の圧力変動スペクトルを見ると、円柱単独の時のピークに相当する $St_L = 1.68$ に加え、その半分の周波数の $St_L = 0.83$ 、1.5倍の $St_L = 2.52$ にも強いピークが現れている。 $St_L = 1.68$ と $St_L = 0.83$ の振動の違いを理解するために、それぞれのピークを含む周波数範囲でバンド・パス・フィルターをかけて流れ場を抽出した結果を図15に示す。図15(a)に示す $St_L = 1.68$ では、円柱後流に明確なカルマン渦が現れ、音波の発生を示す空間の圧力変動も円柱の上下方向に振動している。一方、図15(b)に示す $St_L = 0.83$ では、円柱後流のカルマン渦は不明確になり、図15(a)とは逆にキャビティせん断層がより明確に現れている。また、キャビティ内で前後方向に圧力変動が現れ、キャビティ流れのShear-layerモードに生じる音響フィードバックが起きている可能性がある。上で述べたように、キャビティ単独の場合、 $St_L = 0.83$ に近い $St_L = 0.93$ がShear-layerモードの2次モードに相当していることから、ちょうど円柱



(a) $St_L = 1.68$ の圧力変動分布と渦度の等高線



(b) $St_L = 0.83$ の圧力変動分布と渦度の等高線

図15. バンド・パス・フィルターにより抽出したケースDの $St_L = 1.68$ と $St_L = 0.83$ の流れ

カルマン渦の振動2周期が音響フィードバックによるせん断層の振動を誘起していると考えられる。

6. 計算結果のまとめと飛翔の主脚との類似性

以上の計算結果をできる限り一般化して捉えると次のような知見としてまとめられる。

- ケースA：円柱がキャビティせん断層と接しない場合は、キャビティ流れの振動にはほとんど影響を与えない。
- ケースB：円柱位置がキャビティ前縁高さになり、せん断層を被り始めると、流入してくる境界層はキャビティ内部に流れ込み、円柱上面には新たに薄いせん断層が発達する。キャビティから発生する音はこのせん断層の挙動によって決まる。
- ケースC：円柱の上面がキャビティせん断層より外側に出ると、円柱はせん断層を被っているものの、不安定ながらその後流でカルマン渦を形成し始める。そのため発生する騒音には円柱のカルマン渦による周波数成分が含まれるようになる。
- ケースD：円柱がキャビティせん断層の近傍にあるが、キャビティせん断層に直接接触していない場合、円柱のカルマン渦による流れの振動とキャビティの音響フィードバックの影響を受け、カルマン渦によるエオルス音とともに、カルマン渦に同期したキャビティせん断層のShear-layerモードが生じる可能性がある。

飛翔の主脚(図4, 図5)と比較した時、2次元層流の計算は、ケースAからDに向かって、それぞれ順に $Y=0.5\text{ m}$, 0.5 m と 0.4 m の間、 0.4 m , 0.3 m 断面に相当する。図3から分かるように、サイドブレースが収納部に隠れる $Y=0.5\text{ m}$ 付近(ケースAに相当)でキャビティ後縁の圧力変動が少なく、 $Y=0.4\text{ m}$ 断面付近(ケースCに相当)からサイドブレースが気流に晒されるにつれて圧力変動が増えている。 $Y=0.4\text{ m}$ 断面では、ケースC同様にキャビティ前縁からせん断層がサイドブレース下面側に流れ込み、サイドブレース後流と一体となってキャビティ後縁の圧力変動を増やしている可能性がある。また、飛翔の場合にケースDと同様の音響フィードバックが発生しているは不明であるが、ケースC, ケースDの結果は、発生する騒音の周波数は、キャビティ特有の周波数よりもサイドブレースのカルマン渦の周波数に影響されやすいことを示しており、飛行試験において160Hzの騒音レベルが高かったことと整合している。

7. まとめ

キャビティせん断層と円柱後流の干渉について、2次元層流の非定常流CFD解析を行い、干渉の仕方が流れの振動特性に与える影響を調べた。それにより主脚収納部における低周波数域の干渉騒音のメカニズムを理解し、その低騒音化を検討していくための基礎的な知見を得ることができた。

実際の飛翔の主脚の流れは3次元かつ高レイノルズ数の乱流であり、サイドブレースも斜めであるため、本稿で示した2次元層流の振動よりも非常に複雑になる。今後、段階的に脚収納部の流れに影響を与える複雑さの要因を増やし、脚収納部と脚要素との干渉騒音について検討を進めていきたい。

謝辞

本研究は、第二著者の梁裕卓が高知工科大学大学院修士課程において、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の受託指導学生制度の下で取り組んだ研究を基にしている。また、CFD解析には宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータシステム『JSS2』を利用した。

参考文献

- 1) 山本一臣, 葉山賢司, 熊田俊行, 林賢亮: 機体騒音低減技術の飛行実証プロジェクト FQUROH の概要, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 67, No. 11, 2019.
- 2) Dobrzynski, W., "Almost 40 Years of Airframe Noise Research: What Did We Achieve?" *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 2 (2010) pp353-367.
- 3) Takaishi, T., et al., "Quantitative Modeling of Sound Sources around Civil Aircraft on Final Approach," 8th Berlin Beamforming Conference, BeBeC-2020-D04, 2020.
- 4) Yamamoto, K., et al., "FQUROH: A Flight Demonstration Project for Airframe Noise Reduction Technology—the 2nd Flight Demonstration," AIAA Paper 2018-4087, 2018.
- 5) Takaishi, T., et al., "Further Noise Reduction Design for Landing Gear toward FQUROH Second Flight Demonstration," AIAA Paper 2018-3300, 2018.
- 6) 山本一臣, 葉山賢司, 林賢亮, 熊田俊行: 機体騒音低減技術の飛行実証 FQUROH における成果と今後の課題, 第 57 回飛行機シンポジウム講演集, No. 2A12, 2019.
- 7) Ueno, Y., Isotani, K., Hayama, K., et al., "Validation of Noise Reduction Design for Landing Gear in the FQUROH Flight Demonstration Project," AIAA Paper 2019-2506, 2019.
- 8) Rossiter, J. E., "Wind-Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds," *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda*, No. 3438, 1966.
- 9) Murayama, M., et al., "Numerical Simulation of Main Landing Gear Noise Reduction in FQUROH Flight Demonstration," AIAA Paper 2019-1836, 2019.
- 10) 吉川茂, 和田仁(編): 音源の流体音響学, 日本音響学会編, コロナ社, 東京, 2007.
- 11) Rowley, C. W., Colonius, T. and Basu, A. J., "On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities," *J. Fluid Mech.* (2002), vol. 455, pp. 315-346.
- 12) Takaki, R., Yamamoto, K., Yamane, T., Enomoto, S. and Mukai, J., "The Development of the UPACS CFD Environment," *High Performance Computing, Proc. of ISHPC 2003*, Springer, pp. 307-319, 2003.
- 13) Shima, E. and Kitamura, K., "Parameter-Free Simple Low-Dissipation AUSM-Family Scheme for All Speeds," *AIAA J.*, Vol. 49, No. 8, pp 1693-1709, 2011.
- 14) Jameson, A. and Yoon, S., "Multigrid Solution of the Euler Equations Using Implicit Schemes," *AIAA J.*, Vol. 24, No. 11, pp 1737-1743, 1986.