

■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4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

ドップラーソーダー

前号に紹介したように、ドップラーソーダーの特性やキャリブレーションの方法について、欧米の研究機関が連携して本格的な研究を行い、詳細な報告書を2005年に纏めていますⁱ。風車性能試験法に対する現在のIEC標準では、性能試験時の風計測はマストに設置した三杯式風速計によるものしか認められていませんが、風車の大型化に伴って将来的にこの方式では対応できなくなる時がいずれやって来る、との見通しに立って纏められたものです。

その後風車用に開発されたドップラーライダーが市場にでてくるようになって、ドップラーソーダーの陰が少し薄くなっているようですが、2009年の欧州風力シンポジウム(EWEC2009)には、従来のドップラーソーダーに変わる斬新なコンセプトも発表されており、将来どうなるかは予断を許しません。

この報告書は、ドップラーソーダーについて広い視点から纏められており、ドップラーソーダーの特性について理解するのに絶好の資料といえますので、本号では、この報告書から面白そうなところを選び出して紹介してみたいと思います。

ドップラーソーダーの測定原理

温度や湿度、更に風速の不均質による大気屈折率の揺らぎは電波や音波を四方八方に反射する性質があります。大気中に音響パルスビームを放射し、この性質により反射されてもとに戻ってくる成分(後方散乱)を分析すると、上空の風速を計ることが出来ます。

街中を歩いているときに、救急車が通過する

際、ピーポー音の音程が急変することは誰もが経験することですが、この現象をドップラー現象と言います。音程の変化量は、救急車の速度に比例します。ドップラーソーダーの場合、大気が動いていると(風があると)、ドップラー現象により生ずる発信音と受信音の周波数のずれ(音程の差)を解析すると、風速がわかるというわけです。

(ライダーの場合には、音波の代わりにレーザー光線を用います。そして、後方散乱の原因となるのは、大気の揺らぎではなく、空気中の微小な浮遊物質(エアロゾル;塵や水滴など)です。この点が違っているだけで、ライダーもソーダーも測定原理は似たようなものです。)

ドップラーソーダーでは、同時に高さ方向の複数点の風速を計ることが出来ます。

これは、受信した信号を音響パルスを発信した時刻からの時間で区分することによって可能となります。例えば、パルスを発信してから0.3秒後に帰ってきた信号は地上50mの風速情報を持っていることとなります。

$$340[\text{m/s}] \times 0.3[\text{s}] \div 2 \approx 50[\text{m}]$$

ここで、340[m/s]はご存知の音速です。

従って、例えば、受信信号から0.3秒刻みに拾っていけば、50m刻みの高さ方向の風速が得られるわけです。

(ライダーもパルス波方式のものは同じ原理を使っています。)

ただ、解析可能なだけの信号量が必要ですから、ある程度の時間幅を必要とします。従って、計測するのはある幅を持った高さにおける風速平均値となります。大体10m程度、というのが一般的なようです。

高さだけではなく水平方向にも幅が必要です。これは、風速を知るためには音響ビーム放射方向の水平成分が必要なため、パルスは天頂から

ⁱ M. de Noord(ECN), I. Antoniou(RISOE), S. Bladley (Univ. Salford), D. Kindler(WINDTEST), H. Mellinshoff(DEWI), S. Emeis(IMK-IGU) et. al.; WISE-Wind Energy Sodar Evaluation_Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005

若干の傾きをもって発射し、しかも、最低3方向への発射が必要なためです。通常は、天頂から15°から30°の角度で、互いに水平方向に直角な2方向へ発射するパルスと、天頂方向へ発射するパルスを使って3軸方向の風速成分を計算します。従って、例えば、地上100mの風速では水平方向に30~60m程度の幅を持った空間の平均値を計っていることとなります。

鉛直方向の風速変化が大きい(ウインドシアが大きい)場合や、複雑地形で風速が水平方向に変化しているような場合、ドップラーソナーで計測する風速は、点ではなく空間の平均値であることを忘れないようにしておく必要があります。このあたりの事情はライダーでも同じことです。

因みに、ドップラーソナーで受信する信号は後方散乱音のごく一部ですから、発射した音響パルスに比較するときわめて弱いものになります。エネルギー比にすると、 10^{14} 分の1程度のオーダーになります(地上100mの風速を4.5kHzのドップラーソナーで計測する場合)。

SN比

ドップラーソナー計測時の重要な出力の一つにSN比(SNR; Signal to Noise Ratio)があります。風速計の中では、表面に出てくる量としてはドップラーソナー特有のものです。受信器が捕らえた信号のうち、実際の風速信号とノイズ信号の比を表したもので、データ品質の指標となります。SN比が悪いデータは信頼性が低くなるため、適当な閾値を設けてデータフィルタリングを行うような処理が行われます。

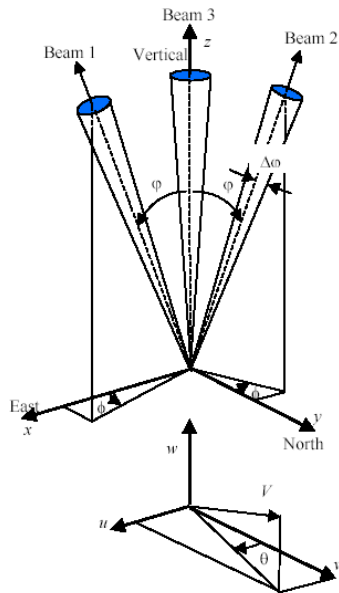


図1 ソナーの音響ビーム射出方向(出典:WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005)

測定に影響を与える因子

ドップラーソナーはその測定原理上様々な外乱因子の影響を受けます。

(1) 大気安定度

ドップラーソナーは大気の揺らぎによる音響の散乱を利用していますから、大気安定度の影響を受けます。大気安定度が中立の場合、大気中の上下方向の熱移動(つまり上昇気流や下降気流)はほとんどなくなります。このような状態では、発射された音響ビームに対して180度方向への後方散乱は非常に少なくなります。大気安定度中立の状態は、風の非常に強いときや朝、安定から不安定に移行する遷移時間帯、或いは、夕方にかけて大気混合が充分な時間帯に発生します。このような状況ではSN比が非常に悪くなり、計測誤差は大きくなります。

図2の下図は、Risoeの試験サイトで初夏の約2ヶ月の観測期間に計測したバルク・リチャードソン数Ribとドップラーソナーのデータ取得率の関係を示したものです。Ribは大気安定度の指標として用いられ、Rib=0が中立状態で、マイナス側が不安定、プラス側が安定です。中立状態でデータ取得率が極端に落ちていることがわかります。上の図は、期間中のRibの出現率です。

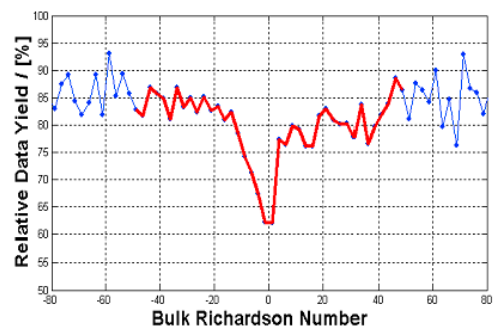
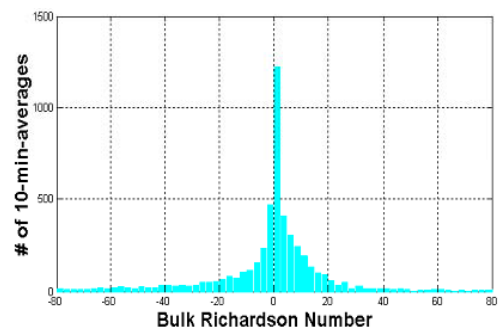


図2 大気安定度とデータ取得率の関係(出典:WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005)

(2) 降雨・降雪

降雨は雨音がノイズ信号となる他、雨滴の移動速度と風速の間に差があればこれも計測誤差の原因となります。図3はマスト風速計（地上30m）、ドップラーソーダー（地上35mおよび30m）の風速計測値時系列データをプロットしています。降雨期間にマスト風速計とドップラーソーダーの計測値の開きが大きくなり、降雨が計測に影響していることが判ります。この計測では、1時間雨量が2mmを超えるとデータ取得率が5%以下になることも報告されています。この様に降雨時のデータは全く信頼できないため、何らかの手段で降雨を検知し、この期間を強制的に欠測とするような処理が必要です。

霰や雹のときは更に状況が悪くなります。また、雪は雨滴に比べ、表面積が大きいので、ドップラーソーダーの発射した音響パルスを良く反射します。そのため、データの見かけ上のSNは降雨時と違って悪くなりません。風速の鉛直成分が（マイナス方向に）大きく現れるのが特徴です。

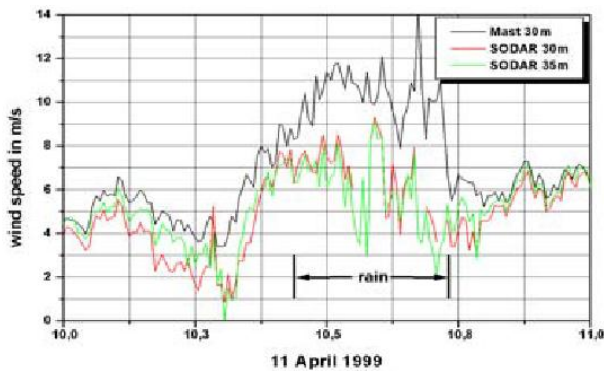


図3 降雨の影響(出典:WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005)

(3) 強風

強風はそれ自体が音を発生すると同時に、ドップラーソーダー本体に風切り音を発生させます。これらの音はノイズ信号となり、SN比劣化の原因となります。図4に計測例を示します。左側の図はSN比（縦軸）と風速（横軸）の関係、右側の図は受信信号数と風速の関係です。風速とともにSN比の劣化の様子が明瞭に見て取れます。

同図の上は、固定反射（第6項参照）信号をフィルター処理により除去したもの、下は除去前のプロットです。

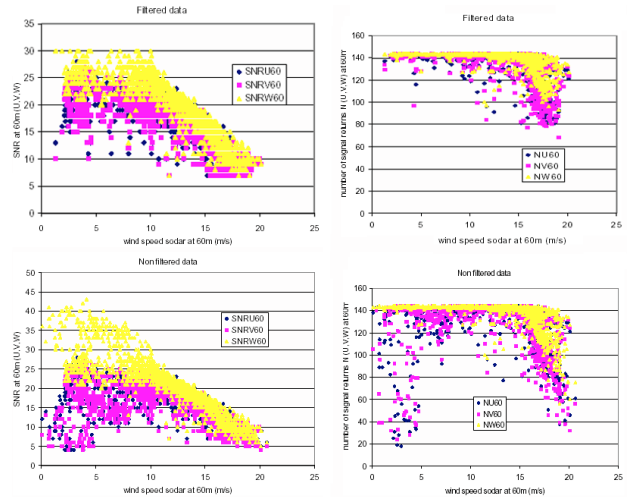


図4 SN比および受信信号数と風速の関係
(出典:WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005)

(4) 大気減衰

音は、大気によって減衰されますから、観測高度が高くなるほど、信号量が少なくなり、それとともにSN比が劣化します。図5は信号量が観測高度とともに減少する様子を観測例から示しています。また、この図では、SN比によるフィルター処理により、観測高度が高いほどデータ損失が大きくなることも示しています。

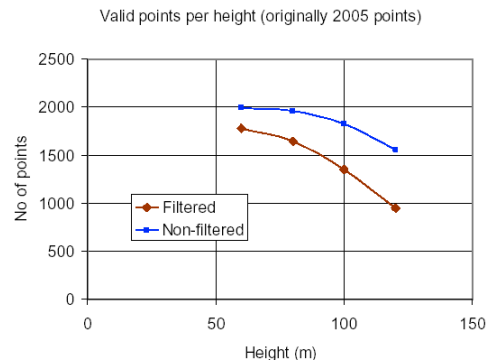


図5 受信信号数と観測高度の関係
(出典:WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C—05-044, Mar 2005)

(5) 環境音

電線の風切り音、樹木の葉摺れ音、鳥のさえずり、発電機や機械類等人工物の発する音、自動車や航空機の通過音などです。これらの音にドップラーソーダー発射音の周波数に近い成分が多く含まれていると測定誤差の原因となります。これを避けるには、出来るだけその様なノイズの発生が少ない場所を選定するしか方法はありません。

(6) 固定障害物反射 (Fixed Echo)

ドップラーソーダーの近くに樹木や、風車、風況観測塔、建築物があると、ドップラーソーダーの発射する音が反射してノイズとなります。反射音のレベルは非常に高いため、音響ビームのサイドローブ部分の反射だけでも大きな影響を与えます。降雪の場合と同様、ドップラーソーダーはこの反射音をノイズとして認識しないため、SN比は高いまま、風速ゼロの信号と見なすことになり、大きな計測誤差の原因となります。

図6は固定障害物反射の影響を示す観測例です。上図はSN比を、下図は信号強度をそれぞれ風速に対してプロットしたものです。飛び離れて高い値を示しているブロックが固定反射によるものです。

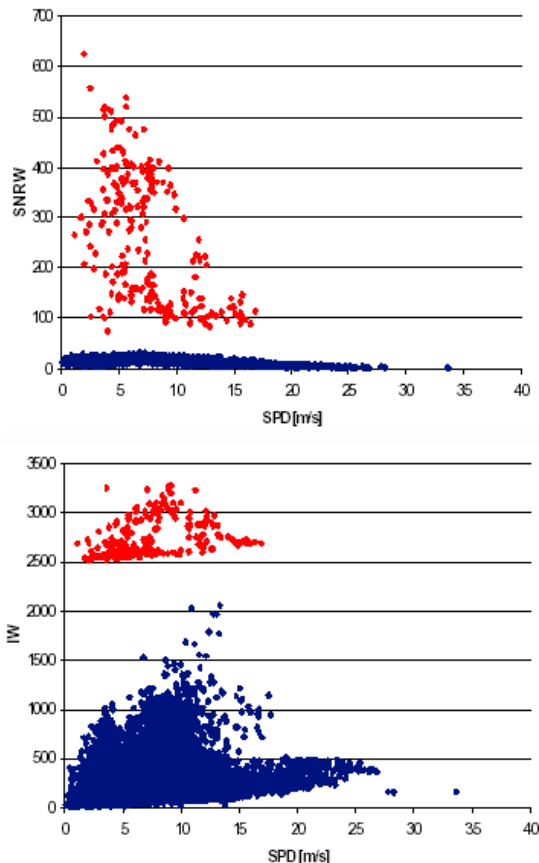


図6 固定障害物反射の影響

(出典: WISE Wind Energy Sodar Evaluation Final Report, ECN-C-05-044, Mar 2005)

データ処理の過程でフィルターをかけるアルゴリズムもありますが完璧ではなく、ドップラーソーダーをこれら固定障害物から十分に離して設置することが有効な解決策となります。大まかな目安としては、障害物の高さ分だけ距

離を離すことが推奨されています。例えば、50mの風況観測塔があり、これに設置した風速計とデータを比較したい、といった場合には観測塔から50m離せばよい、ということになります。ただし、これはあくまでも目安であって、障害物の音響反射面積や反射角度などその場の状況によって大きく変わってきますから、ケースバイケースの判断が必要になります。また、障害物が特定の方向にしかない場合は、音響ビームの発射角度の調整により影響を少なくすることが可能です。

(7) 射出音響ビームの角度

先に述べたように、ドップラーソーダーは、天頂方向、および、天頂から 15° ~ 30° の角度を持った2方向へ音響ビームを発射しますが、この発射角度の誤差が、風速計測誤差に大きく影響します。詳細の計算結果によると、音響ビームの設定天頂角が 18° の場合、 1° のずれに対して5%の風速計測誤差が発生します。

風力関係では、モノスタティック型とフェーズドアレー型が一般的に用いられますが、モノスタティック型の場合は、各アンテナ(送受波器)の取り付け角度、フェーズドアレー型の場合は、気温が角度誤差に影響します。後者の場合 10°C の気温変化が 0.3° の角度誤差、従って1.5%の風速計測誤差となって現れますので、温度補正は誤差を少なくするための重要な要因となります。また、地盤の軟弱な、或いは足場の悪い山中の計測などの場合、如何に安定した基礎を確保するか、という事も重要です。



フェーズドアレー型ソーダー
(左: ソニック、右: 英弘精機)



モノスタティック型ソーダー (ソニック社製)

図7 モノスタティック型ソーダーとフェーズドアレー型ソーダー