

ターボ機械から発生する広帯域騒音の予測

工学研究科 システム科学部門 人間環境科学分野 助教・佐々木 壮一
(派遣期間：平成23年3月20日～平成23年9月21日)

私はフランスの Ecole Centrale de Lyon に滞在し、Michel Roger 教授の研究室でターボ機械から発生する広帯域騒音の予測に関する研究情報の収集および共同研究を実施しましたので、その成果について概要を報告します。

1. 滞在研究機関の紹介

フランスには総合大学の他に、エコール・セントラル (Ecole Centrale) と呼ばれる高等教育機関があります。後者はフランス独自のシステムであり、企業との結びつきが強いのが特徴で、そこに所属する研究者は企業との共同研究だけでなく、ヨーロッパプロジェクト関連の研究にも参画しています。私はその拠点をリヨンに置く Ecole Centrale de Lyon (ECL) に6ヶ月間滞在しました。ECL は流体力学・音響学研究所 (LFMA) といわれるユニークな研究所を有しており、EU だけでなく世界的にもその分野で高い水準の研究を推進しています。



ECL 音響学研究センター



Michel Roger 教授

私は欧州とアジアの流体力学関連の研究交流を目的とした国際会議 (ISAIF) に参加をしており、その会議で LFMA の Xavier OTTAVY 博士と交流する機会に恵まれました。今回の滞在については OTTAVY 博士を通して、直接 Michel Roger 教授にコンタクトとることができました。国内の機械メーカーとの共同研究を通してエンジン冷却ファンから発生する広帯域騒音の問題に直面し、輸出大国日本の基盤技術となる空力騒音関連の研究を改めて推進する必要性を感じていました。ECL の音響学センターは 10m×8m×8m の大型風洞装置

を有しており、Michel Roger 教授はフランスの航空機関連企業との共同研究を通して空力騒音に関する最新の解析理論を確立しています。ECL との共同研究の一つの目的は、エンジン冷却ファンから発生する広帯域騒音を理論的に予測することでした。

2. 研究内容と成果

【日本語概要】近年、機械に搭載されるエンジンに対する環境規制などの背景から、冷却ファンには更なる高性能化が求められています。我々の研究室では、これまで北部九州地区で開発された Fukano 理論（文献1）に基づいてファン騒音を予測してきました。この理論では後流渦によって発生する空力音を予測することが可能ですが、高周波数帯域に分布する騒音の予測は困難でした。本研究では、この高周波側の広帯域騒音を Roger 理論（文献2）によって予測することを試みました。

図1には、実験に用いられた羽根車の外観写真が示されています。この主要寸法が表1に整理されています。実験には羽根枚数が7枚、14枚および21枚の羽根車が用いられました。図2は実測値のファン騒音に Fukano 理論の予測値を重ね合わせたものです。最高効率点近傍（ $\phi=0.35$ ）では、羽根枚数21枚のプロペラファン（P21）から発生する広帯域騒音が7枚羽根のプロペラファン（P7）よりも小さくなっています。内部流動を解析した結果、P21の翼間の流れが羽根枚数の増加によって付着流れになっており、その後流渦のポテンシャルが弱められることが明らかになりました。それとは対照的に実際のファンの設計点（ $\phi=0.25$ ）では、P21の広帯域騒音はP7の騒音レベルよりも大きくなりました。この運転点では、空力騒音に関係する二つのファンの内部流動には大きな差が生じませんでした。以上のことから、設計点近傍では音源となる羽根車の羽根枚数が広帯域騒音に直接影響することがわかりました。

図3には、Roger 理論によって予測された広帯域騒音の予測値（図中の実線）が示されています。この理論によって予測された高周波の広帯域騒音は実測値の傾向を表すことができます。二つの理論による広帯域騒音の傾向から、Fukano 理論では100Hzから1000Hzの低・中周波数域での広帯域騒音の予測に有効であること、Roger 理論では1000Hz以上の高周波数帯域における騒音の予測に有効であることが明らかになりました。この実験結果は、後流渦音と後縁騒音が寄与する周波数帯域を明示するものです。

【英語概要】 This collaborated research is a preliminary attempt towards the prediction of the broadband noise from a minimal knowledge of the flow features, compatible with industrial constraints. Fukano *et al.* made prediction theory for the aerodynamic noise. This theory can predict the fan noise generated from the wake vortices; however, it is difficult theoretically to predict the broadband noise in the high frequency domain by Fukano's model. Trailing-edge noise possibly contributes to the broadband self-noise in the middle and high-frequency range. It has been assessed using Amiet's analytical model readdressed by Roger [2].

Figure 1 shows pictures of the investigated impellers, the main dimensions of which are listed in table 1. The blade design is the same and only the number of blades is varied. In the following, the

impellers with 7, 14 and 21 blades are referred to as P7, P14 and P21, respectively. The predicted noise levels according to Fukano's model are superimposed on the measured spectra in Fig. 2. At the maximum efficiency point, the flow of P21 remains attached along the blades because of the increased number of blades; the broadband noise of P21 is lower than that of P7 because of the stringent difference of parameters (lower characteristic speed). In contrast at the design point, the broadband noise level of P21 exceeds that of P7. The relative velocities and wake widths used in the model predictions do not differ a lot for this operation point. Therefore, it is concluded that the increase of number of blades is responsible for the higher broadband noise of P21.

The high-frequency predictions made using Amiet's model are plotted in Fig.3 for the two selected operating points, and the fan P14. The trailing-edge noise appears as a good agreement in the present case certainly contributes to the high-frequency part of the spectrum. In the tendency of the broadband noise predicted by these two theories, the following characteristics of the broadband noise were clarified; Fukano's theory can predict the broadband noise in the domain from 100Hz to 1000Hz. In Roger theory, it is effective for the prediction of the broadband noise higher than the 1000Hz. According to these experimental results, it clarified contribution of the frequency band related to the wake vortex noise and the trailing edge noise.

【参考文献】

- (1) Fukano, T., Kodama, Y., Senoo, Y., 1977, Noise generated by low pressure axial flow fans, I: Modeling of the turbulent noise, *Journal of Sound and Vibration*, 50(1), pp. 63-74.
- (2) Michel Roger, Stephane Moreau, Back-scattering correction and further extensions of Amiet's trailing-edge noise model. Part 1 : theory, *J. of Sound and Vib.*, 286 (2005), pp. 477-506

Table 1 Main dimensions

Impeller	P7	P14	P21
C (mm)		122	
C_{hub} (mm)		66	
D (mm)		613	
D_{hub} (mm)		260	
$v = D_{hub} / D$		0.424	
t (mm)		3	
Z	7	14	21



P7

P14

P21

Fig. 1 Test impeller

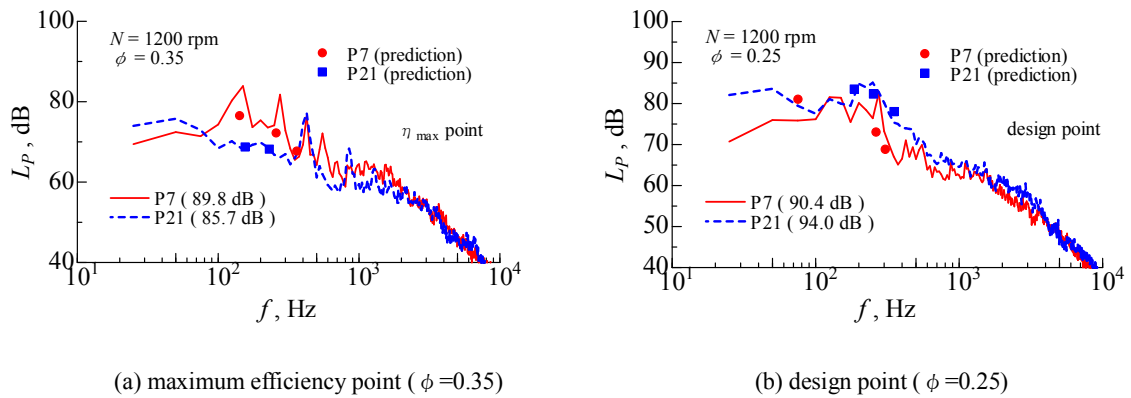


Fig. 2 Comparison of low-frequency predicted noise levels with measured noise spectra

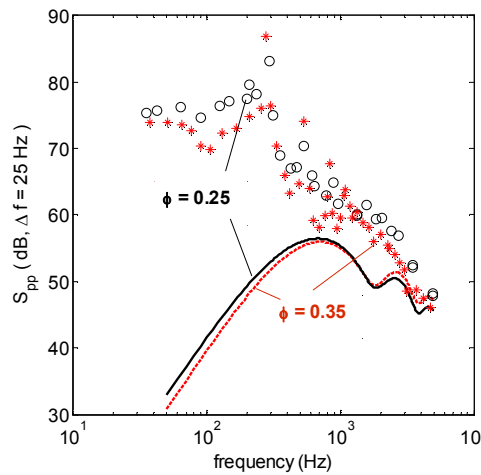


Fig. 3 Comparison of high-frequency predicted noise levels with measured noise spectra

3. 今後の展望と感想

1975年にAmietの第一次散乱モデルが提案され、その30年後の2005年に第二次後方散乱理論がMichel Roger教授によって発表されました。ECL滞在中には、翼端側の複雑流動現象によって生成される空力音源を数値シミュレーションによって解析し、第三の後方散乱による空力音源の解析に取り組みました。これはプロペラファンの翼端渦によって発生する翼端騒音の解析へ応用することができます。ECLの風洞で計測された翼端側の複雑流動に関する貴重な実験データが共同研究者のMarc Jacob先生から提供されました。今後はこの実験データと数値シミュレーションの結果を比較しながら、第三次後方散乱モデルの解析を進めていきたいと考えています。また、前述の研究成果については、2012年の3月に米国で開催される国際会議(ISROMAC14)で発表する予定です。