

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1250 March 2012

風杯式風速計の応答特性と線形補償

藤田 勇
松崎 義孝
永井 紀彦

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 小型風車長期実証試験プラントにおける風況観測	4
3. 風杯式風速計のダイナミクス	7
4. 実際の変動風中での扱い	9
5. 周波数応答補償	12
6. まとめ	14
7. あとがき	14
謝辞	14
参考文献	14

Dynamic Response of Cup Anemometer and its Linear Compensation

Isamu FUJITA*

Yoshitaka MATSUZAKI**

Toshihiko NAGAI***

Synopsis

Since the global warming is a very serious issue, renewal energy sources is now intensively under research and development to substitute fossil fuel energy. Wind power generation is one of the promising options to contribute to this purpose. In 2009, Port and Airport Research Institute built a small wind power generation demonstration plant to monitor its long term performance. In the plant, wind has been measured and recorded with two different tools of an ultrasonic anemometer and a cup anemometer as well as wind power generation.

Wind data are fundamental and indispensable information for the design of wind power facilities. Cup anemometers are classical tools, but still now widely used practically for measuring wind. However, it should be noted that the cup anemometer has a mechanical rotation system which may cause its poor response behavior in the fluctuating wind.

In this report, frequency response performance of cup anemometer is studied. A linearized model for the cup anemometer is proposed for describing its power attenuation in the high frequency dynamics. The model is verified by numerical simulation and compared with real field wind data using spectrum analysis. A simple compensation method of cup anemometer is also proposed to improve its dynamic performance.

Key Words: Cup anemometer, Spectrum analysis, Frequency response, Linearized model, Compensator

* Head, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field

** Researcher, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field

*** Visiting Researcher

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5065 Fax : +81-46-844-0575 e-mail: fujita@pari.go.jp

風杯式風速計の応答特性と線形補償

藤田 勇*・松崎 義孝**・永井 紀彦***

要 旨

地球温暖化の観点から、化石燃料から自然再生エネルギーへの転換が叫ばれている。風力発電もその中の有力な候補として、実用化がはかられている。港湾空港技術研究所では2009年度に小型風車長期実証試験プラントを整備した。そこでは風車による発電性能及び、超音波式風速計と三杯式風速計による風の常時観測が行われている。

沿岸および洋上の精緻な風況把握は、風力エネルギーの有効活用のため、きわめて重要である。風杯式風速計は風況観測用の機器として広く用いられているが、機械的な回転系を有するために、変動する風に対する応答特性には注意が必要である。

本資料は、研究所構内に設置した超音波式および風杯式の風速計による同時計測結果をスペクトル解析により比較し、風杯式風速計の問題点とされる突風など高い周波数を持つ変動成分の再現性を検討し、風杯式風速計による観測結果の適切な補正方法を提案するものである。

キーワード：風杯式風速計，スペクトル解析，周波数特性，線形近似，補償器

* 沿岸環境研究領域 混相流体研究チームリーダー

** 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム研究官

*** 港湾空港技術研究所 客員研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5065 Fax：046-844-0575 e-mail:fujita@pari.go.jp

1. まえがき

地球温暖化対策の観点から、化石燃料から再生可能エネルギーへのシフトが叫ばれている。風力について言えば、陸上風力は、地形や障害物の影響を受けやすく、また景観問題や低周波騒音などに関連する諸々の制約があり、立地における適地を見つけ出すのが徐々に難しい状況になりつつある。技術的には高度なものが求められるが、より制約が少なく、エネルギー的にも有利な洋上風力への展開が求められる。

広大なEEZを有する日本にとっては海洋エネルギーの活用が重要であるが、これまで沿岸海域（特に外洋）における風・波・流れなどの海象データの整備は十分とは言い難かった。従って、洋上構造物の設計条件に不確実性が大きく、洋上風力エネルギーのポテンシャルの把握が困難となり、その重要性は認められつつも、海洋エネルギーの活用面で日本は西欧諸国に遅れをとっているのが現状である。

特に、洋上風の変動特性の把握は、着底式や浮体式の洋上風力発電施設の耐疲労設計などを行う際、重要な外力条件となるものであるが、現状では、洋上風の観測データが不足しているため、洋上風力発電システムの耐疲労設計法の確立は、今後の重要な技術開発課題として位置づけられる。

こうした流れを受けて、北九州沖合に洋上風況観測塔を建設し、さまざまな海面高度における超音波式・三杯式等の各種風速計による洋上風観測を行うといった取り組みがなされており¹⁾(図-1)、近いうち、洋上風の特性の解明が期待される場所である。こうした特定地点における詳細な観測の一方で、我が国の沿岸全域の洋上風の出現特性を明らかにするためには、GPS波浪計などの既存洋上風観測情報を有効に活用する必要がある。GPS波浪計は全国に多く配置され、波浪に加えて、風向と風速の観測をプロペラ式風向風速計により連続的に行っている。

風速観測の装置としては、近年では超音波風向風速計など、周波数応答特性の優れたものが普及しつつあるが、歴史的にはプロペラ式や風杯式など、風速を機械的な回転速度に変換する形式のものが多く用いられてきている。機械的な回転系を有する風速計の場合、定常風に対しては正しい値を示すものの、変動する風の場合、乱れ成分に対する追従性は、回転系の持つ慣性モーメントや摩擦の為に、真値からずれを生じる。特に変動周期の短い乱れ成分を測定しようとする場合には補正が必要となる。

港湾空港技術研究所は、2009年度に構内に小型風車長期実証試験プラントを建設した。そこでは1kWクラスの

小型風車を二台使い、風力発電の常時モニタリングを現在まで行っている。当施設においては風況観測用に超音波式風向風速計と三杯式風速計を整備しており、両者の風速、風向観測値の比較および、風車の発電量との相関等を測定できる体制となっている。

本稿では、本施設で得られた測定方法の異なる風況観測データを比較し、風杯式風速計の周波数応答特性を明らかにする。また、風杯式風速計を線形システムで近似して、周波数応答特性を改善する補償器を提案する。

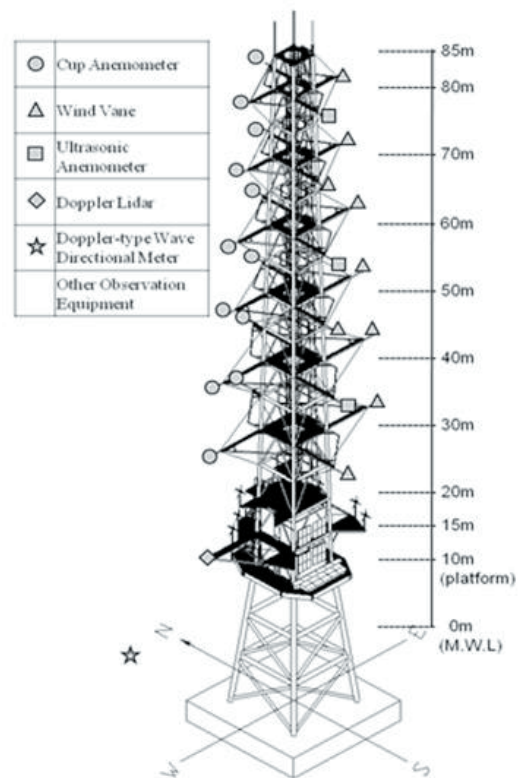


図-1 北九州沖に建設中の洋上風況観測塔の概要

2. 小型風車長期実証試験プラントにおける風況観測

港湾空港技術研究所は神奈川県横須賀市の長瀬、久里浜港の北東部に立地している。小型風車長期実証試験プラントは構内にあり、図-2に示すように、南西方向が久里浜港に向かって開けた位置に設置されている。発電用の風車は二台あり、ほぼ南北に10mの間隔で配置されている(図-3下)。二台の発電用風車の中央に風況観測用の塔があり、上部に超音波式風向風速計と三杯式風向風速計が取り付けられている(図-3上)。取り付け高さはGL面よ

り5,260mm, 二台の風速計の距離は南北方向に1,000mmである。

超音波式風速計および三杯式風速計は表-1に示すものを用いている。三杯式風速計の距離定数とは静止状態の風速計を急に風速 u m/sの風の中に置いたと仮定し、風速計の指示値が風速の63% ($=1-1/e$) になるのに要する時間を T とした場合の、 u と T の積であり、風杯式風速計の応答特性を決める最も基本的なパラメータである(意味については次章以降において説明する)。今回設置したブリード034SAに関しては、カタログ上に記載はなかったが、供給元に問い合わせたところ4.3m以下であるとの情報を得た。

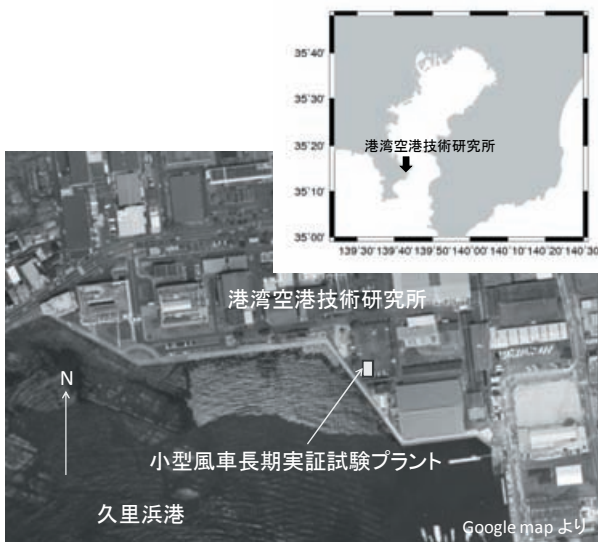


図-2 小型風車長期実証試験プラントの位置

表-1 小型風車長期実証試験プラント緒元

位置	
緯度経度	N35.227861,E139.720927
風車	
形式	水平軸ダウンウィンドプロペラ型 NIKKO NWG-1K
ブレード径	1980mm
出力	1kW(12m/sec時)
超音波式風向風速計	
型式	Young CYG-81000
測定範囲	0~40 m/s
分解能	0.01 m/s
精度	±1%rms (0~30m/s)
サンプル周波数	160Hz
出力周波数	4~32Hz
三杯式風向風速計	
型式	ブリード 034SA
測定範囲	0~60 m/s
起動風速	0.4 m/s
精度	±1.1%(10 m/s)
距離定数	4.3 m 以下



(風況観測塔上部)



図-3 発電用風車と風況観測塔
(東側より望む全景)

風速計のデータはアナログ値を 4-20mA の信号で伝送し、PC ベースの高速データアキュイジションユニット(横河電機 MX100) で収集した。

本稿の主題とはずれるが、施設の紹介の意味も兼ねて、少し紙面を割いて、小型風車長期実証試験プラントで得られるデータと解析の例を示す。図-4 は 2011 年 1 月から 10 月までの三杯式風速計によって得られた風速観測値から 10 分間平均風速の出現確率密度を求めたものである。平均風速は 3.55m/s であった。このような風場の中で、風車が実際にはどの程度の発電を行ったのかを図-5 に示す。横軸は図-4 同様風速であり、縦軸にはパワー密度をとっている。風のパワー密度は、風車ブレードの回転面内を単位時間に通過する空気の運動エネルギー(風速の三乗に比例)に図-4 の出現確率をかけたもので定義している。一方、風車のパワー密度は整流器後の電圧と電流、それに出現確率を掛けたものとして定義している。図中に示す Betz の限界は、薄い羽根車状の回転機械を用いて、流体の運動エネルギーから取り出すことのできる最大のエネルギーに関する理論限界(=0.593)をあてはめたものである。風の平均エネルギーはおおよそ 220W であるのに対して風車による平均発電エネルギー

は47Wという結果になった。エネルギーの変換効率からみた場合には、21%程度なので風力発電の典型例であるとも見ることができるが、公称出力1kWの風車を用いて平均47Wの発電ということでは、施設の効率という観点からは疑問である。風力発電は文字通り風のエネルギーを電気に変えるものであるから、最も重要なのは、大きなエネルギーを持つ風の中に置くこと、すなわち風況の良い場所を選んで設置することである。高所であること、また周辺の広い範囲に風を遮る障害物がないことなどが選択の基本指針になる。その意味では、洋上に規模の大型の風車を設置することが有望であるといえることができる。実際、永井等の計測²⁾によると、図-6に示すように本施設から比較的近い洋上として、南東沖合に2km強離れたアシカ島では平均して8m/sに近い風が得られており、本施設での平均風速3.55m/sとは大きな違いを見ることができる。

化石燃料の消費抑制の観点から風力発電を含めた自然エネルギーの開発が必要なことに疑う余地はない。しかし定格出力1kW以下といった小型風車の場合、個人需要家などが、かなりの割合で対象となると予想されるが、そのような場合、設置場所が限られ、期待する性能が得られないことが往々にして発生することが懸念される。大型風車の場合LCA（ライフサイクルアセスメント）が行われ、導入の効果が検証されることは常であるが、小型風車についても発電の実態に則してLCA的に個別に評価することが必要であると考えられる。

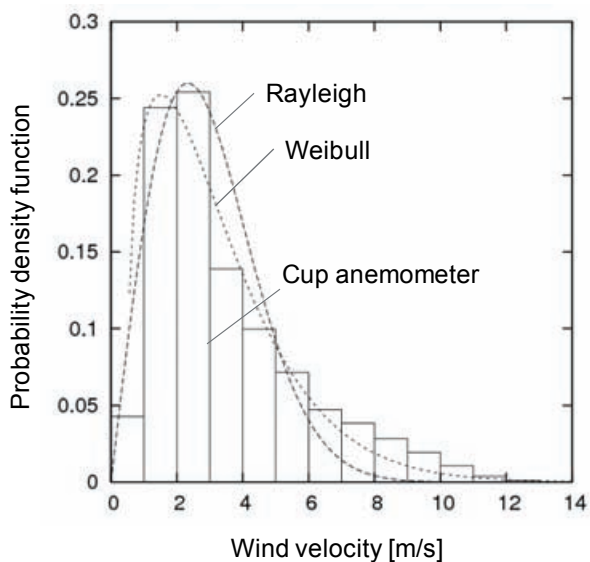


図-4 10分平均風の出現確率密度

施設の紹介に始まって、主題からは少し脱線したが、次

章からは本題に戻り、風杯式風速計の応答特性に関する議論を展開する。

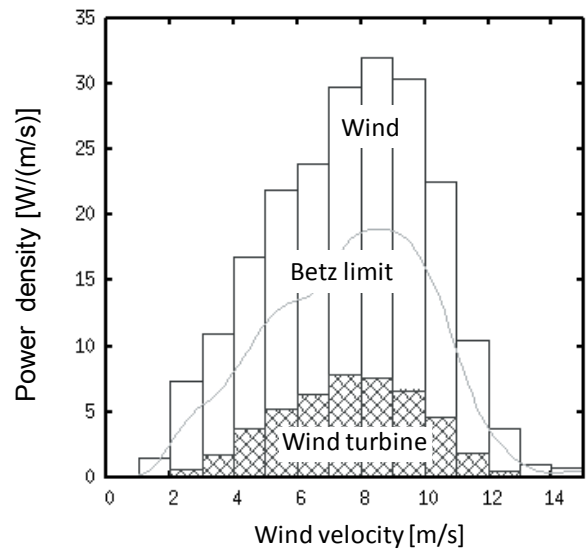


図-5 風と風車のパワー密度

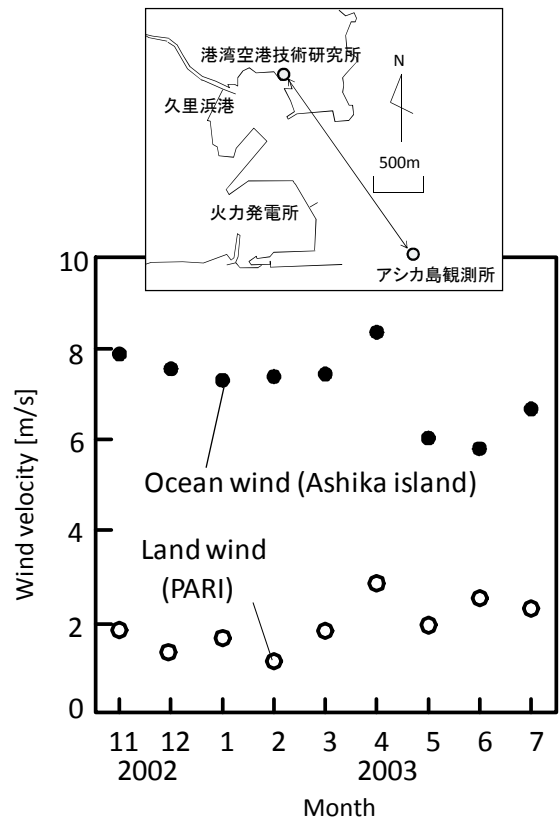


図-6 陸上風と洋上風の違い²⁾

3. 風杯式風速計のダイナミクス

風杯式風速計の変動風への応答特性を理解するために、ここでは、風杯式風速計の運動方程式を考える。

風杯式風速計は半球状の風杯（カップ）に受ける風圧を回転軸まわりの回転モーメントに変換し、軸の回転数より風速を算出する装置である。古くはロビンソン型といい、杯の数が四個のものが用いられたが、層流と乱流での平均速度に偏倚が生じるなどの問題があった。現在ではそれを解決するものとして風杯の数を三個にした三杯式風速計が広く用いられるようになってきている³⁾。本稿でも対象にした風杯式風速計は図-7に示すような杯が三個の三杯式風速計である。

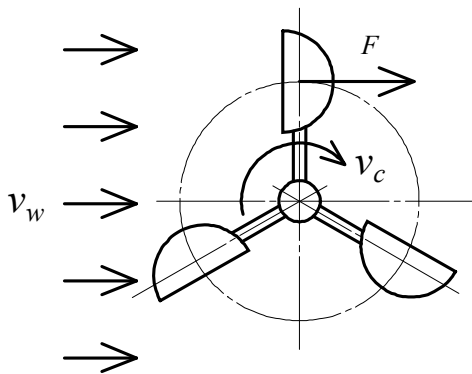


図-7 三杯式風速計

流体中に置かれた物体に働く力は一般的には流体と物体の相対速度の二乗に比例することを考え、三杯式風速計の運動方程式として

$$I \frac{dv_c}{dt} = C_d |v_w - v_c| (v_w - v_c) \quad (1)$$

を仮定する。ここで v_c は三杯式風速計による風速の指示値、 v_w は風速、 I は三杯式風速計の回転系の持つ慣性、 C_d は風によって生じる力に関する係数である。(1)式の左辺は三杯式風速計の回転系の持つ運動量の変化であり、右辺は回転させる力、あるいはモーメントである。風速が風速計の指示値より大きい場合には、風速計は加速され、逆に風速が小さい場合、風速計は減速するので、右辺 $v_w - v_c$ の項の一つは絶対値で評価している。(1)式を用いた場合、加速時と減速時で同じような応答特性を示すことになる。厳密にいうと、実際の風杯風速計では加速時の方が減速時より応答特性が良いことが知られており、(1)式とは異

なるが、本稿では簡略化した近似モデルとして(1)式を仮定することとする。

はじめに、距離定数の意味について(1)式をもとに考える。距離定数の定義は前章で与えたが、もう一度書くと、風速が0から v_w にステップ状に変化した時に風速計の指示値 v_c が v_w の $1-1/e (=0.63)$ になるまでの時間を t とした場合の $v_w t$ である。線形システムに慣れた者から見ると、これは一見不思議である。もし v_c と v_w が線形関係で仮に

$$\frac{dv_c}{dt} \propto (v_w - v_c) \quad (2)$$

であれば、これは一次遅れ系となり、 v_w のステップ入力に対する静定時間 t は v_w の大きさにかかわらず一定値となるはずである。

ところが、風速計の場合、応答の外力が(1)式のように速度差の自乗に比例するので、 t そのものが一定ではなく $v_w t$ が一定値となるのである。実際に(1)式を使って風速に関するステップ応答を計算したものを図-8に示す。横軸は風速と経過時間の積、縦軸は風杯式風速計の指示値を風速で除したものである。風速計の機械的な応答性の良いものから悪いものまで三種類 ($C_d/I=1.0, 0.5, 0.1$)、各々について風速を三種類 (0.1/1.0/10 m/sec) 変えて計算した結果を示している。風速計の機械的な応答性の違いで距離定数に違いが見られるが、風速によって変化していないことがわかる (各風速に対応する線三本は、ほとんど重なっている)。

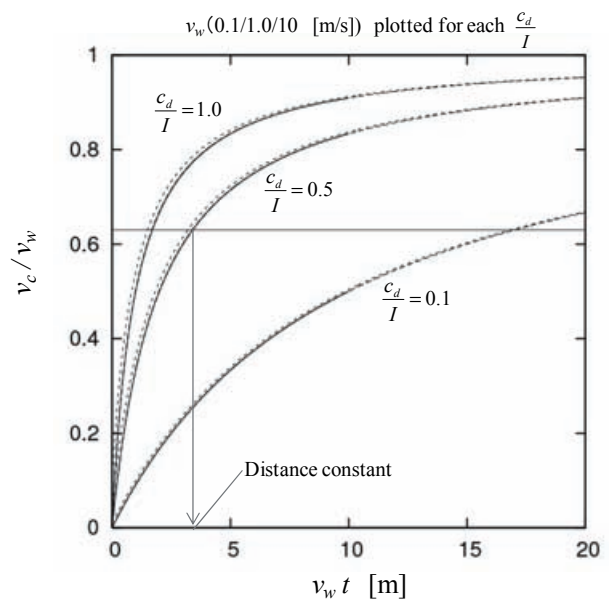


図-8 風杯式風速計のステップ応答

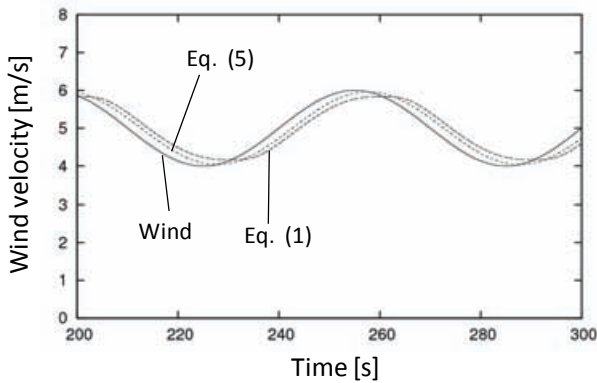


図-9 規則的な変動風に対する応答特性
(変動周期：60 秒)

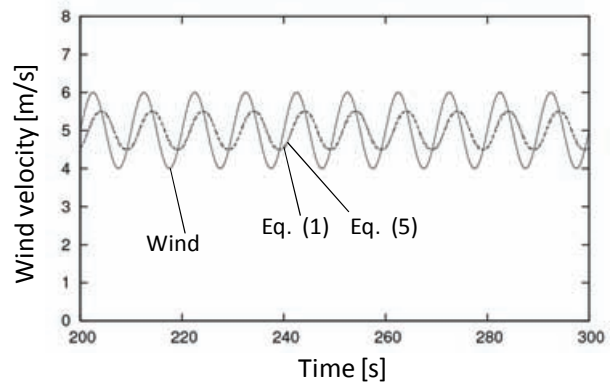


図-10 規則的な変動風に対する応答特性
(変動周期：10 秒)

厳密には距離定数は変化するものであるが、距離定数を一定とする一般的な風杯式風速計の扱いの範囲においては、(1)式はある程度妥当なものだということがわかる。

乱れを持った風況場における風速計の応答について(1)式をもとに考察する。ゆっくりした変動場においては、風杯式風速計の持つ慣性の影響は少なく、真の風に追従でき、 v_c は v_w にほぼ一致するであろうことは容易に想像できる。むしろ関心は比較的早い変動場における特性であり、この場合には風速計は風に追従できなくなり、位相が遅れるとともにゲインも小さくなることが予想される。そのようなケースでは風の変動に対して風速計の変動は相対的に小さく、(1)式の左辺の絶対値の項における v_c の効果は小さいとして、 v_w のみで表現することが可能であろう。この様に仮定すると、(1)式は線形化することが可能である。仮に風として定常成分に正弦波状の乱れ成分が重畳した

$$v_w = v_{w0} + \Delta v_w \sin(\omega t) \quad (3)$$

を考える。ここで、 v_{w0} は風の定常成分、 Δv_w は風の変動成分の振幅、 ω は風の変動の角振動数である。風の定常成分 v_{w0} に対応する三杯式風速計の指示値を v_{c0} として、(1)式右辺の絶対値の部分については両者がバランスしているものと仮定すると(1)式は線形な形で、

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{c_d}{I} \frac{2\Delta v_w}{\pi} (v_w - v_c) \quad (4)$$

と変形できる。係数にかかる $2/\pi$ は正弦波の正側半周期に

おける平均値 $(\frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega t) dt = \frac{2}{\pi})$ である。(4)式をラプラ

ス変換 ($F(s) = \int f(t)e^{-st} dt$) して、プラントの特性を $G(s) = V_c/V_w$ (但し、 V_c は三杯式風速計の指示値のラプラス変換、 V_w は真の風速のラプラス変換) と定義してみれば、 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{V_c}{V_w} = \frac{1}{1 + Ts} \quad (5-1)$$

となる。である T は時間の次元を持つ定数であり、

$$T = \left(\frac{c_d}{I} \frac{2\Delta v_w}{\pi} \right)^{-1} \quad [s] \quad (5-2)$$

で与えられる。(5)式は線形システム論的には、単純な一次遅れ系であることがわかる。

線形化したモデルの(5)式と、もとの運動方程式(1)式を比較する。風の変動成分の振幅 Δv_w を1.0m/sとして、周期が長い変動風と周期が短い変動風についての数値計算を行った。図-9は周期が60秒の揺らぎの場合で、図-10は周期が10秒の揺らぎを条件として与えた場合である。図には風の速度、(1)式による応答及び(5)式による応答が示してある。図-9のように変動の周期が長い場合には、(1)式と(5)式で若干の違いが見られるが、両者は風の変動をほぼ再現している。一方変動の周期が短い場合には、図-10に示すように(1)式と(5)式はともに、真の風に対して位相が遅れ、振幅も小さくなっている。位相の遅れとゲイン

の関係を見やすくするために、変動成分のみを抽出してリサージュ図形にしたものを図-11に示す。xを風の変動成分、yを(1)式あるいは(5)式から計算される各モデルの変動成分として、(x,y)をプロットしている。(x,y)の軌跡は楕円に近い形状として描かれる。ゲインはyの最大値、位相の遅れは楕円の長軸の傾きで評価でき、傾きが $\pi/4$ の時、位相遅れがゼロ、楕円の長軸の傾きがゼロの時、位相の遅れが $\pi/2$ になる。図からわかるように、長周期の変動に対しては、線形近似したモデルである(5)式と運動方程式モデルの(1)式で若干の違いがあるものの、変動成分が短くなるに従って両者の違いは小さくなっている。従って線形化モデルの(5)式は(1)式の高周波側での漸近的特性を正確に表すものであり、また低周波側の特性を含めるとは、近似として成り立つものであると解釈することができる。一次遅れ系の特徴は、図-12に示すようなボード線図にすると、より明らかになる。図の上がゲイン特性であり、下が位相特性を示している。ゲイン特性は $1/T$ rad/secを屈曲点として、それより低い周波数ではゲイン1（デシベル表現では0）、それより高い周波数では、 -20dB/decade の（周波数に反比例した）減衰を示す。位相的には低周波域では遅れを示さないが、 $1/T$ の屈曲点では -45° 、最終的な高周波領域では -90° の遅れを持つ。図-11でも、高周波の変動については楕円の長軸が水平になっており、これは位相遅れが -90° であることを示しており、図-12のボード線図の特性と一致する。

このように正弦波状に規則的に変動する風に対する風杯式風速計の応答特性は一次遅れ系として表現できることがわかった。その際、一次遅れ系の時定数 T は、風の変動成分の大きさから(5-2)式によって求められることを示した。こうした特性を利用して、次章では実際の変動風中での風杯式の応答特性について考察する。

4. 実際の変動風中での扱い

前章では、規則的に変化する風に対する風杯式風速計の応答に関して運動方程式と、それを線形化したモデルを用いて理論的に考察した。ここでは、実際の三杯式風速計と超音波式風速計による測定結果の比較を通して、三杯式風速計の周波数応答特性を考察する。

計測には表-1に示す超音波式風向風速計（Young CYG-81000）と三杯式風速計（プリード034SA）を用いた。計測インターバル Δt は両方とも1.0秒とした。

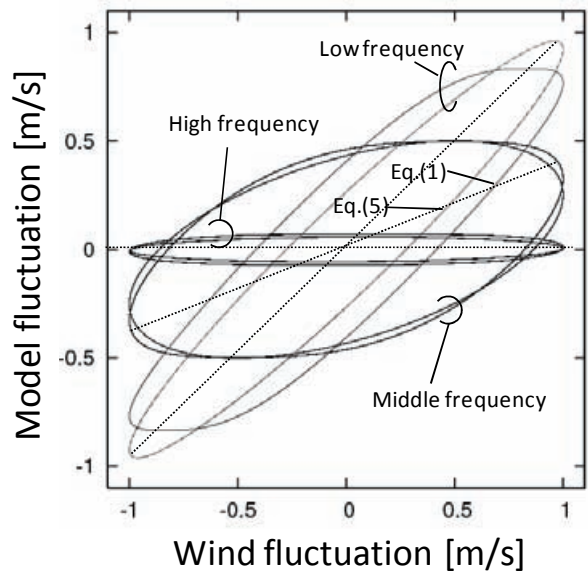


図-11 規則的な変動風に対する応答特性

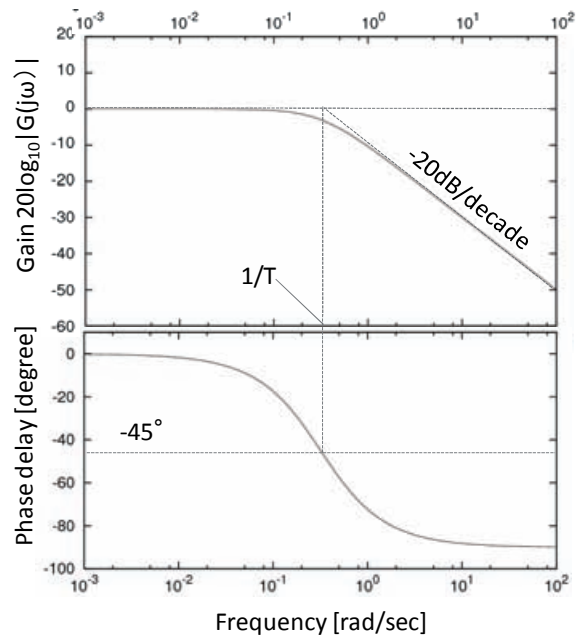


図-12 一次遅れ系のボード線図

図-13に超音波式風速計と三杯式風速計の時系列データの一例を示す。これは2011年4月27日の午前0時から60秒間のデータである。超音波式風速計に対して、三杯式風速計は、位相の遅れがあり、振幅も小さくなっていることが定性的にわかる。

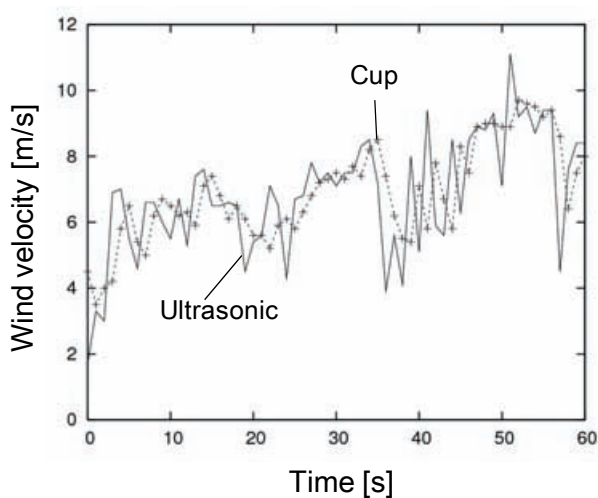


図-13 風速計の時系列データ

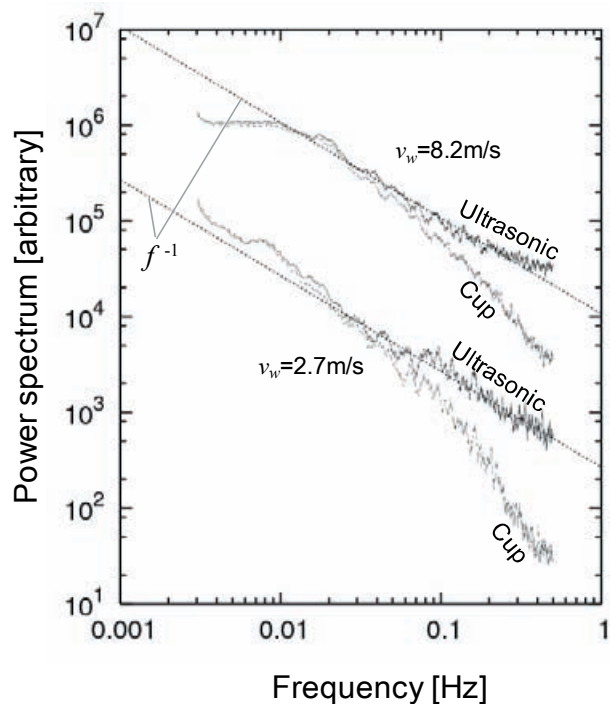


図-14 超音波式風速計と三杯式風速計における風のパワースペクトル

風の変動成分に対する応答特性を見る目的でスペクトル解析を行った。計測インターバル1秒で 2^{15} (=32,768)点(約9時間)のデータをFFTにかけ、実部と虚部の自乗和を計算した。パワースペクトルのばらつきを抑えるために隣接する100点について相乗平均をとった。結果を図-14に示す。平均風速が8.2m/s時と2.7m/s時の2ケースを示している。各風速時において上側が超音波式により計測された風速についてのパワースペクトルであり、下側が三杯式風速計によるものである。低周波領域におけるパワースペクトルは両者で違いは見られないものの、周波数が0.03~0.04Hz辺りから両者に差がみられるようになり、周波数が0.1Hz以上のところでの乖離は大きなものとなった。

超音波風速計におけるパワースペクトルの減衰傾向は周波数にほぼ反比例する結果となった。乱流の統計的な理論によると、ある程度高周波域の慣性小領域では、パワースペクトルは周波数の $-5/3$ 乗に従って減衰していくことが知られている。ここでの超音波式風速計によるパワースペクトル減衰傾向はほぼ -1 乗であるので、慣性小領域に至る過渡的な波数領域の減衰を捉えているものと考えられる。こうした自然風の変動成分の $1/f$ 減衰は泉宮等によるものとも一致している⁴⁾。

一方、三杯式風速計におけるパワースペクトルの減衰の周波数依存性は超音波式に比べて更に大きい。このようなパワーの減衰は、定性的には、三杯式風速計に時間遅れがあるため風の変動成分に追従できないことに原因があるが、定量的にもこの様な大きな減衰を再現できるものなのかを検討する。風の時系列データを入力にし、(1)式で示す非線形の運動方程式モデルおよび(5)式で示す線形化モデルの応答を数値計算し、得られるパワースペクトルを実プラントのものと比較する(図-15)。風の時系列データは真の値は不明であるが、ここでは超音波風速計による計測データを真値と仮定し、風の入力データとした。

線形化モデルにおいては風の変動振幅 Δv_w をパラメータとして含んでいるので、ランダムに変動する実際の風における変動振幅を見積もる必要がある。ここでは、 Δv_w を風の変動成分の代表的な統計値である標準偏差から評価することを試みる。実際の風の揺らぎはランダムな変動によるものであるが、ここでは簡略化したモデルとして、実際の風も正弦波状に揺らいでいると仮定する。(5)式の Δv_w は正弦波状の片振幅として定義しているので、正弦波における標準偏差 σ と Δv_w の関係である

$$\sigma^2 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \Delta v_w^2 \sin^2(\omega t) dt = \frac{\Delta v_w^2}{2}$$

標準偏差と揺らぎの振幅の関係は、

$$\Delta v_w = \sqrt{2}\sigma \quad (6)$$

と評価できる。(5-2)式に与えた一次遅れ系として見た場合の時定数は、実際の風に対して、

$$T = \left(\frac{c_d}{I} \frac{2\sqrt{2}\sigma}{\pi} \right)^{-1} \quad [\text{s}] \quad (7)$$

となる。従って風の揺らぎの標準偏差がわかれば、風杯式風速計の応答特性を線形系として近似できることになる。

風速の標準偏差は実測値から評価することができる。定性的には標準偏差は平均風速 v_w と相関があるので、例えば、

$$\sigma = \sum_i c_i v_w^i \quad (8)$$

といった評価が可能である。実際に測定した平均風速と標準偏差 σ の相関を図-16に示す。これは2011年1月1日から同年10月24日に至る期間に測定された1秒インターバルのデータをもとに、10分間平均風速からの風速の揺らぎを標準偏差としてプロットしたものである。本研究では、図中に示す線のように、(8)式において一次の項までをとり、直線的な相関として風速の標準偏差を評価した。図-15に示す手法による比較の結果を図-17に示す。運動方程式(1)によるモデルも線形化したモデル(5)も三杯式風速計のスペクトル減衰特性をうまく表現できていることがわかる。

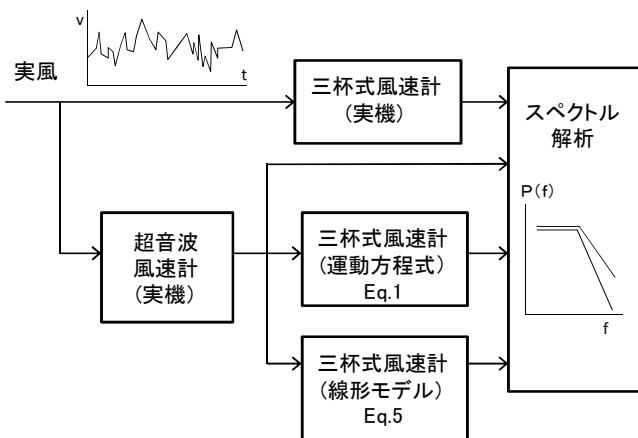


図-15 実際の風場における応答計算モデル

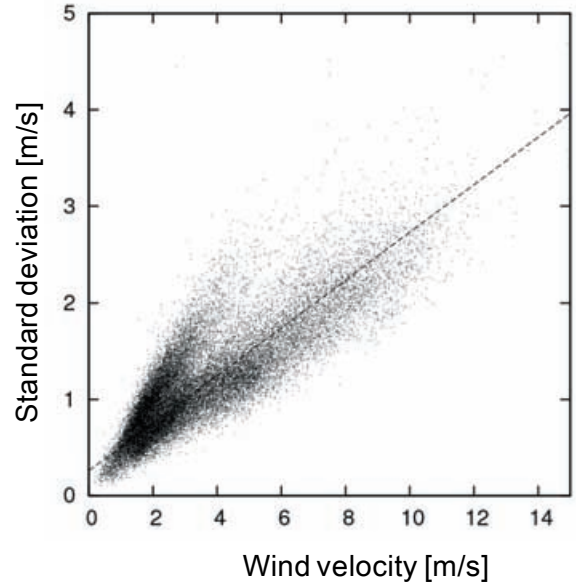


図-16 風速と風速の標準偏差の関係

図-18 は三杯式風速計のパワースペクトルを超音波式風速計のパワースペクトルで除したものであり、三杯式風速計単体の応答スペクトルを表している。図中の滑らかな線は(5)式の線形モデルによるもので、線形モデルが良い近似になっていることがわかる。以上のように、ランダムに変動する実際の風に対しても、揺らぎの大きさを標準偏差の形で評価することで、線形モデルは三杯式風速計の周波数応答をある程度表現できることがわかった。

このように線形システムとして近似できることのメリットは大きい。一般的な線形システムとして、 $\{\phi\}$ をシステムの状態変数、 $\{u\}$ を入力値とおいて、

$$\frac{d}{dt} \{\phi\} = A\{\phi\} + B\{u\} \quad (9)$$

を考えた場合、入力が状態変数に与える影響を記述する係数行列 B が特異でない限り、(9)式は $\{u\}$ について解くことができ、それは、

$$\{u\} = B^{-1} \left[\frac{d}{dt} \{\phi\} - A\{\phi\} \right] \quad (10)$$

で与えられる。風速計に当てはめると、これは、風杯式風速計の測定値 $\{\phi\}$ から、真の風 $\{u\}$ を線形計算により解くことができる、すなわち補償できることを示している。一方システムの特性が非線形の場合にはこれ程簡単ではない。風杯式風速計について非線形モデルを逆に解いて、周波数特性を改善する試みもなされているが⁵⁾、内容は複雑である。本研究では次章に示すように線形モデルに

基づいた補償法について検討する.

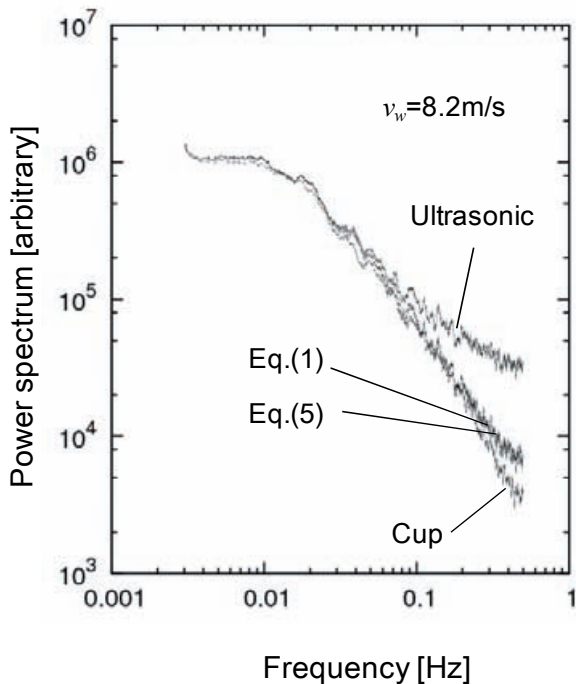


図-17 実際の風に対するモデルの応答特性

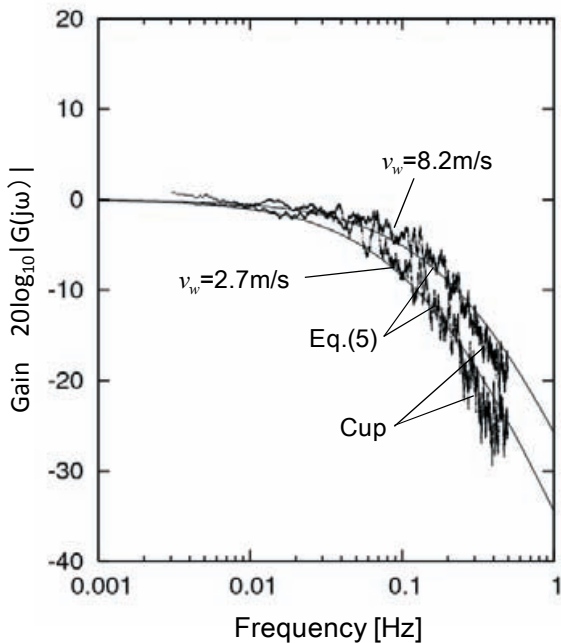


図-18 三杯式風速計単体の応答特性

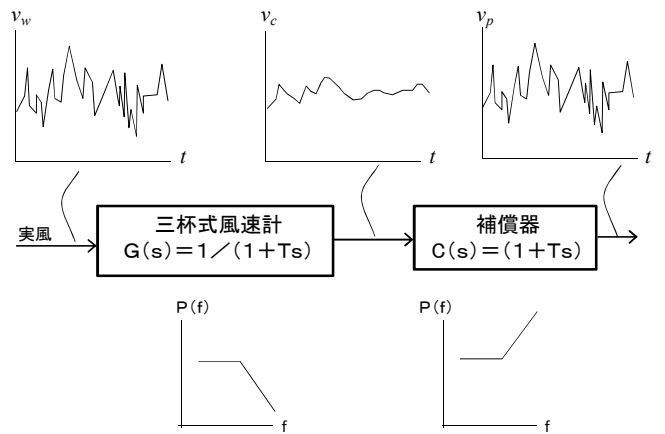


図-19 三杯式風速計の応答特性補償

5. 周波数応答補償

三杯式風速計プラント特性が(5)式に示すような線形の一次遅れ要素として近似できるとするならば、真の風は、図-19に示すように一次の進み要素、

$$C(s) = 1 + Ts \quad (11)$$

を加えることで再現できる可能性がある。ここで、 T は時定数であるが、(7)式で与えられるものと同一である。念のため(11)式を微分方程式として書くと、

$$v_p = v_c + T \frac{dv_c}{dt} \quad (12)$$

となる。ここで v_c は三杯式風速計の生の風速、 v_p は補償器の出力である。

図-13と同じデータを(11)あるいは(12)式により補正した時系列データを図-20に示す。(A)が超音波式風速計と補償を行っていない三杯式風速計の比較、(B)が超音波風速計と補償を行った三杯式風速計の比較および(C)が補償なしの三杯式風速計と補償を行った三杯式風速計の比較である。補償器を加えたことにより、風の変動に対する応答が改善されている。応答特性改善の効果は周波数領域で見るとより明瞭となる。図-21に補償器を加えた場合の三杯式風速計のパワースペクトルを示す。補償器を加えることで、パワーの減衰が改善され、超音波式風速計のパワースペクトルに近いものに改善されていることがわかる。

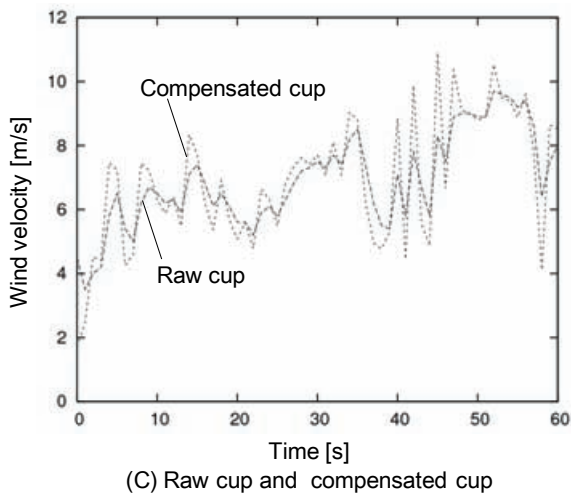
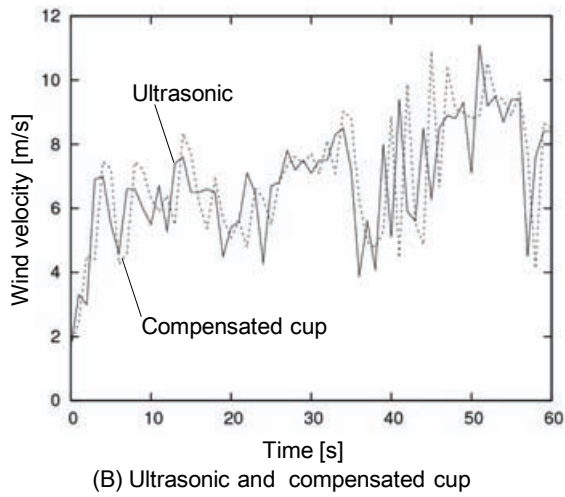
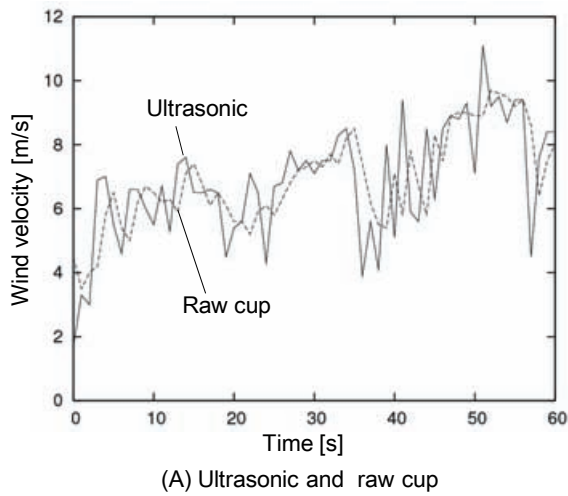


図-20 線形要素による補償効果 (時系列)

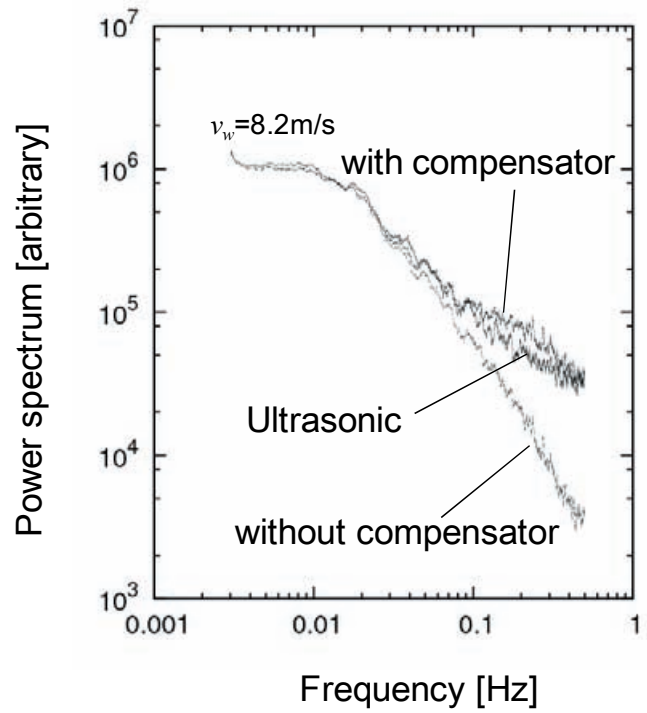


図-21 線形要素による補償効果 (パワースペクトル)

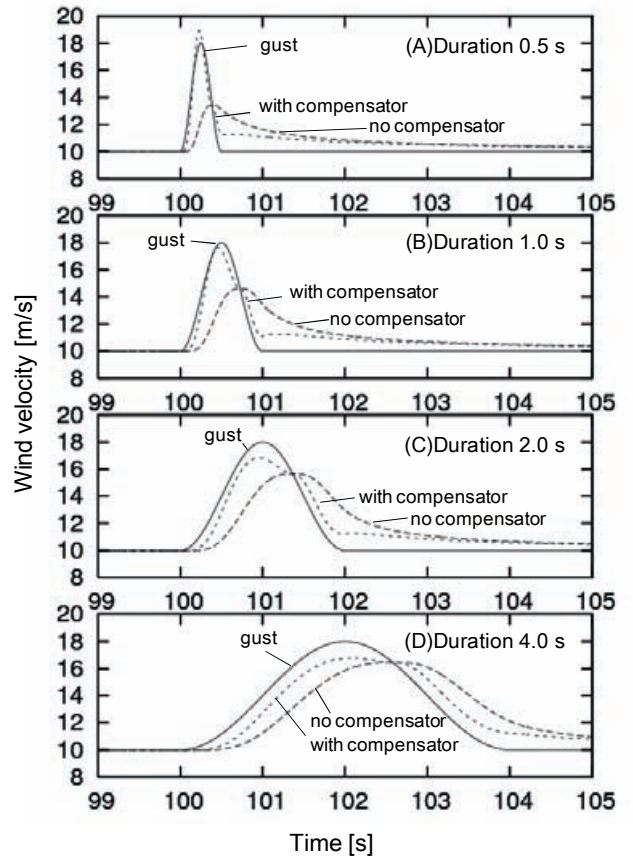


図-22 突風に対する効果

線形補償器により突風などに対する応答が改善できるかを見るために、突風に対する応答を数値計算し、補償器の効果を検討する。例として風速 10m/s の定常風に突発的に 1.8 倍の正弦波状の強風が発生した場合のシミュレーションを図-22 に示す。図-20 の実際の風の測定値を用いた補償では、計測間隔が 1 秒と大きいために、補償器の効果は限定されたものになっていた。ここでのシミュレーションは数値計算であるが、ほぼ連続系として扱っており、この場合には、補償器により位相とゲインともに応答特性が優れて改善されていることがわかる。特に時間の短い突風に関してその効果が大きいことがわかる。

以上のように三杯式風速計のダイナミクスを時定数が変化する線形一次遅れ系と見なすことにより、周波数応答特性を改善できることがわかった。

6. まとめ

本資料では港湾空港技術研究所内に設置されている小型風車長期実証試験プラントにおける風の実測データを用いて、風杯式風速計の変動風場における周波数応答特性を考察した。以下に主な内容をまとめる。

- 超音波式風速計と三杯式風速計による風況観測値を FFT により解析し、高周波域における三杯式風速計のパワースペクトルの減衰を求めた。
- 三杯式風速計のパワースペクトルの減衰特性を説明する為に、非線形の運動方程式と、線形化したモデルを用いて考察した。
- 三杯式風速計は回転系に慣性を有するため機構上、高い周波数成分の変動成分に対して追従性が悪くなるが、その特性は、規則的な変動風ならびに実際の変動風においても一次遅れ系として近似できることを明らかにした。
- 線形モデルに基づいた補償器を加えることで、三杯式風速計の応答特性を改善する手法を提案した。

7. あとがき

今回の検討は線形化近似を行い線形システム論の範疇で問題を扱った。手法としては、かなり古典的なものとも言えるが、線形系への帰着は工学の基本でもあり、また、本稿では理解しやすい単純なモデルから出発し、線

形化のプロセスと実際の変動風への応用への一連の流れを、考え方を中心に記述したので、線形システムの基礎的な知識があれば、直観的な理解につながるものである。その意味で小冊子ではあるが、解説あるいは技術資料として価値はあると思う。更にここで紹介した方法は風力発電装置自体の動特性の解析にも応用できる可能性がある。これについては、稿を改めて検討したいと思う。

本稿の主題は風速計の補償方法ということであり、このことからすれば蛇足ということになるが、簡単な施設紹介と洋上風力のメリットを示す意味で、二章において、小型風車の発電実績の一例を紹介した。今回のデータは単なる一つの例であり、一般化して断言はできないが、非常に風況の優れたところを除くと、おおむね小型風車の実力はこの程度のものなのではないかと想像している。一年ちょっとの期間とはいえ、実際小型風車を運転して解析した実感として言えば、風力発電はかなり条件を選ぶのである。小型風車の環境問題解決への貢献については、もちろん緒論あるだろうが、本資料で紹介した事例も議論する上での一つの材料になってくれればと思う。

いずれにせよ大筋としては、再生可能エネルギーの開発が重要視されており今後は更に加速されていくだろう。本稿が、風力発電における風況観測に若干でも役立てられることを期待しつつ稿を結ぶ。

(2011年11月9日受付)

謝辞

本研究を始めるきっかけには、(株)エコーの仲井圭二氏に計算して頂いた三杯式風速計のパワースペクトル図がある。それ自体は幾つかの点で、著者らの予想に反するものであった。本当に?、何故?、と考え始めたことから、次第に運動方程式、線形モデルでの近似、それに基づく周波数応答の改善方法へと論が展開していった。研究の動機づけという意味で氏の貢献に感謝するものである。

参考文献

- 1) 永井紀彦・川口浩二・吉村豊・吉岡健・谷川亮一・青木功(2011): 洋上風の乱れと波浪との同時生起性に関する実証的検討, 土木学会論文集B3, 第36回海洋開発シンポジウム, 講演No.155, (CD-ROM).
- 2) 永井紀彦・下迫健一郎・牛山泉・根本泰行・川西和昭・塚本泰弘(2005): 沿岸風力照明システムの計画・設計に関する検討-一点灯稼働率事前予測法の開発などについて-, 港湾空港技術研究所資料 No.1105, p.

23.

- 3) 小野木茂 (2009) : 地上風の測器,日本風工学会誌 Vol.34,No.3,pp.314-321.
- 4) 泉宮尊司・湯島智恵美・石橋邦彦(2007) : 変動風速による海面抵抗係数と風波の応答に関する研究, 海

岸工学論文集, Vol.54, pp.41-45.

- 5) 丹省一・本橋元・矢吹益久・宮崎孝雄(2007) : 三杯式風速計による瞬間最大風速算出の試み, 第29回風力エネルギー利用シンポジウム,pp.207-210.

港湾空港技術研究所資料 No.1250

2012.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています