

# 境界層における乱流と計測

環境に影響を与えない測定のため

GRAS Sound & Vibration  
White Paper // By Dr Rémi Guastavino

# はじめに

乗車時間や燃費に対する期待から、許容できる騒音レベルの認識を含む快適性のレベルまで、私たちは過去100年、あるいは25年の間に大きく変化しました。空力特性は長い間、燃費に影響を与えてきましたが、現在では、自動車、バス、列車、航空機の音質に関する主な懸念要因が空力騒音であるほど、私たちは高速で移動しています。実際、騒音は空力設計に主な影響を与えるものとして効率に加わっています。例えば、サイドミラーやウィングエレメントのデザインが悪いと、かなり多くの余分なノイズを発生させてしまいます。空港の騒音規制がより厳しくなり、車両の全体的な音質やキャビン内の会話の明瞭性が車両設計の重要な要素となっていることから、現在では、これらは大きな欠陥と認識され、受け入れられません。新技術の登場により、エンジンやトランスミッションのマスキングノイズがなくなった電気自動車では、以前は気づけなかったノイズが発生することがあります。

静かで燃費の良い自動車を作るためには、乱流を理解し、いかに正確な測定データを取得できるかが重要となります。高速の流れや大きな物体を扱う場合に、騒音発生の主な原因となるのが「乱流」です。乱流がすでに流れの中に存在している場合は、乱流の相互作用によるノイズということになりますが、乱流は別の境界層にある物体によっても発生し、乱流がエッジを通過する際に高レベルのノイズを発生させます。測定器のエッジでも、測定範囲内で相互作用ノイズが発生する可能性があり、有効なデータを得るためには最小限に抑える必要があります。したがって、最も正確で現実的なデータを得るためには、測定環境に追加されるエッジ要素の数とサイズを最小限に抑えることが重要です。

このホワイトペーパーでは、データの改善、設計の改善、シミュレーションの改善のために、正確で有効なデータを取得することを目的として、ボディ周りの空力的な流れの種類について説明します。正確なデータを取得するための測定センサのダイアフラムサイズ的重要性と、測定領域におけるセンサの空力音響影響を最小化する必要性について説明します。また、高コストの構造物や、フラッシュマウントのための穴あけができない場所での非破壊的なセンサ取り付けの有用性についても言及します。最後に、超薄型サーフェスマイクロホンとフラッシュマウント型マイクロホンのデータを比較します。

# 層流 vs 乱流

流れは大きく分けて2種類あります。1) 層流、2) 乱流です

1. 層流は、流体の粒子が平行な層の中で滑らかな経路をたどり、層の間に乱れがないか、ほとんどないことが特徴です(図1)。層流の速度分布は放物線を描いています。流れの速度は壁部分で最も低く、流れの中心で最も高くなります。

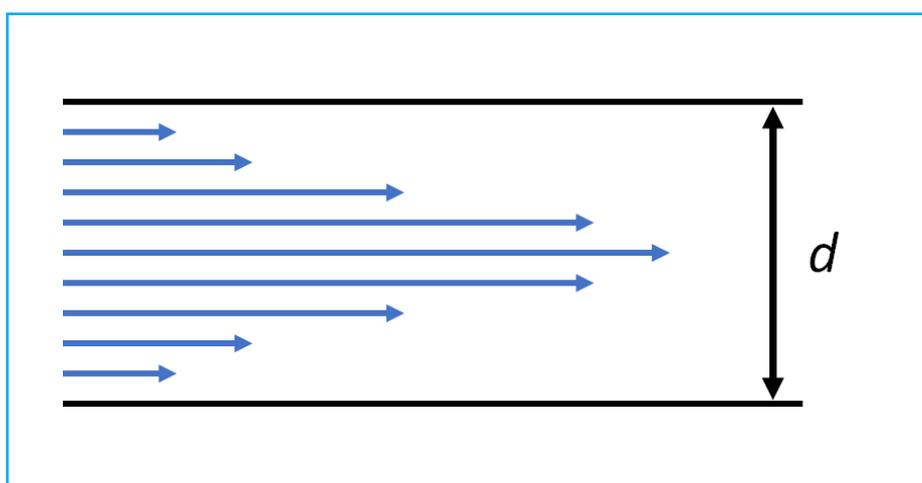


図1  
密閉されたパイプ内の層流。矢印の長さは、流体のおおよその流速を示している

2. 乱流とは、圧力や流速が無秩序に変化する流体運動のことです(図2)。

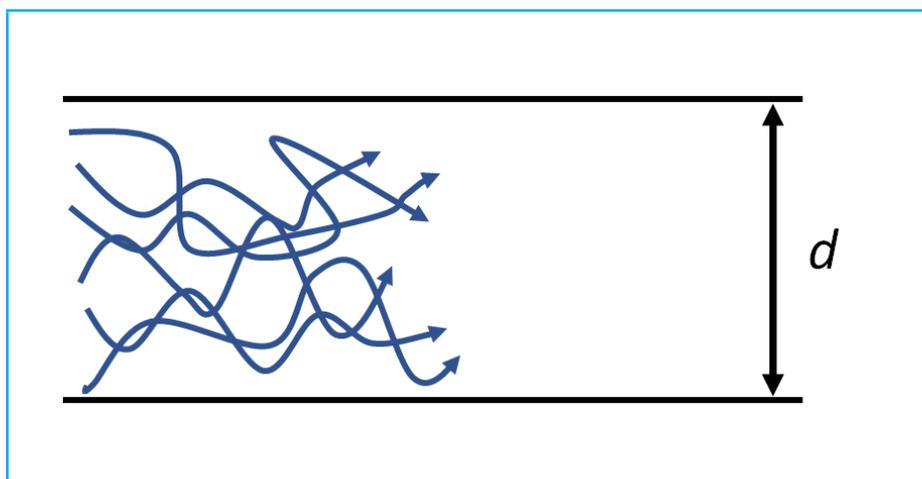


図2  
閉鎖管内の乱流

航空宇宙産業における風切り音試験の主な焦点の一つは、境界層での測定です。ここでは、音響信号を流れに起因する乱流ノイズや流体力学的ノイズから分離することに大きな関心が寄せられています。また、流れが層状（比較的静か）から乱流でノイズが多い状態になる正確な位置を特定することにも特別な注意が払われます。その場所を遷移領域と呼びます（図3）。

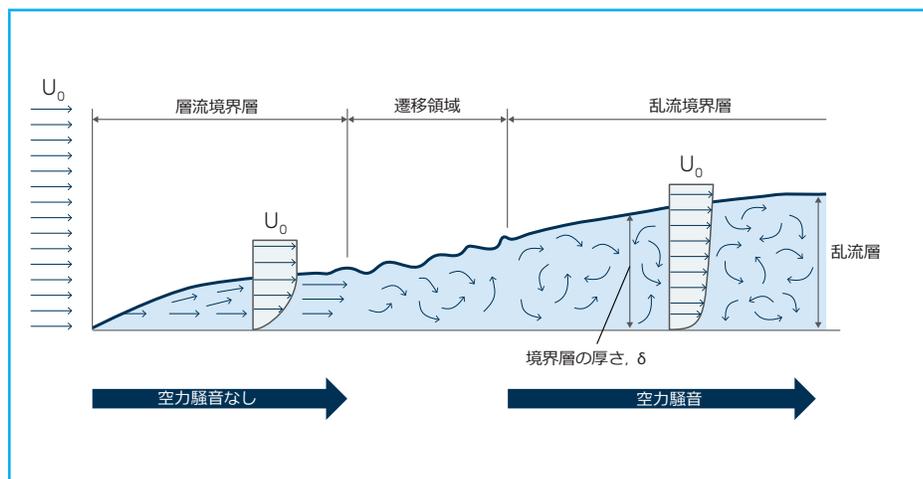


図3  
流れの中の境界層

遷移領域は、翼型（飛行機の翼など）の失速を扱う際にも非常に重要です。航空分野での失速とは、最大揚力が得られる状態で、迎え角が増減すると揚力が減少し始める状態を指します。迎え角が大きくなると、分離した流れの領域が前方に移動し、揚力に影響を与え、抗力が増加する。つまり、最適な角度（最大の揚力と最小の抗力）は、分離領域の位置と相関があるということです（図4）。この最適な角度は、燃料消費量と騒音の発生を最小限に抑えることにもつながります。

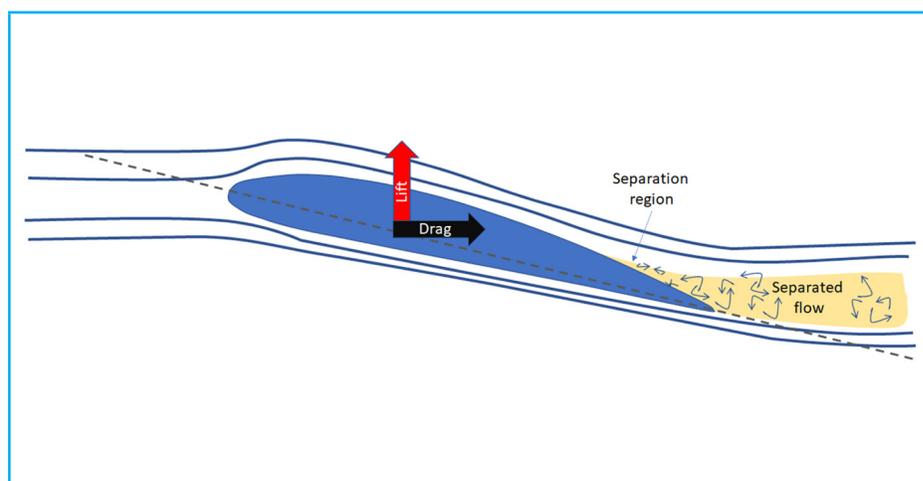


図4  
翼型の周りの流れ。

乱流には特徴的な音響信号があり、層流の音響信号と区別することができるため、マイクや圧力センサーを使用して分離領域を監視することができます。乱流のレベルは、分離領域から分離された流れに向かって上昇し、障害物の背後に渦系が形成されます。これらの渦や乱流は流速に匹敵する速度で移動し、流体力学的ノイズの主な発生源となる。速度が十分に高い場合、音響成分は流体力学的ノイズに比べて一般的に非常に小さな振幅になります。

動力学的ノイズの特徴の一つは、乱流が音速ではなく流れに沿って伝播することです。その結果、波長が非常に短くなります。風洞では、乱流はマイクロホンのダイヤフラムに平行に伝わっていくため、高い周波数での「**マイクロホンサイズ効果**」を避けるために、特別な注意を払う必要があります。

## サイズが重要になる場合

### ダイヤフラムのサイズ

センサは、その物理的な大きさから、検出素子（またはダイヤフラム）の表面に平行な方向から来る音波を平均化するという自然な傾向があります。これは、流れが90°の角度で通過する滑らかな壁に平らに取り付けられたマイクロホンの一般的な測定シナリオです。

波長の大きさがマイクロホンのダイヤフラムよりも大きくなければ、加わる圧力の積分は実際の音圧レベルを過小評価する傾向があります。この傾向は、波長の大きさがマイクロホンのダイヤフラムの大きさと同じになるまで続き、面全体の積分では正圧と負圧が同時に発生し、正味の出力はゼロになります（図5）。

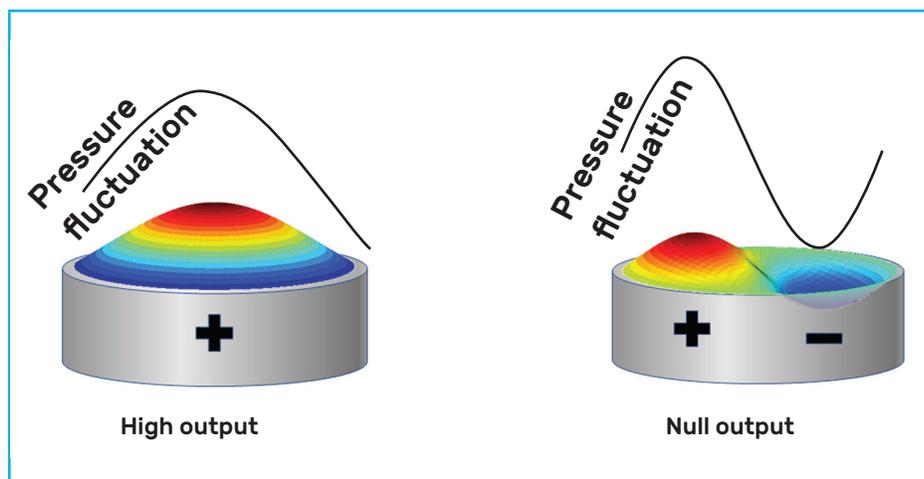


図5  
ダイヤフラムサイズの影響

つまり、検出素子が大きいセンサは、検出素子が小さいセンサに比べて、すぐに高周波成分が過小評価される傾向があります（図6）。

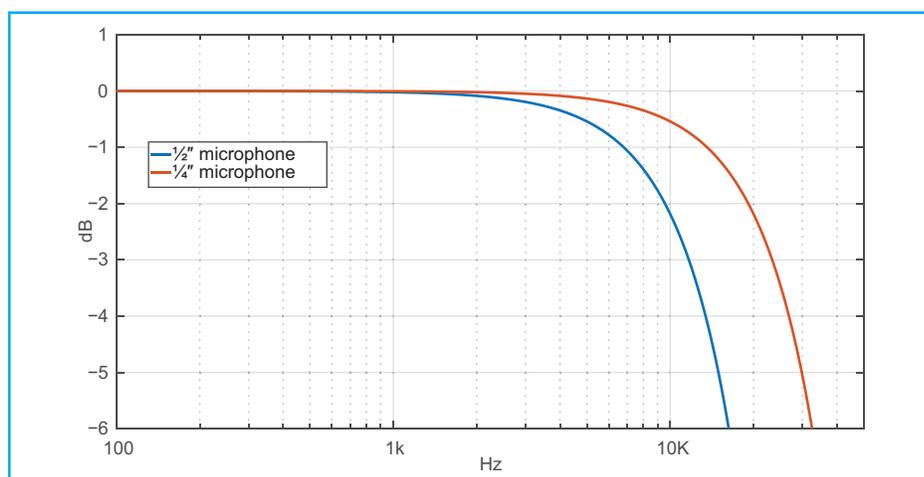


図6  
メムレンサイズに応じた90°入射のレスポンス

この効果は、流れが遅いときにはさらに顕著になります。流れに乗って移動する空力音響障害は、波数が非常に大きくなり、キャンセルがより早く行われます\*（図7）。

\* 波数とは、波の空間的な周波数のことで、単位距離あたりの周期で表されます。

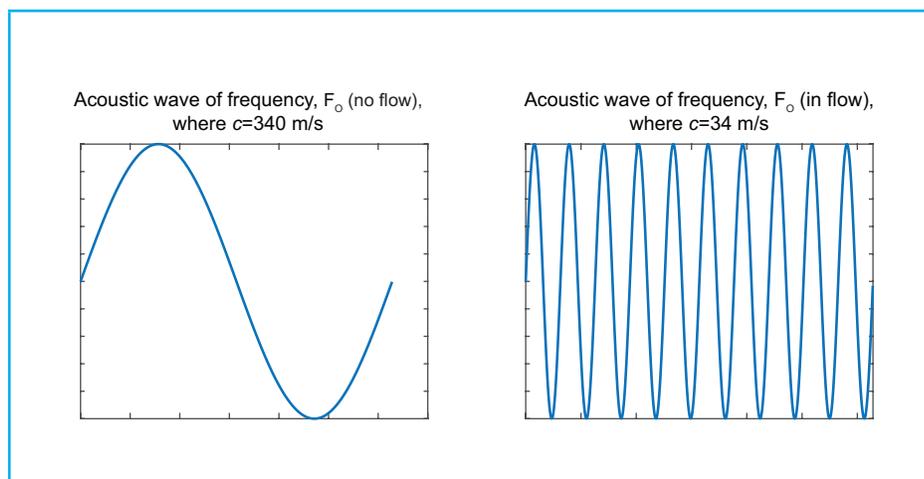


図7  
同じ周波数で、異なる流速で1から10までの波数

したがって、GRAS 48LX-1のように、アクティブ・メンブレンのサイズを1/4"よりもわずかに小さくして最適化したマイクロホンであれば、低いノイズフロアと適度な出力を維持しながら、平均化効果を最小限に抑えることができます（図8）。

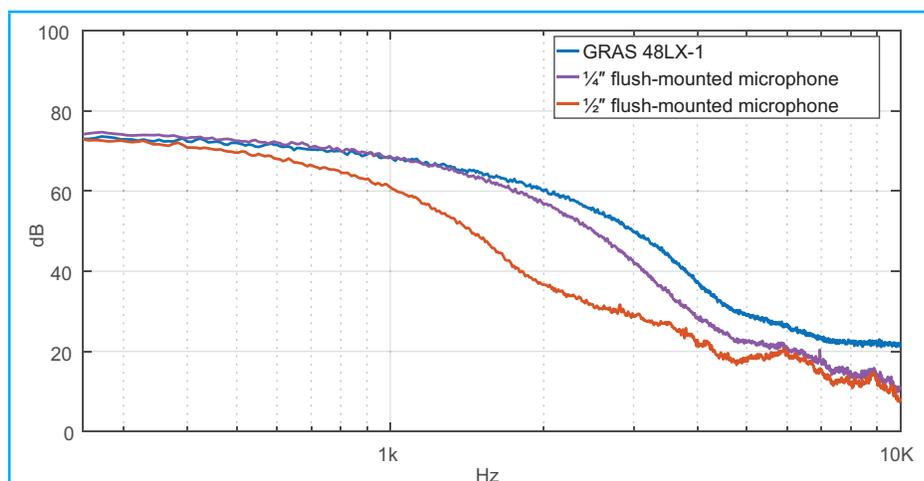


図8  
15m/sでの高周波航空音響ノイズの測定。1/2"マイクロホンの高周波成分が過小評価されているのは、振動板での平均化によるものです。

境界層の特性を重要な流れの中で測定する場合、大きな検出サイズのセンサで測定すると、乱流の高周波成分が大きく過小評価されてしまいます。これは、乱流が流れと同じ速度で移動し、より高い波数を持つため、早く平均化されてしまうためです。

# センサ全体のサイズ

マイクロホンが物理的に存在すると、流れが乱れ、不要な空力音響や口笛のようなノイズが発生します。これまでの解決策は、マイクロホンを風洞の壁にフラッシュマウント\*するか、最悪の場合、被試験機器（DUT）にドリルで穴を開けることでした。しかし、これは常に可能とは限らず（例えば、ガラス窓の中など）、邪魔になり、費用もかかり、破壊的な結果を招く可能性もあります。

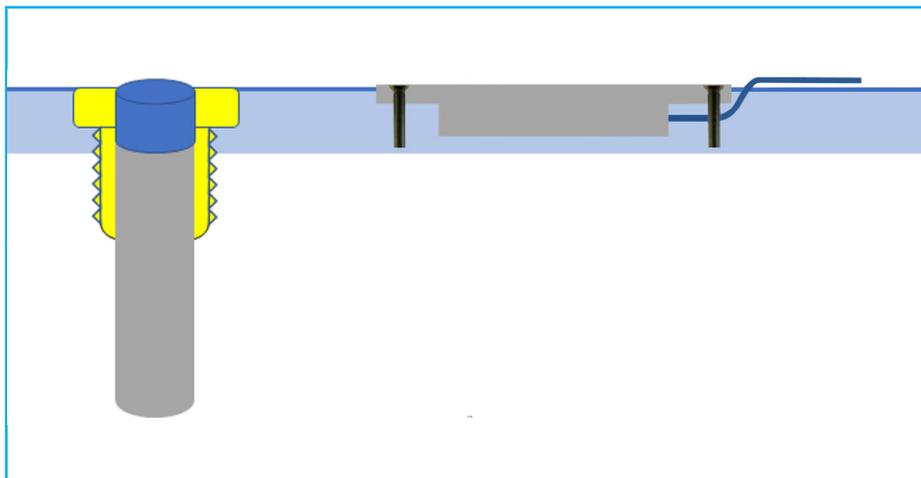


図9  
レギュラーマイク  
（左）とサーフェスマイク（右）のフラッシュマウントオプション。

サイズの重要性と、試作品であるDUTに穴を開けることによる破壊的で破滅的な影響の可能性があるため、GRAS 48LX（図10）のように、DUTの表面にマイクロホンを取り付けることができ、より薄くて非破壊的な方法が望まれています。

このマイクロホン（高さ1mm、設置面積9×18mm）は非常に小さいため、特別に設計されたフェアリングに正しく取り付けられた場合、48LXの周波数特性と従来のフラッシュマウント型の測定用マイクロホンを判別することは非常に困難です。それほど同じような特性になります。

\*マイクをフラッシュマウントするには、被測定物の表面に小さな穴を開け、ネジ山やネジを付ける必要があります。

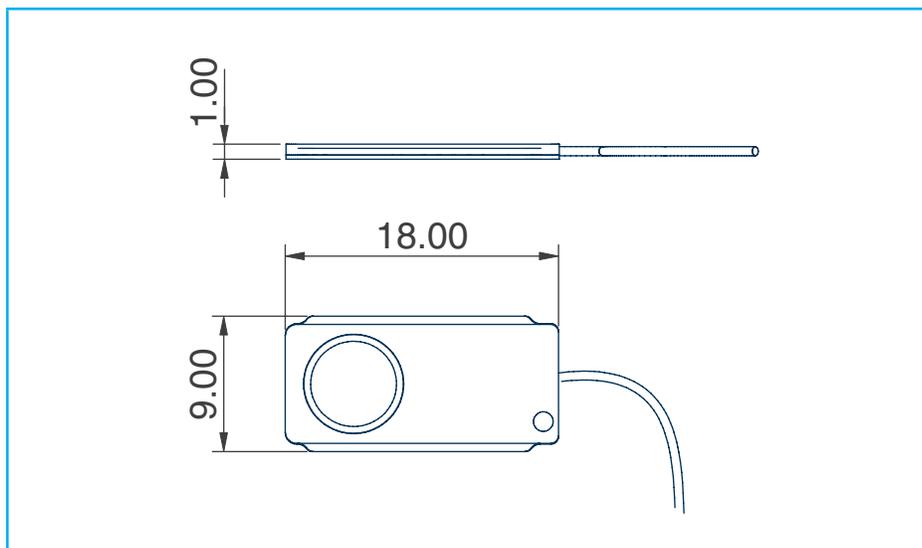


図 10  
48LX-1一寸法(mm)

これにより、穴を開ける必要がなくなりました。図11（左）に示すように、マイクロホンは、あらゆる平面や曲面に、簡単かつ、時間をかけずに取り付けすることができます。

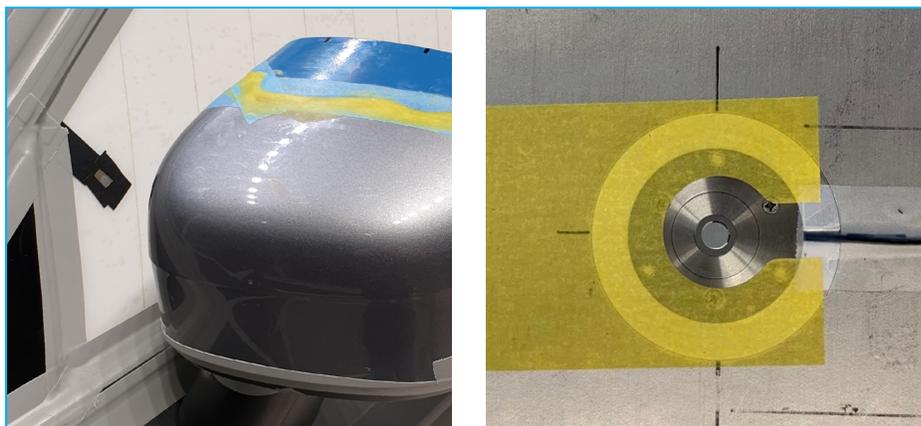


図 11  
フェアリングマウント  
（左、Volvo Car  
Corporation提供）と  
フラッシュマウント  
（右）

# 結論

GRAS 48LX-1のような厚さが非常に薄いマイクロホンは、DUTに永久的な物理的ダメージを与えることなく、フラッシュマウントのマイクロホンと同等の精度で測定することができます。

メンブレンのサイズを小さくすることで、図12に示すように、ノイズフロアを損なうことなく測定範囲を広げることができました（高周波成分を過小評価する従来のマイクロホンの設計と比較して）。

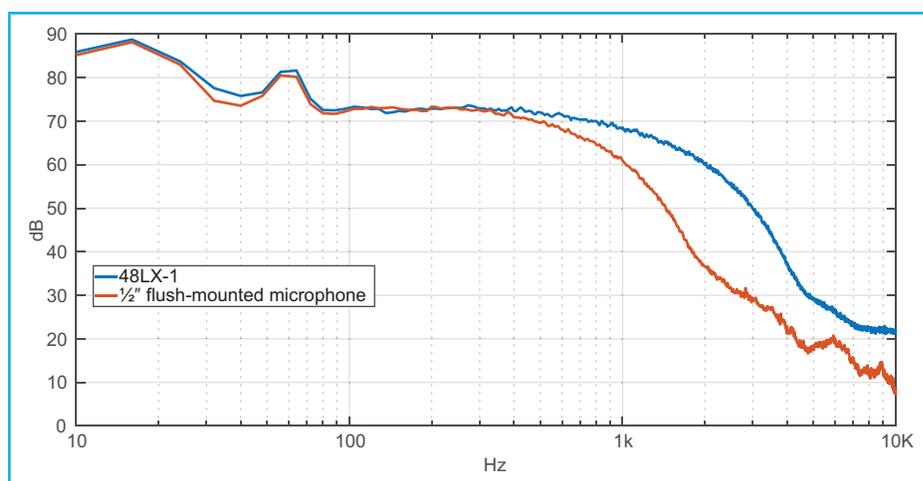


図 12

風速15m/sでのフェアリング取付の48LX-1と1/2"フラッシュマウントマイクロホン

境界層で有効かつ実用的なデータを取得するためには、乱流や流れを理解し、それらが測定データの精度にどのように影響するかを知ることが重要です。このような理解があれば、測定器のエッジを最小限に抑えることで、測定領域内の相互作用ノイズを低減し、ダイアフラムのサイズを小さくすることで測定範囲を広げることができることがわかります。このことは、データの改善、設計の改善、シミュレーションの改善につながります。また、超薄型のサーフェスマイクロホンは、高価なDUTや穴の開かない表面への非破壊的な取り付けや、マイクロホンの配置が変更される可能性のあるシナリオに対して、新たな選択肢を提供します。

 **丸文株式会社**

お問い合わせ先  
丸文株式会社  
E-mail: [gras@marubun.co.jp](mailto:gras@marubun.co.jp)  
〒103-8577  
東京都中央区日本橋大伝馬町8-1  
システム営業第1本部 営業第1部 計測機器課  
TEL: 03-3639-9881

中部支社  
〒450-0003  
愛知県名古屋市中村区名駅南1-17-23  
システム営業第1本部営業第3部 システム営業第2課  
TEL: 052-563-1181