

# 流れ場の高周波変動計測

○小林 典彰<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>大阪大学 大学院工学研究科 技術部

## 1. はじめに

空気の流れは私達にとって身近な現象である。たとえば、風車は風のエネルギーを用いて発電する装置であり、空調装置は電気のエネルギーを用いて風を送る装置である。一方で風によるエネルギーがデメリットになる場面もある。たとえば、自動車の空気抵抗や送風機などから発生する空力騒音（いわゆる風切り音）である。筆者は空気の流れを扱う学問である流体力学における代表的なツールである風洞実験と数値流体解析を用いて現象の解明に従事してきた。この空力騒音は空気の流れから発生する騒音であるが、その因果としては物体の周りに発生する渦が変形することで音波となることである。この物体の周りに発生する渦は物体の形状などにも起因するため、空力騒音を対象とした研究では音響学の知見だけでなく流体力学の知見が非常に重要である。これらを明らかにする代表的なツールが風洞実験と数値流体解析である。

風洞実験では実機や模型などを人工的な空気の流れの中に置くことで、現象を再現するものである。速度や圧力、流体力、音など多数の計測器を用いて様々な情報を得ることができる。数値流体解析ではコンピュータを用いて流れと音の現象をシミュレーションするものである。ここでは、微細な渦の現象を解析することが重要であるため、富岳など最新鋭のスーパーコンピュータも用いられる。また、流れ場の中には様々なスケールの渦が存在し、特にこの微細な渦は高周波の変動を伴うため、計測やシミュレーションを実施する上で課題となる。

ゆえに、空力騒音を対象にした研究では微細な渦を解析できる風洞実験と数値流体解析を駆使することで初めて現象を明らかにすることができる。本報では、この中で風洞実験における微細な渦の現象の計測、すなわち流れ場の高周波変動計測に着目し、実験を行う際の工夫や留意点についてまとめる。

## 2. 研究用風洞の概要

研究用風洞は、大阪大学大学院工学研究科の共同利用施設として昭和 56 年 4 月に設置され、風力エネルギー利用に関する研究、建物周辺や室内の気流分析の研究、車体・飛行体・船体および流体機械要素の研究、大気拡散・汚染の予測、長大構造物の耐風性の研究、流れの境界層や乱流構造の研究など、大変幅の広い研究分野で利用されている。

風洞の利用は、大阪大学の研究者だけではなく、他大学の研究者はもちろん、一般の企業の研究者にも開放されており、当施設は風に関わる研究の拠点としての役割を担っている。大きな特色として、可動式変流翼を回転することにより、水平回流型と吹放し型の 2 形式に切り換えられる。さらに、各種実験に対して最適な模型寸法と風速を選択できるように、大小 2 種の測定胴を交換使用できる。

また、風洞装置による風の流れは非常に乱れが小さい（主流速度の 1 %未満）特徴を有し、様々な基礎研究から応用研究に活用することができる。

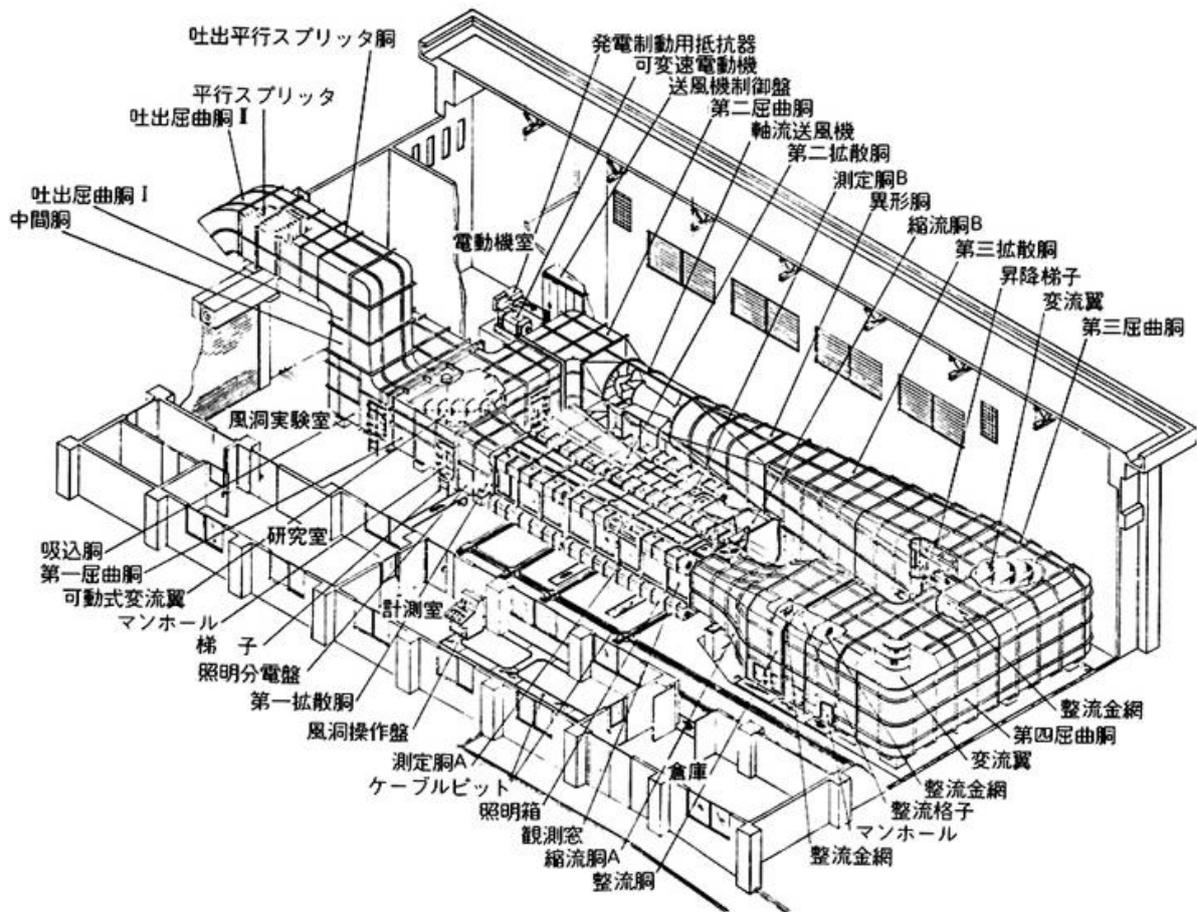


図1 研究用風洞の外観図



図2 模型を設置した風洞測定部内の様子

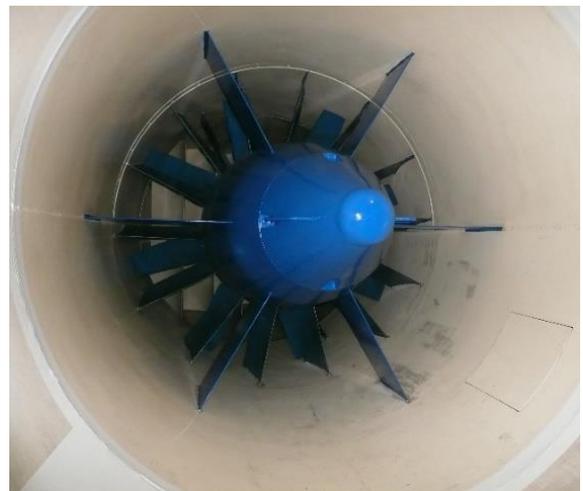


図3 風洞の流れを作る大型送風機

### 3. 熱線流速計

熱線流速計は、伝熱現象を用いた流体計測手法であり、流れによる周囲への熱エネルギーの伝達が流速に依存する性質を用いている。図4に本体の写真を示す。筆者が使用している熱線流速計はリニアライザなどがユニット化され、それらを組み合わせることで構成されている。センサープローブは3.1~25 $\mu\text{m}$ のタングステンや白金などの細い金属線であり、電気によりこれを加熱して用いる。このことか

ら「熱線」流速計とよばれる。熱線流速計は定電流型と定温度型に大別されるが、一般的には定温度型が用いられる。無風状態であれば熱線には本体から一定の電圧が印加されて一定温度に保たれている。しかし、熱線に風などの流れの影響を受けることで熱エネルギーが奪われ熱線の温度が低下する。この際、印加電圧を上げることで熱線の温度を上昇させ、無風状態と同じ温度を保つことができる。この性質を利用し、電圧と流速の関係を求め、計測することができる。図5に熱線流速計とピトー管によって得られた流速の比較を示す。ここでは、リニアライザを通さない場合の熱線流速計の出力も併せて比較している。

また、前述の通り熱線は3.1~25  $\mu\text{m}$ の細い金属線であるため、高周波の応答性にも優れ、計測機本体が電気的な回路でのみ構成されていることから、流れ場の高周波変動を捉えることが可能となる。これは、熱線流速計の大きな特徴である。一方で、時間とともに熱線表面が空気により酸化され抵抗値が変化するため、一定の風速時でも印加電圧が変化してしまう。図6は風洞を同一風速にて連続運転した際のピトー管と熱線流速計の出力、風洞内温度を記録したものである。この図から熱線流速計の出力は温度の変化と時間の経過とともに変化していることがわかる。そのため、信頼性の高い結果を得るためには、応答性には劣るものの信頼性の高いピトー管などの流速を測れる計測器と併せて頻繁に検定をする必要がある。さらに、周囲の温度変化による影響も受けやすいため、温度変化を補正する回路（温度補償器）も備わっている。しかしながら、この温度補償器を用いても限度があるため、頻繁に検定をする必要がある。

熱線流速計は、リニアライザを経由してアナログ信号として出力される。この信号はAD変換器などを用いて時系列波形を計測する。その後必要に応じて平均値や変動値、FFTなどの処理を行う。熱線流速計は調整次第では最大で数MHzの変動まで捉えることができるが、実用上は数kHz~数十kHzの変動を得る。このため、空力騒音を評価する上で重要な帯域（人間の可聴音帯域）である20kHzをカバーすることができる。図7は乱れがある流れ場を熱線流速計で計測した際のスペクトルである。熱線流速計は広帯域の変動を計測できることがわかる。

なお、局所排気装置などの建築設備の風速を計測する際に用いる熱式風速計のことを熱線流速計（熱線風速計）と呼称する場合もあるが、筆者が本報で紹介した熱線流速計とは大きく異なるものであり、熱式風速計は耐久性を維持するためセンサー（熱線）が太く、高周波の現象を捉えることはできない。

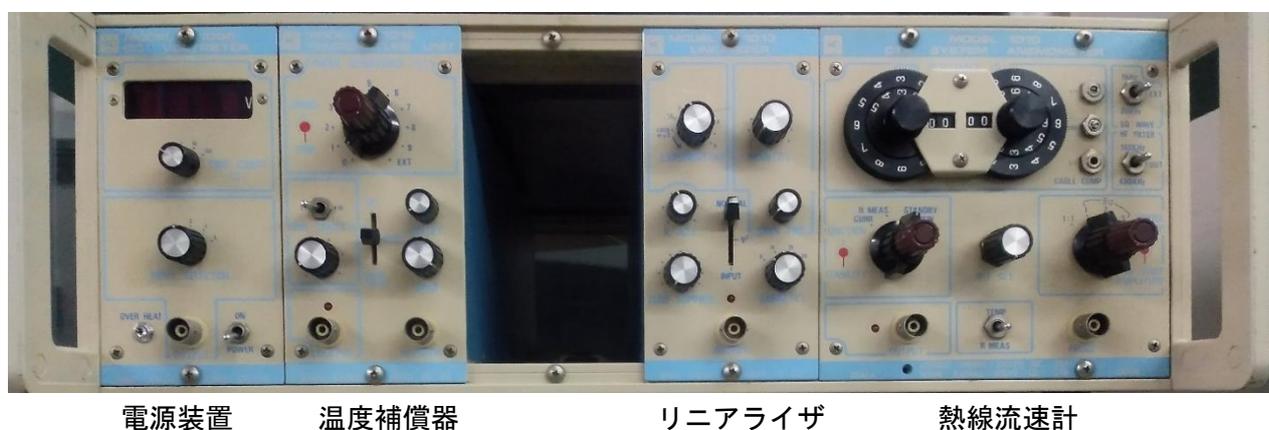


図4 熱線流速計の構成

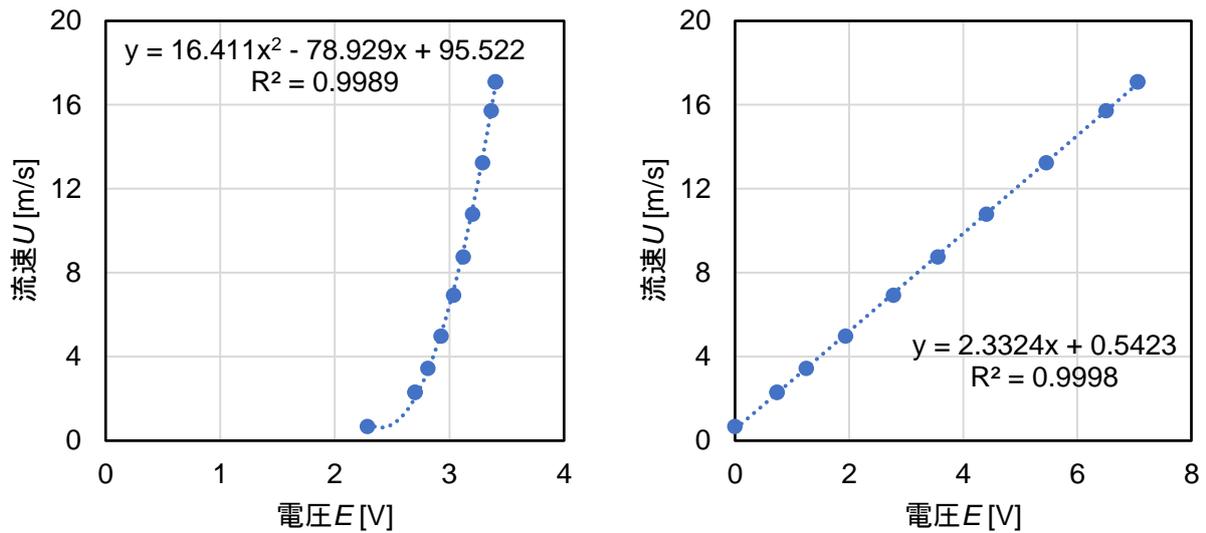


図5 熱線流速計・電圧とピトー管・流速の関係 (左：リニアライズ前・右：リニアライズ後)

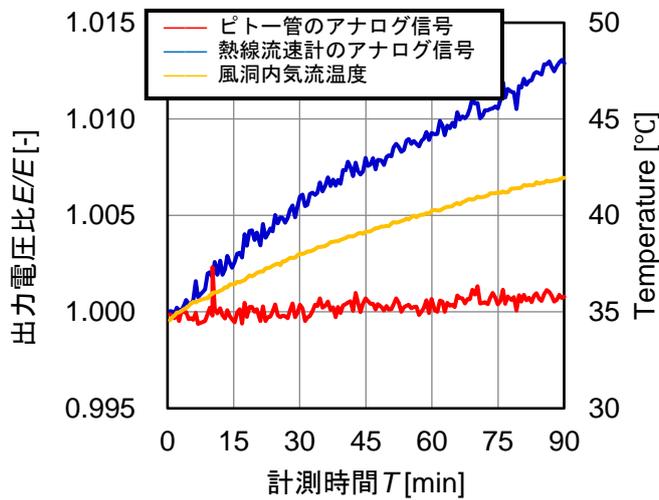


図6 熱線流速計センサー出力の時間変化

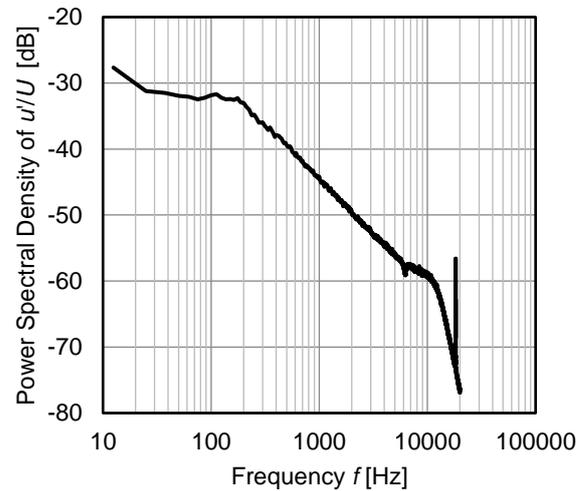


図7 熱線流速計の周波数特性

#### 4. まとめ

本報では、筆者がこれまで取り組んできた空力騒音に関する研究とそのための重要なツールである風洞実験の中で、熱線流速計による流れ場の高周波変動計測を紹介した。センサーの特性を把握したうえで熱線流速計を活用することで流れ場の有益な計測を行うことができる。本報が研究用風洞のような大型実験施設の管理運営や流れ場の計測を担う方々の一助となれば幸いである。