

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560955

研究課題名(和文) ファン騒音の高精度数値予測による解明と複数音響モード制御実験

研究課題名(英文) Elucidation of fan noises using high-precision numerical prediction and multiple acoustic mode control experiments of fan noises

研究代表者

山崎 伸彦 (Yamasaki, Nobuhiko)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70166635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：ファン動翼下流の静翼の、リーン(周方向傾斜角)、動翼からの軸方向距離、スイープ(軸流方向後退角)、がファン騒音低減におよぼす効果を、非定常レイノルズ平均ナビエーストークス(URANS)方程式にもとづく数値計算によって明らかにし、いずれの幾何学的パラメタも騒音低減に有効であることを、物理的根拠とともに示した。

モデルファン試験機を用いたファン騒音の能動制御試験については、複数の音響モードを発生させることのできる音源を開発し、周波数空間 Filtered-X LMS アルゴリズムを導入し、複数モードの自動制御を実現可能とした。

研究成果の概要(英文)：Effects of the lean (circumferential inclination angle), the distance from the rotor blades, the sweep (axial inclination angle) of the stator vanes downstream of the rotor blade of a fan on fan noise reduction were elucidated by the numerical calculation based on the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equations. It was shown all geometric parameters can be effective in the noise reduction, together with the physical reasoning.

As far as the active suppression of fan noise using the model fan setup is concerned, the sound source which can generate multiple sound modes was developed, the filtered-x LMS algorithm in the frequency domain was introduced, and the automatic control of the multiple modes was enabled to be realized.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ファン騒音 トーンノイズ 能動制御 ANC モード解析 線形非定常 翼列

1. 研究開始当初の背景

(1) 航空機用ガスタービンエンジンであるジェットエンジンからの騒音低減は重要な技術的な研究課題である。ジェットエンジンからの代表的なエンジン騒音はジェット騒音とファン騒音とである。前者のジェット騒音は、高速ジェット気流を後方に排出して推進するときに生じる乱流騒音であり、エンジンへの流入空気を一部バイパスしてファンのみを通して排出するターボファンエンジンのバイパス比の増加によって排出ジェット気流の速度が減少されてきたことにより、近年、その深刻性は減ってきている。一方のファン騒音は、ターボ機械の動翼と静翼が干渉して生じるもので、ターボ機械のエネルギー授受の基本原則そのものに関わっていて、動翼枚数を静翼枚数の半分以下にして伝播モードを減らすなどといった受動的対策しか行なわれておらず、ファンの幾何形状にまで踏み込んだ、ファン騒音の大きな減少は得られていない。

(2) ファン内の流れは、前置翼列の後流が乱流で現象の正確な把握が難しく、ファン騒音を、実機的设计・研究開発段階で、数値空力音響学 (Computational AeroAcoustics (CAA)) で見積もることは、まだ確立されていない。そのため、数値計算に基づく騒音発生現象の理解も十分でなく、また、最終目標である CAA による騒音低減化技術開発は未開拓である。ファン騒音の数値予測に関して先駆的論文として、数値流体力学 (Computational FluidDynamics (CFD)) 的手法による動静翼干渉流れ場計算と特異点法による音響強さ計算を組み合わせたハイブリッド CAA 手法 (Proc. 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, Tsuchiya ら (2003)) があり、比較的高精度に数値予測が可能であることが示された。最近、本研究者は、音響強さ計算で、その論文での後流干渉に加え、ポテンシャル干渉も考慮した計算を行い、検証実験との比較で精度の改善を見た。また、発生騒音強さに対する幾何パラメータへの依存性も十分解明されていない。

(3) 研究者らはファン騒音の能動制御について実験的研究も実施してきた。ファン騒音の能動制御では、逆位相の音で単一音響モードの発生騒音を消すというアンチサウンドの制御が有力である。申請者らは、FPGA (Field Programmable Gate Array) という高速計算素子をプログラム制御することによって、回転数に同期し位相制御された複数音源による回転制御音響場を生成し、低回転数で 12 dB という大きな減音を得ることに成功した。さらに、干渉音源出力を強化して高回転数を含め、単一のカットオンモード (伝播モード) の大部分を減衰させることに成功した。しかし、実際のファンでは、複数のカ

ットオンモードが現れたり、無限長のダクトでは現れないカットオフ (非伝播モード) が生き残っていたりと複数の制御対象音響モードが発生することが多いが、複数モード制御実験は過去になされていない。

2. 研究の目的

(1) ファン動翼下流の静翼の、リーン (周方向傾斜角)、動翼からの軸方向距離、スイープ (軸流方向後退角)、がファン騒音低減におよぼす効果を、非定常レイノルズ平均ナビエス トークス (URANS) にもとづく数値計算によって明らかにし、いずれの幾何学的パラメータの影響を明らかにする。

(2) モデル試験機を用いたファン騒音の能動制御試験については、複数の音響モードを発生させることのできる音源を開発し、周波数空間 Filtered-x LMS アルゴリズムを導入し、複数モードの自動制御を可能とする。

3. 研究の方法

(1) 高精度ファン騒音予測は次の方法に基づく。ファン騒音は動静翼干渉により BPF (翼通過周波数=回転数×動翼枚数) とその高周波で卓越したスペクトルを持つ。本研究では、この BPF とその高周波 (3 倍音まで) に焦点を当てる。騒音解析には、モード解析法を用いる。これは CFD により得られた非定常圧力場に、BPF においてフーリエ解析を行い、これに動静翼干渉音のなすモードによってベッセル・フーリエ解析を行い、各モードの振幅を解析的に求める手法である。

この手法の優位性は、翼列を通過する流れ場によって励起されるモードを特定することができると同時に、ダクト伝播の過程で減衰するモード (Cut-Off モード) がどれほど含まれているか、逆に減衰せず伝わるモード (Cut-On モード) がどれほど含まれているかを知ることができ、騒音の性質を特定することにある。

(2) 能動制御実験システムの概略図を Fig.1 に示す。動静翼の干渉音を、ダクト周囲に設置された 16 基のスピーカで制御し、ダクト入口のハブとケーシングに取り付けられたマイクで音圧を測定する。

制御では、軸に取付けられた光センサからのトリガー信号と、マイクからの信号を用い、FPGA ボードを介し、スピーカに制御信号を送る。制御信号では、振幅と位相、周方向モードを指定しなければならない。振幅はボリューム、位相とは、トリガー信号との位相差、周方向モードとは、スピーカアレイが発生させる波形のことで、スピーカ間の位相を変化させ、特定のモードを発生させる。

振幅と位相は、騒音源と同じ振幅かつ逆位相である必要がある。つまり、この二つのパラメータには最適値が存在する。今回、この最適値探索の自動化を試みた。最適化には、

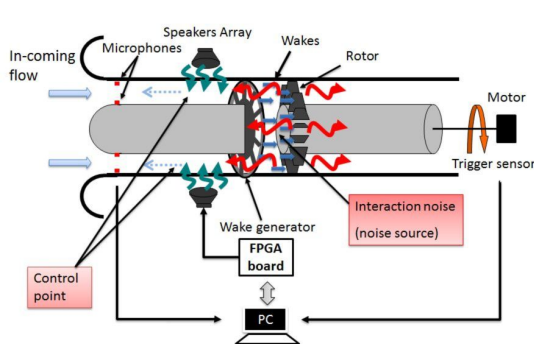


Fig. 1: Our system schematic

Filtered-x LMS アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムは、制御対象の音圧値の2乗を評価関数とし、この評価関数が最小になるように、フィルター係数を更新していく。本件研究では、評価値としてマイクからの音圧にFFT演算を行い、さらにモード別に分解した音圧値を用いている。制御では、特定のモードのみを制御する。今までの研究では、単一のモードのみを扱っていたが、今回は更なる制御効果を得るために、複数のモードの同時制御を試みた。複数モード同時制御では、2つのモードの波形を重ね合わせてスピーカから発生させる重ね合せ法と、半分のスピーカから1つのモード、残りのスピーカから別のモードを発生させる分離法の二つの方法で制御を試みた。

4. 研究成果

(1) 【数値予測精度の向上】URANS 計算結果から動静翼干渉により発生するファン騒音の高精度予測を行う音響モード解析法の改良を行い、実験値との比較 Fig. 2 に上流

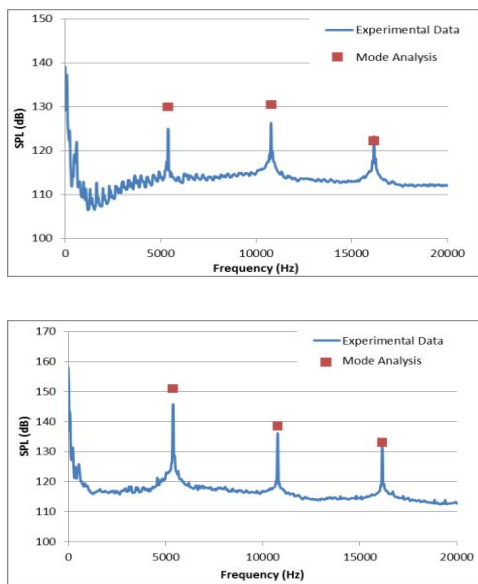


Fig. 2 Comparison of SPL with Experimental Data (Forward and Rearward) for Baseline model

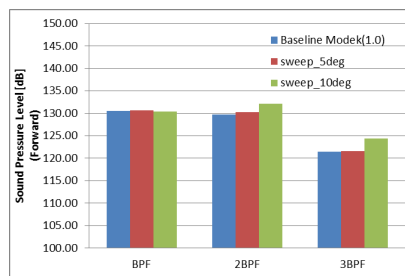
伝播と下流伝播の音圧レベルを示す、実験と比較して、良好な予測となっていることがわかる。

【リーン静翼の効果】リーン静翼のモード解析・減音効果の検証を行った。静翼をリーンさせることによる減音効果の主な要因は、半径方向波数の高い Cut-Off モードが発生し、逆に半径方向波数の低い Cut-On のモードの発生が制限されることにある。リーン静翼モデルのモード解析・騒音評価を行った結果、下流伝播に対して、スイープ静翼により減音効果が現れ、その減音効果は動翼後流の減衰の影響はほとんど見られず、動翼後流が静翼と干渉するときの角度の影響が大きいとみなせると考えられる。

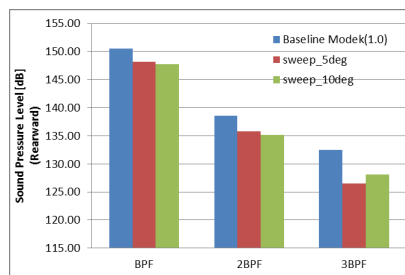
【翼間距離の効果】動静翼間距離変化モデルのモード解析・騒音評価を行った結果次の結果を得た。動静翼間距離の増加による減音効果は動翼後流の減衰の影響は低く、動翼後流が静翼と干渉するときの角度の影響が大きいことにある。

【スイープ静翼の効果】スイープ静翼モデルのモード解析・騒音評価を行った結果、下流伝播に対して、スイープ静翼により減音効果が現れ (Fig. 2)、その減音効果は動翼後流の減衰の影響はほとんど見られず (Fig. 3)、動翼後流が静翼と干渉するときの角度の影響が大きいとみなせると考えられる。上流伝播については、必ずしもスイープによって音圧が減少するといえず、今後の解明が待たれる。

(2) 能動制御実験では、ダクト周囲に取り付けたスピーカアレイからファン騒音に対して逆位相の音を発生させ、能動的な制御を試みた。実験結果から、以下の結論が得られた。

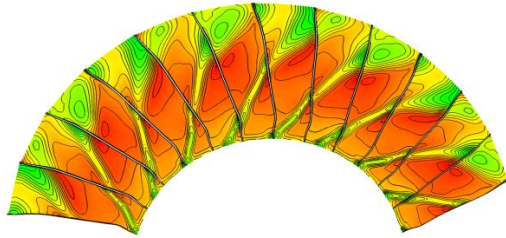


(a) Forward propagation

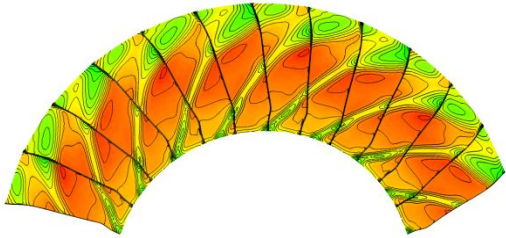


(b) Rearward propagation

Fig. 3 Comparison of SPL with sweeps



(a) Baseline (no sweep) model



(b) 10deg. Swept Stator Model

Fig.4 Comparison of Instantaneous Pressure distribution

- ・ 下記の改良により，より正確な位相と振幅の最適値を探索することが可能になった．
- 1. 測定マイクをハブ，ケーシングそれぞれ 8ch にしたことでリアルタイムでモード分解ができるようになったこと．
- 2. 制御理論を導入し，自動で最適値に収束するシステムを構築したこと．
- ・ BPF ピーク値，OASPL とともに，すべての回転数で減音することに成功した．2 つのモードを制御したときの OASPL と BPF のピーク値の減少量は Table.1 のとおりである．
- ・ ダクト入口のみでなく，放射場の騒音も減少していることから，ファン騒音に対する ANC は有効であるといえる．

Table 1: The reduction level of OASPL and BPF peak

[rpm]	reduction level [dB]	
	OASPL	BPF peak
2000	-3.8	-6.2
2500	-8.1	-21.7
3000	-1.1	-7.9
3500	-6.3	-13.1
4000	-5.0	-10.5

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

鈴木優太郎，猪口雄三，山崎伸彦，ファン騒音の能動制御，ターボ機械，査読有，第 40 巻，第 4 号，pp. 226 - 233，2012 年 4 月．

長井 健一郎，鈴木 優太郎，猪口 雄三，生沼 秀司，石井 達哉，山崎 伸彦，モード解析を用いたダクトファンのアクティブ消音，日本機械学会論文集 B 編，査読有，第 79 巻，第 801 号，pp. 739 - 743，2013 年 5 月．

[学会発表](計 9 件)

Nobuhiko Yamasaki, Yutaro Suzuki, Takeshi Nakagawa and Yuzo Inokuchi, Active Control of Fan Noise at Various Rotational Speeds, Proceedings of 20th International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), ISABE-2011-1413, CD-ROM, 2011.

Yutaro Suzuki, Kenichiro Nagai, Yuzo Inokuchi, Takuya Ishii, Hideshi Oinuma, and Nobuhiko Yamasaki, Experiments on Adaptive Anti-Noise Control for Fan Noises, Proceedings of The 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics, and Aeroelasticity of Turbomachines, ISUAAAT13-S12-6 (CD-ROM), 2012.

Nobuhiko Yamasaki, Noise Prediction and Suppression from Aircraft Engines, Proceedings of 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Sciences, (APCATS), Invited Paper, 2013.

Nobuhiko Yamasaki, Daijiro Shiraiwa and YunTae Lee, Fan Noise Prediction Using Unsteady CFD Analysis and Modal Decomposition, Proceedings of 21st International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), ISABE-2013-1316, CD-ROM, 2013.

[その他]

ホームページ

<http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/apl/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山崎 伸彦 (YAMASAKI, Nobuhiko)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70166635

(2)研究分担者

猪口 雄三 (INOKUCHI, Yuzo)
九州大学・大学院工学研究院・准助教
研究者番号：30274509