

ミニドップラーソーダの風況精査への応用

林 農・原 豊・劉 薇・佐々 浩司^{*1}・加藤 優^{*2}・若 良二^{*3}
鳥取大学大学部応用数理工学科・^{*1}高知大学理学部自然環境科学科・
^{*2}(株)エナテクス ^{*3}鳥取大学教育地域科学部地域設計学講座

Investigation for the Wind Characteristics Using a Mini Doppler Sodar
Tsutomu HAYASHI, Yutaka HARA, Wei LIU,
Koji SASSA ^{*1}, Masaru KATO ^{*2} and Ryoji WAKA ^{*3}

Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: hayashi@damp.tottori-u.ac.jp

^{*1}Department of Natural Environmental Science, Faculty of Science
Kochi University,

^{*2}ENATEX Corporation

^{*3}Department of Regional Planning, Faculty of Education and Regional Sciences

Abstract: It is quite important for constructing wind power plants to investigate the wind characteristics of the site proposed. Observation towers for such investigation are usually less than 30m in height and cannot accurately estimate the wind speed at the height corresponding to wind power generators. Recently, the Mini Doppler Sodar has become to be considered as a new instrument for the wind characteristics investigation. The Mini Doppler Sodar is a kind of acoustic remote sensor and can measure the wind speed and direction at various heights up to about 200m. It is portable and can be used at complex terrains. This paper describes the structure of the Mini Doppler Sodar and the principles of its operation. The Mini Doppler Sodar is expected to be suitable for the assessment of wind power generation.

Key words: Doppler Sodar, Remote Sensing, Wind Characteristics, Wind Energy, Power Generation

1. 緒言

21世紀のエネルギー問題を考える時、新エネルギーの大幅な導入は欠くことができない。その中でも風力発電は、クリーンなエネルギーとして脚光を浴びつつあり、設備も急速に増加している。

風力発電の特徴は、火力発電や原子力発電に見られるような二酸化炭素や放射性廃棄物などの環境汚染物質の排出が全くないクリーンな発電システムであること、風という再生可能なエネルギーを利用するためエネルギー資源がほぼ無尽蔵であることである。しかし、風は常に変化し風向や風速が絶えず変動するため、安定した発電出力が得られにくいことが短所になっている。この短所を緩和するには、風力発電に適した強風地での導入、風車の大型化による発電出力の増大と効率化、多数の風車のネットワーク化による発電量の安定化

などが有効な手段であるが、そのためには第1に風車の設置場所を適切に選択することが不可欠である。すなわち風況精査が風力発電導入の成否を決定すると言っても過言ではない。

鳥取県東伯郡北条町の北条砂丘では、防風林が南に大きく傾き、年間平均風速が強いことが予想される。すなわち、風力発電の適地である可能性が高い。本研究グループでは、この北条砂丘に計測用ポールを立て、地上高20m及び30mに設置した風向風速計で風況精査を行ってきた。しかし、近年導入が進んでいる発電用風車は大型化しており、その風車のハブ高さは50m～70mにまで及ぶ。故に、観測地の地表面上粗度に応じたべき乗則を仮定して、20mおよび30mのデータより上層の風速値を外挿するのであるが、複雑な地形の影響度は大きく、外挿値の信頼度は低いと考えられる。そこで本研究では音波を利用することにより地上

高数百メートルまでの風速が測定可能である可搬式のミニドップラーソーダを、風況精査用機器として使用する可能性について調査及び検討を行っている。本論文では使用しているミニドップラーソーダの原理と特性について述べ、風況精査への応用の可能性について議論する。

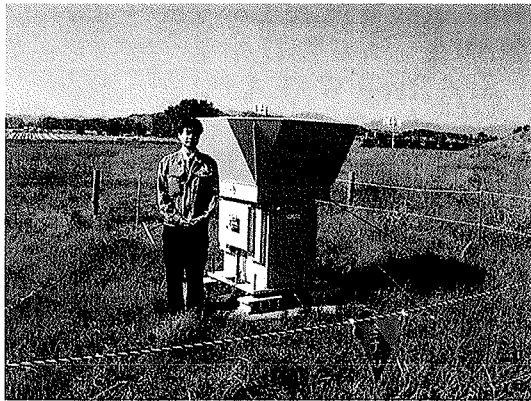


図1 ミニドップラーソーダの外観

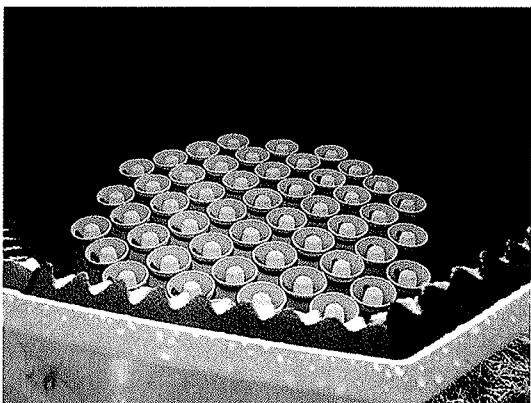


図2 音響素子アレイ

表1 ミニドップラーソーダの仕様

| | |
|----------|--|
| 音波出射方式 | フェーズドアレイ方式 |
| 送信周波数 | 2100Hz |
| 送信最大出力 | 260W |
| 送信パルス幅 | 90msec, 350msec 混合パルス送信方式 |
| 観測高度 | 30~240m |
| サンプリング間隔 | 18sec |
| 観測項目 | 高度別成分風速 高度別平均風速、風向 標準偏差 エコー強度(受信強度) |

2. 観測装置の概要

ドップラーソーダは、気流中の微小な温度変動によって後方散乱される音波のドップラー周波数偏移を利用して風速を得る音波レーダーの一種である。上空に向け発射した音波を同じアンテナにより受信し、受信時間のずれによって得られる各高度ごとの信号をFFT処理してドップラー周波数偏移を求め、各高度の音波出射方向の風速成分を計測する。3次元的に風速ベクトルを計測するためには音波を3方向以上に射出の必要があり、その方式によって一般に、モノスタティック型とフェーズドアレイ型のソーダがある。モノスタティック型のソーダは送信3方向それぞれにアンテナを固定して設置するタイプであり良好な音響ビームが得られる反面、装置が大がかりとなり移動設置作業に時間がかかる。一方、フェーズドアレイ型のソーダは多数の音源の位相を規則的にずらすことによって音波の出射方向を制御する方式である。装置が複雑になるが、アンテナが一基のみであるため移動観測が比較的容易である。また5方向(+X,-X,+Y,-Y,+Z)に音響ビームを送信することによって屈折の影響やアンテナ設置時の水平度誤差の補正も可能であるなどの利点をもつ。

本研究では可搬性のある小型のフェーズドアレイ型ミニドップラーソーダ(㈱カイジョー製、KPA-100C)を使用する。図1にこのミニドップラーソーダの外観(1600×1600×1740mm)を示す。音波を送受信する送受波器を上部から見ると、図2に示すように内部に音響素子が8×8列のアレイ状に並んでいる。表1に本研究で設定したミニドップラーソーダKPA-100Cの仕様を示す。送信周波数は2.1kHz、送信方向は+X,+Y,+Zの3方向のみとし、6秒間隔で各ビームを送信する。

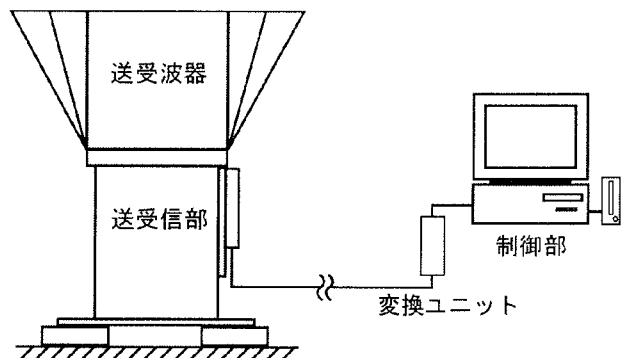


図3 ミニドップラーソーダの構成図

2.1 ミニドップラーソーダの構成

KPA-100C フェーズドアレイ型ミニドップラーソーダの主要機器構成を図3に示す。本装置は大きく分けると、送受波器、送受信部、変換ユニット及び制御部で構成される。制御部に接続されたパソコンによってコントロール及びデータ処理・保存を行う。各部の機能は次のとおりである。

(a) 送受波器

図2に示すように、送受波器内部には5Wのスピーカ型音響素子が8×8列に並んでいる。ただし、四隅の角部分には音響素子は配置していないため、素子数は合計52個である。音響素子アレイの周りは遮音板で囲んでおり、送信音響信号の遺漏と外部音響騒音の混入を防止している。

(b) 送受信部

制御部から送られてくる送波信号を電力増幅する機能と送受波器で集音された散乱受波信号を前置増幅する機能をもつ。

(c) 変換ユニット

送受信部と制御部は約100m離れているため、その間のデータ通信は長距離通信が可能なRS422を用いている。そのため制御部への入出力においてRS422とRS232Cの変換を行っている。

(d) 制御部

装置の作動、送波信号の設定、受波信号の増幅・波形整形等を行う。受波信号はここで周波数解析して風向風速などの演算処理を行う。結果はプリント出力、グラフィック画面への風向風速プロファイル表示、ソーダエコー、及び受波信号スペクトルなどの中間処理を含めての外部記憶(MO, ハードディスク)への結果収録ができる。

2.2 フェーズドアレイ方式による音波の指向性

フェーズドアレイ方式のドップラーソーダでは、アレイ状に並べた音響素子から放出する音波の位相を列ごとに一定間隔でずらすことにより、合成音波の進行方向を変化させる。位相差の間隔を変えれば、音波の主要進行方向の天頂角度が変化し、同位相にする列の組み合わせを変えることで、方位を変化させることができる。図4に、鉛直方向に送波した場合の合成音波の指向性を示す。図示されるように音波の主要進行方向(メインローブ)以外にも相対的に音波強度が高い方向が生じており、これをサイドローブと呼ぶ。16列アレイを用いたKPA-1000の場合、サイドローブの音波強度は-35dB以下[1]であり、音波の指向性は極め

て良好であるが、8列アレイの本機の場合、図中Dで示す5列アレイに近い結果が予想され、サイドローブは-20dB程度に指向性が劣化するものと思われる。このサイドローブは信号雑音の原因になるため、遮音板により可能な限り発生を抑制している。

小島ら[1]によれば8列アレイの場合、主ビームの散乱角は $\theta=12^\circ$ になると思われ、このことより鉛直方向にビームを出射した場合の高度100mにおける検査体積は約38000m³になる。従って、ドップラーソーダはかなり広範囲の平均風速を計測していることになり、点計測に近い一般の風速計とは異なる計測特性を持つことは注意を要する。

3. ドップラーソーダの測定原理

3.1 ドップラーシフト

図5に送波信号及び受波信号の模式図を示す。図に示すように送波信号は一定強度(260W)及び一定周波数($f_0=2.1\text{kHz}$)の音波であるが、受波信号は往復する距離と散乱体の量に応じて強度が時間と共に変化する信号となる。また、受波信号は後方散乱される高度の風速に応じてドップラーシフトを受け、周波数が偏移している(受波信号の周波数を f_d とする)。そこで受波信号の各部分をFFT処理してドップラー周波数偏移を検出すると、音波の出射方向の風速成分が求められる。

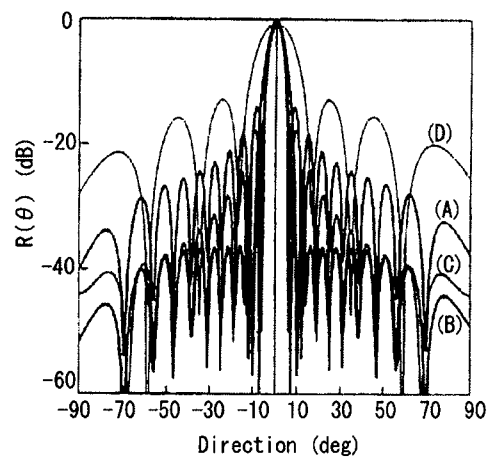


図4 フェーズドアレイ方式の音波指向性 (A) 16列アレイ、テーパなし、(B) 16列アレイ、テーパあり、(C) 素子間隔と波長の比 $D/\lambda=10$ の円盤音源、(D) 5列アレイの指向性(小島ら、1997より[1])

本研究で用いた装置は低高度では短いパルス幅 ($\tau=90\text{msec}$)、高高度では長いパルス幅 ($\tau=350\text{msec}$)を用いており、低高度で良好な高度分解能を維持し、高高度で信号強度の増加を得ている。図6は高度30mに相当する受波信号スペクトルの例である。この例ではX方向の受波信号が大きなドップラーシフト ($f_d - f_0$)を受けていることがわかる。

3.2 風速ベクトル・風向の算出

一般に、互いに直角な2方位 (方位角 A, B) に向け天頂角 α で斜め上方に音波を放出し、このとき求められる各出射方向の風速成分を V_1, V_2 とする (図7(a)参照)。また、鉛直上方に放出される音波により求まる風速成分を V_3 とする。このとき、それぞれの風速は次式で与えられる [2]。ただし、 a は音速である。

$$V_j = \frac{a(f_d - f_0)}{2f_0} \quad (j=1,2,3) \quad (1)$$

図7のように座標系を東を+X、北を+Y、鉛直上方を+Z とするように設定し、各々の方向の風速を V_x, V_y, V_z とすると、これらは次式によって与えられる。

$$V_x = \frac{V_1 \cos B - V_2 \cos A + V_3 \cos \alpha (\cos A - \cos B)}{\sin \alpha \sin(B - A)} \quad (2)$$

$$V_y = \frac{V_1 \sin B - V_2 \sin A + V_3 \cos(\sin A - \sin B)}{\sin \alpha \sin(A - B)} \quad (3)$$

さらに水平方向の風速 U と風向 ϕ は次式により求められる。

$$V_z = V_3 \quad (4)$$

$$U = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_x}{V_y} \quad (6)$$

3.3 受信パワー

一般に音波の後方散乱を利用するソーダの受信パワー P_r は次式で与えられる [3]。

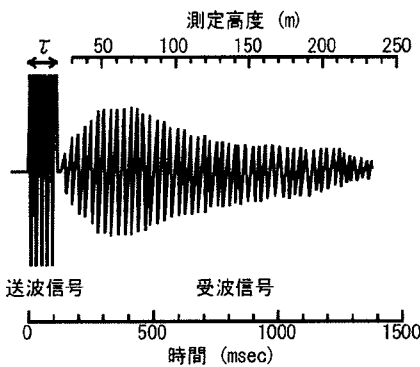


図5 送波信号及び受波信号の模式図

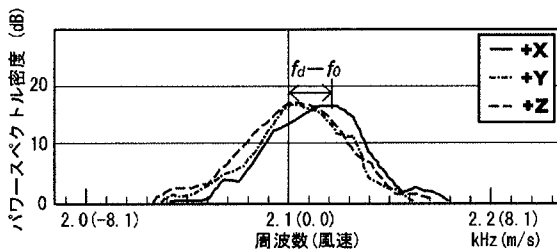


図6 受波信号スペクトル

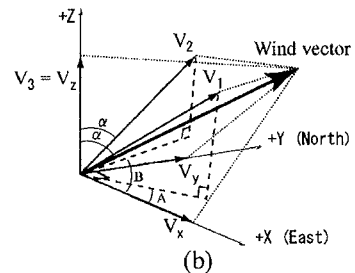
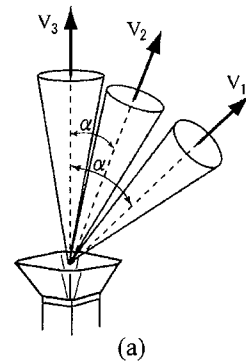


図7 音波送信方向(a)と風速ベクトル(b)

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \sigma(\theta) \frac{C \tau A_r}{2 R^2} L \quad (7)$$

ここで P_t は送信パワー、 η_t 、 η_r は各々送・受信変換効率、 $\sigma(\theta)$ は後方散乱断面積、 C は音速、 τ はパルス幅、 R は探査距離、 A_r はアンテナ開口面積、 L は音波の距離 $2R$ による減衰損失である。後方散乱断面積は次式のように気流の温度変動のみに依存する[3]。

$$\sigma(\theta) = 0.008 \frac{C_T^2}{T^2} \lambda^{-1/3} \quad (8)$$

T は気流温度、 λ は音波の波長、 C_T^2 は温度変動に関する構造定数で、温度変動に対する構造関数とは次の関係にある。

$$C_T^2 \Delta z^{2/3} = [T(z) - T(z + \Delta z)]^2 \quad (9)$$

ここで z は鉛直方向の座標、 Δz は鉛直方向の位置変化、 $T(z)$ はそれぞれ z 点における気温である。このことより、ソーダのエコーを見るファクシミリ画像によって大気の成層状態を定性的に把握することが可能である。

4. 観測地点

本研究では、日本海に面した北条砂丘の北緯 35 度 29 分、東経 133 度 49 分、海拔高度 3.8m の地点において風況観測を行っている。図 8 に観測地点を示す。海岸線から幅約 200m にわたって防風林(北端の最高高さ 20m)が東西に約 9km 続いている。防風林の南には国道 9 号線が通っており、防風林と国道 9 号線の間観測場所がある。ミニドップラーソーダは防風林から 30m 南の位置に設置した。なお、ドップラーソーダの東側 80m には高度 70m の観測铁塔がある。

5. 計測事例

観測は 2001 年 3 月 23 日より 6 月 7 日までの 144 日間行った。観測期間中は春から夏にかけての比較的穏やかな気候にあり、海陸風循環に伴う風向と風速の変化がしばしば観測された。

2001 年 7 月 29 日における日中の 13:00 から 15:30 までと、夜の 19:30 から 22:00 までの時間帯のファクシミリを図 9 に示す。この日は海陸風

循環が観測された日である。図 9 のファクシミリにおいて赤色は信号強度が最も強いことを表し、寒色系に近づくにつれて信号強度が弱くなっている。日中のファクシミリを見ると高度 240m 程度まで暖色系の色が分布しており、高い高度においても強い信号強度が得られていることがわかる。しかし、強い信号強度が得られている高度は時間に伴い激しく変動している。これは日射に伴う激しい対流混合の様子を良く表している。一方、夜間のファクシミリでは、信号強度が強い部分は約 100m 以下の高度に分布している。その分布の時間変動は弱く明瞭な層状構造をなしているが、これは地表面からの放射冷却に伴って安定成層が形成されていることを示している。

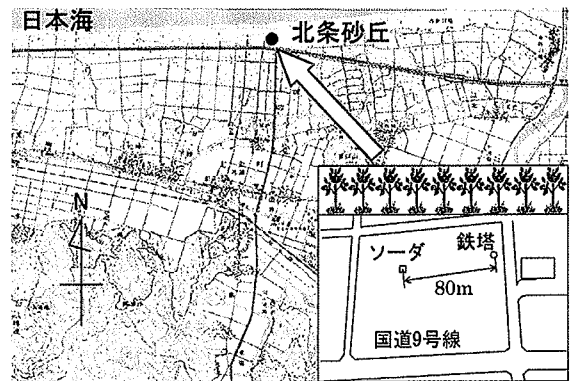


図 8 観測位置

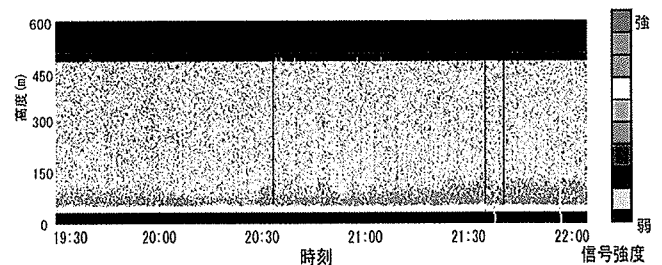
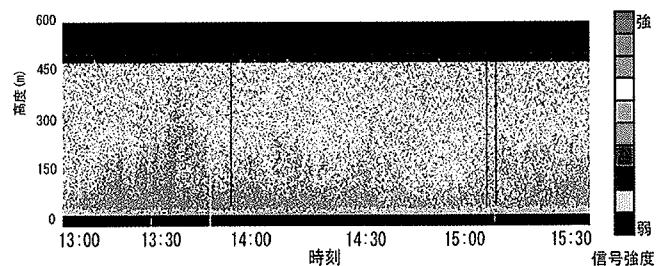


図 9 ファクシミリ画像

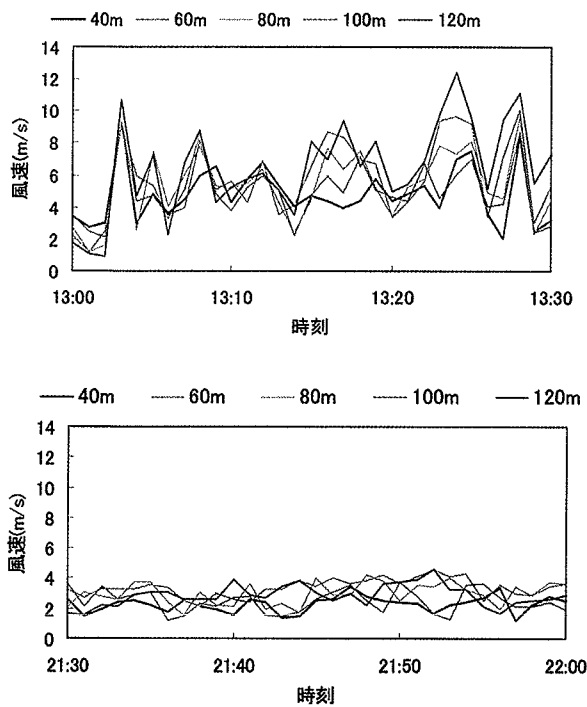


図 10 水平方向の風速変動波形

図 9 に示した時間帯の一部であるが、13:00 から 13:30 までと 21:30 から 22:00 までの時刻における 5 つの高度 (40m, 60m, 80m, 100m, 120m) の水平方向風速 U の変化を図 10 に示す。このように、ソーダ基のみの使用により、上層の風速変動分布を容易に求められることがソーダの大きな利点である。日中の風速は平均的に高く、その変動は激しくなっている。また、高度が高くなると風速が大きくなっている時刻の他に、風速の高度分布が反転している場合も見られる。一方、夜間の風速は平均して小さく、変動も小さい。120m の風速値 (信号強度が小さく信頼性が低い) を除けば、その他の高度の風速値は比較的安定しており、高度に伴い風速が大きくなる傾向が保たれていると言える。図 9, 10 に示したデータは海陸風循環が観測された日のものであり、日中は海風が

吹き、夜間は陸風が吹いていた。これらの図で示された日中と夜間の大気状態の違いと風速変動の特徴は、北条砂丘で観測されている海陸風の特徴をよく表していると考えられる。

ドップラーソーダの観測期間 144 日間の内、欠測は約 40% であった。欠測の原因は主として強風、降雨などにより生じている。降雨の場合、上方方向に露出したアンテナの構成上、欠測となるのはやむを得ないが、強風の場合は、アンテナフードを剥離渦が生じないような形状に変更するなど、今後の対策が必要となるであろう。欠測の一部は音波の指向性が弱いことによるノイズ混入や、地表面からの散乱音波、国道の騒音をひろったことによるノイズによるものが考えられる。これらは設置環境に応じて事前チェックを行い、風況精査の際に十分考慮しておく必要がある。

5. まとめ

本研究では、風力発電のための風況精査に役立つと考えられる可搬式ミニドップラーソーダについて、その構造、測定原理、設置状況などについてまとめた。また、これまでに得られた観測データの一例を示し、ミニドップラーソーダのデータが北条砂丘で観測されている海陸風循環による風況特性や成層の特性を良く表していることを示した。今後はドップラーソーダの風向・風速データの精度を検証するため、観測鉄塔による観測値との比較を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 小島、平井、中島、伊藤 (1997) カイジョー 技報 6.
- [2] 赤井、朝倉、片寄 (1993) 天気 40-7, p21.
- [3] 村山 (1983) これからの気象観測, p101.

(受理 平成 13 年 9 月 28 日)