

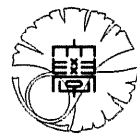


電子 408

学位論文

合成開口レーダ画像における  
空間的な濃度の揺らぎに関する研究

福田 盛介

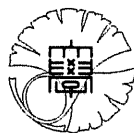


東京大学大学院  
工学系研究科 電子工学専攻

1999年12月

A STUDY ON SPATIAL FLUCTUATION IN SYNTHETIC  
APERTURE RADAR IMAGES

Seisuke Fukuda



Submitted to the University of Tokyo  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Engineering

December 1999

## Abstract

本論文は「合成開口レーダ画像における空間的な濃度の揺らぎに関する研究」と題し、リモートセンシング用のマイクロ波センサである、合成開口レーダ (SAR) が提供する画像にみられる濃度の揺らぎに関連した、種々の課題への取り組みをまとめている。SAR 画像は、光学センサの画像や航空写真などと比較すると、しばしば視覚的に異質に映るが、これは、植生や土壌を透過する SAR の特徴に加え、画像内の空間的な濃度の揺らぎによるものであり、そのソースであるスペックルとテクスチャが、本論のキーワードとなっている。スペックルとテクスチャは互いに重畳した形で画像上に存在し、結果として観察される濃度の揺らぎは、雑音と情報の両方の側面を併せもつことに留意し、その性質、および処理、活用方法を論じる。本論文は全 8 章から構成される。

第 1 章は「序論」であり、リモートセンシングにおける SAR の位置付け、ならびに SAR 画像の濃度の揺らぎの一般的な性質を論じた上で、本論文の目的と構成を示している。

第 2 章では、「基礎」として、本論文を理解するために必要なことがらを概説する。具体的には、スペックルの統計、レーダポーラリメトリ、ウェーブレット解析についてまとめる。

第 3 章「ウェーブレットを用いたスペックルの低減」では、SAR 画像のスペックルを低減するための、ウェーブレット分解を応用したフィルタ (WSF) を新たに提案する。スペックルは、コヒーレントな撮像システム一般にみられる現象であり、分解能セル内の各散乱点からの散乱波が、ランダムに干渉することによって生じる。スペックルによる濃度の揺らぎは画像判読を妨げ、SAR 画像においては雑音として扱われる。したがって、これを平滑するための、エッジやテクスチャの保存性や視覚的自然性の観点からみて、バランスのとれたフィルタの構成が必要とされている。提案する WSF は、スペックルによる高周波な揺らぎが、ウェーブレット分解で得られる差分画像の振幅 (ウェーブレット係数) を圧縮することにより抑えられる、というアイデアに基づいている。その際、エッジなどの画像構造を保存するために、選択的な処理アルゴリズムを構築し、視覚的に自然な処理画像を出力することを目指すものである。実際、WSF の良好な性能は、シミュレーションや数種の実画像への適用において示されている。またここでは、フィルタパラメータと平滑効果の関係の定量的な考察を行っている。このことは、homomorphic フィルタリングとの関わりについてや、ケンナウ行列で与えられた多偏波データへの適用性など、WSF に関する発展的な研究へと繋がる。さらに、WSF のパラメータを適当に設定することによる、テクスチャ保存型のスペックル低減の一つのアプローチをも提示する。

第 4 章は、「テクスチャ情報に基づく多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類」を試みるものである。SAR 画像におけるテクスチャとは、スペックルやシステム雑音以外の、撮像される表面に固有な空間的多様性や、散乱の物理的な機構に由来する画像濃度の揺らぎを指す。よって、テクスチャの情報を積極的に用いることで、ターゲットを把握することが可能になる。そこでは、マルチスケール性を有する新たなテクスチャの表現として、過剰系ウェーブレット分解によりテクスチャ情報を抽出し、画像分類のための特徴ベクトルを構成する方法を案出する。また、実際の分類手法においては、多偏波なデータを処理する際に適応的に偏波を

選択する手順や、使用する特徴量の数を絞りこむ方法などを検討する。適用例としては、農耕地帯を撮した多周波／多偏波な SAR 画像を、非常に高い精度で分類した結果を、カラーマップや判別効率表によって示す。

第5章「テクスチャ特徴としてのフラクタル次元」では、SAR 画像におけるテクスチャの自己相似性に着目する。すなわち、テクスチャの揺らぎを捉える特徴量として、フラクタル次元を取り上げるものであり、その推定式を新たに導出する。具体的には、2次元非整数ブラウン運動 (fBm) モデルを介し、フラクタル次元に対応するハースト指数を、ウェーブレット分解の解像度と差分画像内のデータの分散の関係から推定できることを数学的に示す。また、この推定法により、SAR 画像のフラクタル性を実証するとともに、そのフラクタル次元の観測周波数や偏波への依存性を明らかにする。

第6章は、「高分解能な SAR 画像における濃度の揺らぎ」と題し、現在から将来にかけての SAR システムの分解能の向上を鑑み、高分解能な画像の統計的性質を考察する。これまでに、分解能が波長の数倍程度であるシステムが供する SAR 画像では、テクスチャの影響が増大する、もしくは分解能セル内の散乱点の個数が減少するなど、その濃度の揺らぎの性質が従来の統計から変化することが予想されていたが、ここでは実際に、多周波／多偏波な高分解能画像の解析を行う。これは、スペckルとテクスチャを、より統合的に扱う研究であるともいえる。詳細としては、スペckルとテクスチャを乗法的に扱う積モデル、およびそこから導かれる K 分布の妥当性に焦点をあて、森林や市街地の領域について、データとの適合を精査する。その結果、解析したデータ (強度) は、森林域で K 分布によく適合するのに対し、市街地の領域ではターゲットの極度な不均質性により、通常の数値分布はおろか、K 分布からさえも逸脱すること、また K 分布に適合する森林域においても、そのオーダーパラメータは、従来の分解能の SAR 画像と比較して小さな値となり、高分解能化が確かにテクスチャの効果を高めていること、などを明らかにする。さらに、単純な積モデルでは解釈が困難な、L バンドにおける森林域のオーダーパラメータの偏波依存性を説明するために、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤを取り扱う新たなモデルを提案する。

第7章「K 分布に従う SAR 画像にみられる線状構造」では、第6章の内容をうけ、道路などの線状ターゲットの検出の妨げとなる、スペckルによる暗線模様の性質を、高分解能化の弊害の一例として、K 分布画像にまで拡げて議論する。SAR 画像の空間的な濃度の揺らぎは、暗い画素の連なりを確率的に発生させ、画像上に物理的に意味のない線状のパターンをもたらすが、K 分布に従う画像においては、そのような線状パターンが、一般的なスペckル画像と比べ、より鮮明な形で生起することを示す。また、K 分布画像におけるそれらのパターンは、マルチルック処理が施された場合でも、周囲と識別され得るだけの十分な閾値を有し、その影響は容易には回避できないことについて注意を促す。

第8章は「結論」であり、以上の研究成果を総括する。

## Abstract

This thesis presents the result of several works on spatial fluctuation in synthetic aperture radar (SAR) images. SAR is an active remote sensing sensor that operates in the microwave region. Compared with optical images or aerial photographs, SAR's providing images sometimes give a different impression because of the spatial fluctuation. Two major sources of the fluctuation in SAR images are **speckle** and **texture**. Speckle is regarded as a troublesome noise, caused by the interaction of reflected waves from various independent scatterers within a resolution cell, while texture has useful information which originates from the intrinsic spatial variability of the scene.

The thesis consists of eight chapters.

In the first chapter, SAR remote sensing and spatial fluctuation observed in SAR images are briefly reviewed. Also the objective and the outline of the thesis are presented.

Chapter 2 gives background descriptions which facilitate the understanding of the thesis; speckle formation/statistics, radar polarimetry, and wavelet analysis.

In Chapter 3, a wavelet-based filter to reduce speckle in SAR images is presented. The filter, referred to as WSF, is based on an idea that speckle may be suppressed by reducing the amplitude of the pixels in detail images (i.e., the wavelet coefficients) of each wavelet decomposition level. Edges are detected in detail images themselves, and are preserved by releasing the amplitude reduction around them. Simulations and application to SAR images show that the performance of the WSF is satisfactory in both speckle smoothing and edge preservation, and in generating visually-natural images as well. In the latter half of the chapter, the relation between the smoothing effect of the WSF and the parameters is fully investigated. The smoothing effect is dependent on the decomposition level and the degree of amplitude reduction of detail images. Using this relation, the WSF combined with the homomorphic filtering is studied. Furthermore, the polarimetric WSF (i.e., independently filtering each element of Kennaugh matrices) is considered. An approach for speckle reduction with texture preservation is also derived.

In Chapter 4, a wavelet-based texture feature set is introduced. It consists of the energy of subimages obtained by the overcomplete wavelet decomposition of local areas in SAR images, where the downsampling between decomposition levels is omitted. The feature set is successfully applied to multifrequency polarimetric AIRSAR images of the Flevoland site with thirteen classes of land covers. In the classification, the effective methods of polarization selection and feature reduction are also devised.

In Chapter 5, fractal dimension is examined as a novel texture feature of SAR images. Many natural scenes can be considered "statistically self-similar". When such a 3-D surface is imaged by SAR, fractal dimension of the image is featuring roughness of the surface

intuitively. A new technique for estimating fractal dimension of an image using the wavelet decomposition, which employs the fractional Brownian motion (fBm) model, is proposed. Its application to multifrequency polarimetric SAR images shows that the images exhibit fractal behavior, and that the fractal dimension has a potential for the effective texture feature.

In Chapter 6, spatial fluctuation observed in high-resolution SAR images is discussed. Especially the validity of the product model and the corresponding K-distribution for high-resolution images is examined. Of particular interest are the order parameter of the K-distribution for several types of clutter and its relation to the polarization. In experimental tests, low order parameters are measured for most clutter, indicating the high-resolution enhances the texture effect. Also an extension of the product model taking account of backscattering from multiple layers is presented, in order to explain polarimetric variation in the measured order parameters for the forest areas at *L*-band.

Speckle statistically brings series connections of dark pixels, which can be observed as dark line features in SAR images. The dark lines have no physical meaning. In Chapter 7, line patterns of that kind in K-distributed SAR images are studied. It is stochastically explained that the dark line patterns in 1-look K-distributed images can be observed more distinctly than those in exponential distributed images. It is further revealed that such patterns in K-distributed images may remain even if the images are multilooked. The experiments on simulated images as well as on actual SAR images confirm the explanation.

Finally, in Chapter 8, the achievements obtained in Chapter 3 to 7 are summarized, and the final conclusions are drawn.

## Contents

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	リモートセンシングと合成開口レーダ	2
1.2	SAR 画像における濃度の揺らぎ	5
1.3	本論文の目的と構成	8
	Notes	11
	References	12
<b>2</b>	<b>基礎</b>	<b>13</b>
2.1	あらまし	14
2.2	スペckルの生成と統計	14
2.3	レーダポーラリメトリ	19
2.4	ウェーブレットと多重解像度解析	24
2.5	まとめ	33
	Notes	33
	References	34
<b>3</b>	<b>ウェーブレットを用いたスペckルの低減</b>	<b>36</b>
3.1	あらまし	37
3.2	スペckル低減フィルタ	37
3.3	ウェーブレットを用いたスペckル低減フィルタ (WSF) の提案	39
3.4	WSF の平滑効果	51
3.5	様々なフォーマットのデータへの WSF の適用	53
3.6	テクスチャを保存するスペckル低減	57
3.7	まとめ	60
	Notes	60
	References	61
<b>4</b>	<b>テクスチャ情報に基づく多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類</b>	<b>63</b>
4.1	あらまし	64
4.2	テクスチャ特徴と SAR 画像の分類	64
4.3	ウェーブレットによるテクスチャ特徴の抽出	66
4.4	分類手法の実際	68
4.5	Flevoland テストサイトの分類結果	71
4.6	まとめ	77
	Notes	77
	References	78

5	テクスチャ特徴としてのフラクタル次元	80
5.1	あらまし	81
5.2	フラクタルと自己相似	81
5.3	非整数ブラウン運動	82
5.4	ウェーブレット分解による画像のフラクタル次元の推定手法	85
5.5	SAR 画像のフラクタル次元の推定	89
5.6	まとめ	94
	Notes	94
	References	95
6	高分解能な SAR 画像における濃度の揺らぎ	97
6.1	あらまし	98
6.2	高分解能な SAR 画像の統計	98
6.3	K 分布と積モデル	100
6.4	高分解能な SAR 画像の統計的性質の解析/解釈	104
6.5	まとめ	115
	Notes	115
	References	117
7	K 分布に従う SAR 画像にみられる線状構造	119
7.1	あらまし	120
7.2	スペckルがもたらす暗い線状パターン	120
7.3	K 分布に従う画像における線状パターンの生起	125
7.4	線状パターンの検出実験の結果	127
7.5	まとめ	133
	Notes	133
	References	134
8	結論	135
	List of Publications	138
	Acknowledgement	140



## List of Figures

1-1	SAR のジオメトリ	3
1-2	SAR 画像の例	7
1-3	本論文の構成	10
2-1	分解能セル内の散乱点	17
2-2	複素平面上のランダムウォーク	17
2-3	SAR 画像の強度ヒストグラム	18
2-4	偏波楕円	23
2-5	偏波シグネチャ	23
2-6	ウェーブレット分解と再構成	29
2-7	画像のウェーブレット分解	30
2-8	Daubechies のスケーリング関数とウェーブレット	31
3-1	WSF による処理前後のエッジのふるまい	41
3-2	エッジ情報を検出するウィンドウ	41
3-3	差分画像におけるエッジ情報	42
3-4	WSF のエッジ保存性能	46
3-5	WSF の AIRSAR 画像への適用 — (1) Flevoland	48
3-6	ウェーブレット分解のレベルに関する処理画像の比較	49
3-7	WSF の AIRSAR 画像への適用 — (2) Kilauea 火山	50
3-8	homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF	54
3-9	homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF(処理例)	54
3-10	WSF が施されたケンナウ行列による偏波シグネチャ	56
3-11	WSF によるテクスチャを保存するスペckル低減	58
3-12	WSF によるテクスチャを保存するスペckル低減(ヒストグラム)	59
4-1	画像の過剰系ウェーブレット分解	67
4-2	分類の流れ図	68
4-3	Flevoland サイトの原画像	73
4-4	分類に用いた偏波画像	74
4-5	分類結果のカラーマップ	75
5-1	非整数ブラウン運動	84
5-2	合成テクスチャ画像のフラクタル次元	91
5-3	月の表面画像(SIDBA)のフラクタル次元の推定	92
5-4	分解レベルに対する差分画像の分散の片対数プロット	93

---

6-1	高分解能セル内の散乱点	99
6-2	負の二項分布の確率密度関数	103
6-3	解析対象とした PI-SAR 画像	107
6-4	PI-SAR データのヒストグラムと K 分布の適合結果	112
6-4	PI-SAR データのヒストグラムと K 分布の適合結果 (続き)	113
6-5	分解能セルの統合	114
7-1	線状パターン	123
7-2	K 分布画像に生起することが期待される線状パターンの強度の閾値	126
7-3	模擬 K 分布画像において検出された暗い線状パターン	128
7-4	暗い線状パターンが検出された模擬 K 分布画像の割合 (1 ルック)	129
7-5	暗い線状パターンが検出された模擬 K 分布画像の割合 (3 ルック)	129
7-6	線状パターンの検出実験に用いた 1 ルックの PI-SAR 画像のヒストグラム	131
7-7	線状パターンの検出実験に用いた 3 ルックの PI-SAR 画像のヒストグラム	131
7-8	線状パターンの検出実験に用いた AIRSAR 画像のヒストグラム	132
7-9	暗い線状パターンが検出された SAR 画像中の正方パッチの割合	132

## List of Tables

1-1	主要な SAR システム	4
2-1	Daubechies のウェーブレットのツースケール列	32
3-1	WSF の一様領域の平滑効果	45
4-1	分類に用いた偏波	73
4-2	分類の判別効率表	76
4-3	分類の判別効率表 (DoC に基づき特徴ベクトルの次元数を半分に削減した場合)	76
5-1	Raco サイトの推定フラクタル次元	93
6-1	PI-SAR の諸元	106
6-2	オーダパラメータの推定結果	112
7-1	線状パターンの数	124

# Chapter 1

## 序論



### 1. Introduction

In the first chapter, SAR (synthetic aperture radar) remote sensing and spatial fluctuation observed in SAR images are briefly reviewed. Also the objective and the outline of the thesis are presented.

## 1.1 リモートセンシングと合成開口レーダ

「地球は青かった」。世界初の宇宙飛行士, Gagarin の言である。遠く離れた宇宙空間から (remote), 地球を見た (sensing), 人類史上初のこの行為は, 広い意味においてのリモートセンシングであると捉えられる。狭義には, リモートセンシングとは, 航空機や衛星に搭載したセンサを介し, 地球環境の状態を表現する諸量を計測する, より能動的な行為を指す<sup>1</sup>。Gagarin から 38 年余りを経た現在, 地球規模のグローバルな環境意識の高まりから, リモートセンシングが担う責任と可能性は非常に大きくなっている。本論文では, リモートセンシングに用いられるマイクロ波映像センサの一つである, 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) が供する画像に関する研究について述べる。

一括してリモートセンシングと称される技術には, 多様な方式が存在する。ここでは, 二つの分類基準を提示する。一つは波源による分類であり, 受動/能動方式に分けられる。受動方式は, センサ以外から発せられた電磁波の散乱やターゲットからの放射を受信するものである。これに対し, 能動方式は, センサ自身が照射する電磁波のターゲットからの散乱を測定するものである。もう一つの分類基準は, 電磁波の波長に関するものである。リモートセンシングで用いられる波長帯は幅広く, 可視光領域からマイクロ波, UHF 帯にまで及ぶ。一般的には, これを光学センサとマイクロ波センサに大別する。この分類基準によれば, SAR は能動方式のマイクロ波センサと位置付けられる。

光学センサとマイクロ波センサは多分に相補的な特徴を有し, 総合的な環境モニタリングには, 両者を混合した形態の運用が求められる<sup>2</sup>。SAR に代表されるマイクロ波センサの, 光学センサに対する利点としては, 天候や昼夜を問わず観測が可能であること, 植生や砂層といった媒質への透過性をもつこと, などを挙げることができる。このため, 現在までに, 各国で SAR を搭載した様々なシステムが開発, 計画されてきた。表 1-1 に, 主要な SAR システム, およびその諸元を示す<sup>3</sup>。例えば国内についてみると, 日本初の SAR 搭載衛星 JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite; ふよう 1 号) は, 昨年 10 月に 6 年半にわたる運用を終えた。これをうけ, より機能や性能を向上させた SAR (Phased Array type L-band SAR; PALSAR) が, 来世紀初頭に打ち上げられる陸域観測技術衛星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) に搭載される予定となっている。また, 表 1-1 を通して, 各システムが高分解能化, 多偏波観測 (ポーラリメトリ; polarimetry) を追求している様子が伺える。

SAR は, アンテナから地表面に向けて位相の揃ったマイクロ波を照射し, その後方散乱を同じアンテナで受信する。マイクロ波の照射方向であるレンジ (range) 方向は, プラットホームの進行方向, つまりアジマス (azimuth) 方向に対して, 横斜め下方である。このようなシステムは, サイドルッキングレーダ (side-looking radar) と呼ばれる。図 1-1 に, SAR の基本的なジオメトリを示す。

アンテナ面の電界分布が一様分布に近いアンテナにおいては, アジマス, レンジ両方向のビーム幅 (半値幅)  $\beta_a$ ,  $\beta_r$  は, それぞれ  $\lambda/d_a$ ,  $\lambda/d_r$  で与えられる。  $d_a$ ,  $d_r$  はアジマス, レン

ジ方向のアンテナ長,  $\lambda$ は波長である. 一般的な SAR では  $d_a > d_r$  であるため, ビーム幅は  $\beta_a < \beta_r$  となる. このようなアジマス方向に狭く, レンジ方向に広いビームを用い, プラットホームの移動にしたがって地表を帯状に掃引していくことにより, 地表面の映像化がなされる.

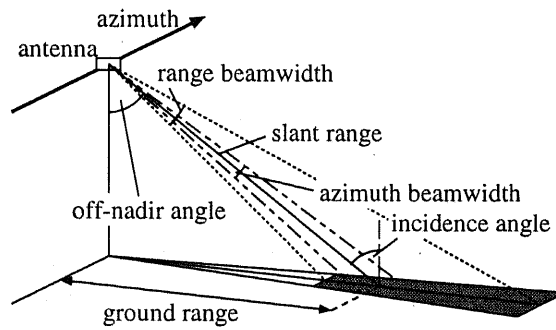


図 1-1. SAR のジオメトリ.

Fig. 1-1. Geometry of SAR.

表 1-1. 主要な SAR システム.  
Table 1-1. Major SAR systems.

		resolution[m] /looks	band	polarization
SIR-C/X-SAR	NASA/JPL	25/4	L,C,X	HH,HV,VH,VV****
ERS-1,2	ESA	30/4	C	VV
JERS-1	Japan	18/3	L	HH
Radarsat	Canada	10-100/1-8	C	HH
Envisat/ASAR*	ESA	30/4	C	HH&VV or HH&HV or VV&VH
LightSAR*	NASA/JPL	3-5/1-2**	L***	HH, HV, VH, VV
ALOS/PALSAR*	Japan	10/2	L	HH or VV
SkyMed/COSMO*	Italy	3/1	X	HH or VV
AIRSAR	NASA/JPL	6.6×12/4	P,L,C	HH,HV,VH,VV
EMISAR	Denmark	2/1	L,C	HH,HV,VH,VV
PI-SAR	Japan	3×0.75/1 1.5×0.375/1	L X	HH,HV,VH,VV

The upper eight missions are spaceborne, and the lower three are airborne; strictly speaking, SIR-C/X-SAR is the "shuttle-borne" mission.

\* Planned missions

\*\* High-resolution mode

\*\*\* C- or X- band is being considered additionally.

\*\*\*\* The polarization of X-SAR is VV only.

## 1.2 SAR 画像における濃度の揺らぎ

SAR による画像は、光学センサの画像や航空写真などと比較して、それを初めて目にするユーザに対してしばしば異質感を与える。これは、植生や土壌などを透過する SAR の特徴に加え、画像内の空間的な濃度の揺らぎによるものである。SAR 画像の濃度の揺らぎを生成するソースとしては、スペckル (speckle) とテクスチャ (texture) が挙げられる。この二つの用語は、以降本論文における重要なキーワードである。

スペckルは、SAR のみならず、レーザイメージングなどコヒーレントな撮像システム一般にみられる現象であり、分解能セル内の各散乱点からの散乱波が、ランダムに干渉することによって生じる。これまでに、スペckルの統計的性質についての研究は精力的に行われており、完全に発達したスペckル (fully-developed speckle, 2.2 参照) においては、散乱電界の強度  $I$  が次式のような指数分布に従うことが明らかになっている [GOO75]。

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (1.1)$$

$\langle I \rangle$  は  $I$  の期待値を表す。指数分布の標準偏差はその平均に等しいことから分かるように、スペckルによる揺らぎは非常に激しく、画像判読を著しく妨げる。このため、SAR 画像内のスペckルは、一般的に雑音として扱われる。

実際に利用される SAR 画像に対しては、スペckルによる揺らぎを抑えるために、マルチルック (multilook) と呼ばれる平滑処理が施されることが多い。これは、独立な  $L$  個のピクセルの強度の平均をとるものであり、 $L$  ルック処理という。また、マルチルック処理をしない生の画像を、特に 1 ルック画像と呼ぶ場合もある。 $L$  ルック処理された強度  $I$  の分布は、以下のようなガンマ分布に従う<sup>4</sup>。

$$p(I) = \frac{L^L}{\Gamma(L)\langle I \rangle} \left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right)^{L-1} \exp\left(-\frac{LI}{\langle I \rangle}\right) \quad (1.2)$$

$\Gamma$  はガンマ関数を表す。当然ながら、式 (1.2) に  $L = 1$  を代入すると、式 (1.1) が得られる。

スペckルは、信号に対して乗法的に作用する積雑音 (multiplicative noise) として扱われる [TUR82]。スペckル成分  $w$  を、観測される強度とその期待値の商  $I/\langle I \rangle$  とし、式 (1.2) を  $w$  に対する確率密度関数へと変数変換すると、

$$p(w) = \frac{L^L}{\Gamma(L)} w^{L-1} \exp(-Lw) \quad (1.3)$$

を得る。つまり、スペckル  $w$  は、自由度  $2L$  の  $\chi^2$  分布をスケーリングした分布に従う、期待値 1、標準偏差  $1/\sqrt{L}$  の確率変数である。



一方、SAR 画像におけるテクスチャとは、スペックルやシステム雑音以外の、撮像される表面に固有な空間的多様性や、散乱の物理的な機構に由来する画像濃度の揺らぎを意味する。つまり、一般的な画像解析においてのテクスチャよりもやや限定的に、ターゲット理解に繋がる情報としての揺らぎを指す。

1 ルックの SAR 画像の強度が指数分布に従うことを示唆する式 (1.1) の導出にあたっては、前提として二、三の仮定が与えられている。分解能セル内の散乱点の数が十分に大きいことや、それらの散乱点が統計的に独立で、各散乱波の位相がランダム変数とみなせること、などである [ULA89]。したがって、この前提が満たされない場合、受信される電力の統計は式 (1.1) から逸脱することになるが、このような揺らぎをテクスチャとして捉えた様々な研究が、これまでに行われてきている<sup>5</sup>。例えば、[BEC86] においては、各散乱波の位相がある傾向を有して分布した場合について調べられている。また、散乱点の数自体が統計的にふるまうケースについては、6.3 で詳しくふれる。

テクスチャの存在する SAR 画像における濃度の揺らぎは、スペックルとテクスチャが乗法的に作用したものとしてよくモデル化できる。このいわゆる積モデル [WAR81] は、後方散乱係数に比例する物理量である  $\langle I \rangle$  そのものが、テクスチャとして空間的に揺らぐとするものである。このとき、受信強度  $I$  の確率密度関数は、式 (1.1)、あるいは (1.2) を条件付き分布と考え、次式のようにして求められる。

$$p(I) = \int_0^{\infty} p(I|\langle I \rangle) p(\langle I \rangle) d\langle I \rangle \quad (1.4)$$

テクスチャの確率密度関数  $p(\langle I \rangle)$  は、実際の撮像表面を鑑み、何らかの分布によりモデル化する。

実際の SAR 画像の例として、図 1-2 に NASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory; ジェット推進研究所) の航空機搭載システム AIRSAR による画像を示す。撮像サイトは、オランダの農耕地 Flevoland である。この図から、まず、画像全体にわたるスペックルによる濃度の揺動をみてとれる。また、これとは別に、図の右方の森林を撮した領域では、テクスチャによる揺らぎをみることができる。

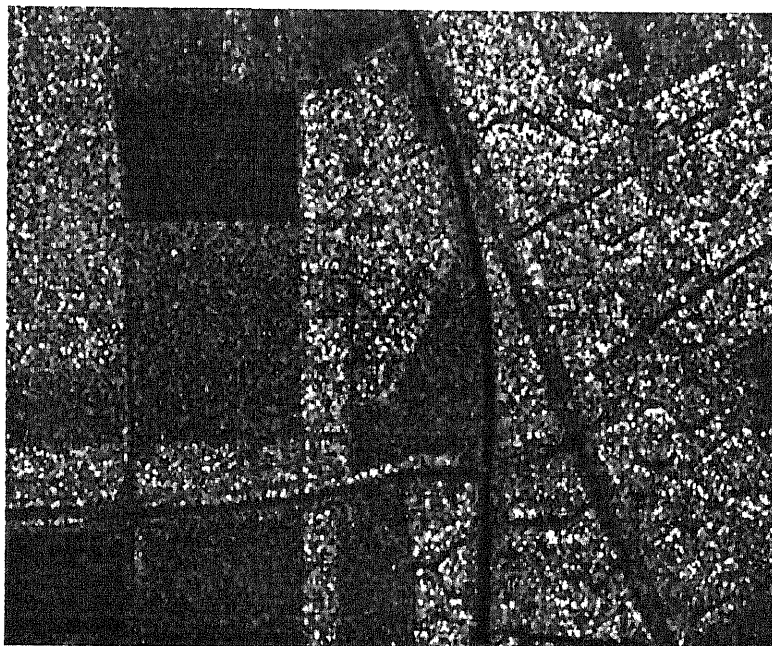


図 1-2. SAR 画像の例. NASA/JPL AIRSAR, Flevoland サイト (オランダ), C バンド, HV 偏波, 4 ルック.

Fig. 1-2. A NASA/JPL AIRSAR image: Flevoland, the Netherlands, C-HV band, four-look.

### 1.3 本論文の目的と構成

「合成開口レーダ画像における空間的な濃度の揺らぎに関する研究」と題する本論文は、SAR 画像中にみられる前述のスペックルやテクスチャに関連した、種々の課題への取り組みをまとめたものである。SAR 画像が、一般の利用に供される機会が増大している中で、それに特有な濃度の揺らぎの性質を整理することは重要である。また、そのような揺らぎの処理法や活用の指針を与えることは、広く求められている。論文の構成は、序論である本章を含めて全 8 章からなるが、研究内容はおよそ次の三つに括ることができる。

- 雑音としての濃度の揺らぎ(スペックル)を低減する手法の研究.
- 情報としての濃度の揺らぎ(テクスチャ)を画像理解に適用するための研究.
- 高分解能画像における濃度の揺らぎの性質に関する研究.

以下、各章の目的、および概要を記す。なお、図 1-3 には本論文の構成を図示する。

第 2 章では、「基礎」として、本論文を理解するために必要なことがらを概説する。具体的には、スペックルの統計、レーダポーラリメトリ、ウェーブレット解析についてまとめる。

第 3 章「ウェーブレットを用いたスペックルの低減」では、SAR 画像内のスペックルを低減する、ウェーブレット分解を応用した新たなフィルタを提案する。スペックルによる濃度の揺らぎは、画像判読の妨げになり、これを平滑するための、エッジやテクスチャの保存性や視覚的自然性の観点からみて、バランスのとれたフィルタの構成が必要とされている。提案するフィルタは、ウェーブレット分解された差分画像の振幅を圧縮することにより、スペックルを低減するものである。その際、多重解像度でエッジを保存する処理を加えることで、画像構造を損なうことなく、スペックルを平滑化する。また、フィルタパラメータと平滑効果との間の定量的な関係を考察し、それをうけ、様々なフォーマットに対する提案フィルタの適用性を論じる。さらに、提案フィルタを用いた、テクスチャ保存型のスペックル低減の一つのアプローチをも示す。

第 4 章は、「テクスチャ情報に基づく多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類」と題し、画像濃度の揺らぎを情報とみなし、ターゲット分類に活用する試みについて述べる。特に、マルチスケール性を有する新たなテクスチャの表現として、過剰系ウェーブレット分解によりテクスチャ情報を抽出し、画像分類のための特徴ベクトルを構成する方法を案出する。実際の分類手法においては、多偏波なデータを処理する際に適応的に偏波を選択する手順や、使用する特徴量の数を絞りこむ方法などを提示する。本手法を、オランダの農耕地帯を撮した多周波／多偏波な画像に適用した結果は、その土地被覆を高い精度で分類することに成功している。

第 5 章「テクスチャ特徴としてのフラクタル次元」では、SAR 画像におけるテクスチャの自己相似性に着目する。そこでは、テクスチャの新しい特徴量として、フラクタル次元を取り上げる。画像のフラクタル次元の推定には、2次元非整数ブラウン運動のウェーブレット分解

を用いる手法を導出する。この手法による解析で、SAR 画像のフラクタル性、およびそのフラクタル次元の観測パラメータに対する依存性などを明らかにする。

第 6 章は、「高分解能な SAR 画像における濃度の揺らぎ」とし、現在から将来にかけての分解能の向上を鑑みて、高分解能な SAR 画像の統計的性質を考察する。これは、スペックルとテクスチャを、統合的に扱う研究であるともいえる。高分解能画像においては、テクスチャの影響が増大する、もしくは分解能セル内の散乱点の個数が減少するなど、その濃度の揺らぎの性質が、従来の SAR 画像の統計から逸脱すると予想される。そこで、実際の多周波/多偏波な高分解能 SAR 画像に関し、特にデータの K 分布、および積モデルとの適合を調べることで、その統計を検討する。また、その結果を踏まえ、テクスチャの偏波依存性を記述するための、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤを考慮したモデルを提案する。

第 7 章「K 分布に従う SAR 画像にみられる線状構造」では、高分解能な K 分布画像の具体的な性質、あるいは高分解能化の弊害の一例として、そこに観察される線状のパターンについて議論する。スペックルによる濃度の揺らぎは、暗い画素の連なりを確率的に発生させ、SAR 画像上に物理的に意味のない線状パターンをもたらすが、K 分布に従う画像においては、そのような線状パターンが、より鮮明な形で存在することを説明する。さらに、K 分布画像におけるそれらのパターンは、マルチルック処理が施された場合でも、周囲と識別され得るだけの十分な閾値を有することを示す。

第 8 章は「結論」であり、以上の成果の総括を行う。

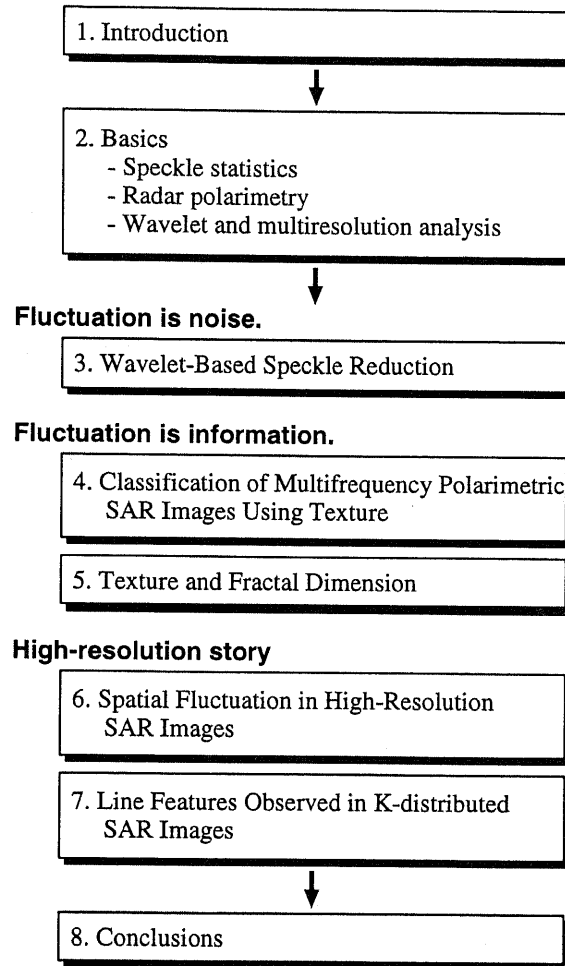


図 1-3. 本論文の構成.

Fig. 1-3. Organization of this thesis.

## Notes

<sup>1</sup> NASA/JPL の金星探査ミッション Magellan[JOH91] など、宇宙空間の観測もしばしばリモートセンシングとして扱われる。

<sup>2</sup> 例えば、現在計画されている情報収集衛星システムでは、光学衛星 2 機、合成開口レーダ衛星 2 機の、計 4 機での運用が予定されている。

<sup>3</sup> 開発中のシステムの諸元は、多分に流動的である。表 1-1 では、Envisat/ASAR は [DES99]、LightSAR は [HIL98]、SkyMed/COSMO は [IMP98]、EMISAR は [CHR98] をそれぞれ参照した。また、[EVA98] 中の表も参考にした。

<sup>4</sup> 式 (1.2) は、スペックルの空間的な相関は考慮していない。

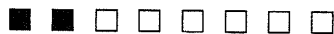
<sup>5</sup> 分解能セル内の散乱点の数が、十分に大きいとみなすことができない場合については、特に部分的に発達したスペックル (partially-developed speckle) と呼ばれ、一般的にはテクスチャとしては扱われない (6.2 参照)。

## References

- [BEC86] P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Norwood, MA: Artech House, 1986.
- [CHR98] E. L. Christensen *et al.*, "EMISAR: An absolutely calibrated polarimetric L- and C-band SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.36, pp.1852-1865, Nov. 1998.
- [DES99] Y. -L. Desnos, H. Laur, P. Lim, P. Meisl, and T. Gach, "The ENVISAT-1 Advanced Synthetic Aperture Radar processor and data products," in *Proc. 1999 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, pp.1683-1685.
- [EVA98] D. L. Evans and M. Moghaddam, Eds., "LightSAR science requirements and mission enhancements," Report of the LightSAR Science Working Group (LSWG), NASA/JPL, 1998.  
<http://lightsar.jpl.nasa.gov/>
- [GOO75] J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, Eds., Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1975, ch.2, pp.9-75.
- [HENS98] F. M. Henderson and A. J. Lewis, Eds., *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing*, 3rd ed., vol.2, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [HIL98] J. E. Hilland *et al.*, "Future NASA spaceborne SAR missions," *IEEE AES Syst. Mag.*, pp.9-16, Nov. 1998.
- [IMP98] F. Impagnatiello, R. Bertoni, and F. Caltagirone, "The SkyMed/COSMO system: SAR payload characteristics," in *Proc. 1998 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'98)*, Seattle, WA, pp.689-691.
- [JOH91] W. T. K. Johnson, "Magellan imaging radar mission to Venus," *Proc. IEEE*, vol.79, pp.777-790, June 1991.
- [MAL98] S. G. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego, CA: Academic Press, 1998.
- [OLI91] C. J. Oliver, "Information from SAR images," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.24, pp.1493-1514, 1991.
- [OLI98] C. J. Oliver and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [STU95] F. Stuhr, R. Jordan, and M. Werner, "SIR-C/X-SAR —A multifaceted radar," *IEEE AES Syst. Mag.*, pp.15-24, Oct. 1995.
- [TUR82] M. Tur, K. C. Chin, and J. W. Goodman, "When is speckle noise multiplicative?," *Appl. Opt.*, vol.21, no.7, pp.1157-1159, 1982.
- [ULA89] F. T. Ulaby and C. Elachi, *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [WAR81] K. D. Ward, "Compound representation of high resolution sea clutter," *Electron. Lett.*, vol.17, no.16, pp.561-563, 1981.

# Chapter 2

## 基礎



### 2. Basics

This chapter gives background descriptions which facilitate the understanding of the thesis. The following contents are included:

- Speckle formation and statistics
- Radar polarimetry
- Wavelet and multiresolution analysis



## 2.1 あらまし

本章では、以降の理解を助ける目的で、本研究の背景的な事項をまとめる。

スペックルが完全に発達している状況における SAR 画像の強度が、指数分布に従うことは既に述べた。2.2 では、スペックルが完全に発達するための条件、およびそこからの確率密度関数の導出について述べる。マルチルック処理についても簡単にふれる。

次に、2.3 では、昨今急速に発展した多偏波観測 (ポーラリメトリ) の考え方と、その基本諸量を整理する。

2.4 は、2.2、2.3 の内容とは離れるが、以降の章で用いるウェーブレット解析に関し、特に、多重解像度解析や Daubechies のウェーブレットについて述べる。

## 2.2 スペックルの生成と統計

序論で述べたように、1 ルックの SAR の強度画像の画素値は、指数分布に従う確率変数であることが知られている [GOO75]。以下に、その理由を概説する。

SAR の受信電界  $E$  は、次式のように 1 分解能セル内にランダムに散在する、各散乱点からの散乱電界の重ね合わせとして表せる [図 2-1 参照]。

$$E = G \sum_{i=1}^{N_s} A_i \exp(j\vartheta_i) \quad (2.1)$$

$N_s$  は分解能セル内の散乱点の個数、 $G$  は定数係数である。すなわち、観測される散乱電界は、 $N_s$  個のフェーザの和として表され、図 2-2 に示したような複素平面上のランダムウォークとしてモデル化できる。

散乱電界の強度  $|E|^2$  が指数分布に従う、つまりスペックルが完全に発達するためには、各散乱点、およびその振幅、位相、個数に対し、以下に挙げるような仮定が必要となる [ULA89]。

- 1) 各散乱点は統計的に独立である。
- 2) アンテナから各散乱点へのレンジの分散は、レンジに対して十分小さい。
- 3) 散乱点の個数  $N_s$  は十分大きい。
- 4) 各散乱点の振幅  $A_i$  と位相  $\vartheta_i$  は独立である。
- 5) 位相  $\vartheta_i$  は  $[0, 2\pi]$  の一様分布に従う。
- 6) 散乱電界  $E$  は一つ (あるいは少数) の散乱点に支配されない。

仮定 1) は、スペックルの統計についての条件というよりむしろ、散乱電界を式 (2.1) で表すための前提である。2) は、係数  $G$  が各散乱点に依存しないことを保証している。

いま、仮定 3) は中央極限定理の適用を可能にし、これにより、 $E$  の実部  $\Re(E)$  と虚部  $\Im(E)$  はそれぞれ正規分布に従うことが示せる。したがって、 $\Re(E)$  と  $\Im(E)$  の結合確率密度関数は、次式の形で表せる複素正規分布となる。

$$p(\Re(E), \Im(E)) = p(\Re(E))p(\Im(E)) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[ -\frac{\Re(E)^2 + \Im(E)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.2)$$

ここで、

$$\sigma^2 = \lim_{N_s \rightarrow \infty} \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\langle A_i^2 \rangle}{2} \quad (2.3)$$

このとき、観測される散乱電界の振幅を  $A$ 、位相を  $\vartheta$  とすると、それらの結合確率密度関数は、

$$p(A, \vartheta) = J \cdot p(\Re(E), \Im(E)) \quad (2.4)$$

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial \Re(E)}{\partial A} & \frac{\partial \Re(E)}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial \Im(E)}{\partial A} & \frac{\partial \Im(E)}{\partial \vartheta} \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

で与えられる。式 (2.5) のヤコビアン  $J$  は、 $\Re(E)$  と  $\Im(E)$  が、 $\Re(E) = A \cos \vartheta$ 、 $\Im(E) = A \sin \vartheta$  であることから、

$$J = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & -A \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & A \cos \vartheta \end{vmatrix} = A \quad (2.6)$$

となり、結果として、結合確率密度関数  $p(A, \vartheta)$  として、

$$p(A, \vartheta) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp \left( -\frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.7)$$

を得る。 $A$ 、 $\vartheta$  のそれぞれの分布は、式 (2.7) の周辺分布を求めることにより、以下のように求められる。

$$p(A) = \int_0^{2\pi} p(A, \vartheta) d\vartheta = \frac{A}{\sigma^2} \exp \left( -\frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.8)$$

$$p(\vartheta) = \int_0^\infty p(A, \vartheta) dA = \frac{1}{2\pi} \quad (2.9)$$

これより、散乱電界の振幅はレーリー分布<sup>1</sup>、位相は  $[0, 2\pi]$  の一様分布に従う確率変数であることが分かる。また、 $p(A, \vartheta) = p(A)p(\vartheta)$  であることから、散乱電界の振幅と位相は統計的に独立である。

散乱電界の強度  $I$  は、 $K$  を定数として  $I = KA^2$  と表せるため、その確率密度関数は式 (2.8) を変数変換することにより、

$$p(I) = \frac{1}{2K\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2K\sigma^2}\right) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (2.10)$$

のように負の指数分布として得られる [式 (1.1) 参照]。強度  $I$  が式 (2.10) に従うとき、その標準偏差と平均の比  $\sigma_I/\langle I \rangle$  は 1 に等しい。この比は CoV (Coefficient of Variation) と呼ばれ、スペckルが完全に発達しているか否かの指標とされる。また、CoV の逆数の 2 乗  $\langle I \rangle^2/\sigma_I^2$  は等価ルック数 (Equivalent Number of Looks; ENL) として、3 章で述べるスペckル低減フィルタの性能の指標などに用いられる。

スペckルによる揺らぎを低減するために、SAR 画像に対しては、一般的にマルチルック処理が予め施される。マルチルックは一種の平均化処理であり、一つの分解能セルに対して  $L$  回の独立な測定を行ない、その平均値を出力する。具体的には、以下の方法が用いられる。

- アンテナビームを  $L$  個のサブアパーチャに分割し、独立に画像再生処理<sup>2</sup> を行った後、インコヒーレントに加算する。
- 隣接する  $L$  個の分解能セルの強度を平均する。

マルチルック数  $L$  は、レンジ方向とアジマス方向の分解能を鑑みて決められる。例えば、JERS-1 では 3 ルックのとき、レンジ分解能とアジマス分解能がほぼ等しくなるように設定されている。

マルチルックの結果、SAR 画像の強度の分布は、指数分布から次式のガンマ分布へと変化する [式 (1.2) 参照]。

$$p(I) = \frac{L^L}{\Gamma(L)\langle I \rangle} \left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right)^{L-1} \exp\left(-\frac{LI}{\langle I \rangle}\right) \quad (2.11)$$

式 (2.11) から、マルチルック加算後の強度の平均は 1 ルック画像のそれに等しく、標準偏差のみが  $1/\sqrt{L}$  倍になることが分かる。よって、 $L$  ルック画像の CoV は  $1/\sqrt{L}$  である。また、ENL はマルチルック数に等しい<sup>3</sup>。

図 2-3 に, SAR 画像の強度ヒストグラム の例を示す. 対象は, 図 1-2 の AIRSAR 画像における  $50 \times 50$  ピクセルの矩形領域である. グランドデータ [NAS] によれば, この領域は一様ななたね (rapeseed) 畑で占められている. AIRSAR 画像のマルチルック数は 4 であるが, 隣接するピクセル間の相関の影響で, 実際には 3 ルックに近い統計的性質を有することが知られている [LEE94b]. 図 2-3 には,  $L = 3$  に対する式 (2.11) のガンマ分布を付した. 図から, 件のデータがガンマ分布によく適合していることが認められる. このことは, すなわち, p.14 の 1) から 6) の仮定が, 標準的な SAR 画像 (ターゲット) において十分満たされ得ることを示唆している.

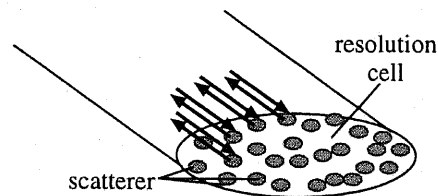


図 2-1. 分解能セル内の散乱点.

Fig. 2-1. Schematic representation of scatterers within a resolution cell.

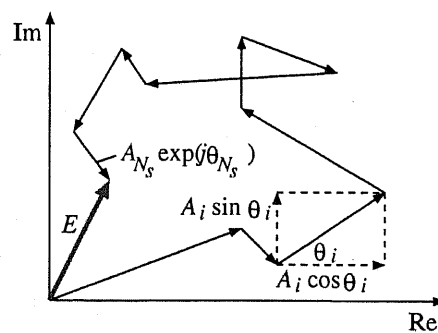


図 2-2. 複素平面上のランダムウォーク.

Fig. 2-2. Random walk in the complex plain.

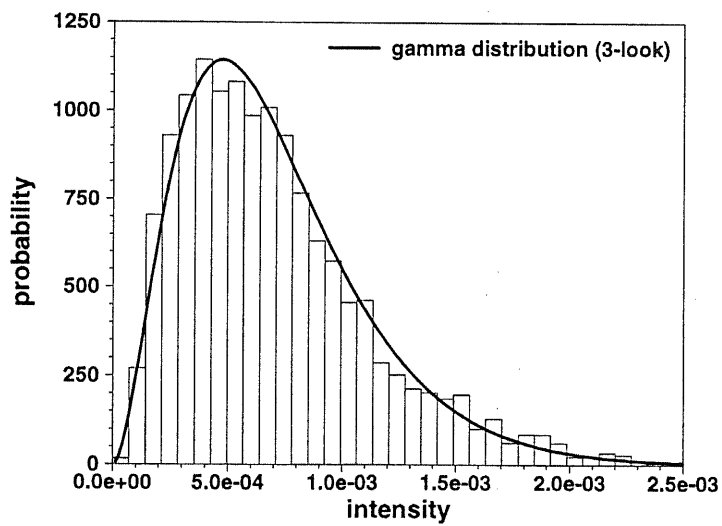
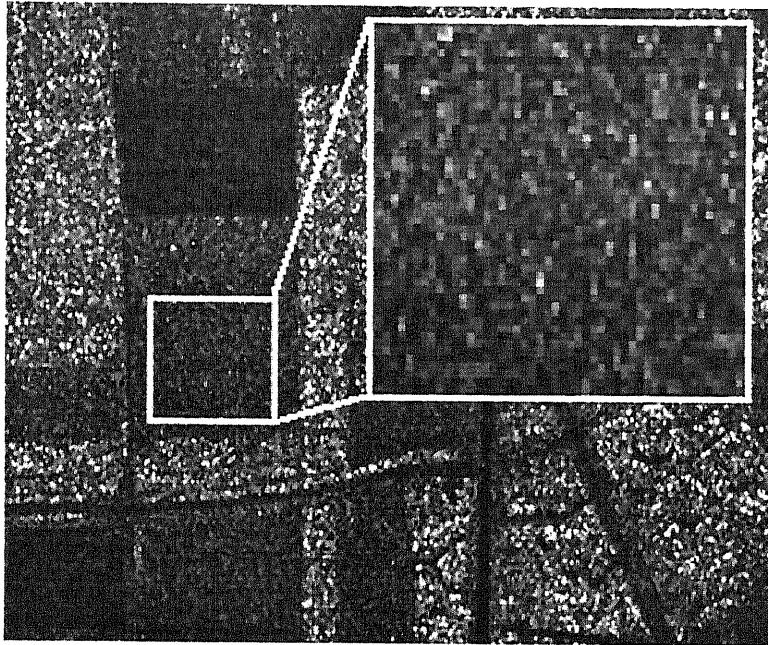


図 2-3. SAR 画像の強度ヒストグラム.

Fig. 2-3. Intensity histogram for a  $50 \times 50$  area from the AIRSAR image in Fig. 1-2. The corresponding 3-look gamma distribution is also shown.

### 2.3 レーダポーラリメトリ

SAR は、周波数や偏波、入射角などの様々な観測パラメータを有し、これらを様々に組み合わせることで観測を多重化し、撮像表面のレスポンスを計測している。例えば表 1-1 に示したように、JPL の AIRSAR やシャトル搭載レーダ SIR-C/X-SAR などのシステムは、多周波データを供している。周波数の相違は、表面の粗さを識別する能力や、植生や土壌への侵入の程度に違いをもたらす、画像の印象を大きく変化させる。一方、偏波に関しては、近年レーダポーラリメトリと呼ばれる技術の成熟により、楕円偏波まで含めた任意の送受偏波の画像を得ることが可能になった [ZEB87, ZYL87, EVA88, ULA90a, KON90, ZEB91, BOE98]。以下、ポーラリメトリについてまとめる。

電磁波の偏波は、一般に図 2-4 の偏波楕円によって表現される。偏波楕円は電界ベクトルの先端が描く軌跡であり、その形状は二つの角度  $\psi$  (orientation angle),  $\chi$  (ellipticity angle) により規定される。 $\chi = 0^\circ$  は直線偏波、 $|\chi| = 45^\circ$  は円偏波を表す。 $\psi = 0^\circ$  は水平偏波、 $\psi = 90^\circ$  は垂直偏波である。

偏波に着目した際、電磁波は以下のストークスベクトル (Stokes vector) で記述される<sup>4</sup>。

$$\mathbf{J} = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T = [|E_h|^2 + |E_v|^2, |E_h|^2 - |E_v|^2, 2\Re(E_h E_v^*), 2\Im(E_h E_v^*)]^T \quad (2.12)$$

$E_h$ ,  $E_v$  はそれぞれ電界ベクトルの水平成分、垂直成分である。 $*$  は共役複素を、 $T$  は転置を表す。 $S_0$  は全電力に等しい。また、ストークスベクトルは偏波楕円のパラメータにより、

$$\mathbf{J} = [S_0, S_0 \cos(2\psi) \cos(2\chi), S_0 \sin(2\psi) \cos(2\chi), S_0 \sin(2\chi)]^T \quad (2.13)$$

のように表せる。電界ベクトル  $E$  が複素ベクトルであるのに対し<sup>5</sup>、式 (2.12), (2.13) から分かるように、ストークスベクトルの各成分は実数であり、加算性を有する。さらに、完全に偏波した電磁波においては、

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.14)$$

が成り立つ。部分的に偏波した状態では、上式の右辺は左辺よりも小さい<sup>6, 7</sup>。

SAR における入射波と散乱波の電界ベクトルの関係は、散乱行列 (scattering matrix) により、次式のように表される<sup>8</sup>。

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \frac{e^{jkR}}{kR} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

添字  $t, s$  は送信波, 散乱波を意味する.  $k$  は波数,  $R$  はスラントレンジである. 散乱行列の各要素は複素数であり, 散乱波のベクトル的なふるまいを完全に表現する. また, 後方散乱を扱う場合, その相反性 (reciprocity) から  $S_{hv}$  と  $S_{vh}$  は同一となる.

一方, 送信波と散乱波のストークスベクトルの関係は, ミュウラー行列 (Mueller matrix) を介し ( $M$  で表す), 次式で与えられる<sup>9</sup>.

$$\mathbf{J}_s = \frac{1}{(kR)^2} \mathbf{M} \mathbf{J}_t \quad (2.16)$$

具体的なミュウラー行列の形式は以下である.

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \mathbf{W} \mathbf{R}^{-1} \quad (2.17)$$

ここで,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -j & j & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} S_{hh} S_{hh}^* & S_{hh} S_{hv}^* & S_{hv} S_{hh}^* & S_{hv} S_{hv}^* \\ S_{hh} S_{vh}^* & S_{hh} S_{vv}^* & S_{hv} S_{vh}^* & S_{hv} S_{vv}^* \\ S_{vh} S_{hh}^* & S_{vh} S_{hv}^* & S_{vv} S_{hh}^* & S_{vv} S_{hv}^* \\ S_{vh} S_{vh}^* & S_{vh} S_{vv}^* & S_{vv} S_{vh}^* & S_{vv} S_{vv}^* \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

また,

$$\mathbf{R}^{-1} = \frac{1}{2} \mathbf{R}^{*T} \quad (2.20)$$

ミュウラー行列は, 散乱行列と異なり, 加算平均が可能であることから, 偏波状態が完全に一致せず, 部分的に偏りがあるような散乱波の平均的な偏波状態を表すのに好適である.

散乱行列の4成分を位相まで含めて測定することにより, 任意の送受偏波の組合せに対する受信電力を計算のみで求める, いわゆる偏波合成 (polarization synthesis) が可能となる. 極座標  $(\theta_a, \phi_a)$  の方向から電界がアンテナに入射するとき, 受信電力  $P_r$  は次式で与えられる.

$$P_r = F(\lambda, \theta_a, \phi_a) |\mathbf{E}_r \cdot \mathbf{E}_s|^2 \quad (2.21)$$

$$F(\lambda, \theta_a, \phi_a) = \frac{\lambda^2}{8\pi\eta} \frac{G(\theta_a, \phi_a)}{|\mathbf{E}_r|^2} \quad (2.22)$$

$\mathbf{E}_r$  は受信アンテナの偏波特性を表す電界ベクトル,  $\mathbf{E}_s$  はアンテナに入射する電界ベクトル, つまりターゲットからアンテナへ向けて散乱された場を表すベクトルを示す.  $G(\theta_a, \phi_a)$  はアンテナ利得,  $\eta$  は自由空間のインピーダンス,  $\lambda$  は波長である. 式(2.15)を式(2.21)に代入することで, 以下が得られる.

$$P_r = F(\lambda, \theta_a, \phi_a) |\mathbf{E}_r \cdot \mathbf{S}\mathbf{E}_t|^2 \quad (2.23)$$

式(2.23)によれば, 任意の送受偏波の特性を  $\mathbf{E}_t$ ,  $\mathbf{E}_r$  に与えることで, 測定された散乱行列  $\mathbf{S}$  から, 受信電力を計算で求められる. 各セルについて計算された受信電力を画素値として割りふれば, 任意の偏波の強度画像を生成できる.

偏波合成は, 送受偏波の特性をストークスベクトルで与えた場合にも, 次の式により実行できる.

$$P_r = \frac{F(\lambda, \theta_a, \phi_a)}{2(kR)^2} \mathbf{J}_r^T \mathbf{K} \mathbf{J}_t \quad (2.24)$$

$\mathbf{K}$  はケンナウ行列 (Kennaugh matrix) と呼ばれるものである [GUI94]. ケンナウ行列とミューラー行列との関係は,

$$\mathbf{K} = \mathbf{U}_4 \mathbf{M} \quad (2.25)$$

のように表される<sup>10</sup>. ここで,  $\mathbf{U}_4 = \text{diag}(1, 1, 1, -1)$  である. すなわち, ケンナウ行列はミューラー行列の第4行の符号を反転させたものに等しい. したがって, 当然, ケンナウ行列も加算性を有し, 複数回の測定の平均電力について次式が成り立つ.

$$\langle P_r \rangle = \frac{F(\lambda, \theta_a, \phi_a)}{2(kR)^2} \mathbf{J}_r^T \sum_n \mathbf{K}_{(n)} \mathbf{J}_t \quad (2.26)$$

$\mathbf{K}_{(n)}$  は, 個々の測定で得られるケンナウ行列である. 式(2.26)から, ケンナウ行列の形でポーラリメトリックなデータを表現すると, マルチルック処理を直接行えることが理解できる.

式(2.26)により, 任意の送受偏波におけるターゲットの後方散乱係数<sup>11</sup> と (平均) ケンナウ行列は, 以下の式で結びつけられる.

$$\sigma^0 = C \mathbf{J}_r^T \sum_n \mathbf{K}_{(n)} \mathbf{J}_t \quad (2.27)$$



$C$ は定数であるが,  $\sigma^0$ の偏波依存性を相対的にみる場合には, 無視して差し支えない. 無数にある偏波の組合せのうち, 送受偏波が同一のもの (co-polarization), あるいは直交しているもの (cross-polarization) に関し,  $\sigma^0$ を送信偏波の偏波楕円パラメータ ( $\psi, \chi$ ) に対して三次元的にプロットしたものを, 特に偏波シグネチャ (polarization signature) という. 偏波シグネチャは, ターゲットの形状や散乱機構によって異なり, ポーラリメトリックなデータの重要な特徴量となる. 図 2-5 に, 例として, 海面の領域に対して作成した偏波シグネチャを示す. この図では, co-pol の直線偏波に対して  $\sigma^0$  が大きく, かつ VV 偏波の方が HH 偏波より大きいこと, また cross-pol の直線偏波の  $\sigma^0$  は極めて小さいことなど, 海面の支配的な散乱機構がブラッグ散乱 (Bragg scattering) であることを示唆する特徴がみてとれる.

ポーラリメトリックなデータの表現においては, 上述の散乱行列, ミュウラー行列 (またはケンノウ行列) の他に, 共分散行列 (covariance matrix) と呼ばれる行列もよく用いられる. いま, 散乱行列の成分を並べたベクトルを考える.

$$\mathbf{u} = [S_1, \dots, S_q]^T \quad (2.28)$$

ポーラリメトリックにおいては, 一般的には  $q = 4$  であるが, 後方散乱を扱う場合は  $q = 3$  としてよい. スペックルが完全に発達した一様な領域においては,  $\mathbf{u}$  は多次元複素正規分布に従うことが知られている.

$$p(\mathbf{u}) = \frac{1}{\pi^q |\mathbf{C}|} \exp(-\mathbf{u}^{*T} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{u}) \quad (2.29)$$

式 (2.29) 中の  $\mathbf{C}$  が共分散行列であり, 次式で定義される.

$$\mathbf{C} = \langle \mathbf{u} \mathbf{u}^{*T} \rangle \quad (2.30)$$

ケンノウ行列と同様に, 共分散行列を加算平均することによっても, マルチルック処理は行える.  $L$  ルックの共分散行列は,

$$\mathbf{C}_L = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{u}_{(n)} \mathbf{u}_{(n)}^{*T} \quad (2.31)$$

によって得られる. このとき,  $\mathbf{C}_L$  は以下の Wishart 分布に従う [LEE94a, LEE94b, LOP97].

$$p(\mathbf{C}_L) = \frac{L^L q |\mathbf{C}_L|^{L-q} \exp[-L \text{Tr}(\mathbf{C}^{-1} \mathbf{C}_L)]}{\pi^{q(q-1)/2} \Gamma(L) \dots \Gamma(L-q+1) |\mathbf{C}|^L} \quad (2.32)$$

$\text{Tr}(\mathbf{C}^{-1}\mathbf{C}_L)$  は行列  $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{C}_L$  のトレースを表す. 式 (2.32) において  $q = 1$  としたとき, 式 (2.11) に示したマルチルックされた (単偏波の) 強度に関するガンマ分布を得る. このように, 共分散行列による表現は, その統計が明らかになっているという点で, 好んで用いられる.

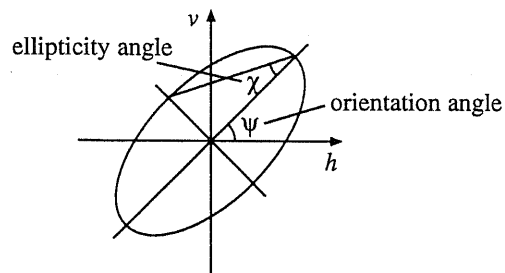
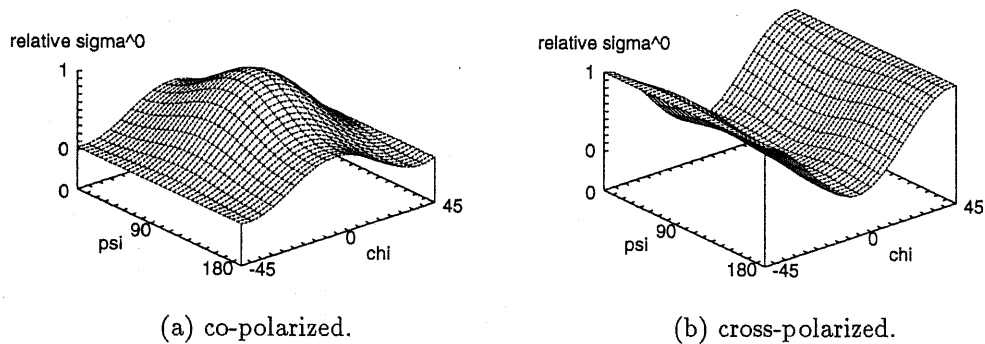


図 2-4. 偏波楕円.

Fig. 2-4. Polarization ellipse.



(a) co-polarized.

(b) cross-polarized.

図 2-5. 偏波シグネチャ(海面).

Fig. 2-5. Polarization signatures for an ocean area.

## 2.4 ウェーブレットと多重解像度解析

以降の3～5章においては、ウェーブレット変換 (wavelet transform) が頻繁に用いられる。これは、空間、周波数両方向に対して高い分解能を有すること、多重解像度での解析が行えるなど、ウェーブレットが画像の濃度の揺らぎを扱う本研究に適した性質を有することによるものである。ここでは、本論文の理解を促す目的で、ウェーブレット、および多重解像度解析 (multiresolution analysis) について、主に信号/画像処理の観点から解説する。

ウェーブレットの起源 [DAU96] は、古くは Haar<sup>12</sup> まで遡ることができるが、80年代初頭の Morlet による石油探査への応用を端と考えるのが一般的である。その後現在までの間に、数学者の手によって精力的に理論面の整備がなされ、一方、工学者はその応用の可能性を広範に検討してきた。ウェーブレット変換とは、基本関数  $\psi(x)$  をダイレーション変換、シフト変換した以下のような関数系を基底とする積分変換をいう<sup>13</sup>。

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0) \quad (2.33)$$

$\psi$  は特にマザーウェーブレット (mother wavelet) と呼ばれる。ウェーブレット変換、および逆変換は、

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}^*(x) f(x) dx \quad (2.34)$$

$$f(x) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(a, b) \psi_{a,b}(x) \frac{da db}{a^2} \quad (2.35)$$

で与えられる。ここで、定数  $c_\psi$  は、

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (2.36)$$

である。 $\Psi(\omega)$  は  $\psi(x)$  のフーリエ変換を表す。式 (2.35) は、 $c_\psi$  の有限性を要求する。これは、アドミッシブル条件 (admissibility condition) と呼ばれ、逆変換の存在を保証するものである [GRO84]。アドミッシブル条件は、

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (2.37)$$

と同値である。式 (2.37) は、 $\psi(x)$  の平均値が 0 であること、つまり無直流成分の要求である。

ここで、ウェーブレット変換とフーリエ変換との比較を簡単に述べておく。フーリエ変換は、三角関数をダイレーションした基底系により、周期  $2\pi$  の 2 乗可積分空間  $L^2(0, 2\pi)$  に属する任意の関数を表現するものである。これに対し、周期  $2\pi$  の実数  $\mathbf{R}$  への拡張を試みるとき、ウェーブレットの考え方が導出される。 $L^2(\mathbf{R})$  に属する関数は、 $\pm\infty$  で 0 に減衰しなくてはならない。よって、三角関数は  $L^2(\mathbf{R})$  に属さない。また、 $L^2(\mathbf{R})$  を生成する基底自身も、当然  $\pm\infty$  で 0 に減衰する必要がある、その減衰の度合ははやい方が良い。しかしながら、基底関数が非常に速く減衰するものであるなら、その基底によって  $L^2(\mathbf{R})$  全体を表現するために、フーリエにはない実数空間  $\mathbf{R}$  に沿ったシフトという概念をもちだす必要が生ずる。このような、ダイレーションとシフトを伴い、かつ 0 への収束性のよい基底系による、 $L^2(\mathbf{R})$  の任意の関数の表現が、すなわち、ウェーブレット変換である。

さて、画像のようなデジタル信号を扱う場合には、ダイレーション/シフトのパラメータ  $a$ ,  $b$  をナイキスト密度の範囲でサンプリングした離散ウェーブレット (discrete wavelet) が用いられる。とりわけ、 $a = 2^j$ ,  $b = 2^j k$  とした 2 進ウェーブレット (dyadic wavelet)

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - k), \quad (j, k \in \mathbf{Z}) \quad (2.38)$$

は拡張性に富み、利用価値が高い。離散ウェーブレットにおいて、基底関数  $\psi_{j,k}$  の組があまねく直交しているものを、直交ウェーブレット (orthogonal wavelet) という。なおかつ、基底関数の全てのノルム (2 乗積分値) が 1 に規格化されたものを、正規直交基底 (orthonormal basis) と呼ぶ。直交ウェーブレットを基底とした変換は、全く情報が重複することなく、信号をタイトに表現することができる。

80 年代末に、Mallat が提案した多重解像度解析により、ウェーブレットの応用の可能性は飛躍的に高められた [MAL89a, MAL89b]。多重解像度解析は、もともとは、正規直交ウェーブレットの系統的な構成法として考案された。多重解像度解析では、以下の条件を満たす、 $L^2(\mathbf{R})$  に属する閉部分空間列  $\{V_j | j \in \mathbf{Z}\}$  と関数  $\phi(x)$  の組が定義される。

- |  |           |
|--|-----------|
| 1) $V_{j+1} \subset V_j \quad (j \in \mathbf{Z})$              | [単調性]     |
| 2) $\bigcup_{j \in \mathbf{Z}} V_j$ は $L^2(\mathbf{R})$ の中で稠密。 | [稠密性]     |
| 3) $\bigcap_{j \in \mathbf{Z}} V_j = \{0\}$                    | [分離性]     |
| 4) $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2^j x) \in V_0$             | [スケーリング性] |
| 5) $\{\phi(x - k)   k \in \mathbf{Z}\}$ は $V_0$ の正規直交基底。       | [正規直交性]   |

$\phi(x)$  はスケーリング関数 (scaling function) と呼ばれる<sup>14</sup>。条件 4), 5) から、 $\phi(x)$  のダイレーションとシフトから得られる関数系

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}x - k), \quad (j, k \in \mathbf{Z}) \quad (2.39)$$

が  $\mathbf{V}_j$  の正規直交基底となる。また、条件 1), 5) により、 $\phi \in \mathbf{V}_0 \cap \mathbf{V}_1$  であるので、スケーリング関数について次の関係が得られる。

$$\phi(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} p_k \phi(2x - k) \quad (2.40)$$

上式をツースケール関係 (two-scale relation),  $p_k$  をツースケール列 (two-scale sequence) という。いま、 $\mathbf{V}_j$  の直交補空間  $\mathbf{W}_j$  ( $\mathbf{V}_j \perp \mathbf{W}_j$ ,  $\mathbf{V}_j \oplus \mathbf{W}_j = \mathbf{V}_{j-1}$ ) を考える。条件 2) より、 $\bigoplus_{j \in \mathbf{Z}} \mathbf{W}_j$  は  $L^2(\mathbf{R})$  の中で稠密となる。このとき、式 (2.40) と同様の関係

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} q_k \phi(2x - k) \quad (2.41)$$

によって  $\psi(x)$  を定義すると、関数系

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - k), \quad (j, k \in \mathbf{Z}) \quad (2.42)$$

が  $\mathbf{W}_j$  の正規直交基底となる [式 (2.38)]. 式 (2.41) において、 $q_k = (-1)^k p_{1-k}$  である。このように、多重解像度解析によって、あるスケーリング関数  $\phi(x)$  と空間列  $\mathbf{V}_j$  を得ることができれば、それに対応する正規直交ウェーブレット  $\psi(x)$  は容易に構成される。

多重解像度解析の文脈でいえば、直交ウェーブレット変換とは、信号  $f$  を直交基底により、部分空間列に射影することに他ならない。以下のように、 $f$  と  $\phi_{j,k}$ ,  $\psi_{j,k}$  との内積をとる。

$$c_{j,k} \equiv \langle f, \phi_{j,k} \rangle \quad (2.43)$$

$$d_{j,k} \equiv \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (2.44)$$

そのとき、 $c_{j,k}$  と  $d_{j,k}$  に関しては、以下の有用な分解則が存在する。

$$c_{j+1,k} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} p_{l-2k} c_{j,l} \quad (2.45)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} q_{l-2k} c_{j,l} \quad (2.46)$$

式(2.45), (2.46)は,  $p, q$  をローパスフィルタ, ハイパスフィルタとし, (2:1) のダウンサンプリングを加えることで, 図2-6(a)のようなフィルタバンクとして実装できる [VET92].  $c_j$  は近似信号 (approximated signal),  $d_j$  は差分信号 (detail signal) と称される<sup>15</sup>.  $d_j$  はマザーウェーブレットとの内積であるため, ウェーブレット係数とも呼ばれる. 近似信号  $c_{j+1}$  に対しては, 繰り返し分解を行うことができ<sup>16</sup>, その結果, ピラミッド構造の帯域分割表現が得られる. 一方, 再構成則は次のように与えられる.

$$c_{j,k} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} p_{k-2l} c_{j+1,k} + \sum_{l=-\infty}^{\infty} q_{k-2l} d_{j+1,k} \quad (2.47)$$

式(2.47)は完全再構成を保証している. 再構成のフィルタ表現を, 図2-6(b)に示す.

ウェーブレット分解, および再構成は, そのまま2次元画像へと拡張できる. この場合, 近似画像 (approximated image) は  $\mathbf{V}_j^2 (= \mathbf{V}_j \otimes \mathbf{V}_j)$  への射影となる. したがって, 近似画像を生成するスケーリング関数は  $\phi(x)\phi(y)$  となる. また,  $\mathbf{V}_j^2$  の直交補空間  $\mathbf{W}_j^2$  ( $\mathbf{V}_j^2 \perp \mathbf{W}_j^2$ ,  $\mathbf{V}_j^2 \oplus \mathbf{W}_j^2 = \mathbf{V}_{j-1}^2$ ) を考えると,

$$\mathbf{W}_j^2 = (\mathbf{V}_j \otimes \mathbf{W}_j) \otimes (\mathbf{W}_j \otimes \mathbf{V}_j) \otimes (\mathbf{W}_j \otimes \mathbf{W}_j) \quad (2.48)$$

と表せるため, 1回の分解において3枚の差分画像 (detail image) が生成されることになる. それらに対応するマザーウェーブレットは  $\phi(x)\psi(y)$ ,  $\psi(x)\phi(y)$ ,  $\psi(x)\psi(y)$  である. このことは, 画像のウェーブレット分解が, 図2-7(a)のような行/列方向の分離的なフィルタバンクで実装できることを示唆している. つまり, 画像のウェーブレット分解は, 面積がそれぞれ原画像の4分の1である, 3枚の差分画像と1枚の近似画像を生成する. 本論文では, これらを総称してサブイメージ (subimage) と呼ぶ場合がある. さらに, 近似画像を繰り返し分割することによって, 低周波方向への階層的な画像表現を構成できる. 分割されたサブイメージ群からの原画像の再構成も同様に行える. 図2-7(b)は, ウェーブレット分解を空間的に表している. なお, 次章以降では, 近似画像は LL 画像, 差分画像は高周波成分で構成されている方向により LH, HL, HH 画像として参照する<sup>17</sup>.

フィルタ演算の観点からは, ツースケール列  $p_k, q_k$  は, 有限個を除き0であることが望ましい. ウェーブレット解析では, この要求をコンパクトサポート (compact support) と呼ぶ. 古くから知られるハール関数 (Haar function) は, 最小のサポートを有する正規直交基底である. ハールウェーブレット, およびそのスケーリング関数は以下である.

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq x < 1/2 \\ -1 & \text{if } 1/2 \leq x < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq x < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.50)$$

ハール基底のツースケール列は,

$$p_k = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & \text{if } k = 0, 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.51)$$

である。このように、ハール基底はコンパクトサポートを有するが、式(2.49)、(2.50)からも分かるように、その形状は不連続性を呈しており、信号解析への応用において不適な場合も多い。

これに対し、Daubechiesによるウェーブレットは、最初に構成されたコンパクトサポートを有する連続な直交基底として知られている [DAU88, DAU92]。以下に、Daubechiesのスケールリング関数の構成法を示す。

1) 任意の正整数  $n$  に対し、次を満たすツースケール列  $p_k, q_k$  を選択する。

- (a)  $p_k = 0, \quad (k < 0 \text{ or } k > 2n)$
- (a)  $\sum_k p_k p_{k+2i} = \delta_{0,i}$
- (a)  $\sum_k p_k = \sqrt{2}$
- (a)  $\sum_k q_k k^m = 0, \quad (0 \leq m \leq n-1)$

2) スケールリング関数  $\phi(x)$  を,

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \prod_{i=1}^{\infty} \mathcal{M}_0(2^{-i}\xi), \quad \left( \mathcal{M}_0(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_k p_k \exp(-jk\xi) \right) \quad (2.52)$$

のフーリエ変換として求める。

$\delta$  はクロネッカーのデルタ (Kronecker's delta) である。図 2-8 に、Daubechies のスケールリング関数、およびウェーブレットの形状を示す。  $Dn'$  とは、  $n = n'/2$  として、上の手順で構成したものを指している<sup>18</sup>。図からも分かるように、Daubechies のスケールリング関数とウェーブレットのサポートは、それぞれ  $[0, 2n-1]$ 、  $[-n+1, n]$  である。また、Daubechies のウェーブレットは以下の関係を満たす。

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^m \psi(x) dx = 0, \quad (0 \leq m \leq n-1) \quad (2.53)$$

つまり、 $\psi(x)$  のモーメントは  $n-1$  次のもので消えている。これを、ヴァニッシングモーメント (vanishing moment) と呼ぶ。ヴァニッシングモーメントは、 $\psi$  の微分可能性 (滑らかさ)

に関する指標であるが、図 2-8 とあわせ、基底の滑らかさと局在性(サポート)はトレードオフとなることが理解できる。

最後に、表 2-1 に、Daubechies ウェーブレットのツースケール列を示す ( $0 \leq n \leq 8$ )。表中に示されていない  $k$  については、 $p_k = 0$  である。先に述べた  $n'$  は非零の  $p_k$  の数、すなわち、フィルタを構成したときのタップ数にあたる。また、 $n = 1$  の Daubechies ウェーブレット (D2) は、ハール基底と等価である。

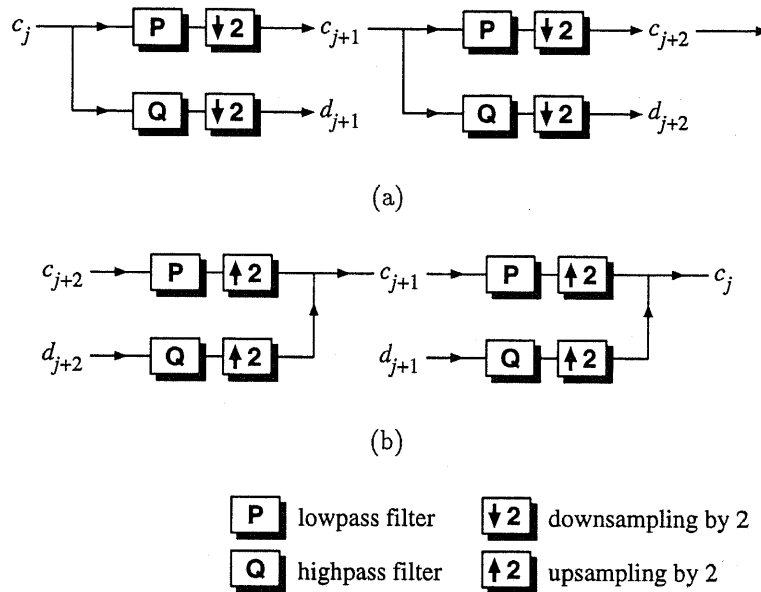
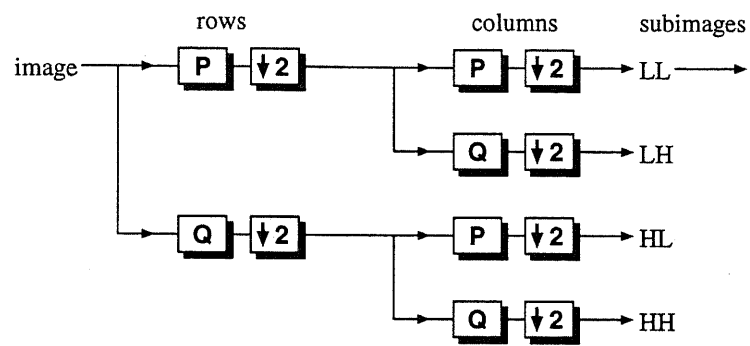


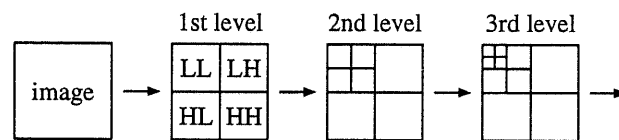
図 2-6. ウェーブレット分解と再構成.

Fig. 2-6. Wavelet decomposition and reconstruction.





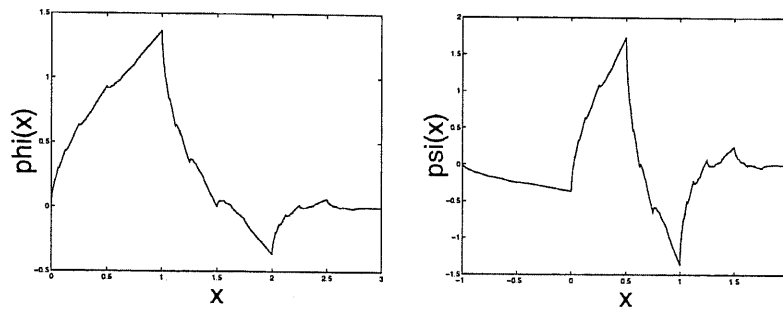
(a)



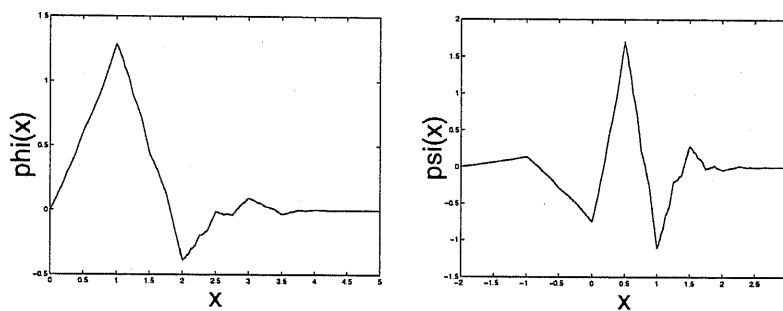
(b)

図 2-7. 画像のウェーブレット分解.

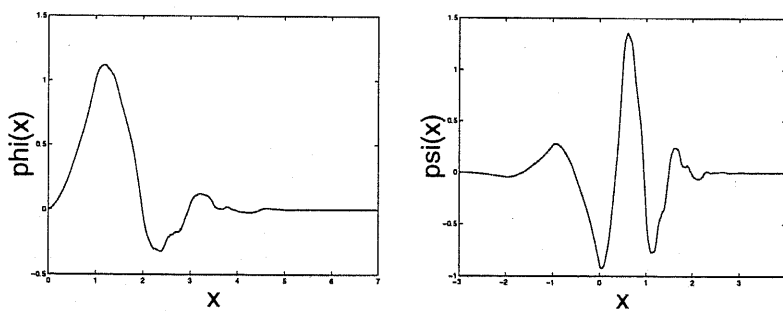
Fig. 2-7. Wavelet decomposition of an image.



(a) D4.



(b) D6.



(b) D8.

図 2-8. Daubechies のスケーリング関数とウェーブレット.

Fig. 2-8. Daubechies scaling functions and wavelets.

表 2-1. Daubechies のウェーブレットのツースケール列 ([DAU92, Table 6.1] を参照).

Table 2-1. Two-scale sequences of Daubechies wavelets.

$n$	$k$	$p_k$
1	0	$1/\sqrt{2}$
	1	$1/\sqrt{2}$
2	0	0.482962913145
	1	0.836516303738
	2	0.224143868042
	3	-0.129409522551
3	0	0.332670552950
	1	0.806891509311
	2	0.459877502118
	3	-0.135011020010
	4	-0.085441273882
4	5	0.035226291882
	0	0.230377813309
	1	0.714846570553
	2	0.630880767930
	3	-0.027983769417
	4	-0.187034811719
	5	0.030841381836
	6	0.032883011667
5	7	-0.010597401785
	0	0.160102397974
	1	0.603829269797
	2	0.724308528438
	3	0.138428145901
	4	-0.242294887066
	5	-0.032244869585
	6	0.077571493840
	7	-0.006241490213
	8	-0.012580751999
6	9	0.003335725285
	0	0.111540743350
	1	0.494623890398
	2	0.751133908021
	3	0.315250351709
	4	-0.226264693965
	5	-0.129766867567
	6	0.097501605587
	7	0.027522865530
	8	-0.031582039318
	9	0.000553842201
	10	0.004777257511
11	-0.001077301085	
7	0	0.077852054085
	1	0.396539319482
	2	0.729132090846
	3	0.469782287405
	4	-0.143906003929
	5	-0.224036184994
	6	0.071309219267
	7	0.080612609151
	8	-0.038029936935
	9	-0.016574541631
	10	0.012550998556
	11	0.000429577973
	12	-0.001801640704
13	0.000353713800	
8	0	0.054415842243
	1	0.312871590914
	2	0.675630736297
	3	0.585354683654
	4	-0.015829105256
	5	-0.284015542962
	6	0.000472484574
	7	0.128747426620
	8	-0.017369301002
	9	-0.044088253931
	10	0.013981027917
	11	0.008746094047
	12	-0.004870352993
	13	0.000391740373
	14	0.000675449406
15	0.000117476784	

## 2.5 まとめ

本論文を読み進めるために必要なことがらとして、スペックルの統計、ポーラリメトリ、ウェーブレット解析を概説した。具体的には、2.2で、スペックルが存在するSARの画像(強度)が従う統計、すなわち、指数分布の式を導出した。また、マルチルック処理についても述べた。次に、2.3で、ポーラリメトリの理論について、特にそこで用いられる種々の表現(ストークスベクトル、ミュウラー行列、ケンナウ行列、共分散行列など)を整理しつつ解説した。さらに、2.4では、ウェーブレット解析について、主に信号処理の側面からまとめた。Mallatによる多重解像度解析や、Daubechiesのウェーブレットについては、やや詳しく記述した。

## Notes

<sup>1</sup> 平均は $\sigma\sqrt{\pi/2}$ である。

<sup>2</sup> SARの画像再生処理は、例えば[IIS98, SAR92]に詳しい。

<sup>3</sup> ここでは、テクスチャは考慮していない。テクスチャの存在するSAR画像においては、ENLはマルチルック数より小さな値をとる。

<sup>4</sup> 座標のとり方は、[HIRO94]に則っている。電磁波の進行方向は、図2-4において紙面に垂直に手前向きであり、 $h$ ,  $v$ , 進行方向が右手系をなすものとする。

<sup>5</sup> ジョーンズベクトル (Jones vector) ともいう。

<sup>6</sup> 以下の偏波度 (degree of polarization) は、部分的な偏波状態の指標となる [BOR75].

$$\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$$

<sup>7</sup> ストークスパラメータと偏波状態との関係を直截的に図示するものとして、ポアンカレ球 (Poincaré sphere) がある。

<sup>8</sup> ここでの入射波と散乱波の電界ベクトルの座標系は、BSA(backscatter alignment) [ULA90a] である。座標系にはこの他にFSA(forward scatter alignment)が挙げられるが、その場合、散乱行列は対称とならない。

<sup>9</sup> JPLの論文などでは、ストークス行列 (Stokes matrix) とも呼ばれている。また、例えば[ZYL87]の式(4)におけるMと本論文におけるミュウラー行列は、異なるものである。

<sup>10</sup> ポーラリメトリに関する多くの文献 (JPLによる[ZEB87, ZYL87, EVA88, ZEB91]など) では、ケンナウ行列という用語は用いられていない。しかし、ミュウラー行列とケンナウ行列の違いを意識することは、ポーラリメトリを理解するにあたって重要である。

<sup>11</sup> 単位面積あたりの後方散乱断面積として定義される。見かけ上は無次元の量である。

<sup>12</sup> Alfred Haar (1885-1933).

<sup>13</sup> 前節においては、レーダポーラリメトリの一般的な表記として、 $\psi$ を偏波楕円のパラメータに用いた。ウェーブレットの分野でも、基本関数を $\psi$ で表すのが普通であり、ここではあえて重複して使用する。その他、実数空間 $\mathbf{R}$ 、関数空間 $\mathbf{W}$ についても、前節との重複がある。混同のないよう注意が必要である。

<sup>14</sup> mother wavelet  $\psi$  に対し、 $\phi$ はfather waveletとも呼ばれる。

<sup>15</sup> approximated signal に対する和訳は、筆者の知るところ定着していない。

<sup>16</sup> 信号の最適な帯域分割表現を得るため、何らかの評価関数に従い、差分信号をも繰り返し分解するものを、ウェーブレットパケット分解という [COI92a, COI92b].

<sup>17</sup> 偏波を表すHHとの区別に留意されたい。

<sup>18</sup> Daubechiesのウェーブレットを、 $D_n$ で表す文献もある。

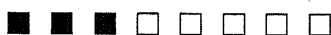
## References

- [BEND95] J. J. ベネデット, M. W. フレージャー編, 山口昌哉, 山田道夫監訳, ウェーブレット 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1995.
- [BOE98] W. -M. Boerner *et al.*, "Polarimetry in radar remote sensing: Basic and applied concepts," in *Principles and Applications of Imaging Radar*, Manual of Remote Sensing, 3rd ed., vol.2, F. M. Henderson and A. J. Lewis, Eds., New York: John Wiley & Sons, 1998, ch.5, pp.271-357.
- [BOR75] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*. New York: Pergamon, 5th ed., 1975, ch.10, pp.491-555.
- [CHU92] C. K. Chui, *An Introduction to Wavelets*. San Diego, CA: Academic Press, 1992.
- [COI92a] R. R. Coifman, Y. Meyer, and M. V. Wickerhauser, "Wavelet analysis and signal processing," in *Wavelets and their Applications*, M. B. Ruskai *et al.*, Eds., Boston, MA: Jones and Bartlett, 1992, pp.153-178.
- [COI92b] R. R. Coifman and M. V. Wickerhauser, "Entropy-based algorithms for best basis selection," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.38, pp.713-718, Mar. 1992.
- [DAU88] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," *Commun. Pure Appl. Math.*, vol.41, pp.909-996, Nov. 1988.
- [DAU92] ———, *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.
- [DAU96] ———, "Where do wavelets come from? —A personal point of view," *Proc. IEEE*, vol.84, pp.510-513, Apr. 1996.
- [EVA88] D. L. Evans, T. G. Farr, J. J. van Zyl, and H. A. Zebker, "Radar polarimetry: Analysis tools and applications," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.26, pp.774-789, Nov. 1988.
- [GOO75] J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, Eds., Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1975, ch.2, pp.9-75.
- [GRO84] A. Grossmann and J. Morlet, "Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape," *SIAM J. Math. Anal.*, vol.15, no.4, pp.723-736, July 1984.
- [GUI94] A. Guissard, "Mueller and Kennaugh matrices in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.32, pp.590-597, May 1994.
- [HIRO94] 廣澤春任, "Radar Polarimetry における基本諸量," unpublished, Oct. 1994.
- [IIS98] 飯坂讓二監修, 日本写真測量学会編, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998.
- [KON90] J. A. Kong, Eds., *Polarimetric Remote Sensing, PIER 3 (Progress in Electromagnetics Research)*. Amsterdam: Elsevier, 1990.
- [LEE94a] J. S. Lee, M. R. Grunes, and R. Kwok, "Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on complex Wishart distribution," *Int. J. Remote Sensing*, vol.15, no.11, pp.2299-2311, 1994.
- [LEE94b] J. S. Lee, K. W. Hoppel, S. A. Mango, A. R. Miller, "Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.32, pp.1017-1028, Sept. 1994.
- [LOP97] A. Lopès and F. Séry, "Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric SAR imagery and the Wishart distribution," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.35, pp.632-647, May 1997.
- [MAL89a] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.11, pp.674-693, July 1989.
- [MAL89b] ———, "Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol.37, pp.2091-2110, Dec. 1989.

- [MAL98] \_\_\_\_\_, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego, CA: Academic Press, 1998.
- [NAS] NASA/JPL, *SIR-C education program*, Pre-launch CD-ROM, SIRCED01.
- [RIO91] O. Rioul and M. Vetterli, "Wavelets and signal processing," *IEEE Signal Processing Mag.*, pp.14-38, Oct. 1991.
- [SAR92] 合成開口レーダ (SAR), (財) 資源観測解析センター, 1992.
- [ULA89] F. T. Ulaby and C. Elachi, *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [ULA90a] \_\_\_\_\_, Eds., *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [VET92] M. Vetterli and C. Herley, "Wavelets and filter banks: Theory and Design," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.40, pp.2207-2232, Sept. 1992.
- [YAM94] 山田道夫, "ウェーブレット," *数理科学*, no.130, Apr. 1994.
- [ZEB87] H. A. Zebker, J. J. van Zyl, and D. N. Held, "Imaging radar polarimetry from wave synthesis," *J. Geophys. Res.*, vol.92, no.B1, pp.683-701, 1987.
- [ZEB91] H. A. Zebker and J. J. van Zyl, "Imaging radar polarimetry: A review," *Proc. IEEE*, vol.79, pp.1583-1606, Nov. 1991.
- [ZYL87] J. J. van Zyl, H. A. Zebker, and C. Elachi, "Imaging radar polarization signatures: Theory and observation," *Radio Sci.*, vol.22, no.4, pp.529-543, 1987.

## Chapter 3

# ウェーブレットを用いた スペックルの低減



### 3. Wavelet-Based Speckle Reduction

In this chapter, a wavelet-based filter to reduce speckle in SAR images is presented. The filter, referred to as WSF in this chapter, is based on an idea that speckle may be suppressed by reducing the amplitude of the pixels in detail images (i.e., the wavelet coefficients) of each wavelet decomposition level. Edges are detected in detail images themselves, and are preserved by releasing the amplitude reduction around them. Simulations and application to SAR images show that the performance of the WSF is satisfactory in both speckle smoothing and edge preservation, and in generating visually-natural images as well.

In the latter half of this chapter, the relation between the smoothing effect of the WSF and the parameters is fully investigated. The smoothing effect is dependent on the decomposition level and the degree of amplitude reduction of detail images. Using this relation, the WSF combined with the homomorphic filtering is studied. Furthermore, the polarimetric WSF (i.e., independently filtering each element of Kennaugh matrices) is considered. An approach for speckle reduction with texture preservation is also derived.

(English publications relevant to this chapter: 1-a, 1-b, 1-c, 2-a, 2-c)

### 3.1 あらまし

本章では、SAR 画像のスペックルを低減するための、ウェーブレット分解を応用した新たなフィルタを提案している。提案するフィルタは、画像の高周波成分に属するスペックルを、ウェーブレット分解された差分画像の振幅を圧縮することにより低減するものである。その際、多重解像度でエッジを検出／保存する処理を加えることで、画像の構造を損なうことなく、スペックルによる揺らぎを平滑化する。

各節の内容としては、まず 3.2 で、スペックル低減フィルタに課せられる目標をまとめ、既存の代表的なフィルタとして、局所統計フィルタについて概説する。次いで、3.3 で、提案するフィルタのアルゴリズムを提示し、その性能をシミュレーションや実際の SAR 画像への適用を通じて検証する。3.4 では、フィルタのアルゴリズムに含まれるパラメータと平滑効果の関係を定量的に示す。その結果は、対数の形で表現された画像や、ポーラリメトリックなデータなど、様々なフォーマットに対する提案フィルタの適用性を論じる 3.5 へと繋がる。最後に、3.6 では、テクスチャを保存するスペックル低減の一つのアプローチについて述べる。これは、提案フィルタによる処理の前後で、テクスチャの CoV を保存しようとするものである。

### 3.2 スペックル低減フィルタ

スペックルは、SAR 画像中で米粒状の斑点として現れ、画像判読の妨げとなる。2.2 で述べたマルチルック処理は、スペックルを低減するための前処理であり、 $L$  ルックの場合、その標準偏差を  $1/\sqrt{L}$  にすることができる。しかしながら、マルチルックによるラジオメトリックな分解能の向上と空間分解能の劣化の間にはトレードオフが存在し、したがって、やみくもにマルチルック数を大きくすることは現実的ではない。このため、数ルック程度の画像について、さらにスペックルを低減するためのフィルタ（ポストマルチルックフィルタ）が必要とされている [LEE81, LEE82, FRO82, LEE83, CRI85, KUA85, KUA87, LOP93]。

スペックルの乗法性を考えると、スペックル低減とは、観測される受信電力から後方散乱係数に関する所望の信号成分を抽出することに相当する。しかし、スペックルに苛まれた SAR 画像において、各画素の濃度は確率変数の実現値に過ぎず、計測の物理的な意味を有する量は、画素値の期待値<sup>1</sup>である。一様な領域の場合、期待値は局所的な画素値の平均により推定される。よって、スペックル低減フィルタを構成する際には、局所平均の保存性が第一の条件となる。これを踏まえた上で、スペックル低減の目標をまとめると、以下が挙げられる。

- 一様な領域におけるスペックルの平滑。
- エッジやテクスチャなどの画像構造の保存。
- 画像の視覚的な自然性の維持。

ここで、一様領域の平滑とエッジの保存は、通常、同時に達成することが困難な課題であるといえる<sup>2</sup>。テクスチャの保存は、スペックルとテクスチャという異種の揺らぎを、分離して



扱うことの難しさを伴っている。また、局所的な平均処理によって一様領域を平滑した場合、画像全体にわたつた視覚的な不自然さが生じることがある。定量化の困難を差し引いても、視覚的自然性はフィルタの性能の大きな指標となる。このような観点から、既存のスペックル低減手法を概観すると、課せられる目標をバランスよく完遂するフィルタは少ない。

Lee が提案した局所統計フィルタ (local statistics filter) は、代表的なエッジ保存型のスペックル低減手法として知られている [LEE81]。次節で、提案するフィルタの性能比較の対象として用いる都合上、以下、局所統計フィルタについて述べておく。

まず、観測される受信電力  $I$  を、抽出すべき信号成分  $x$  とスペックル  $w$  の積として表す。

$$I = xw \quad (3.1)$$

このとき、信号とスペックルの相関がないことを仮定すれば、 $x$  の平均と分散は、

$$\bar{x} = \bar{I}/\bar{w} = \bar{I} \quad (3.2)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_I^2 + \bar{I}^2}{\sigma_w^2 + \bar{w}^2} - \bar{x}^2 = \frac{\sigma_I^2 - \bar{I}^2 \sigma_w^2}{\sigma_w^2 + 1} \quad (3.3)$$

のように求められる。上では、 $\bar{w} = 1$  を用いている。いま、観測値  $I$  を  $(\bar{x}, \bar{w})$  に関する 1 次のテイラー級数展開により線形化する。

$$I = \bar{w}x + \bar{x}(w - \bar{w}) \quad (3.4)$$

式 (3.4) は、式 (3.1) の最適線形近似となっている。この式に基づき、 $x$  の最小平均 2 乗誤差推定 (MMSE estimator) は、以下のように与えられる。

$$\hat{x} = \bar{x} + g(I - \bar{x}\bar{w}), \quad \left( g = \frac{\bar{w}\sigma_x^2}{\bar{x}^2\sigma_w^2 + \bar{w}^2\sigma_w^2} \right) \quad (3.5)$$

式 (3.2), (3.3) を、式 (3.5) に代入して整理すると、

$$\hat{x} = \bar{I} + g(I - \bar{I}), \quad \left( g = \frac{\sigma_I^2/\bar{I}^2 - \sigma_w^2}{\sigma_I^2/\bar{I}^2 + \sigma_w^4} \right) \quad (3.6)$$

が得られる。 $\bar{I}$ ,  $\sigma_I^2$  としては局所的なウィンドウ内の平均、分散を求め、 $\hat{x}$  をウィンドウの中心画素に割り当てる。 $\sigma_w$  については、一様な領域の CoV を計算して用いる<sup>3</sup>。

局所統計フィルタの効果は、式(3.6)から直観的に理解できる。 $\sigma_I^2/\bar{I}^2 \approx \sigma_w^2$ であるような一様な領域に対しては、 $g \approx 0$ となり、フィルタはウィンドウ内の平均 $\bar{I}$ に近い値を返す。逆に、 $\sigma_I^2/\bar{I}^2$ が大きい不均質な領域では、 $g \approx 1$ のため、観測値 $I$ 付近の値をそのまま出力する。つまり、一様領域の画素値は平均化し、エッジを含むような領域の画素値は変更しないことにより、比較的良好なエッジ保存型のスペckル低減を果たすものである。

### 3.3 ウェーブレットを用いたスペckル低減フィルタ (WSF) の提案

ウェーブレットを用いた雑音低減の手法としては、hard thresholding や soft thresholding などの閾値処理が知られている [DON94, DON95]。例えば、hard thresholding は、ウェーブレット分解で生成したウェーブレット係数のうち、その絶対値が閾値より小さいものを0で置き換えるという処理を行う<sup>4</sup>。これに対し、ここでは、SAR 画像をウェーブレット分解して得られるウェーブレット係数、すなわち差分画像の振幅を、一定の割合で圧縮することにより、スペckルを低減する手法を提案する。以下では、提案するフィルタを WSF (Wavelet-based Speckle Filter) と呼ぶ<sup>5</sup>。

画像のウェーブレット分解が出力する3枚の差分画像は、原画像の高周波成分により構成されており、その後階層的に分解された、あるレベルにおける差分画像は、一つ前のレベルの近似画像の高周波成分を含んでいる。WSF は、スペckルは高周波な揺らぎであり、ウェーブレット分解された際、主に差分画像にのるため、その振幅を圧縮することで低減される、というアイデアに基づいたものである。差分画像の振幅 (ウェーブレット係数) は正負の値をとるため、WSF ではその絶対値が圧縮される。

スペckルの振幅を圧縮するという着想は、そもそも [HIRO88, HIRO89, HIRO92] で、実空間において提案された。この手法は、CoV により局所領域内の一様性を判定した後、一定の割合 (50%程度) で画素値の振幅を圧縮するものであり、他のフィルタとの比較実験においても、優れた性能を有することが報告されている [GEB95]。WSF は、一つの側面においては、その多重解像度への拡張として位置付けられる。

#### アルゴリズム

WSF の基本アルゴリズムは以下である。

- I. SAR 画像を  $M$  レベルまでウェーブレット分解する。
- II. 各レベルの差分画像の振幅の絶対値を  $\alpha\%$  に圧縮する。
- III. 処理した差分画像と各レベルの近似画像から、画像を再構成する。

しかし、上のアルゴリズムは、差分画像全体の振幅をおしなべて圧縮するため、スペckルによる揺らぎを低減するだけでなく、エッジ構造をも損わせる、という問題点を孕んでいる。図 3-1 に、WSF による処理前後のエッジのふるまいを例示する。(a) は濃度の異なる二つの一様領域によるエッジを有する 4 ルック相当のシミュレーション画像、(b) は (a) を上の基本アルゴリズム ( $M = 5$ ,  $\alpha = 50$ ) で処理した画像である ((c) については後述)。なお、ここではハール基底を用いている。(b) では、一様領域におけるスペckルは平滑化されているものの、エッジ付近に矩形上のぼけが生じていることがみてとれる。このように、基本アルゴリズムの段階では、WSF はエッジ保存型のスペckル低減フィルタとなり得ていない。

エッジを保存する処理を組み込んだ、WSF の完全なアルゴリズムを以下に示す。

I'. SAR 画像を  $M$  レベルまでウェーブレット分解する。

II'. 次の手順で、各レベルの差分画像を処理する。

II'a. 各レベルの差分画像の画素値を、その振幅の絶対値が閾値  $T_d$  より大きいかな否かで、ハイレベル/ローレベルに二値化する。

II'b. ローレベルピクセルの振幅の絶対値を  $\alpha$  % に圧縮する。

II'c. ハイレベルピクセルについては、その周りに  $3 \times 3$  のウィンドウをとり、図 3-2 のような“ハイエリア”を設定する。ハイエリアは LH, HL, HH 画像に対してそれぞれ異なる。

II'c-1. ウィンドウ内のハイエリアにハイレベルピクセルを含む場合、中心ピクセルの振幅を保存する。

II'c-2. ウィンドウ内のハイエリアにハイレベルピクセルを含まない場合、中心ピクセルの振幅の絶対値を  $\beta$  % に圧縮する。

III'. 処理した差分画像と各レベルの近似画像から、画像を再構成する。

前節で述べた局所統計フィルタなどでのエッジ保存の方法が、局所領域の統計量に立脚したものであるのに対し、WSF はウェーブレット分解された多重解像度の差分画像におけるエッジ情報 [MAL92] を検出する。ウェーブレット分解においては、図 3-3 のように、各方向のエッジが LH, HL, HH 画像に分離的に現れるため、WSF では、図 3-2 のウィンドウにより、エッジの情報を構成する画素を同定する。このウィンドウは、差分画像におけるエッジ情報の方向性に則って作られている。エッジ成分であると同定された画素に対しては、振幅の圧縮を差し控える (II'c-1)。スペckル低減におけるエッジ保存にあつて、エッジ成分を同定し、その画素値を維持するというコンセプトは一般的なものであるが、その際、方向性を考慮して多重解像度でエッジを同定/保存するという点が、WSF の特色であるといえる。

図 3-1(c) は、(a) を WSF の完全な形のアルゴリズムによって処理した画像である ( $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = \beta = 50$ )。 (b) と比較して、エッジ保存性に関し、大幅な改善がみられている。

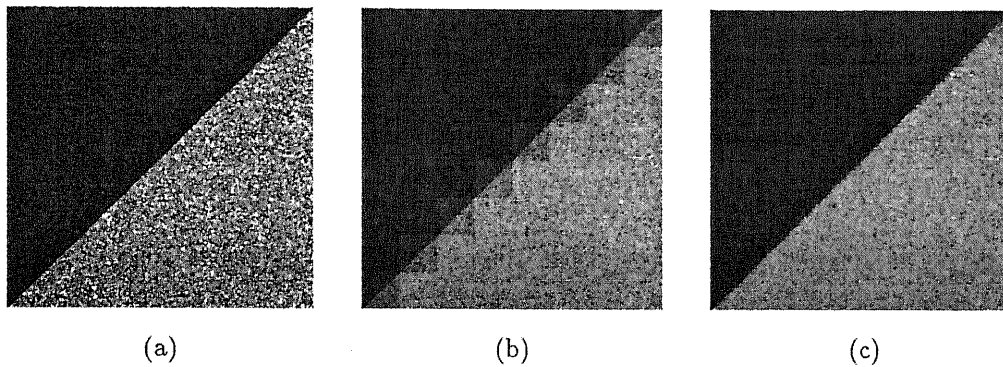


図 3-1. WSF による処理前後のエッジのふるまい. (a) 原画像 (シミュレーション画像, 4 ルック), (b) WSF の基本アルゴリズムによる処理画像 ( $M = 5$ ,  $\alpha = 50$ ), (c) WSF の完全なアルゴリズムによる処理画像 ( $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = \beta = 50$ ). WSF の基底はハール基底.

**Fig. 3-1.** Behaviour of edges through WSF: (a) original simulated image (four-look), (b) filtered image by the basic WSF algorithm ( $M = 5$ ,  $\alpha = 50$ ), (c) filtered image by the complete WSF algorithm ( $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = \beta = 50$ ). In this simulation the Haar basis is used.

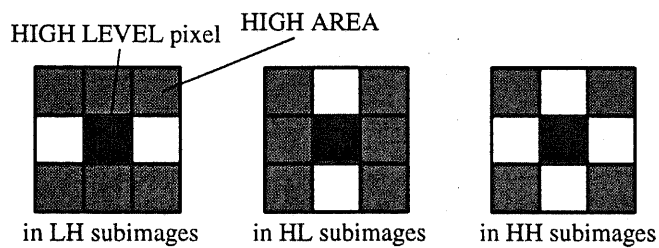


図 3-2. エッジ情報を検出するウィンドウ.

**Fig. 3-2.** Windows for detecting edge information in each detail image.

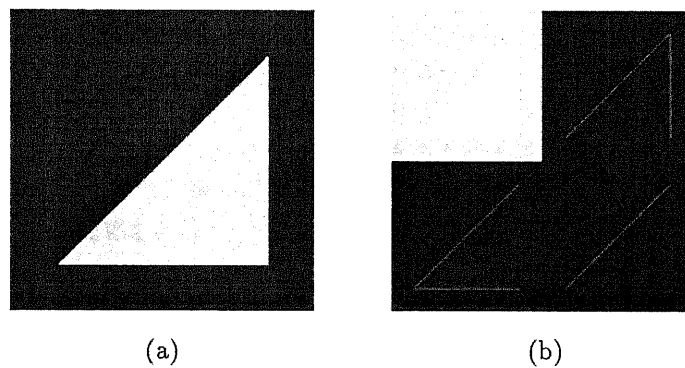


図 3-3. 差分画像におけるエッジ情報. (a) 原画像, (b) ハール基底によりウェーブレット分解された画像. 差分画像は振幅の絶対値を表示している.

**Fig. 3-3.** Edge information in detail images: (a) original image, (b) wavelet-decomposed image using the Haar basis. The detail images show the absolute value of the amplitude.

## シミュレーションによる性能検証

ここでは、WSF の一様領域での平滑効果とエッジ保存性能を、シミュレーションによって検証した結果を示す。シミュレーション画像は、スペckルの統計的性質に則して SAR の強度画像を模擬し、256 階調に割り当てたものを用いている。

一様領域の平滑効果は、処理画像の ENL を計算することによって調べられる。この場合、エッジの保存を考える必要がないため、基本アルゴリズム I-III で処理する。アルゴリズムに含まれるパラメータ  $M$ 、 $\alpha$  に対する、出力画像の ENL を表 3-1 に示す。ウェーブレット分解の基底としては、ハール基底 (D2)、および Daubechies の 4 タップ (D4)、6 タップ (D6) の基底について評価した。原画像の ENL は 4.10、平均値は 256 階調にして 49.21、画像サイズは  $64 \times 64$  画素である。また、比較の対象として、局所統計フィルタ ( $3 \times 3$  ウィンドウ) による処理画像の ENL も付している。

表 3-1 から、まず、分解レベル  $M$  が増すにつれて、WSF の処理画像の ENL が大きな値をもつことが伺える。このことは、より多重化された解像度で、スペckル低減が行われることを考えれば、妥当な結果であるといえる。また、ENL の増加は  $M = 4 \sim 5$  で飽和しているが、これは画像のサイズに起因した現象である。より大きなサイズの画像に対しては、さらに深いレベルまで分解を行うことで、最大限の平滑性能が引き出されると予想される。

次に、ENL と  $\alpha$  の関係を見ると、当然、 $\alpha$  に小さい値を設定した方が、より大きな ENL を得られている。特に、 $\alpha = 40$  とした場合に  $M = 3$  以上で得られる ENL は、局所統計フィルタによるそれを上回っている。しかしながら、実際の応用において、 $\alpha$  (あるいは  $\beta$ ) に過度に小さな値を与えると、差分画像が不用意に圧縮され、情報の喪失による処理画像の劣化が生ずる。 $\alpha$  を 0 に近づけることは、各解像度の近似画像のみから画像を再構成することに他ならない。

また、基底の違い (ハール、D4、D6) は、ENL の値に有意な差を与えるものではない。基底の差異は、むしろ、後述するエッジ保存性能や、実際の SAR 画像に適用したときの視覚的自然性に影響を及ぼす。

表 3-1 における括弧内の数値は、処理画像の平均値を表している。これから、WSF が原画像の平均値を維持していることが分かる。前節で述べたように、原画像の平均値を保存し得ることは、スペckル低減処理が施された画像における、物理量 (後方散乱係数) の妥当性という点で重要である。

WSF のエッジ保存性能の検証として、図 3-4 を示す。これは、エッジを含む画像の画素値を、3 次元的に表示したものである。パラメータは、 $M = 5$ 、 $T_d = 128$ 、 $\alpha = 40$ 、 $\beta = 50$  としている。図で、(a) は二つの一様領域 (256 階調にして 150 と 25) によりエッジを構成する画像パターン、(b) は (a) に対する 4 ルック相当のスペckルパターンである。(b) から、あらためて、スペckルの激しい揺らぎを認めることができる。(c)~(e) は、(b) に対する WSF の処理結果である。それぞれ、ハール、D4、D6 基底の出力を表している。(f) は局所統計フィル

タの出力である。(c)~(e)を比較すると、ハール基底を用いた場合の結果が、最も鋭角的／直線的にエッジを保存している。(f)の局所統計フィルタと比べても、(c)の方が良好な性能を呈している。逆に、基底のタップが長くなるにしたがい、エッジの不鮮明化が進んでいる。したがって、エッジ保存性の観点からは、タップの短い基底が有効であるといえる。

以上、ここでのWSFの性能検証の結果は、次のようにまとめられる。平滑効果とパラメータの関係については、次節で定量的な考察を与える。

- WSFによる処理画像のENLは、分解を重ねるにつれて増加し、一定の値で飽和する。
- 差分画像の振幅の圧縮割合を小さくするほど、WSFの平滑効果は増す。適当なパラメータの値を設定すれば、局所統計フィルタと同等以上の平滑効果を得られる。
- 分解に用いる基底の差異は、一様領域の平滑性能には影響しない。
- WSFは原画像の平均値を保存する。
- エッジ保存性に関しては、タップの短い基底が有効である。特にハール基底を用いた場合、局所統計フィルタの出力と比較しても、良好にエッジが保存される。

表 3-1. WSF の一様領域の平滑効果.

Table 3-1. Smoothing effect of WSF in a homogeneous simulated image.

original		ENL = 4.10 (mean = 49.21)				
local statistics filter (3×3 window)		20.21 (49.04)				
		$M = 1$	2	3	4	5
Haar(D2)	$\alpha = 40$	10.75	19.53	23.89	25.35	25.60
		(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)
	50	9.16	13.92	15.75	16.30	16.40
		(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)
	60	7.76	10.30	11.12	11.35	11.39
		(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)	(49.21)
D4	40	10.67	19.80	24.29	25.23	25.44
		(49.21)	(49.21)	(49.20)	(49.20)	(49.20)
	50	9.10	14.04	15.90	16.26	16.33
		(49.21)	(49.21)	(49.20)	(49.20)	(49.20)
	60	7.73	10.36	11.18	11.33	11.36
		(49.21)	(49.21)	(49.20)	(49.20)	(49.20)
D6	40	10.79	19.46	24.29	25.29	25.55
		(49.22)	(49.23)	(49.24)	(49.25)	(49.26)
	50	9.19	13.89	15.91	16.29	16.39
		(49.22)	(49.23)	(49.24)	(49.25)	(49.26)
	60	7.77	10.29	11.19	11.35	11.40
		(49.22)	(49.23)	(49.24)	(49.25)	(49.26)



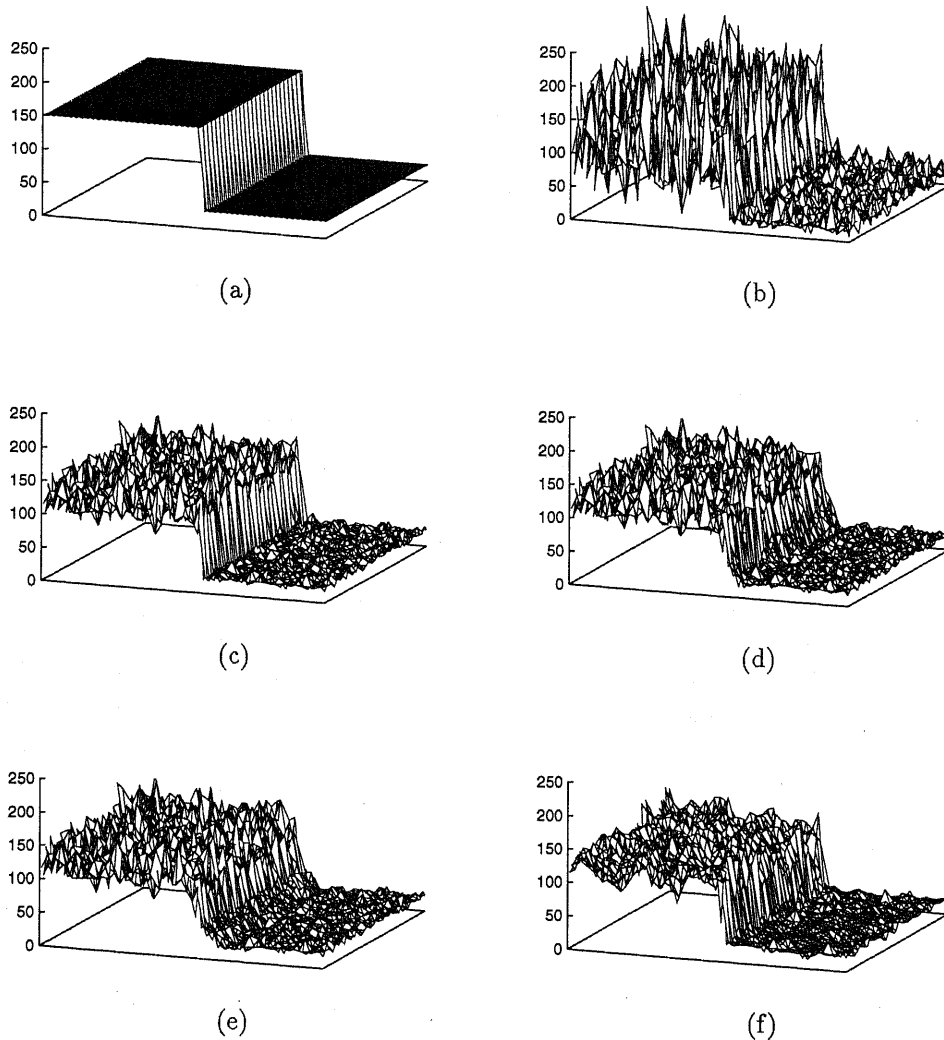


図 3-4. WSF のエッジ保存性能. (a) オリジナルパターン, (b) スペックルパターン (4 ルック), (c) WSF (ハール基底), (d) WSF (D4 基底), (e) WSF (D6 基底), (f) 局所統計フィルタ (3×3 ウィンドウ). WSF のパラメータは,  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$  としている.

**Fig. 3-4.** Edge preservation performance of WSF: (a) original pattern, (b) speckled pattern (four-look), (c) WSF (Haar basis), (d) WSF (D4 basis), (e) WSF (D6 basis), (f) local statistics filter (3×3 window). The parameters of WSF are settled as  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$ .

### SAR 画像への適用

WSF を実際の SAR 画像に適用した結果を示す。適用対象は、AIRSAR による 4 ルック、HH 偏波の画像である。また、ここでも、局所統計フィルタ ( $3 \times 3$  ウィンドウ) による処理画像を比較対象として提示する。

まず、図 3-5 は、前出の農耕地サイト Flevoland (図 1-2, 2-3 参照) の別の領域を撮像した、L バンドの画像に対する結果である。(a) は原画像、(b) は局所統計フィルタの出力、(c)、(d) がそれぞれハール基底、D4 基底を用いた WSF による処理結果である。パラメータは、 $M = 5$ 、 $T_d = 128$ 、 $\alpha = 40$ 、 $\beta = 50$  と設定している。この図から、WSF はエッジや画像の視覚的自然性を損なうことなく、スペckルの揺らぎを十分に低減している様子を見ることが出来る。局所統計フィルタの出力と見比べても、定量的な評価は困難であるにせよ、より自然な画像を生成しているといえる。また、基底の比較では、農耕地を撮した本画像のように、直線的な境界が多く存在する場合、よりコンパクトなハール基底が、エッジ保存性でやや優れている。

WSF の平滑効果は、分解を重ねるにつれて増すことは先に述べたが、図 3-5 の原画像に対し、分解レベル  $M$  を 1 から 5 としてそれぞれ処理した画像を、図 3-6 に示す。この図は、スペckルの振幅を多重解像度で圧縮することの効果をも端的に表している。

一方、図 3-7 は、ハワイの Kilauea 火山の C バンド画像をフィルタリングしたものである。この図においても、WSF が良好なスペckル低減画像を供していることが認められる。しかし、図 3-5 とは逆に、ハール基底の出力よりも、D4 基底のそれの方が自然に感じられる。これは、山肌のような滑らかな自然形状には、ややタツプの長い連続な基底が適しているためであると考えられる。このように、基底の選択については、その優劣を一概に断ずることは難しく、被処理画像を十分に吟味した上で、基底との“相性”を考え合わせ、用いる基底を決定すべきであるといえる。

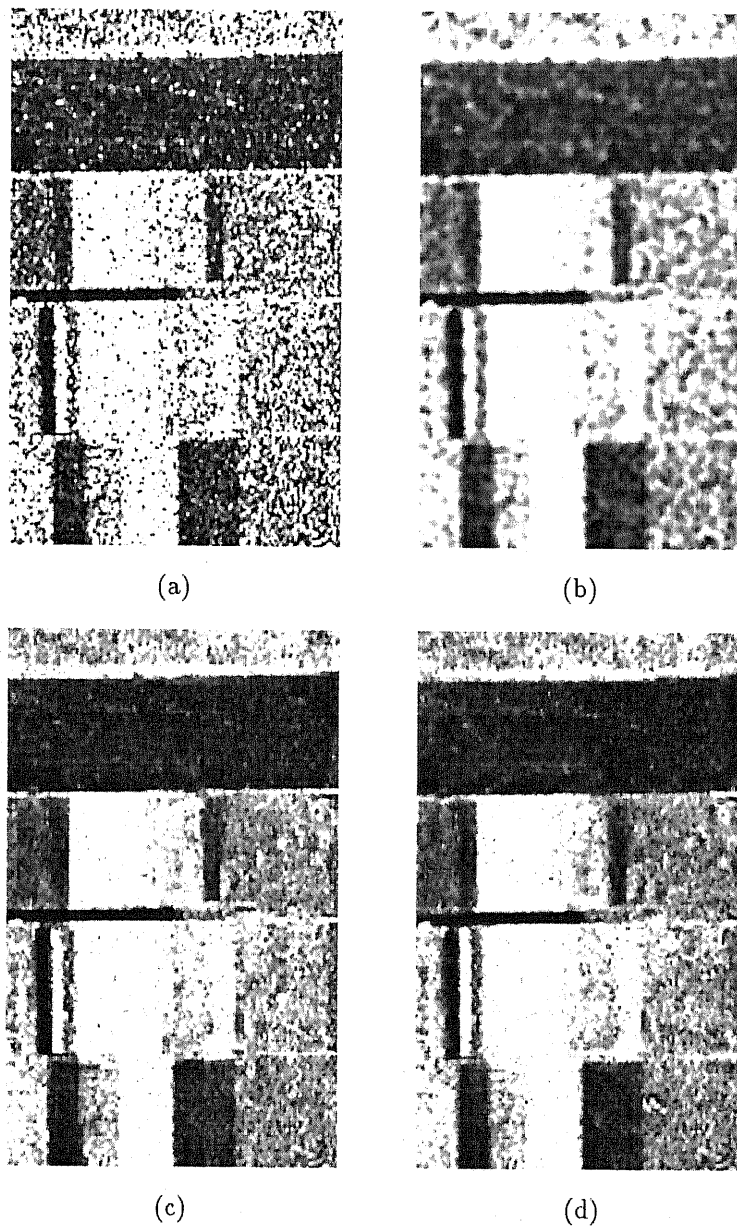


図 3-5. WSF の AIRSAR 画像への適用 — (1) Flevoland. (a) 原画像 (4 ルック, L バンド, HH 偏波), (b) 局所統計フィルタ (3×3 ウィンドウ), (c) WSF (ハール基底), (d) WSF (D4 基底). WSF のパラメータは,  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$  としている.

Fig. 3-5. Filtering of an AIRSAR image — (1) Flevoland: (a) original four-look image at L-HH band, (b) local statistics filter (3×3 window), (c) WSF (Haar basis), (d) WSF (D4 basis), The parameters of WSF are settled as  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$ .

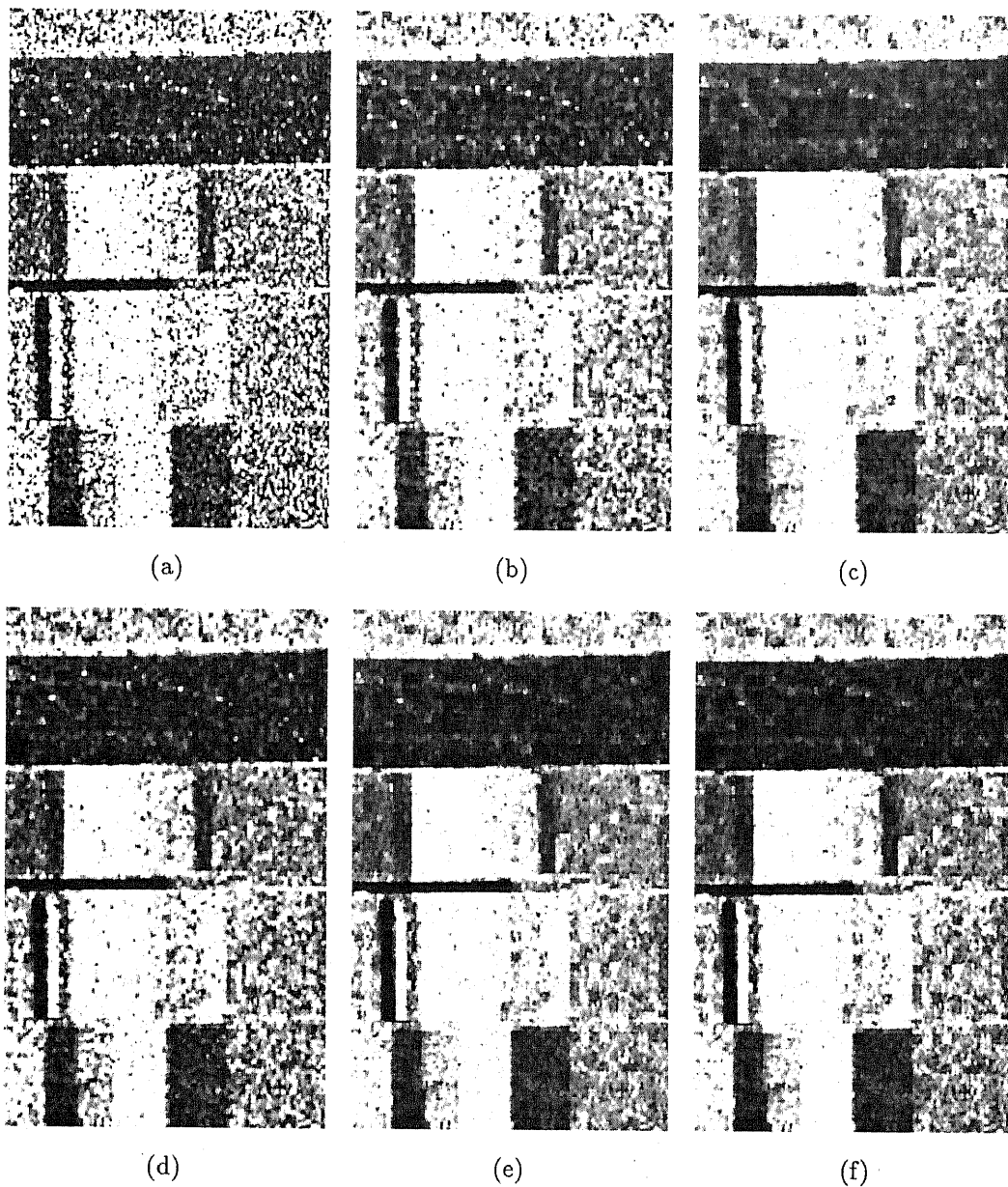


図 3-6. ウェーブレット分解のレベルに関する処理画像の比較. (a) は原画像. (b) から (f) は, ハール基底を用いた WSF で, それぞれ  $M = 1$  から 5 とした処理画像. その他のパラメータは, 図 3-5 と同様である.

Fig. 3-6. Comparison of WSF outputs: (a) is the original image. The images (b)–(f) are outputs of WSF using the Haar basis with  $M = 1, 2, \dots, 5$ , respectively. The remaining parameters are same as in Fig. 3-5.

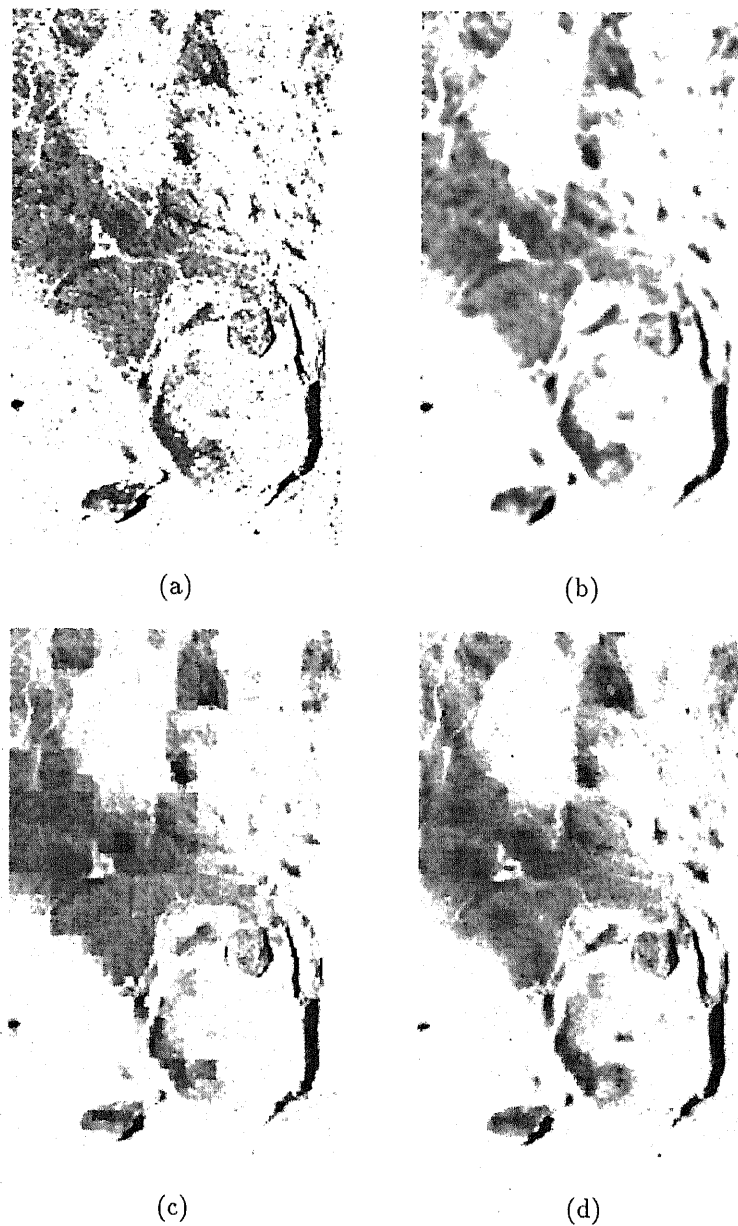


図 3-7. WSF の AIRSAR 画像への適用 — (2) Kilauea 火山. (a) 原画像 (4 ルック, C バンド, HH 偏波), (b) 局所統計フィルタ (3×3 ウィンドウ), (c) WSF (ハール基底), (d) WSF (D4 基底). WSF のパラメータは,  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$  としている.

Fig. 3-7. Filtering of an AIRSAR image — (2) Kilauea Volcano: (a) original four-look image at C-HH band, (b) local statistics filter (3×3 window), (c) WSF (Haar basis), (d) WSF (D4 basis), The parameters of WSF are settled as  $M = 5$ ,  $T_d = 128$ ,  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 50$ .

### 3.4 WSF の平滑効果

WSF のアルゴリズムは、複数のパラメータを含んでいる。WSF を用いるユーザは、必要とする平滑度を鑑み、パラメータの値を設定しなければならない。本節では、パラメータ設定の指針を与えるべく、WSF の平滑効果とパラメータの関係を定量的に考察する。なお、この考察においては、エッジを含まない様な領域のみを対象とする。したがって、p.39 の基本アルゴリズムにおける  $M$ 、 $\alpha$  と平滑効果との関係を検討する。

以下では、ハール基底を用いる場合を考える。WSF の平滑効果を調べるにあたっては、まず、処理前後における“イメージユニット”のふるまいを知る必要がある。イメージユニットとはここで定義する用語で、処理画像の1画素に作用する原画像内の局所領域を指す。ハール基底によれば、イメージユニットの大きさは、 $M$  レベルまでのウェーブレット分解で  $2^M \times 2^M$  画素となり、また、各々のイメージユニットは互いに重ならない。このとき、WSF ( $W$  で表す) によって、イメージユニット  $\mathbf{Y} = \{v_{ij} | 0 \leq i, j \leq 2^M\}$  は、次式のように処理される。

$$W(\mathbf{Y}) = \frac{100 - \alpha}{100} \mu_v \mathbf{G} + \frac{\alpha}{100} \mathbf{Y}, \quad (\mathbf{G} = \{g_{ij} = 1 | 0 \leq i, j \leq 2^M\}) \quad (3.7)$$

$\mu_v$  はイメージユニット内の画素値の平均を表す。

(例)  $M = 1$  の場合

イメージユニットの大きさは  $2 \times 2$  ピクセルであり、ウェーブレット分解は次のように表せる。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} \\ v_{12} & v_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v_{11} + v_{21} + v_{12} + v_{22} & v_{11} - v_{21} + v_{12} - v_{22} \\ v_{11} + v_{21} - v_{12} - v_{22} & v_{11} - v_{21} - v_{12} + v_{22} \end{bmatrix}$$

差分画像を  $\alpha\%$  に圧縮すると、以下となる。

$$\Rightarrow \frac{\alpha}{200} \begin{bmatrix} 100(v_{11} + v_{21} + v_{12} + v_{22})/\alpha & v_{11} - v_{21} + v_{12} - v_{22} \\ v_{11} + v_{21} - v_{12} - v_{22} & v_{11} - v_{21} - v_{12} + v_{22} \end{bmatrix}$$

これをウェーブレット再構成することで、WSF によって処理されたイメージユニットが得られる。

$$\Rightarrow \frac{(100 - \alpha)(v_{11} + v_{21} + v_{12} + v_{22})}{400} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\alpha}{100} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} \\ v_{12} & v_{22} \end{bmatrix} = W(\mathbf{Y})$$

式(3.7)から、フィルタリングされたイメージユニット内の画素値の平均と分散は、

$$\mu_{W(v)} = \frac{100 - \alpha}{100} \mu_v + \frac{\alpha}{100} \mu_v = \mu_v \quad (3.8)$$

$$\sigma_{W(v)}^2 = \left\langle \left( \frac{100 - \alpha}{100} \mu_v + \frac{\alpha}{100} v_{ij} - \mu_{W(v)} \right)^2 \right\rangle = \left( \frac{\alpha}{100} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.9)$$

となる。 $\sigma_v^2$ はもとのイメージユニット内の分散である。

一方、画像全体の平均 $\mu$ と分散 $\sigma^2$ は、画像内のイメージユニットの平均と分散により、次式のように表せる。

$$\mu = \frac{1}{N_v} \sum_{m=1}^{N_v} \mu_{v,m} \quad (3.10)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_v} \sum_{m=1}^{N_v} [\sigma_{v,m}^2 + (\mu_{v,m} - \mu)^2] \quad (3.11)$$

$N_v$ は画像内のイメージユニットの個数、 $\mu_{v,m}$ 、 $\sigma_{v,m}^2$ は画像内の $m$ 番目のイメージユニット内の画素値の平均、および分散である。式(3.8)、(3.9)でみたように、WSFにより、イメージユニット内の平均は処理前と変化せず、分散のみが $(\alpha/100)^2$ 倍になる。よって、式(3.10)、(3.11)から以下のことがいえる。

- $\mu$ はWSFによる処理前後で変化しない。
- $\sigma^2$ はWSFによる処理前後で $P_W$ 倍に減少する。

$$P_W = \frac{\sum_{m=1}^{N_v} [(\alpha/100)^2 \sigma_{v,m}^2 + (\mu_{v,m} - \mu)^2]}{\sum_{m=1}^{N_v} [\sigma_{v,m}^2 + (\mu_{v,m} - \mu)^2]} \quad (3.12)$$

このことは、ひいては、WSFがSAR画像のENLを $1/P_W$ 倍にすることを示唆している。したがって、ユーザはこの関係を用い、必要とする平滑効果(ENL)に見合ったパラメータ $M$ 、 $\alpha$ を設定すればよい。なお、 $M$ は式(3.12)で $N_v$ に関係している。

### 3.5 様々なフォーマットのデータへの WSF の適用

本節では、対数形式で表現された画像や、ポーラリメトリックなデータなど、様々なフォーマットに対する WSF の適用性、およびその場合に留意すべきことがらについて述べる。

#### homomorphic フィルタリングとの関係

信号処理において、実際の処理に先立って適当な変換を施す homomorphic フィルタリングは、信号が各成分の積や畳み込みなどの演算で表されるようなシステムにおいて有効である [OPE68]。スペckルが乗法的に作用する SAR 画像の処理にあつては (式 (3.1) 参照)、対数/指数演算が homomorphic フィルタリングとして用いられ、これにより、スペckル成分は一般的な加法性の雑音に変換できる [ARS84, FRA95]。

$$\log(I) = \log(xw) = \log(x) + \log(w) \quad (3.13)$$

そこで、ここでは対数演算が施された画像に対する WSF を考える。図 3-8 に示したように、WSF による処理後、再び指数演算が行われる。

式 (3.7) でみたように、あるピクセル  $v_{ij}$  は WSF によって、

$$\mathcal{W}(v_{ij}) = \frac{100 - \alpha}{100} \mu_v + \frac{\alpha}{100} v_{ij} \quad (3.14)$$

のように変化する。これに対し、WSF の前後に対数/指数演算が組み込まれたとき ( $\mathcal{W}_h$  で表す)、処理後の  $v_{ij}$  は次式のように与えられる。

$$\mathcal{W}_h(v_{ij}) = \mu_{v,g}^{\frac{100-\alpha}{100}} v_{ij}^{\frac{\alpha}{100}} \quad (3.15)$$

$\mu_{v,g}$  はユニット内のスペckルの相乗平均である。ここで注意すべきことは、 $\mathcal{W}_h(v_{ij})$  のユニット内での平均が、 $\mu_v$  と比較して小さくなることである。3.2 でも述べたように、スペckル低減によって局所平均値が変化した場合、処理画像から後方散乱係数に関する物理量を抽出することが不可能となる。したがって、各イメージユニットごとに

$$\mu_v - \mu_{v,g}^{\frac{100-\alpha}{100}} \left\langle v_{ij}^{\frac{\alpha}{100}} \right\rangle$$

を処理後に  $\mathcal{W}_h(v_{ij})$  に加えるなどして、局所平均を補正する必要がある。



図 3-9 に、homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF の処理例を示す。この図から、WSF は homomorphic フィルタリングと結合されると、スペckルの揺らぎは低減し得るものの、画像全体をやや暗くする、つまり画像濃度の平均を低下させてしまうことがみてとれる。



図 3-8. homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF.

Fig. 3-8. WSF combined with homomorphic filtering.

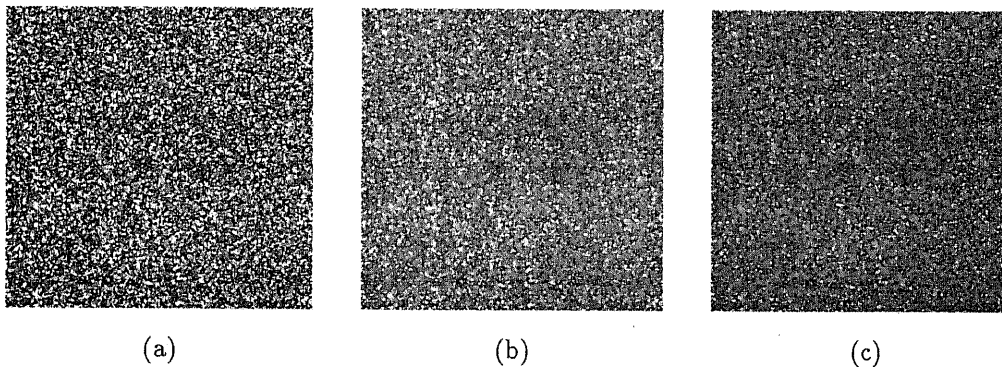


図 3-9. homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF(処理例). (a) 原画像(シミュレーション画像, 4 ルック, 平均値 149.99), (b) WSF による処理画像(平均値 149.99) (c) homomorphic フィルタリングと組み合わせた WSF による処理画像(平均値 136.15).

Fig. 3-9. Comparison of speckle-reduced images by WSF with and without homomorphic filtering: (a) original simulated image (four-look, mean=149.99), (b) WSF (mean=149.99), (c) WSF with homomorphic filtering (mean=136.15). Here the Haar basis is used.

## ポーラリメトリックなデータへの WSF の適用

90年代の始めから、ポーラリメトリックなデータに対するスペckル低減の研究も散見されるようになってきている。PWF(Polarimetric Whitening Filter)[NOV90]や最適加重法[LEE91]などがそれである。例えば、PWFはHH, HV, VV偏波の3枚の画像から、スペckルが最小化されるように重み付けして足し合わせた1枚の画像を出力する。つまり、PWFの出力画像においては、ポーラリメトリックな情報は喪失されている。これに対し、ここでは、ポーラリメトリックなデータへのWSFの適用として、ケンナウ行列の各成分にそれぞれ等しくWSFを施す手法について検討する<sup>6</sup>。

式(2.24)でみたように、ケンナウ行列  $\mathbf{K}_{ij}$  が与えられたとき、ストークスペクトル  $\mathbf{J}_t$ ,  $\mathbf{J}_r$  で表現される送受偏波に対する受信電力は、

$$P_{ij} = \frac{F}{2(kR)^2} \mathbf{J}_r^T \mathbf{K}_{ij} \mathbf{J}_t \quad (3.16)$$

で計算される。 $P_{ij}$  に対するWSFの処理は、式(3.7),あるいは(3.14)と同様を書くことができ、つまり、イメージユニット内における近傍画素の線形結合として、以下のように表せる。

$$\mathcal{W}(P_{ij}) = \sum_{i,j}^U r_{ij} P_{ij} \quad (3.17)$$

上では、イメージユニットの大きさを  $U \times U$  画素としている。式(3.17)を(3.16)に代入することにより、次式が得られる。

$$\mathcal{W}(P_{ij}) = \sum_{i,j}^U r_{ij} \left[ \frac{F}{2(kR)^2} \mathbf{J}_r^T \mathbf{K}_{ij} \mathbf{J}_t \right] = \frac{F}{2(kR)^2} \mathbf{J}_r^T \left( \sum_{i,j}^U r_{ij} \mathbf{K}_{ij} \right) \mathbf{J}_t \quad (3.18)$$

さて一方、その各成分に等しくWSFが施されたケンナウ行列は、次のように与えられる。

$$\mathcal{W}(\mathbf{K}_{ij}) = \sum_{i,j}^U r_{ij} \mathbf{K}_{ij} \quad (3.19)$$

したがって、 $\mathcal{W}(\mathbf{K}_{ij})$  から偏波合成された受信電力は、式(3.18)の右辺と等しくなる。このことは、ケンナウ行列による偏波合成とWSFとの間に、可換性が成立することを示している<sup>7</sup>。すなわち、WSFは、偏波合成の前に、ケンナウ行列に対して直接施すことが可能である。また、その場合に出力される画像は、偏波合成後の一般的なWSFのそれと同一であり、当然、スペckルの平滑効果にも差はない。

図 3-10 に、WSF が施されたケンナウ行列から得られる偏波シグネチャの例を示す。対応するもとのシグネチャは、図 2-5 である。図 3-10 のシグネチャは、co-pol, cross-pol とともに、図 2-5 とよく一致しており、WSF がデータのポーラリメトリックな性質を保持していることが分かる。実際には、偏波シグネチャは、一様領域における局所的なケンナウ行列の平均から、式 (2.27) により計算される。これまでに見たように、WSF は被処理データの平均を変化させない。よって、WSF により処理されたケンナウ行列から得られるシグネチャは、もとのシグネチャの形状を完全に保存したものであるといえる。

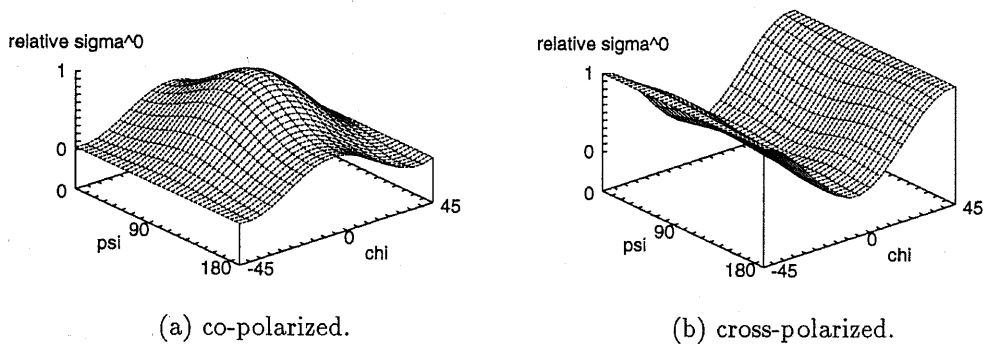


図 3-10. WSF が施されたケンナウ行列による偏波シグネチャ。対応するもとのシグネチャは、図 2-5 を参照。

**Fig. 3-10.** Polarization signatures when each Kennaugh matrix is processed by WSF. They are corresponding to Fig. 2-5.

### 3.6 テクスチャを保存するスペックル低減

1.2で述べたように、SAR画像の濃度の揺らぎはスペックルのみならず、テクスチャにも起因する。テクスチャはターゲット理解のための重要な情報となるため、テクスチャの存在するSAR画像においては、テクスチャを保存しつつ、スペックルによる揺らぎのみを低減する手法が必要となる [LOP93]。テクスチャの保存を考える際においては、テクスチャの定量化が不可避である。ここでは、CoVに着目し、テクスチャを保存するスペックル低減のための、WSFを用いた一つのアプローチを提示する。

SAR画像の濃度をスペックルとテクスチャの積とみなすとき、両者を独立とすると、画像のCoV( $C$ で表す)について以下の式が成り立つ [ULA86]。

$$C^2 = C_w^2 C_\gamma^2 + C_w^2 + C_\gamma^2 \quad (3.20)$$

$C_w$ 、 $C_\gamma$ はスペックル、およびテクスチャのCoVである。スペックルが完全に発達している場合、 $L$ ルック画像において、 $C_w = 1/\sqrt{L}$ であることは、2.2で既に述べた。これを、式(3.20)に代入すると、 $C_\gamma$ は次のように表せる。

$$C_\gamma = \sqrt{\frac{C^2 - 1/L}{1 + 1/L}} \quad (3.21)$$

いま、仮にテクスチャを保存したまま、完全にスペックルが低減されたとすると、画像のCoVは $C_\gamma$ に等しくなる。3.4でみたように、WSFは画像のENLを $1/P_w$ 倍にするため、CoVは $\sqrt{P_w}$ 倍になる。したがって、

$$\frac{C_\gamma}{C} = \frac{\sqrt{(C^2 - 1/L)/(1 + 1/L)}}{C} = \sqrt{P_w} \quad (3.22)$$

が満たされるように、WSFのパラメータを設定すれば、スペックル低減の前後でテクスチャのCoVを保存することができる。式(3.22)の $P_w$ に式(3.12)を代入し、 $\alpha$ について解くと、以下が得られる。

$$\alpha = 100 \cdot \sqrt{\frac{(1+z)[1 - 1/(LC^2)]}{1 + 1/L}} - z, \quad \left( z = \frac{\sum_{m=1}^{N_u} (\mu_{v,m} - \mu)^2}{\sum_{m=1}^{N_u} \sigma_{v,m}^2} \right) \quad (3.23)$$

例として、Brodatzのアルバム [BRO66] 中のテクスチャ画像を用いた実験の結果を示す。図3-11(a)はもとのテクスチャ画像、(b)は(a)に4ルックのスペックルを模擬的にかけた画像

である。ここで、ハール基底を用い、分解のレベル  $M$  を 5 としたとき、図 3-11(b) に対して式 (3.23) は  $\alpha \approx 47.2$  を与える。図 3-11(c) は、このパラメータによる WSF の処理画像である。図 3-12 には、各画像の濃度ヒストグラムを示す。これから、WSF がテクスチャの CoV を保存しながらスペckルを低減し、原画像のヒストグラムをうまく回復している様子が伺える。

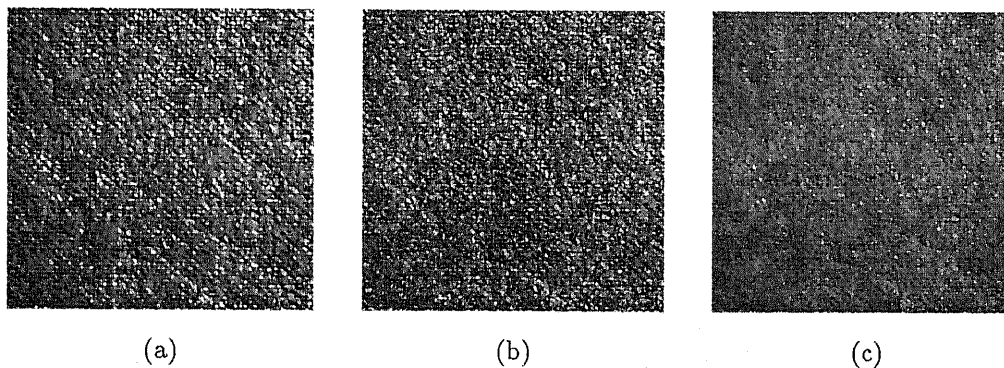


図 3-11. WSF によるテクスチャを保存するスペckル低減. (a) テクスチャ画像, (b) (a) に対する 4 ルックのスペckル画像, (c) WSF による処理画像 ( $M = 5$ ,  $\alpha = 47.2$ ). WSF の基底はハール基底.

**Fig. 3-11.** Speckle reduction with texture preservation using WSF: (a) original texture image, (b) four-look speckled image of (a), (c) filtered image by WSF ( $M = 5$ ,  $\alpha = 47.2$ ). Here the Haar basis is used.

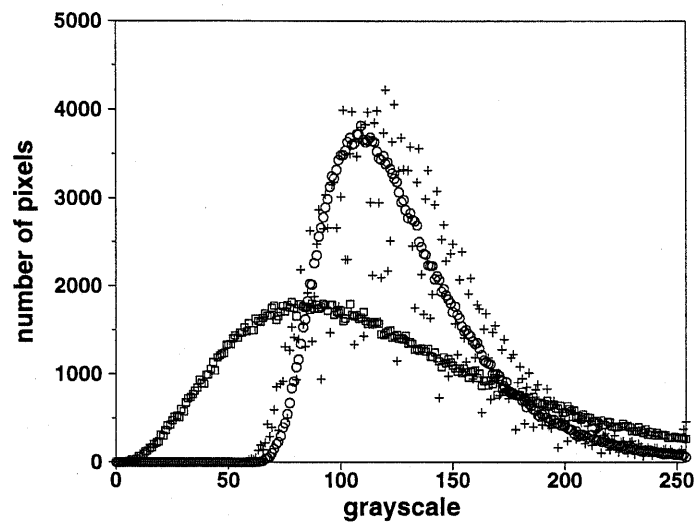


図 3-12. WSF によるテクスチャを保存するスペckル低減 (ヒストグラム). “+”, “□”, “o” はそれぞれ図 3-11 の (a), (b), (c) に対応.

Fig. 3-12. Histograms of Fig. 3-11(a)-(c). The marks of “+”, “□”, and “o” indicate (a), (b), and (c), respectively.

### 3.7 まとめ

SAR 画像上にみられるスペckルを低減するための、ウェーブレットを用いたフィルタ (WSF) を新たに提案した<sup>8</sup>。これは、スペckルによる高周波な揺らぎが、ウェーブレット分解で得られる差分画像の振幅 (ウェーブレット係数) を圧縮することにより抑えられる、というアイデアに基づいたものであり、その際、エッジなどの画像構造を保存するために、選択的な処理アルゴリズムを構築し、視覚的に自然な処理画像を出力することに成功した。フィルタの性能は、シミュレーション、および実際の SAR 画像への適用により調べられた。

また、WSF のフィルタパラメータと平滑効果の関係を定量的に考察した。このことは、homomorphic フィルタリングとの関係についてや、ケンナウ行列で与えられたポーラリメトリックなデータへの適用性など、WSF に関する発展的な研究へと結びついた。さらに、WSF のパラメータを適当に設定することで、処理前後におけるテクスチャの CoV を保存できることを示し、テクスチャ保存型のスペckル低減に対する先鞭をつけた。

### Notes

<sup>1</sup> ターゲットの後方散乱係数とシステムの等価雑音散乱係数に比例した量である [HIRO86].

<sup>2</sup> エッジ付近のスペckルの統計は、境界 (斜面など) のモデル化を必要とし [CAV95], 統一的な記述が難しい。したがって、一般的には、エッジ付近の画素値を保存するよう、フィルタのアルゴリズムを構築する。

<sup>3</sup>  $L$  ルック画像の CoV の理論値は  $1/\sqrt{L}$  であるが、実際の SAR 画像への適用において、これをそのまま  $\sigma_w$  として用いることは、マルチルックの際の近接画素間の相関の影響を鑑みて、好ましくない。

<sup>4</sup> このようなウェーブレット係数に対する閾値処理は、総称して wavelet shrinkage とも称される。

<sup>5</sup> 発表文献の中では、単にウェーブレットフィルタと呼んでいる場合が多い。

<sup>6</sup> 類似のアプローチとして、最近、共分散行列の各成分を局所統計フィルタで処理する手法が提案された [LEE99].

<sup>7</sup> 偏波合成との可換性は、処理画像が式 (3.17) の形で表せるフィルタリングに共通な性質である。その最も簡単な例は、マルチルック処理である。

<sup>8</sup> スペckルを低減するためのフィルタは、20 年来、各国の研究者によって盛んに研究されてきたが、筆者の研究以降、ごく最近になって俄にウェーブレットの利用が注目されている [HOR98, SIM98, GAG99, SVE99].

## References

- [ARS84] H. H. Arsenault and M. Levesque, "Combined homomorphic and local-statistics processing for restoration of images degraded by signal-dependent noise," *Applied Opt.*, vol.23, no.6, pp.845-850, 1984.
- [BRO66] P. Brodatz, *Textures — A Photographic Album for Artists and Designers*. New York: Dover, 1966.
- [CAV95] R. G. Caves, P. J. Harley, and S. Quegan, "Clutter statistics along edge features in synthetic aperture radar imagery," *J. Electromagn. Waves Applicat.*, vol.9, no.3, pp.327-353, 1995.
- [CRI85] T. R. Crimmins, "Geometric filter for speckle reduction," *Applied Opt.*, vol.24, no.10, pp.1438-1443, 1985.
- [DON94] D. L. Donoho and I. M. Johnstone, "Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage," *Biometrika*, vol.81, pp.425-455, 1994. Also Tech. Rep. 400, Department of Statistics, Stanford Univ., Stanford, CA, July 1992.
- [DON95] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.41, pp.613-627, May 1995. Also Tech. Rep. 409, Department of Statistics, Stanford Univ., Stanford, CA, Nov. 1992.
- [FRA95] G. Franceschetti, V. Pascazio, and G. Schirinzi, "Iterative homomorphic technique for speckle reduction in synthetic-aperture radar imaging," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol.12, no.4, pp.686-694, 1995.
- [FRO82] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, and J. C. Holtzman, "A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.PAMI-4, pp.157-165, Mar. 1982.
- [GAG99] L. Gagnon, "Wavelet filtering of speckle noise — Some numerical results," in *Proc. Conf. Vision Interface 1999 (VI'99)*, Trois Rivières, Canada, pp.336-343.
- [GEB95] M. Gebhardt, J. M. Horrell, and M. R. Inggs, "Comparison of speckle reduction techniques applied to airborne SAR imagery," in *Proc. 1995 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'95)*, Firenze, Italy, pp.172-174.
- [HIRO86] 広沢春任, "合成開口レーダ画像のラジオメトリックな画質に関する検討," *信学論 (B)*, vol.J69-B, pp.292-294, Mar. 1986.
- [HIRO88] H. Hirose and N. Kobayashi, "Reduction of speckle in one-look synthetic aperture radar images," in *Proc. 16th Int. Symp. Space Technology and Science*, Sapporo, Japan, 1988, pp.2235-2239.
- [HIRO89] H. Hirose and H. Kimura, "Generation of speckle-reduced one-look SAR images," in *Proc. 1989 Int. Symp. Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors (ISNCR-89)*, Kyoto, Japan, pp.705-710.
- [HIRO92] 広沢春任, "1ルックの合成開口レーダ画像のスペckルの低減," *信学論 (B-II)*, vol.J75-B-II, pp.197-200, Mar. 1992.
- [HOR98] G. Horgan, "Wavelets for SAR image smoothing," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol.64, no.12, pp.1171-1177, 1998.
- [KUA85] D. T. Kuan, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, and P. Chavel, "Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.PAMI-7, pp.165-177, Mar. 1985.
- [KUA87] \_\_\_\_\_, "Adaptive restoration of images with speckle," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol.ASSP-35, pp.373-383, Mar. 1987.
- [LEE81] J. S. Lee, "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images," *Comput. Graph. Image Process.*, vol.17, pp.24-32, 1981.



- [LEE82] \_\_\_\_\_, "Refined filtering of image noise using local statistics," *Comput. Vision, Graph., Image Process.*, vol.15, pp.380-389, 1981.
- [LEE83] \_\_\_\_\_, "Digital image smoothing and the sigma filter," *Comput. Vision, Graph., Image Process.*, vol.24, pp.255-269, 1983.
- [LEE91] J. S. Lee, M. R. Grunes, and S. A. Mango, "Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.29, pp.535-544, July 1991.
- [LEE99] J. S. Lee, M. R. Grunes, and G. de Grandi, "Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, pp.2363-2373, Sept. 1999.
- [LOP93] A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi and H. Laur, "Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images," *Int. J. Remote Sensing*, vol.14, no.9, pp.1735-1758, 1993.
- [MAL92] S. Mallat "Characterization of signals from multiscale edges," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.14, pp.710-732, July 1992.
- [NOV90] L. M. Novak and M. C. Burl, "Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.26, pp.293-305, Mar. 1990.
- [OPE68] A. V. Oppenheim, R. W. Shafer and T. G. Stockam, Jr., "Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals," *Proc. IEEE*, vol.56, pp.1264-1291, Aug. 1968.
- [SIM98] M. Simard, G. de Grandi, K. P. B. Thomson, and G. B. Béné, "Analysis of speckle noise contribution on wavelet decomposition of SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.36, pp.1953-1962, Nov. 1998.
- [SVE99] J. R. Sveinsson, A. M. Hrafnkelsson, and J. A. Benediktsson, "Multiple wavelet transform for speckle reduction of SAR images," in *Proc. 1999 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, pp.1321-1323.
- [ULA86] F. T. Ulaby, F. Kouyate, B. Brisco and L. Williams, "Textural information in SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-24, pp.235-245, Mar. 1986.

## Chapter 4

# テクスチャ情報に基づく 多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類



### 4. Classification of Multifrequency Polarimetric SAR Images Using Texture

In this chapter, a wavelet-based texture feature set is introduced. It consists of the energy of subimages obtained by the overcomplete wavelet decomposition of local areas in SAR images, where the downsampling between decomposition levels is omitted. The feature set is successfully applied to multifrequency polarimetric AIRSAR images of the Flevoland site with thirteen classes of land covers. In the classification, the effective methods of polarization selection and feature reduction are also devised.

English publications relevant to this chapter: 1-d, 2-b.

## 4.1 あらまし

前章で、SAR 画像における雑音としての濃度の揺らぎであるスペックルに対し、これを低減するフィルタを提示した。一方、テクスチャによる揺らぎは、SAR によるリモートセンシングにおいて、ターゲットに関する重要な情報を有している。したがって、テクスチャの情報を積極的に用いることで、撮像表面の状況を把握することが可能になる。本章では、ウェーブレット分解により生成されるサブイメージのエネルギーを、テクスチャの特徴量として新たに導入し、SAR 画像中の土地被覆を分類する手法を提案している。

まず、4.2 で、従来から用いられるテクスチャ特徴量を整理し、SAR 画像分類の既存手法を簡単に振り返る。次に、4.3 で、ウェーブレット分解によりテクスチャ情報を抽出し、画像分類のための特徴ベクトルを構成する方法について述べる。なお、ここでは、分解レベル間でダウンサンプリングを行わない、過剰系ウェーブレット分解を考える。これを踏まえ、4.4 では、実際のカテゴリ分類手法の詳細として、多偏波なデータを処理する際に適応的に偏波を選択する手順や、分類に使用する特徴量の数を絞りこむ方法などを示す。そして、4.5 で、本手法をオランダの農耕地帯 Flevoland を撮した、多周波/多偏波な AIRSAR 画像に適用し、その土地被覆を 13 のクラスに分類した結果について記す。

## 4.2 テクスチャ特徴と SAR 画像の分類

撮像された地表面の被覆状況を把握、分類することは、SAR リモートセンシングの大きな課題の一つである。画像分類の特徴量としては、まず、局所的な平均濃度が挙げられる。これは、ターゲットの後方散乱係数に関係した量である。一方、情報としての濃度の揺らぎ、すなわちテクスチャも、画像分類の有効な手がかりとなる<sup>1</sup> [ULA86]。ターゲットの形状や散乱機構の差異が、テクスチャに変化を与える。

しかしながら、テクスチャを特徴量として定量化することは容易ではなく、かつ多様な方法が考えられる [SOA97, SOLB97, WU99]。その中で、よく知られたテクスチャ特徴としては、1 次統計に基づく諸量 [LAU87] や、グレイレベル同時生起行列 (Gray-Level Co-occurrence Matrix; GLCM) から導出される量 [HAR73, BAR95] が挙げられる。

### • 1 次統計に基づく量

$\mu$ ,  $\sigma$  を局所領域 (ウィンドウ) の平均、および標準偏差とする。  $p(i)$  は濃度  $i$  の相対頻度で、  $\sum_i p(i) = 1$  を満たす。

– Coefficient of Variation (CoV)

$$= \sigma / \mu \tag{4.1}$$

- skewness (歪度)

$$= (1/\sigma^3) \sum_i (i - \mu)^3 p(i) \quad (4.2)$$

- kurtosis (尖度)

$$= (1/\sigma^4) \sum_i (i - \mu)^4 p(i) \quad (4.3)$$

- entropy

$$= - \sum_i p(i) \log(i) \quad (4.4)$$

• GLCM から導出される量

GLCM とは、濃度が  $i$  のピクセルから、一定の変位  $\Delta = (r, \theta)$  だけ離れたピクセルの濃度が  $j$  である確率  $p_{\Delta}(i, j)$  を要素とする行列をいう。[HAR73] では、GLCM から、energy や contrast など 14 種類の特徴量を導出している。

- energy (angular second moment)

$$= \sum_{i,j} p_{\Delta}(i, j)^2 \quad (4.5)$$

- contrast

$$= \sum_{i,j} (i - j)^2 p_{\Delta}(i, j) \quad (4.6)$$

その他、フラクタル次元<sup>2</sup> [DEL91] や、K 分布のオーダパラメータ [LUC97] なども、テクスチャ特徴として用いられる。前者については 5 章で、後者については 6 章で、詳しく述べる。

上述した 1 次統計に基づく量や、GLCM などから導出される量は、テクスチャの表現法として一定の地位を占めているが、ピクセル間の関係を単一のスケールでしか記述できない、という共通の欠点を有している。これに対し、ウェーブレットは、そのマルチスケール性<sup>3</sup> から、テクスチャ解析/表現にブレークスルーをもたらす手法として期待されている [SCH98]。本章においても、次節以降、ウェーブレットを用いた新たなテクスチャ特徴を提示し、画像分類への有効性を検討していく。

SAR 画像の分類においては、たとえ良好な特徴量を以てしても、単独の画像のみから十分な精度を実現することが困難な場合もある。したがって、複数の画像による情報の多重化が必要とされる。複数の画像を取得する方法としては種々考えられるが、例えば、多時期観測データ (multitemporal data) の利用 [KURO99, KURV99]、他のセンサのデータとの統合 (data fusion) [SOLA99] などが挙げられる。本章で述べる手法では、多周波/多偏波なデータを対象として、特徴量を多重化することを試みる。特に、偏波に関しては、フルポーラリメトリックなデータから、一般的な直線偏波の組合せ (HH, HV, VV など) にとらわれず、適応的に偏波画像を生成、利用することを考える。

### 4.3 ウェーブレットによるテクスチャ特徴の抽出

テクスチャを空間周波数的に解析する場合，“スケール”の概念は有用である。前述したように，ウェーブレットは信号をマルチスケールで表現することができるため，テクスチャ解析の有望な手法として注目されている [CHAN93, LAI93, LU97, POR97, WOU99]。特に，ウェーブレット分解により生成される各サブイメージのエネルギー（絶対値の平均）は，どの空間周波数に情報が存在するかを示唆し，テクスチャ解析のよい特徴量となる。以下，このサブイメージのエネルギーを用い，テクスチャを特徴づけるベクトル（特徴ベクトル）を構成する方法について述べる。

2.4 でみたように，一般的なウェーブレット分解においては，レベル間にダウンサンプリングが存在する。このような情報の損失も冗長さもないタイトな直交分解は，例えば符合化などのアプリケーションには好適な表現であるといえる。しかしながら，この場合，テクスチャ解析に必要とされる，平行移動に関する不変性 (translation-invariance) を得ることができない。よって，ここでは，ダウンサンプリングを除いた過剰系の分解 (overcomplete decomposition) を考える。図 4-1 に，画像に対する過剰系ウェーブレット分解のフィルタバンク的な模式図を示す (図 2-7(a) と比較)。過剰系の分解は冗長であるがゆえに，逆にロバストなテクスチャ特徴を供すると考えられる。

具体的な特徴ベクトルの構成は，画像内の正方局所領域に対する複数レベルの分解で生成された各サブイメージのエネルギーを，領域の中心ピクセルに割り当てることにより行う。ただし，各レベルの LL 画像のエネルギーは，互いに強い相関を有するため，1 レベル分のみを特徴ベクトルの要素に加えることにする。都合，特徴ベクトルは  $M$  レベルまでの分解に対し，

$$[e_{LL-1}, e_{LH-1}, e_{HL-1}, e_{HH-1}, \dots, e_{LH-M}, e_{HL-M}, e_{HH-M}]^T \quad (4.7)$$

のように， $3M + 1$  次元のものとなる。上式において，例えば  $e_{LL-1}$  は 1 レベルの LL 画像のエネルギーを意味する。 $e_{LL-1}$  は，低周波成分による近似画像のエネルギーであり，原画像の濃淡に関する情報を表している。したがって，式 (4.7) は，テクスチャ特徴に濃度情報をも組み込んだ，ハイブリッドな特徴ベクトルと捉えられる。

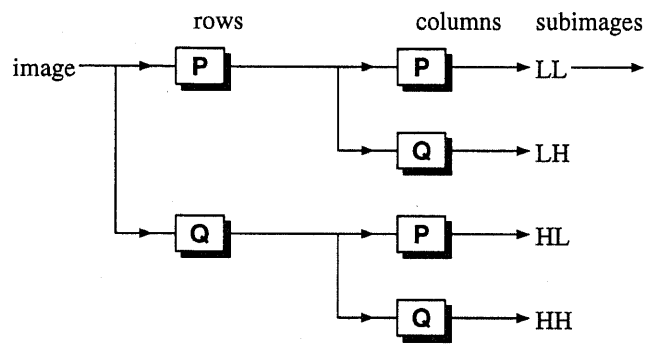


図 4-1. 画像の過剰系ウェーブレット分解.

Fig. 4-1. Overcomplete wavelet decomposition of an image.

#### 4.4 分類手法の実際

ここでは、前節で述べたテクスチャ特徴(特徴ベクトル)を用い、実際に多周波/多偏波な SAR 画像を分類する手法を概説する。図 4-2 に示すように、本手法は複数のプロセスの複合として表せる。具体的には、

- 偏波の選択
- 特徴ベクトルの構成
- 特徴ベクトルの正規化
- 特徴ベクトルの次元数の削減
- 最短距離法による教師つき分類

により構成される。以下、各々のプロセスについて個別にみていく。

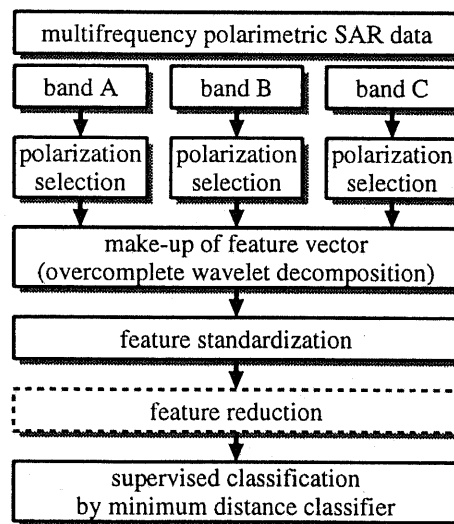


図 4-2. 分類の流れ図.

Fig. 4-2. Pipeline of the classification scheme.

### 偏波の選択

本手法では、フルポーラリメトリックなデータを対象とする。ポーラリメトリにより、互いに相関の小さい複数の画像を生成して用いることで、テクスチャ情報の多重化が図れ、分類精度の向上を期待できる。1枚の画像から構成される特徴ベクトルの次元数は、単一画像を用いる場合の1倍になる。

偏波を選択する基準として、以下の二つを設ける。

- 1) 各分類クラスのトレーニングベクトルが特徴空間上で偏らず、均等に分布すること。
- 2) 選択された画像が互いに(できるだけ)独立で、相関が小さいこと。

トレーニングベクトルとは、個々の分類クラスを代表する教師データで、ここでは、別に定めるトレーニングエリア内における特徴ベクトルの平均を用いる。1)に関しては、トレーニングベクトルの均等分離性の指標として、新たに以下の量 (Coefficient of Class Separability; CoCS) を導入する。

$$\text{CoCS} = \frac{1}{(3M+1)(N_c-1)} \sum_{s=1}^{3M+1} \sum_{k=1}^{N_c-1} \left| \frac{V_{k+1,s} - V_{k,s}}{(V_{N_c,s} - V_{0,s})/(N_c-1)} - 1 \right| \quad (4.8)$$

$V_{k,s}$  はクラス  $k$  のトレーニングベクトルの  $s$  次元目の要素、 $N_c$  は分類クラスの数を表す。各次元の要素  $V_{k,s}$  は、値の小さいものから順に、 $V_{0,s}, V_{1,s}, \dots, V_{N_c,s}$  のようにソートされている。式(4.8)から分かるように、トレーニングベクトルの各要素が、完全に均等に分布しているとき、CoCSは0となる。したがって、CoCSの小さい偏波を選択することにより、1)の条件が満たされる。しかしながら、CoCSを唯一の基準として偏波を選択した場合、互いに類似した画像が生成され、十分にテクスチャ情報を多重化できないおそれがある。よって、2)の相関に関する基準を併用する。具体的な偏波の選択の手順は、以下となる。

- I. 各偏波のCoCSを計算し、CoCSリストを作成する。
  - II. リスト中でCoCSが最小な偏波を選択し、リストから削除する。
  - III. II. で選択された偏波が生成する画像と、リスト中の他の偏波が生成する画像との相関係数を計算し、閾値  $T_c$  を超える場合、その偏波をリストから削除する。
  - IV. II. に戻る。
- II. から IV. は、予め決められた数の偏波が選択されるまで繰り返される。



### 特徴ベクトルの構成

上述の方法で選択された偏波 (画像) に対し, 式 (4.7) の特徴ベクトルを構成する.  $l$  枚の画像から特徴ベクトルを構成した場合, その次元数は  $l(3M + 1)$  となる.

### 特徴ベクトルの正規化

本手法においては, 各ピクセルのクラス判別に, ユークリッド距離 (Euclidean distance) を用いた最短距離法を用いる. その際, レンジの大きい成分 (すなわち, LL 画像による成分) のみが分類を支配するのを防ぐために, 特徴ベクトルを正規化する必要がある<sup>4</sup>. ここでは平均値を引き, 標準偏差で割ることにより, 特徴ベクトルの各成分の分散を揃えるよう正規化を施す.

### 特徴ベクトルの次元数の削減

特徴ベクトルの過剰な次元は, 計算量を増大させるばかりでなく, 分類精度にも悪影響を与える場合がある (いわゆる, curse of dimensionality). したがって, 必要に応じ, 次元数の削減を考えなければならない. 次元数の削減には, 通常, 主成分分析などが用いられるが, 巨大な正方行列の固有値問題を解く必要が生じ, 分類手法全体の計算量を鑑みると, 必ずしも有効であるとはいえない. そこで, 以下のような次元  $s$  の分類への寄与率 (Degree of Contribution; DoC( $s$ )) を考える.

$$\text{DoC}(s) = \sum_{k_1 \neq k_2} \frac{(V_{k_1,s} - V_{k_2,s})^2}{\sum_{s=1}^{l(3M+1)} (V_{k_1,s} - V_{k_2,s})^2} \quad (4.9)$$

式 (4.9) から分かるように, DoC( $s$ ) はクラス間の距離に占める次元  $s$  の割合に相当する. よって, DoC が大きいほど,  $s$  は分類における重要度の高い次元であるといえる. 逆に, 次元数の削減が必要とされる場合, DoC が低い次元を切り捨てたととしても, 分類精度に与える影響は小さいと考えられる.

### 最短距離法による教師つき分類

正規化, および場合によっては次元数の削減がなされた特徴ベクトルを用い, ユークリッド距離による最短距離法で教師つき分類 (supervised classification)<sup>5</sup> を行う. 具体的には, ピクセルと各トレーニングベクトルとの特徴空間上での距離を求め, その距離が最小となるクラスにピクセルを分類していく.

## 4.5 Flevoland テストサイトの分類結果

本節では、4.4で述べた分類手法を、多周波/多偏波な AIRSAR 画像に適用し、Flevoland テストサイトの土地利用を分類した結果を示す。

Flevoland サイトの画像については、これまでに度々提示してきたが(図 1-2, 2-3, 3-5, 3-6), 図 4-3 がその全図(Lバンド)である。本データは、既に4ルックのマルチルック処理が施されているが、テクスチャ情報を精度よく抽出するためには、さらにスペckルを低減し、ラジオメトリックな分解能を向上させることが必要であると考え。そこで、3章で提案した WSF を予めかけておく。なお、WSF によるフィルタリングは、偏波が選択され、用いる画像が生成された段階で行う。

次に、分類クラスとして、[NAS]中のグランドデータを参考に、土壌面、森林、水域、耕作地(小麦、まめ、じゃがいもなど)といった13クラスを設定した。ここで、本データに撮像されている土壌面については、[CHE96]でも指摘されているように、明らかに散乱特性の異なる2種類の表面が存在している。一方は強い後方散乱を呈しているのに対し、逆に、もう一方は比較的暗い領域として映っている。したがって、これらは別々の分類クラスとして扱うこととする(土壌面1, 2)。

その他、分類手法の具体的なパラメータ等は、以下のように設定した。

- 1バンドあたりの選択偏波数: 3
- 偏波の選択における相関係数の閾値  $T_c$ : 0.5
- 各クラスのトレーニングエリアのピクセル数: 320
- ウェーブレット分解される局所領域:  $8 \times 8$  ピクセル
- ウェーブレット分解のレベル  $M$ : 3
- 基底: 4タップの Daubechies のウェーブレット (D4)

本データは、C, L, Pの3バンドで撮像されている。したがって、それぞれから3偏波ずつを選択し、都合9枚の画像を生成して用いる<sup>6</sup>。実際に選択された偏波を表4-1に、また各々の偏波で生成した画像(WSF処理済み)を図4-4に示す<sup>7</sup>。表4-1中の数値( $\psi_t, \chi_t, \psi_r, \chi_r$ )は、送受偏波の偏波楕円パラメータを表している(図2-4参照)。

図4-5に、分類の結果を色で分けて示したカラーマップを示す。各分類クラスと色の対応表は、マップの右に付す。この結果から、テクスチャに基づいた本手法は、画素の濃度のみでは容易に判別し難いクラスの分類に成功していることが伺える。森林とじゃがいも畑、土壌面2と砂糖だいこん畑などの判別がそれである。

分類の結果を定量的にみるため、表4-2に判別効率表(confusion matrix)を示す。この表において、正しいクラスに分類された割合(表中の対角線成分)は、軒並み90%前後であり、13と

いう多クラス分類の精度としては良好なものである。また、ピクセル数で重みづけした総合精度は、91.09%と計算された。これは、同一サイトについて分類を行った [CHE96] 中の 89% という結果と比較しても、優秀な値であるといえる<sup>8</sup>。

個々のクラスについてみると、森林、牧草地、むらさきうまごやし (lucerne)、じゃがいも、砂糖だいこんといった畑に対しては、95%以上の高い分類精度を示している。一方、唯一、えんどうまめ畑においては、約 2/3 のピクセルが土壌面 2 に誤分類されている。これは、両クラスのテクスチャ特徴が酷似していることによるものであると推察され、その識別にはさらに別の特徴量が必要であると考えられる。

本結果における高い分類精度は、ウェーブレット分解により抽出されたテクスチャ特徴が奏功しているのはもちろんであるが、その他の要因にもよっている。その一つとしては、偏波の適応的な選択が挙げられる。例えば、各バンドについて、HH、HV、VV という一般的な直線偏波の画像を用いて分類を行った場合、さして高い精度は得られず、総合精度は 82.57% 程度にすぎない。また、前処理として行った WSF によるスペckル低減も、分類精度に対して一定の貢献を果たしている。スペckル低減を行わず、4 ルック画像をそのまま使用した際の総合精度は、88.85%にとどまる。

表 4-3 は、DoC に基づき、特徴ベクトルの次元数を半分に削減して分類を行ったときの判別効率表である。この場合においても、分類結果の大きな落ち込みはみられず、88.28% の総合精度が得られており、計算時間の短縮という点から有用であるといえる。さらに、えんどうまめや stem bean<sup>9</sup> の畑、土壌面 1、森林の各クラスについては、逆に精度が向上している。これは、紛らわしい特徴が除去された、つまり curse of dimensionality が解消されたことによるものであると考えられる。

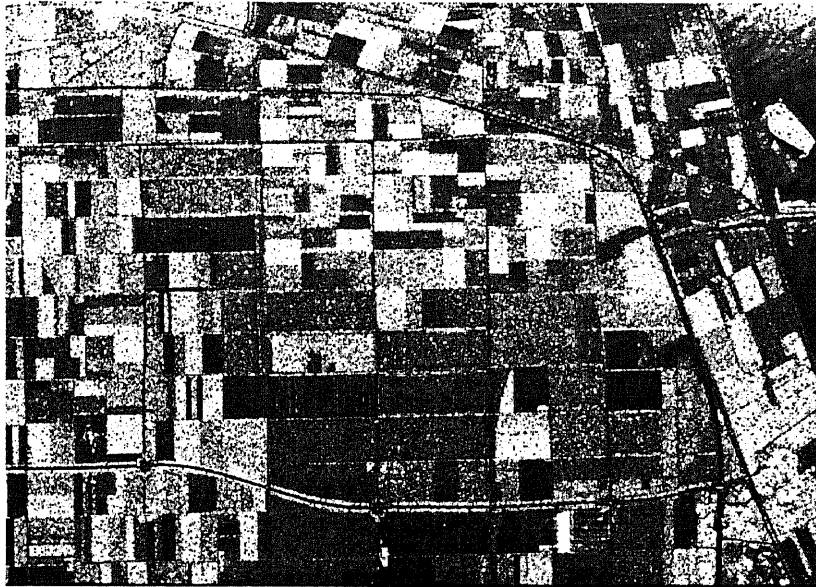


図 4-3. Flevoland サイトの原画像 (AIRSAR, L バンド).

Fig. 4-3. Original AIRSAR image of Flevoland (L-band).

表 4-1. 分類に用いた偏波. 数値は送受偏波の偏波楕円パラメータ [deg.].

**Table 4-1.** Selected polarizations for the classification. The values in the bracket are the polarization ellipse orientation and ellipticity angles of the transmitting and receiving waves, respectively. They are given in degree.

band	polarization $(\psi_t, \chi_t, \psi_r, \chi_r)$
C	(0, 45, 0, 30)
	(30, -30, 30, -30)
	(90, 15, 0, -30)
L	(0, 0, 30, 0)
	(120, -15, 0, -30)
	(150, 30, 120, 15)
P	(120, 30, 60, -30)
	(0, 0, 90, -15)
	(150, 15, 0, 15)

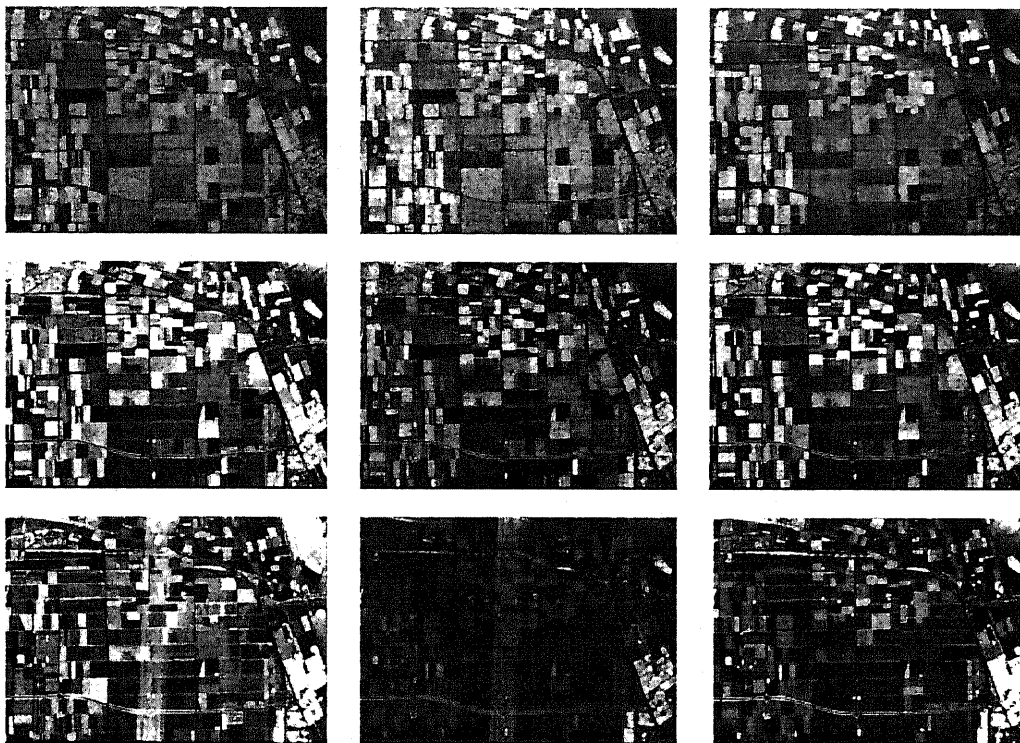


図 4-4. 分類に用いた偏波画像 (9 枚, WSF 処理済み). (上) C バンド, (中) L バンド, (下) P バンド.

Fig. 4-4. Nine images used for the classification: C-band (first row), L-band (second row), and P-band (third row), respectively. Each image has been already processed by WSF.



図 4-5. 分類結果のカラーマップ.

**Fig. 4-5.** Classification map of Flevoland. The correspondence between the class and the color is given in the right of the map.

表 4-2. 分類の判別効率表 [%].

Table 4-2. Confusion matrix for the classification. Values are given in percent. The overall accuracy is evaluated to be 91.09%.

	b.s.1	b.s.2	bar.	for.	gra.	luc.	pea.	pot.	rap.	ste.	sug.	wat.	whe.	pixels
bare soil 1	94.16	0.00	2.40	0.00	2.59	0.29	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.47	0.00	8,542
bare soil 2	0.00	88.70	0.00	0.00	0.00	0.00	11.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4,140
barley	3.53	0.00	83.93	0.00	3.82	8.31	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.35	0.00	12,142
forest	0.00	0.00	0.00	98.50	0.00	0.00	1.23	0.21	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	7,179
grass	0.02	0.00	1.63	0.00	95.51	1.36	0.00	0.00	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00	16,535
lucerne	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	97.23	0.00	0.00	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00	6,392
peas	0.00	68.46	0.00	0.00	0.00	0.00	31.44	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2,898
potatoes	0.00	0.11	0.00	0.13	0.00	0.00	0.69	96.13	0.10	1.65	1.18	0.00	0.00	29,806
rapeseed	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	2.75	0.55	0.00	93.47	0.00	0.00	0.00	3.21	15,641
stem beans	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	2.00	0.99	2.22	93.96	0.04	0.00	0.37	5,362
sugar beet	0.00	0.01	0.00	0.61	0.00	0.00	2.07	0.36	0.94	0.01	95.88	0.11	0.00	17,289
water	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.26	0.00	0.00	0.00	0.00	87.66	0.00	7,048
wheat	0.00	0.03	1.22	0.00	0.54	6.65	0.06	0.00	5.11	0.44	0.07	0.00	85.88	35,121

表 4-3. 分類の判別効率表 (DoC に基づき特徴ベクトルの次元数を半分に削減した場合)[%].

Table 4-3. Confusion matrix for the classification when one half the features with the large DoC are used. Values are given in percent. The overall accuracy is evaluated to be 88.28%.

	b.s.1	b.s.2	bar.	for.	gra.	luc.	pea.	pot.	rap.	ste.	sug.	wat.	whe.	pixels
bare soil 1	95.18	0.00	2.29	0.00	1.62	0.42	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.42	0.00	8,542
bare soil 2	0.00	81.91	0.00	0.00	0.00	0.00	18.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4,140
barley	8.47	0.00	80.13	0.00	0.83	8.60	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	1.94	0.00	12,142
forest	0.00	0.00	0.00	99.25	0.00	0.00	0.74	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7,179
grass	0.13	0.00	3.65	0.00	92.29	2.94	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.10	0.00	16,535
lucerne	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	82.62	0.00	0.00	16.46	0.00	0.00	0.00	0.13	6,392
peas	0.00	66.67	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2,898
potatoes	0.00	0.08	0.00	1.84	0.00	0.00	0.75	94.21	0.25	1.57	1.30	0.00	0.00	29,806
rapeseed	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	5.26	0.59	0.00	89.59	0.00	0.11	0.00	4.41	15,641
stem beans	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	1.92	0.84	1.19	95.30	0.04	0.00	0.06	5,362
sugar beet	0.00	0.11	0.00	0.32	0.00	0.00	2.65	0.24	1.10	0.39	94.94	0.25	0.00	17,289
water	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.04	0.00	0.00	0.00	0.00	86.86	0.00	7,048
wheat	0.00	0.00	0.93	0.00	0.55	7.53	0.01	0.00	8.97	0.07	0.02	0.00	81.91	35,121

## 4.6 まとめ

ウェーブレット分解によりテクスチャ情報を抽出し、これを特徴量として SAR 画像内の土地被覆を分類する手法を提示した。具体的には、過剰系ウェーブレット分解で帯域分割して得られるサブイメージのエネルギーから、平行移動に対する不変性を有したロバストな特徴ベクトルを構成し、最短距離法による教師つき分類を行うものである。その際、多偏波なデータを処理するにあたり、特徴空間上での各偏波の均等分離性を指標として、適応的に偏波を選択する手順を示した。また、分類への寄与率という観点から、分類に用いる特徴量の数を絞りこむ方法についてもふれた。結果、オランダの農耕地帯 Flevoland を撮像した多周波/多偏波な AIRSAR 画像について、13 のクラスを 91.09% という高い (総合) 精度で分類することに成功した。分類の結果は、カラーマップや判別効率表により、視覚的/定量的に確認された。

## Notes

- <sup>1</sup> 濃度とテクスチャを統合した分類手法については、例えば [DEL91] で報告されている。
- <sup>2</sup> 類似の概念として、lacunarity が挙げられる [HENE95]。
- <sup>3</sup> テクスチャをマルチスケールで解析するものとしては、ウェーブレットの他に、Gabor フィルタ [BOV90, JAI91], Wigner-Ville 分布 [REE90] などがある。
- <sup>4</sup> マハラノビス距離 (Mahalanobis distance) を用いれば、正規化の問題を回避できる。
- <sup>5</sup> それぞれの分類クラスを代表するトレーニングベクトル (教師データ) を用いた分類手法をいう。トレーニングデータを使用しない、クラスタリングなどによる手法を、逆に、教師なし分類 (unsupervised classification) と呼ぶ。その他、SAR 画像の分類においては、散乱機構に関する知識を用いた方法なども検討されている [DOB96]。このような知識ベースの画像分類は、昨今のポーラリメトリの発展をうけ、より精度が高められている [PIE94]。
- <sup>6</sup> 各バンドあたりの選択偏波数は任意であるが、3 偏波を選択することで、一般的な直線偏波の組合せである HH, HV, VV 偏波を用いた場合と直接比較でき、偏波を選択する効果を推し量れる。
- <sup>7</sup> P バンドの画像にみられる筋状の帯は、近隣の電波塔からの干渉によるものである。
- <sup>8</sup> [CHE96] では、多周波/多偏波な画像濃度を特徴量とし、ニューラルネットワークを用いた分類が行われている。
- <sup>9</sup> 適当な和訳は不明。茎の長い豆類であると推測される。



## References

- [ANY95] H. Anys and D. -C. He, "Evaluation of textural and multipolarization radar features for crop classification," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.33, pp.1170-1181, Sept. 1995.
- [BAR95] A. Baraldi and F. Parmiggiani, "An investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.33, pp.293-304, Mar. 1995.
- [BOV90] A. C. Bovik, M. Clark, and W. S. Geisler, "Multichannel texture analysis using localized spatial filters," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.12, pp.55-73, Jan. 1990.
- [CHAN93] T. Chang and C. -C. J. Kuo, "Texture analysis and classification with tree-structured wavelet transform," *IEEE Trans. Image Processing*, vol.2, pp.429-441, Oct. 1993.
- [CHE96] K. S. Chen, W. P. Huang, D. H. Tsay, and F. Amar, "Classification of multifrequency polarimetric SAR imagery using a dynamic learning neural network," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.34, pp.814-820, May 1996.
- [DEL91] S. Dellepiane, D. Giusto, S. Serpico, and G. Vernazza, "SAR image recognition by integration of intensity and textural information," *Int. J. Remote Sensing*, vol.12, no.9, pp.1915-1932, 1991.
- [DOB96] M. C. Dobson, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "Knowledge-based land-cover classification using ERS-1/JERS-1 SAR composites," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.34, pp.83-99, Jan. 1996.
- [HAR73] R. M. Haralick, K. Shanmugan, and I. Dinstein, "Textural features for images classification," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol.SMC-3, no.6, pp.610-621, 1973.
- [HENE95] G. M. Henebry and H. J. H. Kux, "Lacunarity as a texture measure for SAR imagery," *Int. J. Remote Sensing*, vol.16, no.3, pp.565-571, 1995.
- [JAI91] A. K. Jain and F. Farrokhnia, "Unsupervised texture segmentation using Gabor filters," *Pattern Recognit.*, vol.24, no.12, pp.1167-1186, 1991.
- [KURO99] T. Kurosu, S. Uratsuka, H. Maeno, and T. Kozu, "Texture statistics for classification of land use with multitemporal JERS-1 SAR single-look imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, pp.227-235, Jan. 1999.
- [KURV99] L. Kurvonen and M. T. Hallikainen, "Textural information of multitemporal ERS-1 and JERS-1 SAR images with applications to land and forest type classification in boreal zone," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, pp.680-689, Mar. 1999.
- [LAI93] A. Laine and J. Fan, "Texture classification by wavelet packet signatures," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.15, pp.1186-1191, Nov. 1993.
- [LAU87] H. Laur, T. Le Toan, and A. Lopes, "Textural segmentation of SAR images using first order statistical parameters," in *Proc. 1987 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'87)*, Ann Arbor, MI, pp.1463-1468.
- [LU97] C. S. Lu, P. C. Chung, and C. F. Chen, "Unsupervised texture segmentation via wavelet transform," *Pattern Recognit.*, vol.30, no.5, pp.729-742, 1997.
- [LUC97] A. J. Luckman, A. C. Frery, C. C. F. Yanasse, and G. B. Groom, "Texture in airborne SAR imagery of tropical forest and its relationship to forest regeneration stage," *Int. J. Remote Sensing*, vol.18, no.6, pp.1333-1349, 1997.
- [NAS] NASA/JPL, *SIR-C education program, Pre-launch CD-ROM*. SIRCED01.
- [PIE94] L. E. Pierce, F. T. Ulaby, K. Sarabandi, and M. C. Dobson, "Knowledge-based classification of polarimetric SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.32, pp.1081-1086, Sept. 1994.

- [POR97] R. Porter and N. Canagarajah, "Robust rotation-invariant texture classification: Wavelet, Gabor filter and GMRF based schemes," *Proc. Inst. Elect. Eng., Vision, Image, Signal Processing*, vol.144, no.3, pp.180-188, 1997.
- [REE90] T. R. Reed and H. Wechsler, "Segmentation of textured images and Gestalt organization using spatial/spatial-frequency representations," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.12, pp.1-12, Jan. 1990.
- [SCH98] P. Scheunders, S. Livens, G. van de Wouwer, P. Vautrot, D. van Dyck, "Wavelet-based texture analysis," *Int. J. Computer Science and Information Management*, vol.1, no.2, pp.22-34, 1998.
- [SOA97] J. V. Soares, C. D. Rennó, A. R. Formaggio, C. C. F. Yanasse, and A. C. Frery, "An investigation of the selection of texture features for crop discrimination using SAR imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol.59, no.2, pp.234-247, 1997.
- [SOLA99] B. Solaiman, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "Multisensor data fusion using fuzzy concepts: Application to land-cover classification using ERS-1/JERS-1 SAR composites," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, pp.1316-1326, May 1999.
- [SOLB97] A. H. S. Solberg and A. K. Jain, "Texture fusion and feature selection applied to SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.35, pp.475-479, Mar. 1997.
- [ULA86] F. T. Ulaby, F. Kouyate, B. Brisco and L. Williams, "Textural information in SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-24, pp.235-245, Mar. 1986.
- [WOU99] G. van de Wouwer, P. Scheunders, and D. van Dyck, "Statistical texture characterization from discrete wavelet representations," *IEEE Trans. Image Processing*, vol.8, pp.592-598, Apr. 1999.
- [WU99] D. Wu and J. Linders, "A new texture approach to discrimination of forest clearcut, canopy, and burned area using airborne C-band SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, pp.555-563, Jan. 1999.

## Chapter 5

# テクスチャ特徴としての フラクタル次元



### 5. Texture and Fractal Dimension

Many natural scenes can be considered “statistically self-similar”. When such a 3-D surface is imaged by SAR, fractal dimension of the image is featuring roughness of the surface intuitively. In this chapter, fractal dimension is examined as a novel texture feature of SAR images. A new technique for estimating fractal dimension of an image using the wavelet decomposition, which employs the fractional Brownian motion (fBm) model, is proposed. Its application to multifrequency polarimetric SAR images shows that the images exhibit fractal behavior, and that the fractal dimension has a potential for the effective texture feature.

English publications relevant to this chapter: 2-a.

## 5.1 あらまし

本章では、SAR 画像におけるテクスチャの揺らぎを捉える新たな特徴量として、フラクタル次元を取り上げる。これは、テクスチャの自己相似性に着目し、マルチスケールでの解析を試みるものである。多くの自然表面は、フラクタル的な性質を有しており、それらを撮像した画像のフラクタル次元は、揺らぎの複雑性に関しての、ターゲットに固有な情報を含んでいる。

まず、5.2 で、フラクタル、および自己相似の考え方を紹介し、フラクタル次元 (相似次元) の定義を示す。次に、5.3 では、統計的フラクタルの代表的な記述モデルである、非整数ブラウン運動 (fBm) についてまとめる。これを用い、5.4 で、ウェーブレット分解によって、2次元画像のフラクタル次元を推定する新たな方法を提示する。5.5 においては、提案した手法を実際の画像に対して適用し、その妥当性や SAR 画像のフラクタル性、あるいはフラクタル次元のテクスチャ特徴としての有用性を検証する。

## 5.2 フラクタルと自己相似

フラクタル (fractal) とは、1970 年代に Mandelbrot が提唱した造語であり<sup>1</sup>、経験的な整数の次元からはみ出した非整数次元を有する集合を指す [MAN85]。このような非整数次元を一般に、すなわちハウスドルフ次元 (Hausdorff dimension) や相似次元などをまとめて、フラクタル次元と呼ぶ。これに対し、経験的な整数次元は、位相次元と呼ばれる。

フラクタルとはほぼ同義に使われる用語として、自己相似が挙げられる。ある集合の縮小が、その集合中の一部分に内包されているとき、その集合は自己相似性を有しているといわれる。つまり、自己相似的な集合とは、その一部分の拡大が、全体、あるいはそれより大きい部分と同様の形状や複雑さを呈しているようなセットをいう。

自己相似性を測る尺度である相似次元は、ある図形が相似比  $R$  で、 $N$  個に分割されるとき、

$$D = -\frac{\log_{10} N}{\log_{10} R} \quad (5.1)$$

で定義される。例えば、有名な自己相似図形であるトリアディック (triadic) なコッホ (Koch) 曲線 [MAN85, 図 42 など] の場合、相似比  $R = 1/3$ 、分割数  $N = 4$  であり、その相似次元は、

$$D = -\log_{10} 4 / \log_{10}(1/3) \approx 1.2618$$

となる。また、線分では  $R = 1/2$ 、 $N = 2$  より  $D = 1$ 、正方形では  $R = 1/2$ 、 $N = 4$  より  $D = 2$ 、立方体では  $R = 1/2$ 、 $N = 8$  より  $D = 3$  となり、経験的な位相次元と一致する。

実際、様々なシステムで観測される信号は、コッホ曲線のような数学的に厳密な自己相似性は有さないが、それらの信号に対しても、自己相似性の拡張として統計的自己相似性を考え

ることができる。自己相似な確率過程  $F_s(t)$  は、任意の正定数  $\kappa$  に対し、以下の関係を満たすことが求められる。

$$F_s(\kappa t) \stackrel{d}{=} \kappa^D F_s(t) \quad (5.2)$$

ここで、 $\stackrel{d}{=}$  は両辺が確率過程として等価であることを示す。式 (5.2) により、自己相似な確率過程の実現値で記述される図形に対する、統計的な意味の相似次元 (統計的自己相似次元) が以下で定義できる。

$$D = -\frac{\log_{10} [\langle F_s(\kappa t) \rangle / \langle F_s(t) \rangle]}{\log_{10}(1/\kappa)}, \quad (5.3)$$

いま、 $N \rightarrow \langle F_s(\kappa t) \rangle / \langle F_s(t) \rangle$ ,  $R \rightarrow 1/\kappa$  の対応を考えれば、式 (5.3) で表される統計的自己相似次元が、式 (5.1) の相似次元の拡張となっていることが理解できる。以下では、統計的自己相似次元を、単にフラクタル次元と呼ぶ。

最近、信号解析の新たな視点として、このような信号の自己相似性に基づいた解析が注目されている。例えば、インターネットに流れる通信トラフィックの自己相似性が明らかにされたことなどは、そのトピックである [LEL94]。一方、画像のテクスチャ解析へのフラクタルの応用も検討されている [PEN84, LUN86, CHAU95]。テクスチャの解析にマルチスケール性が必須であることは 4.2 で述べたが、テクスチャの自己相似性をみることは、上述の定義から分かるように、様々なスケールで濃度の揺らぎを推し量ることに他ならない。

自然界の多くの地形/形状は、フラクタル的であるといわれている。したがって、地球表面を撮像した画像において、そのフラクタル次元は表面に関する何らかの特徴量になり得る<sup>2</sup>。一般的には、フラクタル次元は、表面の粗さ (roughness) や起伏の激しさを反映した量であると考えられる。このような観点から、昨今、SAR 画像のテクスチャ特徴として、フラクタル次元が取り上げられ始めている [STE93, LIE95, ALP97, BENL99]。本章でも、以下、非整数ブラウン運動モデルとウェーブレット分解を用い、2次元画像のフラクタル次元を推定する新たな方法を示し、これを SAR 画像に適用した結果について述べる。

### 5.3 非整数ブラウン運動

統計的自己相似性を有する、つまり式 (5.2) を満たす典型的な確率過程として、ブラウン運動 (Brownian motion) がある。ブラウン運動は、白色雑音を一階積分したものに相当する<sup>3</sup>。ブラウン運動のフラクタル次元  $D$  は 1.5 である。

ブラウン運動を非整数回微積分することにより、フラクタル次元が  $1 < D < 2$  となるような過程を生成することができる。これは非整数ブラウン運動 (fractional Brownian motion;

fBm) と呼ばれ, 統計的自己相似過程の代表的記述モデルとして用いられる. fBm は, 次式のような, 平均値が 0 の非定常なガウシアン過程として与えられる [MAN68].

$$B_H(t) = \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \left[ \int_{-\infty}^0 (|t-s|^{H-\frac{1}{2}} - |s|^{H-\frac{1}{2}}) dB(s) + \int_0^t |t-s|^{H-\frac{1}{2}} dB(s) \right] \quad (5.4)$$

$B(t)$  はブラウン運動を表す.  $H$  はハースト (Hurst) 指数と呼ばれ,  $0 < H < 1$  の値をとる.  $H = 1/2$  のとき,  $B_H(t)$  はブラウン運動に相当する. 一般に,  $B_H(t)$  のハースト指数とフラクタル次元には, 以下の関係が成立する.

$$D = T + 1 - H \quad (5.5)$$

$T$  は位相次元であり, 例えば, 2次元画像のフラクタル次元は,  $T = 2$  より,  $D = 3 - H$  となる.

前述したように, fBm は非定常過程であり, 次式のような自己相関関数を有する.

$$\langle B_H(t)B_H(s) \rangle = \frac{V_H}{2} (|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H}) \quad (5.6)$$

ここで,

$$V_H = \text{var}[B_H(1)] = \Gamma(1-2H) \frac{\cos \pi H}{\pi H} \quad (5.7)$$

var は分散を表す. 式 (5.6) より, fBm に対して, 一般的な意味でのパワースペクトルの概念を持ち出すことは正確ではない<sup>4</sup>. しかし, 平均スペクトル (average spectrum) を考えることにより, 以下が得られる [FLA89].

$$S_{B_H}(\omega) = \frac{V_H}{|\omega|^{2H+1}} \quad (5.8)$$

すなわち, fBm はべき乗のスペクトルをもつ  $1/f$  過程のよいモデルとなる. また, fBm の増分に関しては, 次式が成り立つ.

$$\text{var}(B_H[i+\Delta] - B_H[i]) = |\Delta|^{2H} \text{var}(B_H[i+1] - B_H[i]) \quad (5.9)$$

$B_H[i]$  は fBm のサンプル値である. 式 (5.9) は, ハースト指数  $H$  の推定によく用いられるものである [PEN84].

図 5-1 に, ハースト指数がそれぞれ  $H = 0.2, 0.5, 0.8$  である fBm の例を示す<sup>5</sup>. この図から, ハースト指数, ひいてはフラクタル次元と, fBm の形状の複雑性の関係がみてとれる.

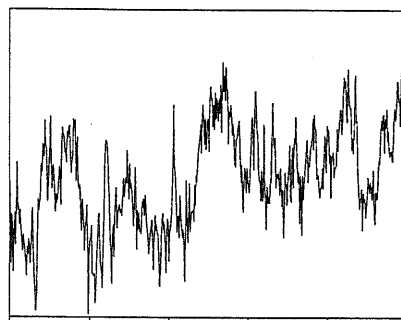
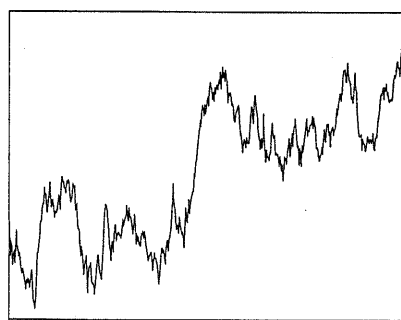
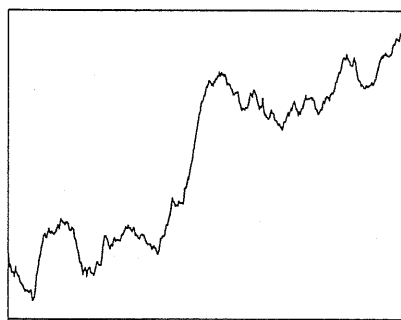
(a)  $H = 0.2$ .(b)  $H = 0.5$ .(c)  $H = 0.8$ .

図 5-1. 非整数ブラウン運動.

**Fig. 5-1.** Fractional Brownian motion (fBm) with various Hurst parameters. Note that for  $H = 0.5$ , fBm is an ordinary Brownian motion.

## 5.4 ウェーブレット分解による画像のフラクタル次元の推定手法

対象信号のフラクタル次元を求める問題は、fBm をモデルとすれば、そのハースト指数を推定することと等価になる。本節では、fBm のウェーブレット分解を考えることで、2次元画像のフラクタル次元を推定するための新たな方法を提示する。先にみたように、fBm の重要な性質は、次の二つである。

- 非定常性  $\Rightarrow$  time-dependent な解析が必要。
- 自己相似性  $\Rightarrow$  scale-dependent な解析が必要。

ウェーブレットの時間/スケール(周波数)分析能力は高く(例えば、短時間フーリエ変換などと比較して)、上を鑑みれば、fBm の有効な解析手法となると考えられる。

Flandrin は、ウェーブレット変換により、1次元の fBm のフラクタル次元を推定できることを示した [FLA92]。式 (2.38) の 2 進マザーウェーブレットによる fBm の変換は、次式のように表せる。

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} B_H(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (5.10)$$

このとき、各解像度  $j$  でのウェーブレット係数  $d_{j,k}$  の分散は、以下で与えられる。

$$\text{var}(d_{j,k}) = \frac{V_H}{2} Q_\psi(H) (2^j)^{2H+1} \quad (5.11)$$

$$Q_\psi(H) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \psi(t-\tau) |\tau|^{2H} dt d\tau \quad (5.12)$$

したがって、式 (5.11) の両辺の対数をとることにより、

$$\log_2 [\text{var}(d_{j,k})] = (2H + 1)j + \text{constant} \quad (5.13)$$

の関係が得られ、複数の点  $[j, \text{var}(d_{j,k})]$  を片対数プロットした傾きから、 $H$ 、 $D(=2-H)$  を推定することができる<sup>6</sup>。

ここで新たに、式 (5.13) を拡張し、2次元画像のフラクタル次元を推定する式を導出する。その方針は以下とする。



- 2次元の fBm を,  $x, y$  の両方向について fBm の性質を有する  $B_H(x, y)$  とする.
- 2次元ウェーブレット分解のウェーブレット係数として,  $x, y$  方向とも高周波成分により構成される  $d_{j,k,l}^{HH}$ , すなわち HH 画像を考える.

$B_H(x, y)$  の自己相関関数は, 式 (5.6) の類推により,

$$\langle B_H(x_1, y_1) B_H(x_2, y_2) \rangle = \frac{V_H}{2} \left\{ (x_1^2 + y_1^2)^H + (x_2^2 + y_2^2)^H - [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^H \right\} \quad (5.14)$$

と表せる. また, HH 画像に対しては, 変換基底が  $\psi(x)\psi(y)$  となることから,  $d_{j,k,l}^{HH}$  は次式で与えられる.

$$d_{j,k,l}^{HH} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_H(x, y) \psi_{j,k}(x) \psi_{j,l}(y) dx dy \quad (5.15)$$

この場合, 各解像度  $j$  における  $d_{j,k,l}^{HH}$  の分散については, 以下が得られる.

$$\text{var} (d_{j,k,l}^{HH}) = \frac{V_H}{2} Q'_\psi(H) (2^j)^{2(H+1)} \quad (5.16)$$

$$Q'_\psi(H) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\psi(y)\psi(x-\tau_x)\psi(y-\tau_y) (\tau_x^2 + \tau_y^2)^H dx dy d\tau_x d\tau_y \quad (5.17)$$

式 (5.16) の証明

式 (5.14), (5.15) を用いて,

$$\begin{aligned} & \langle d_{j_1, k_1, l_1}^{HH} d_{j_2, k_2, l_2}^{HH} \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle B_H(x_1, y_1) B_H(x_2, y_2) \rangle \\ & \quad \cdot \psi_{j_1, k_1}(x_1) \psi_{j_1, l_1}(y_1) \psi_{j_2, k_2}(x_2) \psi_{j_2, l_2}(y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_H}{2} \left\{ (x_1^2 + y_1^2)^H + (x_2^2 + y_2^2)^H - [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^H \right\} \\ & \quad \cdot \psi_{j_1, k_1}(x_1) \psi_{j_1, l_1}(y_1) \psi_{j_2, k_2}(x_2) \psi_{j_2, l_2}(y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \end{aligned}$$

$x'_1 = 2^{-j_1} x_1 - k_1$  などと置き換えて,

$$\begin{aligned} &= \frac{V_H}{2} \cdot 2^{-(j_1+j_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \left\{ [(x'_1 + k_1)^2 2^{2j_1} + (y'_1 + l_1)^2 2^{2j_1}]^H + [(x'_2 + k_2)^2 2^{2j_2} + (y'_2 + l_2)^2 2^{2j_2}]^H \right. \\ &\quad \left. - \left\{ [(x'_2 + k_2) 2^{j_2} - (x'_1 + k_1) 2^{j_1}]^2 + [(y'_2 + l_2) 2^{j_2} - (y'_1 + l_1) 2^{j_1}]^2 \right\} \right\} \\ &\quad \cdot \psi(x'_1) \psi(y'_1) \psi(x'_2) \psi(y'_2) 2^{j_1} dx'_1 2^{j_2} dy'_1 2^{j_2} dx'_2 2^{j_2} dy'_2 \end{aligned}$$

マザーウェーブレット  $\psi$  には, 式 (2.37) のアドミッシブル条件が課せられるので,

$$\begin{aligned} &= -\frac{V_H}{2} \cdot 2^{j_1+j_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \left\{ [(x'_2 + k_2) 2^{j_2} - (x'_1 + k_1) 2^{j_1}]^2 + [(y'_2 + l_2) 2^{j_2} - (y'_1 + l_1) 2^{j_1}]^2 \right\} \\ &\quad \cdot \psi(x'_1) \psi(y'_1) \psi(x'_2) \psi(y'_2) dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2 \end{aligned}$$

$x'_2, y'_2$  を変数変換して,

$$\begin{aligned} &= -\frac{V_H}{2} \cdot 2^{j_1+j_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \left[ (-\tau_x 2^{j_2})^2 + (-\tau_y 2^{j_2})^2 \right]^H \psi(x'_1) \psi(y'_1) \\ &\quad \cdot \psi \left\{ 2^{j_1-j_2} x'_1 - [\tau_x - (2^{j_1-j_2} k_1 - k_2)] \right\} \psi \left\{ 2^{j_1-j_2} y'_1 - [\tau_y - (2^{j_1-j_2} l_1 - l_2)] \right\} \\ &\quad \cdot dx'_1 dy'_1 (-d\tau_x) (-d\tau_y) \\ &= -\frac{V_H}{2} \cdot (2^{j_2})^{2(H+1)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad C_\psi [x'_1; 2^{j_1-j_2}, \tau_x - (2^{j_1-j_2} k_1 - k_2)] C_\psi [y'_1; 2^{j_1-j_2}, \tau_y - (2^{j_1-j_2} l_1 - l_2)] \\ &\quad \cdot (\tau_x^2 + \tau_y^2)^H d\tau_x d\tau_y \end{aligned}$$

ここで,

$$C_\psi(x; \rho, \tau) = \sqrt{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \psi(\rho x - \tau) dx$$

したがって,

$$\text{var}(d_{j,k,l}^{HH}) = \frac{V_H}{2} Q'_\psi(H) (2^j)^{2(H+1)}$$

$$Q'_\psi(H) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_\psi(x; 1, \tau_x) C_\psi(y; 1, \tau_y) (\tau_x^2 + \tau_y^2)^H d\tau_x d\tau_y$$

■

よって、式 (5.16) の両辺の対数をとれば、

$$\log_2 [\text{var}(d_{j,k,l}^{HH})] = 2(H+1)j + \text{constant} \quad (5.18)$$

となる。つまり、1次元の式 (5.13) と同様に、複数組得られた点  $[j, \text{var}(d_{j,k,l}^{HH})]$  の片対数プロットの傾きにより、 $H$  を推定できる。1次元の場合との相違は、プロットの傾きが  $2H+1$  から  $2(H+1)$  となることである。フラクタル次元は、 $D=3-H$  として求められる。

式 (5.10), (5.15) で用いた非整数ブラウン運動  $B_H(t)$ ,  $B_H(x, y)$  は連続的な信号である。しかしながら、解析の対象となるのは、サンプリングされた離散的な信号である。本来、スケーリング関数 (2.4 参照) によって、

$$a_{0,k} = \int_{-\infty}^{\infty} B_H(t)\phi(t-k)dt \quad (5.19)$$

$$a_{0,k,l} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_H(x,y)\phi(x-k)\phi(y-l)dxdy \quad (5.20)$$

のようにモデル化される初期信号は、実際には、fBm を  $k$ , および  $l$  ごとにサンプリングしたものととなっている。[FLA92] では、離散化された1次元 fBm から得られるウェーブレット係数  $\hat{d}_{j,k}$  の分散が、次式に従うことが示されている。

$$\text{var}(\hat{d}_{j,k}) = \frac{V_H}{2} \tilde{Q}_\psi(H, j) (2^j)^{2H+1} \quad (5.21)$$

式 (5.11) と比較すると、 $Q_\psi(H)$  が解像度  $j$  に依存する量  $\tilde{Q}_\psi(H, j)$  になっていることが分かる。これに伴い、 $\log_2[\text{var}(\hat{d}_{j,k})]$  の傾きは、もはや  $2H+1$  に相当しない。とはいえ、 $\tilde{Q}_\psi(H, j)$  については以下が成立する。

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \tilde{Q}_\psi(H, j) = Q_\psi(H) \quad (5.22)$$

したがって、十分深い ( $j$  が大きい) 分解レベルにおいて、 $[j, \text{var}(\hat{d}_{j,k})]$  を片対数プロットした傾きから  $H$  を推定すれば、離散化の影響は収束すると考えられる。2次元画像についても同様である。

## 5.5 SAR 画像のフラクタル次元の推定

本節では、式(5.18)によるフラクタル次元の推定を、実際の画像に適用した結果を示す。なお、以下の実験では、ウェーブレット分解には全てハール基底を用いている。

まず、画像のフラクタル次元の相違を直観的に表すため、合成テクスチャへの適用結果を図5-2に示す。(a)は2種の類似したテクスチャを合成した画像であり、(b)は式(5.18)を用いて(a)のフラクタル次元を推定した結果である。(b)においては、高い(明るい)階調ほど、フラクタル次元が高いことを意味している。フラクタル次元は、正方局所領域内で推定し、その中心画素に出力している。(a)の合成テクスチャ画像は、一見して両テクスチャを分離するのは困難であるが、フラクタル次元はその相違を十分に捉えている。つまり、二つのテクスチャは、視覚的には類似してみえるが、フラクタルの観点からは、大きな差異を有している。このように、フラクタル次元は、テクスチャの解析に一つの視座を加える特徴量であるといえる。

次に、提案した推定法が出力するフラクタル次元の妥当性を検証するために、標準画像データベース SIDBA に含まれる月の表面画像に対して適用した結果を、図5-3に示す。本画像については、これまでも様々な方法でフラクタル次元が計算されており、[TAK91]には2.623、あるいは2.687という値が示されている。ここでは、隣接する分解レベル間においてそれぞれ、 $H$ を推定している(図5-3(b))。すなわち、式(5.18)から、

$$\log_2 [\text{var}(d_{j+1,k,l}^{HH})] - \log_2 [\text{var}(d_{j,k,l}^{HH})] = 2(H+1) \quad (5.23)$$

として  $H$  を推定し、フラクタル次元を得ている。図5-3(b)では、フラクタル次元は分解のレベルに応じて変化している。前節で述べたように、離散化の影響が十分深いレベルにおいて収束することを考えると、件の月面画像のフラクタル次元は2.7前後と推察される。これは、他の方法で計算された値とほぼ一致している。

さて、以上述べてきたウェーブレット分解による方法を用い、実際に SAR 画像のフラクタル次元を推定した結果について述べる。対象は、米国ミシガン州の森林地帯である Raco 地域を撮像した AIRSAR 画像で、多周波ポーラリメトリックな4ルックのものである。偏波は、一般的な HH, HV, VV の画像を用いる。

フラクタル次元の推定にあたっては、式(5.18)の関係に基づき、分解レベルに対する差分画像  $d_{j,k,l}^{HH}$  の分散の片対数プロットを作成し、その傾きからハースト指数  $H$  を求める。図5-4にプロットの例を示す。SAR 画像がサンプルデータであることを考慮し、深い分解レベル ( $j=6,7,8$  の3点)において、最小二乗法により傾きを推定する(図5-4中の実線)。

表5-1に、推定されたフラクタル次元の値を示す。この表からは、およそ以下の傾向が読みとれる。

- 観測周波数に関しては、L, P, Cバンドの順に、高いフラクタル次元を示している。
- 偏波に関しては、HV, HH, VVの順に、高いフラクタル次元を示している。

先に述べたように、SAR画像のフラクタル次元は、撮像された地表面の複雑性に関する量である。複数の観測パラメータを有するSAR画像においては、波長の長短や偏波の相違により、これらの複雑性の記述のされ方が異なり、そのため、推定されるフラクタル次元にも差異が生じるものと考えられる。上に挙げたフラクタル次元の大小の順列は、本画像に限定されるものかもしれないが、フラクタル次元が観測パラメータに影響される量であることは確認できた。このような性質は、フラクタル次元を画像分類などのためのテクスチャ特徴として用いるにあたり、情報の多重化の観点から有用なものとなる。

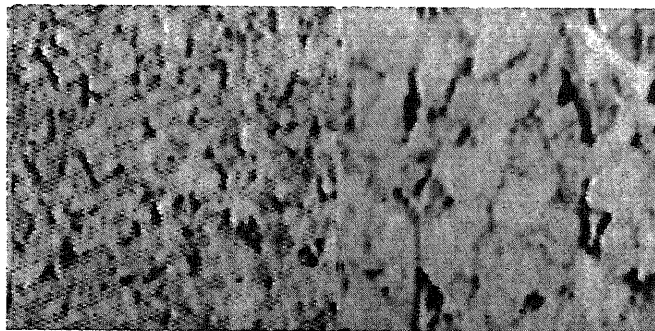
最小二乗法によれば、いかにデータがランダムであろうと、何らかの推定値が得られるが、そのような等方的なデータから推定されたフラクタル次元に対して、画像の特徴量としての物理的な意味づけを施すことは妥当ではない。そこでここでは、点列の直線度という尺度を導入する。平面上の点列 $(X_i, Y_i)$ の直線度は、次のように定義される [OHT84].

$$\mathcal{L}_{X,Y} = \frac{\sqrt{4\mu_{11}^2 + (\mu_{20} - \mu_{02})^2}}{\mu_{20} + \mu_{02}} \quad (5.24)$$

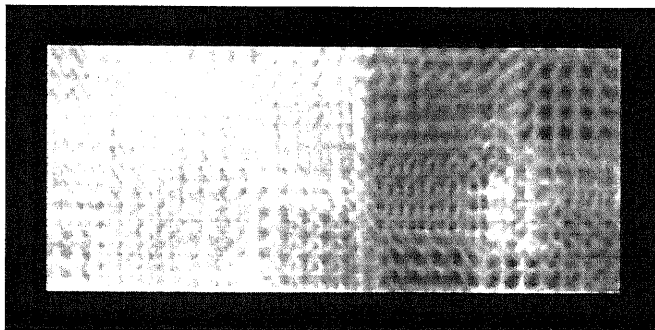
ここで、

$$\mu_{pq} = \frac{1}{N_{point}} \sum_{i=1}^{N_{point}} (X_i - \langle X_i \rangle)^p (Y_i - \langle Y_i \rangle)^q \quad (5.25)$$

$N_{point}$  は点列の数を表す。点列が完全に直線上に並ぶ場合は $\mathcal{L}_{X,Y} = 1$ 、全くランダムな場合は $\mathcal{L}_{X,Y} = 1$ となる。よって、フラクタル次元を推定する際、推定に用いる点列の直線度が、そのデータがどれくらいフラクタル的であるかを示す指標になると考える。表5-1の括弧内の数値は、各画像のフラクタル次元の推定に用いた点列の直線度であり、おしなべてほぼ1に近い値となっている。このことから、本画像をフラクタル的に解析する意義は確保されているといえる。



(a)



(b)

図 5-2. 合成テクスチャ画像のフラクタル次元. (a) 類似したテクスチャによる合成画像, (b) 局所的なフラクタル次元.

Fig. 5-2. Fractal dimension of a synthesized texture image: (a) synthesized texture image, (b) locally estimated fractal dimension.

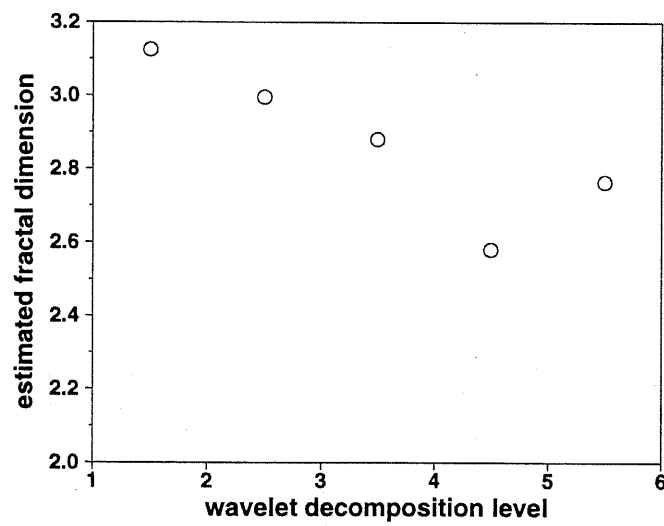
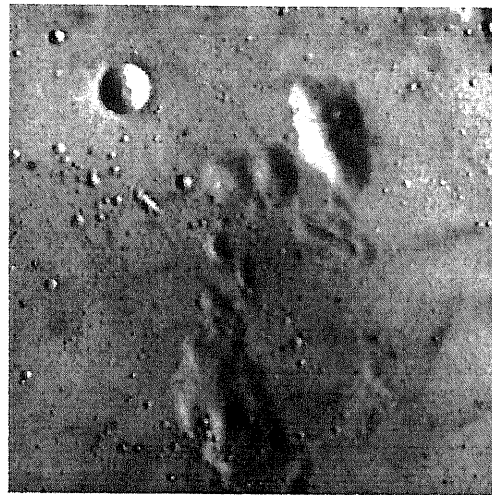


図 5-3. 月の表面画像 (SIDBA) のフラクタル次元の推定.

**Fig. 5-3.** Estimation of fractal dimension of the moon surface image. The image is in the standard image database "SIDBA".

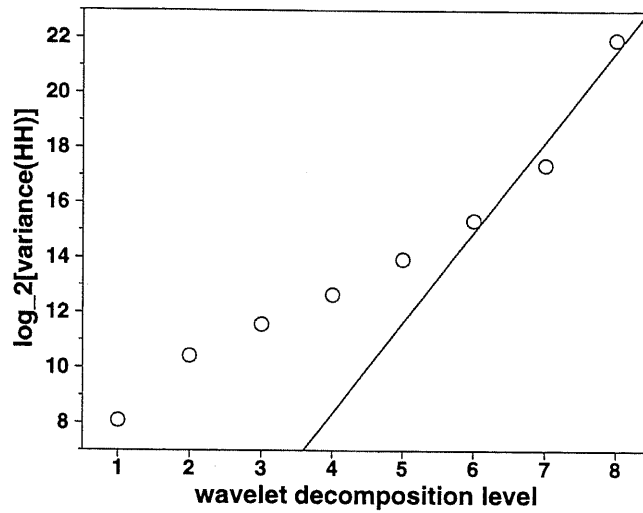


図 5-4. 分解レベルに対する差分画像の分散の片対数プロット.

**Fig. 5-4.** Variance of wavelet coefficients within HH detail images log-plotted as a function of wavelet decomposition level.

**表 5-1.** Raco サイトの推定フラクタル次元. 括弧内の数値は推定に用いた点列の直線度を表す.  
**Table 5-1.** Fractal dimension estimated in AIRSAR images of the Raco site. The value in the bracket is the linearity of the point sequence used in the estimation.

	HH	HV	VV
C-band	2.3513 (0.9930)	2.5323 (0.9934)	2.2863 (0.9969)
L-band	2.9214 (0.9997)	2.9817 (0.9997)	2.8968 (0.9993)
P-band	2.6388 (0.9990)	2.7078 (0.9962)	2.5740 (0.9989)



## 5.6 まとめ

テクスチャ特徴としてフラクタル次元に着目し、2次元 fBm のウェーブレット分解を考慮することで、画像のフラクタル次元を推定するための新たな手法を導出した。また、これを実際の画像に適用し、SAR 画像のフラクタル性、およびそのフラクタル次元の観測パラメータに対する依存性を明らかにした。

提案したフラクタル次元の推定法は、5.4 で示したように、導出の際の式展開が直截的であり、fBm によるモデル化が妥当でありさえすれば、いかなるデータに対しても用いられる。また、Wornell は一連の研究の中で、ウェーブレットによる方法が他の手法と比較して、雑音に対してロバストであることを示している [WOR90, WOR92, WOR93, WOR95]。本論では検討しなかったが、このことは、SAR の SN 比が劣化している場合において利点となる。

実際に、フラクタル次元を用い、ターゲット分類のアルゴリズムを構築するには、分類の分解能を確保するため、局所的な推定を行うことが必要となる。しかし、推定の局所化は分解レベルの減少を招き、これに対する過剰系分解による推定式の導入など、さらなる課題も残されている。その一方で、従来の特徴量に加えて、補助的にフラクタル次元を利用するハイブリッドなアルゴリズムなどは、より現実的な応用として考えられる。

## Notes

<sup>1</sup> ラテン語の fractus(半端な、砕けた)に由来している。

<sup>2</sup> フラクタルな 3 次元表面を撮像して得られる 2 次元画像が、同様にフラクタル性を有することは、[PEN84] で示されている。

<sup>3</sup> ブラウン運動の軌跡は、酔歩運動 (random walk) から求められる。数直線上を、原点から各 1 歩ごとに、左右いずれかに確率  $1/2$  で進むプロセスを考えたとき、歩数に対する位置のプロットがブラウン曲線となる。

<sup>4</sup> Wiener-Khintchine の定理は、パワースペクトルと結びつけられる自己相関関数に、時間差  $t-s$  のみの関数であることを要求している。

<sup>5</sup> 図 5-1 の作図には、逐次ランダム加算法 [HON96] を用いた。

<sup>6</sup> [ABRY98] では通信トラフィックのデータの、また [AKA97] では医療への応用として心音データのフラクタル次元が、式 (5.13) の関係を用いて推定されている。

## References

- [ABRY98] P. Abry and D. Veitch, "Wavelet analysis of long-range-dependent traffic," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.44, pp.2-15, Jan. 1998.
- [AKA97] M. Akay, "Wavelet applications in medicine," *IEEE Spectrum*, pp.50-56, May 1997.
- [ALP97] L. Alparone, M. Barni, M. Betti, and A. Garzelli, "Fuzzy clustering of textured SAR images based on a fractal dimension feature," in *Proc. 1997 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'97)*, Singapore, pp.1184-1186.
- [BENL99] G. Benelli and A. Garzelli, "Oil-spills detection in SAR images by fractal dimension estimation," in *Proc. 1999 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, pp.218-220.
- [CHAU95] B. B. Chaudhuri and N. Sarkar, "Texture segmentation using fractal dimension," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.17, pp.72-77, Jan. 1995.
- [FLA89] P. Flandrin, "On the spectrum of fractional Brownian motions," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.35, pp.197-199, Jan. 1989.
- [FLA92] ———, "Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.38, pp.910-917, Mar. 1992.
- [HON96] 本田勝也, "成長する荒れた界面の形とダイナミクス —自己アフィン・フラクタル," *科学*, vol.66, pp.184-192, Mar. 1996.
- [KAL93] L. M. Kaplan and C.-C. J. Kuo, "Fractal estimation from noisy data via discrete fractional Gaussian noise (DFGN) and the Haar basis," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.41, pp.3554-3562, Dec. 1993.
- [LEL94] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.2, pp.1-15, Feb. 1994.
- [LIE95] S. C. Liew, H. Lim, L. K. Kwoh, and G. K. Tay, "Texture analysis of SAR images," in *Proc. 1995 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'95)*, Firenze, Italy, pp.1412-1414.
- [LUN86] T. Lundahl, W. J. Ohley, S. M. Kay, and R. Siffert, "Fractional Brownian motion: A maximum likelihood estimator and its application to image texture," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol.MI-5, pp.152-161, Sept. 1986.
- [MAN68] B. B. Mandelbrot and J. W. Van Ness, "Fractional Brownian motions, fractional noises and applications," *SIAM Rev.*, vol.10, no.4, pp.422-437, 1968.
- [MAN85] B. B. マンデルブロ著, 広中平祐監訳, フラクタル幾何学, 日経サイエンス, 1985.
- [OGU94] 小倉久直, "1/f ノイズを確率過程としてみれば," *信学誌*, vol.77, pp.250-253, Mar. 1994.
- [OHT84] 大津展之, "平面上のデータ点列の直線度," 昭59 信学総全大, 1571.
- [PEN84] A. P. Pentland, "Fractal-based description of natural scenes," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.PAMI-6, pp.661-674, Nov. 1984.
- [STE93] C. V. Stewart, B. Moghaddam, K. J. Hintz, and L. M. Novak, "Fractional Brownian motion models for synthetic aperture radar imagery scene segmentation," *Proc. IEEE*, vol.81, pp.1511-1522, Oct. 1993.
- [TAK91] 高木幹雄, 下田陽久監修, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991, pp.528-538.
- [TEW92] A. H. Tewfik and M. Kim, "Correlation structure of the discrete wavelet coefficients of fractional Brownian motion," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.38, pp.904-909, Mar. 1992.
- [WOR90] G. W. Wornell, "A Karhunen-Loève-like expansion for 1/f processes via wavelets," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.36, pp.859-861, July 1990.

- 
- [WOR92] G. W. Wornell and A. V. Oppenheim, "Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.40, pp.611-623, Mar. 1992.
- [WOR93] G. W. Wornell, "Wavelet-based representations for the  $1/f$  family of fractal processes," *Proc. IEEE*, vol.81, pp.1428-1450, Oct. 1993.
- [WOR95] \_\_\_\_\_, *Signal Processing with Fractals: A Wavelet-Based Approach*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.

## Chapter 6

# 高分解能な SAR 画像における 濃度の揺らぎ



### 6. Spatial Fluctuation in High-Resolution SAR Images

In this chapter, spatial fluctuation observed in high-resolution SAR images is discussed. Especially the validity of the product model and the corresponding K-distribution for high-resolution images is examined. Of particular interest are the order parameter of the K-distribution for several types of clutter and its relation to the polarization. In experimental tests, low order parameters are measured for most clutter, indicating the high-resolution enhances the texture effect. Also an extension of the product model taking account of backscattering from multiple layers is presented, in order to explain polarimetric variation in the measured order parameters for the forest areas at *L*-band.

English publications relevant to this chapter: 2-d.

## 6.1 あらまし

分解能が波長の数倍程度であるシステムが供する SAR 画像においては、濃度の揺らぎは従来から知られる性質から変化する。最近の SAR の分解能の向上は目覚しいが、高分解能画像の統計は未だ十分に明らかになっていない。本章では、将来のさらなる分解能の向上を睨み、高分解能な SAR 画像の統計的性質を解析し、それに対する新たな統計モデルを提案している。具体的には、高分解能化によるテクスチャの効果の増大や、偏波とテクスチャの関係などに焦点をあてている。

まず、6.2 で、高分解能画像の二つのシナリオを提示し、そのうち、分解能セル内の散乱点の個数が減少し、スペックルの発達が妨げられるケースについて述べる。次に、6.3 では、散乱点の個数が確率変数的にふるまう場合として、K 分布の諸式をまとめる。K 分布の基となる積モデルに関し、それが示唆する偏波とテクスチャとの関係などもみていく。そして、6.4 で、実際に高分解能な SAR 画像を解析した結果を示す。そこでは、特に、データの K 分布との適合を調べることで、高分解能画像の統計的性質を考察する。また、多偏波なデータを解析した結果をうけ、積モデルの拡張として、テクスチャの偏波依存性を表現するための、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤを考慮したモデルを提案している。

## 6.2 高分解能な SAR 画像の統計

昨今、SAR の分解能は飛躍的に向上している。例えば、前章までに用いた AIRSAR 画像の分解能が、4 ルックでアジマス方向 6.7m、レンジ方向 12m であるのに対し、現在、航空機搭載型の SAR では、数 10 cm から数 m 程度の分解能を実現するシステムが出現している。このようなセンサの高分解能化は、高度な情報表現という点において極めて有用であるが、高分解能システムが供するデータの統計は、従来の分解能のそれから変化し、レーダ画像に対するよく知られた分布では、もはや画像内の濃度の揺らぎを記述し得なくなると予想される。したがって、高分解能 SAR 画像のアプリケーションの礎として、その統計的性質を精査することが必要となっている。

標準的な SAR 画像の統計については、既に 2.2 で述べた。しかしながら、高分解能下においては、そこでの議論は成り立たなくなる可能性がある。特に、一般には、十分大きい定数として仮定される分解能セル内の散乱点の個数  $N_s$  に対し、高分解能化がもたらす以下のようなシナリオが考えられる。

- (i)  $N_s$  が小さくなる。
- (ii)  $N_s$  自体の確率変数としてのふるまいが無視できなくなる。

(i) は、中央極限定理の適用が困難になり、スペックルの発達が妨げられることを示唆するものである。つまり、図 6-1 のように、少数 (数個) の散乱点のみがセル内に存在する場合を

指す (図 2-1 と比較). このケースを, 完全に発達したスペックルに対し, 部分的に発達したスペックル (partially-developed speckle) などと呼ぶ. 部分的に発達したスペックルは, 高分解能画像の他に, 例えば, オフナディア角 (off-nadir angle)<sup>1</sup> が大きいシステムで海面を撮像するような際にも考えられる. また, (i) はその極限において, 唯一の散乱点が散乱電界を支配する, いわゆる点目標 (point target) をも扱っている ( $N_s = 1$ ).

中央極限定理が適用できる限界的な  $N_s$  の値については, 古くから計算やシミュレーションを通じて検討され, [ULA89] は  $N_s = 10$  を挙げている<sup>2</sup>. とはいえ, 中央極限定理を適用できない以上, 部分的に発達したスペックルの性質を統一的に記述することは難しく, 各散乱点からの散乱波についての何らかの単純な仮定が必要となる. 一例として, [DAB95] には, 各散乱波の振幅  $A_i$  を一定として導いた結果が示されている.

(ii) については次節で記す.

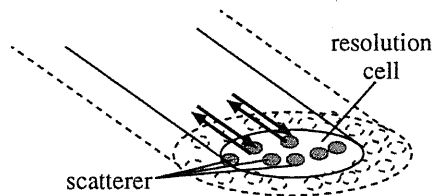


図 6-1. 高分解能セル内の散乱点.

Fig. 6-1. Schematic representation of scatterers within a high-resolution resolution cell.

### 6.3 K 分布と積モデル

高分解能化のシナリオ (ii) は、セル内の散乱点の個数  $N_s$  を確率変数として扱うものである。このモデルによれば、テクスチャは散乱点の個数 (密度) の空間的な揺らぎに基づくものとして解釈できる。 $N_s$  の分解能セルごとの揺動は、もちろん分解能が向上した場合に限られるものではないが、結果として得られる画像濃度の揺らぎに対する影響は、 $N_s$  が比較的小さくなったとき、より顕著に現れると考えられる。

$N_s$  がセルごとに揺らぐとするモデルから導かれる代表的な分布に、K 分布 (K-distribution) がある [JAK76, JAO84]。これは、 $N_s$  を、次のような負の二項分布 (negative binomial distribution) に従う変数として仮定するものである [JAK80]<sup>3</sup>。

$$p(N_s) = \binom{N_s + \nu - 1}{N_s} \frac{(\langle N_s \rangle / \nu)^{N_s}}{(1 + \langle N_s \rangle / \nu)^{N_s + \nu}} \quad (6.1)$$

$\langle N_s \rangle$  は  $N_s$  の平均値である。図 6-2 に、 $\langle N_s \rangle = 10$  としたときの式 (6.1) のプロットを示す。図から、パラメータ  $\nu$  により、 $p(N_s)$  の形状が変化することが分かる。 $\nu$  の値が小さいほど、 $N_s$  の揺らぎは大きくなる。この正変数  $\nu$  は、K 分布の文脈では、オーダーパラメータ (order parameter) と呼ばれる。式 (6.1) から、以下のような散乱電界の強度に対する K 分布が得られる。

$$p(I) = \frac{2}{\Gamma(\nu)} \left( \frac{\nu I}{\langle I \rangle} \right)^{\frac{1+\nu}{2}} K_{1-\nu} \left( 2 \sqrt{\frac{\nu I}{\langle I \rangle}} \right) \quad (6.2)$$

$K_{1-\nu}$  は  $1-\nu$  次の変形ベッセル関数を表す。また、上式に従う強度をマルチルック加算した場合の分布は、次式のように与えられる。

$$p(I) = \frac{2}{\Gamma(\nu)\Gamma(L)} \left( \frac{L\nu I}{\langle I \rangle} \right)^{\frac{L+\nu}{2}} K_{L-\nu} \left( 2 \sqrt{\frac{L\nu I}{\langle I \rangle}} \right) \quad (6.3)$$

式 (6.3) に  $L = 1$  を代入すると、式 (6.2) へと帰着する。

一方、式 (6.2), (6.3) の K 分布は、冒頭の 1.2 で述べたいわゆる積モデル [WAR81] によっても導出できる。積モデルにおけるテクスチャは、後方散乱係数に比例する量である  $\langle I \rangle$  の空間的な揺らぎによるものとして捉えられ、このとき、強度  $I$  の分布は式 (1.4) によって求められる。 $\langle I \rangle$  を  $\mu_I$  と置き換え、式 (2.11) の  $p(I)$  を条件付き分布として式 (1.4) に代入すると、以下を得る。

$$p(I) = \frac{L^L I^{L-1}}{\Gamma(L)} \int_0^\infty \frac{1}{\mu_I^L} \exp\left(-\frac{LI}{\mu_I}\right) p(\mu_I) d\mu_I \quad (6.4)$$

いま,  $\mu_I$  をガンマ分布

$$p(\mu_I) = \frac{\nu^\nu}{\Gamma(\nu)\langle\mu_I\rangle} \left(\frac{\mu_I}{\langle\mu_I\rangle}\right)^{\nu-1} \exp\left(-\frac{\nu\mu_I}{\langle\mu_I\rangle}\right) \quad (6.5)$$

で仮定すると, 式 (6.4) は式 (6.3) の K 分布を与える<sup>4,5</sup>.

式 (6.5) から, オーダパラメータ  $\nu$  が, K 分布の形状を決める変数であることが理解できる. つまり,  $\nu$  の値が小さい場合,  $\mu_I$  は大きく揺らぎ, 強いテクスチャが画像に現れる. 逆に,  $\nu$  が大きいときには, 式 (6.5) のガンマ分布はデルタ状となり, 結果として式 (6.2) の K 分布は指数分布へ, 式 (6.3) はガンマ分布へと収束していく.

積モデルは, ポーラリメトリックなデータに対しては, 次式のように拡張される [NOV89].

$$\mathbf{u} = \sqrt{\gamma} \mathbf{w} \quad (6.6)$$

$\mathbf{u}$  は, 式 (2.28) に示した散乱行列の成分を並べたベクトルである.  $\mathbf{w}$  はスペックル成分のみに依存するベクトル,  $\gamma$  はここでのいわゆるテクスチャを表す. スペックル成分  $\mathbf{w}$  は, 式 (2.29) と同様に多次元複素正規分布に従うため,  $\mathbf{u}$  の  $\gamma$  に対する条件付き確率密度関数は, 次のように書ける.

$$p(\mathbf{u}|\gamma) = \frac{1}{\pi^q |\gamma \mathbf{C}_w|} \exp[-\mathbf{u}^{*T} (\gamma \mathbf{C}_w)^{-1} \mathbf{u}] \quad (6.7)$$

ただし,  $\mathbf{C}_w (= \mathbf{C}/\gamma)$  は  $\mathbf{w}$  の共分散行列である. したがって,  $\mathbf{u}$  の分布は以下の式により求められる.

$$p(\mathbf{u}) = \int_0^\infty p(\mathbf{u}|\gamma) p(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\pi^q} \int_0^\infty \frac{1}{|\gamma \mathbf{C}_w|} \exp[-\mathbf{u}^{*T} (\gamma \mathbf{C}_w)^{-1} \mathbf{u}] p(\gamma) d\gamma \quad (6.8)$$

ここで, 単偏波の場合と同じように, テクスチャ成分  $\gamma$  にガンマ分布

$$p(\gamma) = \frac{\nu^\nu \gamma^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp(-\nu\gamma) \quad (6.9)$$

を考え, 式 (6.8) に代入すると,  $\mathbf{u}$  の確率密度関数は次式に示す多次元 K 分布として得られる ([TOU95] など<sup>6</sup>).



$$p(\mathbf{u}) = \frac{2^{\nu(\nu+q)/2}}{\pi^q |\mathbf{C}| \Gamma(\nu)} (\mathbf{u}^{*T} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{u})^{\frac{\nu-q}{2}} K_{\nu-q} \left( 2\sqrt{\nu \mathbf{u}^{*T} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{u}} \right) \quad (6.10)$$

また、式 (2.31) のマルチルック処理された共分散行列は、積モデルによって以下のように表せる。

$$\mathbf{C}_L = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{u}_{(n)} \mathbf{u}_{(n)}^{*T} = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \gamma_{(n)} \mathbf{w}_{(n)} \mathbf{w}_{(n)}^{*T} \quad (6.11)$$

マルチルック数  $L$  が比較的小さく、テクスチャの揺らぎのスケールがマルチルックのセルよりも大きいと考えられるとき、式 (6.11) は、

$$\mathbf{C}_L = \frac{\gamma}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{w}_{(n)} \mathbf{w}_{(n)}^{*T} = \gamma \mathbf{C}_{w,L} \quad (6.12)$$

と書き直せる [JOU94]。スペックル成分の共分散行列をマルチルックした  $\mathbf{C}_{w,L}$  は、式 (2.32) の Wishart 分布に従う。したがって、式 (6.12) を用いて  $\mathbf{C}_L$  の  $\gamma$  に関する条件付き分布  $p(\mathbf{C}_L | \gamma)$  を生成し、これと式 (6.9) を、

$$p(\mathbf{C}_L) = \int_0^\infty p(\mathbf{C}_L | \gamma) p(\gamma) d\gamma \quad (6.13)$$

に代入することで、 $\mathbf{C}_L$  についての K 分布が次式のように計算できる [LEE94c]。

$$p(\mathbf{C}_L) = \frac{2(L\nu)^{(\nu+Lq)/2} |\mathbf{C}_L|^{L-q} \text{Tr}(\mathbf{C}^{-1} \mathbf{C}_L)^{(\nu+Lq)/2}}{\pi^q (q-1)^{L/2} \Gamma(L) \cdots \Gamma(L-q+1) |\mathbf{C}|^L \Gamma(\nu)} K_{\nu-Lq} \left[ 2\sqrt{L\nu \text{Tr}(\mathbf{C}^{-1} \mathbf{C}_L)} \right] \quad (6.14)$$

上式の確率密度関数は  $q^2$  次元を有するが、例えば  $q=1$  の場合、単偏波の強度に対する K 分布を表し、式 (6.3) と一致する。

さて、ポーラリメトリックなデータについての上の議論は、式 (6.6) に示した積モデルに拠っているが、ここで注目すべき点は、 $\mathbf{w}$  の各成分に対し、単一のスカラー量  $\gamma$  によるモジュレーションが等しく与えられていることである。つまり、積モデルにおいては、テクスチャは偏波に依存しない量であるといえる<sup>7</sup>。これについては、次節で実データを用い詳察する。

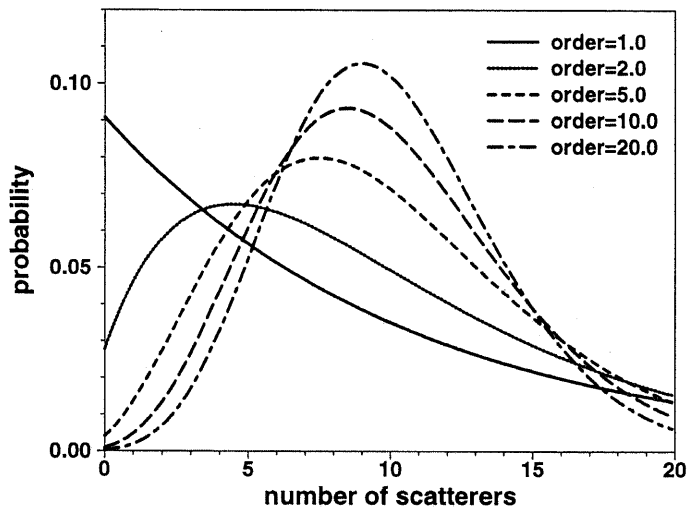


図 6-2. 負の二項分布の確率密度関数 ( $\langle N_s \rangle = 10$ ).

Fig. 6-2. Negative binomial probability density functions for several order parameters with  $\langle N_s \rangle = 10$ .

## 6.4 高分解能な SAR 画像の統計的性質の解析／解釈

以上をうけて、本節では、実際に多周波／多偏波な高分解能 SAR 画像の統計的性質を解析した結果について述べる。

使用したデータは、通信総合研究所 (CRL) と宇宙開発事業団 (NASDA) が共同で開発した航空機搭載システム PI-SAR (Polarimetric Interferometric SAR) によるものである<sup>8</sup>。PI-SAR システムは X バンド (9.55 GHz)、および L バンド (1.27 GHz) の二つの観測周波数を備え、両バンドについてフルポーラリメトリックなデータを供する。また、L バンドにはインタフェロメトリ (interferometry)<sup>9</sup> 機能をも有している。表 6-1 に PI-SAR の諸元を示す [CRL98]。表には 4 ルックにおける分解能が与えられているが、1 ルックでの分解能はさらに高く、 $1.5 \times 0.375$  m (X バンド)、あるいは  $3.0 \times 0.75$  m (L バンド) を実現している。本節の解析では、1 ルックのデータを用いる。

図 6-3 は、解析したサイトの X バンド、VV 偏波の画像である。本画像には、鳥取砂丘周辺の防砂林<sup>10</sup>、および市街地が撮像されている。ここでは、異なる性質を有するターゲットのサンプルとして、防砂林と市街地に対し、各々図中の白枠の領域を設定した。なお、防砂林については二つの領域 (図中左上) を設定し、それぞれ森林 A/B として扱っている。

ここでの解析の目的は、高分解能下における積モデル、および K 分布の妥当性を検証することにある。具体的には、以下のような事項を明らかにしようとするものである。

- 各領域のデータは K 分布によってよく表現され得るか。

前節で述べた前提が満たされる、すなわち分解能セル内の散乱点の個数が負の二項分布に従う、もしくは積モデルにおけるテクスチャ成分がガンマ分布で表せる場合、データは K 分布に適合すると考えられる。しかし、6.2 の (i) のような、高分解能化によりセル内の散乱点が極端に減少している状況においては、データの性質は K 分布を以てしても記述できない。散乱点の数は、ターゲットの特性や波長にも左右される。

- データが K 分布に適合するならば、オーダパラメータの値はどの程度であるか。

高分解能画像では、直観的には、テクスチャがより詳細に捉えられ、その揺らぎが増大すると推察される。このことは、K 分布においては、オーダパラメータの値が小さくなることを意味している。

- テクスチャと偏波の関係は、式 (6.6) のポーラリメトリックな積モデルに従うか。

積モデルは、テクスチャ成分が偏波に依存しない、つまり各偏波におけるオーダパラメータが同一の値をもつことを示唆している。

解析の手順としては、まず、各領域についてオーダパラメータ $\nu$ の推定を行う。式(6.3)のK分布に対する対数尤度は、

$$\lambda_K = -N \ln \Gamma(\nu) + N \ln \left[ \frac{2}{\Gamma(L)} \right] + \frac{N(L+\nu)}{2} \ln \left( \frac{L\nu}{\langle I \rangle} \right) + \frac{L+\nu-2}{2} \sum_{i=1}^N \ln I_i + \sum_{i=1}^N \ln \left[ K_{L-\nu} \left( 2\sqrt{\frac{L\nu I_i}{\langle I \rangle}} \right) \right] \quad (6.15)$$

のように表せる。 $N$ はサンプル $I_i$ の数である。しかしながら、上式の第5項についての偏微分方程式の解は、解析的に得ることができないため、最尤推定を行うには、 $\lambda_K$ を最大にする $\langle I \rangle$ 、 $\nu$ を2次元的に探索しなければならない[JOU93]。これをうけて、近似的に $\nu$ を推定する多くの手法が提案されている[RAG91a, OLI93, LOM94, JAH96, ISK99]。ここでは、次の関係により $\nu$ を推定する[OLI93]。

$$\ln(\nu) - \psi(\nu) = \ln(\langle I \rangle) - \langle \ln(I) \rangle + \psi(L) - \ln(L) \quad (6.16)$$

上式中の $\psi$ は、ディガンマ関数(digamma function)[ABRA64]<sup>11</sup>であることに注意されたい。式(6.16)による推定は、 $\nu$ が小さい値をとる場合においても、最尤推定のよい近似となることが知られている[BLA94]。式(6.16)を用いるにあたっては、データから $\langle I \rangle$ 、および $\langle \ln(I) \rangle$ を計算する際、空間的な相関による影響を抑えるため、データのサブサンプリング(間引き)を行う。 $\nu$ は各偏波について推定される。

その後、推定された $\nu$ が与えるK分布と、データのヒストグラムとの適合をみる。ここでは、平均強度の異なる領域間の統計的な性質を直接比較するため、平均値で正規化した強度 $I' (= I/\langle I \rangle)$ の分布を調べる。本解析では1ルックのデータを使用するが、1ルックの $I'$ に対するK分布は、式(6.2)を変数変換して、次式のように求められる。

$$p(I') = \frac{2(\nu I')^{(1+\nu)/2}}{I' \Gamma(\nu)} K_{1-\nu} \left( 2\sqrt{\nu I'} \right) \quad (6.17)$$

表 6-1. PI-SAR の諸元 [CRL98].  
Table 6-1. PI-SAR characteristics.

	X-band	L-band
Observation Altitude	6000–12000 m	
Observation Speed	100–250 m/s	
Total Weight of SAR System	1130 kg	
Center Frequency	9.55 GHz	1.27 GHz
Transmission Peak Power	8.3 kW	3.5 kW
Chirp Bandwidth	100 MHz	50 MHz
Antenna Size	1.05 m × 0.19 m	1.55 m × 0.65 m
Off-nadir Look Angle	10–75 deg. (variable)	20–60 deg. (fix)
Polarization	HH/HV/VH/VV	HH/HV/VH/VV
Slant-Range Resolution	1.5 m	3 m
Azimuth Resolution (4-look)	1.5 m	3 m
Interferometry —Baseline	2.3 m	N/A
Interferometry —Topographic Accuracy	≤ 2 m	N/A
Bit Length	8 bits (I and Q)	8 bits (I and Q)
Data Rate	512 Mbps	256Mbps

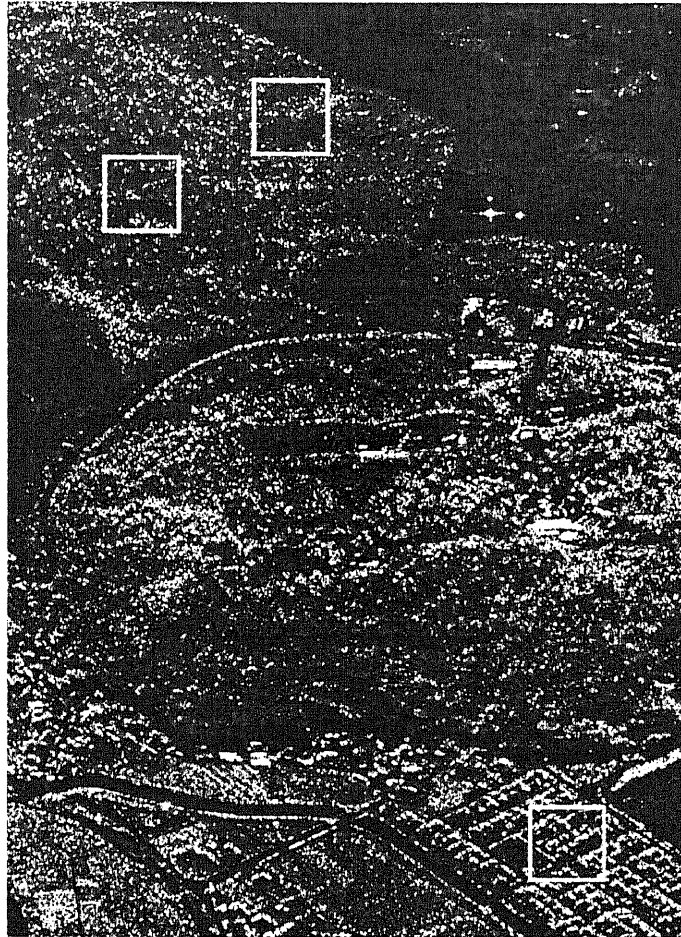


図 6-3. 解析対象とした PI-SAR 画像 (X バンド, VV 偏波, 1 ルック). 図中の白枠は実際に解析したサンプルを表す. 上部の二ヶ所が森林 A/B, 下部が市街地の領域を指している.

**Fig. 6-3.** PI-SAR image of the Tottori Dune site at X-VV band. The analyzed sample areas are annotated by the rectangles. The upper rectangles indicate the forest A/B, and the lower rectangle indicates the urban area.

では以降、解析の結果について述べる。表 6-2 に、X, L バンド各々の HH, HV, VV 偏波のデータに対して推定された、森林 A/B, および市街地領域のオーダパラメータの値を示す。また、図 6-4 に、各データにおける正規化強度  $I'$  のヒストグラムを、推定されたオーダパラメータが与える式 (6.17) の K 分布と併せて示す。図 6-4 には、参考として、一般的な指数分布  $\exp(-I')$  をも付している。これらから得られる特徴的な結果としては、次のようなことが挙げられる。

- 1) 推定されたオーダパラメータの値は概して小さい。
- 2) 森林の領域においては、ヒストグラムは各周波数/偏波で K 分布によく適合している。しかし、各偏波でのオーダパラメータは、X バンドではほぼ揃った値を示しているのに対し、L バンドでは有意なばらつきがみられる。
- 3) 市街地の領域に対しては、推定されたオーダパラメータが与える K 分布は、ヒストグラムと適合しているとはいえない。

以下、1) から 3) のそれぞれについて考察を試みる。

まず 1) は、高分解能な SAR データ (強度) の統計が、確かに、一般的な SAR 画像に対する指数分布のモデルから逸脱することを示唆するものである。すなわち、定性的には、高分解能化によりテクスチャの影響が強まった結果であるといえる。これを、再び、テクスチャを分解能セル内における散乱点の個数の揺らぎとする観点から考察してみる。式 (6.1) に示した負の二項分布の特性関数 (characteristic function)<sup>12</sup> は、 $r = \nu / (\nu + \langle N_s \rangle)$  とすると、

$$\varphi(\zeta) = \langle \exp(j\zeta N_s) \rangle = \left[ \frac{r}{1 - (1-r)\exp(j\zeta)} \right]^\nu \quad (6.18)$$

となる。いま、図 6-5 のように、新たに  $m$  個の分解能セルを統合したセル単位をとると、もとのセル間の  $N_s$  の相関を無視した場合、統合されたセル内の散乱点の個数が従う確率分布の特性関数は、式 (6.18) から次式で表せる。

$$\varphi_m(\zeta) = [\varphi(\zeta)]^m = \left[ \frac{r}{1 - (1-r)\exp(j\zeta)} \right]^{m\nu} \quad (6.19)$$

式 (6.18), (6.19) を比較すると、 $m$  倍の大きさの分解能セルでは、オーダパラメータ  $\nu$  が  $m\nu$  となることが分かる。したがって、逆にいえば、高分解能化によりセルの面積が小さくなれば、それに比例してオーダパラメータの値が小さくなる。もちろん、この議論は非常に単純化されたものであり、より現実的には、セル間のテクスチャの相関を考慮する必要があるが<sup>13</sup>、少なくとも分解能の向上がオーダパラメータの値を減少させることを説明しており、1) はこれに

沿った結果であるといえる。前述したように、オーダパラメータの大きいK分布は、従来の指数分布とほぼ一致する。よって、分解能が低いシステムで撮像された際には、その強度が指数分布で記述できるシーンであっても、高分解能画像ではテクスチャがズームアップされ、低いオーダのK分布に適合していく。

2)の結果は、本サイトの森林の領域においては、K分布が成立するための前提が満たされていることを指し示すものである。この場合は、高分解能化が、中央極限定理の適用が云々されるほど散乱点の個数を減少させているというよりは、むしろ、セルごとの散乱点の個数の揺らぎを助長していると考えの方が妥当であり、またその揺らぎは負の二項分布でよくモデル化され得る<sup>14</sup>。

しかしながら、Lバンドにおける偏波チャネル間のオーダパラメータのばらつきは、式(6.6)のポーラリメトリックな積モデルが、偏波に依存しないスカラーなテクスチャ成分を想定していることを鑑みれば、非常に解釈が難しい。とはいえ、偏波チャネル間で有意に異なるオーダパラメータは、他の文献でも報告されており[SHE92, QUE95, BLA97, DEG97]<sup>15</sup>、これらはポーラリメトリックなデータを、単純な式(6.6)のモデルのみでは記述できない事例であるとみなせる。テクスチャ成分の偏波依存性を表現するためには、単純には、式(6.6)を次のように変更しなければならない。

$$\mathbf{u} = \gamma \mathbf{w} \quad (6.20)$$

ここで $\gamma$ は、

$$\gamma = \text{diag}(\sqrt{\gamma_1}, \sqrt{\gamma_2}, \dots, \sqrt{\gamma_q}) \quad (6.21)$$

の形式の対角行列であり、 $\gamma_1, \gamma_2$ などが各偏波チャネルのテクスチャ成分となる。しかし、式(6.20)の物理的な意味は明らかでない。そこで、新たに以下のようなモデルを提案する。

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{N_l} \sqrt{\gamma_i} \mathbf{w}_i \quad (6.22)$$

これは、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤ<sup>16</sup>を考慮して式(6.6)を拡張し、受信電界を各々のレイヤからの散乱電界の和とするものである。 $N_l$ は散乱レイヤの数を表す。個々のレイヤにおいては、それぞれ式(6.6)のモデルが成立しているものとする。言い換えれば、各レイヤにおける分解能セル内の散乱点の個数は、めいめい独自の負の二項分布に従っていると考える。式(6.20)との関係でいえば、



$$\gamma = \text{diag} \left( \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\sqrt{\gamma_i} w_{i,1}}{w_1}, \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\sqrt{\gamma_i} w_{i,2}}{w_2}, \dots, \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\sqrt{\gamma_i} w_{i,q}}{w_q} \right) \quad (6.23)$$

としたものに相当する.  $(w_1, w_2, \dots, w_q)$  は式 (6.20) 中の  $\mathbf{w}$  の成分,  $(w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,q})$  は式 (6.22) 中の  $\mathbf{w}_i$  の成分である. 式 (6.22) によれば, 各レイヤのテクスチャ成分  $\gamma_i$  は従来の積モデルと同様にスカラーであるが, スペックル成分  $\mathbf{w}_i$  がベクトル量であるため, 両者の積の複数のレイヤ分の和として得られる観測データにおいては, そのオーダーパラメータは偏波依存性を有することになる. 具体的な  $\mathbf{u}$  の確率密度関数は, 各々のレイヤの散乱を記述する式 (6.10) の多次元 K 分布を,  $N_1$  個畳み込んだ形の式となる.

提案する式 (6.22) のモデルは, 森林の物理的な散乱機構を考えると, より理解しやすい. これまでの研究で, L バンドにおける森林の後方散乱は, 樹冠からの体積散乱や地面からの直接的な散乱, あるいは地面と幹の間のコーナリフレクタ (corner reflector) 的な散乱が, 偏波に依存する比率で混合したものと表せることが明らかになっている [ULA90b, WAN93]. 例えば, HV 偏波では樹冠の体積散乱が支配的であるが, HH や VV 偏波では地面からの散乱やコーナリフレクタ的な散乱の寄与も大きい, などである. このことは, 複数の散乱機構を想定した式 (6.22) と合致しており, 偏波間のオーダーパラメータのばらつきを, 定性的ながら裏付けるものである. また, 表 6-2 をみると, L バンドにおけるオーダーパラメータは, 森林 A では HH 偏波において, 森林 B では VV 偏波において最も高い値を示している. これは, 各レイヤからの散乱の寄与の度合いが, サンプルによって異なることによると考えられる.

一方, X バンドにおける森林の散乱は, 一般的に, ほぼ樹冠からの体積散乱のみに支配される [LET92]. つまり, 式 (6.22) において  $N_1 = 1$  とした場合にあたり, 結局単純な積モデルに帰着する. したがって, X バンドにおけるオーダーパラメータが偏波に依存しないという結果は, 拡張したモデルからみても妥当であるといえる.

式 (6.22) は, もちろん, その対象を高分解能なデータに限定するものではない. しかしながら, 分解能がさして高くなく, 個々のレイヤのオーダーパラメータが比較的大きい値をもつと考えられる際は, 結果として得られる受信電力の K 分布の形状が, おしなべて指数分布に極めて近いものとなり, わざわざ式 (6.22) のモデルを持ち出すことの意義は小さい.

偏波間のオーダーパラメータの値に関するこれ以上の厳密な議論, あるいは式 (6.22) のモデルの定量的な検証は, PI-SAR システムの精緻なポーラリメトリック較正を待つ必要がある<sup>17</sup>. また, オーダーパラメータの推定は, 雑音の影響を強く受ける [LOM95, BLA97]. SN 比が悪い場合には, 雑音によってデータのガウシアン的な性質が強まり, オーダーパラメータが大きく見積もられる傾向がある. よって, 各偏波チャンネルにおける雑音の正確な見積りが求められる.

最後に, 3) の結果は, 市街地域ではターゲットの不均質性が高まり, もはや K 分布がデータの性質を記述し得ないことを示唆している. このようなターゲットにおいては, 分解能セル内の散乱点の個数が極端に小さくなり, スペックルが完全に発達しない状況になっていることも予想される. すなわち, 6.2 で述べた高分解能化がもたらすシナリオのうち, (i) のケースが

起こっていると推察できる。市街地(建造物など)のような人工物からの散乱の点ターゲット的なふるまいは、従来から観測されているが、高分解能データではその効果が増している。したがって、積モデルやK分布ではない、全く別の統計モデルを模索すべきであると考えられる。

表 6-2. オーダパラメータの推定結果.  
Table 6-2. Estimated order parameters.

	band	polarization		
		HH	HV	VV
forest A	X	2.77	2.48	2.97
	L	8.23	4.75	4.52
forest B	X	3.12	2.77	2.77
	L	3.74	2.91	5.46
urban area	X	0.77	0.60	0.77
	L	1.03	0.87	0.97

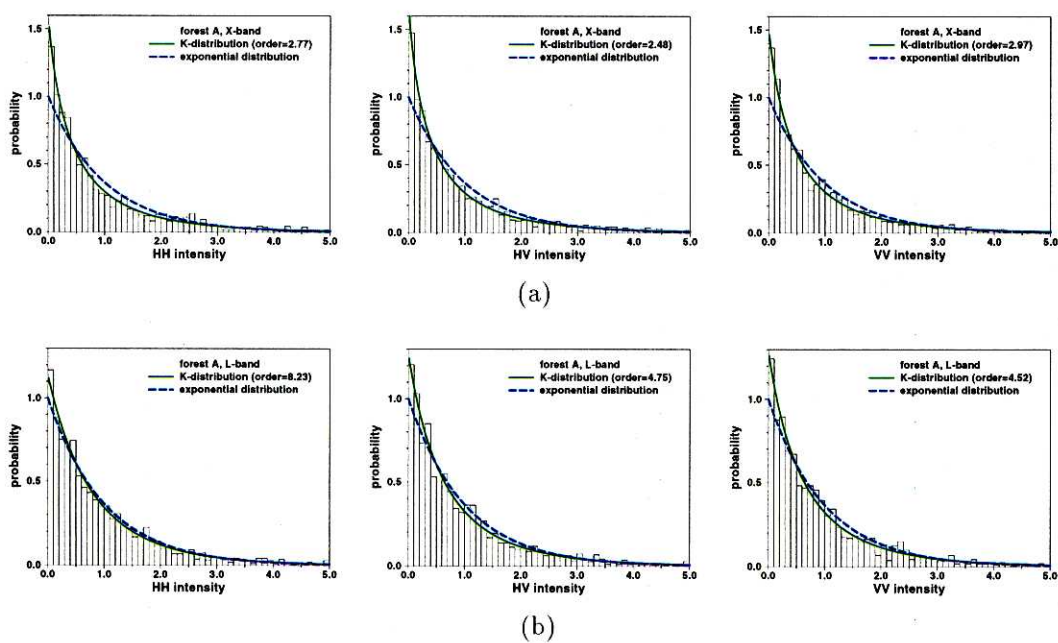


図 6-4. PI-SAR データのヒストグラムと K 分布の適合結果. (a) 森林 A(X バンド), (b) 森林 A(L バンド). 強度は平均値で正規化されている. 破線は指数分布  $\exp(-I')$  を表す.

Fig. 6-4. Measured histograms of the normalized intensity with their corresponding K-distributions in the analyzed sample areas of the PI-SAR image: (a) forest A (X-band), (b) forest A (L-band). For comparison, the exponential distribution is also shown.

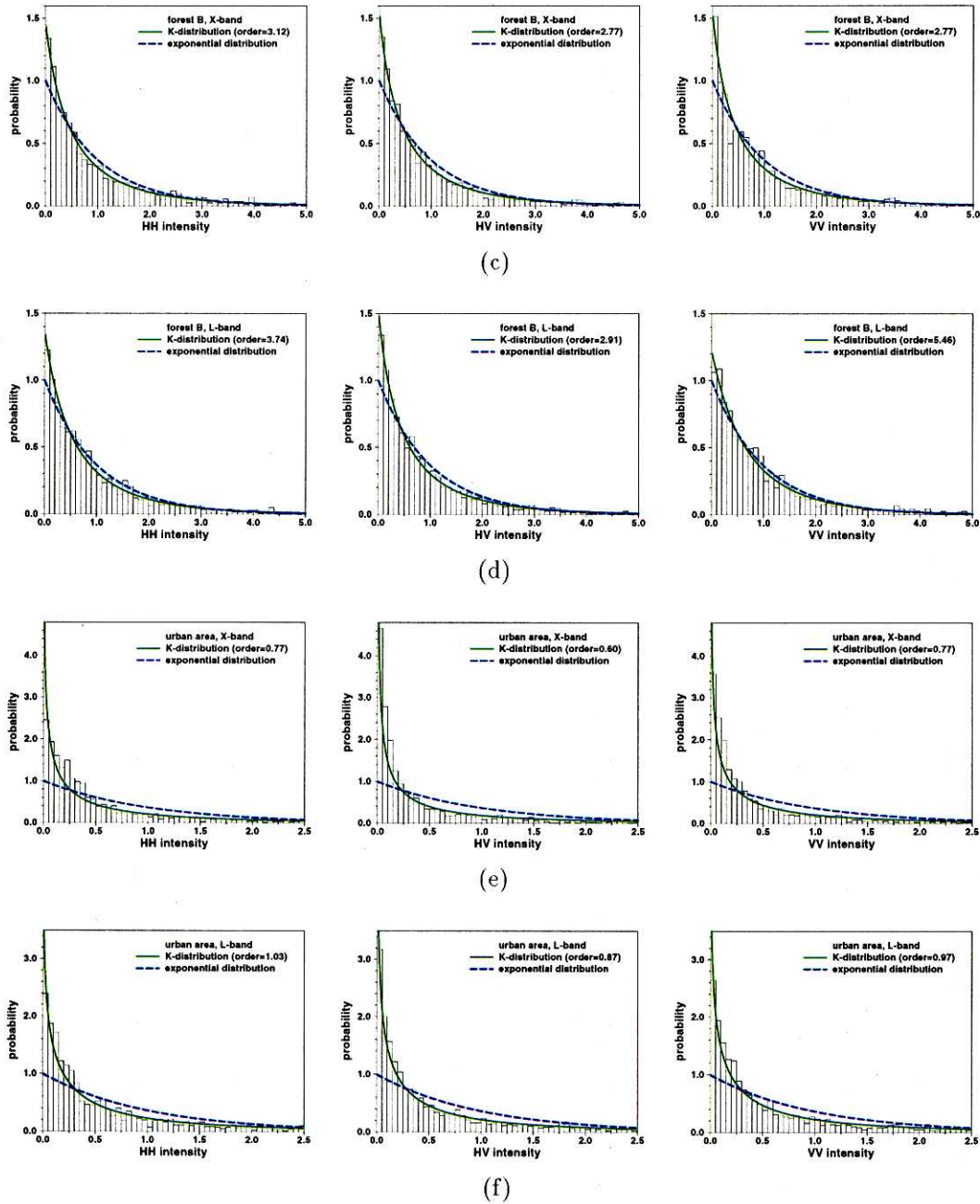


図 6-4. PI-SAR データのヒストグラムと K 分布の適合結果 (続き). (c) 森林 B(X バンド), (d) 森林 B(L バンド), (e) 市街地 (X バンド), (f) 市街地 (L バンド).

Fig. 6-4. (Continued.) Measured histograms of the normalized intensity with their corresponding K-distributions in the analyzed sample areas of the PI-SAR image: (c) forest B (X-band), (d) forest B (L-band), (e) urban area (X-band), (f) urban area (L-band).

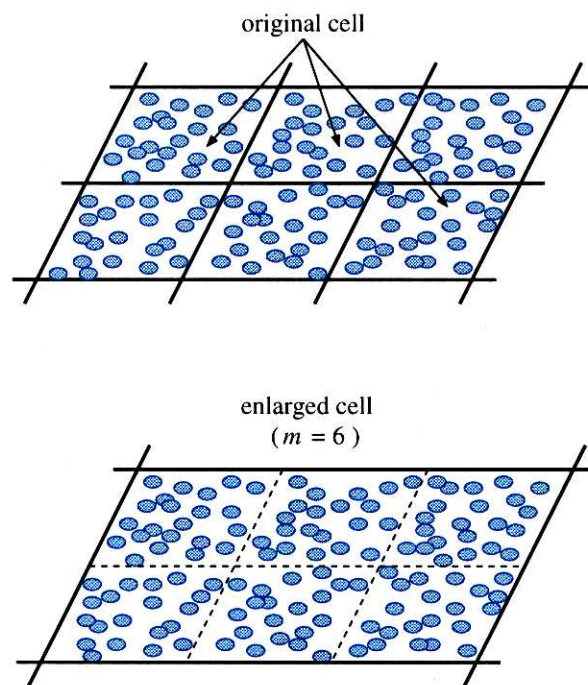


図 6-5. 分解能セルの統合.

Fig. 6-5. Enlargement of resolution cells.

## 6.5 まとめ

高分解能な SAR 画像においては、テクスチャの影響が増大する、あるいは分解能セル内の散乱点の個数の減少から、中央極限定理の適用が困難になり、スペックルが完全に発達しないなど、その濃度の揺らぎの性質が従来の SAR 画像の統計から逸脱すると考えられる。本章では、PI-SAR による多周波/多偏波データを用いて、高分解能画像の統計的性質を解析した結果を示した。その中で特に、K 分布や積モデルの高解像度下での妥当性を、森林や市街地の領域について検証した。そこでは、解析した PI-SAR データ (強度) は、森林域においては K 分布によく適合するのに対し、市街地の領域ではターゲットの極度な不均質性のため、従来の指数分布はおろか、K 分布によってもその統計を記述し得ないことが明らかになった。また、K 分布に適合する森林域においても、そのオーダーパラメータは、従来の分解能の SAR 画像と比較して小さな値となり、高分解能化によりテクスチャの効果が増していることを実証できた。さらに、森林域のオーダーパラメータは、X バンドでは各偏波についてほぼ揃った値をとるのに対し、L バンドでは偏波ごとにばらつきを呈した。このことは、単純な積モデルによる解釈が困難であり、新たに、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤを考慮したモデルへの拡張を行った。拡張したモデルは、森林の散乱機構を鑑みても、X、L 両バンドにおけるオーダーパラメータのふるまいを、矛盾なく説明できるものであった。

## Notes

<sup>1</sup> センサの鉛直直下 (ナディア) 方向と観測方向とのなす角をいう。類似用語に入射角があるが、これは撮像表面の法線方向と入射波のなす角であり、局所的な表面の曲率を考えると、オフナディア角とは一致しない。しかし、航空機搭載型 SAR の場合、普通両者は同一とみなして差し支えない。

<sup>2</sup> 古典的な文献 [KER51] においても、同様の結果が示されている。

<sup>3</sup> [JAK80] では、散乱点の “birth-death-immigration” プロセスの解として、負の二項分布が与えられている。

<sup>4</sup>  $p(I|\langle I \rangle)$ ,  $p(\langle I \rangle)$  の双方にガンマ分布を用いるため、ガンマ-ガンマモデルと呼ばれることもある。

<sup>5</sup> パラメータの数を増やし、より複雑な分布で  $\langle I \rangle$  を仮定するモデルも提案されている [FRE97, ANA99]。

<sup>6</sup> [YUE90] には、負の二項分布モデルからの導出が示されている。

<sup>7</sup> ここでのテクスチャの定義は極めて狭義であり、例えば 4 章で述べたような多偏波なデータによるテクスチャ情報の多重化などの議論においては、より広義にスペックルを一部含むような揺らぎを指している場合が多い。とはいえ、式 (6.6) の積モデルを認めるならば、スペックルが完全に発達している状況において、理想的なテクスチャ保存型のスペックル低減手法が存在したとすると、厳密な意味でのテクスチャの情報はポーラリメトリにより多重化されない。

<sup>8</sup> PI-SAR という略称は、X バンドの波長が 3.14 cm であることにも因んでいる。

<sup>9</sup> 隣接した二つのアンテナから取得された SAR データを、位相差を利用して干渉させ、地形の標高を求める技術をいう。

<sup>10</sup> マツが植林されている。

<sup>11</sup> ガンマ関数の対数微分に相当する。 $-\psi(1)$  はオイラーの定数 (Euler's constant) と呼ばれる。

<sup>12</sup> 確率密度関数のフーリエ変換である。

<sup>13</sup> [WAT87, RAG91b] には、セル間の相関を扱った同様の議論が見受けられる。

<sup>14</sup> 逆に、散乱点の個数の大小をいう場合、森林のような分布ターゲットに対しては、散乱点という概念自体を再考する必要があると考えられる。

<sup>15</sup> [DEG97] は ENL をテクスチャ成分の指標とし、偏波シグネチャのアナロジーであるテクスチャシグネチャを提唱している。

<sup>16</sup> ここでのレイヤとは、必ずしも空間的な層状構造を意味するものではない。

<sup>17</sup> PI-SAR のポーラリメトリック較正は現在進行中である [SAT98, WAK99].

## References

- [ABRA64] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Eds., *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1964.
- [ANA99] V. Anastassopoulos, G. A. Lampropoulos, A. Drosopoulos, and M. Rey, "High resolution radar clutter statistics," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.35, pp.43-60, Jan. 1999.
- [BLA94] D. Blacknell, "Comparison of parameter estimators for K-distribution," *Proc. Inst. Elect. Eng., Radar, Sonar Navig.*, vol.141, no.1, pp.45-52, 1994.
- [BLA97] D. Blacknell and A. P. Blake, "Single point and spatial statistics of polarimetric SAR imagery," *Int. J. Remote Sensing*, vol.18, no.3, pp.629-649, 1997.
- [CRL98] CRL and NASDA, "CRL/NASDA 航空機搭載合成開口レーダ," pamphlet, Feb. 1998.
- [DAB95] J. S. Daba and M. R. Bell, "Statistics of the scattering cross-section of a small number of random scatterers," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.43, pp.773-783, Aug. 1995.
- [DEG97] G. de Grandi, J. S. Lee, and D. L. Schuler, "Texture and speckle statistics in polarimetric SAR synthesized images," in *Proc. 1997 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'97)*, Singapore, pp.1414-1417.
- [FRE97] A. C. Frery, H. -J. Müller, C. C. F. Yanasse, and S. J. S. Sant'Anna, "A model for extremely heterogeneous clutter," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.35, pp.648-659, May 1997.
- [ISK99] D. R. Iskander, A. M. Zoubir, and B. Boashash, "A method for estimating the parameters of the K distribution," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.47, pp.1147-1151, Apr. 1999.
- [JAH96] M. Jahangir, D. Blacknell, and R. G. White, "Accurate approximation to the optimum parameter estimate for K-distributed clutter," *Proc. Inst. Elect. Eng., Radar, Sonar Navig.*, vol.143, no.6, pp.383-390, 1996.
- [JAK76] E. Jakeman and P. N. Pusey, "A model for non-Rayleigh sea echo," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-24, pp.806-814, Nov. 1976.
- [JAK80] E. Jakeman, "On the statistics of K-distributed noise," *J. Phys. A: Math. Gen.*, vol.13, pp.31-48, 1980.
- [JAO84] J. K. Jao, "Amplitude distribution of composite terrain radar clutter and the K-distribution," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-32, pp.1049-1084, Oct. 1984.
- [JOU93] I. R. Joughin, D. B. Percival, and D. P. Winebrenner, "Maximum likelihood estimation of K distribution parameters for SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.31, pp.989-999, Sept. 1993.
- [JOU94] I. R. Joughin, D. P. Winebrenner, and D. B. Percival, "Probability density functions for multilook polarimetric signatures," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.32, pp.562-574, May 1994.
- [KER51] D. E. Kerr, Eds., *Propagation of Short Radio Waves*. MIT Radiation Laboratory Series (13), New York: McGraw-Hill, 1951.
- [LEE94c] J. S. Lee, D. L. Schuler, R. H. Lang, and K. J. Ranson, "K-distribution for multi-lock processed polarimetric SAR imagery," in *Proc. 1994 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'94)*, Pasadena, CA, pp.2179-2181.
- [LET92] T. Le Toan, A. Beaudoin, J. Riou, and D. Guyon, "Relating forest biomass to SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.30, pp.403-411, Mar. 1992.
- [LOM94] P. Lombardo and C. J. Oliver, "Estimation of texture parameters in K-distributed clutter," *Proc. Inst. Elect. Eng., Radar, Sonar Navig.*, vol.141, no.4, pp.196-204, 1994.



- [LOM95] P. Lombardo, C. J. Oliver, and R. J. A. Tough, "Effect of noise on order parameter estimation for K-distributed clutter," *Proc. Inst. Elect. Eng., Radar, Sonar Navig.*, vol.142, no.1, pp.33-40, 1995.
- [NOV89] L. M. Novak, M. B. Sechtin, and M. J. Cardullo, "Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.AES-25, pp.150-165, Mar. 1989.
- [OLI93] C. J. Oliver, "Optimum texture estimators for SAR clutter," *J. Phys. D*, vol.26, pp.1824-1835, 1993.
- [OLI98] C. J. Oliver and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [QUE95] S. Quegan and I. Rhodes, "Statistical models for polarimetric data: Consequences, testing and validity," *Int. J. Remote Sensing*, vol.16, no.7, pp.1183-1210, 1995.
- [RAG91a] R. S. Raghavan, "A method for estimating parameters of K-distributed clutter," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.27, pp.238-246, Mar. 1991.
- [RAG91b] \_\_\_\_\_, "A model for spatially correlated radar clutter," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.27, pp.268-275, Mar. 1991.
- [SAT98] M. Satake *et al.*, "Polarimetric calibration of X-band airborne synthetic aperture radar using corner reflectors and an active radar calibrator," in *Proc. 1998 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'98)*, Seattle, WA, pp.660-662.
- [SHE92] D. R. Sheen and L. P. Johnston, "Statistical and spatial properties of forest clutter measured with polarimetric synthetic aperture radar (SAR)," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.30, pp.578-588, May 1992.
- [TOU95] R. J. A. Tough, D. Blacknell, and S. Quegan, "A statistical description of polarimetric and interferometric synthetic aperture radar data," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol.449, pp.567-589, 1995.
- [ULA89] F. T. Ulaby and C. Elachi, *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [ULA90b] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt, and M. C. Dobson, "Michigan microwave canopy scattering model," *Int. J. Remote Sensing*, vol.11, no.7, pp.1223-1253, 1990.
- [WAK99] H. Wakabayashi, T. Kobayashi, M. Satake, and S. Uratsuka, "Airborne L-band SAR system: Characteristics and initial calibration results," in *Proc. 1999 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, pp.464-466.
- [WAN93] Y. Wang, J. Day, and G. Sun, "Santa Barbara microwave backscattering model for woodlands," *Int. J. Remote Sensing*, vol.14, no.8, pp.1477-1493, 1993.
- [WAT87] S. Watts and K. D. Ward, "Spatial correlation in K-distributed sea clutter," *Proc. Inst. Elect. Eng. F*, vol.134, no.6, pp.526-532, 1987.
- [WAR81] K. D. Ward, "Compound representation of high resolution sea clutter," *Electron. Lett.*, vol.17, no.16, pp.561-563, 1981.
- [YUE90] S. H. Yueh *et al.*, "K-distribution and polarimetric terrain radar clutter," in *Polarimetric Remote Sensing, PIER 3 (Progress in Electromagnetics Research)*, J. A. Kong, Eds., Amsterdam: Elsevier, 1990, ch.4, pp.237-275.

## Chapter 7

# K 分布に従う SAR 画像にみられる 線状構造



### 7. Line Features Observed in K-Distributed SAR Images

Speckle statistically brings series connections of dark pixels, which can be observed as dark line features in SAR images. The dark lines have no physical meaning. In this chapter, line patterns of that kind in K-distributed SAR images are studied. It is stochastically explained that the dark line patterns in 1-look K-distributed images can be observed more distinctly than those in exponential distributed images. It is further revealed that such patterns in K-distributed images may remain even if the images are multilooked. The experiments on simulated images as well as on actual SAR images confirm the explanation.

English publications relevant to this chapter: 1-e.

## 7.1 あらまし

画像処理のアルゴリズムは、画像理解の研究からのフィードバックをうけて、よりロバストなものへと発展する。前章では、一般的には指数分布に従う SAR の強度画像が、高分解能化により、K 分布、あるいはさらに不均質な分布へと変化することが分かったが、これにより、従来の SAR 画像の統計に則して開発されたアルゴリズム (ターゲット検知など) には、改変の必要性が生じる。その一つの例として、本章では、道路などの線状ターゲットの検出に影響を及ぼす、スペックルによる暗線模様の性質を、K 分布画像にまで拡げて論じている。

7.2 では、[HIRO97] に則し、スペックルがもたらす暗い線状のパターンについて、現在までに明らかになっていることをまとめる。これをうけ、7.3 で、強度が K 分布に従う SAR 画像における、それらの線状パターンの生起を、確率的に考察する。そこでは、K 分布による強い濃度の揺らぎが、暗い画素の連なりである線状パターンをより鮮明にすることなどを説明する。7.4 では、シミュレーション画像や実際の SAR 画像を用い、K 分布画像での線状パターンの発生の様子を検証する。

## 7.2 スペックルがもたらす暗い線状パターン

SAR 画像において線状の構造を検出することは、様々なアプリケーションにおいて重要である。例えば、[SUZ97] では、樹冠を透過するマイクロ波 (L バンド) の特性を利用し、熱帯雨林に覆われたユカタン半島のマヤ時代の道路 (サクベ) を抽出する試みがなされた<sup>1, 2</sup>。その他、いわゆる GIS (Geographic Information System) 的な応用として、都市の道路網を線状構造として検出する研究なども盛んに行われている [TUP98]。しかし、スペックルによる高周波な濃度の揺らぎのために、SAR 画像に対して、一般的な画像解析で用いられる線抽出手法を直接適用することは難しい。このため、スペックル画像に特化した線抽出の方法も種々検討されているが [HENR88, SAM90, CAV92, CZE98]、なお課題も多い。また、前処理としてのスペックル低減も、フィルタ処理が数画素足らずの微細な線構造を損なわせるという危惧を否めない。

スペックルが存在する画像における線抽出の困難さは、主に、線構造を構成する画素がスペックルに埋もれてしまうことにある。これとは別に、[HIRO97] は、スペックル自体の濃度の揺らぎが、筋状の模様を生成することを確率論的に示した。つまり、スペックルによって周囲の平均的な濃度よりも暗く揺らいだ画素の連なりが、筋状に見えるというものである。したがって、道路などを含まない、一様なターゲットを撮像した SAR 画像においても、スペックルがもたらす線状構造が観察される。もちろん、このような線構造に物理的な意味はなく、却って画像認識の妨げとなるばかりである。本章は、[HIRO97] における議論を K 分布に従う画像に拡張しようとするものである。よって、ここでは、[HIRO97] にならって“線状パターン”を定義し、そこでの結果をまとめる。

いま、画素の大きさは、SARの空間分解能セルに等しいものとする。図7-1(a)のように、画像中に正方領域をとり、その左縁から1ステップ(画素)ごとに、右上、右、右下のいずれかの方向に、領域の右縁まで連なりながら進む画素列を考える。ここでは、このようなパターンを“線状パターン”として定義する。この線状パターンは、各ステップで連結する方向の選択性(3方向)が与えられているため、直線だけでなく、曲線状の画素の繋がりも表現している。 $n \times n$ の領域あたりの線状パターンの総数は、次式で計算できる。

$$U(n) = 2n \cdot 3^{n-1} \quad (7.1)$$

上式では、図7-1(b)のような垂直方向の線状パターンも数えられている。また、(c)のように、ステップの途中で領域から脱するパターンをも含んでいる。さらにいえば、厳密には、(d)の対角線上に並ぶ2本のパターンは、それぞれ2回重複して数え上げられているが、表7-1に示すように、 $U(n)$ の値は十分大きいので、このことは無視して差し支えない。 $n$ が1増えると、 $U(n)$ はおよそ3倍になる。

後方散乱係数が一定の一様な領域において、ある一つのパターンを構成する $n$ 個の画素の全てが、スペckルの揺らぎにより、その領域の平均強度よりも十分小さい画素値を有しているとき、暗い線状パターンがみられることになる。[SUZ97]で扱われた森林に覆われた道路などは、SAR画像において暗い線特徴として検出されるため、このようなスペckルによる暗い線状パターンは、画像理解の場面では、極めて紛らわしい存在であるといえる。ここで、画素が暗いか否かの強度の閾値を $I_T$ とすると、 $n$ 個の画素がおしなべて暗くみえる確率は、

$$\Psi(I_T, n) = [P(I_T)]^n = \left[ \int_0^{I_T} p(I) dI \right]^n \quad (7.2)$$

となる。 $P(I)$ はSARの強度 $I$ の累積確率密度関数を示している。 $p(I)$ は確率密度関数である。すなわち、 $\Psi(I_T, n)$ は、一つの線状パターンが暗いパターンとして生起する確率とみなせる。

領域中の線状パターンの総数は式(7.1)で表せることから、以下の条件が満たされる場合、その領域において1本の暗い線状パターンが現れることが、確率的に期待できる。

$$U(n)\Psi(I_T, n) = 1 \quad (7.3)$$

(もちろん、この議論では、パターン部分以外の画素の強度は任意としているため、そのパターンが、必ずしも実際に視覚的に暗いものとして観察されるとは限らない。)

[HIRO97]では、式(7.2)中の $p(I)$ に、一般的なSARの強度分布である式(2.11)を代入したときの $\Psi$ について、式(7.3)を満たす閾値 $I_T$ を求めている。特に、1ルック(指数分布)、および4ルック(ガンマ分布)の場合が調べられている。その結果は、次のようにまとめられる。

- 1 ルックでは, 平均強度に対して, 閾値  $I_T$  は  $-5$  dB 程度である.
- 4 ルックでは, 平均強度に対して, 閾値  $I_T$  は  $-2$  dB 弱である.

実際に地表面を撮した SAR 画像のダイナミックレンジは,  $15$  dB 程度である. これを鑑みれば, 平均強度に対して  $-5$  dB の線状パターンは, 十分暗いものである. つまり, 1 ルックの SAR 画像には, 統計的にいって, スペックルに起因する 1 本の暗い線状パターンが必ず存在するといえる. 一方, 4 ルックにおける, 平均値の  $-2$  dB 程度の閾値で規定される線状パターンは, 周囲との濃度差が小さく, 目立った暗いパターンとしては識別され得ないと考えられる. このことは, 一般的なマルチルック画像においては, スペックルによる線状パターンはほぼみられなくなると換言でき, 我々の SAR 画像についての経験的な認識と合致する. なお, ここでは,  $n = 5 \sim 10$  のときの閾値  $I_T$  がそれぞれ求められているが,  $I_T$  は領域の大きさにはほとんど依存しないことが明らかになっている.

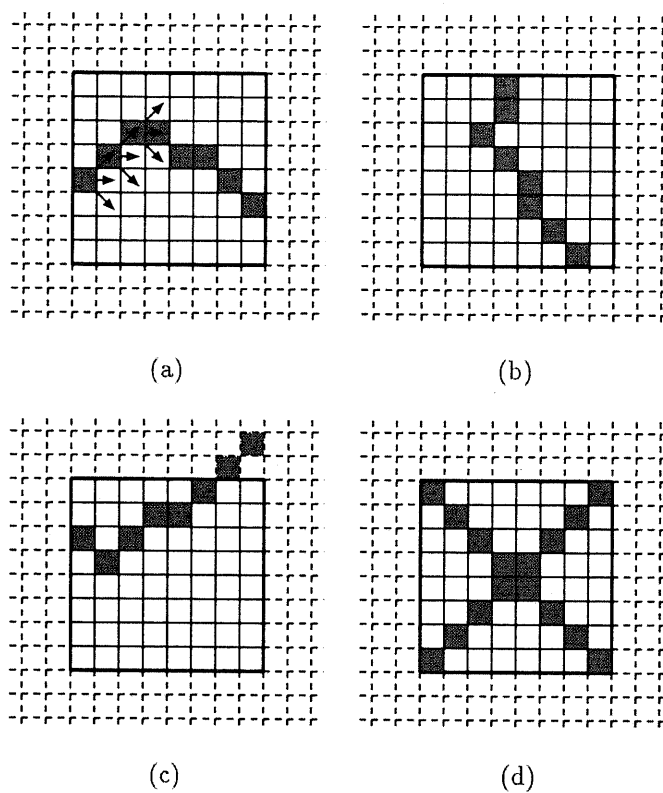


図 7-1. 線状パターン. (a) 水平方向のパターン, (b) 垂直方向のパターン, (c) 正方領域から脱するパターン, (d) 対角線上のパターン (2 本).

**Fig. 7-1.** Schematic representation of line patterns: (a) a pattern in the horizontal direction, (b) a pattern in the vertical direction, (c) a pattern going out of the square area, and (d) the diagonal patterns of the square area.

表 7-1. 線状パターンの数 ( $n \times n$  の領域あたり).Table 7-1. Number of possible line patterns per  $n \times n$  square area.

$n$	$U(n)$
5	810
6	2916
7	10206
8	34992
9	118098
10	393660
⋮	
15	143489070
⋮	
20	46490458680

### 7.3 K 分布に従う画像における線状パターンの生起

6章でみたように、現在実現/計画されている程度の高分解能 SAR システムにより、森林域などを撮像した際の強度画像の統計は、指数分布 (マルチルック画像ではガンマ分布) から逸脱し、K 分布によく適合する。これをうけて、以下、前節における議論を、K 分布に従う画像に関して拡張する。

具体的には、式 (7.2) 中の  $p(I)$  に、強度画像についての K 分布 (式 (6.3)) を代入した  $\Psi$  を考える。このとき、式 (7.3) に示した、領域内に 1 本の暗い線状パターンが現れる条件は、

$$U(n)\Psi(I_T, n) = 2n \cdot 3^{n-1} \left[ \int_0^{I_T} \frac{2}{\Gamma(\nu)\Gamma(L)} \left( \frac{LvI}{\langle I \rangle} \right)^{\frac{L+\nu}{2}} K_{L-\nu} \left( 2\sqrt{\frac{LvI}{\langle I \rangle}} \right) dI \right]^n = 1 \quad (7.4)$$

となり、これを満たす閾値  $I_T$  を数値的に求める。図 7-2 は、範囲が  $\{0, 20\}$  のオーダパラメータに対して、 $I_T$  の値をプロットした結果である。破線は式 (7.4) で  $L=1$  とした 1 ルックの場合の  $I_T$ 、鎖線は 3 ルックの場合の  $I_T$  を表す。正方領域の大きさは、 $n=20$  としている。なお、ここでは、平均強度を 1 として  $I_T$  を求値したが、実際には平均に対するデシベルの形で  $I_T$  を提示するため、平均強度の与え方は任意である。また、図 7-2 には、[HIRO97] と同様に、一般的な SAR の強度分布、すなわち 1 ルックの指数分布、あるいは 3 ルックのガンマ分布に対応する閾値 (それぞれ  $-4.60$  dB,  $-2.01$  dB) を参考として付している。

図 7-2 から、 $p(I)$  を K 分布とすると、指数分布やガンマ分布と比較して、線状パターンの強度の閾値が小さくなることがみてとれる。とりわけ、オーダパラメータが 5 より小さいときには、その違いは顕著である。例えば、 $\nu=1$  の 1 ルックの K 分布での  $I_T$  の値は  $-8.36$  dB となるが、平均強度と閾値との差がこのように大きい線状パターンは、視覚的に容易に周囲から見分けられる。もちろん、オーダパラメータが大きくなると、K 分布における  $I_T$  と、指数分布やガンマ分布におけるそれとの差異は収束していく。これは、オーダパラメータが大きい K 分布そのものが、指数分布、もしくはガンマ分布に帰着するためである (6.3 参照)。

前節で述べたように、[HIRO97] が示した重要な結果の一つは、マルチルック処理が施された画像では、スペックルによる線状パターンが観察されにくくなる、ということであった。しかしながら、このことは、K 分布画像に関しては必ずしもあてはまらない。図 7-2 は、3 ルックの K 分布において、そのオーダパラメータが 1.5 程度以下のとき、 $I_T$  の値は 1 ルックの指数分布の場合と同等、あるいはそれより小さくなることを示唆している。つまり、K 分布に従うような高分解能 SAR 画像を用いる際には、たとえマルチルック処理がされていたとしても、件の線状パターンが残存している可能性があることに留意すべきである。

K 分布は、テクスチャを考慮することにより導出される。テクスチャによる画像濃度の揺らぎは、撮像される表面の特性に基づくものであるため、K 分布画像に存在する上述の線状パ



ターンは、スペックルのみに基づくものと比べ、その解釈が難しい。しかし、積モデルの文脈でいえば、K分布はテクスチャについて、ガンマ分布という1次統計的な性質を付与しているにすぎない(式(6.5))。したがって、K分布画像の揺らぎが生成する線状パターンに対しても、何らかの物理的な意味を見出すことはできない。

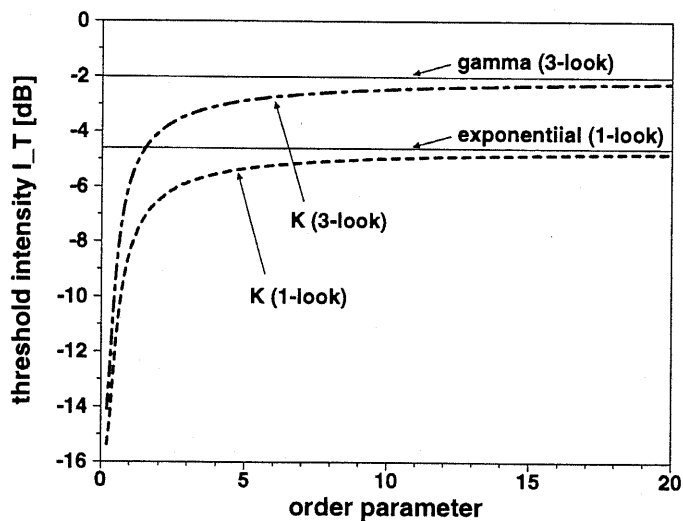


図 7-2. K 分布画像に生起することが期待される線状パターンの強度の閾値 ( $n = 20$ ). 閾値は平均強度に対するデシベル表示としている。

Fig. 7-2. Threshold intensity at which the appearance of one dark line pattern is expected in K-distributed images. The size of the area is  $20 \times 20$  pixels. The threshold is represented in decibel against the mean.

## 7.4 線状パターンの検出実験の結果

SAR 画像の濃度の揺らぎがもたらす意味のない暗い線状パターンは、指数分布やガンマ分布に従う一般的なスペckル画像に比べ、K 分布画像において、より明瞭な形で生じ得ることを、前節で確率論的に示した。本節では、これを検証するために、シミュレーション画像や実際の SAR 画像を用いて行った、線状パターンの検出実験の結果を記す。

まず、強度が K 分布に従う模擬的な SAR 画像を生成し、そこに暗い線状パターンがみられるか否かを調べた。ここでは、一様な表面を模擬し、画像中に実質的な線構造を供していないため、検出される線状パターンは全て、暗く揺らいだ画素の連なりによるものとなる。K 分布画像は、積モデルに基づいて作成した。すなわち、各画素値は、テクスチャを表すガンマ乱数と、スペckルを表す指数乱数(マルチルック画像ではガンマ乱数)の積として与えている。

生成された画像 ( $n \times n$  画素) 内の暗い線状パターンは、水平方向については、以下の手順で検出する。

- I. 各画素を、閾値  $I_T$  を用い、“DARK” または “NON-DARK” に分類する。
- II. ある DARK 画素の左上、左、左下の隣接画素が全て NON-DARK である場合、その DARK 画素を NON-DARK に再分類する。右方向についても同様とする。
- III. DARK 画素の再分類が収束するまで、II. を繰り返す。

上を経た後、 $n$  個以上の DARK 画素が残っていれば、画像中には、少なくとも 1 本の水平方向の暗い線状パターンが存在しているといえる。水平方向の線状パターンを検出し得ない際には、垂直方向のパターンを同様の手順で探索する。図 7-3 に、模擬 K 分布画像において検出された暗い線状パターンの例を示す。画像サイズは  $20 \times 20$  画素、K 分布のオーダーパラメータは 1 としている。この線状パターンは、閾値を平均強度の  $-6$  dB として検出したものである。

図 7-4 は、 $\nu = 1, 2, 3, 5, 10, 20$  として、それぞれ 1000 枚生成した 1 ルックの K 分布画像 ( $20 \times 20$  画素) の中で、暗い線状パターンが検出された画像の割合を、検出に使用した閾値  $I_T$  に対して表したものである。また、指数分布に従う通常のスペckル画像における結果も併示している。図では、オーダーパラメータの値が小さくなるほど、高い割合で線状パターンが検出されており、前節の考察と一致している。例えば、 $I_T = -5$  dB での検出割合は、 $\nu = 1$ 、あるいは 2 のとき、90% を超えている。一方、この閾値を用いた、指数分布画像に対する検出の割合は 66.3% と十分高いものであり、[HIRO97] を裏付けている。しかし、 $I_T = -10$  dB となると、指数分布画像はその約 10% でしか線状パターンがみられなくなるが、 $\nu = 1$  の K 分布の場合、未だ約半数の画像で線状パターンが識別されている。

図 7-5 は 3 ルックの画像についての結果である。再び、 $I_T = -5$  dB での割合に目を移すと、ガンマ分布に従う画像においては、線状パターンはほとんど検出されていないことが分かる (4.8%)。これは、[HIRO97] で示されたように、マルチルック処理がスペckルによる暗い

線状パターンを目立たなくする効果を有することを考えれば、妥当であるといえる。とはいえ、 $\nu = 1$  の K 分布画像における検出割合は 90% 弱を維持しており、K 分布に従う画像にあっては、たとえマルチルックが施されていても、線状パターンは残存し得るとした前節の言を確証している。

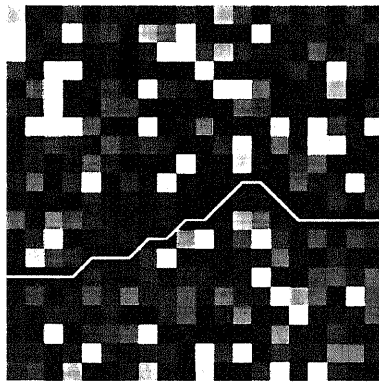


図 7-3. 模擬 K 分布画像において検出された暗い線状パターン。

Fig. 7-3. Detected dark line pattern in a simulated K-distributed image.

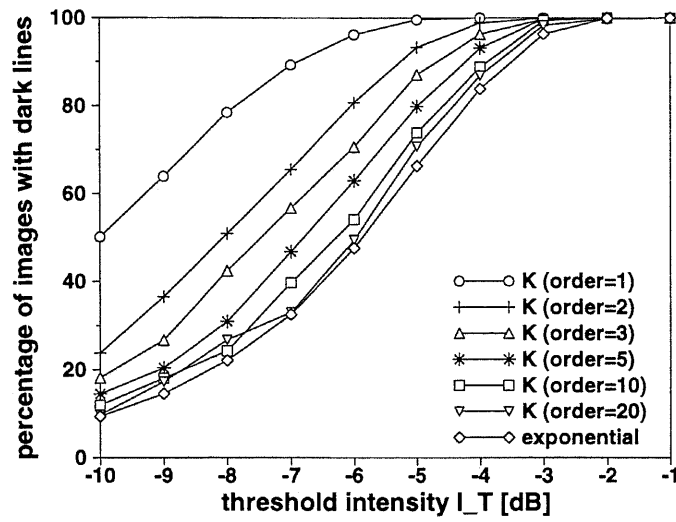


図 7-4. 暗い線状パターンが検出された模擬 K 分布画像の割合 (1 ルック).

Fig. 7-4. Percentage of the simulated images in which the dark line patterns are detected. The percentage as a function of the threshold intensity is given for the 1-look K-distributions with several order parameters and the exponential distribution.

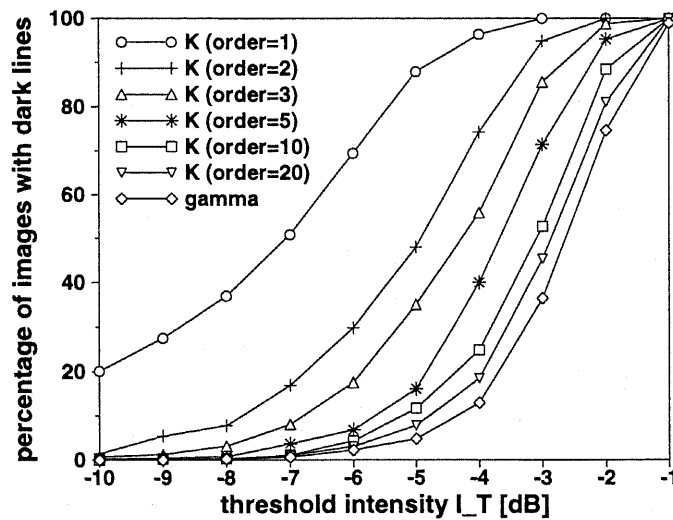


図 7-5. 暗い線状パターンが検出された模擬 K 分布画像の割合 (3 ルック).

Fig. 7-5. Same as Fig. 7-4 but for the case of 3-look.

6.4で解析したPI-SAR画像は、森林域(防砂林)において、K分布によく適合するものであったが、ここでは、模擬画像に対してと同様の線状パターンの検出実験を、同領域において行った。使用するPI-SAR画像は、Xバンド、HH偏波のものである。また、マルチルックの効果をみるため、アジマス方向に3ルックの処理を施した画像をも対象とする。さらに、一般的なスペckル画像の例として、4ルックのAIRSAR画像(Flevolandサイトの森林領域)も併せて用いる。これらの領域はともに、ほぼ一樣な森林を撮しており、道路などの線状ターゲットは含まないものとする。

図7-6~7-8に、1ルックのPI-SAR画像、3ルックのPI-SAR画像、およびAIRSAR画像の正規化強度のヒストグラムをそれぞれ示す。図7-6、7-7から、同領域のPI-SAR画像の統計が、通常の指数分布やガンマ分布から逸脱し、K分布に符合している様子が伺える。式(6.16)により推定されたオーダパラメータの値は、2.63となっている。一方、4ルックのAIRSAR画像が、実際には3ルックに近い性質を帯びていることは、既に2.2で述べたが、図7-8では、確かに、ヒストグラムが4ルックのガンマ分布よりも、3ルックのそれに近いものであることが見受けられる。いずれにせよ、このAIRSAR画像(領域)がガンマ分布で十分記述され得ることを理解できるが、これにより、3ルックのPI-SAR画像と直接比較することも可能であると考えられる。

本実験に用いた領域の大きさは、1ルックのPI-SAR画像では $300 \times 80$ 画素、3ルックのPI-SAR画像、ならびにAIRSAR画像では $100 \times 80$ 画素としている。前述の模擬画像による実験と対応させるため、各々の領域を $20 \times 20$ 画素のパッチに分割し、パッチごとに暗い線状パターンを探索する。線状パターンは、ここでも、p.127中のI.~III.の手順で検出される。

図7-9は、各画像において、線状パターンが検出されたパッチの割合を示すものである。この図から、実画像に対する結果についても、模擬画像による検証(図7-4、7-5)と類似の傾向が認められる。1ルックのPI-SAR画像、3ルックのPI-SAR画像、AIRSAR画像の $I_T = -5$  dBでの検出確率は、それぞれ95.0%、80.0%、5.0%である。つまり、AIRSAR画像内のスペckルによる暗い線状パターンは、マルチルック処理によりおよそ消失するが、K分布に従うPI-SAR画像においては、1ルックはもちろん、3ルックの場合でさえなお、多くの線状パターンが観測され続けている。よって、K分布による甚だしい濃度の揺らぎは、スペckル画像にみられる画素の連なりをより鮮明にし、そのような線状パターンの影響は、マルチルックを以てしても容易に回避できないことが、実際のSAR画像を通して確かめられた。

図7-9に関して付け加えれば、PI-SAR画像の線状パターンの検出割合は、図7-4、7-5における同程度のオーダパラメータでの結果に比べ、やや高い値を呈している。このことを説明するためには、実画像中の画素間の相関、すなわち2次統計まで含めたK分布[OLI85, OLI86]を扱う必要があると考えられる。

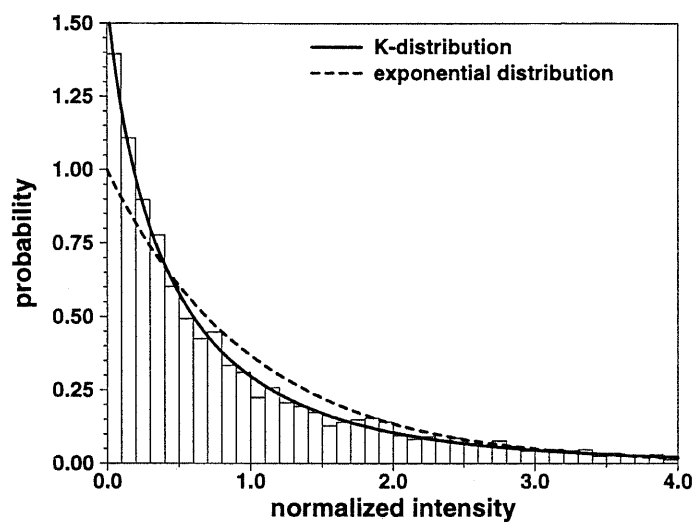


図 7-6. 線状パターンの検出実験に用いた 1 ルックの PI-SAR 画像のヒストグラム。強度は平均値で正規化されている。実線は対応する K 分布，破線は指数分布を表す。

Fig. 7-6. Histogram of the normalized intensity for the used 1-look PI-SAR image. The corresponding K-distribution and the exponential distribution are also shown.

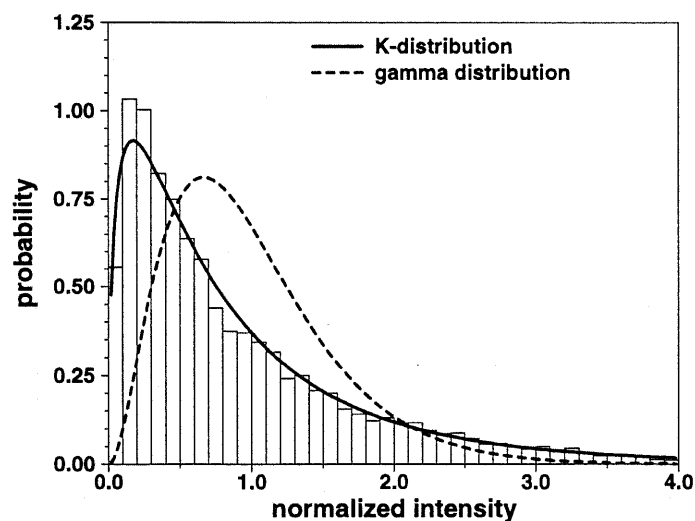


図 7-7. 線状パターンの検出実験に用いた 3 ルックの PI-SAR 画像のヒストグラム。強度は平均値で正規化されている。実線は対応する K 分布，破線はガンマ分布を表す。

Fig. 7-7. Histogram of the normalized intensity for the used 3-look PI-SAR image. The corresponding K-distribution and the gamma distribution are also shown.

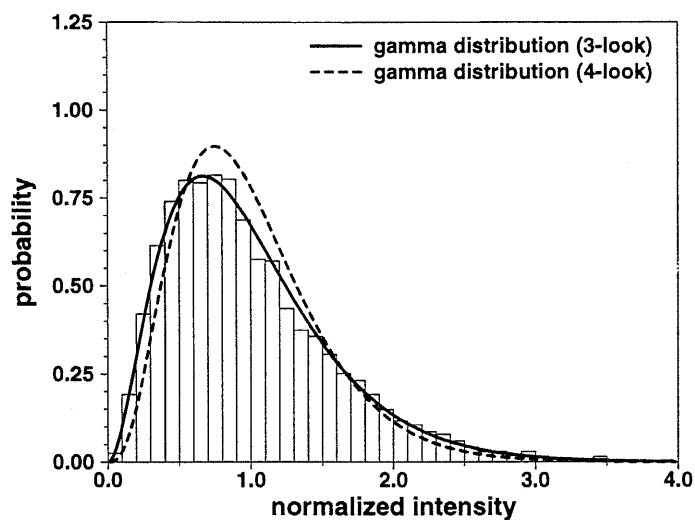


図 7-8. 線状パターンの検出実験に用いた AIRSAR 画像のヒストグラム。強度は平均値で正規化されている。実線は 3 ルック、破線は 4 ルックのガンマ分布を表す。

Fig. 7-8. Histogram of the normalized intensity for the used AIRSAR image. The 3-look and 4-look gamma distributions are also shown.

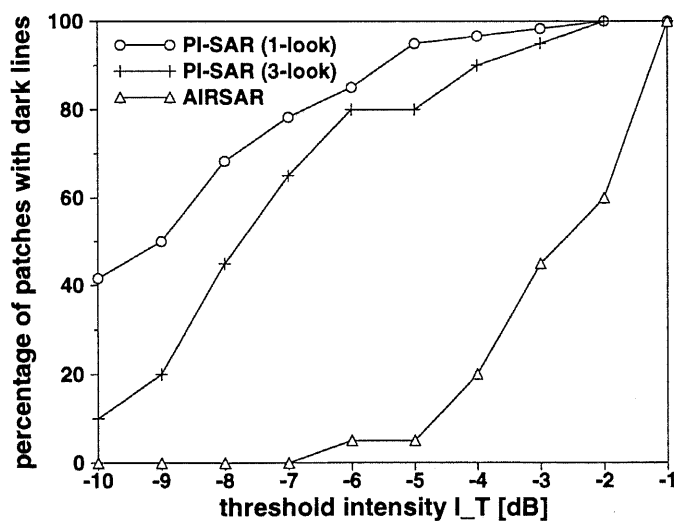


図 7-9. 暗い線状パターンが検出された SAR 画像中の正方パッチの割合。

Fig. 7-9. Percentage of the patches of the actual SAR images in which the dark line patterns are detected. The percentage as a function of the threshold intensity is given for the 1-look PI-SAR, the 3-look PI-SAR, and the AIRSAR images.

## 7.5 まとめ

スペックルによる濃度の揺らぎは、暗い画素の連なりを確率的に発生させ、これにより、SAR 画像においては、意味のない線状のパターンが観察される。本章では、強度が K 分布に従う SAR 画像における、そのような線状パターンを取り上げた。また、その生起を統計的に考察した。その結果、K 分布画像の強度の揺らぎによりもたらされる暗い線状パターンは、通常のスペックル画像のそれと比較し、より鮮明な形で存在し、マルチルック処理が行われた場合でも、周囲と識別され得るだけの十分な閾値を有することが明らかになった。このことは、シミュレーション画像や実際の SAR 画像を用いた実験によって検証した。

最後に、ここでの議論は、SAR 画像のみならず、例えば一部の医用画像 [CZE99] のように、K 分布に従うスペックル画像一般に適用できることを付言しておく。

## Notes

<sup>1</sup> [SUZ97] では JERS-1 画像が用いられているが、このように人工衛星に搭載されたセンサにより古代遺跡を調査することを、“宇宙考古学”などという。

<sup>2</sup> 熱帯雨林の場合、光学センサによる画像では単調な樹海として映るのみで、その下の道路などを検出することは困難である。



## References

- [CAV92] R. G. Caves, P. J. Harley, and S. Quegan, "Matching map features to synthetic aperture radar (SAR) images using template matching," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.30, pp.680-685, July 1992.
- [CZE98] R. N. Czerwinski, D. L. Jones, and W. D. O'Brien, Jr., "Line and boundary detection in speckle images," *IEEE Trans. Image Processing*, vol.7, pp.1700-1714, Dec. 1998.
- [CZE99] \_\_\_\_\_, "Detection of lines and boundaries in speckle images —Application to medical ultrasound," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol.18, pp.126-136, Feb. 1999.
- [HENR88] A. Hendry, J. Skingley, and A. J. Rye, "Automated linear feature detection and its application to curve location in synthetic aperture radar imagery," in *Proc. 1988 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'88)*, Edinburgh, U.K., pp.1521-1524.
- [HIRO97] H. Hirose, "A probabilistic explanation of dark line features observed in images with speckle," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.35, pp.791-792, May 1997.
- [OLI85] C. J. Oliver, "Correlated K-distributed clutter models," *Optica Acta*, vol.32, no.12, pp.1515-1547, 1985.
- [OLI86] \_\_\_\_\_, "The interpretation and simulation of clutter textures in coherent images," *Inverse Problems*, vol.2, no.4, pp.481-518, 1986.
- [SAM90] R. Samadani and J. F. Vesecky, "Finding curvilinear features in speckled images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.28, pp.669-673, July 1990.
- [SUZ97] 鈴木健夫, 廣澤春任, "森林地帯を撮した SAR 画像に見られる暗い線状構造に関する一検討 —ユカタン半島北部の L バンド SAR 画像を対象として—," *写真測量とリモートセンシング*, vol.36, no.6, pp.54-62, 1997.
- [TUP98] F. Tupin, H. Maître, J.-F. Mangin, J.-M. Nicolas, and E. Pechersky, "Detection of linear features in SAR images: Application to road network extraction," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.36, pp.434-453, Mar. 1998.

# Chapter 8

## 結論



### 8. Conclusions

In this chapter, the achievements obtained in Chapter 3 to 7 are summarized, and the final conclusions are drawn.

本論文では、スペックルやテクスチャによる、SAR 画像にみられる空間的な濃度の揺らぎに関する研究について述べた。スペックルとテクスチャは互いに重畳した形で画像上に存在し、結果として観察される濃度の揺らぎは、雑音と情報の両方の側面を併せもつことに留意し、その性質、および処理、活用の方法を論じた。以下に、各章における主たる成果を列挙する。

第 3 章では、SAR 画像のスペックルを低減するための、ウェーブレット分解を用いたフィルタ (WSF) を新たに提案した。これは、スペックルによる高周波な揺らぎが、ウェーブレット分解で得られる差分画像の振幅 (ウェーブレット係数) を圧縮することにより抑えられる、というアイデアに基づいており、その際、エッジなどの画像構造を保存するために、選択的な処理アルゴリズムを構築し、視覚的に自然な処理画像を出力することを目指した。WSF は、シミュレーション、ならびに数種の実画像への適用において、良好な性能を示すことができた。また一方、フィルタパラメータと平滑効果の関係の定量的な考察を行った。このことは、homomorphic フィルタリングとの関わりについてや、ケンナウ行列で与えられた多偏波データへの適用性など、WSF に関する発展的な研究へと繋がった。さらに、WSF のパラメータを適当に設定することで、処理前後におけるテクスチャの CoV を保存できることを示し、テクスチャ保存型のスペックル低減に対する先鞭をつけた。

第 4 章では、テクスチャによる揺らぎを情報として積極的に使い、撮像表面の状況を把握する試みとして、ウェーブレット分解により帯域分割された各空間周波数での差分画像のエネルギーで特徴ベクトルを構成し、土地被覆を自動分類する手法を案出した。ここでは、テクスチャ特徴に平行移動不変性を与えるための過剰系ウェーブレット分解や、多偏波データからの適応的な偏波合成など、分類精度を高めるための新たな知見を提示した。また、使用する特徴量の数を、分類への寄与率の観点から絞りこむ方法についても検討した。結果、農耕地帯を撮した多周波/多偏波な画像を、非常に高い精度で分類することに成功した。分類の効果は、カラーマップや判別効率表により、視覚的/定量的に確認した。

第 5 章では、SAR 画像中のテクスチャの揺らぎを捉える特徴量として、フラクタル次元に注目し、その推定式を導出した。具体的には、2 次元非整数ブラウン運動 (fBm) モデルを介し、フラクタル次元に対応するハースト指数を、ウェーブレット分解の解像度と差分画像内のデータの分散の関係から推定できることを数学的に示した。また、この推定法により、SAR 画像のフラクタル (自己相似) 性を実証するとともに、そのフラクタル次元の観測周波数や偏波への依存性を明らかにした。

第 6 章では、現在から将来にかけての SAR システムの分解能の向上を鑑み、高分解能な SAR 画像における濃度の揺らぎを考察した。これまでの研究で、分解能が波長の数倍程度であるシステムが供する SAR 画像では、テクスチャの影響が増大する、もしくは分解能セル内の

散乱点の個数の減少するなど、その濃度の揺らぎの性質が従来の統計から変化することが予想されていたが、ここでは実際に、PI-SARによる多周波/多偏波な1ルックデータを用い、高分解能画像の統計的性質の解析を行った。詳細としては、スペckルとテクスチャを乗法的に扱う積モデル、およびそこから導かれるK分布の妥当性に焦点をあて、森林や市街地の領域について、データとの適合を精査した。その結果、解析したPI-SARデータ(強度)は、森林域でK分布によく適合するのに対し、市街地の領域ではターゲットの極度な不均質性のため、通常の数値分布はおろか、K分布からさえも逸脱することが認められた。また、K分布に適合する森林域においても、そのオーダーパラメータは、従来の分解能のSAR画像と比較して小さな値となり、高分解能化が確かにテクスチャの効果を高めていることが解明できた。さらに、森林域のオーダーパラメータは、Xバンドでは各偏波についてはほぼ一様な値を示す一方で、Lバンドでは偏波ごとにばらつきを呈した。このことは、単純な積モデルによる解釈が困難であり、異なる散乱機構を有する複数の散乱レイヤを取り扱う新たなモデルを提案した。提案したモデルは、森林の散乱機構からみても、X、L両バンドにおけるオーダーパラメータのふるまいを、矛盾なく説明できた。

第7章では、第6章の内容をうけ、道路などの線状ターゲットの検出の妨げとなる、スペckルによる暗線模様の性質を、高分解能化の弊害の一例として、K分布画像にまで拡げて議論した。SAR画像の空間的な濃度の揺らぎは、暗い画素の連なりを確率的に発生させ、画像上に物理的に意味のない線状のパターンをもたすが、K分布に従う画像においては、そのような線状パターンが、一般的なスペckル画像と比べ、より鮮明な形で生起することを明らかにした。さらに、K分布画像におけるそれらのパターンは、マルチルック処理が施された場合でも、周囲と識別され得るだけの十分な閾値を有することを示し、その影響が容易には回避できないことについて注意を促した。

□

本研究は、SAR画像に特化したもののみならず、画像のフラクタル次元の推定法など、一般の画像解析に寄与する成果をも含んでいる。また、その内容は、非常に実用性の高いものから、次世代のSARを見据えた基礎的な性格の強いものにわたる。

来る21世紀の初頭には、国内外で様々なSAR搭載衛星の打ち上げが計画されている。比較的安価な航空機SARは、環境や災害のモニタリングなどにおいて、常識的な技術となるであろう。それらが取得するデータを、システムの専門家以外のユーザが、実アプリケーションのために利用する機会が飛躍的に増すと考えられる中で、本論文がその一助となれば幸いである。今後のSARリモートセンシングの一層の発展を期し、本論を結ぶ。

## List of Publications

### (1) 投稿論文

- 1-a. 福田盛介, 廣澤春任, “ウェーブレットを用いた合成開口レーダ画像のスペckル低減,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J79-A, no.12, pp.1994–2001, Mar. 1996.  
[英訳版]  
S. Fukuda and H. Hirosawa, “Wavelet-based speckle reduction in synthetic aperture radar images,” *Electronics and Communications in Japan: Part 3*, vol.80, no.9, pp.29–36, Sept. 1997.
- 1-b. S. Fukuda and H. Hirosawa, “Suppression of speckle in synthetic aperture radar images using wavelet,” *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, no.3, pp.507–519, Feb. 1998.
- 1-c. S. Fukuda and H. Hirosawa, “Smoothing effect of wavelet-based speckle filtering: The Haar basis case,” *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol.37, no.2, pp.1168–1173, Mar. 1999.
- 1-d. S. Fukuda and H. Hirosawa, “A wavelet-based texture feature set applied to classification of multifrequency polarimetric SAR images,” *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol.37, no.5, pp.2282–2286, Sept. 1999.
- 1-e. S. Fukuda, M. Baba, and H. Hirosawa, “Dark line features observed in K-distributed synthetic aperture radar images,” submitted to *IEICE Trans. Communications*.

### (2) 国際会議

- 2-a. S. Fukuda and H. Hirosawa, “Multiresolution analysis and processing of synthetic aperture radar images using wavelets,” in *Proc. 1997 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'97)*, Singapore, pp.1187–1189, Aug. 1997.
- 2-b. S. Fukuda and H. Hirosawa, “Land cover classification from multifrequency polarimetric synthetic aperture radar data using wavelet-based textural information,” in *Proc. 1998 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98)*, Seattle, WA, pp.357–359, July 1998.
- 2-c. S. Fukuda and H. Hirosawa, “A speckle-reduced SAR image by wavelet-based method and its first-order statistics,” in *Proc. 1998 Int. Symp. Noise Reduction for Imaging and Communication Systems (ISNIC-98)*, Tokyo, Japan, pp.277–282, Nov. 1998.
- 2-d. S. Fukuda, K. Suwa, and H. Hirosawa, “Texture and statistical distribution in high resolution polarimetric SAR images,” in *Proc. 1999 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, pp.1268–1270, June–July 1999.

## (3) 研究会等

- 3-a. 福田盛介, 廣澤春任, “ウェーブレットによる多重パラメータ SAR 画像のフラクタル次元推定の試み,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE96-95, Feb. 1997.
- 3-b. 福田盛介, 廣澤春任, “ウェーブレットによるテクスチャ情報の抽出と多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類手法について,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE98-3, Apr. 1998.
- 3-c. 諏訪啓, 福田盛介, 廣澤春任, “ポーラリメトリックな高解像度合成開口レーダ画像の統計的性質,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE99-15, May 1999.
- 3-d. 福田盛介, “合成開口レーダリモートセンシングへのウェーブレットの応用 —スペックル雑音を低減する手法—,” 可視化情報学会 第 27 回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp.95-98, July 1999.

## (4) 大会

- 4-a. 福田盛介, 廣澤春任, “ウェーブレットによる SAR 画像のスペックル低減,” 電子情報通信学会 1996 年ソサイエティ大会講演論文集, B-209, Sept. 1996.
- 4-b. 福田盛介, 廣澤春任, “多重解像度解析に基づく合成開口レーダ画像のフラクタル次元推定の検討,” 電子情報通信学会 1997 年総合大会講演論文集, B-2-31, Mar. 1997.
- 4-c. 福田盛介, 阿部義徳, 山本武文, 廣澤春任, “ウェーブレット特徴量を用いた多周波ポーラリメトリックな SAR 画像の分類,” 電子情報通信学会 1998 年総合大会講演論文集, B-2-28, Mar. 1998.
- 4-d. 福田盛介, 廣澤春任, “ウェーブレットによる SAR 画像のスペックル低減のための homomorphic フィルタリングに関する考察,” 電子情報通信学会 1998 年ソサイエティ大会講演論文集, SB-2-3, Sept. 1998.

## (5) その他

- 5-a. 研究代表者: 廣澤春任, 研究担当: 福田盛介, 鈴木健夫, 諏訪啓, “ウェーブレットによる推定フラクタル次元を用いた合成開口レーダ画像の解析,” 平成 9~10 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 研究成果報告書, Apr. 1999.

## Acknowledgement

本研究を進めるにあたり、常に熱心な御指導を賜りました廣澤春任教授に深く感謝致します。

本論文に収められた研究の一部は、廣澤研究室に在籍した学生と共同で行われた。具体的には、諏訪啓君(平成10年度東大修士卒, 現在三菱電機(株)), 井澤正文君(平成8年度武蔵工大卒), 阿部義徳君, 山本武文君(ともに平成9年度武蔵工大卒), 馬場基君(武蔵工大在学中)らに御協力頂いた。皆様に感謝致します。その他, 廣澤研究室のスタッフ, 学生, 同室の宇宙科学研究所平林研究室の方々に御礼申し上げます。

PI-SARのデータは, 郵政省通信総合研究所との共同研究に基づき提供を受けた。同所, ならびに宇宙開発事業団に謝意を表す。特に, 共同研究の窓口となって頂いた同所地球環境計測部データ応用技術研究室の佐竹誠氏, および小林達治氏に感謝致します。

AIRSARデータは, 三菱電機(株)鎌倉製作所の原芳久氏から御提供頂いた。同氏に重ねて御礼を申し上げます。

本研究の一部は, 文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(2)08650523, 09650501, 特別研究員奨励費11-09306により行われた。また, 特別研究員として援助を受けた日本学術振興会に謝意を表す。

本研究は, 文部省宇宙科学研究所において遂行された。快適な研究施設を提供頂いた同所, および諸先生方, 皆様に御礼を申し上げます。

最後に, 私個人を支えてくれた友人, そして両親に感謝します。ありがとうございました。

1999年12月

福田 盛介

*Seisuke Fukuda*

福田 盛介