

チューブを用いた圧力計測時における変動する圧力の推定

濱崎, 真洋
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/1929698>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 18, pp.18-23, 2017-10. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

チューブを用いた圧力計測時における 変動する圧力の推定

濱崎 真洋

要旨

自然エネルギー統合利用センターでは、風力発電に係る風車技術を研究対象の一つとしており、大型境界層風洞を用いた風洞試験を実施している。その際に、技術職員の職務の一つとして、計測技術の向上が求められている。

当該風洞設備において、供試体表面の定常的な圧力を計測する場合、測定点に穴を開け、ビニールチューブで穴と圧力計を接続し、チューブ内を伝達した圧力を測定する手法が一般的である。一方、非定常に変動する圧力を計測する場合、前述の方法で行うと、チューブの影響により、圧力変動の位相遅れや振幅の減衰が発生するため、正確に測定することが困難である。

本稿では、スピーカーを用いて任意の圧力変動を再現し、チューブの影響を定量的に解明することで、風洞試験の測定値から測定点での変動する圧力を推定する手法を紹介する。

キーワード

圧力計測・周波数伝達関数

1. 風洞試験

自然エネルギー統合利用センターにおける技術支援として行った、風洞試験での圧力測定について概要を示す。図 1-1 に示す風車の模型を用いて風車の翼端損失に関する実験を行った。実験の一つとして、ダクトが風車の翼端で発生する渦に与える影響を検証する目的で、ダクト内側の圧力変動を計測した。使用した圧力計を図 1-2 に示す。この圧力計は風の流れを乱さないように装置から離して設置しており、図 1-3 で示すように、測定点と圧力計をビニールチューブで接続して計測を行った。図 1-4 に装置の全体図の模式図を示す。測定点の表面圧力はビニールチューブ内を伝播し、圧力計内のセンサーによって数値として出力される。定常的な圧力は正確に計測することができるが、圧力の変動成分については、ビニールチューブ内を伝播する際に位相遅れや振幅の減衰が発生するため、ビニールチューブの特性を評価する必要がある。

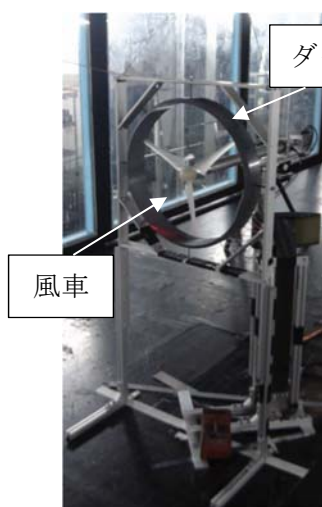


図 1-1 風車の試験



図 1-2 使用した圧力計

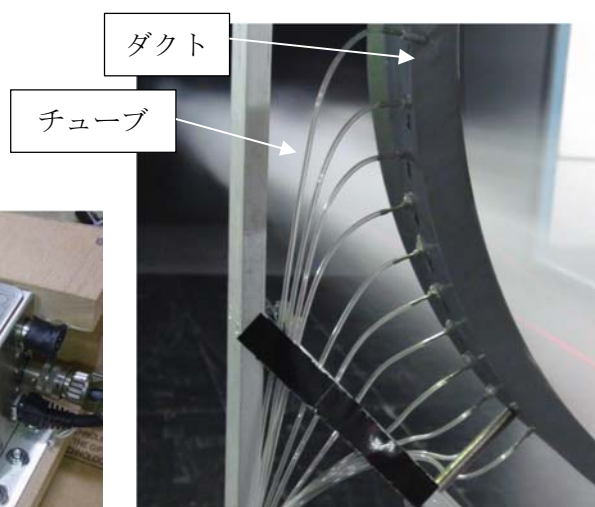


図 1-3 チューブ接続の様子

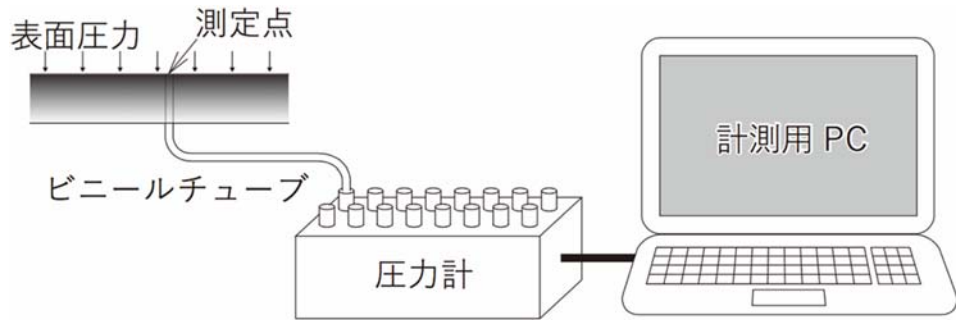


図 1-4 圧力計測の模式図

2. スピーカー実験

圧力変動がビニールチューブを伝播する際の特性を評価する実験を行った。実験には任意の圧力変動を発生させる装置としてスピーカーを用いた。スピーカーから発せられる音は、空気の圧力変動であり、ビニールチューブ内の空気は圧力変動を伝達する「バネ」として働くため、ビニールチューブの特性を伝達関数によって書き表せると考えられる。

図 2-1 にスピーカー実験の模式図を示す。音源は PC で作成した正弦波とし、アンプはスピーカーに内蔵していたものを使用した。スピーカーは図 2-2、2-3 に示すように、コーン前面をアクリル板で密閉し、外部の影響を受けないようにした。さらに、アクリル板に穴を開け、アクリル板と圧力計を 0.05m と 5m のビニールチューブで接続した。これは、ビニールチューブを用いず直接接続することが構造上できないため、最短となる長さ 0.05m のビニールチューブを基準とし、実際に風洞試験で使用した長さ 5m のビニールチューブの影響をみるためである。

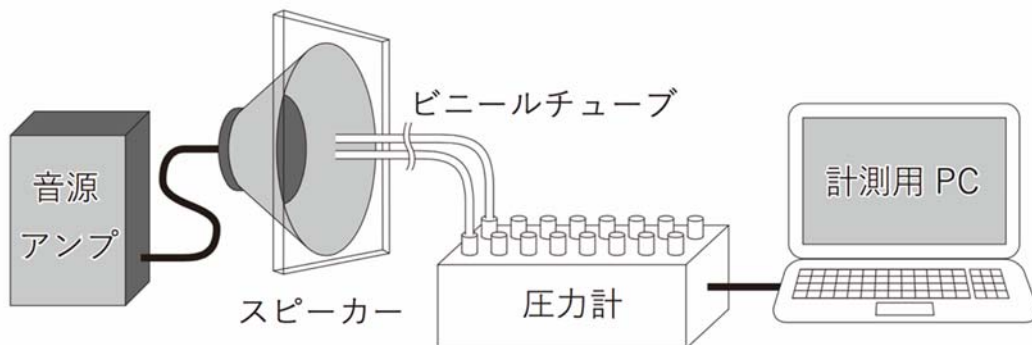


図 2-1 スピーカー実験の模式図

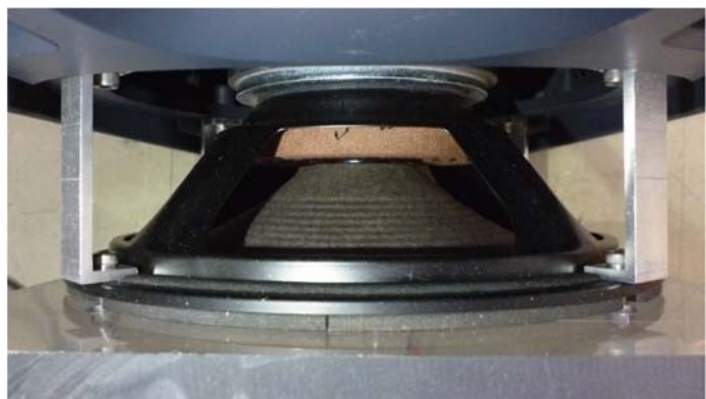
図 2-2 アクリル板を取り付けた
スピーカー

図 2-3 コーン前面を密閉した様子

スピーカーに正弦波を入力し、出力された圧力変動の測定を行った。スピーカーに入力する正弦波の周波数はアンプの性能、圧力計のサンプリングレート（500Hz）を考慮し 20Hz～240Hz の 10 Hz ごととした。一例として 20 Hz での音源信号、スピーカーに入力された電圧、圧力計で計測された値を図 2-4～図 2-6 に示す。長さ 0.05m のビニールチューブに対し、風洞試験で使用した長さ 5m のチューブでは、位相遅れと振幅の減衰が確認された。

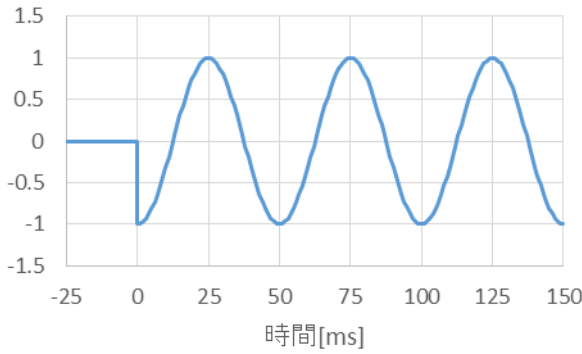


図 2-4 PC で作成した音源の信号

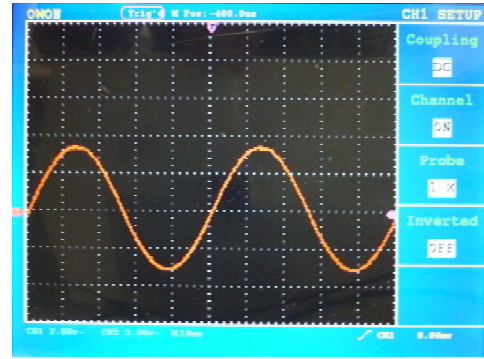


図 2-5 スピーカーに入力された電圧
(オシロスコープで計測)

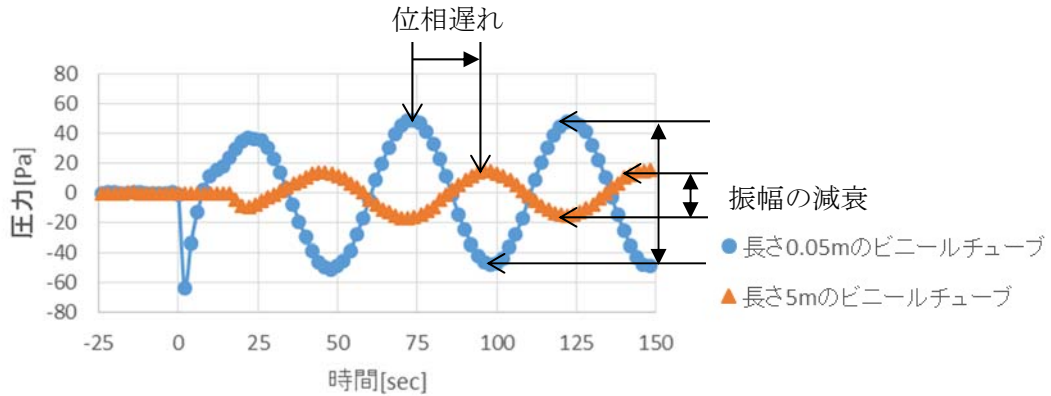


図 2-6 各ビニールチューブでの計測した圧力変動

周波数を変化させながら、位相差と振幅の減衰を計測した。結果を図 2-7、図 2-8 に示す。図 2-7 では各周波数で位相遅れに差があり、複数の周波数成分を持つ圧力変動は、同時に測定できないことが分かる。また、図 2-8 では周波数が高いほど減衰しやすく、伝播しづらいことが読み取れる。

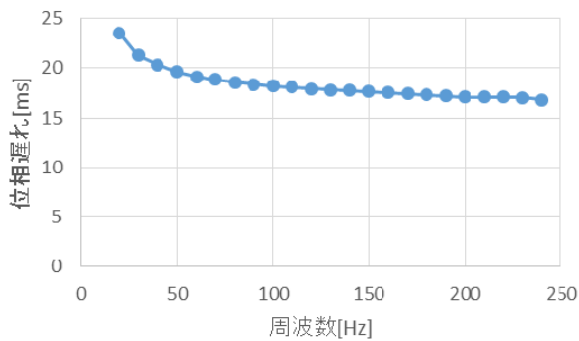


図 2-7 周波数ごとの遅れの変化

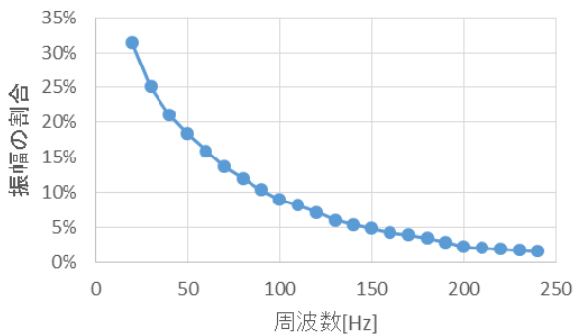


図 2-8 周波数ごとの 0.05mチューブの振幅
に対する 5mチューブの振幅の割合

3. 伝達関数による補正

スピーカー実験により、ビニールチューブ内を伝播する圧力変動には周波数特性があることが分かった。これを周波数伝達関数で書き表し、風洞実験で測定したデータの補正を行う。スピーカー実験で計測したデータは非線形であったが、処理を簡略化するため、式 (1) で表される一次近似の伝達関数を用いた。

$$G(s) = \frac{\omega_a}{s + \omega_a} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式 (1) の s を $j\omega$ (j : 虚数単位、 ω : 角周波数) に置き換えた式 (2) を、周波数伝達関数と呼び、 $|G(j\omega)|$ をゲイン、 $\angle G(j\omega)$ を位相とし、図 3-1、図 3-2 のボード線図を描くことで特性を見ることができる。また、ゲインは dB 単位 ($20 \log_{10} |G(j\omega)|$) で表し、位相は度数法で表している。

$$G(j\omega) = \frac{\omega_a}{j\omega + \omega_a} e^{-j\tau\omega} \quad (2)$$

ここで近似を行うため、カットオフ角周波数 ω_a と時定数 τ を設定する必要がある。カットオフ角周波数 ω_a とは、ゲインが -3dB となる角周波数である。よって、図 3-1 で示す実験データについて低周波側に外挿し、ゲインが -3dB となる角周波数を見つければよい。ゲインに関しては、式 (2) より近似式 (3) を得ることができるが、式 (2) の特性上、近似直線の傾きは -20dB/dec で一定となる。当該条件を満たしつつ、実験値を代表する近似直線となるように ω_a を調整し、決定した。

$$20 \log_{10} |G(j\omega)| = 20 \log_{10} \left\{ \omega_a (\omega_a^2 + \omega^2)^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

位相に関しては、式 (4) により近似できる。ここで、右辺第 1 項は周波数による位相遅れの特性を表し、右辺第 2 項はチューブの長さによる位相遅れを表している。時定数 τ は、チューブ内での圧力伝播の最短時間 (音速での伝播) を意味しているが、実験データにあわせて調整を行い決定した。

$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1} \left(-\frac{\omega}{\omega_a} \right) - \tau\omega \quad (4)$$

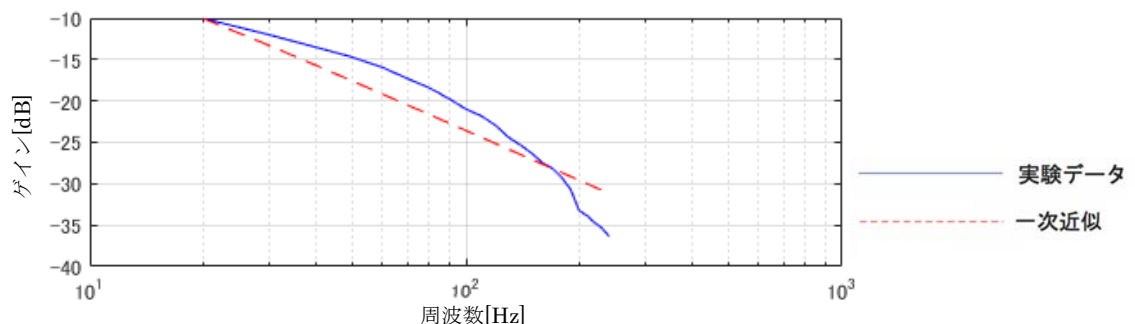


図 3-1 周波数に対する振幅の減衰 (ゲイン線図)

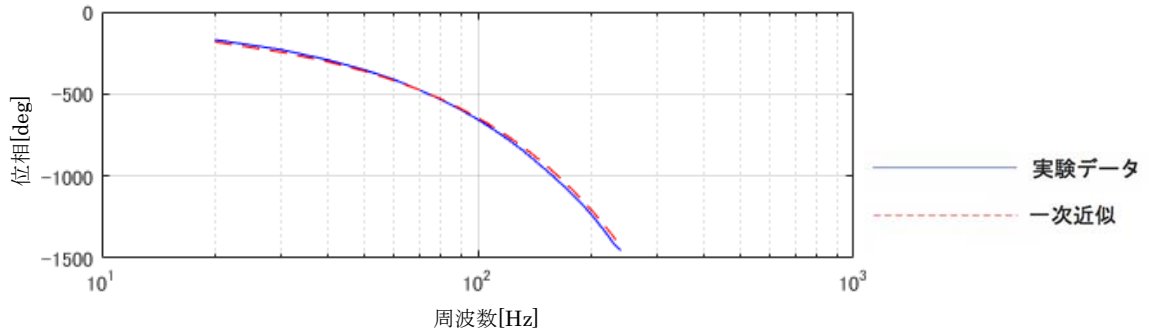


図 3-2 周波数に対する位相差（位相線図）

ここで、ビニールチューブの測定点側の圧力変動を X 、圧力計側の圧力変動を Y としたときの、伝達関数での処理を以下のように行う。

① $X \rightarrow \frac{\omega_a}{s+\omega_a} e^{-\tau s} \rightarrow Y$ とする。

② $X \rightarrow \frac{\omega_a}{s+\omega_a} \rightarrow \bar{Y}$ (\bar{Y} : Y の位相を τ だけずらしたもの)

③ 伝達関数の逆関数を考えると、

$$\bar{Y} \rightarrow \frac{s+\omega_a}{\omega_a} \rightarrow X$$

④ ここで、実験データを超える周波数は必要がないため、ローパスフィルタを用いる。

$$\bar{Y} \rightarrow \frac{s+\omega_a}{\omega_a} \frac{\omega_c}{s+\omega_c} \rightarrow \hat{X}$$

(\hat{X} : 補正した X 、 $\frac{\omega_c}{s+\omega_c}$: ローパスフィルタ、 ω_c : ローパスフィルタのカットオフ角周波数)

⑤ 最後に、 \hat{X} の位相を τ だけ戻す。

上記処理の実装には、数値計算ソフトである MATLAB の機能を利用した。図 3-3 に示すように、スピーカー実験における 5m チューブでの測定値に上記の処理を適用したところ、算出した推定値は、0.05m チューブの測定値を概ね再現することができた。推定値には高周波ノイズが含まれるものの、目的の周波数に対し、適切なローパスフィルタを用いればよく、有用な推定方法であると結論付けた。風洞試験における測定値、ならびに測定値に対して本手法を適用して得られた推定値を、図 3-4 に示す。

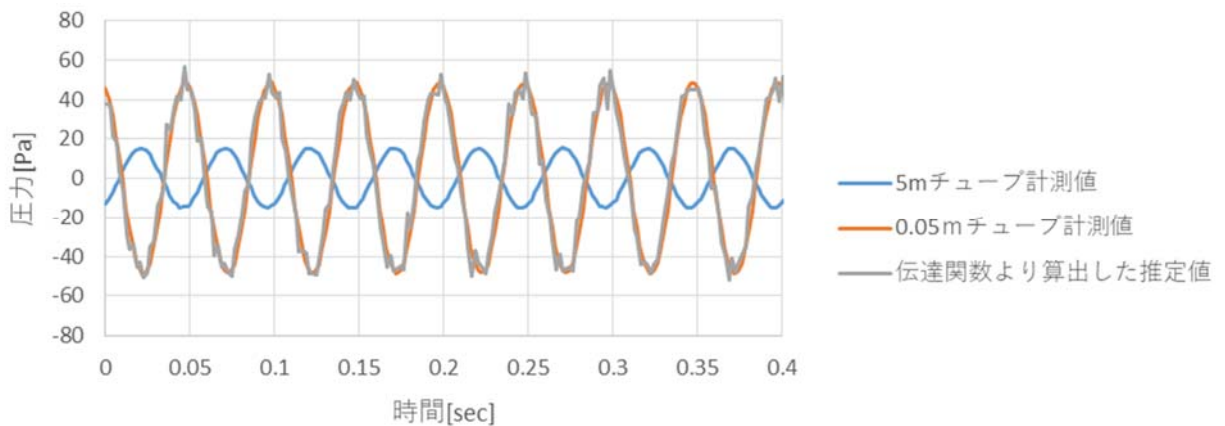


図 3-3 スピーカー実験の測定値と推定値

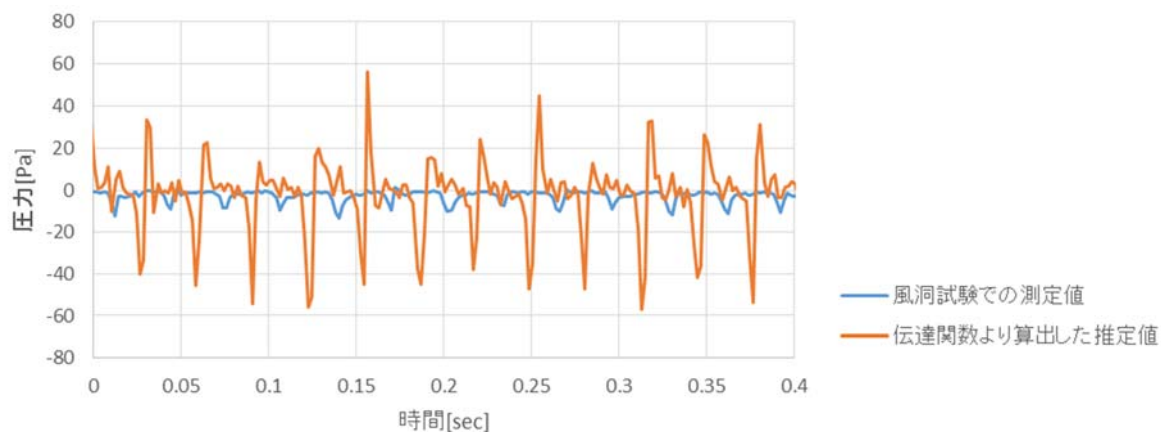


図 3-4 風洞試験の測定値と推定値

4. おわりに

風洞試験で測定した値から測定点での圧力変動を求めることができた。しかし、伝達関数を用いて求めた圧力は推定値に過ぎず、この値が正しいか確認するためには、シート型の圧力センサーや光ファイバーによる圧力センサーといった、チューブを使用せず、圧力変動を直接測定できる機器を用いた試験結果や、既知のモデルと照らし合わせる必要がある。今後これらの検証を行い、圧力変動を測定する方法としての有用性を検討していきたい。

参考文献

- [1] 杉江俊治：システム制御工学シリーズ 3 フィードバック制御入門、コロナ社（1999）

謝辞

今回の実験を行う機会を与えていただいた、自然エネルギー統合利用センター自然エネルギー複合利用分野の吉田茂雄教授、伝達関数の計算方法をご指導いただいた朱洪忠助教に感謝申し上げます。