

エオルス音に基づく風速推定のための音源定位に関する基礎的検討
 Preliminary Study on Sound Source Localization for Wind Speed Estimation based on Aeolian Tone

○吉川峻平, 大風翼, 高野靖, 西嶋一欽

○Shunpei YOSHIKAWA, Tsubasa OKAZE, Yasushi TAKANO, Kazuyoshi NISHIJIMA

This study investigates the possibility to estimate wind speeds based on the frequency of Aeolian tone emitted from a cylindrical object. The underlying idea behind the wind velocity estimation is that the Strouhal number, consisting of characteristic length, sound frequency and wind speed, takes a constant value when the Karman Vortex, the cause of Aeolian tone, is generated. To determine characteristic length, it is necessary to estimate sound source location and identify the object emitting sounds. In this paper, we examine the feasibility of source localization of Aeolian tone outdoors based on cross-correlation methods. We found that it is possible to localize the sound source with an accuracy that enables to identify the object in cases the frequency component of the Aeolian tone is dominant.

1. はじめに

耐風設計および風環境制御の観点から都市空間内の風速観測は必要不可欠であるが、その観測密度は低い(AMeDAS 全国約 1,300 か所、約 17km 間隔¹⁾)。従来の三杯式/矢羽根式/超音波式風速計といった風速計を用いて計測する場合、風速計の設置位置でしか風速を計測できないという欠点がある。また、ドップラーライダーを用いる方法は、計測可能レンジが数十 m 以上であることから、都市空間内の風速計測には適さない。

そこで本研究では都市空間内の稠密な風速場計測を目的として、エオルス音の周波数から風速を推定する手法を開発する。エオルス音とは柱状物体の後流に生成されるカルマン渦に伴い発生する空力音である。円柱物体の後方でカルマン渦が発生するとき、式(1)に示す関係が成り立つため²⁾、エオルス音の周波数 f と代表長さ D (円柱上物体の直径)が分かれば風速 U を推定することができる、というのが本手法の原理である。代表長さ D を決定するためには、十分な精度で音源定位を行い、音源を特定する必要がある。

$$\text{ストロハル数 } S_t = fD/U \approx 0.2 \quad (1)$$

(レイノルズ数 Re が $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ のとき)

2. 実験概要

2. 1. 計測条件

本研究では、比較的静かな屋外環境で、人工的に発生させたエオルス音の録音実験を行った。実験は京都大学防災研究所境界層風洞実験室屋上にて実施した。

本実験では録音機器として、小野測器 O-Solution DS-5000 及びこれに接続された 6 本のマイク(マイク MI-1235 およびアンプ MI-3111)を使用した。3 本のマイクを 135mm 間隔で並べた群を 2 個(A、B)作製し、これらを 8.0m 離して設置した(図 1)。マイクは床面からの振動を吸収するために、厚さ 5mm のウレタンフォームで両側を挟まれた、厚さ 20mm の木板(合計厚 30mm)の上に乗せ、マイク後方には、建物からの音の反射の影響を軽減するための吸音材(ポリエステル繊維、厚さ 50mm、幅 910mm、高さ 910mm)を設置した。計測はサンプリング周波数 51,200Hz で行った。実験時の気温は 5°C 前後(音速 $c = 335\text{m/sec}$)であり、木の葉が揺れる程度の風が吹いていた。

2. 2. 実験手順

直径 4.5mm の円形断面、長さ 1.0m のケーブルを高さ 2m 付近でおよそ 30 秒間振り回し、エオルス音を継続的に発生させ、これを録音する。図 1 に示す 15 個の格子点それぞれを音源位置(≒ケーブルの回転中心)として計測を行った。

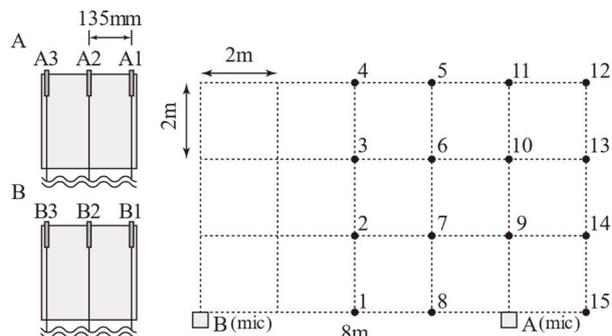


図 1 実験配置図(マイクの配置及び音源位置)

3. 実験結果および解析

3. 1. パワースペクトログラム

実験番号 14 のエオルス音発生時のスペクトログラムを図 2 に示す。マイク A1(図 1 参照)で 1,100Hz 付近に周期的に表れる、輝度の高い領域がエオルス音のパワーに相当する。このことはケーブルの回転速度と断面直径から推定されるエオルス音の周波数が 1,150Hz であることから確認される。一方、音源から離れているマイク B1 のスペクトログラムからはエオルス音の形跡を読み取ることができない。

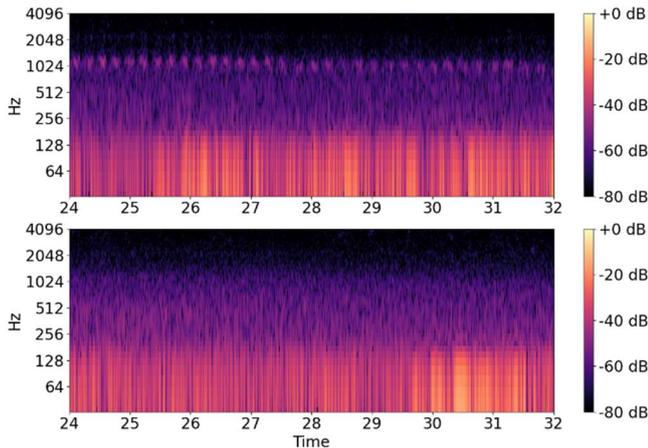


図 2 エオルス音発生時のスペクトログラム
(実験番号 14 上:マイク A1、下:マイク B1)

3. 2. 時間周波数領域でのエオルス音の抽出

音源から近いマイク A1 について、スペクトログラム上でエオルス音の形跡が読み取れる時間帯の信号を切り出す。次に、周辺雑音(主に低周波域)の影響を排するために、切り取った信号の STFT(短時間フーリエ変換)に対して 800Hz 以下の周波数成分を 0 とするハイパスフィルタ処理を行う。これを ISTFT(逆短時間フーリエ変換)することでエオルス音を含む時刻暦波形を得る。マイク A1 で設定した時間帯および周波数帯で、同様の処理をほかのマイク、他の実験番号でも行う。

3. 3. 相互相関法による音源位置の推定

前節で得られたエオルス音の時刻暦波形について、隣接するマイクで相互相関関数を算出し、それが最大となる時間を音の到達時間差として音源方向を推定する。マイク群ごとに得られる到達時間差を平均した値から、マイク群ごとの音源方向 θ_A 、 θ_B を求める(相互相関法)。幾何学的な関係より、図 3(上)に示す 3 次元空間上の円弧上に音源があると推定されるので、これを平面に投影したものを図 3(下)に示す。ただし、マイク間隔と比べて音源は十分に遠方にあるため、到達する音波は平

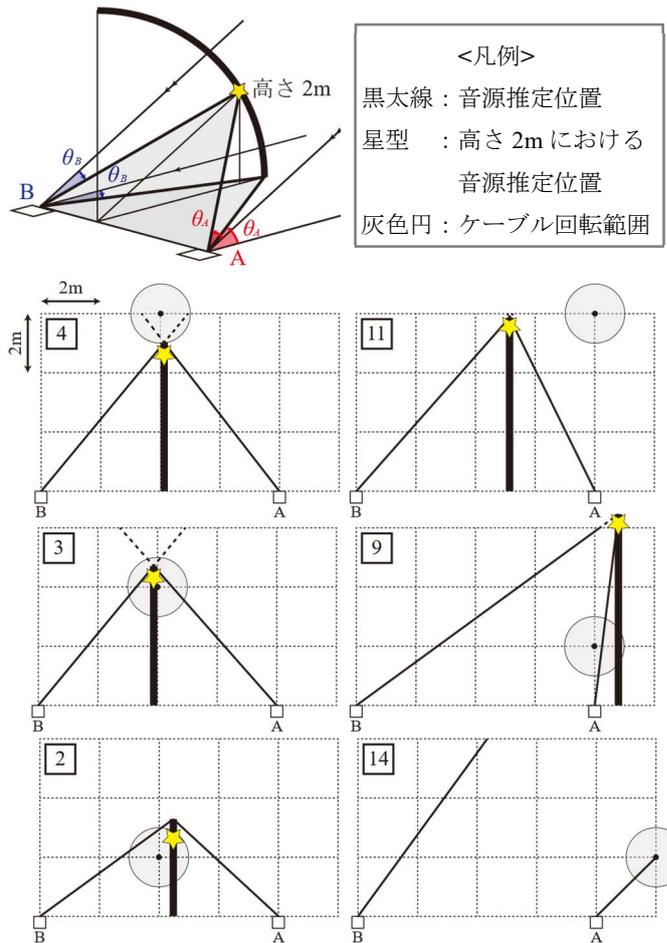


図 3 音源定位の概念図(上)と音源定位の結果(下)

面波とみなしている。

4. 結論

図 3 より音源とマイクとの距離が近いなどの要因で、エオルス音の周波数成分が卓越する場合には、物体を特定するのに十分な精度で音源方向を推定できることが分かる(例えば、図 2:実験番号 14、ほかの実験番号についても同様)。一方で、音源位置の遠い場合には、エオルス音が周辺雑音と同程度以下の音圧レベルになることから(図 2(下)参照)、推定の精度は著しく低く、推定ができていないと言いはない。本稿で実践した音源定位の手法が暗騒音の多い強風時でも有効かどうかの検証などが今後の課題として挙げられる。

謝辞 本研究は、2022 年度大成学術財団研究助成「空力音源の位置同定と周波数特性解析に基づく街中の風速推定」の研究成果である。

参考文献 1) 気象庁 | アメダス

(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>, 2023.1.14 閲覧)、2) 鈴木康方・関谷直樹・彭國義・松島均・沖田浩平、『流体力学』、コロナ社、p.147、2018