

## 津軽海峡沿岸部における JERS-1 合成開口レーダの クロススペクトル法を利用した海上風の風向評価

Estimation of wind direction on the Tsugaru channel of the JERS-1/SAR image  
using the cross spectral method

山本義春\*, 齊藤玄敏\*

Yoshiharu Yamamoto, Hiroyuki Saito

\*弘前大学理工学部

\*Faculty of Science and Technology, Hirosaki University.

キーワード：JERS-1/SAR(JERS-1 synthetic aperture radar), フーリエ変換(fourier transform),  
クロススペクトル法(cross spectral method), コヒーレンス(coherence), 風向(wind direction)

連絡先：〒036-8561 弘前市文京 3 弘前大学理工学部知能機械工学科 齊藤玄敏

Tel : 0172-39-3694 , E-mail : saito@cc.hirosaki-u.ac.jp

### 1.はじめに

エネルギー問題の解決法の一つとして、風力発電などの再生可能エネルギーが期待されている。風力発電はクリーンかつ無尽蔵であるが、風力発電のための風車設置には、風向・風速の変動により安定したエネルギー供給が難しく、プロペラの回転や発電機に伴う騒音、設置場所の確保の困難、景観を損なうなどの問題がある。これらの問題を解決するため、欧州を中心として、特にデンマークの沿岸部へ風車設置が進められている<sup>1)</sup>。日本では、国内の沿岸部で水深が急に深くなるため、沿岸部の風車設置は難しいとされていたが、2003年に国内最初の洋上風車が建設されている<sup>2)</sup>。

沿岸部の風車の設置を考える場合、海上風の風況マッピングが重要である。設置地点の詳細な風況の把握は、最適な設置場所の決定や、発電量の

予測につながるためである。海上風の風況マッピングには、合成開口レーダ(SAR)を利用することができる。SAR はパルス圧縮と合成開口処理により、光学センサと同等の高い空間分解を得ることのできる唯一の衛星搭載マイクロ波センサである。海域を対象とした SAR の応用については、欧州で打ち上げられた ERS-1/SAR を使用する風況マッピングの研究が進んでいる。

著者らはこれまでに青森県と北海道の間に位置する津軽海峡を対象地域とし、JERS-1/SARの海域画像から算定したパワースペクトルを、波長800mから6.4kmの範囲で積分し、相互相関解析からピーク位置を求めることで風向を決定し、観測所のデータを基に抽出風向を評価している<sup>3)</sup>。この方法では、フィッティングさせる周期成分以外の影響を受ける問題が生じ、求めた全ての相関係

数の平均値が 0.6 以下となった。そこで本研究では相関解析にクロススペクトル法を採用し、位相差とコヒーレンスを使って風向の評価を行う方法について検討し、風向の再評価を行う。

## 2.使用データと対象地域

本研究では 1993 年から 1998 年にわたる、津軽海峡を含むパス-ロウ 65-231 の 13 シーンの Level2.1 JERS-1/SAR画像を使用した。対象とする海域は観測所付近の 6.4km平方の正方領域で切り出した。抽出した風向の比較には渡島半島のやや南方に位置する木古内町、津軽半島の北端に位置する竜飛崎およびその東方に位置する今別町、下北半島の北端に位置する大間崎およびその付近に位置する大間町の観測所データを使用した。大間、今別、木古内の観測所は気象庁・電子閲覧室の観測データを、大間崎、竜飛崎の観測所データは日本海洋データセンターの観測データを使用した<sup>4,5)</sup>。

Fig.1 に 1996 年 1 月 16 日の JERS-1/SAR 画像に観測所の位置、および観測所の付近の対象とした海域の領域を示す。使用した JERS-1/SAR 画像には、対象の海域部分に船からの後方散乱と考えられる海面以外の信号が含まれることがある。この場合はできるだけ海面以外の後方散乱を含まないように、切り出す領域を若干移動させた。

観測日の 24 時間についての風向分布を調べるために、観測所の風向データを用いて風配図を作成した。Fig.2 に 1996 年 1 月 16 日の竜飛崎、および今別の観測所の風向データを使用した風配図を示す。これらの図から、観測所で観測した風向が、一日を通してほぼ西北西か北西であることが分かる。また、観測所毎に比較することで観測する風向分布の分散の大小の傾向が分かる。Fig.2 の a と b では、共に風向の分散が小さく見えるが、全ての日付について作成した風配図からは木古内、今別の観測所で観測した風向は、大間、大間崎、竜飛崎の観測所と比べて風向が分散する傾向にある。観測所が比較的近い竜飛崎と今別、ある

いは大間崎と大間の風向が大きく異なる場合に、風向の基準が問題になる。この場合大間崎、竜飛崎が海に近いのでこれらの観測所で観測した風向を基準にした。

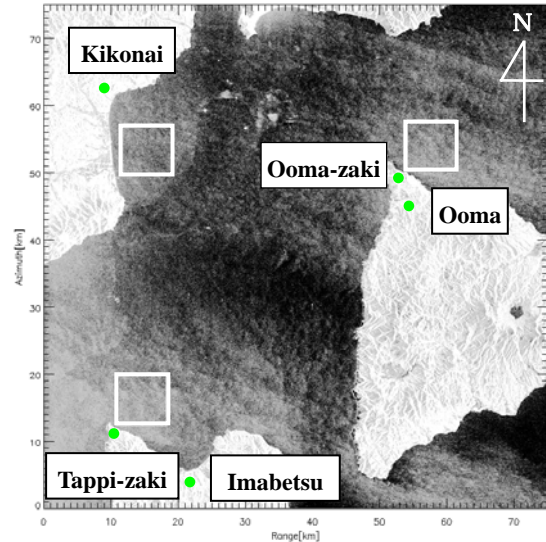
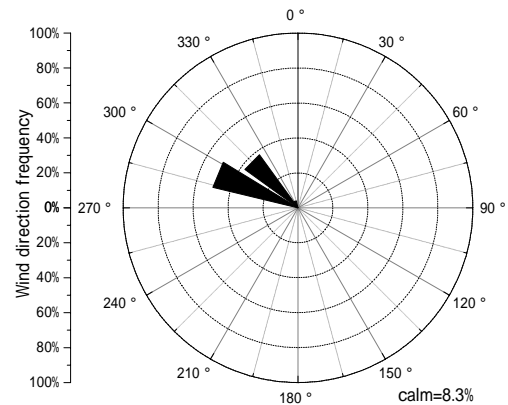
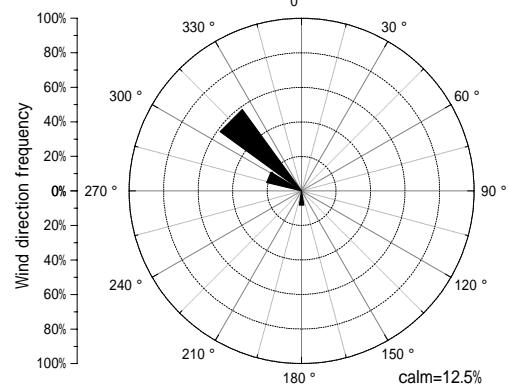


Fig.1 Target area on Tsugaru channel (1996/1/16)



(a) Tappi-zaki (1996/1/16)



(b) Imabetsu (1996/1/16)

Fig.2 Wind rose in observatory wind direction

### 3. 水域観測の原理

海域では上層の風向に鉛直方向の循環が生じ、上層の風向と海面の風向が直交するラングミュール循環現象が生じる<sup>6)</sup>。海面ではラングミュール循環によって生じたさざ波により、入射したマイクロ波が後方散乱する。海上の風速に応じてさざ波が立つことで海面の粗さが変化し、レーダの受信する後方散乱断面積(NRCS)が変化する。また、受信するマイクロ波の往復距離の差が、海面の波長と整数倍異なる場合にブラッグ散乱が起こり、海域における主散乱要素となる。ブラッグ散乱の条件は、

$$L_B = \lambda / (2 \sin \theta) \quad (1)$$

で示される。ここに、 $L_B$ はブラッグ波長、 $\lambda$ はマイクロ波の波長、 $\theta$ は入射角である。JERS-1/SARの場合、波長 $\lambda=23.5\text{cm}$ 、入射角 $\theta=40$ 度となるので、この場合はブラッグ波長 $L_B=18\text{cm}$ となり、波長約18cmのさざ波が主散乱要素となる<sup>7)</sup>。

SARがラングミュール循環によって生じたさざ波からブラッグ散乱を受信することで、画像の海域部分には風向に沿って粗く並ぶ縞状の構造が現れる<sup>8,9)</sup>。

### 4. 風向の抽出方法

SAR画像中のパターンを抽出・認識するため、2次元高速フーリエ変換(2DFFT)を使用する。画素の配列をx方向にM、y方向にNとしてSAR画像を $f(x,y)$ とし、xを0からM-1、yを0からN-1の配列で表すとき、2DFFTで得られるスペクトル $F(u,v)$ は、

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) W_M^{-jux} W_N^{-jvy} \quad (2)$$

$$W_M = \exp(-j2\pi/M) \quad (3)$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N) \quad (4)$$

で表される。ここに、 $u$ はx方向の輝度値に対する波数、 $v$ はy方向の輝度値に対する波数である。パワースペクトル $|F(u,v)|^2$ のピーク列の方向を利用して風向を抽出する。

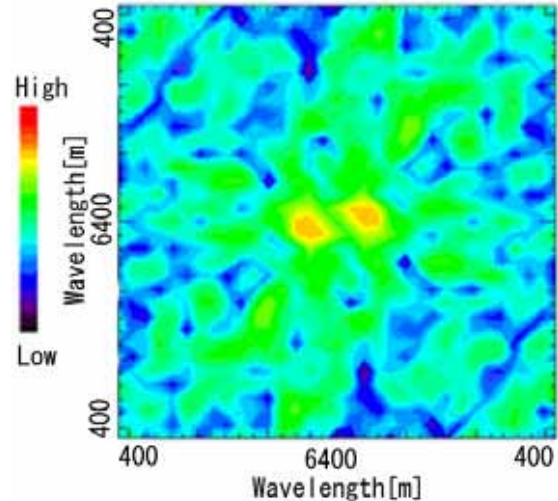


Fig.3 Power spectrum for sea area near from Tappi-zaki and Imabetsu (1996/1/16)

ERS-1/SARを使用した研究例では、画像のパワースペクトルにおいて波長約600m以上の範囲にあるピーク列の向きを利用して風向を抽出している<sup>9)</sup>。しかし、本研究で使用したJERS-1/SAR画像から算定したパワースペクトルは、波長3km以上の範囲にパワーが集中しており、短波長成分についてはERS-1/SARのスペクトル分布のようにはならなかった。そこで、JERS-1/SARから算定したパワースペクトル $|F(u,v)|^2$ を、北を0度として、時計回りの方向毎に軸方向に波長400mから800mの範囲を積分し、パワーの集中する方向を決定した。この方向と直行する方向をSARの抽出風向として扱う。Fig.3に1996年1月16日の大間海域を使用して算定したパワースペクトルを示す。この図は波長400m以上のスペクトルを切り出したものである。中央の長波長部分にピーク列があり、短波長部分にピークは無い。

算定したパワースペクトル $|F(u,v)|^2$ は、波数 $u$ と波数 $v$ の軸について対称性があるので、積分で求めた配列には周期性がある。この配列にクロススペクトル法を用いて同じ周期の正弦波をフィッティングし、パワーの集中するピーク位置を決定した。クロススペクトル法は2つの配列の相互相関関数をフーリエ変換し、周波数領域で解析す

ることによってコヒーレンスと位相差を求める。周波数領域で求めたコヒーレンスは2つの配列の間で、フィッティングする周波数成分間の相関係数を示し、同様に求めて位相角は2つの配列の間の位相差を示す<sup>10)</sup>。この位相差は変換前の系列のディレイを示す。ここで、 $p$ をパワースペクトル  $|F(u,v)|^2$ の積分から求めた配列とし、 $q$ を正弦波の配列とする。コヒーレンス  $Coh$ と位相角  $\theta_{pq}$ は、

$$Coh^2(\omega) = \frac{K_{pq}^2(\omega) + Q_{pq}^2(\omega)}{S_{pp}(\omega)S_{qq}(\omega)} \quad (5)$$

$$\theta_{pq}(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{Q_{pq}(\omega)}{K_{pq}(\omega)}\right) \quad (6)$$

で示される、ここに、 $S_{pp}$ は配列 $p$ のパワースペクトル、 $S_{qq}$ は配列 $q$ のパワースペクトル、 $K_{pq}$ は配列 $p$ と配列 $q$ のコスペクトル、 $Q_{pq}$ は配列 $p$ と配列 $q$ のクオドスペクトル、 $Coh$ は配列 $p$ と配列 $q$ についてのコヒーレンス、 $\theta_{pq}$ は配列 $p$ と配列 $q$ についての位相角を示す<sup>10)</sup>。

求めた位相角  $\theta_{pq}$ から求めた正弦波の移動量を計算し、ピーク位置を示す角度を求め、その角度と直交する角度を抽出した風向とする。

### 5. 風向評価の結果

使用した13シーンを通して JERS-1/SAR 画像から抽出した海上の風向と、観測所の示す風向差を求めた。SAR 画像のスペクトルから抽出した風向には180度の任意性があるので、付近の観測所の風向に近い抽出結果を採用した。

抽出結果は絶対値の平均値が32度、標準偏差が41度となった。抽出結果を Fig.4 に示す。この図

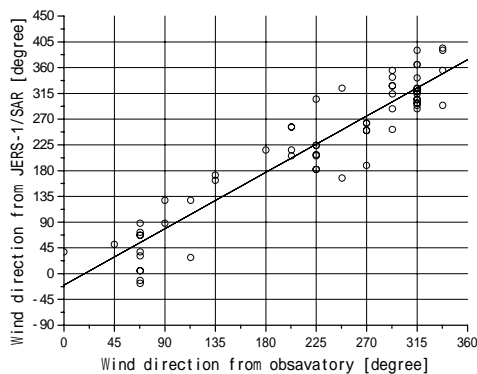


Fig.4 Wind direction from SAR image and observatory

から、使用したデータでは観測した日の風向について、東北東と西北西のものが多いことが分かる。また、観測所データの各風向を基準として、幾つか抽出結果の大きく逸脱している部分が確認できるが、この結果から風向の抽出差が大きくなる風向は判断することができなかった。

得られた風向の抽出精度は41度であり、SEASAT/SARで約10度<sup>8)</sup>、ERS-1/SARで約20度<sup>9)</sup>であることを考慮すると、約20度抽出誤差が大きい。

### 6. 検討

抽出結果に大きな誤差が生じた原因として、ラングミュール循環が起こらずに上層の風向と海上風が平行していることが考えられる。そこで誤差が70度以上となった抽出結果は、スペクトルのピーク列の方向を抽出風向として、観測所の風向データを用いて再評価を行った。再評価の結果を Fig.5 に示す。Fig.5 は Fig.4 よりも分散が小さくなっており、抽出結果は絶対値の平均値が23度、標準偏差が30度となった。この場合の風向の評価結果は、他の衛星 SAR と比較して約10度抽出誤差が大きい。本研究の風向の抽出結果の誤差が大きい原因には、観測所が陸に位置していることから、海上からの風向が陸の地形の影響を受けて変化していることが挙げられる。その他にノイズの影響も誤差の原因として考えられる。

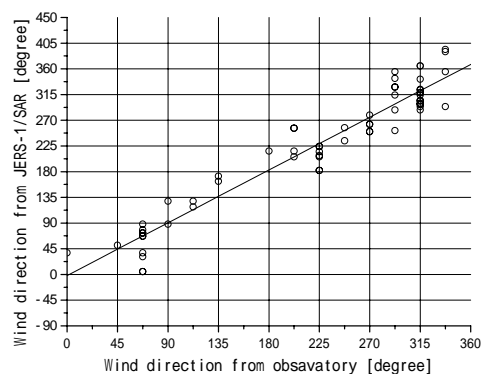
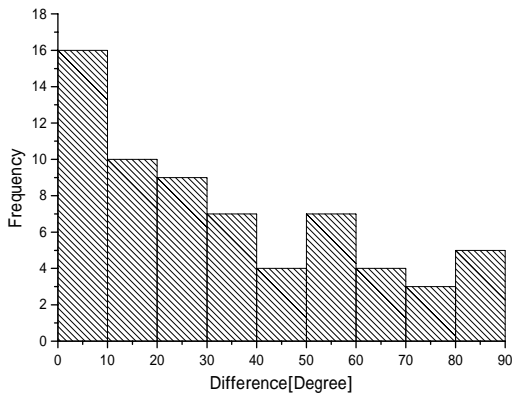


Fig.5 Wind direction from SAR image and observatory

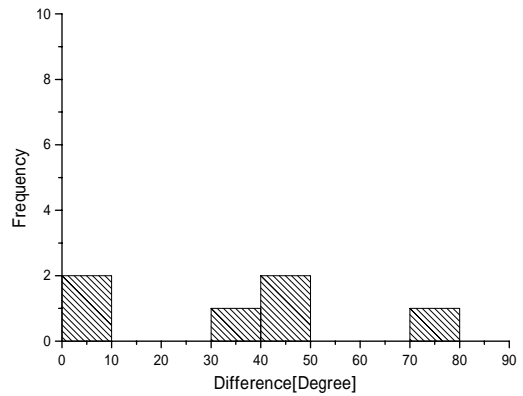
ノイズの指標となる等価ノイズ $\sigma_{\text{Neq}}^0$ は使用するバンドと関連する。ERS-1/SARはCバンドなので $\sigma_{\text{Neq}}^0$  -20dBである<sup>11)</sup>。LバンドのJERS-1/SARは、送信電力が低下した影響も含めて $\sigma_{\text{Neq}}^0$ =-14.5dBである<sup>12)</sup>。よって、JERS-1/SARはERS-1/SARと比べて-5dB以上のノイズを含んでいる。

求めたコヒーレンスは65個の抽出結果の内、56個が0.7以上となった。コヒーレンス毎に、生じた風向差についてヒストグラムを作成した結果をFig.6に示す。コヒーレンスが0.7未満の結果はスペクトルに180度の周期性が無いと考え表示していない。図中のaでは、風向差が30度

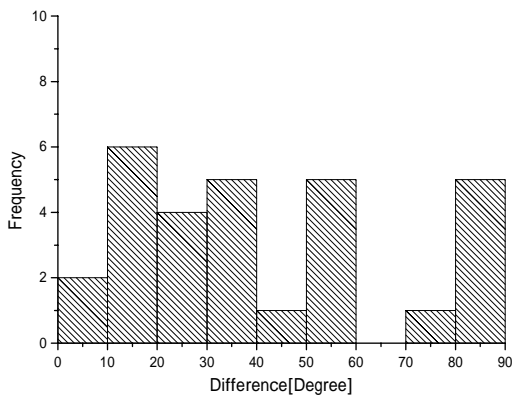
未満の結果がやや多く、それ以上ではほぼ等しく分布している。bはややサンプル数が少ないが、cと共に特に特徴が無い。dでは風向差が40度以内の結果が多い。以上のことから、コヒーレンスが0.9以上のとき、正しい抽出結果が得られる可能性がある。ただし、いくつか大きな風向差も現れている。これは観測所が陸に位置していることから、海上からの風向が陸の地形の影響を受けて変化していることが考えられる。また、ラングミュール循環が起こらずに上層の風向と海上風が平行していることが考えられる。



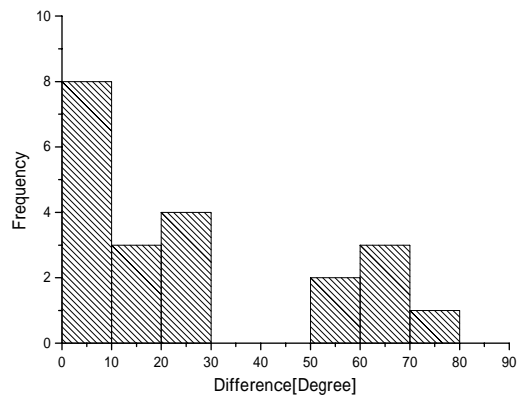
(a) Coherence 0 to 1.0



(b) Coherence 0.7 to 0.8



(c) Coherence 0.8 to 0.9



(d) Coherence 0.9 to 1.0

Fig.6 Histogram of difference for wind direction corresponding to coherence

## 7.終わりに

本研究は JERS-1/SAR 画像の海域部分のパワースペクトルを算出し、スペクトルの積分結果にクロススペクトル法を使用して風向を抽出した。抽出した風向は観測所の風向を利用して風向評価を行った。評価結果は絶対値の平均値が 32 度、標準偏差が 41 度となった。この抽出精度は、他の衛星搭載 SAR と比較すると約 20 度低い。

70 度以上の誤差に関してはラングミュール循環が起こらなかったと考え、スペクトルのピーク列の方向から風向を抽出し、観測所の風向を利用して抽出した風向を評価した。この場合の評価結果は絶対値の平均値が 23 度、標準偏差が 30 度となり、抽出精度は他の衛星搭載 SAR と比較して約 10 度低い。

画像のパワースペクトルから風向を決定する際に計算したコヒーレンスを用いて評価した場合、コヒーレンス 0.9 以上の抽出結果は 40 度以下の風向差となる結果が多く、正しい風向を抽出できる。

本研究で抽出した風向と観測所の示す風向との差は観測所が陸に位置していることから、海上からの風向が陸の影響で変化したことが考えられる。他に、JERS-1/SAR が ERS-1/SAR と比較して SN 比が低いことが原因として考えられる。

## 参考文献

- [1]牛山泉,風力エネルギーの基礎, オーム社, 2005, 263p.
- [2]風車よ回れ, 海風を受けて!, Science Web, 2006 年 5 月, pp.88-91.
- [3]山本義春・齊藤玄敏, JERS-1 合成開口レーダを用いた津軽海峡沿岸部の風向評価に関する研究, 日本リモートセンシング学会第 40 回学術講演論文集, pp.209-120, 2006.
- [4]気象庁,気象観測(電子閲覧室)  
<http://www.data.kishou.go.jp/indem.htm>

- [5]日本海洋データセンター,沿岸海上気象データ  
<http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/2001/wave.jp>
- [6]宇野木早苗, 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版, 1995, pp.276-277
- [7](財)資源・環境観測解析センター,地球観測データからの情報抽出(資源・環境リモートセンシング実用シリーズ 3), pp219-221, 平成 15 年 3 月 31 日
- [8]Gerling, T.W:Structure of the surface wind field from the SEASAT SAR, Journal of Geophysical Research, Vol.91, No.C2, pp.2308-2320, 1986.
- [9]P.W. Vachon, F.W Dobson:Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean, The Global Atmosphere and Ocean, 5, pp.177-187, 1996.
- [10]日野幹雄,スペクトル解析,朝倉書店, 1977, pp.184-191.
- [11]Christopher, R. Jackson, John R. Apel. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, 2005, pp.474
- [12]Shimada, T, H. Kawamura and M. Shimada (2002):An L-Band Geophysical Model Function for SAR Scatterometry Using JERS-1 SAR, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 41, 518-531.