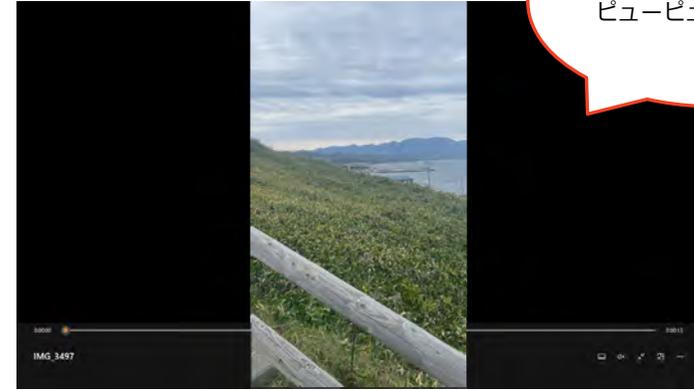


空力音源の位置同定と周波数特性解析に基づく街中の風速推定

京都大学防災研究所 西嶋一欽



実際に強風時に鳴っている音



ゴーっという音ではなく、
ピューピューという音

襟裳岬

研究の背景と目的

◆ 背景

- 都市空間内の流れは局所的な現象であるにもかかわらず、風速観測点数は限られている。
例) 現行の気象観測システムのAMeDAS¹⁾やPOTEKA²⁾の観測点は約10 ~ 20 km 間隔で点在。
- 都市空間内の風況予測には風洞実験や数値流体解析が活用されている。
これらの結果の妥当性を検証するために都市空間スケールで観測された風速場のデータが必要である。

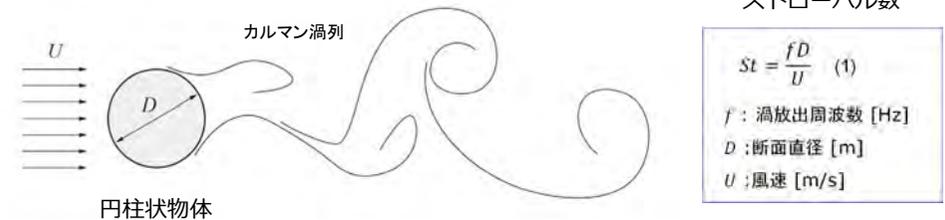
◆ 目的

- 本研究では強風時に街中で聞こえる「ピューピュー」という音
(= 電線や手摺などの柱状物体の後流で生じるカルマン渦列に伴い発生する音)
を利用した風速計測技術を開発することで、都市空間における稠密な風速場計測に寄与する。
- 開発する風速計測手法で実際に風速を測定することができるかを実験によって検証する。

1) 気象庁. "地域気象観測システム(アメダス) | 気象庁. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html> (参照 2024-08-15)

2) 明星電気株式会社. "アメダスの明星電気が提供するIoT技術を用いた | MEISEI[POTEKA ポテカ]超高密度気象観測・情報提供サービス" <https://www.meisei.jp/poteka/> (参照 2024-08-15)

風速推定のコアとなるアイデア



レイノルズ数が $5 \times 10^2 < Re < 2 \times 10^5$ の範囲にあるとき、
ストローハル数 St が約 0.2 になることが知られている



断面直径と渦放出周波数を知ることができれば、
式(1)より風速を推定できる

風速推定手順と研究課題

step 1 (録音)

- ・ 強風時に電線や手摺から発生するエオルス音・振動音を複数のマイクロフォンアレイで録音する
- ・ 録音データから渦放出周波数に対応するピーク周波数 f を得る → **渦放出周波数**

step 2 (音源同定)

- ・ それぞれのマイクロフォンアレイから音源方向を推定し音源となっている円柱状物体を特定する
- ・ 実地で寸法を測定 / 規格を確認するなどにより柱状物体の断面径 D を得る → **断面直径**

step 3 (風速推定)

- ・ 渦放出周波数に関する式(1)から風速を推定する

【研究課題】

課題 1 : どうやって音源を同定するのか?

→ 複数のマイクロフォンアレイで推定された音源方向が交わる点に音源があるはず

課題 2 : 録音された音をスペクトル解析すれば、本当に風速を推定できる?

【課題 1】エオルス音の音源同定 概要

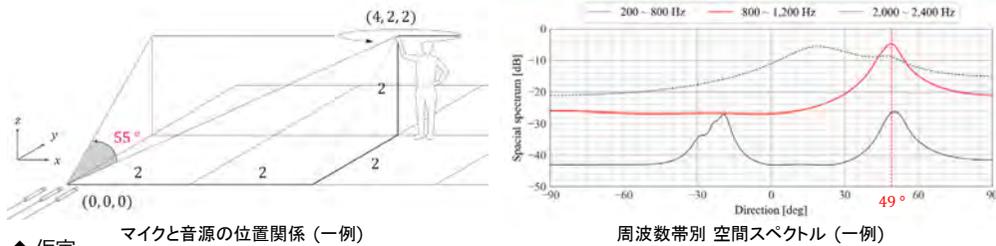


実験風景 (・ マイクロフォン (135 mm 間隔))

エオルス音を発生させる方法

- ◆ 直径 4.5 mm の円形断面を持つ長さ 1 m のケーブルを約 30 秒間 振り回してエオルス音を発生させる
- ◆ 3個の無指向性マイクロフォンを 135 mm 間隔で並べたアレイ × 2 組を 8 m 離して配置した
註) 録音機材は小野測器 無指向性マイクロフォン M1-1235 および アンプ M1-3111 を使用した
- ◆ 上記の計測を音源位置を変えながら複数回実施した (白丸)
 ▶ 周波数 1,000 ~ 1,200 Hz 程度のエオルス音が発生する (ケーブルの回転速度と断面径から計算される周波数と同じ)

【課題 1】エオルス音の音源同定 結果



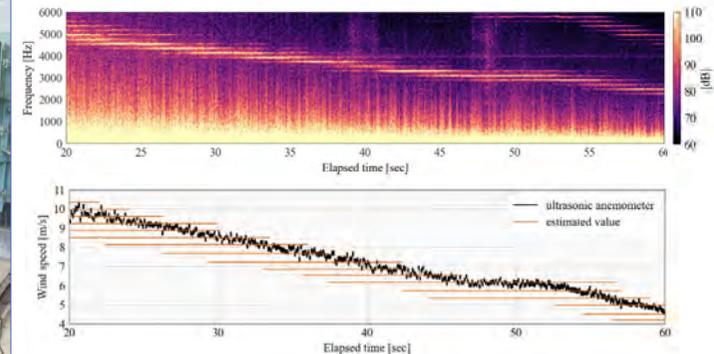
- ◆ 仮定
 - (1) マイクロホンに到達する音波は平面波とみなす (マイクロホン間隔に対して音源までの距離が遠いため)
 - (2) エオルス音を発生させるケーブルを点音源とみなす
- ◆ 方法 : 相互相関法・MUSIC法
- ◆ 結果 詳細は(3)に記載
 - ・ エオルス音の周波数成分が周囲の雑音よりも卓越している場合には相互相関法・MUSIC法いずれの方法であっても音の発生源となる物体を特定できるほどの精度 (音源方向 $\pm 12^\circ$ 以内) で音源方向を推定することができる
 - ・ 音源方向の推定がうまくいかない場合にはエオルス音が聞こえないもしくは周波数成分が著しく小さい

3) Yoshikawa, S., Nishijima, K., Okaze, T., Takano, Y., Feasibility of eolian sound for urban wind speed estimation, Japan Architectural Review, doi:10.1002/2475-8876.12424, 2024.

【課題 2-1】風速推定の検証実験 (屋内・風洞) 概要&結果



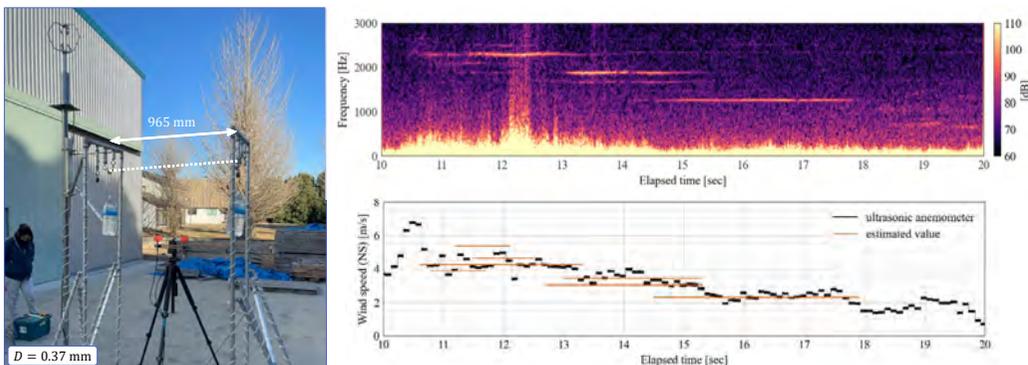
実験風景 録音機材は【課題1】に同じ



スペクトログラム(上)と風速の時刻歴波形(下)

- ◆ 超音波風速計で計測した風速値と振動音から推定される風速値は対応している
- ◆ ピーク周波数が等間隔で離散的に生じており、弦の固有振動数の振動が生じていると考えられる
- ◆ 風洞から吹き出す風の速さを徐々に落としていくと、振動音のピーク周波数は風速に追従する

【課題 2-2】 風速推定の検証実験 (屋外・自然風) 概要&結果



実験風景 録音機材は【課題1】に同じ

スペクトログラム(上)と風速の時刻歴波形(下)

- ◆ 振動音の周波数から平均的な風速を推定することができる可能性が示されている
- ◆ 風速の弦直交成分が卓越している時間帯を選定
- ◆ 一定のピーク周波数の音がある程度継続して発生する (弦の固有振動数と考えられる)

結論

- 本研究の目的は、円柱状物体の後流に発生するカルマン渦列に伴い発生する音に基づいて風速を計測する技術を開発することである。いくつかの実験を通じて得られた知見を以下に示す。

【課題1】 エオルス音の音源同定

- ▶ マイクロフォンアレイでエオルス音を録音することで、音の発生源となる柱状物体を特定する精度(音源方向 $\pm 12^\circ$ 以内)で音源方向を推定できることを示した。音源推定には相互相関法・MUSIC法を使用した。

【課題2-1】 風速推定の検証実験 (屋内・風洞)

【課題2-2】 風速推定の検証実験 (屋外・自然風)

- ▶ 有風下に置かれた円柱状物体の後流に発生したカルマン渦列による**振動音の周波数から平均的な風速を推定できることを示した**。風速を推定するには関係式 $fD/U = St \approx 0.2$ ($Re: 5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$) を利用する。

- 以上のことから、**カルマン渦列発生に伴う音(エオルス音・振動音)から風速を推定できる可能性を示した**。今後は街中で自然発生しているカルマン渦列に伴い発生する音から、音源を同定し風速を推定できるかどうかを検証する予定である。

成果：国際査読付き論文1編 (採択)、日本建築学会大会梗概、国内査読付き論文1編 (投稿中)

襟裳岬での録音した音のスペクトログラム

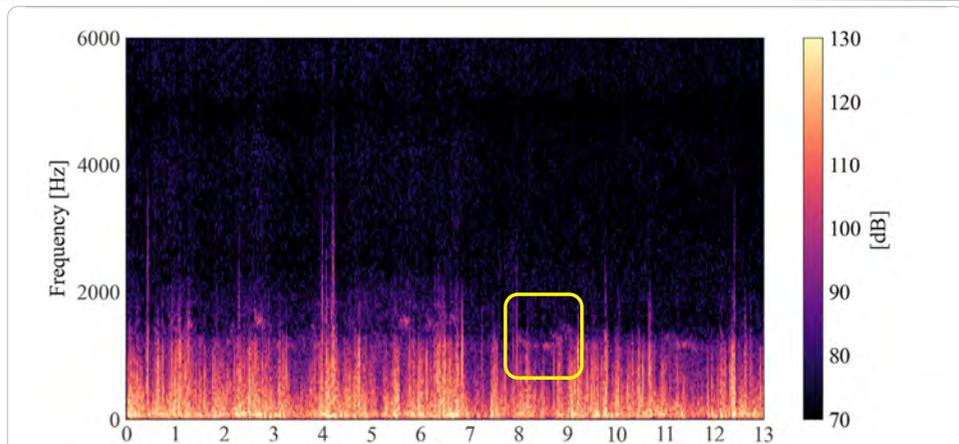


図1: スペクトログラム(サンプリング周波数44100Hz: サンプル数 $N = 2048$: オーバーラップ率 75%: Hann窓)

8~9 秒, 11~12 秒の 1200 Hz の音がエオルス音と考えている音(?)

音圧レベル

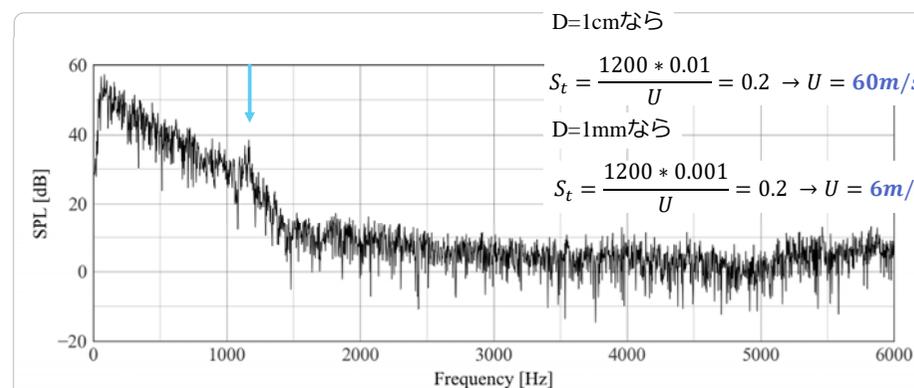


図2: 計測開始から8-9秒間の音圧レベル(各フレームのサンプル数 $N = 16384$)

各フレームのSTFTの絶対値の幾何平均(上記では計2フレーム)を計算している

1200Hz付近のピークがエオルス音と考えている音(?)