

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 ○西嶋一欽 1*
高野 靖 2**
東京工業大学 大風 翼 3***

カルマン渦列 ストローハル数 空力音
エオルス音 周波数解析 マイクロフォンアレイ

研究の目的

都市空間内の風の流れは局所的な現象であるにも関わらず、風速観測点数は極めて限られている。ビル風等の風環境評価のために風況観測も行われてはいるが、離散の少数の点で計測されているだけである。現状、都市空間内の風況の時空間構造を稠密に予測するためには、風洞実験あるいは数値流体解析による以外にない。しかしながら、これらの方法の妥当性は限られた観測データに基づいて検証されているのみで、実現象をどの程度再現しているかは不明である。本研究では、強風時に聞こえるピューピューという音（＝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、風速場を稠密に計測することに資するものである。

研究の内容

流れ場に置かれた柱状物体の後流で発生するカルマン渦列については、長大吊橋や超高層建築物に対する耐風設計、マンションの手すり等で発生する振動による疲労や不快音の防止の観点などから、建築土木分野において広く研究されている。特に、電線や手すりなど円柱状の物体では、レイノルズ数が $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ の範囲で以下の式で定義されるストローハル数が0.2付近で発生することが知られている。

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

ここで、 St はストローハル数、 f はカルマン渦列の発生周期の逆数、 D は円柱断面の直径、 U は風速である。

本研究の本質的なアイデアは、上記の式において $St = 0.2$ とし、録音することで得られる音の振動数 f と物体の代表長さ D を知ること、風速 U を推定するというものである。なお、物体の代表長さ D は、複数のマイクロフォンに到達する音の時刻差から音源の位置を特定し、事後的に物体の寸法を計測する。

上記のアイデアに基づいて風速を推定するためには、式(1)に基づいて風速が推定できることを確認し、カルマン渦列の発生に起因する音を記録し抽出する方法、カルマン渦列が発生している柱状物体を特定する方法を構築

する必要がある。本研究ではこれらの課題に取り組んだ。具体的には、以下の3つの実験を行い、アイデアの実効性を明らかにした。なお、本実験で用いた録音機材は小野測器無指向性マイクロフォン MI-1235 およびアンプ MI-3111 である。

【実験 1】長さ 1m 直径 4.5mm のケーブルを振り回すことで人為的にエオルス音を発生させ（図 2）、3 個 1 組で構成したマイクロフォンアレイでエオルス音を記録し、記録した音圧データに対して相互相関法および MUSIC(MUltiple SIgnal Classification)法を用いて音源方向を推定できることを明らかにした。



図 1. 人為的にエオルス音を発生させる方法

結果の一例を図 2 に示す。この図は、MUSIC 法を用いて音源方向の推定に成功した場合である（真値 55° に対して推定結果は 49° 、詳細は報告書参照）。実験 1 の結果からエオルス音が明瞭に聞こえる場合には音源方向の推定が可能なこと、音源方向の推定がうまくいかない場合は録音データ上でエオルス音を識別できないあるいはエオルス音が著しく小さいことが明らかになった。

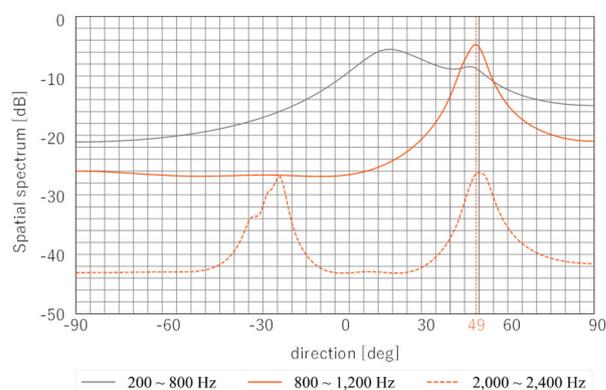


図 2. MUSIC 法による音源方向の推定結果.

【実験 2】風速を制御できる大型風洞にカルマン渦列発生装置を配置し (図 3 左)、風速と音を同時に記録しそれらの関係性を解析することで、式(1)に基づいてカルマン渦列発生に伴う音から風速を推定することが可能であることを示した。実験で用いたカルマン渦列発生装置は、間隔が 965mm の 2 個の滑車の間に釣り糸 (ナイロン 5 号) を通し両端にそれぞれ 2kg のおもりを吊るすことで張力を与えたものである (図 3)。



図 3. 実験 2 風景 (左)、実験 3 風景 (右)

図 4 下は、マイクロフォンで計測した音圧データの一部のスペクトログラムである。同図上の黒線は風洞ノズル出口に配置した超音波風速計で計測した風速、赤線は式(1)に基づいて推定した風速である。カルマン渦列発生装置はノズルの下流に置いているため、超音波風速計の風速よりもやや小さくなっているが風速を精度よく推定できていることがわかる。なお、スペクトログラム上の複数のピークは、カルマン渦列の発生に伴って直接的に発生する空力音であるエオルス音ではなく、カルマン渦列により励振された弦 (2 つの滑車で支持された糸) の基本振動周波数の整数倍の高調波振動により加振された筐体より発生した固体伝搬音であるものと考えている。

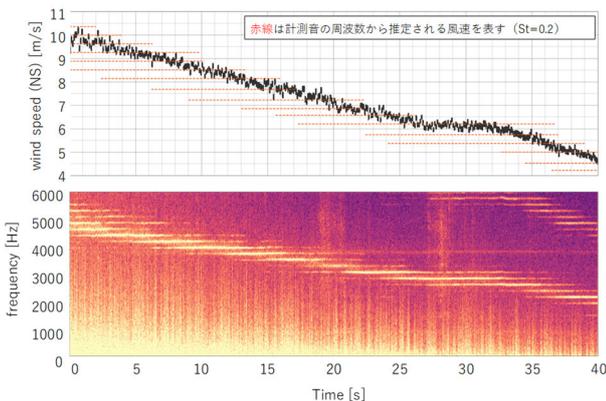


図 4. 上: 計測した風速と式(1)で推定した風速、下: 計測した音圧データのスペクトログラム。図中の NS は釣り糸に直交する方向を表す。

【実験 3】実験 2 と同じカルマン渦列発生装置と超音波風速計を屋外に配置し (図 3 右)、街中の雑音や風速・風向変動がある環境下で、カルマン渦列発生に伴う音から風速が推定可能であることを示した。図 5 に風速推定に成功した事例の一つを示す (図の読み方は図 4 と同じ)。この事例では、釣り糸に直交する風速成分が卓越していたが、それ以外の事例でも風速を推定することが可能であることを示唆する結果が得られた。

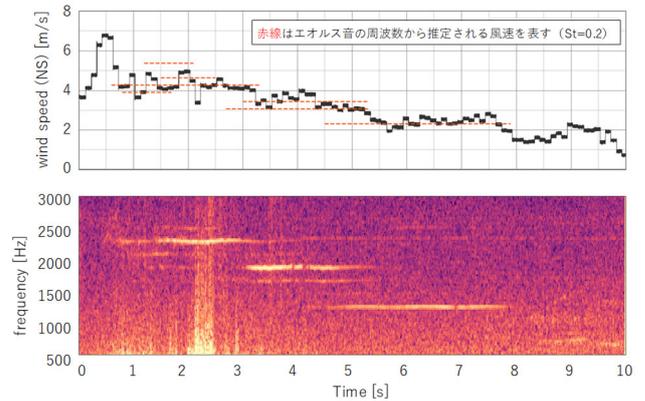


図 5. 上: 計測した風速と式(1)で推定した風速、下: 計測した音圧データのスペクトログラム。図中の NS は釣り糸に直交する方向を表す。

研究の成果、新知見

本研究で得られた主要な知見は以下の通りである。

1. 有風下に置かれた柱状物体から発生するカルマン渦列発生に伴う音から風速を推定することが可能であることを明らかにした。
2. 3台 (最低 2 台) のマイクロフォンでアレイを構成することで、音源位置推定に必要な十分な精度で音源方向を推定可能であることを示した。
3. これらの知見を統合することで、本研究の目的である、街中でカルマン渦列発生に伴う音から風速を推定できる可能性を示した。

今後の予定

本研究で得られた新知見と新たな疑問に基づき、以下の研究を進展させる。カルマン渦列の発生が最終的に音となってマイクロフォンによって計測されるまでの物理的な過程の解明に向けた基礎的な研究。街中に存在している物体から発生するカルマン渦列に伴う音と風速の同時計測に基づく、提案手法の実用性に関する実証的な研究。高価な録音機材の代わりに汎用的で安価に入手できる録音機材を用いた、実用化に向けた研究である。

謝辞

本実験を補助していただいた京都大学大学院工学研究科の吉川峻平君に謝意を示します。

*京都大学防災研究所
**京都大学名誉教授
***東京工業大学

*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
**Kyoto University (Professor Emeritus)
***Tokyo Institute of Technology