

## 3-4 航空機搭載合成開口レーダーによる海面観測

### 3-4 *Surface Observation by using Airborne Synthetic Aperture Radar*

灘井章嗣

Akitsugu NADAI

海上風は沿岸の海洋環境に対して重要な役割を持っているが、従来の手法では空間分解能の粗さから沿岸近くの海上風を計測することができなかった。そのため、合成開口レーダーによる海上風計測に関する研究が行われているが、海面後方散乱係数の入射角、風速、相対風向に対する依存性をレーダー周波数ごとにモデル化する必要がある。本稿では、航空機搭載合成開口レーダーを用いて、短時間のうちに複数の方向から観測を実施することで、後方散乱係数のモデル化を行う可能性について検討した。

The oceanwinds information is quite important to consider the coastal environment. However, conventional methods cannot measure oceanwinds in coastal region due to their coarse spatial resolution. Therefore, the synthetic aperture radar is noticed as a new method to measure oceanwinds because of its fine spatial resolution. To measure oceanwinds, ocean surface backscattering coefficient has to be modeled as a function of incidence angle, wind speed, and relative wind direction to radar beam at each radar frequency. In this paper, the possibility to build a model of ocean surface backscattering coefficient from multi-azimuthal measurements of same ocean area in a short time by using airborne synthetic aperture radar.

#### 1 はじめに

NICT では航空機搭載合成開口レーダーの研究開発を行っている。合成開口レーダーは、航空機や人工衛星といった移動体に搭載した小口径のアンテナで電波を送受信し、地上を高分解能で観測するレーダーである。移動体のアンテナから送信された電波は観測対象（ターゲット）で散乱され、その一部は移動体のアンテナで受信されるが、受信される電波の周波数は移動体とターゲットの位置関係に対応したドップラー周波数偏移を受けている。合成開口レーダーは、このドップラー周波数偏移からターゲットに対するアンテナ位置を推定することにより、移動体の進行方向に大きな口径を持つ仮想的なアンテナを形成し、実際に用いている小口径アンテナでは達成できない高い空間分解能で地上を観測するレーダーである。

このように、合成開口レーダーは受信波のドップラー周波数偏移を利用しているため、移動体とターゲットの運動がわからなくてはレーダー画像を作成することができない。地上に静止したターゲットであれば移動体の運動からレーダー画像を作成することが可能であり、等速移動するターゲットであればターゲッ

トの運動を推定することによりレーダー画像を作成できる。

海洋は地球表面の約7割を占めており、気候などの地球環境へ大きな影響を与えていることがわかってきている。このため、海洋観測の重要性が認識されてきているが、船舶等を用いた直接観測を多くの地点で継続的に行うことは大変困難である。このため、人工衛星などによるリモートセンシング技術の応用が期待されている。

海洋表面には流れ（海流）のみならず、波（海洋波浪）が存在する。海面の波は1つの周期・波向きを持った成分（波浪成分）だけが存在するわけではなく、多くの波浪成分の合成として海洋表面を覆っている。これらの波浪成分はそれぞれ海洋表面に運動をもたらすため、海面は極めて複雑な運動をしている。このため、海面を合成開口レーダーで観測した場合、地表観測に比べ空間分解能が劣化してしまう。また、ターゲットの運動が合成開口レーダー画像に与える影響は複雑であり、画像からの海洋波浪解析には多くの困難が伴うため、現在も研究が進められている [1]。

海洋環境は海洋波浪や海流により大きな影響を受けるが、これらは海面上を吹く風（海上風）により生じる。

### 3 航空機 SAR による地表面の観測

このため、人工衛星に搭載した散乱計による地球全体の海上風計測が行われている。散乱計による海上風計測は、同じ海面に複数の方向から電波を照射し、散乱された電波の強度分布から風向と風速を算出している。現在実用化されている衛星搭載の散乱計は比較的大きなアンテナを使用しているが、空間分解能は数十 km 程度である。これは地球全体に海上風が及ぼす影響を計測するには十分な分解能であり、気象予報や外洋での波浪推算に用いられている。

一方、海洋生態系を考えた場合には陸地に近い沿岸域の海洋環境が重要となる。沿岸域では海上風は陸上地形の影響を受け、小さい空間スケールで変化する。このため、より高い空間分解能が必要となるが、現在の人工衛星に搭載されている散乱計では空間分解能が不足している。また、アンテナビームが陸地に近づくと、陸地からの強い散乱波の影響により、海上風を計測することができなくなる。このため、合成開口レーダーが持つ高い空間分解能を活用した沿岸域の海上風計測が期待されている。

## 2 合成開口レーダーによる海上風計測

海上風は風向と風速の2つの要素を持っており、照射されたレーダー電波が海面で散乱されて再びレーダーに戻る割合(後方散乱係数)は、風速とレーダービームに対する相対的な風向、入射角及びレーダー周波数に依存する。

現在実用されている衛星搭載散乱計による海上風計測では、複数のレーダービームを用いることにより、同じ海面に複数の方向からほぼ同時に電波を照射することで、これら2つの要素を独立に計測している。

一方、合成開口レーダーは移動体の移動方向に直交する向きに電波を照射するため、1つの合成開口レーダーで複数の方向から同一海面を同時に観測することはできない。複数の合成開口レーダーの協調により、同一海面を複数の方向から同時に観測することは不可能ではないが、観測可能な海面に限られることになり、実現のためのコストが高すぎる。このため、気象モデル [2] や海上風により海面に現れるパターンの解析 [3] により風向を決定したうえで、海面の後方散乱係数から風速を求める方法がとられている。しかしながら、この方法では海上風計測の空間分解能は海上風向を決定する手法に影響される。

合成開口レーダーで海上風に対して独立に反応する2つ以上の後方散乱係数を計測することができれば、合成開口レーダーが本来持つ空間分解能を活用した海上風計測が可能となる。現実的には、複数の周波数を持つ合成開口レーダーよりも、2つの平行偏波を観測

できる合成開口レーダーの方が実現性は高い。しかしながら、現在の衛星搭載合成開口レーダーで平行偏波を常時観測する衛星は無いため、後方散乱係数のモデル関数も求められておらず、平行偏波観測による海上風計測の可能性も不明である。

NICT では全偏波観測が可能な X バンド航空機搭載合成開口レーダーの研究開発を実施してきた。航空機搭載合成開口レーダーは、同じ海域を海上風が変化しないと仮定できる短時間のうちに複数の方向から観測することが可能である。この特徴を活用すれば、ある風速条件における後方散乱係数のモデル関数をより簡便に求められる可能性がある。

本研究では、航空機搭載合成開口レーダーを用いて短時間のうちに複数の方向から行った同一海面の観測により、海面後方散乱断面積の入射角、相対風向依存性を計測する可能性について検討する。

## 3 観測

観測には NICT と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が共同で開発及び運用を行ってきた、航空機搭載二周波偏波合成開口レーダー: Pi-SAR [4] を用いた観測で得られた X バンド SAR の観測結果を基に解析を行った。Pi-SAR の主要な諸元を表 1 に記す。

表 1 Pi-SAR の主要諸元

周波数帯	X	L	
中心周波数 [GHz]	9.5547	1.2715	
バンド幅 [MHz]	100	50	
アンテナナディア角 [deg]	40 ~ 60	38	
ビーム幅 [deg]	垂直 (10 dB 幅)	-35 ~ 5	-19 ~ 19
	水平 (3 dB 幅)	2.3	9.8
偏流角補正範囲 [deg]	-6.5 ~ 6.5	N/A	
分解能 [m]	スラントレンジ	1.5	3.0
	アジマス	1.5	3.0
ピクセル間隔 [m]	スラントレンジ	1.25	2.5
	アジマス	1.25	2.5
ノイズ等価 NRCS [dB]	-40	-30	

表 2 観測諸元

観測番号	9001	9002	9003
観測時刻	11:37	11:52	12:14
観測高度 (m)	11898	11884	11886
軌道方位角 (deg)	-150 (SW)	+030 (NE)	-090 (W)
対地速度 (m/s)	199	207	162
偏流角 (deg)	-14.9	+14.4	-6.9
入射角範囲 (deg)	5.5-61.8	5.6-61.9	5.6-61.9
中心 slant range (m)	16623	16618	16625
中心 R/V (s)	83.5	80.3	102.6
相対風向	down-wind	up-wind	cross-wind
X-band (deg)	-178.5	19.0	129.6
L-band (deg)	175.1	25.5	123.1

観測は日本海にある山形県飛鳥周辺海域を対象に、2005年02月15日11:36-12:15(JST)に行った。観測諸元を表2に示す。この観測領域では、観測時には冬季モンスーンによる北西風が吹いており、観測対象海域の空間スケール(25 km 四方程度)は海上風の空間スケールに対して大きくないと考えられる。またすべての観測が45分程度のうちに終了していることから、観測期間を通して海上風は一定であったと仮定する。

飛鳥にはアメダス観測点が設置されており、観測期間のほぼ中央時にあたる12時にはWNW13 m/sの風が観測されていた。さらに、再生画像に現れた飛鳥風下側のシャドー域の広がりから、観測時の風向を310度とした。

観測領域のうち、飛鳥やその周辺に存在する岩場の影響を受けていない海面を対象に、アジマス10 kmの領域に対して再生処理を行った。観測可能なグラウンドレンジはプラットフォームの移動速度により影響を受けるため、それぞれの観測における最大観測グラウンドレンジ範囲を再生対象とした。

交差偏波に対する海面後方散乱係数は平行偏波に比べて小さいため、外来ノイズの影響を受けやすい。また、比較に用いる衛星搭載合成開口レーダーを用いて統計処理により作成されたモデル関数XMOD2 [5] [6]は平行偏波の1つであるVV偏波に対するモデルとなっている。そこで、本研究では解析対象をVV偏波に限定した。さらに、Xバンド航空機搭載散乱計による計測結果 [7] との比較も併せて行った。

## 4 航空機 SAR によるモデル解析

海面後方散乱係数 $\sigma_0$ について、モデル関数XMOD2と同様に、風速 $U$ 、相対風向 $\phi$ 、入射角 $\theta$ を用いて以下のようなモデルを考える。

$$\sigma_0 = a_0(U, \theta) (1 + a_1(U, \theta) \cos(\phi) + a_2(U, \theta) \cos(2\phi)) \quad (1)$$

ここで、 $a_0$ は風速にのみ依存する係数である。一方、 $a_1$ 、 $a_2$ は風速と相対風向に依存する係数である。特に、 $a_1$ が風上向き観測と風下向き観測における後方散乱係数の差を決めるのに対し、 $a_2$ は風に平行な観測と直交する観測における後方散乱係数の差を決める。加えて、すべての係数は入射角の関数となっている。

本研究では、航空機SARを用いて3方位角から観測した、同じ入射角に対する海面後方散乱係数を組み合わせることにより、ある入射角における係数 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ を算出する。

実際の再生画像には波浪など海洋表面現象由来の後方散乱係数変化が存在する。これらによる影響を除くために空間平均を行った。アジマス方向にはアジマス

平均処理範囲にわたり、レンジビンごとに単純平均処理を行う(アジマス1 km 当たり800点)。レンジ方向の平均化は、グラウンドレンジ-入射角変換の際にGaussianフィルタを用いることで空間平均を行う。

本研究では航空機搭載合成開口レーダーによる海面後方散乱係数モデルの作成に空間平均サイズが及ぼす影響について検討した。

## 5 結果

### 5.1 レンジ平均スケールの影響

レンジ平均スケールの影響を検討するため、それぞれの観測で海面後方散乱係数を算出する際のレンジ-入射角変換で使用するGaussianフィルタのe-folding scaleを変化させた結果を図1に示す。アジマス方向には5 kmの空間平均を行っている。

海面後方散乱係数は入射角が小さい時には大きく、入射角の増大に伴い減少する。また、レンジ平均スケールが小さい(e-folding scaleが小さい)場合には、算出された後方散乱係数に小さな入射角スケールの変動が存在するが、e-folding scaleの拡大につれ広いレンジ範囲での平均化が行われるため、変動は小さくなる。この変動は海洋波浪や小さな空間スケールを持つ海上風変化などの影響と考えられる。

海面後方散乱係数のモデル関数を考えるとき、このような小さな入射角スケールを持つ変化は存在しないと考えられるため、ある程度大きなe-folding scaleを設定することが必要であるが、大きすぎるe-folding scaleは入射角変化が存在する状況では不相当と考えられる。このため、以降の解析ではe-folding scaleを2度とする。

### 5.2 アジマス平均スケールの影響

それぞれの観測において、合成開口処理したアジマス方向10 kmのデータに対し、1 kmごと及び5 kmごとにアジマス平均化した後方散乱係数を図2に示す。

アジマス平均スケールを1 kmにした場合、どの観測番号においても後方散乱係数には数dBのばらつきがみられる。一方、このばらつきはアジマス位置との明確な対応は見られないため、大きなスケールを持つ海上風変化ではなく、数km程度の空間スケールを持つ海上風変化の影響と考えられる。アジマス平均スケールを5 kmとした場合、観測番号9001(図2a)では後方散乱係数の変化はかなり小さくなるが、観測番号9002(図2b)、9003(図2c)では1 dB程度のばらつきが残っている。

本研究では、観測領域では日本の冬季モンスーン期特有の北西風が吹いていたことから、その空間スケール

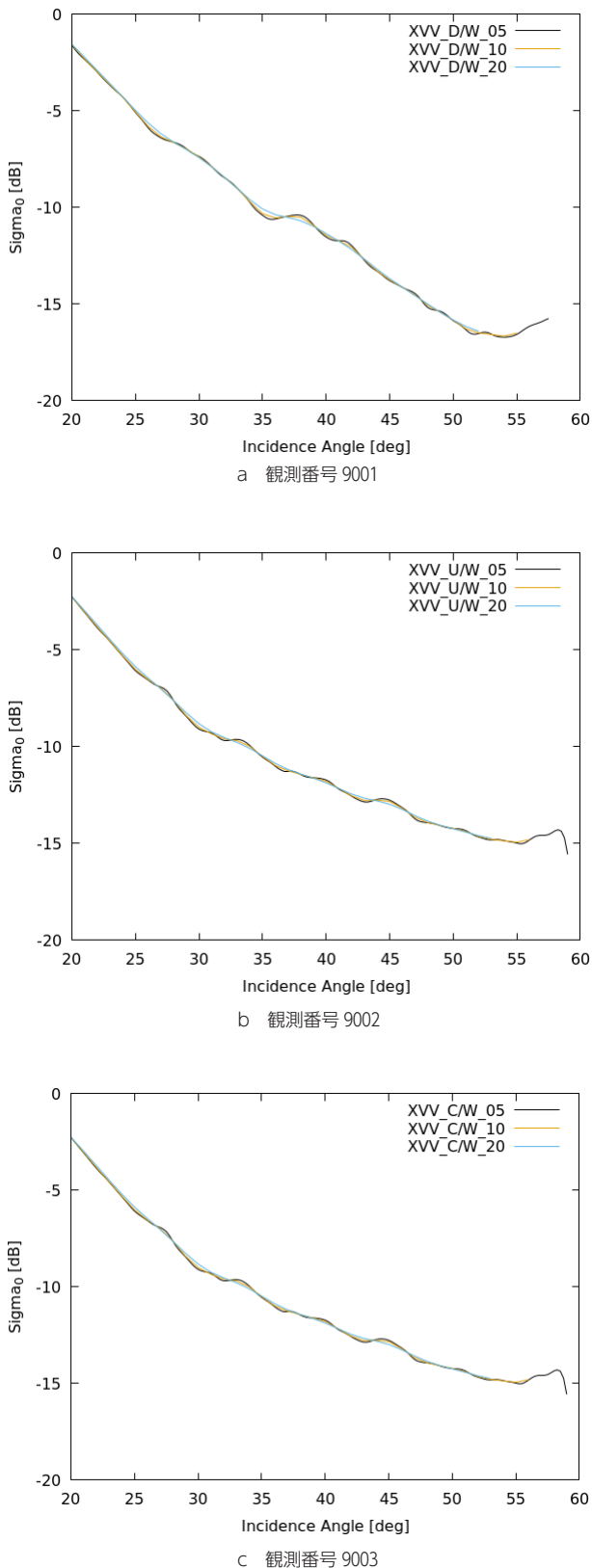


図1 海面後方散乱係数算出におけるレンジ平均スケールの影響  
 黒：e-folding scale 0.5度。橙：e-folding scale 1度。  
 青：e-folding scale 2度。

ルは観測領域に比べ十分大きいと考え、海面波浪などによる小さな空間スケールを持つ後方散乱係数の変化を平均化すればよいと考えていた。図2にみられる後方散乱係数のばらつきは、5 km 程度のスケールを持つ後方散乱係数の変化が実際に存在することを示唆しており、ある海上風条件下で海面後方散乱係数の代表値を求める場合には5 km 以上のアジマス平均処理が必要と考えられる。

### 5.3 海面後方散乱係数の入射角、相対風向依存性

アジマス平均化スケールの影響を検討するため、アジマス平均スケールを5 km 及び10 km として求めた海面後方散乱係数の入射角及び相対風向依存性を図3に示す。図3には衛星搭載合成開口レーダーで求められたモデル及び航空機搭載散乱計による結果も併せて示す。

海面後方散乱係数の入射角依存性に対するアジマス平均スケールの影響は小さい。また、モデルの計算結果に対しては数 dB 小さい後方散乱係数となっている。一方、航空機搭載散乱計の結果とは良い一致を見せている。

一方、海面後方散乱係数の相対風向依存性については、係数 $a_1$ 、 $a_2$ ともモデルに対して大きな値となっている。特に、入射角35度から45度で表れている係数 $a_2$ の1に近い値は、式(1)で計算される後方散乱係数が負となる可能性を示しており、この観測だけに基いて後方散乱係数モデルを作成することが不相当であることを示している。しかしながら、アジマス平均スケールを10 km とした場合、係数 $a_2$ はアジマス平均スケール5 km よりも小さな値となっており、サンプル数を増大することでモデルの精度を改善できる可能性が示されている。

加えて、係数 $a_1$ については入射角32度においてはモデルよりも散乱計に近い値となっており、モデルにも改善の余地があることを示唆している。

## 6 終わりに

本研究では、航空機搭載合成開口レーダーを用いて、短時間のうちに複数の方向から行った同一海面の観測により海面後方散乱係数の入射角、相対風向依存性を計測する可能性について検討した。海面後方散乱係数が持つ依存性を決めるためには、ある海上風条件下における代表的な海面後方散乱係数を決める必要がある。広域的には一様な海上風であっても、その中には小さな空間スケールを持つ変動が存在するため、空間平均処理により代表的な後方散乱係数を算出する必要がある。

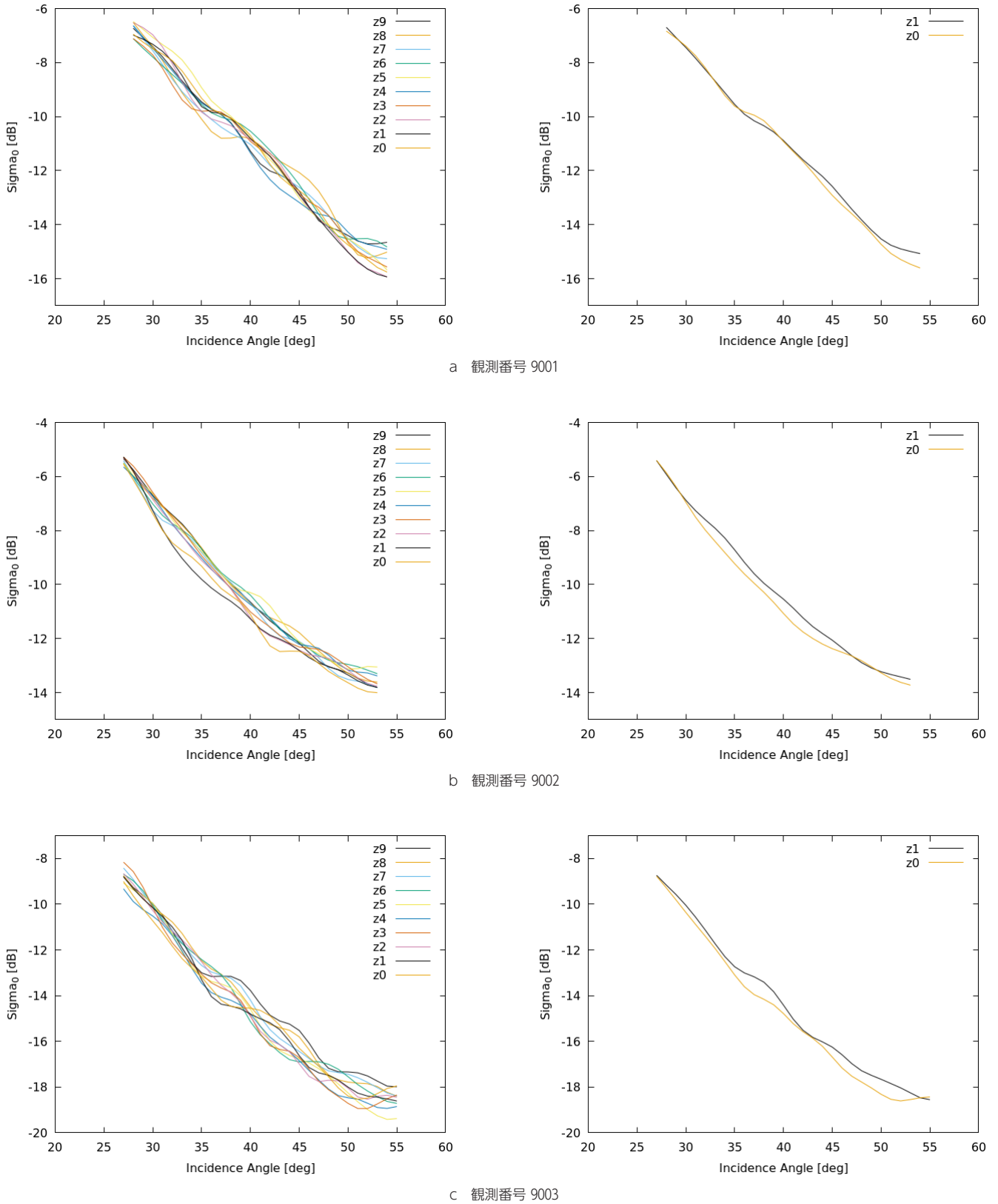


図2 海面後方散乱係数算出におけるアジマス平均スケールの影響

そこで、後方散乱係数の算出において、空間平均スケールが及ぼす影響について検討した。その結果、風速場の変化が小さいと考えられる冬季の日本海に吹く北西風であっても、5 km 以上の空間スケールを持つ

海上風の変動による海面後方散乱の変化を除去する必要があることが示された。

合成開口レーダーによる海上風計測には空間平均処理を行う必要があるが、空間平均処理サイズに関する

### 3 航空機 SAR による地表面の観測

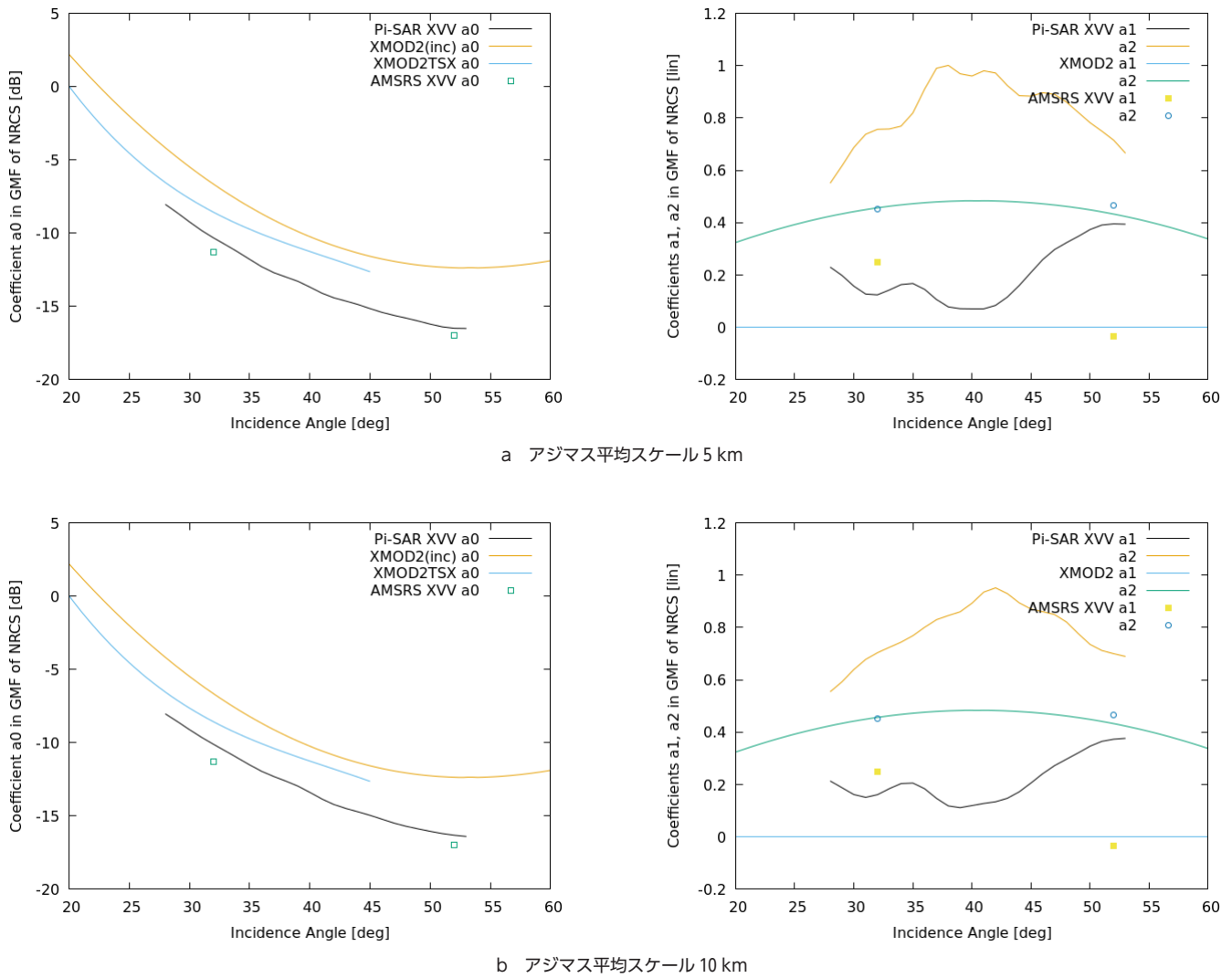


図3 海面後方散乱係数の入射角依存性

知見はあまり多くない。合成開口レーダーによる海上風計測は、海上風が小さな空間スケールをもつ沿岸域への応用が期待されているため、必要な(若しくは適した)空間平均スケールに関する検討が今後必要と考えられる。

#### 【参考文献】

- 1 Y. He, H. Shen and W. Perrie, "Remote Sensing of Ocean Waves by Polarimetric SAR," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol.23, pp.1768–1773, Dec. 2006.
- 2 A. Mouche, B. Chapron, B. Zhang, and R. Husson, "Combined Co- and Cross-Polarized SAR Measurements Under Extreme Wind Conditions," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.55, pp.6746–6755, Dec 2017. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2732508.
- 3 S. Zecchetto, "Wind Direction Extraction from SAR in Coastal Areas," Remote Sensing, 10(2), 261, Feb. 2018. DOI: 10.3390/rs10020261.
- 4 T. Kobayashi, T. Umehara, M. Satake, A. Nadai, S. Uratsuka, T. Manabe, H. Masuko, M. Shimada, H. Shinohara, H. Tozuka, and M. Miyawaki, "Airborne dual-frequency polarimetric and interferometric SAR," IEICE Trans. Commun., vol.E83-B, no.9, pp.1945–1954, Sept. 2000.
- 5 F. Nirchio and S. Venafra, "XMOD2 -- An improved geophysical model function to retrieve sea surface wind fields from Cosmo-Sky Med X-band data," European Journal of Remote Sensing, vol.46, pp.583–595, 2013. doi:10.5721/EuJRS20134634.
- 6 X.-M. Li and S. Lehner, "Algorithm for Sea Surface Wind Retrieval From TerraSAR-X and TanDEM-X Data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.52, pp.2928–2939, 2014. DOI:10.1109/TGRS.2013.2267780.
- 7 H. Masuko, K. Okamoto, M. Shimada, and S. Niwa, "Measurement of Microwave Backscattering of the Ocean Surface Using X Band and Ka Band Airborne Scatterometer," J. Geophys. Res., vol.91, no.1, pp.13065–13083, 1986.

灘井章嗣 (なだい あきつぐ)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
沖縄電磁波技術センター長  
海洋リモートセンシング