

■ウインドウズ オブ Wind (風の窓)

風況よもやま話

—教科書に載っていない風の話あれこれ (第3話) —

株式会社ウインド・エナジー 谷垣 三之介

tel:046-875-9465 e-mail:tngk@pop16.odn.ne.jp

風速を計る計器にはいろいろなタイプのものがありますが、風力の分野では、カップ式、超音波式、プロペラ式、ドップラーソーダー、ドップラーライダーが主に使われています。この中で、風車の性能試験用では、ご存知のようにカップ式の風速計のみが風速計測計器として認められています。どの風速計を使っても良いじゃないか、と思いたくなりますが、風を計るということの中には、簡単にそう言うてしまう訳には行かない奥深い事情があります。

『風速』の定義

風洞試験では乱れの小さい均質な流れを作り出すことができますが、自然の風はそんなものではなく、常時変動しています。風は、大小様々のスケールの渦が合わさって移動しているものと見るができます。時間平均を取ると一方向に流れているように見えても、瞬間々々で見ると上下左右斜めと好き勝手な方向に動いています。瞬時に切り取った流れと時間平均した流れを図解した下図からその様相が理解できると思います。

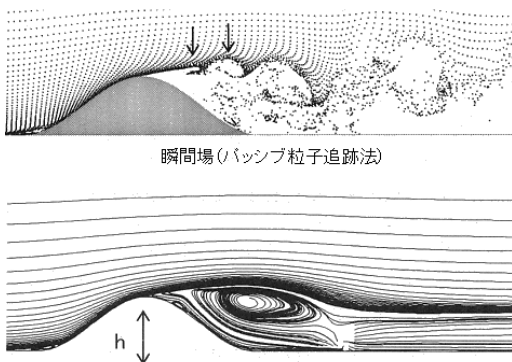


図1 瞬間流(上)と平均流(下)

(出典:内田孝紀 他:PCクラスターを用いたRIAM-COMPACTの実用化へ向けた検討,第25回記念風力エネルギーシンポジウム,H15.11;一部編集)

そこで、各瞬間の空気塊の動きを xyz 3 軸方向の成分に分解することにします。xy 面は水平面、z 軸は鉛直軸です。xyz 系は空間固定の座

標系ですが、風の主流方向を基準にした相対座標系 (uvw 系) で表現することもあります。u は主流方向の成分、v はこれに直角水平方向、w は垂直方向の成分です。

3次元超音波風速計は、各瞬間の風速の xyz すべての成分を計測します。従って、そのときに風が (3 軸方向の) どの方向に、どれだけの速度で動いているかを出すことができます。速度ベクトルの大きさは $\sqrt{(x^2+y^2+z^2)}$ で計算できます。

風速は通常 10 分平均値で論ずることが多いのですが、この場合の『平均』というのは何を平均したものでしょうか? 単純に考えると、速度ベクトルの大きさ $\sqrt{(x^2+y^2+z^2)}$ を平均、となりそうですが、実はそうではありません。通常は、水平成分だけを取り出したもの、つまり $\sqrt{(x^2+y^2)}$ を時間平均したものが使われているのです。

風力の世界で風速を計る目的は何でしょうか? 色々ありますが、最大の二つを上げると、

- ① 風車の発電性能予測のためのデータを得る
- ② 風車の強度設計のためのデータを得る

となりますね。①の場合を考えます。風車の発電出力は流入風速と 1 対 1 に対応しますが、この場合の流入風速は風速の水平成分だけを考えることとなります。風車の回転翼に風が斜めに入ってきた場合、風車の回転の原動力になるのは、翼回転面に流入する風の直角成分だけだということを考えれば、このことが理解できると思います。従って、風車の性能試験を実施す

流入風速を U、翼回転軸に対する流入風の傾斜角を θ とした場合、 $U \cdot \cos \theta$ が発電に有効な風速となります。厳密には $\cos \theta$ ではなく、 $\cos^2 \theta$ の方が実測値に良くあっているという報告もあります。この場合の θ は吹き上げ風の様な鉛直方向の傾斜を考えます。性能試験の場合、水平方向の傾斜流 (yaw error) は、ヨー制御があるということで、特に考慮しません。また、風車の回転軸は多少水平に対して角度を持たしていますが、これも、簡単のため無

る場合は、水平風速を計る風速計を使います。従って、サイトの事前評価のために行う風速計も水平風速を計る風速計でなければなりません。

つまり、一口に『風速』といっても、定義の仕方によっていろいろな『風速』があるということです。

RISO では $\sqrt{(x^2+y^2+z^2)}$ の時間平均をベクトル・スカラー風速、 $\sqrt{(x^2+y^2)}$ の時間平均を水平風速と名付けています。その他にも、主流風速、エネルギー等価風速といった定義もありますⁱⁱ。

余談になりますが、水平風速を考える場合にも、ベクトル平均で考えるか、スカラー平均で考えるか、という議論があります。風速の時間平均を計算するに当たって、瞬時の水平風速の絶対値 $\sqrt{(u^2+v^2)}$ を平均するのがスカラー平均、u 方向成分 (つまり、 $\sqrt{(u^2)}=u$ そのもの) だけを取り出して平均するのがベクトル平均になります。u 方向は対象とする平均化時間における平均風向と一致します。

図 2 はベクトル平均とスカラー平均の違いを計算した例です。黒線がスカラー平均風速、灰色がベクトル平均、白抜きの線が風向標準偏差です。風向標準偏差が大きくなると、スカラー平均とベクトル平均の差が開いてくるのが判ります。

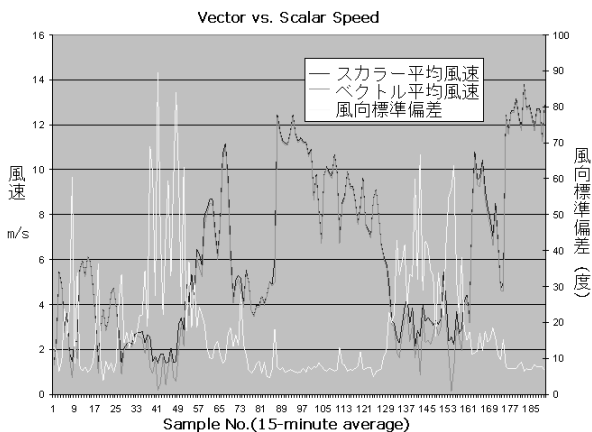


図 2 ベクトル平均風速とスカラー平均風速

(出典: Vector vs. Scalar Averaging of Wind Data, ART Sodar Home Page, <http://www.sodar.com/VectorScalar.htm;editted>)

視します。

ii vector scalar wind speed, horizontal wind speed, longitudinal wind speed, energy equivalent wind speed

後に出てくるドップラーソーダーの計測値は原理上ベクトル平均値を出力するそうです。カップ式風速計は何もしなければスカラー平均を出力しますから、両者の値を比較するときは、特に、風向変動の激しい複雑地形の場合は注意が必要でしょう。

超音波風速計は 3 軸成分を独立に把握できるので、演算処理によって、上記のどの風速でも表示することが出来ます。カップ式はどうでしょうか。カップは水平面内で回転しますから、計測するのは水平風速です。風速の鉛直成分は計測しません。というよりも計測不可能です。

カップ式風速計の問題点

その意味では、カップ式風速計は水平風速を計測する理想的な風速計ということも出来ます。が、しかし話はそう簡単ではありません。水平 (x y) 成分だけを拾ってくれば良いのですが、鉛直 (z) 成分も多少拾ってくるからです。しかも困ったことに、メーカーによって拾い方が違ってくるのです。このことは、風洞試験できちんと校正した風速計であっても、風の乱れのあるフィールドで計測してみると、メーカーによって出てくる値が違ってしまいうということの意味しています。

風車の性能試験を行うに当たってこのことが問題にされ始めたのはそれ程古い話ではなく、今から僅か 10 年程度前のことです。同じ風車でも、RISO で試験して作った性能曲線と DEWI で作った性能曲線が異なるということになってしまいます。それぞれ使用する風速計が異なるからです。このまま放っておく訳には行かないということで、欧州各国の研究機関が EC の予算措置を受け、共同して本格的な調査研究を開始しました。

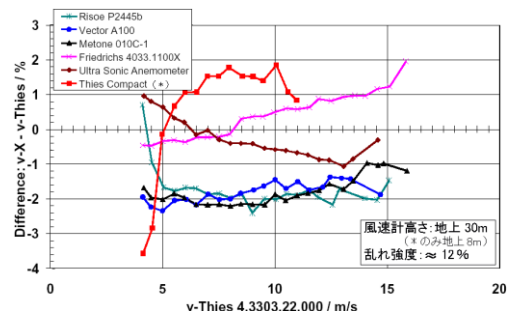


図 3 カップ式風速計の野外風速比較計測結果

(出典: A.Albers et al: Cup Anemometry in Wind Engineering, Struggle for Improvement, DEWI Magazine Nr.18, Feb 2001)

図3はDEWIがメーカーの異なった5種類のカップ式風速計（プラス超音波式1点）を野外計測で比較した結果を整理したものです。横軸は基準の風速計で計った風速、縦軸は各社の風速計と、基準風速計との計測値の差のパーセンテージです。

試験サイトは平坦な場所にあり、乱れ強度は概ね12%程度（日本に比べると非常に低い値です）、風速計の設置高さは地上30m（1点だけは8m）です。風速計は予め、同じ風洞を使ってキャリブレーションを済ませてあります。それにも拘らずメーカーによって最大2%程度の違いのあることが判りました。

風速の鉛直成分に対する応答

その原因についていろいろな検討がなされました。例えば、カップ式風速計にはoverspeeding（過回転）という問題があることが昔から判っています。風速が増加する場合と減少する場合でカップの応答速度に違いがあるため、風の乱れ（流れ方向の）が大きい場合、風速を過大に表示してしまうという問題です。



図4 カップ風速計の傾斜試験

（出展：T.F.Pedersen: Characterisation and Classification of RISO P2546 Cup Anemometer, ris-r-1364, Mar 2004）

しかし、詳細検討の結果、overspeedingの影響はマイナーであり、それよりもむしろ鉛直方向の風の乱れが大きく影響していることが判りました（平坦なところでも、時間平均では風速の鉛直成分はゼロになって水平流となっていますが、瞬間々々では上下方向に激しく変動する成分…乱れ…を持っています）。また、乱れが大きいほど、影響が大きくなることも判りました。同様の野外計測がECNの試験サイトでも行われましたが、ここでも同じ結果が得られました。

鉛直成分がどのように影響するかを見るために、風洞試験が行われました。通常のキャリブレーションでは風車の回転軸を鉛直に設置し、風が真っ直ぐカップに入るようにしますが、このテストでは、回転軸を傾斜させて、各社の風速計で読みがどのように変化するかを計測しました。その結果の一部を図5と図6に示します。図5はメーカーごと、図6は全部を一つに纏めたもので、風洞による違いも一緒に入れてあります。

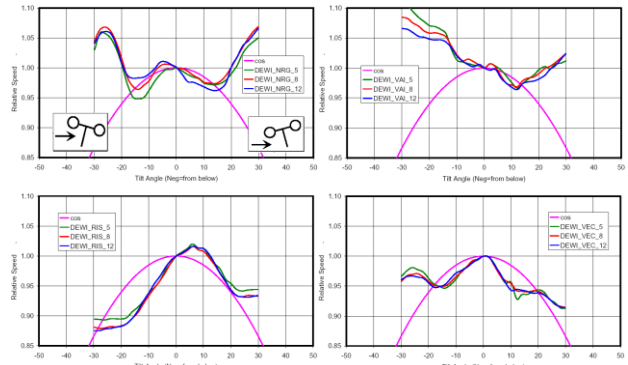


図5 カップ風速計の傾斜試験応答（機種ごと）

（出典：ACCUWIND-Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1, ris-r-1556, May 2006）

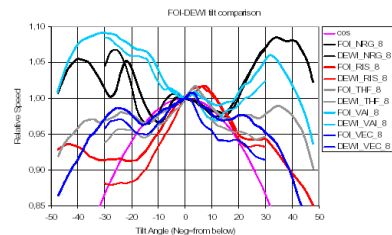


図6 カップ風速計の傾斜試験応答（総まとめ）

（出典：ACCUWIND_Methods for Classification of Cup Anemometers-ris-r-1555, May 2006）

横軸は、回転軸の傾斜角、縦軸は、実際の風洞風速に対する風速計の読みの比率です。図6では、風速計ごとに5m/s、8m/s、12m/sの3つの風速に対する特性を示しています。傾斜角を θ としたときの $\cos \theta$ のカーブを併せて記入してあります。『水平風速』を計測する理想的な風速計はこの $\cos \theta$ カーブどおりの特性を示す筈です。

図を見ると、どの風速計も理想的な水平風速の特性から外れており、しかも、メーカーによって随分と特性が異なっているのがわかります。また、カーブが左右対称になっていないことも注目されます。

特性の異なる原因は主として風速計の形状寸法にあると推定され、特にカップの形状が円錐形か、半球状かによる影響も大きいと見られています。これだけ特性が違っていると、フィールドで風速計によって計測結果が異なることも頷けます。

風速計の等級分類

原因がある程度はつきりしたことで、今後風車性能試験をどうするかが協議されました。どの試験機関で試験をしても同じ風車性能曲線が得られることが最終目標です。

性能試験に使う風速計はメーカー、機種を一つに限定してしまう、メーカー機種ごとの換算表を作る、などが検討されましたが、前者はメーカー間の利害調整が不可能、後者は、乱れが試験サイト、試験時期によって変わるため、不可能、という理由で却下、最終的には、風速計ごとに等級付け(classification)を行うことにより、その風速計の計測精度を明示しようということになり、その考え方、試験方法等が詳細に検討されました。

その結果を取り入れて改訂発行されたのが2005年12月版のIEC61400-12-1『発電用風車の性能試験法』です。この改訂版において初めて風速計のクラス(等級)という考え方が導入され、風車性能試験には1.7A級以上のクラスの風速計使用しなければならないと規定されました。

また、複雑地形で性能試験を行う場合には2.5B級あるいは1.7S級以上の風速計を用いることを推奨する、とされました。そして、等級の考え方や試験方法は付属書IおよびJとして詳細に記載されました。

風速計の等級の考え方はかなり取っ付き難いものですが、簡単に説明してみます。

風速計等級は数字とアルファベットの組み合わせ(例えば"1.7"と"A")で表現します。数字は、その風速計でサイト風速を計測した場合に予想される真値からのばらつきの最大値を表し、計測の「不確かさ」を表す指標となります。どの程度の計測精度が期待できるかがこの数字から判ります。

また、アルファベットは、試験サイトの地形複雑度のクラスを表します。A、B、Sの3クラ

スがあり、Aは「平坦地形」、Bは「複雑地形」、Sは特別に条件付けしたクラスです。

例えば、1.7A級の風速計は、「平坦地形」で使用した場合に、計測の「不確かさ」が、風速10m/sにおいて0.098m/s、15m/sでは0.012m/sとなります。

「不確かさ」は通常 1σ (σ は標準偏差)で表記しますから、このことは、計測結果の68%がほぼ0.1m/s以下の誤差範囲に収まっている、ということの意味です。この不確かさは、性能試験の際に考慮され、性能曲線全体の不確かさを算定する場合の計算に組み込むこととなります。

「平坦地形」、「複雑地形」については別途定義づけされており、また、それぞれの地形で想定される乱れ強度の範囲、乱れの構造、気温、空気密度、平均気流傾斜角が規定されています。因みに、「平坦地形」では乱れ強度が3%~15%(風速16m/sにおいて)、「複雑地形」では3%~18%(同前)の間で変動するものと想定されていますⁱⁱⁱ。

前に、鉛直方向の乱れが計測結果に大きく影響するといいましたが、通常の試験では、鉛直乱れは計測しません。その代わり主流方向の乱れ(通常「乱れ強度」といっている量)は計測しますので、これから推定することになっています。これを定めたのが乱れの構造で、 σ_u 、 σ_v 、 σ_w (それぞれ主流方向、横方向、垂直方向の風速標準偏差)の比を、平坦地形で、1:0.8:0.5、複雑地形で1:1:1と想定しています。これからわかるように、乱れ強度が同じ場合、鉛直方向の乱れは、複雑地形では平坦地形の倍の値となっていると考えます。

つぎに、個々の風速計の等級をどうやって決めるか、ということですが、風洞では自然風のランダムな乱れを再現することが出来ないため、風洞試験の結果だけから決めることは出来ません。そのため、風洞による応答特性試験(傾斜応答、回転トルク、軸摩擦トルク)の結果を使い、人工的に作り出した乱流時系列数値モデルによるシミュレーションで乱流時の応答を計算し、その結果をグラフにプロットして等級を決めるという、非常に複雑な手順が規定され

ⁱⁱⁱ この乱れ強度は当時の版のIEC61400-1『風車の安全要件』に併せてクラス分けをしたようです。現在の最新版との整合は取れていません。

ています。

等級検定の試み

ここまで詳細に規定すれば、これまで問題にしてきた点はすべて解消できた、と思いたいところですが、なかなかそうは簡単に行かないようです。

この規定に従ってうまく風速計の等級付けをすることが出来るかどうかを確かめるために、風力分野で主に使われている各国 5 社^{iv}の風速計を対称に調査研究が行われました。



図 7 カップ式風速計

(出典: ACCUWIND-Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1, ris-r-1556, May 2006)

風速計の応答特性を調べるための風洞試験は DEWI (ドイツ) と FOI (スウェーデン) の 2 機関で実施、これに 2 通りのカップ運動解析モデルを組み合わせて、全部で 5 通りの解析方法によって、各機種種の等級を決定しました。その結果を整理したのが図 8 です。

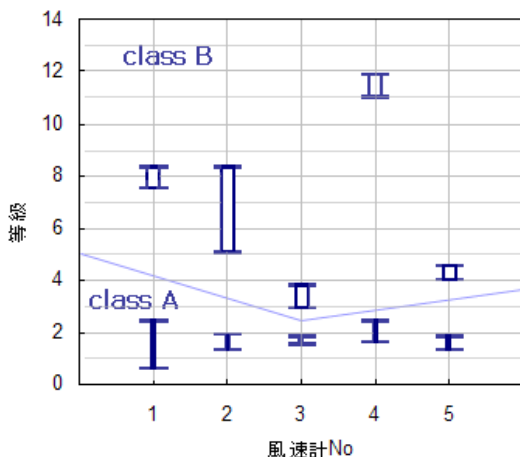


図 8 風速計等級

(出典: ACCUWIND-Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1, ris-r-1556, May 2006 より作成)

結果的には 1 機種にひとつの等級という訳に行かず、等級にバラツキが出てきました。その理由の一つとして、傾斜応答などの風洞試験の結果が、両機関で無視できない程度に食い違っていたことが指摘されています。また、カップ運動モデルによる違いもあります。

IEC61400-12-1 は風速計の試験をして等級付けをする試験機関の資格要件等は規定しておらず、主官庁の判断に任せていますから、このことは、テスト機関によって、付与される等級が異なってくる可能性のあることを示しており、余り好ましいことではありません。2005 年に改訂されたこの標準も、運用上まだまだ改訂の余地がある、ということのようです。

等級の値で言うと、機種によるばらつきは「平坦地形」(クラス A) のサイトに対しては、0.6 ~ 2.4 でした。不確かさで言うと概ね 0.15m/s 以下の値となります。

「複雑地形」(クラス B) サイトに対しては 2.5 ~ 11.9 となっています。特に成績の良かった 1 機種を除くとどれも 4.0 以上で、複雑地形のサイトでは、現在利用可能なカップ風速計では大雑把に言って 0.3m/s 以上の風速計測の不確かさを覚悟しておく必要がある、ということになります。

余談になりますが、図 7 に並べた風速計の写真で一つ気がついたことがあります。一番左側の風速計がお馴染みの NRG 社のものですが、他の 4 社 (すべて欧州) の製品が、ローター (カップ) と本体 (発電機) 部分を長い軸で隔離しているのに対して、NRG 社のものは、長い首がなく、本体に直接ローターがくっ付いていることです。

長い首を設けている理由は、どうしても大きくならざるを得ない本体部分は風を乱す原因になるので、出来るだけ風を捉える部分 (カップ) から隔離したい、ということですが、NRG 社はこの考えをとっていないようです。その代わりに、本体と支持ブームの間に円錐状のゴムカバー (ブーツ) をはかせて、流れがスムーズになるような配慮をしています。

風況観測をしているサイトで偶にこのブーツを履かせないで、本体とブームのつなぎ部分がむき出しになっているのを見かけることがあります。現場の取り付け作業中に紛失してそのままにしてしまうのでしょうか、余り好ましい

^{iv} NRG、Thies、RISO、Vector、Vaisala

ことではありません。

MEASNET

上に述べた鉛直方向の乱れに対する応答性の問題以前に、風速計のキャリブレーションにおける風洞試験の信頼性についての問題提起がなされました。

カップ式風速計は、カップの回転数が風速に（ほぼ厳密に）比例することから、回転数を計ってこれを風速に換算します。換算式は $y=ax+b$ （ y ：風速、 x ：カップ回転数）の形となり、これを伝達関数（transfer function）といいます。多少の誤差を許容する場合は、量産品の品質検査統計値としてメーカーの提供する伝達関数の係数 a 、 b を使えばよいわけですが、工業生産品である限り、製品ごとのばらつきは必ず出てくるため、厳密に考えたい場合には、風速計ごとに第三者機関に依頼して、風洞試験により伝達関数を出してもらうこととなります。



ところがあるとき、同じ機種について出された伝達係数が、試験機関によって数%のオーダーで違っている、という事例が複数出てきたのです。風洞の大きさ、風速計のセッティングの仕方等によって結果が違って来たようです。キャリブレーションの不確かさは通常 1%以下と謳っていますから、数%の違いというのは無視できません。

これでは困るということで、風洞試験方法を統一しようということになりました。その結果 RISO（デンマーク）、DEWI（ドイツ）、ECN（オランダ）、WINDTEST（ドイツ）、CRES（ギリシャ）、CIEMAT（スペイン）といった欧州を代表する研究所、検査機関が集まって MEASNET（Measuring Network of Wind Energy Institutes）というネットワーク機関を結成、風速計だけでなく風車性能試験、風車騒音試験などについても統一した試験法案を作ろうということになりました。この結果風速計の風洞試験法案（Cup Anemometer Calibration Procedure）が 1997 年に発行されました。

ただし、風洞試験機関が風速計のキャリブレーションを行って MEASNET 規格準拠の校正証書を発行できるためには、予め MEASNET の厳格な審査に合格している必要があります。2008 年 5 月現在では 7 機関がその資格を付与されています。

ただ、MEASNET で方法が統一されたといっても、

試験機関による違いをゼロにするのは難しいようで、ラウンドロビンテストの結果では 1% 程度の差が出ているようです^v。それでも MEASNET 以前では 6%の幅があったと言いますから、非常に大きな前進ということが出来ます。

  CUP ANEMOMETER CALIBRATION PROCEDURE Version 1 September 1997		List of Contents 1 FOREWORD 3 2 INTRODUCTION 3 3 GENERAL REQUIREMENTS 3 4 REQUIREMENTS OF THE WIND TUNNEL 4 5 INSTRUMENTATION/CALIBRATION SET-UP REQUIREMENTS 5 6 MEASUREMENT PROCEDURE 5 7 DATA ANALYSIS 7 8 UNCERTAINTY ANALYSIS 7 9 GENERAL UNCERTAINTY THEORY 7 10 REPORTING FORMAT 8 11 UNCERTAINTY CALCULATION 8 11.1 Evaluation of Symbols 8 11.2 Overview 11 11.3 General Uncertainty Theory According to ISO-Guide 11 11.4 Uncertainty Theory Applied to Anemometer Calibration 12 11.5 Basics of Regression Analysis 15 11.6 Symbols 16 12 EXAMPLE OF A CALIBRATION REPORT 25 13 REFERENCES 26
--	--	--

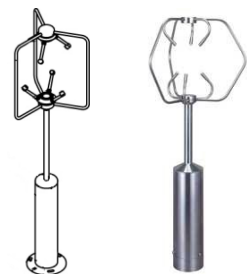
MEASNET: Cup Anemometer Calibration Procedure, Version 1 Page 2/20

なお、この試験法案が必ずしも全風力関係者のコンセンサスを得ているわけではありません。

例えば、我が国で風速計が一番良く用いられている NRG 社は MEASNET で規定している試験風速範囲 4m/s~16m/s の妥当性に異論を唱えており、風車のカットアウト風速までをカバーする 4m/s~26m/s の範囲で試験すべきだとしています。全風速計に校正証書（IEC/ISO, ECN, ASTM 準拠）を付ける事を標準としながらも、MEASNET 準拠の校正証書を付与することについては対応に否定的です。

超音波風速計

超音波風速計は、超音波パルスを発生して、受信器間の到達時間を計測し、風速と音速の関係を利用して、これを演算処理して風速に変換するものです。



パルス間隔は 100Hz オーダーにすることが可能で、しかも距離定数が原理的にゼロですから、カップ式に比べて、高速サンプリングが可能で、高周波の風の乱れを計測することが出来ます。

^v ACCUWIND-Methods for Classification of Cup Anemometers_ris_r_1555, p-52

風力の分野では 10Hz~40Hz 程度のものを使うことが多いようです^{vi}。

また、図のように 3 組の受発信器の角度をつけて配置すれば 3 軸方向の風速成分が計測できますから、風の乱れの計測には最適の計測器といえます。

可動部分がないことから故障も少なく、氷結・凍結対策も比較的簡単に出来る利点を取って、ナセル上に取り付けられることも多くなっています。

反面、センサー構造自体が流れを乱す要因となる (blocking) こと、受発信器の支持構造物 (柱) のウエーク (後流) の影響を受け、しかもこれが流入角によって変化すること、振動や温度変化による受発信器間距離の変化、などの計測精度に影響をおよぼす欠点もあります。

図 9 に 2 種類の超音波風速計の風洞試験の結果を示します。風の流入角によって風速計の読みがどのように変化するかを調べたものです。横軸は風に対する風速計の角度、縦軸は、実風速と風速計計測値の比率を示します。A と B は同じ風速計ですが、別の風洞で試験したもの、それぞれ 2 本の線があるのは、風速による計測値の幅を示します。C は別のメーカーのもので (C の風速の扱いは不明)。それぞれ、支持構造のウエークの影響が 120 度ごとに顕著に出ていることが判ります。

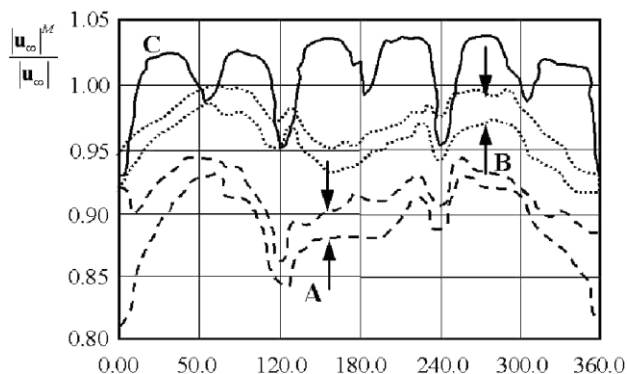


図 9 超音波風速計に及ぼす流入角の影響

(出典:T.F.Pedersen et al.: Evaluation and Classification of Cup and Sonic Anemometry, ECN-RX-06-061, Mar.2006)

このような大きな計測値の変動も、予め特性を掴んでおいて、それをキャンセルするように

^{vi} カップ式では 1~2Hz 程度が限界となっています。これは回転数を周波数信号に変え、これを風速に変換する、という信号変換方式の制約から来ています。

風速の計算回路に組み込んでおけば、かなりの程度少なくすることが出来る筈ですが、それでも、ある程度の計測の不確かさは残ります。

超音波風速計の機種による違いや、環境要素 (風速、乱れ、気温、日射、空気密度、湿度、降雨) の影響を確かめるため、2004 年から 2 年間にわたって、ECN のテストサイトで 6 種類の超音波風速計を使って野外計測が行われました。その結果、機種によって、測定値に 1%~3% の差があることが報告されています。



図 10 ECN の試験装置

(出典:ACCUWIND Task 2. Improve the Accuracy of Sonic Anemometers Final Report, Madrid, June 2006)

カップ式の機種ごとの差とそれ程差異がないことがわかったわけで、カップ式と並んで風車性能試験用の計器として認めてよいのではないかと、という雰囲気も出てきています。

しかし、この場合の一番の問題は、風速計の等級付けをどうするかという問題です。

それ以前に、風力用としての計器のキャリブレーション方法も確立されていません。カップ式の場合は、入力を流入風速、出力をカップの回転数とした入出力の関係だけを求めればよかったですのですが、超音波式の場合は、入力として風の流入角を入力に加える必要があります。しかも、出力は 3 軸成分と 3 つに増えます。しかも、その関係がカップ式の様にリニアではないため、キャリブレーションの結果をどう表現するか、という問題もあります。

さらに、等級付けをするとすると、これだけでなく、カップ式のように、計器の傾き (鉛直方向) に対する応答性なども検討要素に入ります。また、色々な影響因子に対して、どの

ような応答性を示すか、ということもまだ良く判っていない、という指摘もされています。従ってもし、これを本格的に検討しよう、ということになったとしても、関係者全員が合意できる成案が得られるまでには、まだまだ時間がかかるように思えます。

ポイント計測とボリューム計測の違い – ドップラーソーダーとライダー

ソーダーもライダーもともにもともとは気象観測用に km オーダーの上空まで計測するために開発されたものですが、風力産業の発展とともに、200m~500m 程度まで最高観測高さを絞ったものが現れて来ました。どちらもリモートセンシング機器であるというところに特徴があります。

カップ式、超音波式、プロペラ式はすべて、計測対象（風）の中に計器を置いています。つまり、計器のある場所のピンポイントの風速を計る計器といえます。

これに対し、ドップラーソーダーとライダーは、計器の置いてある場所と計測点の位置が異なります。音波や電磁波（光）の空気中の浮遊粒子（塵、水滴、エアロゾル等）からの反射波のドップラー効果を利用しており、通常の使い方（下から上を向いて計る；ビームの発射方向が主流平面に直交）では、原理上、ピンポイント計測は不可能で、上下方向水平方向に幅を持った空間の平均値を計ることになります。

例えば、Q 社のライダーは鉛直に対して 30 度の方向にレーザービームを発射し、これを 360 度回転させ、走査円上で 1 周当たり 50 点のデータを取得、3 周分のデータを平均して一つの観測風速とします。

1 周当たりの走査時間は約 1 秒ですから、1 点のデータを取るに必要な時間は約 3 秒です。また、走査円の直径は、例えば地上 60m の高さに焦点を合わせた場合は約 90m となります。つまり、計っているのは、計測目標点を中心とした直径 90m のドーナツ状の空間の平均風速、ということになります。

平坦地形で、水平面内の風速場がある程度一様と考えられる場合は、ライダー計測の結果と、カップ式などのピンポイント風速計の読みに大きな違いは出ないものと思われそうですが、地形が複雑で、平面的に速度分布があるような場合

は、ドーナツ空間内の速度が場所によって変わりますから、ピンポイント風速計の読みとの間に食い違いが出てくることを避けることは出来ません。

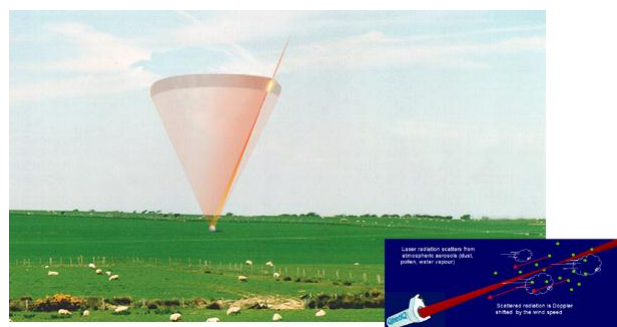


図 11 ライダーの測定原理

(出典: Ole Rathmann et al: Wind Profile Measurements over a Forest with Lidar, proc.ewec2008, apr 2008)

ソーダーやライダーで風の乱れを計る場合も注意が必要です。基本的に広い空間をスキャンしてその平均を取るわけですから、ピンポイントとの乱れとは物理的に異なる量となるわけで、結果的に等価なものを見出すためにはどのような条件が必要となるのか、ケースバイケースの慎重な検討が要求されます。

上に述べたライダーの使用法は、主流風向に直交してビームを発射させる方法ですが、主流方向にビームを発射すると、ピンポイント計測が可能となります。このことを利用すれば、ビームを面上に走査することにより、面としての風速場を捉えることが可能になります。複雑な計算アルゴリズムが必要となりますが、例えば km 単位のウインドファーム予定地のハブ高風速の平面分布を観測することも原理的には可能で、このような研究も進行中です。

ソーダーとライダーの利害得失

波媒体として、ソーダーは音響を使い、ライダーはレーザー光を使います。この違いが、両者の違いを大きく特徴付けます。

ソーダーの利点は、何といたってもライダーに比べて安価であるということです。反面、ソーダーの短所としては以下のような点があります。

- ▶ 音響を発する→近隣住民にとっては騒音
- ▶ 自然音による影響を受ける (SN 比低下)
風切り音、エンジン音、鳥の鳴き声等々
- ▶ 反射音による影響を受ける (SN 比低下) ため、

- 構造物の近くは避ける必要がある
- ▶ 降雨時、降雪時の計測は不可能に近い (SN 比劣化)
 - ▶ ライダーに比べてサンプリング周期が長い
 - ▶ 鉛直解像度は 10m~20m 程度
 - ▶ 消費電力は 100W 程度 (メーカー、機種によって幅あり)

これに対し、ライダーの特徴は次のようになります。

- ▶ 近隣に対する影響は考える必要がない。発射するレーザー光は目に入っても支障のないエネルギーのものを使う。
- ▶ 雲による反射光の影響を受ける(補正可能)。
- ▶ 近くに構造物がある場合、走査円錐内にあればその分の計測データが取れないので、別途配慮が必要
- ▶ 降雨、降雪、濃霧の影響を受けるが、ソーダーに比べると軽微
- ▶ 電源は 50W 程度 (メーカー、機種によって幅あり)

計測の精度もライダーの方が優れているようです。カップ式風速計との同時計測データを見ると、ソーダーに比べてライダーのバラツキははるかに小さく、ライダーに対して今熱い注目の目が向けられていることが良く理解できます。

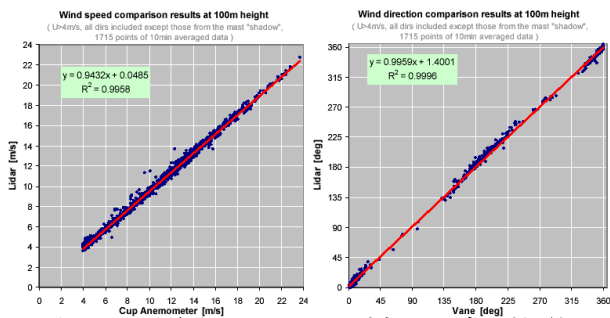


図 12 野外観測におけるカップ式とライダー計測値

(出典: D. Foussekis et al: Wind Profile Measurements using a LIDAR and a 100m Mast, proc.ewec2007)

風車の大型化に伴って、マスト-カップ風速計の組み合わせによる風車性能試験における風速計測法に替わりうる方法として、ソーダー、ライダーの可能性に目が向けられています。IEC61400-12-1 の次期改定作業項目の候補にもこの項目が提案されており、実作業に入っていくものと思われます。

これに先立ってソーダーについては、その特性やキャリブレーションをどうするか等について、欧州の研究機関が共同で本格的な調査研究をしており、2005年に報告書に纏められています。これについてはまた機会を改めて書きたいと思います。

プロペラ式 (飛行機型) 風速計

プロペラ式 (飛行機型) 風速計は、気象庁が気象観測の標準計器として使用しています。



カップ式風速計はローター回転軸が常に固定で風向には無関係ですが、プロペラ式風速計は、尾翼の働きでプロペラが常に風に正対する様になっています。従って、一つの計器で風速と風向が同時に計れる利点がありますが、常に風に正対する必要がある、ということが逆に弱点となります。

どれだけ風向に対する応答性を良くしたとしても、風向変化に対する応答遅れは必ずあるわけで、また、オーバーシュートという現象もあり、これらが誤差要因となります。同じ場所でカップ式とプロペラ式を比較した場合、プロペラ式のほうが低い値を示し、その差は4%~6%という報告例があります。風向の乱れが大きいほど、その差は大きくなります。

プロペラ式風速計を 3 軸方向に取り付けて、風速の 3 軸成分を計測できるようにしたものが 있습니다。このタイプは飛行機型のように風向に追尾することはありませんが、プロペラの特長上、傾斜流に対する応答がカップ式と違ってコサイン特性に近いので、比較的正確に 3 軸成分を導き出すことが出来ます。カップ式に比べて高速サンプリングが可能のため、超音波式と同じように 3 軸方向の乱れを精密に計ることが可能で、超音波式が実用的になるまでは、野外における乱流計測の代表的な計測器とされていました。

