

# アクティブフラップ付きブレードロータの BVI騒音風洞試験

吉本稔, 足立直人, 内山直樹 (三菱重工)  
近藤夏樹, 齊藤茂 (宇宙航空研究開発機構)

## Wind Tunnel Test of a Rotor with Active Flaps for BVI Noise Reduction

Minoru Yoshimoto, Naohito Adachi, Naoki Uchiyama (MHI)  
Natsuki Kondo, Shigeru Saito (JAXA)

### 概 要

ヘリコプタの緩降下飛行時に翼端渦とブレードが干渉し発生するBVI (Blade-Vortex Interaction) 騒音の低減は、環境に対する解決すべき重要課題の1つである。ここでは、BVI騒音の低減が期待されているアクティブフラップ付きブレードに対し、JAXA 6.5m × 5.5m 低速風洞にて実施した模型による風洞試験の内容について報告する。

### 1. 背景・目的

ヘリコプタでは各ブレードの翼端より翼端渦が発生し、ホバリングや通常の前進飛行の際は吹き降ろしによりその渦がロータ面より下方に螺旋状に生成される。一方、緩降下飛行時は機体の降下速度と吹き降ろしが相殺し合い翼端渦がロータ面付近を機体後方に移動するといった現象が発生する場合がある。その結果、ある前進比条件において翼端渦がブレードに対し平行に近い状態で干渉し急激な圧力変動を与え、著しい騒音を発生する。これはBVI騒音と呼ばれ、着陸進入時に発生することから地上の環境問題となり、ヘリコプタの積極的利用の妨げとなっている。従って、BVI騒音の低減は環境に対する重要課題の1つとなっている。

ここでは、BVI騒音低減の可能性が期待されているアクティブフラップ付きブレードに対し、模型を用いた風洞試験により幾つかの制御方法を試行し、その効果を確認することを目的とする。

### 2. 風洞試験

#### 2.1 試験概要

本風洞試験は準備等を含め平成15年9月1日～平成15年10月8日にJAXA 6.5m × 5.5m 低速風洞において実施した。なお、BVI騒音に関する試験の他にホバリングや前進飛行時の性能試験も同時に実施しているが本

稿ではこれらの内容については割愛する。

#### 2.2 設備・装置

##### 2.2.1 風洞内装置

図1, 2に示すように風洞中央にアクティブフラップ付きブレードを装着したロータ高速回転装置を設置し、その前方、後方、及び側方に騒音計測用マイクを設置した。マイクの設置はBVI騒音の指向性を考慮しており、前方及び側方のマイクが右舷側で発生する前進側BVIに対応し後方のマイクが左舷側で発生する後退側BVIに対応する。

##### 2.2.2 供試体

供試体は図3, 4に示すアクティブフラップ付きブレードであり、同ブレード2体による2枚ブレードのロータとして試験を行った。表1に概要を示す。

アクティブフラップのアクチュエータには圧電素子を用いており、ブレード内の図4 (b) に示す位置に内蔵されている。圧電素子の変位は非常に小さいため変位拡大機構を用いてフラップに伝達する。舵角については、三菱重工名航2m × 2m 低速風洞においてブレードを固定した状態の通風を行い、レーザ変位計を用いて振幅は約2°、駆動周波数はロータ回転周波数の3倍周波数にあたる約40Hzまで正常動作することを確認している。

### 2.2.3 制御・駆動系

制御・駆動系の概要を図5に示す。ロータの駆動に関しては、電源装置、制御装置、潤滑冷却装置からなり、指定した回転数となるようにモータを駆動する。ブレードのピッチコントロールに関しては、操作盤にて目標の推力を得つつ前後、左右のトリムが取れた状態になるように操縦する。

アクティブフラップの駆動は基本的にはオープンループであるが、ブレード回転との同期をとるためにロータが1回転するごとに発せられる方位角信号を入力し1回転分の舵角信号を出力するという方式をとっている。

### 2.2.4 計測系

計測系の概要を図6に示す。風洞及び操作盤から得られる定常的な量については読み取り値を筆記記録し、非定常的な量についてはデータレコーダでテープに記録しつつ同時にA/D変換を行いハードディスクにも記録している。

## 2.3 試験内容

### 2.3.1 計測項目

計測項目を表2にまとめる。このうち風洞一様流諸量とコレクティブ/サイクリックピッチ角以外は全て非定常データとして計測している。

### 2.3.2 試験ケース

試験ケースの概要を以下に示す。

- ・ロータ回転数 : 800 [rpm]
- ・推力係数 ( $C_T$ ) :
  - 3.2, 3.5, 4.0 [ $\times 10^{-3}$ ] ; フラップ駆動無
  - 4.0 [ $\times 10^{-3}$ ] ; フラップ駆動有
- ・迎角 ( $\alpha$ ) : 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 [deg]
- ・前進比 ( $\mu$ ) :
  - 0 ~ 0.25 ; フラップ駆動無
  - 0.11, 0.12, 0.16 ; フラップ駆動有

全体としては、まずアクティブフラップ駆動無しにて迎角及び前進比スweepを行いBVI騒音が特に顕著となる条件を探索した上で、その条件においてアクティブフラップ駆動の試験を行うという手順をとった。

### 2.3.3 アクティブフラップ制御

アクティブフラップの制御波形は正弦波と矩形波の2種類とし、周波数は2/revと3/rev(ブレードの回転数の2倍及び3倍)とした。位相については振動開始位相をパラメータにとって、0°から45°刻みで315°まで変化させた。以上より、波形、周波数、及び位相の違いにより

計32パターンの制御波形となる。

## 3. 試験結果

### 3.1 BVI騒音発生条件探索

BVI騒音が顕著となる条件を試験にて探索する前に、予め幾何学的簡易予測により平行BVIとなる前進比条件を検討した。その例を図7に示す。図7は上から見て反時計回りに回転するブレードが左向きに進行する際のブレードのチップパスを描いたもので、翼端渦の渦糸の概略を見ていることに相当する。

実際の試験においても、この予測による条件付近において顕著なBVI騒音が計測され、図8に示すような波形として観測された。

### 3.2 BVI騒音発生時の周波数解析

図8と同じランでの音圧データに対し1/3オクターブバンドでの音圧レベルを算出した結果を図9に示す。図9では、実線がBVI騒音波形が得られた場合、破線がBVI騒音波形が得られなかった場合を表している。前進側、後退側ともBVI騒音がある場合には概ね600~2000kHzのバンドで音圧レベルが大きくなることが分かる。これより、BVI騒音の定量的指標として同バンドの積分値(以降、“BVI音圧レベル”と記述)を採用した。

### 3.3 アクティブフラップによるBVI騒音低減効果

図10, 11に、各制御パターンに対するアクティブフラップ駆動時と非駆動時のBVI音圧レベルの差分を示す。この図で値が負となればBVI騒音が減少したことになる。なお、フラップ駆動無しでBVI騒音を計測した際の再現性に関し、概ね最大0.2dBのばらつきがあることを確認している。

この再現性を考慮すると、有意なBVI騒音低減効果があると考えられるのは特に前進側BVIにおける矩形波駆動の場合のみであり、以下の条件で比較的效果が大きい結果となった。

- ・周波数 2/rev, 振動開始位相 135°
- ・周波数 3/rev, 振動開始位相 180°

## 4. まとめ

### 4.1 成果

- ・本試験においてBVI騒音が顕著となる条件を把握し、BVI騒音の周波数帯に基づく音圧レベル指標を導入した。
- ・アクティブフラップ作動/非作動の各状態に対し上記指標を用いた評価を行い、アクティブフラップによりBVI騒音低減の可能性を確認した。

#### 4.2 今後の課題

- ・アクティブフラップによるBVI騒音低減効果をより明確にするためには、フラップ振幅やフラップ面積をより大きくする必要があると考えられる。
- ・BVI騒音低減の詳細なメカニズム解明については、気流可視化や数値シミュレーション等により現象を把握することが望ましい。

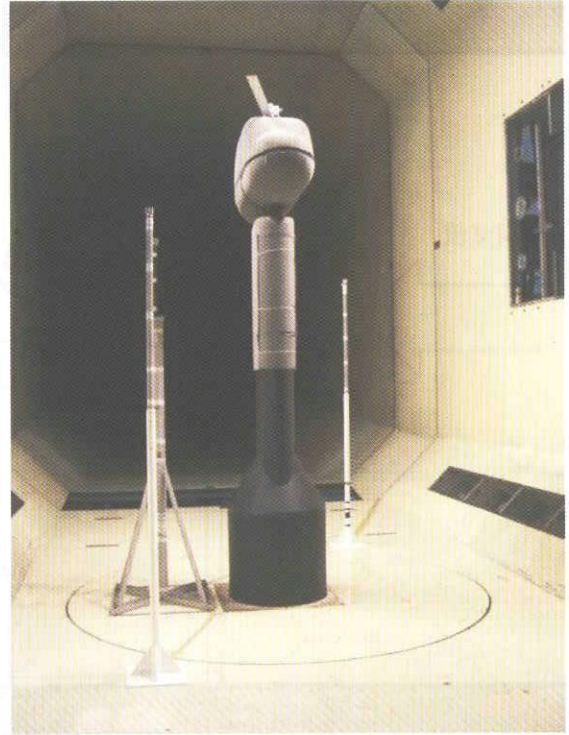


図1 風洞内概況（上流側より見る）

表1 アクティブフラップ付きブレード模型諸元

供試体数	2体 (No.1 / No.2)
ロータ半径 (R)	1.0m
コード長 (C)	0.065m
翼型	NACA0015
振り下げ	線形 8°
アクティブフラップ	75%R位置, スパン長5%R, コード長25%C
表面圧力孔	2箇所 (75, 90%R下面側4%C位置) [No.1ブレードのみ]

表2 計測項目

風洞一様流諸量	温度, 静圧
ロータ6分力	軸力, 横力, 垂直力, ローリングモーメント, ピッチングモーメント, ヨーイングモーメント (全て非回転系)
騒音計測用マイク出力	右前方, 右側方, 左後方
ブレード表面上圧力	75, 90%R下面側4%C位置 (No.1ブレードのみ)
アクティブフラップ駆動信号	No.1ブレード下面側ピエゾ素子への入力信号
ブレード角度	フラッピング角, リード/ラグ角, コレクティブピッチ角, サイクリッグピッチ角 (縦, 横)

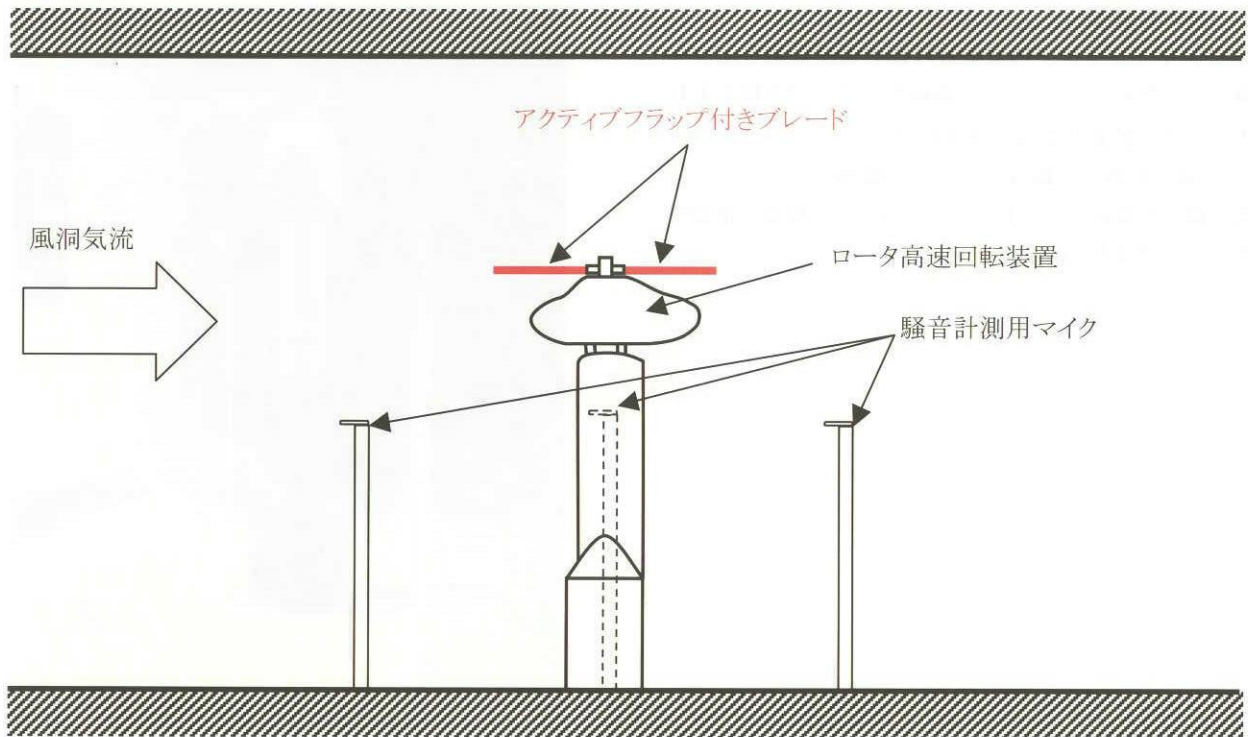
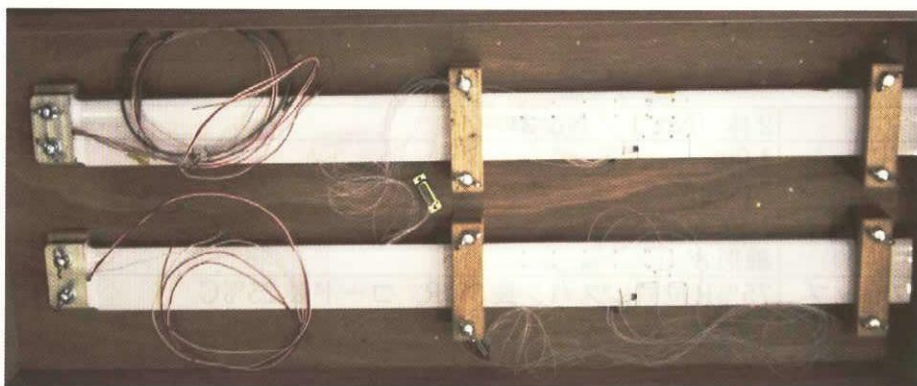
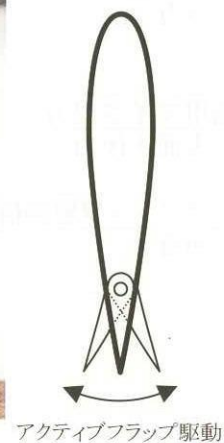
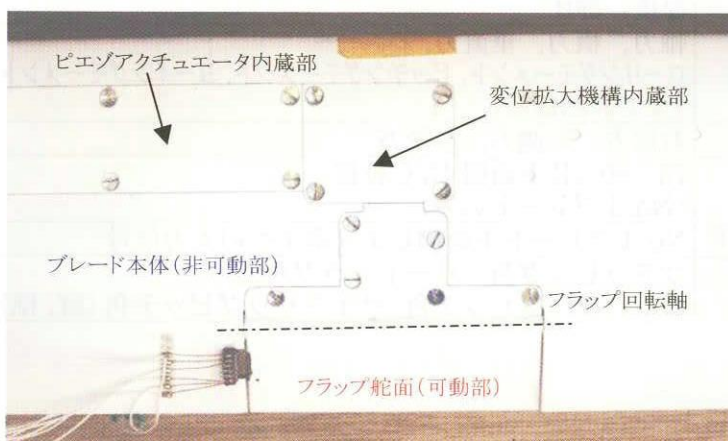


図2 風洞内装置概要



(a) ブレード全体



(b) アクティブフラップ部

図3 ブレード実物写真



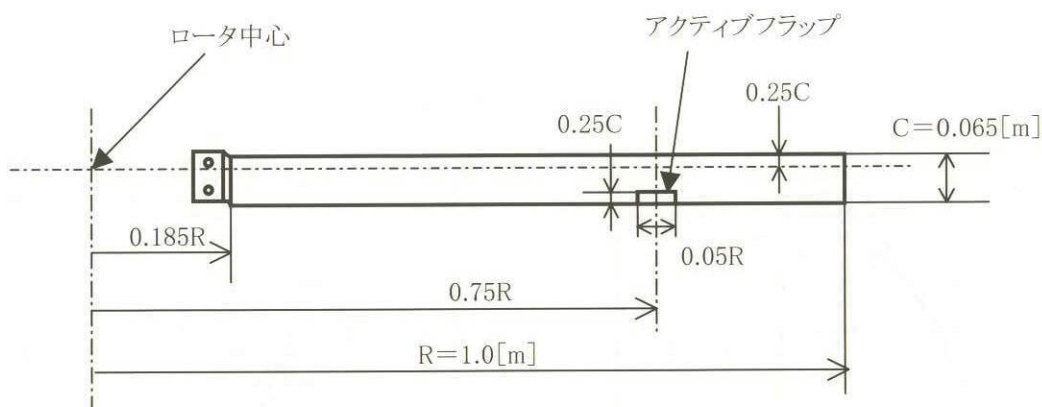


図4 ブレード寸法概要

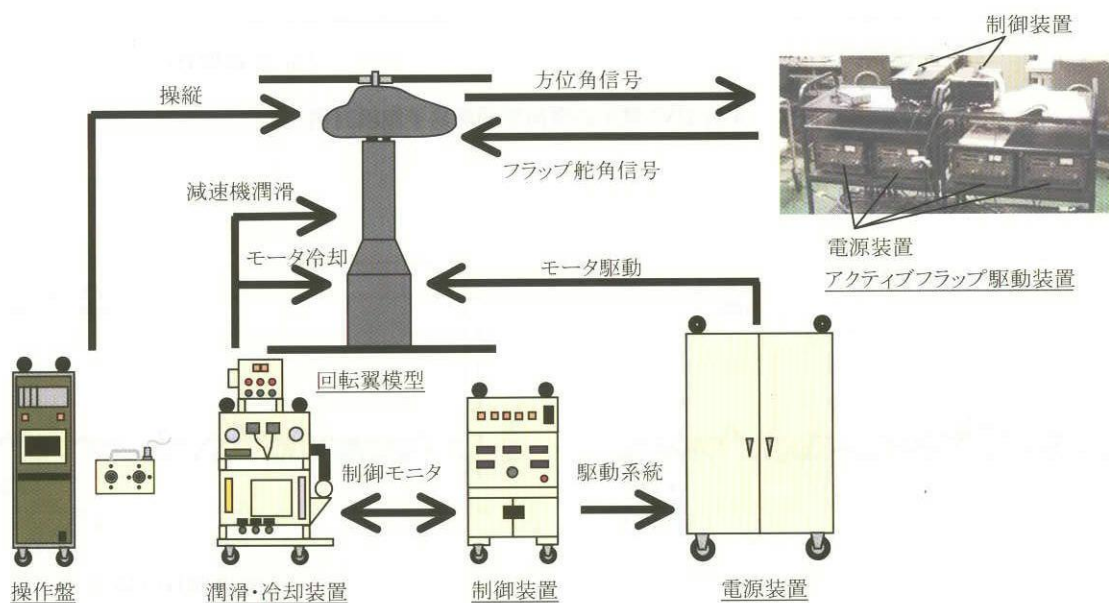


図5 制御・駆動系

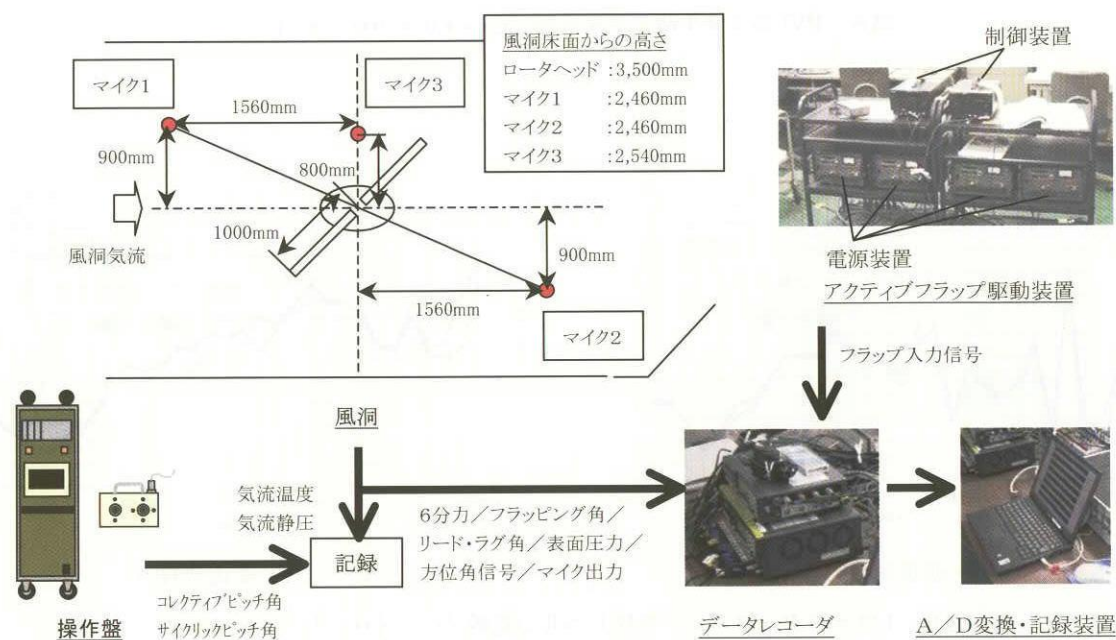


図6 計測系

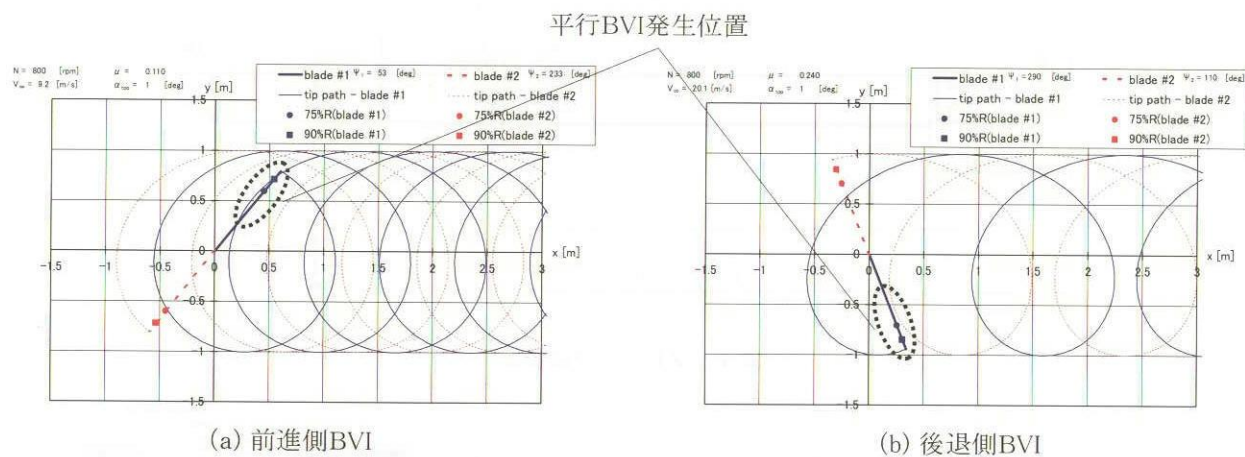
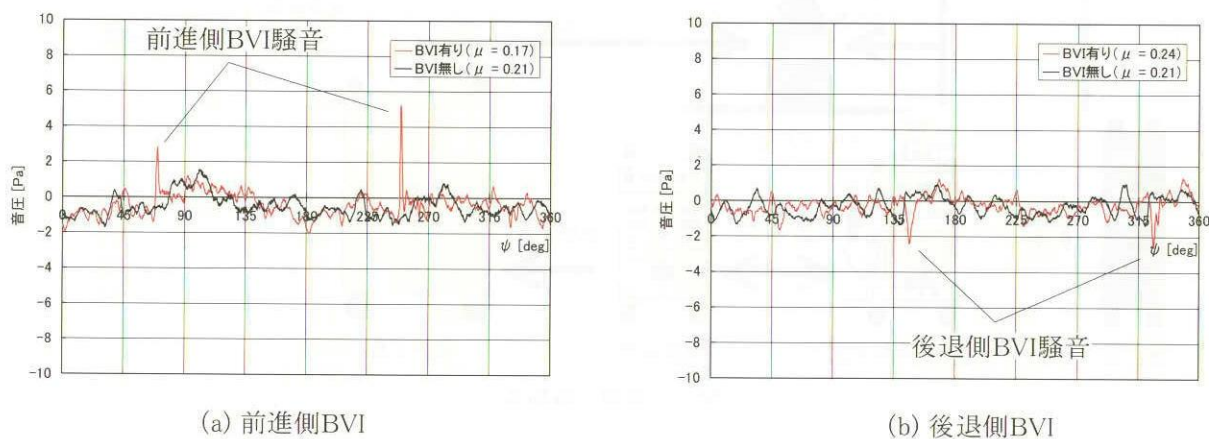
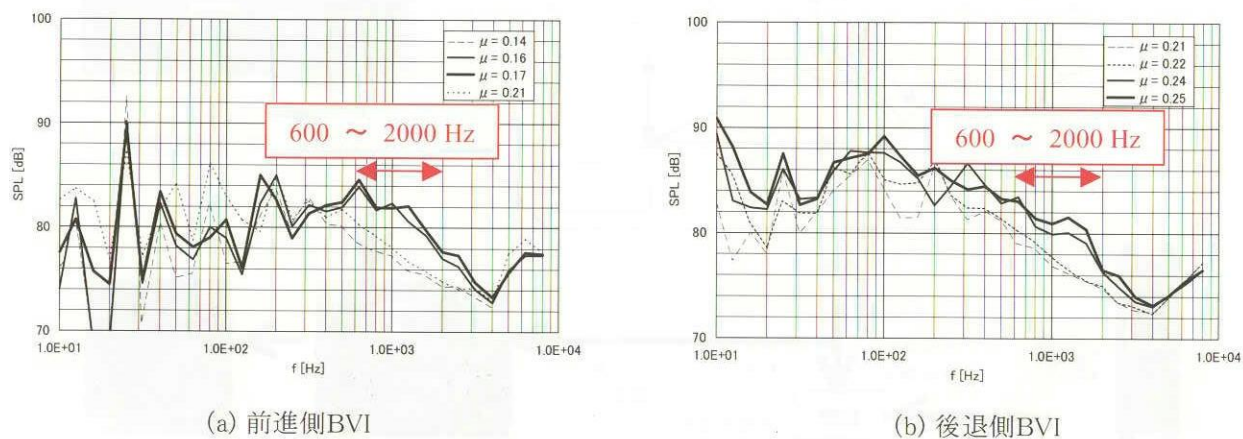
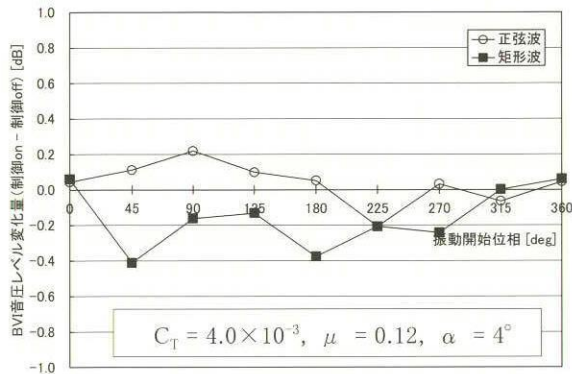
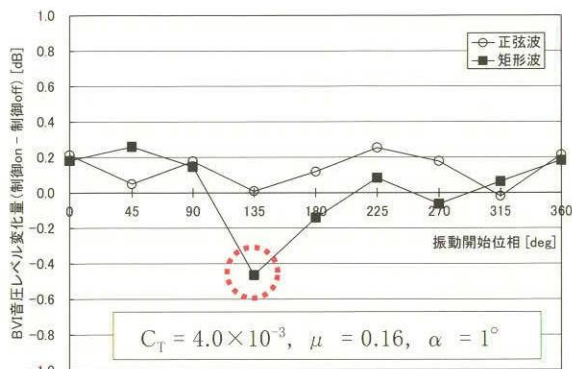
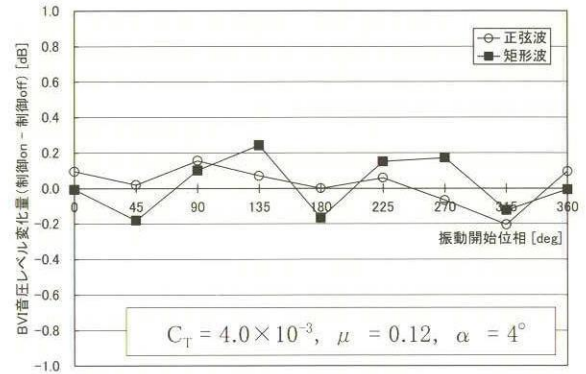
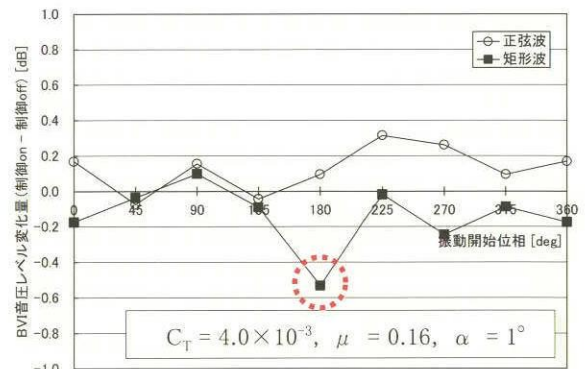


図7 平行 BVI 発生時の幾何学的簡易予測検討例

図8 BVI騒音発生時の音圧波形 [ $C_T = 4.0 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha = 1^\circ$ ]図9 1/3 オクターブバンド音圧レベルの比較 [ $C_T = 4.0 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha = 1^\circ$ ]

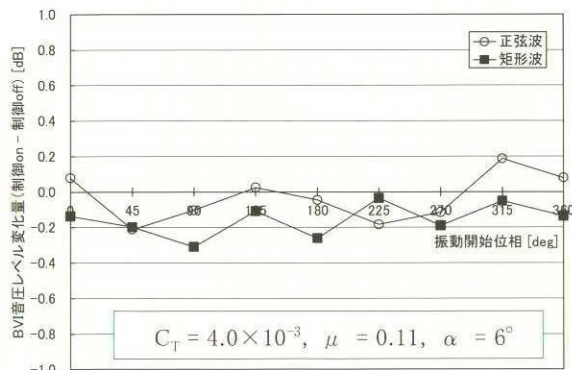
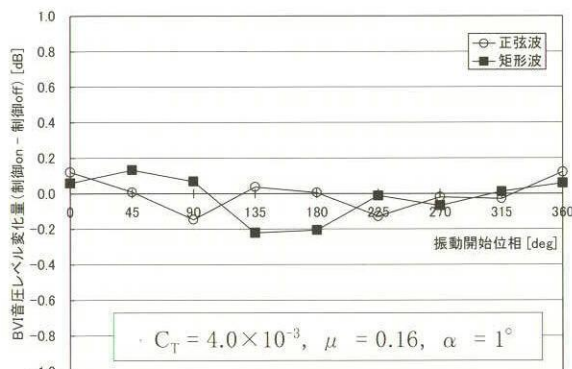


(a) 2/rev 制御

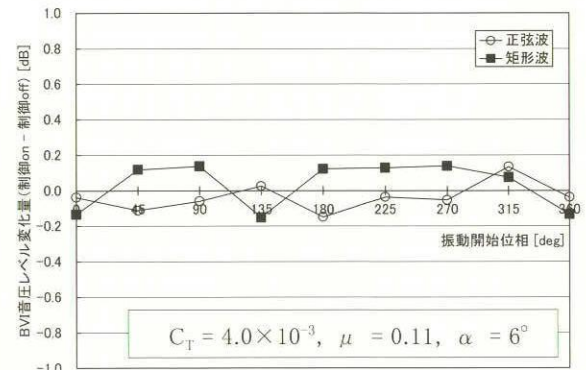
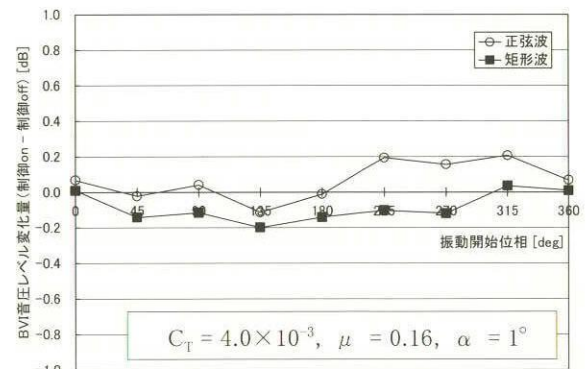


(b) 3/rev 制御

図 10 アクティブフラップによる BVI 騒音低減効果 (前進側 BVI)



(a) 2/rev 制御



(b) 3/rev 制御

図 11 アクティブフラップによる BVI 騒音低減効果 (後退側 BVI)