

2002年度 修士論文

合成開口レーダのスライド・ルック処理を利用した  
海洋画像のノイズ低減と応用

Noise Reduction and Application of Ocean Images  
Using Synthetic Aperture Radar Slide-Look Processing

2003年2月21日提出

指導教員 大内和夫 教授

高知工科大学大学院  
工学研究科基盤工学専攻 博士前期課程  
物質・環境システムコース

1055147 玉木慎祐

# 要約

合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は世界最先端技術を持った高分解能画像レーダで、天候に左右されず、さらには昼夜の別なく観測することができる。合成開口レーダのアジマス (プラットフォーム進行) 方向の高分解能は、小さなアンテナを使い大きな開口を合成することによって達成される。開口を合成するには 0.5~2 秒の時間を必要とするため、受信信号には強度情報のみではなく、合成時間内の海面波や船舶の動きに関する情報も含まれる。そのような動きのある対象物の情報を高精度で定量的に抽出するには、シングル・ルック処理された画像では時系列のデータでないために、情報の抽出が困難になってしまう。一方、合成時間を分割して画像生成処理をするスプリット・ルック処理、及び、合成時間を重複させたスライド・ルック処理は、分解能が劣化するものの時系列的な画像となり、ルック画像間の相関関係を利用することで対象物の抽出が可能である。

本研究は、スライド・ルック処理された複数の画像から相互相関関数を算出して、スプリット・ルック処理による船舶検出の結果と比較し、ノイズに埋もれた船舶画像の高精度な抽出を行うアルゴリズムを開発を目的とする。異なる時刻で生成された船舶画像は、ルック間で相関しているが、海面画像は相関していない。従来のスプリット・ルック処理を用いた手法は、各ルックの海面画像に相関は無いものの、開口の合成時間を重複させることなく分割しているため、得られるルック数に限界がある。ところが、海面の相関時間 (形状の保持時間: コヒーレンスタイム) は開口を合成する時間と比べて短いため、合成時間を一部重複して分割しルック数を増加させるスライド・ルック処理によってノイズを軽減する理論が提唱されていた。この提唱は理論のみに止まり、現在に至るまで実験的に証明されていない。

本研究では、スプリット・ルック処理とスライド・ルック処理によるノイズ軽減の結果を比較検証し、海洋のノイズ信号に埋もれた船舶画像の抽出に最適な処理法を確認した。まず、シミュレーションの強度画像より相互相関画像を算出し、ターゲット検出精度の比較を行った。さらに、複素画像に含まれる位相情報の相関性を加えることで、強度画像を使った手法と比べてより高精度な船舶抽出の可能性が提唱されており、本研究ではシミュレーションによってその理論を検証した。次に、Radarsat 衛星搭載 SAR によって観測された熊野灘のデータから、時間差のあるスライド・ルック画像を生成し、加法平均をとった平均相互相関画像を作成してターゲット抽出精度の確認を行った。

結果としてスライド・ルック処理を使った手法は、スプリット・ルック処理の手法と比べて、船舶画像の相関値は上昇するものの、ノイズの相関値も上昇することが判明した。その理由は、海面画像の相関値が理論値よりも高いため、このような海面には相関時間の長い砕波などが存在し、その影響が表れていると考えられる。従って、スプリット・ルック処理とスライド・ルック処理を利用した船舶の検出アルゴリズムは、海面の状態によって使い分けることが必要である。

今後の展開としては、2004 年打ち上げ予定の地球観測衛星 ALOS 搭載の合成開口レーダへ本手法を応用することと、スライド・ルック相関を利用した海洋波の相関時間の測定が挙げられる。

# 目次

## 要約

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
<b>第 2 章</b>	<b>合成開口レーダ</b>	<b>3</b>
2.1	SAR の原理	4
2.2	パルス圧縮	4
2.2.1	周波数変調	4
2.2.2	レンジ方向の点拡張関数	4
2.2.3	レンジ方向の分解能	6
2.3	アジマス圧縮	6
2.3.1	ドップラー変調	6
2.3.2	アジマス方向の点拡張関数	8
2.3.3	アジマス方向の分解能	8
2.4	スプリット・ルック処理	8
2.4.1	スプリット・ルック点拡張関数	9
2.4.2	スプリット・ルック画像の分解能	10
<b>第 3 章</b>	<b>解析理論とノイズの統計特性</b>	<b>11</b>
3.1	画像複素振幅と画像強度の生成	11
3.1.1	画像複素振幅の生成	11
3.1.2	画像強度の生成	13
3.2	画像の統計解析	13
3.2.1	アンサンブル平均	14
3.2.2	ホワイトノイズ近似	14
3.2.3	画像複素振幅・画像強度の統計特性	15
3.2.4	スペックルノイズ	18
3.2.5	スプリット・ルック画像の統計特性	18
<b>第 4 章</b>	<b>シミュレーション</b>	<b>21</b>
4.1	シミュレーションの手順	21
4.1.1	シミュレーション画像	21
4.1.2	相互相関画像の算出	22
4.2	強度画像と複素画像との比較	22

4.2.1	SN 比の算出 . . . . .	22
4.3	結果 . . . . .	34
<b>第 5 章</b>	<b>スライド・ルック処理による波の相関時間</b>	<b>35</b>
5.1	スライド・ルック処理 . . . . .	35
5.2	陸面と海面の相関時間 . . . . .	36
5.2.1	任意のエリアにおける相関の推移 . . . . .	36
5.2.2	考察 . . . . .	37
5.3	結果 . . . . .	38
<b>第 6 章</b>	<b>Radarsat 画像への応用</b>	<b>40</b>
6.1	Radarsat . . . . .	40
6.2	使用データ . . . . .	40
6.3	強度の低下方法 . . . . .	41
6.4	スプリット・ルック画像とスライド・ルック画像の比較 . . . . .	42
6.4.1	相関画像生成プロセス . . . . .	42
6.4.2	切り出すサイズの変化による SN 比 . . . . .	45
6.5	結果 . . . . .	46
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>47</b>
7.1	本研究のまとめ . . . . .	47
7.2	今後の展開 . . . . .	47
<b>付 録 A</b>	<b>シミュレーション相互相関画像</b>	<b>49</b>
A.1	強度相互相関画像 . . . . .	49
A.2	複素相互相関画像 . . . . .	60
<b>付 録 B</b>	<b>スライド・ルック画像</b>	<b>71</b>
B.1	全体画像 . . . . .	71
B.2	スライド・ルック処理された船舶画像 . . . . .	75
B.2.1	SHIP A . . . . .	75
B.2.2	SHIP B . . . . .	78
<b>付 録 C</b>	<b>切り出すサイズを変化させた相関画像</b>	<b>81</b>
C.1	スプリット・ルック画像による相互相関画像 . . . . .	81
C.1.1	SHIP A . . . . .	81
C.1.2	SHIP B . . . . .	83
C.2	スライド・ルック画像による平均相互相関画像 . . . . .	85
C.2.1	SHIP A . . . . .	85
C.2.2	SHIP B . . . . .	87
	<b>参考文献</b>	<b>89</b>
	<b>謝辞</b>	

# 目次

Figure 2.1	SAR のジオメトリ	3
Figure 2.2	FM パルスの波形	5
Figure 2.3	衛星進行に伴う距離の変化	7
Figure 2.4	スプリット・ルック処理	9
Figure 3.1	任意の点散乱体における SAR のジオメトリ	11
Figure 3.2	スペckルノイズの生成過程	18
Figure 3.3	合成開口の重複プロセス	19
Figure 3.4	スライド・ルック処理における中心時間の差の増加に伴うスペckルの相関値の変化	20
Figure 4.1	シミュレーション画像 (強度)	22
Figure 4.2	強度・複素画像の相互相関画像	23
Figure 4.3	ターゲットサイズ $2 \times 2$ における SN 比とその誤差	24
Figure 4.4	ターゲットサイズ $4 \times 4$ における SN 比とその誤差	25
Figure 4.5	ターゲットサイズ $6 \times 6$ における SN 比とその誤差	26
Figure 4.6	ターゲットサイズ $8 \times 8$ における SN 比とその誤差	27
Figure 4.7	ターゲットサイズ $10 \times 10$ における SN 比とその誤差	28
Figure 4.8	ターゲットサイズ $12 \times 12$ における SN 比とその誤差	29
Figure 4.9	ターゲットサイズ $14 \times 14$ における SN 比とその誤差	30
Figure 4.10	ターゲットサイズ $16 \times 16$ における SN 比とその誤差	31
Figure 4.11	ターゲットサイズ $18 \times 18$ における SN 比とその誤差	32
Figure 4.12	ターゲットサイズ $20 \times 20$ における SN 比とその誤差	33
Figure 5.1	スライド・ルック処理のプロセス	36
Figure 5.2	相関変化を調べたエリア	36
Figure 5.3	任意のエリアでの相関値の推移	37
Figure 5.4	海面の状態と後方散乱	38
Figure 6.1	観測域	41
Figure 6.2	SHIP A 減衰前後	42
Figure 6.3	SHIP B 減衰前後	42
Figure 6.4	スプリット・ルック画像の相互相関画像の生成プロセス	43

Figure 6.5	スライド・ルック画像の相互相関画像の生成プロセス	44
Figure 6.6	相互相関画像と平均相互相関画像	45
Figure 6.7	スプリット・ルックとスライド・ルックの相関画像における切り出しサイズを変化させた場合の SN 比の推移	46
Figure A.1	強度相互相関画像ターゲットサイズ 2×2	50
Figure A.2	強度相互相関画像ターゲットサイズ 4×4	51
Figure A.3	強度相互相関画像ターゲットサイズ 6×6	52
Figure A.4	強度相互相関画像ターゲットサイズ 8×8	53
Figure A.5	強度相互相関画像ターゲットサイズ 10×10	54
Figure A.6	強度相互相関画像ターゲットサイズ 12×12	55
Figure A.7	強度相互相関画像ターゲットサイズ 14×14	56
Figure A.8	強度相互相関画像ターゲットサイズ 16×16	57
Figure A.9	強度相互相関画像ターゲットサイズ 18×18	58
Figure A.10	強度相互相関画像ターゲットサイズ 20×20	59
Figure A.11	複素相互相関画像ターゲットサイズ 2×2	61
Figure A.12	複素相互相関画像ターゲットサイズ 4×4	62
Figure A.13	複素相互相関画像ターゲットサイズ 6×6	63
Figure A.14	複素相互相関画像ターゲットサイズ 8×8	64
Figure A.15	複素相互相関画像ターゲットサイズ 10×10	65
Figure A.16	複素相互相関画像ターゲットサイズ 12×12	66
Figure A.17	複素相互相関画像ターゲットサイズ 14×14	67
Figure A.18	複素相互相関画像ターゲットサイズ 16×16	68
Figure A.19	複素相互相関画像ターゲットサイズ 18×18	69
Figure A.20	複素相互相関画像ターゲットサイズ 20×20	70
Figure B.1	中心周波数 -250Hz ~ -200Hz の全体画像	71
Figure B.2	中心周波数 -150 ~ -50Hz の全体画像	72
Figure B.3	中心周波数 0Hz ~ +100Hz の全体画像	73
Figure B.4	中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の全体画像	74
Figure B.5	中心周波数 -250Hz ~ -100Hz の SHIP A の画像	75
Figure B.6	中心周波数 -50Hz ~ +100Hz の SHIP A の画像	76
Figure B.7	中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の SHIP A の画像	77
Figure B.8	中心周波数 -250Hz ~ -100Hz の SHIP B の画像	78
Figure B.9	中心周波数 -50Hz ~ +100Hz の SHIP B の画像	79
Figure B.10	中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の SHIP B の画像	80
Figure C.1	SHIP A の相互相関画像 ( ウィンドウサイズ 2×2 ~ 8×8 )	81

Figure C.2	SHIP A の相互相関画像 (ウィンドウサイズ $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ )	82
Figure C.3	SHIP B の相互相関画像 (ウィンドウサイズ $2 \times 2 \sim 8 \times 8$ )	83
Figure C.4	SHIP B の相互相関画像 (ウィンドウサイズ $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ )	84
Figure C.5	SHIP A の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ $2 \times 2 \sim 8 \times 8$ )	85
Figure C.6	SHIP A の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ )	86
Figure C.7	SHIP B の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ $2 \times 2 \sim 8 \times 8$ )	87
Figure C.8	SHIP B の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ )	88

# 表 目 次

Table 5.1	スライド・ルック処理のパラメータ . . . . .	35
Table 6.1	Radarsat の諸元 (多彩な観測モード) . . . . .	40

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は最先端の技術を持つ高分解能の画像レーダで、昼夜や天候の制限を受けることなく観測が可能である。衛星や航空機搭載の合成開口レーダを使った海洋情報の抽出に関する研究は、1980年代から活発に行われている。

従来の船舶検出には CFAR (Constant False Alarm Rate) と呼ばれる手法が使われていた。CFAR は、再生された SAR の強度画像から強度値のヒストグラムを算出し、その分布に合うようなワイブル分布や  $K$  分布などの分布関数の係数を求めヒストグラムの分布から差し引き、一定値以上の強度値を抽出するようなしきい値をもうけることでターゲットの検出を行う。従って、この手法では、ターゲット自体が観測されていなければならない、海洋のノイズ信号にターゲットの信号が埋もれてしまっている場合や、後方散乱の弱い非金属のターゲットは検出することが困難となる。

そこで、合成開口レーダのスプリット・ルック処理による時系列の画像間から、相互相関を用いてターゲットを検出する方法が提唱された (参考文献 [4] [5])。合成開口レーダのアジマス方向の分解能は、大きな開口を合成することによって達成される。この開口の合成時間は約 0.5~2 秒間で、観測対象が海面の場合には、観測されたデータに海面の波や船舶の運動情報も含まれる。この情報を高精度で抽出するにはシングル・ルックの画像では困難で、合成開口を複数に分割して画像を生成する、スプリット・ルック処理の時系列データとして解析を行う。この処理により再生された画像は分解能が劣化するものの、時系列データとなることで、画像間ではランダムに変化する海洋からの信号には相関性が低く、船舶のような確定論的ターゲットからの信号には相関性が高い特徴を持つことになる。この特徴を利用して、複数の時系列画像間から相互相関を求めることで、たとえターゲットがノイズに埋もれている場合でも検出が可能となる。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、時系列画像間から相互相関による、より高精度なターゲット検出のアルゴリズムの確立と、海面の相関時間 (形状の保持時間: コヒーレンスタイム) の把握である。

スプリット・ルック処理によって生成される画像は、開口の合成時間を重複せずに分割するため、得られるルック数に限界がある。しかし、各ルックに関して海面の画像には相関性がないものの、海面の相関時間が短いことから、必ずしも開口を重複せずに分割する必要はない。従って、画像再生の際、開口を一部重複して画像を生成するスライド・ルック処理から、より多くのルック数が得られ、それらの組み合わせによる相互相関の加法平均から高精度でターゲット検出を行う。

また、短い時間差で重複画像を生成するスライド・ルック処理により、任意の散乱面で時間の経過と共に相関性がどのように変化しているのかを確かめる。

さらには、SAR 画像は通常、複素画像として記録された画像を強度画像に変換をして可視化し解析を行う。するとこの変換により、複素画像に含まれる位相の情報が失われてしまう。このことから、複素画像の振幅と位相を含めた相関処理により、高精度でターゲット検出が可能と考え、ターゲット抽出の

シミュレーションを行った。

### 1.3 本論文の構成

2章では、SARにおける、レンジ（電磁波照射）方向とアジマス（衛星進行）方向の画像取得について述べる。3章では2章の内容を踏まえた上で、両方向の画像生成を統合した画像生成について述べ、SAR画像の解析の基礎となる理論を、ノイズの統計特性について注目し展開する。4章では強度画像と複素画像を用いたターゲットの抽出のシミュレーションについて、その方法と結果について述べる。5章ではスライド・ルック処理による画像から、任意の散乱面について各画像間でどのような相関変化がみられたのか述べる。6章では任意に強度値を低下させた船舶画像を用いて検出を行い、スプリット・ルック画像とスライド・ルック画像の検出精度の比較を行った。最後に7章として、本研究のまとめと、今後の課題について述べる。尚、付録A,B,Cに本研究で生成算出した画像を示す。

## 第2章 合成開口レーダ

合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は、アンテナから放射した電磁波が対象物によって反射・散乱された電磁波を、再びアンテナが感知することで情報を取得する能動型のセンサである。一方、受動型のセンサは、太陽からの電磁波が対象物によって反射・散乱された電磁波を感知するものである。従って、SAR は昼夜を問わず観測が可能である。この太陽光に観測が依存しない特徴から、一年を通じて半分が暗闇に閉ざされた北極・南極地域や、日照時間の短い高緯度地域の観測に有効である。

さらに、観測に用いる電磁波は可視光線よりも長く、波長帯が約  $1\text{cm} \sim 1\text{m}$  のマイクロ波を使用している。このため、雲や霧などの波長と比較して十分小さい粒子や、ある程度の大きさの雨滴を貫通できる全天候型の特性も持っている。観測が天候に左右されないため、雲や霧、そして降雨の多い熱帯地域での観測にも適している。また、マイクロ波の中でもより長い電磁波を用いることで、植物の茂りや積雪で地表が覆われた地域の地表面や、乾燥した土壌の内部に到る情報まで取得が可能である。

上述した特徴から SAR は、地形的構造、海面波浪、海氷、土地利用状況、植生の状態など、地質学、海洋学、雪氷学、水文学や植生、都市環境の分野の多岐にわたり応用されている。

尚、SAR のジオメトリを Figure 2.1 に示す。

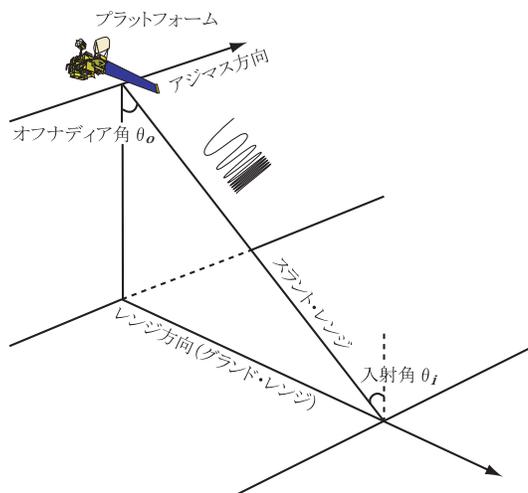


Figure 2.1: SAR のジオメトリ

ここで、衛星の進行方向をアジマス (Azimuth) 方向と呼び、電磁波の照射方向をレンジ (Range) 方向と呼ぶ。さらに、観測面におけるレンジ方向をグラウンド・レンジ方向、衛星からオフナディア角  $\theta_o$  の角度をもつ観測面までの方向をスラント・レンジ方向と呼ぶ。さらに、観測面の垂直方向とスラント・レンジのなす角を入射角と呼ぶ。また、センサを搭載する機械の総称をプラットフォームと呼ぶ。

## 2.1 SARの原理

合成開口レーダは、文字通り“開口を合成”することで高分解能を達成している。一方、この処理をしない実開口による観測の分解能は、フラウンホファー回折やフレネル回折といった電磁波の回折理論で記述することができる。実開口レーダの分解能の指標となるビーム幅を  $\Delta X$ 、発射する電磁波の波長を  $\lambda$ 、アンテナから観測面までの距離であるスラント・レンジ距離を  $D$ 、アンテナに相当する開口の長さを  $a$  とすると、 $\Delta X$  は式 (2.1) のように表される。

$$\Delta X = \frac{\lambda D}{a} \quad (2.1)$$

この式は、波長が短いほど、スラント・レンジ距離が短いほど、そして開口が大きいほどビーム幅が狭くなり、分解能が向上することを示している。仮に衛星に搭載して、合成開口処理と同様の分解能を得るとし、 $D = 800\text{km}$ 、 $\lambda = 0.25\text{cm}$ 、 $\Delta X = 6\text{m}$  として衛星に必要な開口長 (アンテナ)  $a$  を算出すると、その大きさは  $a \approx 33\text{km}$  にも及んでしまう。このようなアンテナを搭載するのは非常に困難である。そこで考え出されたのが合成開口技術である。つまり、 $a$  に相当する開口長を仮想的に合成することによって分解能を高めている。

## 2.2 パルス圧縮

はじめに、SAR におけるレンジ方向 (電磁波照射方向) の画像鮮鋭技術である、パルス圧縮 (Pulse Compression) について説明をする。レンジ方向の画像取得には、方形パルスを用いる方法とパルス圧縮技術を用いる方法とがある。方形パルスを用いた場合の分解能は、順々に発射される送信パルスの時間幅 (パルス幅) に依存している。従って、より高い分解能を得るには、狭い幅のパルスを発射しなくてはならない。しかしながら、この高出力の短いパルスを周期的に連続して照射し続けるには、電力を太陽光等に頼っている衛星搭載のセンサでは、観測に必要な十分な電力の確保が困難である。そこで、限られた電力で分解能の向上のために考え出されたのが、パルス圧縮技術である。

パルス圧縮技術の概要は、受信信号を送信信号から得られる参照信号とで、データ取得後に相関を求めることにより、高い周波数帯を信号として取り出す (信号の圧縮) 技術である。

### 2.2.1 周波数変調

パルス圧縮技術では、従来の方形パルスではなく、ラジオの FM 放送と同様の周波数変調 (Frequency Modulation) をしたパルスを用いる。この FM パルス (チャープパルスとも呼ばれる) は、時間変化と共に周波数が線形に変化をする。時間変数を  $\tau$  とすると、任意の時間に送信された FM パルス  $E_t^R$  の波形は

$$E_t^R(\tau) = E_0' \cos(2\pi f_c \tau + \alpha \tau^2) \quad : \quad -\tau_0/2 \leq \tau \leq \tau_0/2 \quad (2.2)$$

のように表現される。ここで、 $E_0'$  は振幅、 $f_c$  は中心周波数、 $\alpha$  はチャープ定数、 $\tau_0$  はパルス幅である。尚、Figure 2.2 に FM パルスの波形を示す。

### 2.2.2 レンジ方向の点拡張関数

有限な開口幅を持つ結像システムの画像生成において、観測面の一つの点は点画像としてではなく、点拡張関数 (Point Spread Function: PSF) と呼ばれる、ある広がりを持った像として記録される。従っ

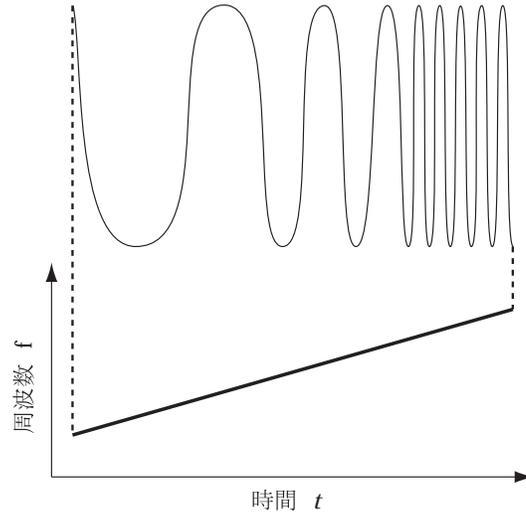


Figure 2.2: FMパルスの波形

て、SARによる点状の画像生成もこのPSFを算出することによって求められる。この節では、SARのレンジ方向における点散乱体画像、点拡張関数の導出について述べる。

点拡張関数の算出は、受信信号と参照信号とを相関処理することによって求められる。受信信号は、アンテナからスラント・レンジ距離  $R_0$  に位置する点散乱体からの信号とすると、パルスを送信してから、ちょうどスラント・レンジ距離の往復に要する時間  $2R_0/c$  だけ遅れて受信することになる。また、受信パルスの振幅は、点散乱体の特性に従って減少するが、基本的には送信時と同じ波形である。

式(2.2)より受信信号  $E_s^R$  は

$$E_s^R(\tau) = E_0 \cos \left( 2\pi f_c (\tau^2 - 2R_0/c) + \alpha (\tau - 2R_0/c)^2 \right) \quad (2.3)$$

となる。

ここで、式(2.2)、式(2.3)は実数で表しているが、実際には複素形で表現されるため、これらの式を複素振幅に変更をする。また、オフセット周波数を  $f_o - f_c = 0$  とする。すると、送信信号  $E_t^R$ 、受信信号  $E_s^R$  は複素振幅としてそれぞれ、

$$E_t^R(\tau) = E_0' \exp(i\alpha\tau^2) \quad : \quad -\tau_0/2 \leq \tau \leq \tau_0/2 \quad (2.4)$$

$$E_s^R(\tau) = E_0 \exp \left( -i2kR_0 + i\alpha(\tau - 2R_0/c)^2 \right) \quad (2.5)$$

で与えられる。ここで、 $k$  は電磁波の波数であり、 $k = 2\pi f_c/c$  である。受信信号と相関処理をする参照信号は、送信信号  $E_t^R$  の複素共役で与えられ、

$$E_r^R(\tau) = E_t^{R*} \quad (2.6)$$

$$= \text{rect}(\tau/\tau_0) \exp(-i\alpha\tau^2) \quad (2.7)$$

となる。ここで、 $*$  は複素共役を意味する。また、 $\text{rect}$  関数は

$$\begin{aligned} \text{rect}(\tau/\tau_0) &= 1 & : & \quad -\tau_0/2 \leq \tau \leq \tau_0/2 \\ &= 0 & : & \quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (2.8)$$

と、ある一区间のみ値をもつ関数として定義される。そして、相関処理は、

$$E_R(\tau') = \int_{-\infty}^{\infty} E_s^R(\tau' + \tau) E_r^R(\tau) d\tau \quad (2.9)$$

$$= E_0 \exp(-i2kR_0) \exp\left(i\alpha(\tau' - 2R_0/c)^2\right) \tau_0 \operatorname{sinc}(\alpha\tau_0(\tau' - 2R_0/c)) \quad (2.10)$$

となる。この式(2.10)がレンジ方向の複素 PSF である。ここで、sinc 関数は  $\sin\theta/\theta$  で定義される関数である。

$\tau'$  はアンテナを原点としたスラント・レンジの時間変数であるので、グラント・レンジの変数  $Y$  に変換をする。グラント・レンジとスラント・レンジの関係は、

$$Y = (\tau'c/2 - R_0) / \sin\theta_i \quad (2.11)$$

であるので、式(2.10)は

$$E_R(Y) = E_0 \exp(-i2kR_0) \operatorname{sinc}(\pi Y/\Delta Y) \quad (2.12)$$

となり、これを強度に変換すると、

$$|E_R(Y)|^2 = |E_0|^2 \operatorname{sinc}^2(\pi Y/\Delta Y) \quad (2.13)$$

となる。ここでは、定数となるものは全て  $E_0$  に含めた。

ここで、式(2.12) 式(2.13)が、グラント・レンジ方向の複素 PSF と強度 PSF である。

### 2.2.3 レンジ方向の分解能

グラント・レンジ方向の分解能は式(2.13)によって定義され、

$$\Delta Y = \frac{\pi c}{2|\alpha|\tau_0 \sin\theta_i} \quad (2.14)$$

となる。つまり、グラント・レンジ方向において、レンジ圧縮を用いて分解能を向上させるには、式(2.14)よりチャープ率  $\alpha$  が大きく、パルス幅  $\tau_0$  が長くあればよい。また、式(2.13)において、ピークの値か最初の 0 の値までの幅は「レーリー分解能」として、分解能の一つの基準となっている。

## 2.3 アジマス圧縮

アジマス圧縮は、SAR におけるアジマス方向(プラットフォーム進行方向)の画像鮮鋭技術である。その基本的な原理はパルス圧縮と同様で、受信信号を参照信号とで相関処理することにある。唯一の違いは、パルス圧縮で用いた周波数変調を、アジマス圧縮では、進行するプラットフォームと点散乱体の距離の変化による受信信号のドップラー変調を用いる点にある。

また、実開口レーダのアジマス方向における分解能は、二つの点散乱体がビームパターン内に入ってしまうことで区別がつかなくなってしまう。つまり、ちょうどビームパターンに点散乱体が接するときが分解能と定義することができる。

### 2.3.1 ドップラー変調

Figure 2.3 にプラットフォームが進行し、任意の点散乱体から信号を受けるときの距離の変化を表した図を示す。

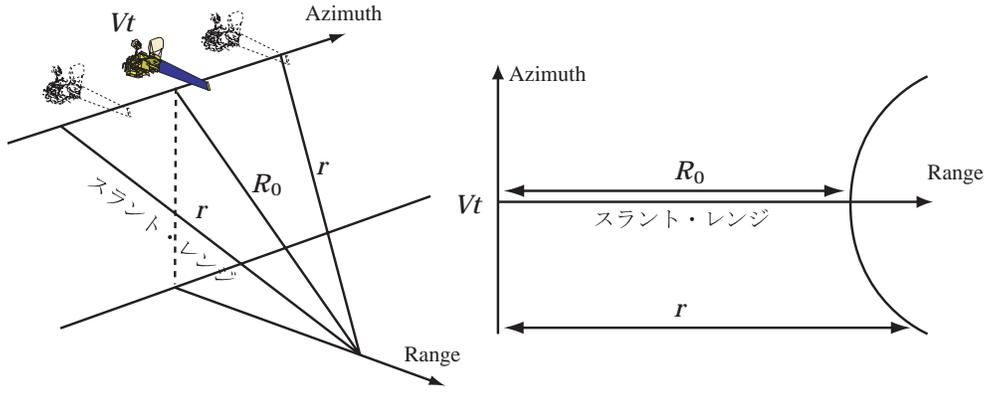


Figure 2.3: 衛星進行に伴う距離の変化

ここで、 $V$  はプラットフォームの速度、 $t$  はアンテナの受信時間、 $R_0, r$  はそれぞれスラント・レンジ距離を示す。尚、簡略化のため、ここでは地球の自転とそれに伴うレンジ方向の成分については省略し、考慮しないものとする。アジマス方向の受信信号  $E_s^A$  は、式 (2.5) のスラント・レンジ距離に依存する項より、

$$E_s^A(t) = E_0 \exp(-i2kr(t)) \quad (2.15)$$

で与えられる。ここで、 $r$  は時間変数  $t$  におけるスラント・レンジ距離の関数である。 $r(t)$  は Figure 2.3 から、

$$r^2(t) = R_0^2 + (Vt)^2 \quad (2.16)$$

となる。式 (2.16) は、衛星のように  $R_0 \gg Vt$  と、移動する距離と比べてスラント・レンジが十分に長い条件では、

$$r = \sqrt{(R_0)^2 + (Vt)^2} \quad (2.17)$$

$$\simeq R_0 + \frac{(Vt)^2}{2R_0} \quad (2.18)$$

と、近似することができる。式 (2.18) を式 (2.15) に代入し、アジマス方向の受信信号を求めると、

$$E_s^A = E_0 \exp\left(-i2k\left(R_0 + \frac{(Vt)^2}{2R_0}\right)\right) \quad (2.19)$$

$$= E_0 \exp(-i2kR_0 - i\beta t^2) \quad (2.20)$$

となる。ここで  $\beta$  はドップラー定数であり、

$$\beta = \frac{2\pi V^2}{\lambda R_0} \quad (2.21)$$

で与えられる。式 (2.20) は、式 (2.5) と同じく周波数変調された信号である。唯一異なる点は、プラットフォームの進行で点散乱体とアンテナとの距離の変化により、受信信号がドップラー変調を受けることである。

### 2.3.2 アジマス方向の点拡張関数

アジマス方向の PSF の算出は、レンジ方向の PSF と同様にして求められる。従って、式 (2.20) の受信信号と参照信号を相関処理することによって得られる。アジマス参照信号は、スラント・レンジ距離  $R_0$  にある点散乱体から、得られるのであろう期待信号として、式 (2.20) の複素共役

$$E_r^A(t) = \text{rect}(t/T_A) \exp(i\beta t^2) \quad (2.22)$$

で与えられる。ここで、 $\text{rect}$  は式 (2.8) と同じく、ある区間のみ値をもつ関数として

$$\begin{aligned} \text{rect}(t/T_A) &= 1 & : & \quad -T_A/2 \leq t \leq T_A/2 \\ &= 0 & : & \quad \textit{otherwise} \end{aligned} \quad (2.23)$$

で定義される。 $T_A$  は参照信号の長さを定義する時間で、アジマス方向で開口を合成する、開口合成時間（または積分時間）と呼ばれるものである。

式 (2.20) と式 (2.22) の相関から、アジマス方向の複素 PSF は、

$$E_A(t') = \int_{-\infty}^{\infty} E_s^A(t' + t) E_r^A(t) dt \quad (2.24)$$

$$= E_0' \exp(-i\beta t'^2) \text{sinc}(\beta T_A t') \quad (2.25)$$

となる。式 (2.25) の画像上のアジマス時間  $t'$  を、 $X = Vt'$  で関係付けられる空間変数  $X$  とおくと、式 (2.25) は

$$E_A(t') = E_0 \exp\left(-i\beta \left(\frac{X^2}{V}\right)\right) \text{sinc}\left(\frac{\pi}{\Delta X} X\right) \quad (2.26)$$

となる。この式 (2.26) が、グランド・レンジ変数に変換したアジマス方向の複素 PSF で、強度に変換すると、

$$|E_A(t')| = |E_0|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\pi}{\Delta X} X\right) \quad (2.27)$$

となる。これが、アジマス方向の強度 PSF である。また、 $\exp$  の項は  $E_0$  に含めた。

式 (2.26) と式 (2.27) がアジマス方向の複素 PSF と強度 PSF である。

### 2.3.3 アジマス方向の分解能

アジマス方向の分解能は式 (2.27) より、

$$\Delta X = \frac{\lambda R_0}{2L_A} \quad (2.28)$$

である。波長が短いほど、スラント・レンジ距離が短いほど、合成時間が長いほど分解能が向上することになる。

## 2.4 スプリット・ルック処理

スプリット・ルック処理 (split-look processing) は、合成開口レーダのようなコヒーレントな画像生成システムに特有のスペckルノイズを軽減する処理法の一つである。その仕組みは合成する開口を複

数のサブ開口に分割する。この処理はプラットフォームが同じ観測面を別々の位置で観測するのと同等である。このようにして生成した強度画像を重ね合わせ、平均化することでノイズが軽減される。また、この処理では、分割したサブ開口の数に応じて分解能が低下してしまう。一般的な SAR では、アジマス方向の分解能がレンジ方向の分解能よりも優れているため、この処理によって両方向の分解能を揃える効果ももっている。尚、スプリット・ルック処理を表した図を Figure 2.4 に示す。

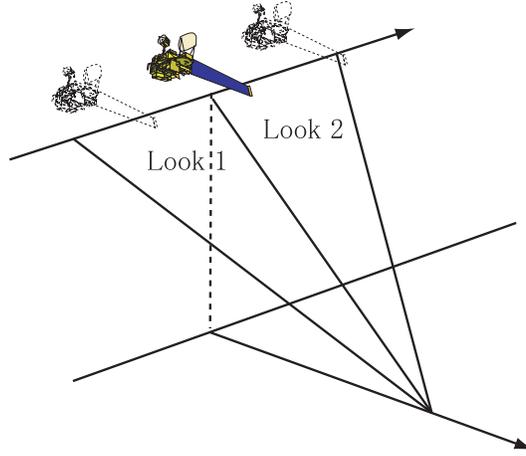


Figure 2.4: スプリット・ルック処理

#### 2.4.1 スプリット・ルック点拡張関数

受信信号は式 (2.20) より、定数を  $E_0$  に含めた形で表現すると、受信ドップラー信号は、

$$E_s^D(t) = E_0 \exp(-i\beta t^2) \quad (2.29)$$

で、この信号と、ルック  $n$  のサブ参照信号

$$E_r^n(t) = \text{rect}((t - T_n)/(T_A/N)) \exp(i\beta t^2) \quad (2.30)$$

とで相関をとることで、スプリット・ルック PSF が求められる。ここで、 $n$  はルックナンバー、 $N$  はトータルルック数、 $T_A$  は開口の合成時間、 $T_n$  はルック  $n$  の参照関数の中心時間を示す。また、式 (2.30) の  $\text{rect}$  関数は、

$$\text{rect}\left(\frac{t - T_n}{T_A/N}\right) = 1 \quad : \quad -T_A/2N \leq t - T_n \leq T_A/2N \quad (2.31)$$

$$= 0 \quad : \quad \textit{otherwise} \quad (2.32)$$

で定義される。つまり式 (2.32) は、受信信号において任意の信号域を指定し、相関範囲としている。また、ここで示した中心時間  $T_n$  は

$$T_n = \frac{T_A}{2N} (2n - N - 1) \quad (2.33)$$

で、与えられる。

相関時間は、式 (2.29)、式 (2.32) から求められ、

$$E^{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} E'_s(t+t')E_r^n(t) dt \quad (2.34)$$

$$= E_0 \exp(-i\beta t'^2 - 2i\beta T_n t') \operatorname{sinc}\left(\frac{\beta T_A}{N} t'\right) \quad (2.35)$$

となる。式 (2.35) が任意のルック、中心時間のスプリット・ルック複素 PSF である。

#### 2.4.2 スプリット・ルック画像の分解能

式 (2.35) の  $t'$  を、アジマス圧縮のときと同様に空間変数  $X$  に変換をすると、

$$E^{(n)}(t') = \exp(-i\beta(X/V)^2) \exp(-i2\beta T_n(X_V)) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi X}{\Delta X N}\right) \quad (2.36)$$

となる。式 (2.36) の sinc 関数より、式 (2.26) のスプリット・ルック処理をしていないアジマス方向の PSF と比較して、処理を施すと分解能が  $N$  倍に劣化する。しかしながら、前述したように、アジマス方向の分解能はレンジ方向よりも数倍良いため、任意のルック画像を生成することで、両方向の分解能を揃えることができる。例えば、日本の衛星である JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite-1) はレンジ方向の分解能が 18m、アジマス方向の分解能が 6m であるので、スプリット・ルック処理により 3 ルックに分割することで、両方向の分解能を揃えることができる。

## 第3章 解析理論とノイズの統計特性

前章では、一つの点散乱体の各方向における画像生成（点拡張関数の導出）について述べた。この章では、散乱面全体にわたる画像生成について述べ、生成される複素・強度画像のスペックルノイズに起因する統計的な特性について述べる。

### 3.1 画像複素振幅と画像強度の生成

本研究は海洋の波に対する研究であり、陸地ほどの顕著な高低差はないため、点散乱体の高さに対するパラメータは無視した上で、二次元の画像生成、つまりレンジ・アジマス両方向の点拡張関数を統合した“二次元点拡張関数”の導出について述べる。尚、この章における SAR のジオメトリを表した図を、Figure 3.1 に示す。

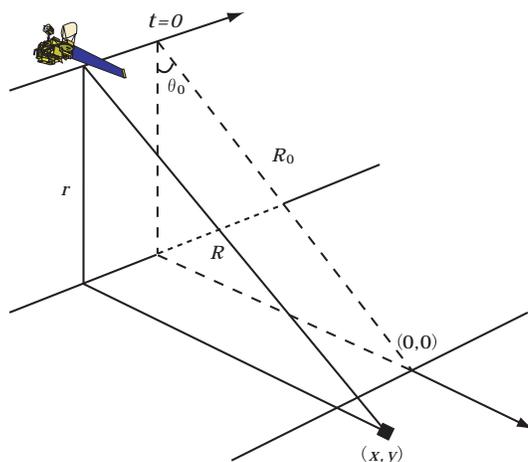


Figure 3.1: 任意の点散乱体における SAR のジオメトリ

#### 3.1.1 画像複素振幅の生成

観測面の任意の位置  $(x, y)$  における点散乱体について考慮する。すると、送信信号、受信信号はそれぞれ式 (2.4) と式 (2.5) から

$$E_t(t_j, \tau) = E'_0 \exp\left(i2\pi f_c(t_j + \tau) + i\alpha(t_j + \tau)^2\right) \quad (3.1)$$

$$E_s(t, \tau; x, y) = E_s \sqrt{\sigma(x, y)} \exp(-i2kr(t) + i\alpha(\tau - 2r(t)/c)) \quad (3.2)$$

と表現できる。ここで、 $\sqrt{\sigma(x, y)}$  は  $(x, y)$  の位置における後方散乱係数で、散乱体によって変化する固有のパラメータである。また、 $j$  は  $j = 1, 2, 3 \dots$  であり、 $t_j$  はアジマス方向で順々にパルスが発射される過程を示している。同じく  $r(t)$  もアジマス時間  $t$  におけるスラント・レンジ距離の変位を表すものである。式 (2.16) 同じように、さらに  $x$  の変位を加味した形式で表現すると、式 (3.2) は

$$\begin{aligned} r(t) &= \sqrt{R^2 + (Vt - x)^2} \\ &\simeq R + \frac{(Vt - x)^2}{2R} \end{aligned} \quad (3.3)$$

となり、 $r(t)$  を近似することができる。この近似を式 (3.2) に適応し、オフセット周波数変換後に除去される項を取り除き、さらには補正によって除去される部分も除いて書き直すと、受信信号は

$$E_s(t, \tau; x, R) = E_0 \sqrt{\sigma(x, R)} \exp(-i2kR) \exp(-i\beta(t - x/V)^2) \exp(-i\alpha(\tau - 2R/c)^2) \quad (3.4)$$

となる。この式 (3.4) の受信信号と関連させる参照信号は、レンジ、アジマス両方向の時間変数より

$$E_r(t, \tau) = \text{rect}(t/T_A) \text{rect}(\tau/\tau_0) \exp(i\beta t^2) \exp(-i\alpha\tau^2) \quad (3.5)$$

となり、前章で示した、レンジ・アジマス各方向の参照信号を結合した形となる。これらのことより、任意の一点における二次元の相関処理は、簡略化して記述すると、以下ようになる。

$$E_p(t', \tau' : x, R) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_s(t' + t, \tau' + \tau) E_r(t, \tau) dt d\tau \quad (3.6)$$

この式 (3.6) に式 (3.4) と式 (3.5) を代入すると、

$$\begin{aligned} E_p(t', \tau' : x, R) &= E_0 \sqrt{\sigma(x, R)} \exp(-i2kR) \exp(-i\beta(t' - x/V)^2) \exp(i\alpha(\tau' - 2R/c)^2) \\ &\cdot \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t/T_A) \text{rect}(\tau/\tau_0) \exp(-i2\beta(t' - x/V)t) \exp(i2\alpha(\tau' - 2R/c)\tau) dt d\tau \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。この式 (3.7) は、位置  $(x, R)$  にある一点の規格化されていない PSF である。従って、全体の画像を得るには、全ての点散乱体についての和を求めれば良いので、式 (3.7) を  $x, R$  について積分すればよい。すると、

$$\begin{aligned} A(t', \tau') &= \iint_{-\infty}^{\infty} E_p(t', \tau' : x, R) dx dR \\ &= E_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\sigma(x, y)} \exp(-i2kR) \exp(-i\beta(t' - x/V)^2) \exp(i\alpha(\tau' - 2R/c)^2) dx dR \\ &\cdot \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t/T_A) \text{rect}(\tau/\tau_0) \exp(-i2\beta(t' - x/V)t) \exp(i2\alpha(\tau' - 2R/c)\tau) dt d\tau \end{aligned} \quad (3.8)$$

となる。

二つ目の積分式は、それぞれの  $\text{rect}$  関数のフーリエ変換によるものであることがわかる。また、同じく二つ目の積分式はアジマス時間とレンジ時間に分けられており、互いに独立した変数であるので、個々に展開し、まとめると、

$$\begin{aligned} A(t', \tau') &= E_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\sigma(x, R)} \exp(-i2kR) \exp(-i\beta(t' - x/V)^2) \exp(i\alpha(\tau' - 2R/c)^2) \\ &\cdot \text{sinc}(\beta T_A(t' - x/V)) \cdot \text{sinc}(\alpha\tau_0(\tau' - 2R/c)) dx dR \end{aligned} \quad (3.9)$$

となる。ここで、定数となるものは全て  $E_0$  に含めた。さらにこの式を簡潔にまとめるために、アジマス時間に依存する部分とレンジ時間に依存する部分を、それぞれ以下のように表現することにする。

$$E_A(t' - x/V) = \exp(-\beta(t' - x/V)^2) \text{sinc}(\beta T_A(t' - x/V)) \quad (3.10)$$

$$E_R(\tau' - 2R/c) = \exp(i\alpha(\tau' - 2R/c)^2) \text{sinc}(\alpha\tau_0(\tau' - 2R/c)) \quad (3.11)$$

すると式 (3.9) は

$$A(t', \tau') = A_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\sigma(x, R)} \exp(-i2kR) E_A(t' - x/V) E_R(\tau' - 2R/c) dx dR \quad (3.12)$$

となる。しかしながら、式 (3.12) はアジマス・レンジの両方向共に時間の変数である。画像として取り扱う場合は、時間の変数よりも距離の変数の方が扱いやすいので、ここで変換をする。

すると、アンテナと散乱面の幾何学的に関係から、 $X = Vt', Y \sin \theta_i = c\tau'/2 - R_0$  より、式 (3.12) は

$$A(X, Y) = A_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\sigma(x, y)} \exp(-i2kR) E_A(X - x) E_R(Y - y) dx dy \quad (3.13)$$

となる。ここで、 $A_0$  は規格化定数である。さらに振幅に相当する  $\sqrt{\sigma(x, y)}$  の部分を  $a(x, y)$  とおくと、式 (3.13) はさらに簡潔に表現でき、

$$A(X, Y) = A_0 \iint_{-\infty}^{\infty} a(x, y) E_{AR}(X - x, Y - y) dx dy \quad (3.14)$$

となる。ここで、 $\exp$  の項は規格化定数  $A_0$  に含めた。

式 (3.14) は、複素画像が振幅と PSF のコンボリューションの積で与えられることを示している。従って、複素画像がこのような画像生成過程を経ていることから、式 (3.14) は“コンボリューションモデル”と呼ばれる。ここで、 $E_{AR}$  は

$$E_{AR} = E_A(X) E_R(Y) \quad (3.15)$$

で与えられる二次元点拡張関数である。

### 3.1.2 画像強度の生成

一般の SAR 画像の解析には、複素画像から位相の部分を除いた強度画像が用いられる。その強度画像は、式 (3.14) の二乗の絶対値によって求められ、

$$\begin{aligned} I(X, Y) &= |A(X, Y)|^2 \\ &= I_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} \iiint_{-\infty}^{\infty} a(x_1, y_1) a^*(x_2, y_2) E_{AR}(X - x_1, Y - y_1) E_{AR}^*(X - x_2, Y - y_2) dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

で与えられる。式 (3.16) が強度画像である。

## 3.2 画像の統計解析

分解能幅と比べて大きいものや、ランダムな振幅や位相の変化のない散乱面は確定論的に取り扱う事ができる。一方、SAR に代表されるコヒーレントな画像生成に特有のスペckルノイズは、分解能幅に

ある複数の点散乱体の PSF による干渉から得られる。従って、この場合の PSF は振幅や位相がランダムに変化をするので確定論的には取り扱えず、統計的に取り扱わなければならない。

ここでは、まずはじめに理想的な平均値を求めるアンサンブル平均について述べた後、ノイズの統計解析で用いられるホワイトノイズ近似について説明をする。そしてさらに、ノイズの解析として、画像複素振幅と画像強度の自己相関関数について理論を展開し、最後にスプリット・ルック処理で生成される画像における相互相関関数について理論を展開をする。

### 3.2.1 アンサンブル平均

ここで、ランダムな値の統計解析に必要なアンサンブル平均について要約する。アンサンブル平均は、サンプル数を無限にしたときの平均で、有限なサンプル数の平均と比較して、不確かさがなく理想的な値なので、真の平均値であると言える。

まず、値がランダムに変化する関数  $g(x)$  について考える。仮にこの  $g(x)$  のサンプル数が  $M$  であるとすると、関数  $g(x)$  の平均値は、

$$\bar{g} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M g(x_j) \quad (3.17)$$

となる。ここで、サンプル数を無限大にまで拡張すると、式 (3.17) は

$$\langle g \rangle = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M g(x_j) \quad (3.18)$$

となる。ここで示した  $\langle g \rangle$  がアンサンブル平均である。尚、 $\langle \rangle$  の記号は、アンサンブル平均であることを意味する。すると、スペckルノイズのようなランダムに変化をする値の自己相関関数は、理想的な関数として、

$$\begin{aligned} C_{gg}(x') &= \langle g(x)g^*(x+x') \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(x)g^*(x+x') dx \end{aligned} \quad (3.19)$$

で定義される。

これにより、式 (3.16) で与えられた画像強度を、アンサンブル平均によりノイズの含まない真の画像強度として記述すると、

$$\begin{aligned} \langle I(X, Y) \rangle &= I_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} \langle a(x_1, y_1)a^*(x_2, y_2) \rangle \\ &\quad \cdot \langle E_{AR}(X-x_1, Y-y_1)E_{AR}^*(X-x_2, Y-y_2) \rangle dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

と、表される。しかしながら、実際にはスプリット・ルック処理をして複数の画像を生成しても画像強度は有限数であるので、完全にスペckルが除去されることはない。

### 3.2.2 ホワイトノイズ近似

式 (3.20) を簡潔にするために、ホワイトノイズ近似を適応する。ホワイトノイズ (白色雑音) とは、光が位相の異なる様々な波の総和から成ることに由来する。従って、ホワイトノイズは以下に挙げる三つの条件を満たす。

1. 散乱面の任意の位置  $(x_1, y_1)$  での振幅  $\sqrt{\sigma(x_1, y_1)}$  と位相  $\psi(x_1, y_1)$  は、統計的に独立しており、互いに影響を及ぼすことなく変化する。
2. 散乱面において、任意の位置  $(x_1, y_1)$  と他の位置  $(x_2, y_2)$  のそれぞれの振幅  $\sqrt{\sigma(x_1, y_1)}, \sqrt{\sigma(x_2, y_2)}$  と位相  $\psi(x_1, y_1), \psi(x_2, y_2)$  は相関していない。相関している場合は、唯一  $x_1 = x_2, y_1 = y_2$  の同じ位置のみである。従ってこの場合は空間的にデルタ相関している。
3. 散乱面の分解能幅に、中心極限定理を満足するに十分な点散乱体が存在している。また、位相はランダムな値で、 $[-\pi, \pi]$  の間で一様に分布している。

すると、後方散乱場  $a(x, y)$  のアンサンブル平均は、

$$\begin{aligned}\langle a(x, y) \rangle &= \langle \sqrt{\sigma(x, y)} \{ \langle \cos(\psi(x, y)) \rangle + i \langle \sin(\psi(x, y)) \rangle \} \\ &= 0\end{aligned}\quad (3.21)$$

となる。これは条件 3 で説明される。位相  $\psi$  が  $[-\pi, \pi]$  の間で一様に分布しているので、 $\langle \cos(\psi) \rangle = \langle \sin(\psi) \rangle = 0$  になるからである。

次に後方散乱場の自己相関関数を考えると、

$$\begin{aligned}\langle a(x_1, y_1) a^*(x_2, y_2) \rangle &= \langle \sqrt{\sigma(x_1, y_1)} \sqrt{\sigma(x_2, y_2)} \\ &\cdot \{ \langle \cos(\psi(x_1, y_1) - \psi(x_2, y_2)) \rangle + i \langle \sin(\psi(x_1, y_1) - \psi(x_2, y_2)) \rangle \}\end{aligned}\quad (3.22)$$

で与えられる。ここで  $\cos, \sin$  の項の位相部分に着目すると、 $(\psi(x_1, y_1) - \psi(x_2, y_2))$  はランダムな値と相関していないランダムな値の差を示している。従って、この差はランダムな値になり、 $[-\pi, \pi]$  の間で一様に分布している。ランダムな位相の  $\psi$  の  $\langle \cos \psi \rangle$  は 0 だが、 $x_1 = x_2, y_1 = y_2$  の時には  $\langle \cos 0 \rangle = 1$  となる。結果的に後方散乱場の自己相関関数は同位置の時のみ値を持つので、式 (3.22) は

$$\langle a(x_1, y_1) a^*(x_2, y_2) \rangle = \langle \sqrt{\sigma(x_1, y_1)} \sqrt{\sigma(x_2, y_2)} \rangle \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2)\quad (3.23)$$

となる。

### 3.2.3 画像複素振幅・画像強度の統計特性

ここでは、簡単のため、アジマス方向のみを考える。

複素振幅のアンサンブル自己相関関数は、式 (3.14) から

$$\langle A(X_1) A^*(X_2) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{j'=1}^M \langle a(x_j) a^*(x'_{j'}) \rangle E_A(X_1 - x_j) E_A(X_2 - x'_{j'})\quad (3.24)$$

で表される。このとき、ホワイトノイズ近似の条件 2 から、散乱面からの位相はランダムであるので、式 (3.24) は  $j = j'$  の場合のみ有限の値を持ち、 $j \neq j'$  の場合には値が 0 になってしまう。従って、式 (3.24) は以下のように簡潔に表すことができる。

$$\langle A(X_1) A(X_2) \rangle = \frac{\langle \sigma \rangle}{M} \sum_{j=1}^M E_A(X_1 - x_j) E_A(X_2 - x_j)\quad (3.25)$$

次に、画像強度に変換する。ここでも次元でアジマス方向のみを考えることとする。画像複素振幅で画像強度の自己相関関数を表現すると、 $\langle I(X_1) I(X_2) \rangle = \langle A(X_1) A^*(X_1) A(X_2) A^*(X_2) \rangle$  であるので、

式 (3.16) より

$$\begin{aligned} \langle I(X_1)I(X_2) \rangle &= \frac{1}{M^2} \sum_{j=1}^M \sum_{j'=1}^M \sum_{j''=1}^M \sum_{j'''=1}^M \langle a(x_1)a^*(x_1)a(x_2)a^*(x_2) \rangle \\ &\quad \cdot E_A(X_1 - x_j)E_A^*(X_1 - x_{j'})E_A(X_2 - x_{j''})E_A^*(X_2 - x_{j'''}) \end{aligned} \quad (3.26)$$

この複雑な式も、ホワイトノイズ近似で簡潔にまとまる。式 (3.24) から、式 (3.25) への変換と同じく、ホワイトノイズ近似の条件 2 から散乱面はどの位置でも相関しておらず、次に挙げる組み合わせ以外は式 (3.26) の和が 0 となる。

1.  $j = j' \neq j'' = j'''$  ( $M^2 - M$  個)
2.  $j = j''' \neq j' = j''$  ( $M^2 - M$  個)
3.  $j = j' = j'' = j'''$  ( $M$  個)

上記の組み合わせ 1.2. の条件は、散乱位置  $X_1, X_2$  のそれぞれにおいて共役な関係をもつような組み合わせである。条件 3. の全てが同じ位置であるときは、考えられる組み合わせが  $M$  通りしかないので、仮に  $M$  の値が十分大きいとすると、条件 1.2. で得られる組み合わせと比較した場合、無視できるほど少ない組み合わせであるといえる。この条件に従うと、式 (3.26) は、

$$\begin{aligned} \langle I(X_1)I(X_2) \rangle &= \frac{1}{M^2} \sum_{j=1}^M \sum_{j'=1}^M \langle \sigma(x_j)\sigma(x_{j'}) \rangle \left[ |E_A(X_1 - x_j)|^2 |E_A(X_2 - x_{j'})|^2 \right. \\ &\quad \left. + E_A(X_1 - x_j)E_A(X_2 - x_j)E_A^*(X_1 - x_{j'})E_A^*(X_2 - x_{j'}) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

となる。ここで後方散乱断面積も空間的に相関していないので、

$$\langle \sigma(x_j)\sigma(x_{j'}) \rangle = \langle \sigma(x_j) \rangle \langle \sigma(x_{j'}) \rangle = \langle \sigma \rangle^2 \quad (3.28)$$

とおくことができ、式 (3.29) に代入すると、

$$\begin{aligned} \langle I(X_1)I(X_2) \rangle &= \frac{\langle \sigma \rangle^2}{M^2} \sum_{j=1}^M \sum_{j'=1}^M \left[ |E_A(X_1 - x_j)|^2 |E_A(X_2 - x_{j'})|^2 \right. \\ &\quad \left. + E_A(X_1 - x_j)E_A^*(X_1 - x_{j'})E_A(X_2 - x_j)E_A^*(X_2 - x_{j'}) \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

この式 (3.29) はさらに書き換えることができ、

$$\langle I(X_1)I(X_2) \rangle = \left| \frac{\langle \sigma \rangle}{M} \sum_{j=1}^M |E_A(X_1 - x_j)|^2 \right|^2 + \left| \frac{\langle \sigma \rangle}{M} \sum_{j=1}^M E_A(X_1 - x_j)E_A^*(X_2 - x_j) \right|^2 \quad (3.30)$$

となる。この式 (3.30) は、式 (3.25) によりさらに簡単にすることができて、

$$\langle I(X_1)I(X_2) \rangle = \langle I \rangle + |\langle A(X_1)A(X_2) \rangle|^2 \quad (3.31)$$

と簡潔にまとまる。さらに、自己相関関数のエルゴード性から  $X'$  の位置の差に依存する変数として扱うことができる。すると、式 (3.31) は規格化をし、二次元で表すと、

$$\begin{aligned} C_I(X', Y') &\equiv \frac{\langle I(X, Y)I(X + X', Y + Y') \rangle}{\langle I \rangle^2} \\ &= 1 + \frac{|\langle A(X, Y)A^*(X + X', Y + Y') \rangle|}{\langle I \rangle^2} \end{aligned} \quad (3.32)$$

となる。この式(3.32)の強度と複素振幅の関係は、「シーガート関係」として知られている。4章で述べるが、本研究では、このシーガート関係をあてはめて、強度画像・複素画像の相互相関から算出される相関値を比較している。

実際に画像強度のスペックル自己相関関数を算出する。ここでもアジマス方向の一次元のみを考える。アジマス方向の画像複素振幅は、式(3.12)より振幅を  $a(x)$  と表現すると、

$$A(x) = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} a(x) \exp\left(-i(\beta/V^2)(X-x)^2\right) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t/T_A) \exp\left(-i2(\beta/V)(X-x)t\right) dt \quad (3.33)$$

で与えられる。すると、複素振幅の自己相関関数は

$$\begin{aligned} \langle A(X_1)A^*(X_2) \rangle &= |E_0|^2 \iint_{-\infty}^{\infty} \langle a(x_1)a^*(x_2) \rangle \exp\left[-i(\beta/V^2)((X_1-x_1)^2 - (X_2-x_2)^2)\right] dx_1 dx_2 \\ &\quad \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t_1/T_A) \text{rect}^*(t_2/T_A) \exp\left[-i2(\beta/V)((X_1-x_1)t_1 - (X_2-x_2)t_2)\right] dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

となる。ここで、スペックルの後方散乱は相関がないことから、ホワイトノイズ近似

$$\langle a(x_1)a^*(x_2) \rangle = \sqrt{\sigma(x_1)\sigma(x_2)}\delta(x_1-x_2) \quad (3.35)$$

があてはまる。そして、 $x_2$  について積分を行うと、“同位置のみ値をもつ”ホワイトノイズ近似の条件から、式(3.34)は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \langle A(X_1)A^*(X_2) \rangle &= |E_0|^2 \langle \sigma \rangle \exp(-i(\beta/V^2)(X_1^2 - X_2^2)) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(i2(\beta/V)(t_1 - t_2 + (X_1 - X_2)/V)x_1\right) dx_1 \\ &\quad \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t_1/T_A) \text{rect}^*(t_2/T_A) \exp\left(-i2(\beta/V)(X_1 t_1 - X_2 t_2)\right) dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

となる。ここで、 $x_1$  の積分には、統計的に一樣な散乱面には空間的に十分大きいと仮定して、デルタ関数で近似的に取り扱う。つまり、 $x_1$  の項を

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[i2(\beta/V)\left((t_1 - t_2 + (X_1 - X_2)/V)x_1\right)\right] dx_1 \simeq \delta(t_1 - t_2 + (X_1 - X_2)/V) \quad (3.37)$$

すると、式(3.36)は

$$\begin{aligned} \langle A(X_1)A^*(X_2) \rangle &= |E_0|^2 \langle \sigma \rangle \exp\left(-i(\beta/V^2)(X_1^2 - X_2^2)\right) \\ &\quad \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} \delta(t_1 - t_2 + (X_1 - X_2)/V) \text{rect}(t_1/T_A) \text{rect}^*(t_2/T_A) \cdot \\ &\quad \cdot \exp\left(-i2(\beta/V)(X_1 t_1 - X_2 t_2)\right) dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

となる。さらに  $t_2$  の積分を行うと、デルタ関数の近似から、 $t_1 = t_2 + (X_1 - X_2)/V$  の条件で値を持つことになる。また、 $X_1 - X_2 = X'$  と表記すると、式(3.38)は

$$\langle A(X_1)A^*(X_2) \rangle = |E_0|^2 \langle \sigma \rangle \exp(-i(\beta/V^2)X'^2) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t_1/T_A) \text{rect}\left(t_1 + \frac{X_1 - X_2}{V}/T_A\right) dt_1 \quad (3.39)$$

となる。

### 3.2.4 スペックルノイズ

ここで、スペックルノイズについて要約する。

スペックルノイズはコヒーレントな画像生成に特有のノイズで、ゴマ塩状のランダムな濃度のゆらぎとして現れる。その生成過程は、コヒーレントな（干渉性の高い）電磁波が、物体により透過や散乱をすることで、受信される振幅、位相成分はランダムになる。この多数のランダムな波が互いに干渉することでスペックルノイズが生じる。SAR 画像では分解能幅にある点散乱体による点拡張関数の和として画像が生成され、乗法的に加わる。原理的にスペックルノイズが生成してしまうのは避けられず、このノイズを軽減するために数々のフィルタによる処理法などが提案されているが、完全にノイズを除去することはできない。

このスペックルの生成過程を表した図を Figure 3.2 に示す。

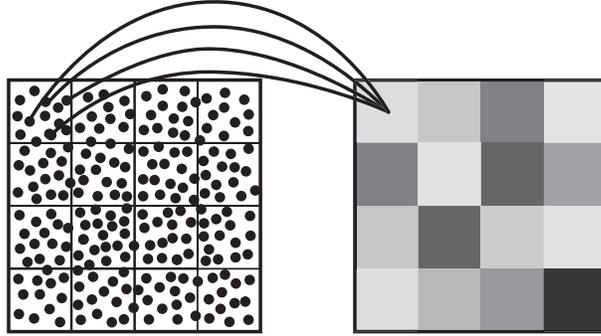


Figure 3.2: スペックルノイズの生成過程

### 3.2.5 スプリット・ルック画像の統計特性

次に、ガウス統計に従う後方散乱場における、スプリット・ルック処理をされた二つの画像の相関関係について考える。スプリット・ルック処理は、開口の合成時間を重複することなく分割をし、異なる中心時間（中心周波数）で画像を生成する。また、中心時間は任意の変数で、合成時間を重複させて画像を生成することも可能である。これがスライド・ルック処理である。

いまここで、各ルックの積分時間を  $T_A$  とし、ルック 1、2 の参照信号の中心時間を、 $t = 0$  を中心にそれぞれ  $-T_C$ 、 $T_C$  とする。このようにして生成されるスペックル画像強度の、各ルック間の相互相関関数は式 (3.32) の自己相関関数の関係（シーガート関係）と同じく、

$$\langle I_1(X; -T_C) I_2(X; T_C) \rangle = \langle I \rangle^2 + \left| \langle A_1(X; -T_C) A_2^*(X; T_C) \rangle \right|^2 \quad (3.40)$$

から求めることができる。（中心時間  $-T_C$  をルック 1、 $T_C$  をルック 2 とする）ここで、右辺の画像複素振幅は、ガウス分布に従う後方散乱場について考慮していることからホワイトノイズ近似することができる。すると、

$$\begin{aligned} \langle A_1(X; -T_C) A_2^*(X; T_C) \rangle &= |E_0|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle a(x_1) a_2^* \rangle \exp \left[ -i(\beta/V^2) ((X - x_1)^2 - (X - x_2)^2) \right] dx_1 dx_2 \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}((t_1 + T_C)/T_A) \text{rect}^*((t_2 - T_C)/T_A) \\ &\quad \cdot \exp \left[ -2i(\beta/V) ((X - x_1)t_1 - (X - x_2)t_2) \right] dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

から、 $x_1$  を積分し、空間的に相関性がないことから  $\langle \sigma \rangle = \langle \sigma(x_1) \rangle \langle \sigma(x_2) \rangle$  とすると、式 ( ) は

$$\begin{aligned} \langle A_1(X; -T_C) A_2^*(X; T_C) \rangle &= |E_0|^2 \langle \sigma \rangle \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}((t_1 + T_C)/T_A) \text{rect}^*((t_2 - T_C)/T_A) \\ &\quad \cdot \exp(-2i(\beta/V))(X - x)(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (3.42)$$

となる。ここで、 $t_1$  で積分し、 $t_2 = t$  とおくと、以下ようになる。

$$\langle A_1(X; -T_C) A_2^*(X; T_C) \rangle = |A_0|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}((t + T_C)/T_A) \text{rect}^*((t - T_C)/T_A) dt \quad (3.43)$$

この式は、各ルック間におけるスペクル複素振幅の相互相関関数が、それぞれの参照信号 (rect 関数) の相互相関であることを示している。

この rect 関数は

$$\begin{aligned} \text{rect}((t \pm T_C)/T_A) &= 1 & : & \quad -T_A/2 \leq t \pm T_C \leq T_A/2 \\ &= 0 & : & \quad \textit{otherwise} \end{aligned} \quad (3.44)$$

で与えられるとすると、式 (3.43) は式 (3.44) で示した二つの rect 関数の重複する範囲での積分となり、その範囲は  $[-T_A/2 + T_C, T_A/2 - T_C]$  となる。従って、式 (3.43) の積分を計算すると、

$$\langle A_1(X; -T_C) A_2^*(X; T_C) \rangle = |A_0|^2 (T_A - 2T_C) \quad (3.45)$$

となる。この相関の過程を Figure 3.3 に示す。

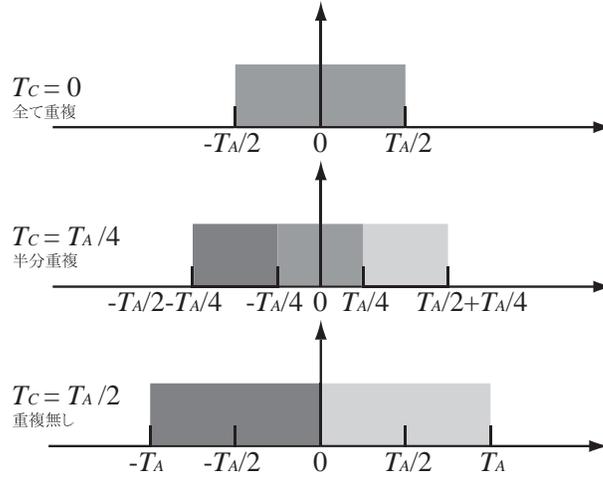


Figure 3.3: 合成開口の重複プロセス

この Figure 3.3 から、各ルックの中心時間の差  $T_C$  の時は各ルックの重複面積が最大となる。次に、中心周波数の差が各ルックの合成時間の半分ある ( $T_C = T_A/4$ ) とすると、重複面積は半分となる。さらに中心時間の差を各ルックの積分時間の分だけ差がある時 ( $T_C = T_A/2$ )、各ルックの積分時間の重複範囲はなくなってしまう。

式 (3.40) と式 (3.45) から、スプリット・ルック強度画像における相互相関は

$$\frac{\langle I_1(X; -T_C) \rangle \langle I_2(X; T_C) \rangle}{\langle I \rangle^2} = 1 + |1 - 2T_C/T_A|^2 \quad (3.46)$$

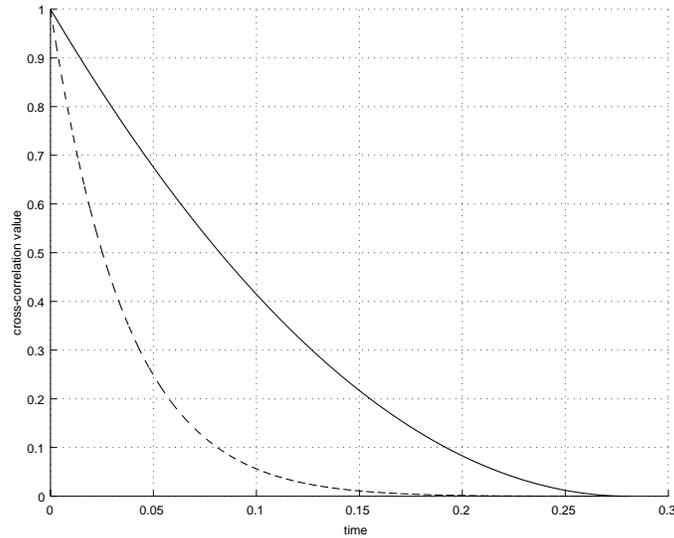


Figure 3.4: スライド・ルック処理における中心時間の差の増加に伴うスペckルの相関値の変化

となる。式 (3.46) より、各ルックの積分範囲の重複範囲が変化することによる相関の変化を表したグラフを Figure 3.4 に示す。

この Figure 3.4 のグラフにおいて、実線は時間変化のない散乱場を想定してる。また、破線は時間変化による散乱場である。

時間の要素は乗法的に加わる。また、その時間変化はガウス統計に従うものとして、式 (3.47)

$$C = 1 + |1 - 2T_C/T_A|^2 \cdot \exp(T_C/t)^2 \quad (3.47)$$

をから算出したものである。その結果、散乱面に動きが有る場合には、短い相関時間で減衰することが読みとれる。従って、相関関係を用いてターゲットの検出をするのに、必ずしも開口の合成時間を重複せずに分割する必要はなく、理論的に十分に相関がなくなるような、合成時間を一部重複した複数の画像も用いることが可能である。本研究ではこの点に着目し、合成時間を重複させたスライド・ルック処理による画像から、加法平均によりノイズを除去し、高精度での船舶抽出を試みた。詳細については5章で説明をする。

## 第4章 シミュレーション

複素画像からの変換による強度画像は、複素画像の持つ位相情報を失っている。従って、強度画像で相関を求める際、その指標となるものが強度値の一種のみである。一方、複素画像は振幅と位相の二つの情報を内含しているため、相関処理ではより高精度で相関値を求めることが可能なはずである。本研究ではこの点に着目し、強度画像と複素画像を用いた場合での、確定論的ターゲットの検出の比較を試みた。

### 4.1 シミュレーションの手順

まず、はじめに本研究で行った複素画像を用いたターゲット検出のシミュレーション手順について要約する。

#### 4.1.1 シミュレーション画像

本研究におけるシミュレーション画像の作成方法は、強度画像を用いた方法 [5] と同様である。唯一異なる点は、相互相関値を算出する為のスプリット・ルック画像に見立てた二つの画像を、強度に変換するか複素画像のまま用いるのかの違いである。

スプリット・ルック処理で生成される複数の画像間では、船舶からのような確定論的な信号は相関が高く、スペckルノイズのような統計的な信号は相関が低い。

まず、スプリット・ルック画像に見立てた二つの複素画像を作製する。生成画像の1ピクセルの値は、

$$A(X, Y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=1}^M a_j \exp(i2\pi R_j) \quad (4.1)$$

で与えられる。ここで、 $M$  は1分解能内に存在する点散乱体の数で、スペckルのようにランダムに変化するノイズは、ガウス分布に従って統計的に扱われる。そのため、ここで仮定しなければならない散乱体の数は、中心極限定理を満足させる4~8以上の数が必要がある。一般に、ほとんどの散乱面では、1分解能あたり中心極限定理が適応できるだけの散乱体を含んでいる。また、 $a$  は振幅、指数部分は位相で、 $R$  は0~1までの乱数を示す。

実際には振幅を1、位相を $[-\pi, \pi]$ まで一様に分布するものとし、散乱体の数 $M$ は中心極限定理を満足するに十分な20個の数を適応した。

このようにして生成される複素画像は、実数部分と虚数部分に分けて表現すると

$$A(X, Y) = A_{real}(X, Y) + iA_{imag}(X, Y) \quad (4.2)$$

となる。また、比較の対象となる強度画像は式(4.2)から

$$I(X, Y) = A_{real}^2(X, Y) + A_{imag}^2(X, Y) \quad (4.3)$$

で与えられる。画像の大きさは128×128ピクセルにした。

次に船舶に見立てたターゲット画像を作製する。スペckル複素・強度画像と同様の方法で作成したサイズの小さい画像を用意し、それぞれをスプリット・ルック画像の同じ位置に埋め込んだ。

以上のようにして作製したシミュレーション用画像（強度）を Figure 4.1 に示す。

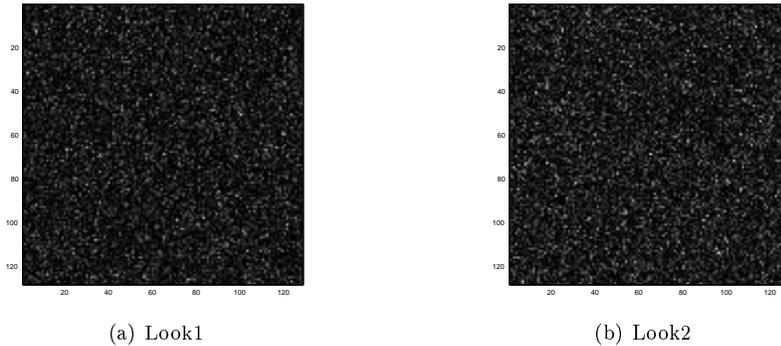


Figure 4.1: シミュレーション画像（強度）

#### 4.1.2 相互相関画像の算出

前述した方法で作製したシミュレーション画像から、任意のサイズで画像を切り出し、その画像間の相互相関を算出する。得られる相互相関関数値の中心の値を、新たに生成する相互相関関数画像として、シミュレーションスプリット・ルック画像間を1ピクセル移動しながら全体にわたり処理をする。尚、強度画像、複素画像からそれぞれ式(3.32)のシーガード関係より、

$$\begin{aligned}
 C(X', Y') &= \frac{\langle I_1(X, Y) \rangle \langle I_2(X + X', Y + Y') \rangle}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} \\
 &= 1 + \frac{|\langle A_1(X, Y) A_2^*(X + X', Y + Y') \rangle|^2}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

で関連づけられている。

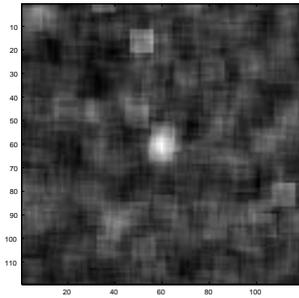
この結果、強度画像と複素画像を用いた時に得られる二次元相互相関画像を Figure 4.2 に示す。Figure 4.2 より、相互相関画像に現れるピークの有無を、ターゲットが存在する判断材料とする。

### 4.2 強度画像と複素画像との比較

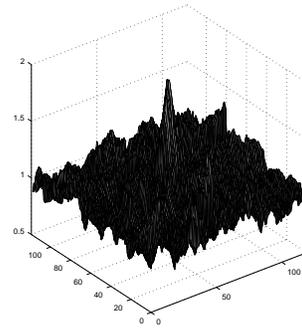
強度画像、もしくは複素画像を用いることで、ターゲットの検出精度にどのような違いが生じるのか、両画像からそれぞれ同じようにターゲットのサイズと切り出すウィンドウのサイズを変化させて相互相関画像を算出し、比較を行った。また、ターゲットのサイズは2刻みで2~20ピクセル。切り出すウィンドウのサイズは2刻みで2~30ピクセル変化をさせた。

#### 4.2.1 SN比の算出

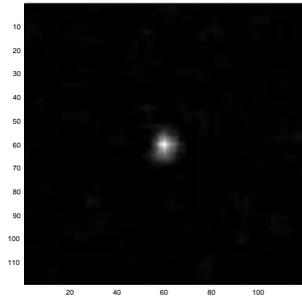
強度画像と複素画像を用いたターゲット検出の精度を定量的に比較するために、ターゲットに相当する部分の相関値のピーク値と、それ以外のノイズ相当する部分の平均値の比率をSN比として評価した。



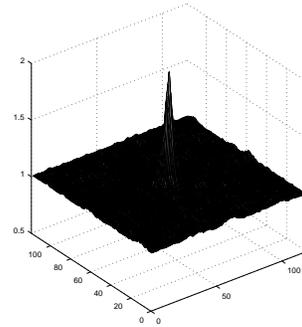
(a) 強度画像の相互相関画像



(b) 強度画像の相互相関画像  
(3D)



(c) 複素画像の相互相関画像

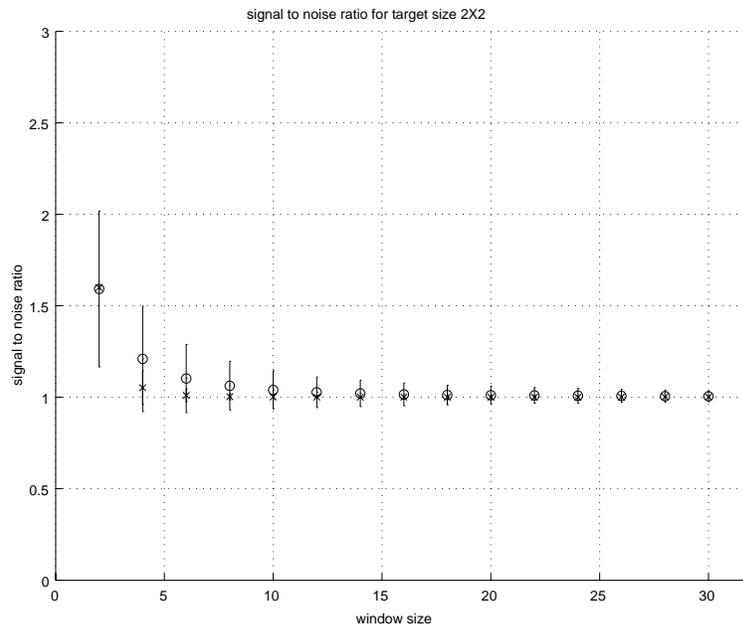


(d) 複素画像の相互相関画像  
(3D)

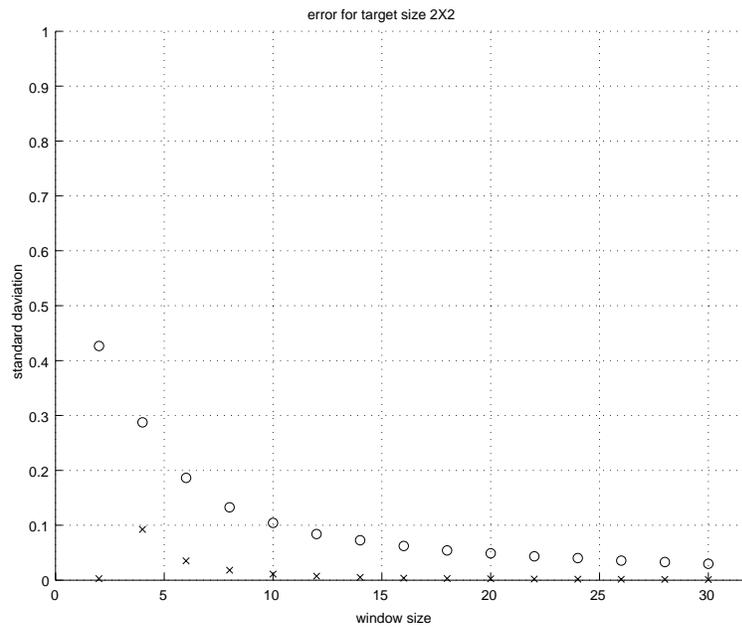
Figure 4.2: 強度・複素画像の相互相関画像

SN 比 ( signal noise to ratio ) はノイズに対する信号の比率で表され、その信号がどの程度優れているのかを示す指標である。

SN 比算出の手順は、前述した方法で強度及び複素画像から相互相関画像を算出する。そして、任意のサイズのターゲット埋め込んでおり、ターゲットが相関画像のどの位置に存在しているのか既知であることから、ターゲットピーク値とノイズの相関値の平均の値の商を算出し、SN を算出した。しかし、実際には相関画像として算出される値にばらつきが生じるため、この処理を 1000 回繰り返している。このようにして算出された SN 比のグラフを Figure 4.3 ~ Figure 4.12 に示す。尚、上段は任意のターゲットサイズにおける SN 比の推移で、下段は 1000 回繰り返した SN 比の誤差を示している。そして、それぞれ は強度画像で × は複素画像による処理である。

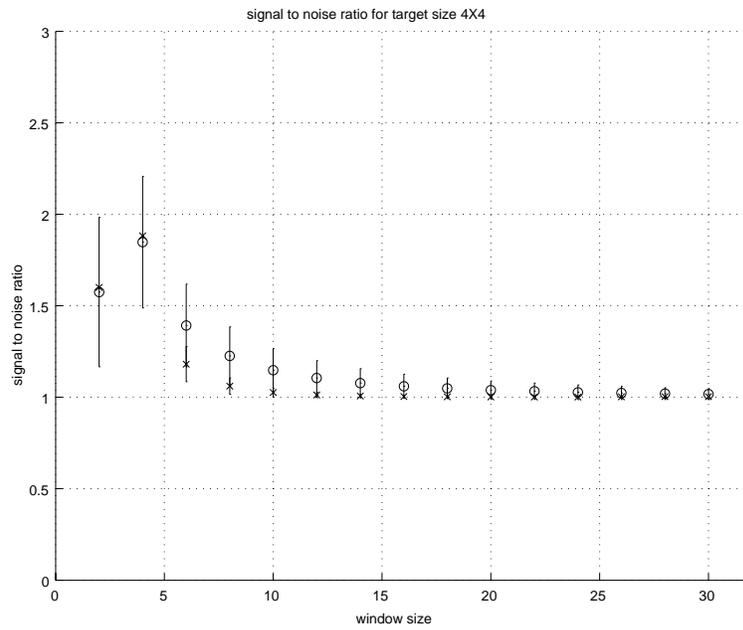


(a) ターゲットサイズ 2×2 における SN 比

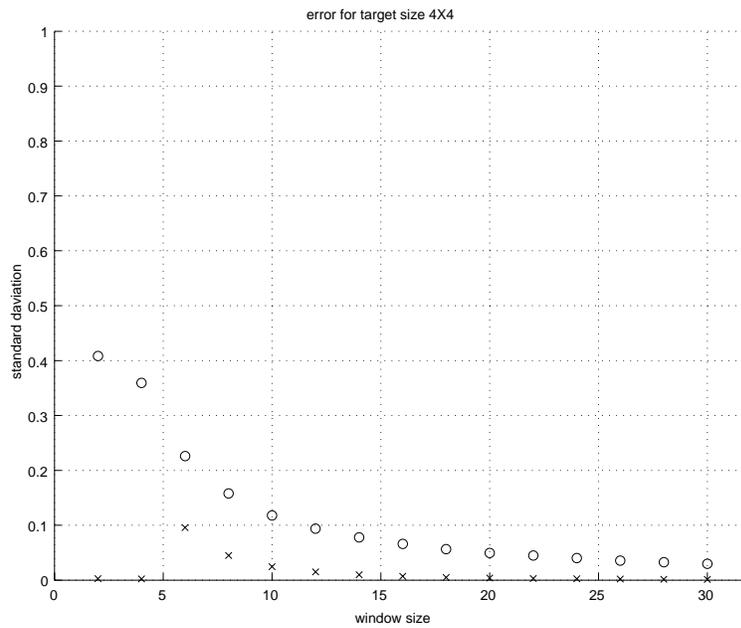


(b) ターゲットサイズ 2×2 における SN 比の誤差

Figure 4.3: ターゲットサイズ 2×2 における SN 比とその誤差

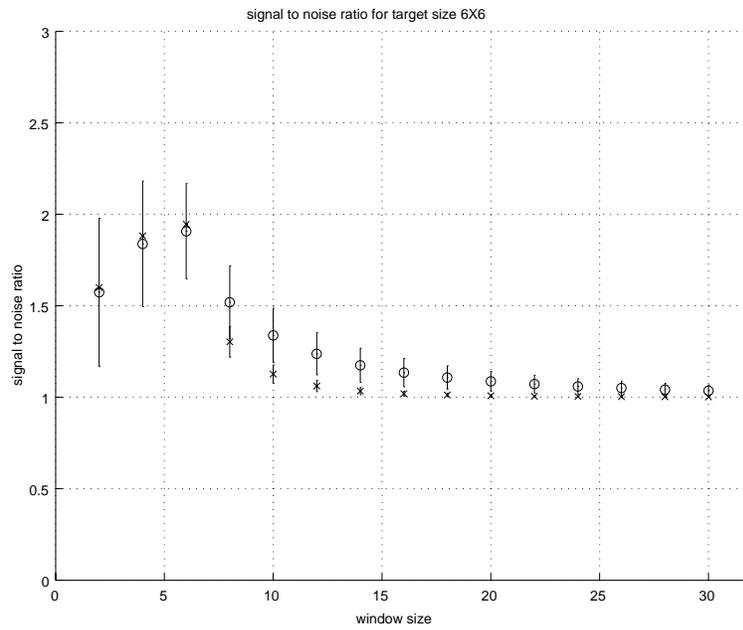


(a) ターゲットサイズ 4×4 における SN 比

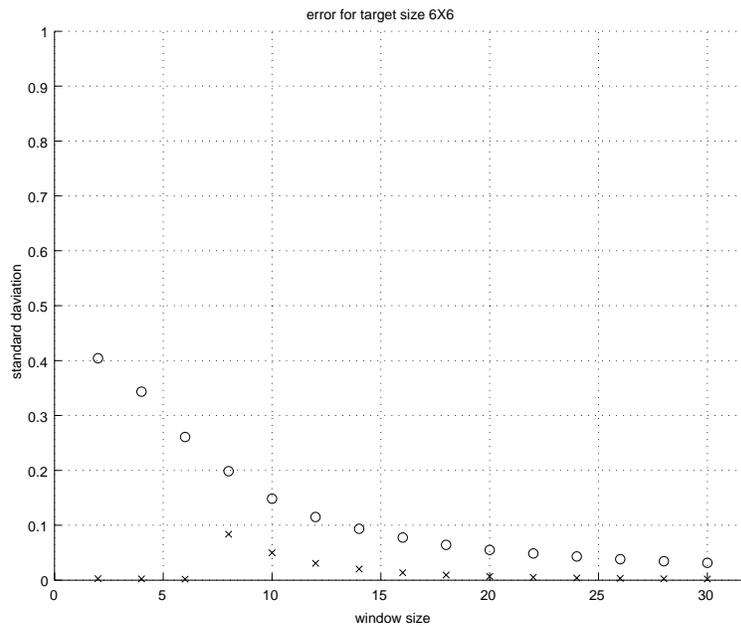


(b) ターゲットサイズ 4×4 における SN 比の誤差

Figure 4.4: ターゲットサイズ 4×4 における SN 比とその誤差

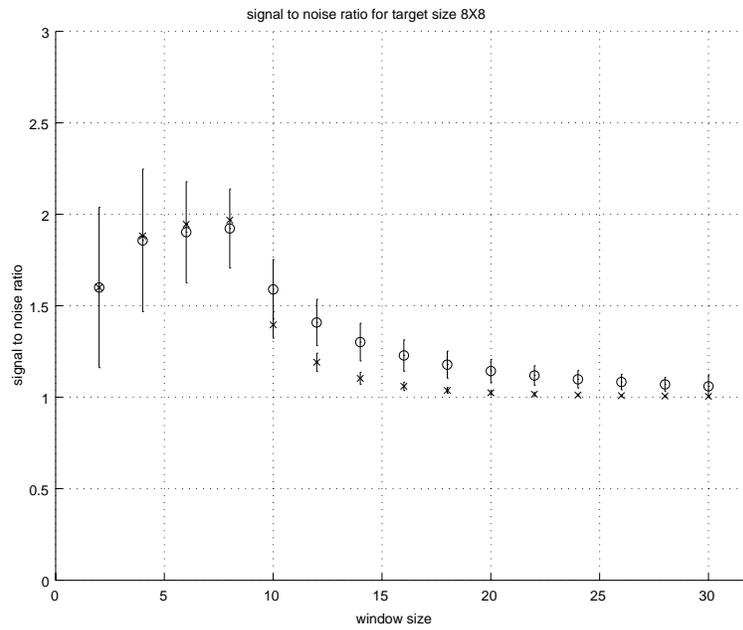


(a) ターゲットサイズ 6×6 における SN 比

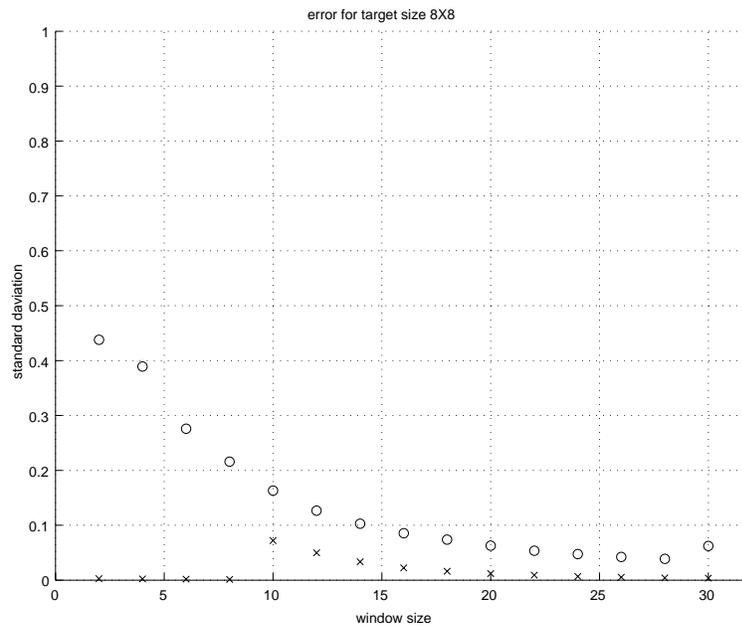


(b) ターゲットサイズ 6×6 における SN 比の誤差

Figure 4.5: ターゲットサイズ 6×6 における SN 比とその誤差

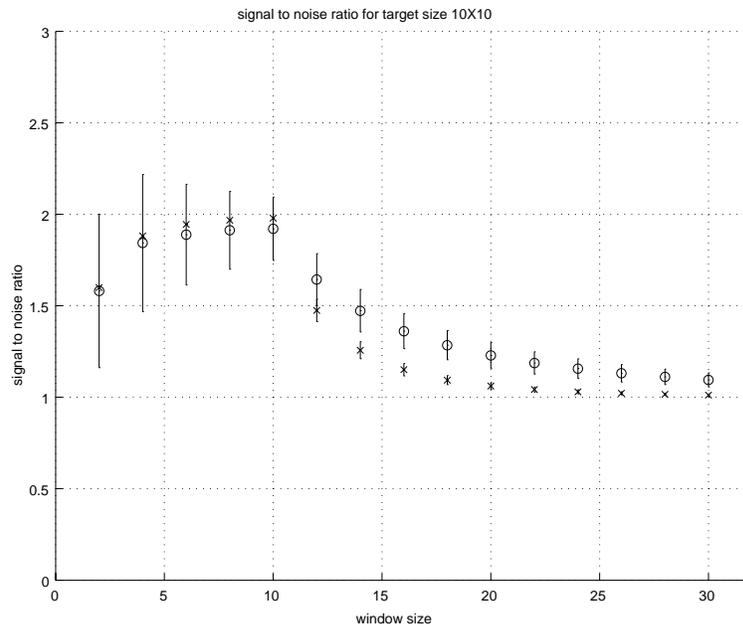


(a) ターゲットサイズ 8×8 における SN 比

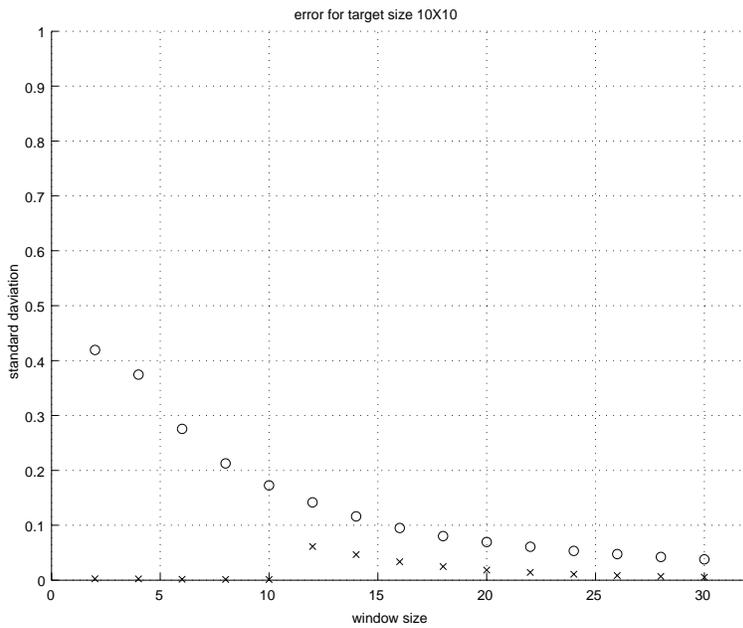


(b) ターゲットサイズ 8×8 における SN 比の誤差

Figure 4.6: ターゲットサイズ 8×8 における SN 比とその誤差

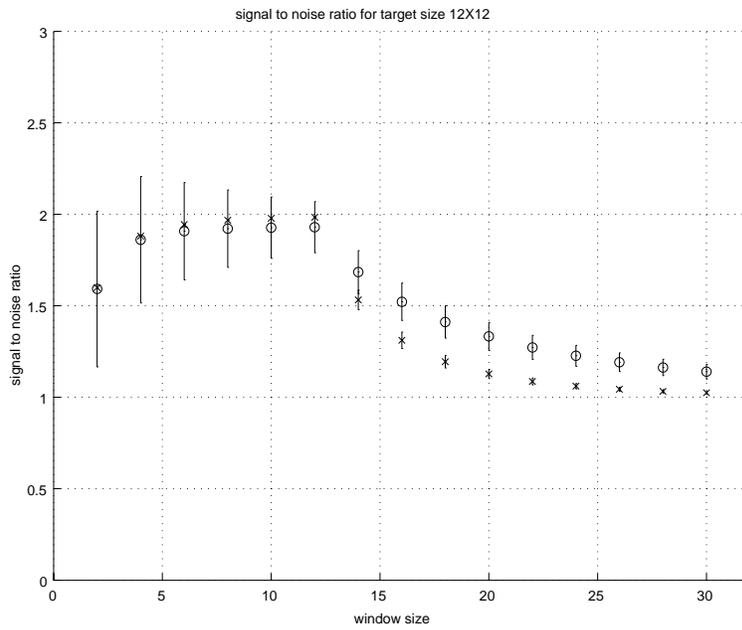


(a) ターゲットサイズ 10×10 における SN 比

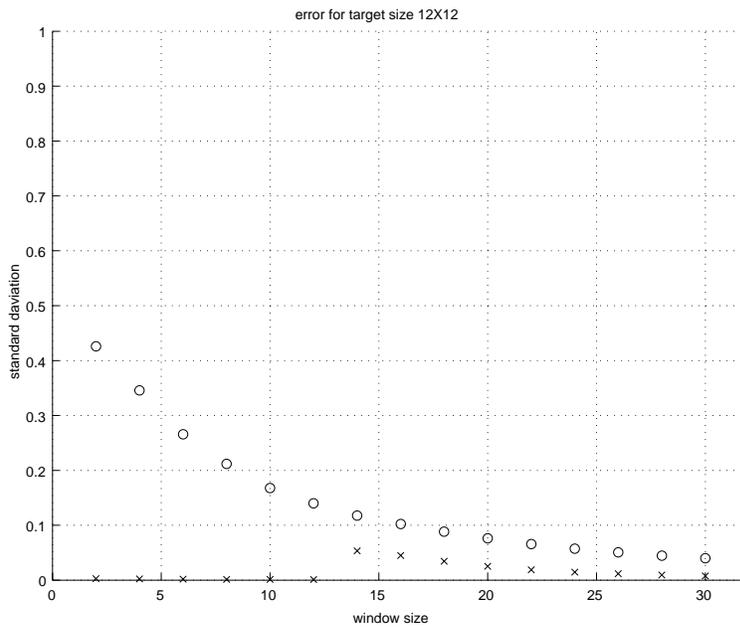


(b) ターゲットサイズ 10×10 における SN 比の誤差

Figure 4.7: ターゲットサイズ 10×10 における SN 比とその誤差

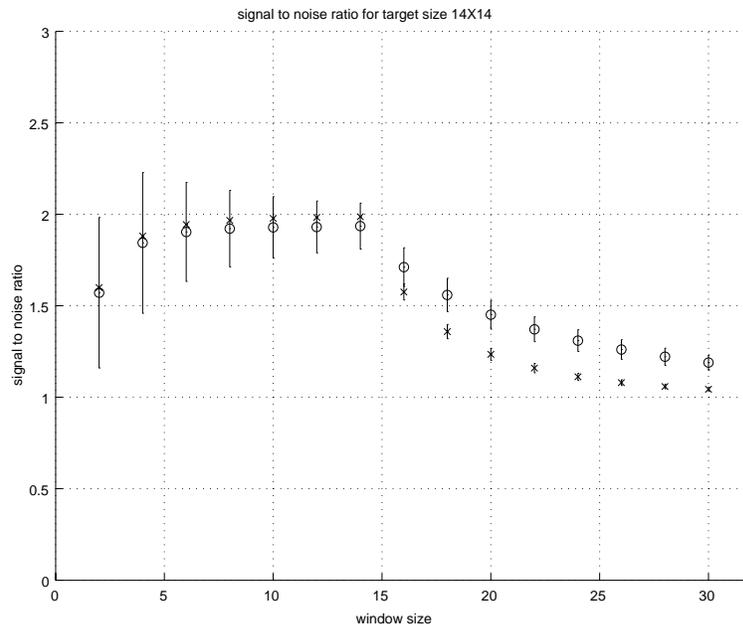


(a) ターゲットサイズ 12×12 における SN 比

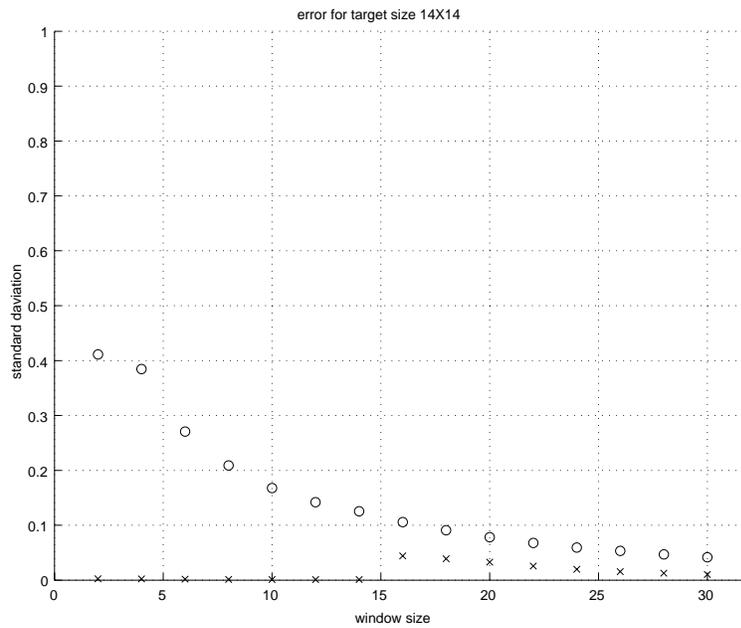


(b) ターゲットサイズ 12×12 における SN 比の誤差

Figure 4.8: ターゲットサイズ 12×12 における SN 比とその誤差

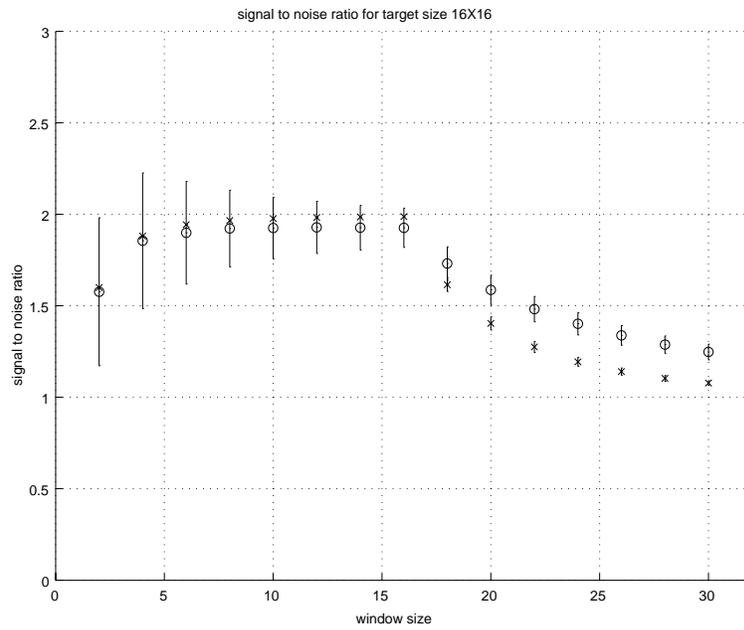


(a) ターゲットサイズ 14×14 における SN 比

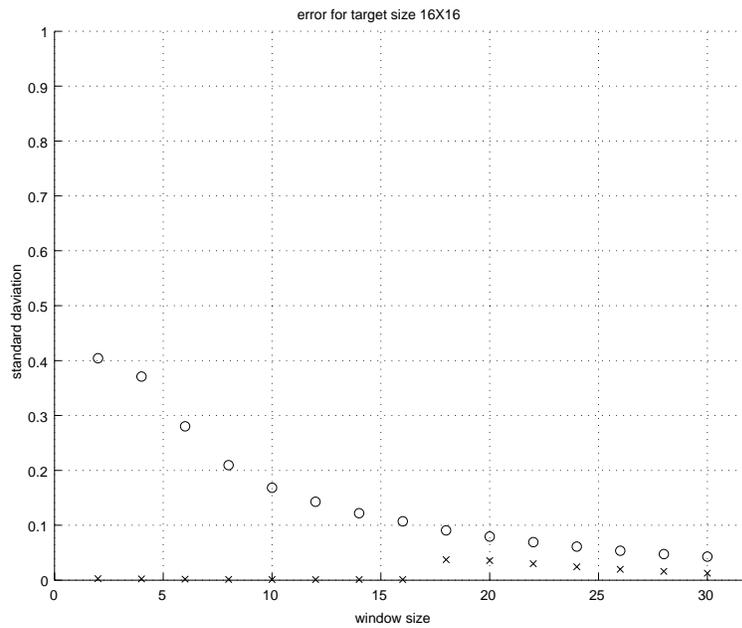


(b) ターゲットサイズ 14×14 における SN 比の誤差

Figure 4.9: ターゲットサイズ 14×14 における SN 比とその誤差

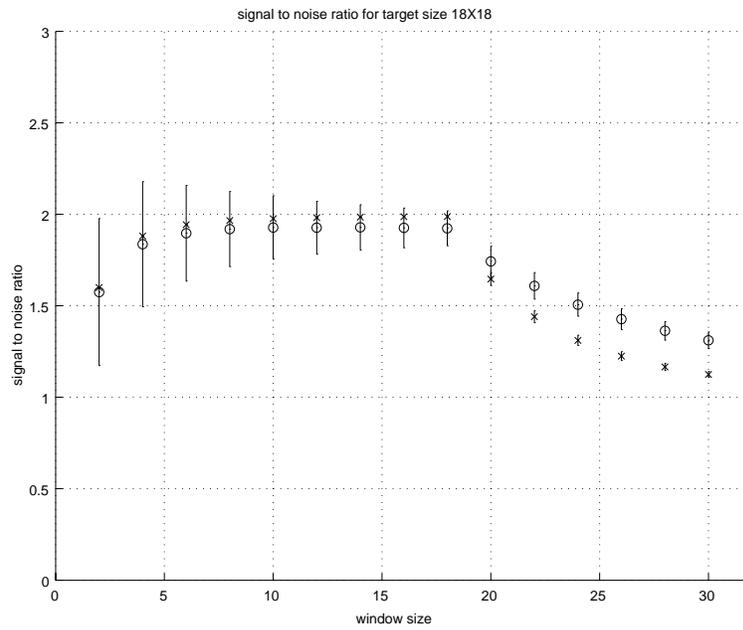


(a) ターゲットサイズ 16×16 における SN 比

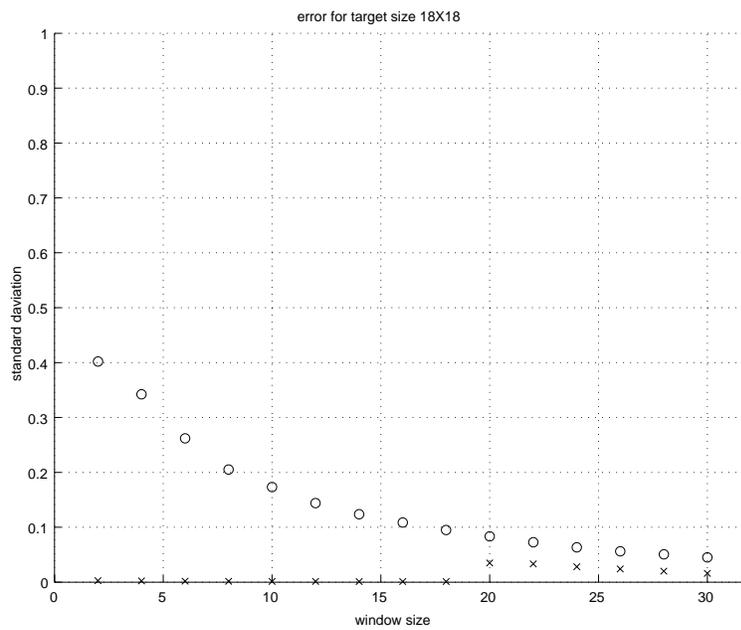


(b) ターゲットサイズ 16×16 における SN 比の誤差

Figure 4.10: ターゲットサイズ 16×16 における SN 比とその誤差

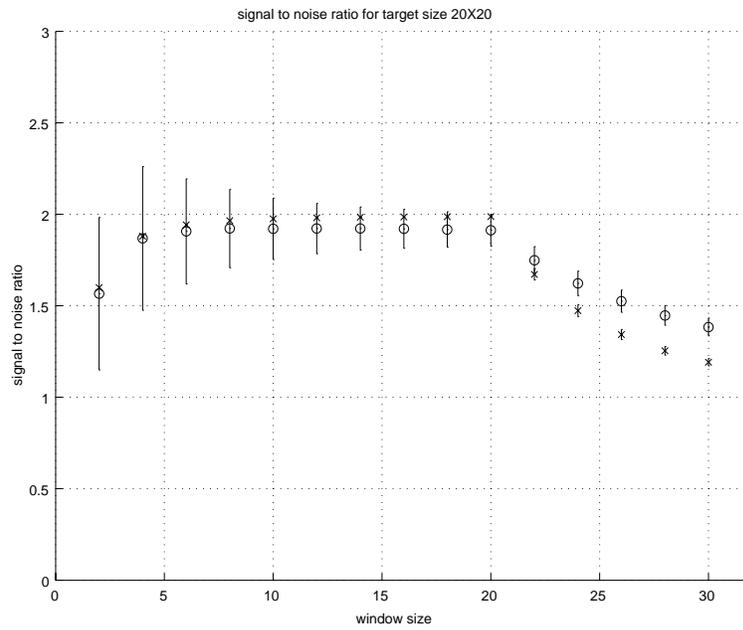


(a) ターゲットサイズ 18×18 における SN 比

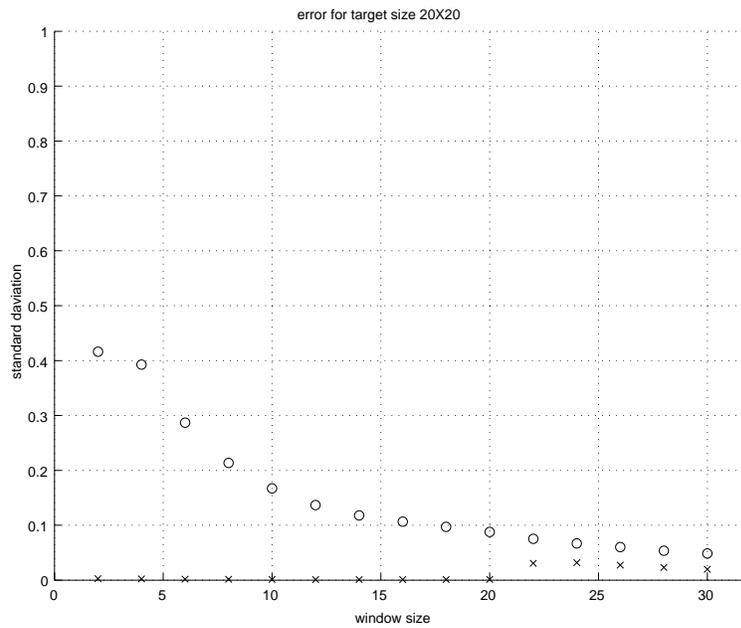


(b) ターゲットサイズ 18×18 における SN 比の誤差

Figure 4.11: ターゲットサイズ 18×18 における SN 比とその誤差



(a) ターゲットサイズ 20×20 における SN 比



(b) ターゲットサイズ 20×20 における SN 比の誤差

Figure 4.12: ターゲットサイズ 20×20 における SN 比とその誤差

### 4.3 結果

Figure 4.3 ~ Figure 4.12 のグラフから、

- ・ 強度画像と複素画像の SN 比の推移は、切り出すサイズがターゲットのサイズと同一になるまで極めて似た推移となる
- ・ ターゲットのサイズを切り出すサイズが超えてしまうと、SN 比は強度画像の方が複素画像を上回る
- ・ 全てのターゲットサイズの対して複素画像 ( × ) の方が強度画像 ( ) よりも SN 比の誤差が小さい

以上のような結果を得た。特筆すべき点は、複素画像を用いた処理ではターゲットサイズが  $6 \times 6$  以下であっても、高精度でターゲットの検出が可能なことである。しかし、 $2 \times 2$  ではその SN 比そのものの誤差は少なくとも、ノイズ部分の相関値は相関要素が少ないために高く、ほとんど検出は困難であると考えられる。

また、ターゲットのサイズを切り出すサイズが超えてしまうと極端に SN 比が落ちてしまう。これは、切り出すサイズが大きくなることでターゲット以外のノイズ部分にまで相関範囲が及び、相関性の低い情報が含まれてターゲットの相関値が減少してしまうためである。一方、強度の SN 比の誤差が高いのは、相関処理の要素が少なすぎるためである。

これらのことより、総合的に評価をすると、複素画像を使った相関処理のターゲット検出は強度画像よりも能力が高いといえる。

# 第5章 スライド・ルック処理による波の相関時間

2章において、動きのない海面の散乱面をホワイトノイズ近似によって記述した。そして、合成時間を一部重複させた強度画像による相互相関は、負の指数関数に似た減衰をすることを確かめた。ここでは、実際に観測されたデータを用いてスライド・ルック処理をし、その画像間で任意の散乱面における相関値の変化を調べた結果について述べる。

## 5.1 スライド・ルック処理

はじめに、本研究で行ったスライド・ルック処理について述べる。尚、観測地域、衛星等の詳細については次章で述べることとする。

本研究では Radarsat の S1 モードによって観測されたデータを、汎用 SAR 画像再生ソフトウェア「PulSAR」にて画像を生成した。

シングルルックにおけるドップラーバンド幅を 1000Hz にし、各ルックのバンド幅を 500Hz に設定した。また、各ルック間の中心周波数の差は 50Hz にした。時間に換算すると、式 (2.20) より

$$\Delta t = \frac{\lambda R \Delta f}{2V^2} \quad (5.1)$$

が得られる。ここで、 $\Delta t$  は各ルック間の時間差、 $\lambda$  は波長、 $R$  はスラントレンジ距離、 $\Delta f$  は中心周波数の差、 $V$  はプラットフォームの速度である。この式 (5.1) から、シングルルックの積分時間は約 0.56 秒、各ルックの積分時間は約 0.28 秒、各ルックの時間差は約 0.028 秒である。以上をまとめたものを Table 5.1 として示す。

使用データ	Radarsat S1 モード	
	周波数 (Hz)	時間幅 (s)
ドップラーバンド幅	1000	0.561
サブドップラーバンド幅	500	0.281
各ルックの差	50	0.028

Table 5.1: スライド・ルック処理のパラメータ

ソフトウェアによる画像の生成では、周波数領域で計算を行う。ドップラー・バンド幅の中心を 0Hz とし、 $\pm 250\text{Hz}$  の間で 500Hz のサブドップラーバンド幅をもったルックを 50Hz ずつ差をとり、画像を生成する。本研究ではこのようにして生成した 11 の強度画像をデータを使用している。以下にスライド・ルック処理のプロセスを表した図を Figure 5.1 に示す。

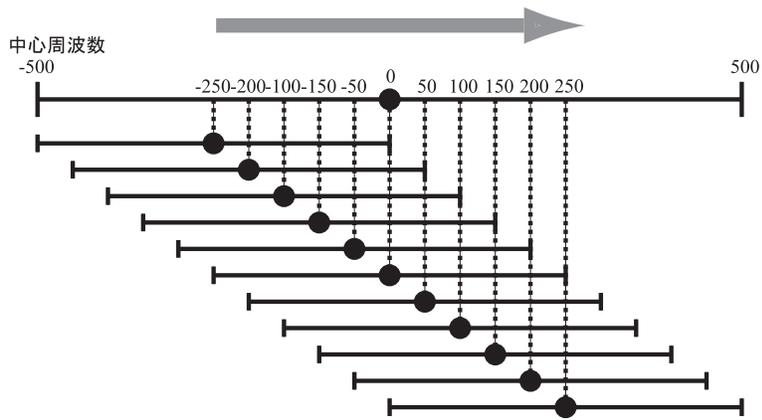


Figure 5.1: スライドロック処理のプロセス

## 5.2 陸面と海面の相関時間

PulSAR によって生成された観測データから、各ルック間の差を増やすことで、時間の経過と共に任意のエリアの相関値がどのように変化するかを調べた。この節では、その算出結果と考察について述べる。

### 5.2.1 任意のエリアにおける相関の推移

本研究で相関値の変化を調べたエリアを Figure 5.2 に示す。

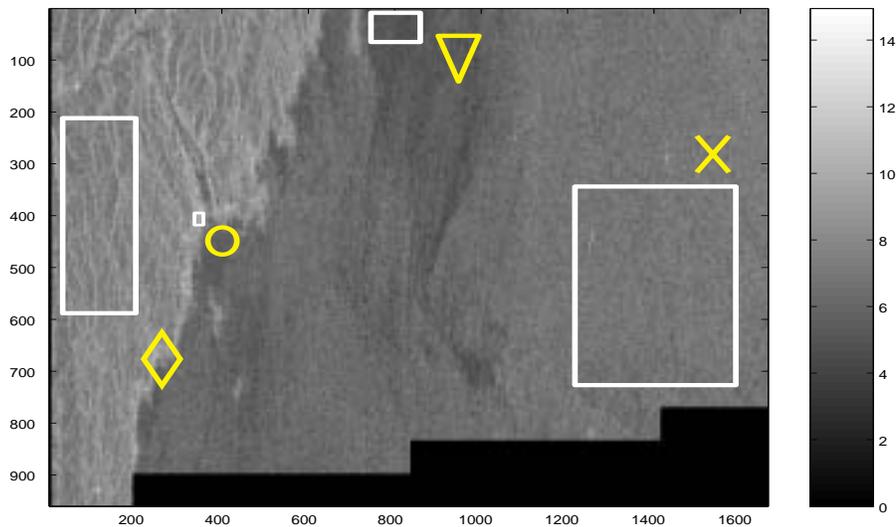


Figure 5.2: 相関変化を調べたエリア

選択したエリアは、強度値のそれぞれ

1. 強度の強い陸面 ( )
2. 強度の弱い陸面 (◇)

3. 強度の強い海面 (×)

4. 強度の弱い海面 (▽)

の四つである。上記のエリアで算出された相関値の変化を表したグラフを Figure 5.3 に示す。

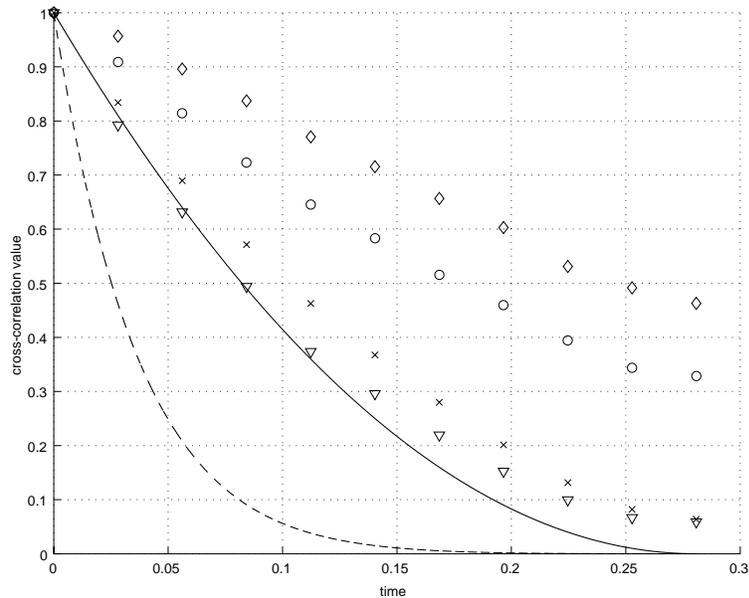


Figure 5.3: 任意のエリアでの相関値の推移

Figure 5.3 のグラフより、移動することのない陸面は海面よりも高い相関値で推移をしている。中でも、強度が強いエリアでは、強度の弱いエリアを相関値が上回る結果を得た。しかしながら、陸面の観測エリア (○, ◇) は海岸沿いで起伏の激しい地形をしているので、後方散乱は散乱面の幾何学的な影響を受けやすい。例えば、レイオーバーなどにより、後方散乱は変化する。

一方、海面 (×, ▽) は散乱面の形状が時間に依存しているので、当然陸面よりも相関値が低く推移する。だが、実線で示した“ 時間変化がない散乱面の理論値 ”を、“ 時間変化のある海面の相関値 ”が上回っている。続いて、このことに対する考察をする。

### 5.2.2 考察

海面の状態は動きの有無と波の高さの要素に対して、1 波が低く (さざ波) 動きが無い、2. 波が低く (さざ波) 動きが有る、3. 波が高く動きが無い、4. 波が高く動きが有るこれら四つの場合に分類できる。それぞれの状況における後方散乱の特徴について以下に述べる。

#### 1. 波が低く (さざ波) 動きが無い

後方散乱の振幅は相関性がなく、位相はランダムに変化をする。つまり、このような画像では点散乱体がガウス統計に従い存在し、理論的にホワイトノイズ近似を満足するので、空間的には相関していない散乱場である。

#### 2. 波が低く (さざ波) 動きが有る

後方散乱の振幅は空間的にランダムに変化するので、相関性はない。一方、位相は時間的にラ

ランダムに変化をする。このような散乱面では前述 1 の場合に加えて位相の時間的な相関要素が加わるため、相関性は短い時間で保たれる。つまり、空間的にも時間的にもランダムに変化をするため、このような画像では点散乱体がガウス統計に従って存在し、理論的にホワイトノイズ近似を満足するので、空間的にも時間的に相関性のない散乱場である。

### 3. 波が高く動きが無い

後方散乱の位相はランダムな変化をするものの、振幅には空間的な相関性が生じる。従ってこのような画像では点散乱体が非ガウス統計として存在し、ホワイトノイズ近似を満足しない。つまり、海面には空間的に相関性のある散乱場である。

### 4. 波が高く動きが有る

後方散乱の位相は海面の時間的な変化により、2 と同様のより短い時間で相関性が保たれる。一方、振幅は 3 と同様で、一様でないが空間的な相関性が残る。そのため、このような画像では点散乱体が非ガウス統計として存在し、ホワイトノイズ近似を満足しない。従って、時間的には短い相関時間ではあるが、空間的には相関性が残っている散乱面である。

尚、この考察を簡潔に表した図を Figure 5.4 に示す。

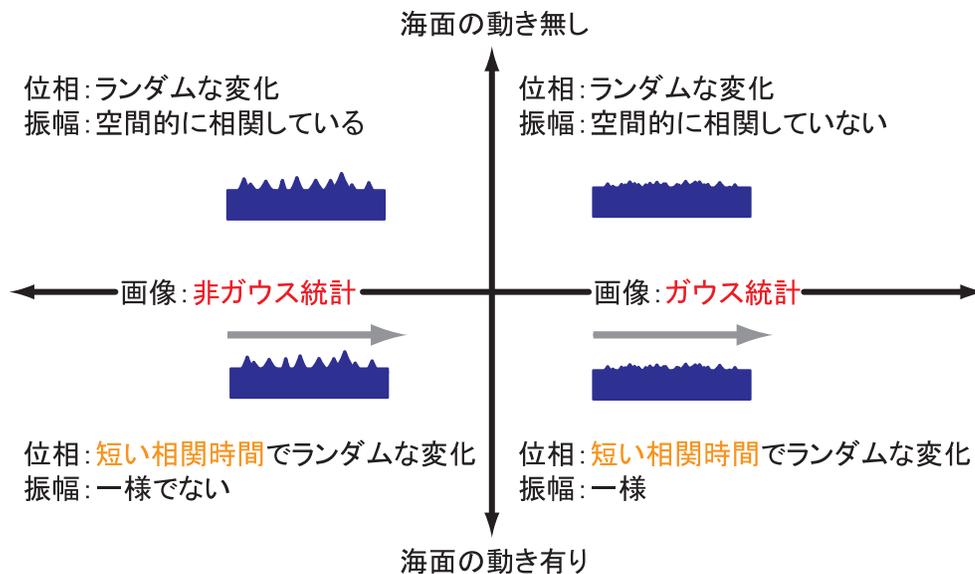


Figure 5.4: 海面の状態と後方散乱

1~4 の考察から、実データの海面は動きが有るので、上記の分類では 2 もしくは 4 の場合と考えられる。しかし、実際には、時間的な変化（時間的な相関性）を考慮しない理論値よりも上回っていることから、4 の状態であると考えられる。

## 5.3 結果

以上のことから、選択した任意のエリアには相関性の高い散乱体が存在していると考えられる。例えば、砕波や白波といった、比較的相関時間の長い散乱体が存在していると考えられる。

だが、強度値の低い海面においても動きの散乱面の相関値を上回った相関値の推移をしている。強度値が低く、散乱体の情報は少ないため、海面に対する相関性は低いはずであるが、このような結果になっ

たのは、受信時にシステムノイズ（サーマルノイズなど）が加わり、ノイズと共に相関処理しているためと考えられる。

## 第6章 Radarsat 画像への応用

この章では、はじめに本研究で用いたデータを取得した衛星 Radarsat についての詳細を述べ、実データのスプリット・ルック画像、スライド・ルック画像を用いた船舶の検出について、精度の比較とその結果を述べる。

### 6.1 Radarsat

Radarsat は、カナダがアメリカの協力の下、1995年11月4日に打ち上げられた極軌道衛星である。この衛星の大きな特徴は、用途に応じてビームモードを変化させることができ、分解能、観測幅、周期、入射角等の変更が可能なことである。特に観測幅が500kmにも及ぶSCANSARモードは、世界初の試みでもある。衛星の利用目的は、カナダ領の北極海を中心とした船舶の航行支援として、流氷分布のリアルタイムのモニタリングや、地下資源の探査、漁獲権の確保、大気汚染、雪氷、農林、森林、水資源のモニタリング、海上輸送のための北大西洋や北極海の冰山や海水監視など、その用途は多岐にわたる。また、今後は、Radarsat-2が打ち上げ予定である。

Radarsat は、使用する電磁波の波長がCバンド5.6cm(周波数:5.3GHz)で、垂直な偏波を送信し垂直な偏波を受信するHH偏波である。また、回帰日数は24日で高度798kmの上空を、対地速度約7km/sの速さで飛行する。

Table 6.1 に Radarsat の諸元を示す。

ビームモード	ビームポジション	入射角 (°)	地上分解能 (m)	観測範囲 (km)
FINE	F1-F5	37-48	10	50×50
STANDARD	S1-S7	20-49	30	1000×100
WIDE	W1-W3	20-45	30	130×130~165×165
Scan SAR Narrow	SN1-SN2	20-46	50	300×300
Scan SAR Wide	SW1	20-49	100	500×500
Extended High	H1-H6	49-59	25	75×75
Extended Low	L1	10-23	35	170×170

Table 6.1: Radarsat の諸元 (多彩な観測モード)

### 6.2 使用データ

本研究で使用したデータは、Radarsat のS1モードによって1998年10月29日に、三重県と和歌山県にまたがる紀伊半島の東、熊野灘の海域を観測したものである (Figure 6.1)。

海域には筋状の線が約三つあり、遠のくに従って線の間隔が広がりをしていないことから、内部波ではなく潮目であると推測される。また、沿岸部付近には約7隻の船舶の存在を確認した。この確認には航跡

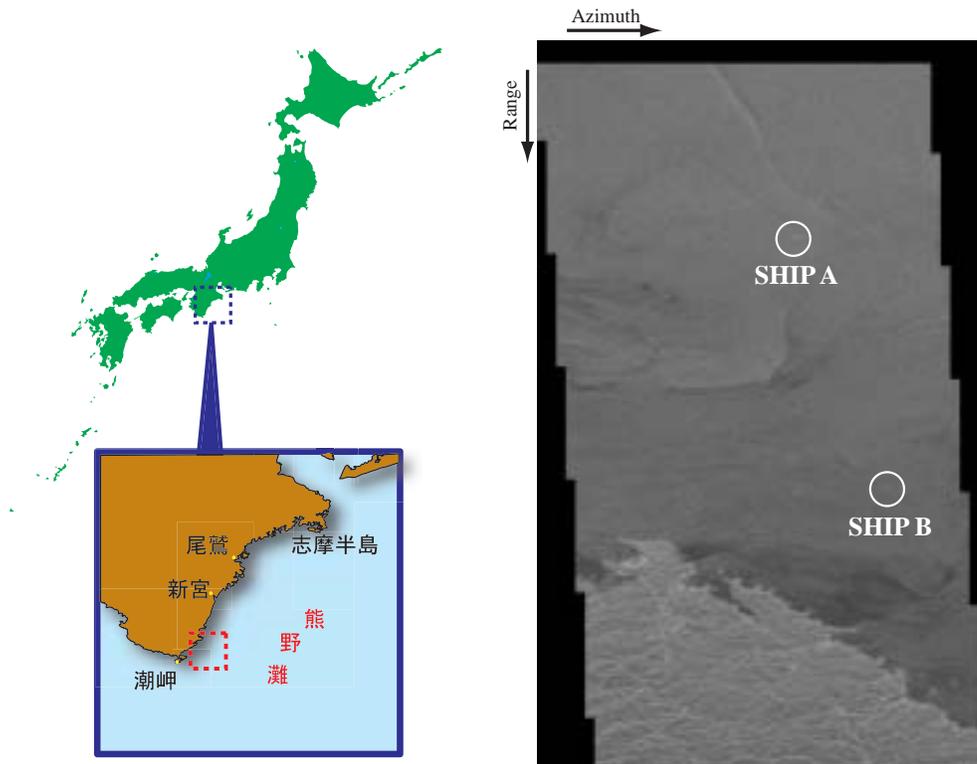


Figure 6.1: 観測域

を判断材料としている。

この観測域のうち で示す船舶 (SHIP A, SHIP B) を解析対象として選択した。

### 6.3 強度の低下方法

本研究は受信データに船舶の信号が海洋のノイズに埋もれてしまって、目視で確認できない状態を想定したものである。しかし、実際にはそのように船舶が写っていないデータの入手は困難であるため、人為的に船舶の部分の強度値を、ノイズレベルにまで低下させる作業を行った。強度値の低下は、突出した値のみを減衰させてしまえばターゲットの信号とは異なるものになってしまうので、式 (6.1) の方法で処理をする。

減衰は、

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\langle I_{noise} \rangle}{\langle I_{target} \rangle} \langle I_j \rangle \quad (6.1)$$

として算出する。ここで、 $j$  は船舶に相当するピクセルの位置を示し、 $I_{target}, I_{noise}$  はそれぞれ船舶とノイズに相当する部分のピクセルの強度値である。式 (6.1) はノイズ部分の強度値のアンサンブル平均と、船舶部分の強度値のアンサンブル平均の商を「減衰係数」とし、この減衰係数を船舶の強度値に乘じることで強度値を減衰をさせる。しかし、式 (6.1) で算出した減衰係数の値では、目視で確認できなくなるまで船舶の強度値が十分に低下しないので、実際には減衰係数  $\times 1/2$ 、もしくは減衰係数  $\times 1/3$  と、係数の値を細かく下げた値を乗じた。尚、この作業は目視にて船舶と思われるピクセルに対して処

理をしている。また、ルック間の時間差が短いことから船舶の移動はないものとし、中心周波数の異なる全ての画像に対して同位置にて減衰処理をした。

Figure 6.2 と Figure 6.3 に船舶の強度値の減衰前と減衰後の画像を示す。

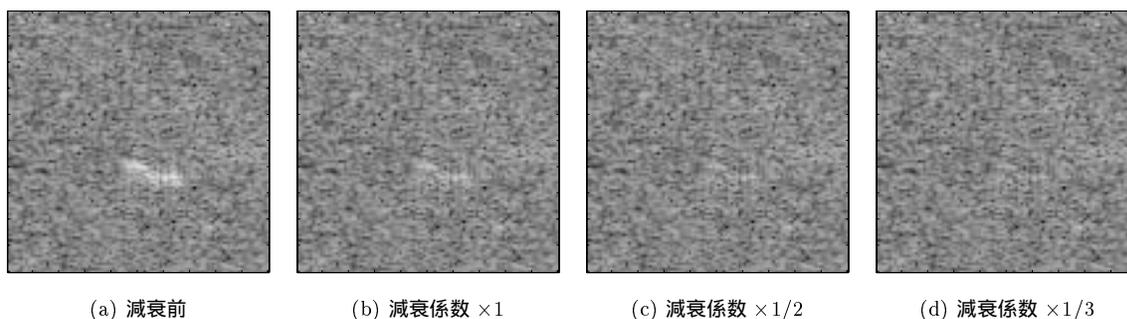


Figure 6.2: SHIP A 減衰前後

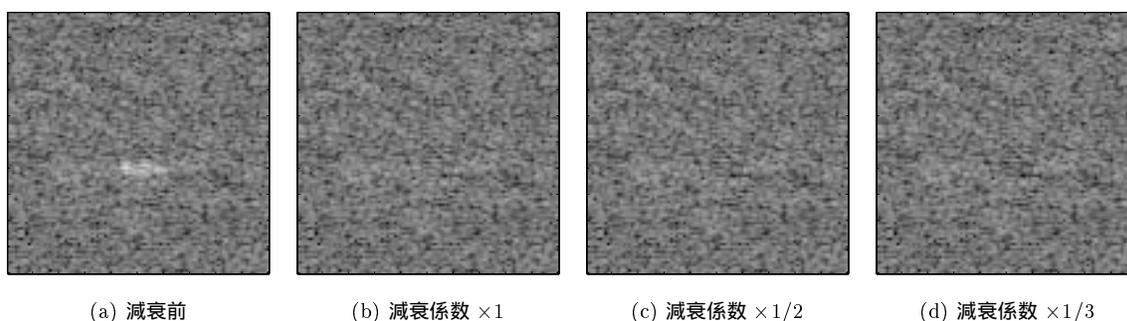


Figure 6.3: SHIP B 減衰前後

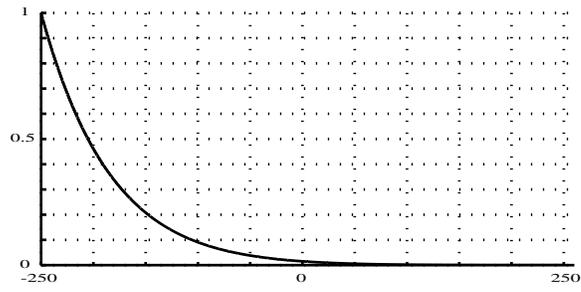
実際に使用した画像は、SHIP A が Figure 6.2(d) の減衰で、SHIP B が Figure 6.3(c) の減衰である。これらの画像がノイズレベルにまで十分低下した画像であると判断した。

## 6.4 スプリット・ルック画像とスライド・ルック画像の比較

スプリット・ルック、及びスライド・ルック処理により生成された画像を、さらに 6.3 で示した方法により船舶の強度値を低下させ、それらの画像間から相互相関を利用して船舶の検出を行った。そして、スプリット・ルック画像とスライド・ルック画像では、どちらが検出精度が高いのか、船舶と海面の相関値の平均を SN 比 (signal to noise ratio) として定量的な比較を行った。

### 6.4.1 相関画像生成プロセス

はじめに、スプリット・ルック、スライド・ルック画像を用いた相互相関画像の生成プロセスを Figure 6.4 と Figure 6.5 に示す。



相関値の推移

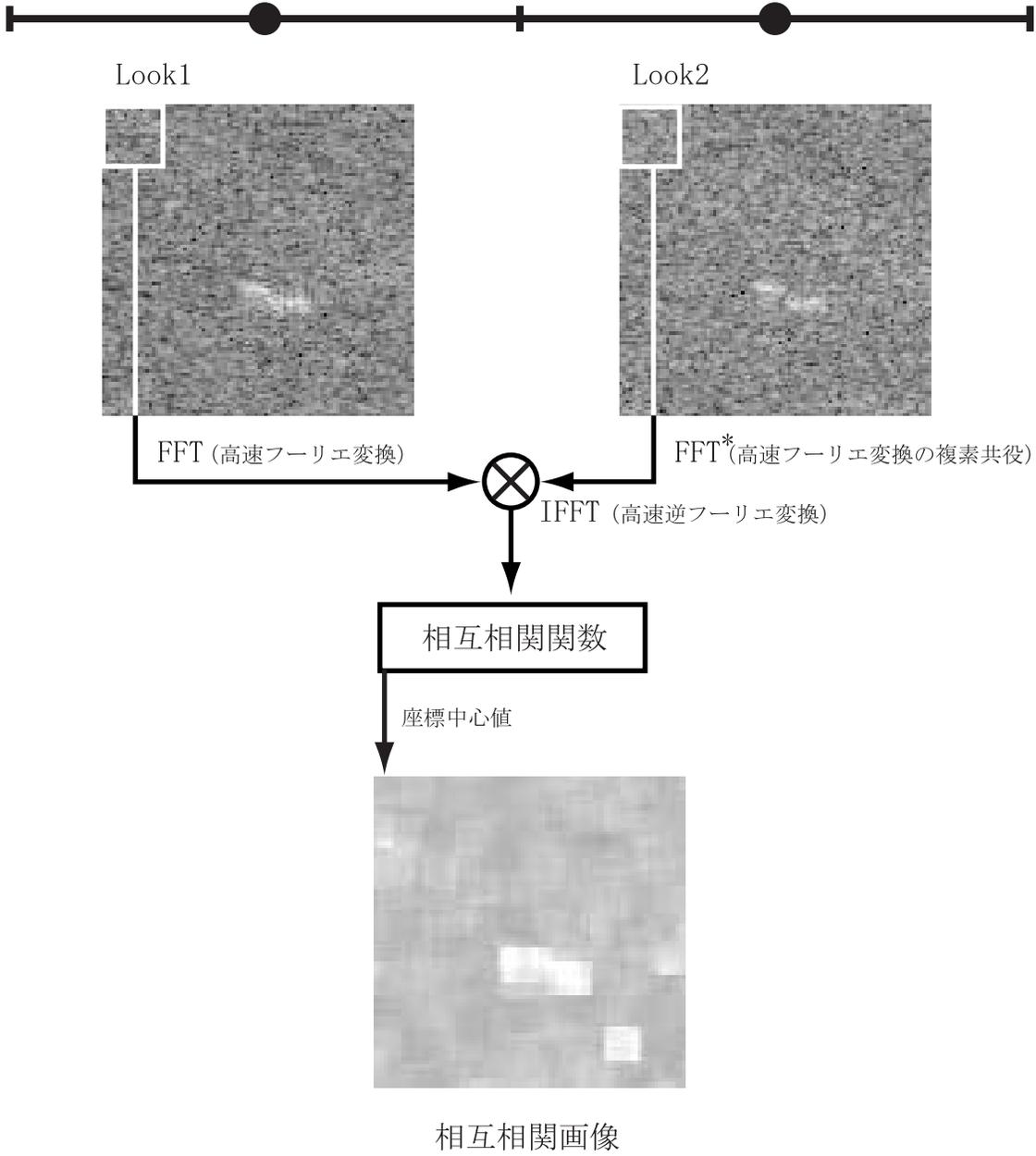


Figure 6.4: スプリット・ルック画像の相互相関画像の生成プロセス

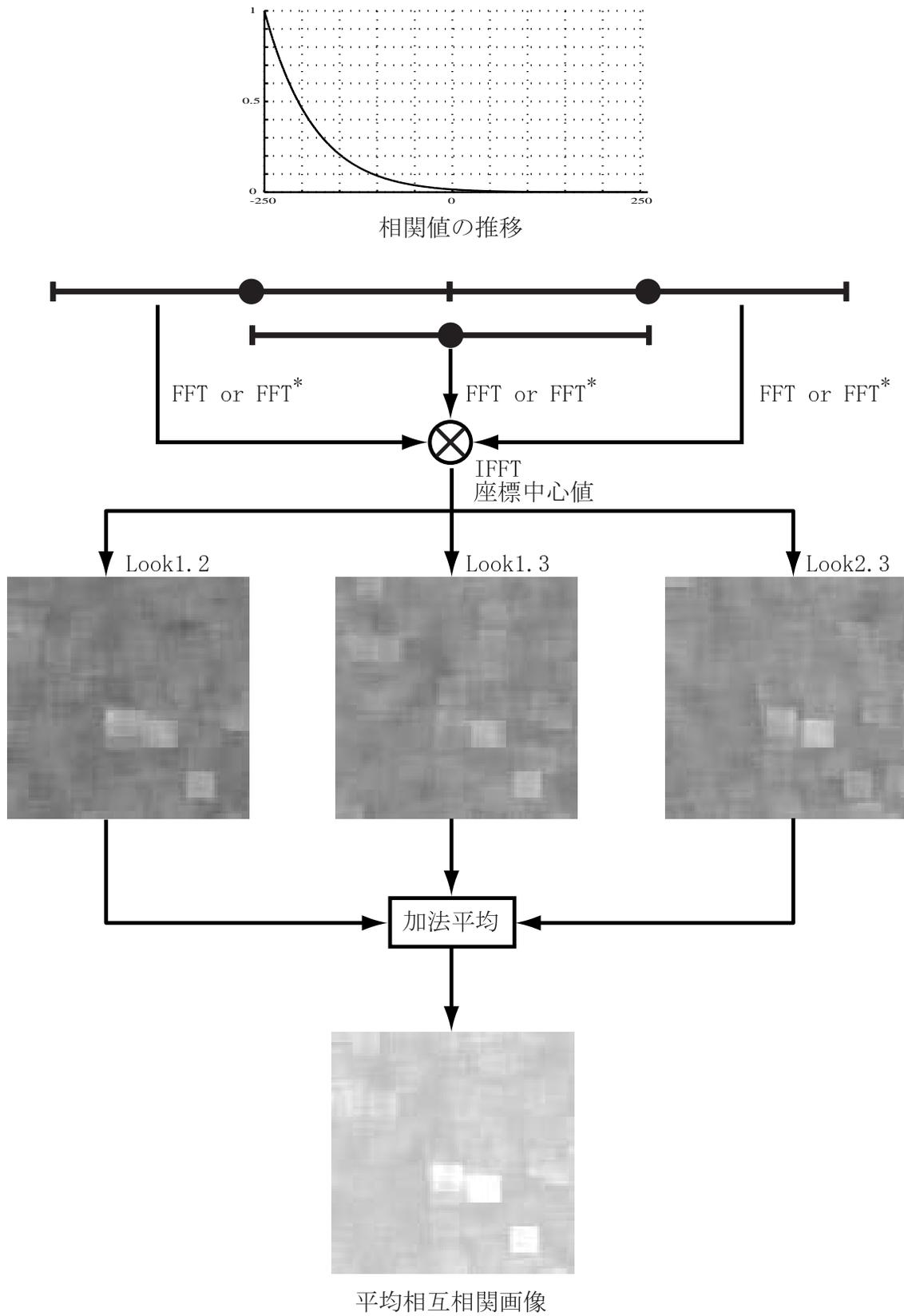


Figure 6.5: スライド・ルック画像の相互相関画像の生成プロセス

Figure 6.4 のスプリット・ルック画像による相互相関画像の生成プロセスでは、合成する開口を重複しないよう中心周波数が $-250\text{Hz}$ と $250\text{Hz}$ の画像を用いた。それらの画像間から任意の切り出しサイズ (moving window) で画像を切り出し、切り出した画像のフーリエ変換とフーリエ変換の複素共役を乗じ、さらに逆フーリエ変換をして相互相関関数を算出する。算出した相互相関関数の中心の値を新たに作製する画像のピクセル値とする。そして以上の手順を moving window を 1 ピクセルずつ移動させ、画像全体を処理し、相互相関画像を作製する。

Figure 6.5 のスライド・ルック処理による相互相関画像の生成プロセスでは、合成する開口をそれぞれ最も重複範囲が狭くなるように中心周波数が $-250\text{Hz}$ と $0\text{Hz}$ と $250\text{Hz}$ の画像を用いた。それぞれの画像の組み合わせでスプリット・ルック画像での手法を同様方法 (Figure 6.4) で各組み合わせの相互相関画像を作製する。最後に各相互相関画像の加法平均をとることで、平均相互相関画像を作製する。

Figure 6.6 に相互相関画像と平均相互相関画像を示す。両者を比較すると、スプリット・ルック処理

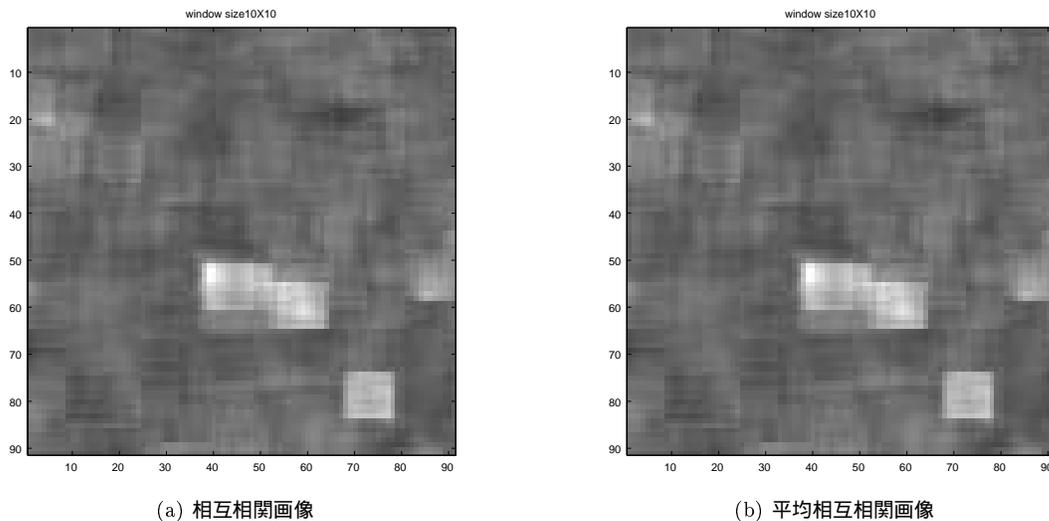


Figure 6.6: 相互相関画像と平均相互相関画像

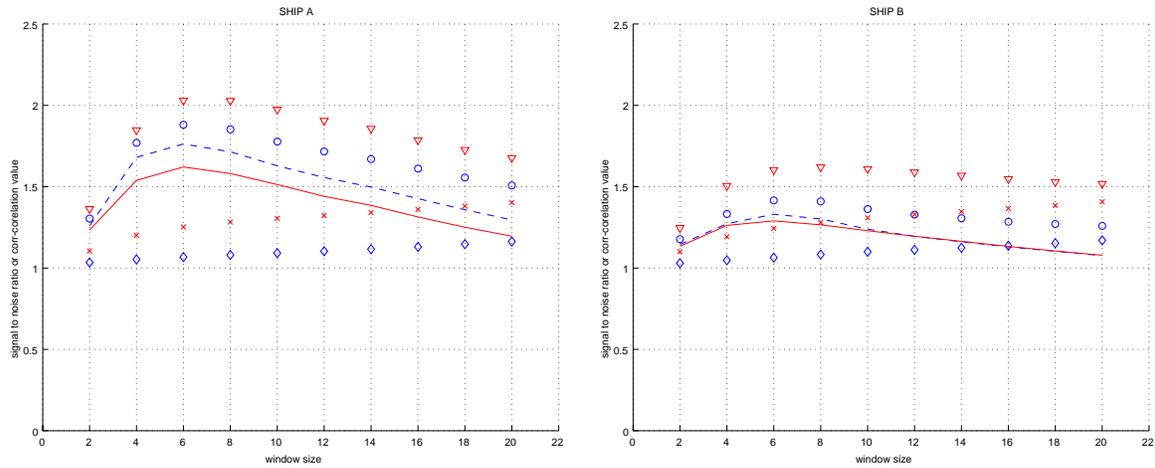
による相互相関画像は、船舶の相関値が低く、海面の相関値も低い。一方、スライド・ルック処理による平均相互相関画像は、船舶の相関値は高く、また海面の相関値も高くなる結果を得た。

#### 6.4.2 切り出すサイズの変化による SN 比

本研究では画像上に船舶が写っていない状況を想定している。従って、実際には観測される船舶の大きさはわからない。そこで、検出精度の良い最適な切り出す window のサイズを決定しなければならない。

Figure 6.7(a) と Figure 6.7(b) に切り出すサイズを変えることで、スプリット・ルックとスライド・ルック画像の検出精度を船舶と海面の SN 比により比較したグラフを示す。尚、相関画像において海面と船舶である判断は目視にて行った。

Figure 6.7 は縦軸は相関値及び SN 比、横軸にはウィンドウサイズを示している。また、実線はスライド・ルック処理の SN 比、破線はスプリット・ルック処理の SN 比を示し、 $\diamond$  はスプリット・ルック画像の相互相関画像における船舶部分と海面部分の相関値の平均で、 $\nabla$  と  $\times$  はスライド・ルック画像の平均相互相関画像における船舶部分と海洋部分の相関値の平均をそれぞれ示している。



(a) SHIP A における切り出しサイズを変化させた場合の SN 比の推移

(b) SHIP B における切り出しサイズを変化させた場合の SN 比の推移

Figure 6.7: スプリット・ルックとスライド・ルックの相関画像における切り出しサイズを変化させた場合の SN 比の推移

## 6.5 結果

Figure 6.7 の二つのグラフのから、スプリット・ルック画像の相互相関画像の SN 比が、スライド・ルック画像の平均相互相関画像の SN 比よりも高い推移をしていることがわかる。これは、前章の考察から、海面に比較的相関時間の長い散乱体が存在しているため、スライド・ルック画像では合成時間を重複した各ルック間に相関性が残っており、船舶検出の相関処理で相関性の残る海面の影響により、海面の相関値が高くなったためと考えられる。

また、切り出すウィンドウのサイズの増加と共に船舶部分の相関値の平均は減少し、海面部分の相関値は増加する傾向がある。船舶部分で平均の相関値が減少するのは、ウィンドウのサイズが船舶のサイズを超えてしまうことで、海面の相関処理に含むことになり、船舶自体の相関性が失われてしまうためである。一方、海面部分で平均の相関値が増加するのは、はウィンドウサイズが大きくなることで、相関処理の際に海面に存在する相関性のある散乱体が多く含まれることになり、相関が高くなるためと考えられる。従って、これら双方の作用により、ウィンドウサイズが大きくなるにつれて SN 比は低下する。

## 第7章 結論

本研究では、合成開口レーダによって観測された画像をスプリット・ルック処理、及び、スライド・ルック処理をし、時系列の画像間から、ターゲットが目視で確認が不可能な場合を想定し、画像間の相関関係を利用してターゲットの検出を試みた。そして、その検出の精度をターゲット部分とノイズ部分のSN比にて定量的に比較し、検出能力を確かめた。さらに、スライド・ルック画像から、観測面における相関性が時間の経過によってどのように変化するのかを確認した。また、SAR画像の再生で生成される複素画像と強度画像を用いたターゲットの検出のために、シミュレーションを行いターゲットとノイズのSN比で検出精度の定量的な比較を行った。

以下に本研究におけるまとめを記す。

### 7.1 本研究のまとめ

- ・ 強度画像よりも複素画像の方が高精度なターゲット検出が可能  
複素画像に含まれる位相部分も相関処理の指標とすることで、一つの指標しか持たない強度画像よりもSN比の誤差が少なく、小さなターゲットでも検出が可能であったことから、複素画像の相関関係を用いることでより高精度でのターゲット検出が可能である。
- ・ スライド・ルック画像から相関時間を調べた  
中心周波数を細かく変化させた画像間から任意のエリアの相関値を算出し、陸地は高い相関性をもち、海面は低い相関性であることを確かめた。しかし、海面は空間的な相関性が残っていたため理論値よりも高くなった。
- ・ スプリット・ルック画像とスライド・ルック画像による船舶の検出は使い分けが必要  
スライド・ルック画像による船舶の検出は、海面に相関時間の長い散乱体が存在している場合、その散乱体の相関性も含めた処理になってしまうので、検出能力がスプリット・ルック画像よりも悪くなってしまう。従って、海面の状態に応じて使い分けなければならない。実際には、ほとんどの海面ではある程度の空間的相関性のある状態が考えられるので、スプリット・ルック画像による船舶の検出の方が有効であると考えられる。
- ・ 使用するデータによって画像間の相関性が異なる  
本研究ではRadarsatのデータを使用した。Radarsatは波長がCバンド5.6cmで、合成時間が短い。短い波長は散乱体の幾何学的な影響を受けやすく、合成時間の短さから観測対象面の時間変化が十分ではないと考えられる。従って、観測対象・目的に沿ったデータを使用すべきである。

### 7.2 今後の展開

- ・ 船舶が目視で確認できないデータでの本手法の適応  
本研究では船舶の強度値を人為的に低下をして検出を行った。実際のデータではどの程度の検出

能力を持つのか確認しなければならない。

- 実際の複素画像を用いた本手法の適応  
今回の研究ではシミュレーションによる検出精度の確認しか行っていない。そこで、実際の複素画像において適応しなければならない。
- L-バンド合成開口レーダ、JERS-1 での海面の相関時間の測定  
日本の衛星 JERS-1 は、L-バンド（波長 23.5cm）を使っており、合成時間は約 2 秒と Radarsat と比べて長い。従って、比較的長い合成時間であるため、JERS-1 データは海面の時間変化を十分に反映していると考えられる。

# 付録A シミュレーション相互相関画像

本研究でシミュレーションより算出された相互相関画像を示す。

## A.1 強度相互相関画像

Figure A.1 ~ Figure A.10 に本研究で算出された強度画像の相互相関画像を示す。

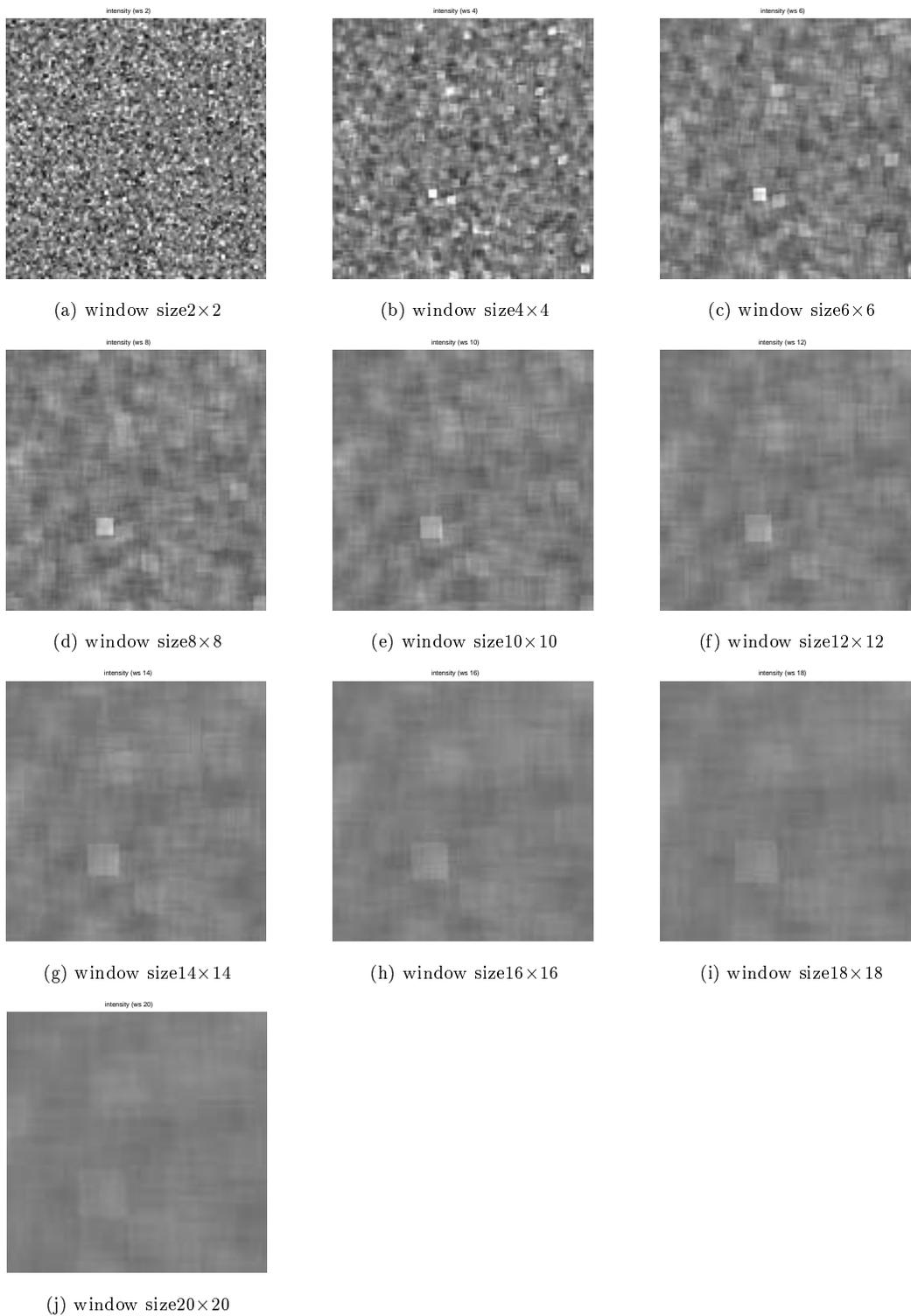


Figure A.1: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $2 \times 2$

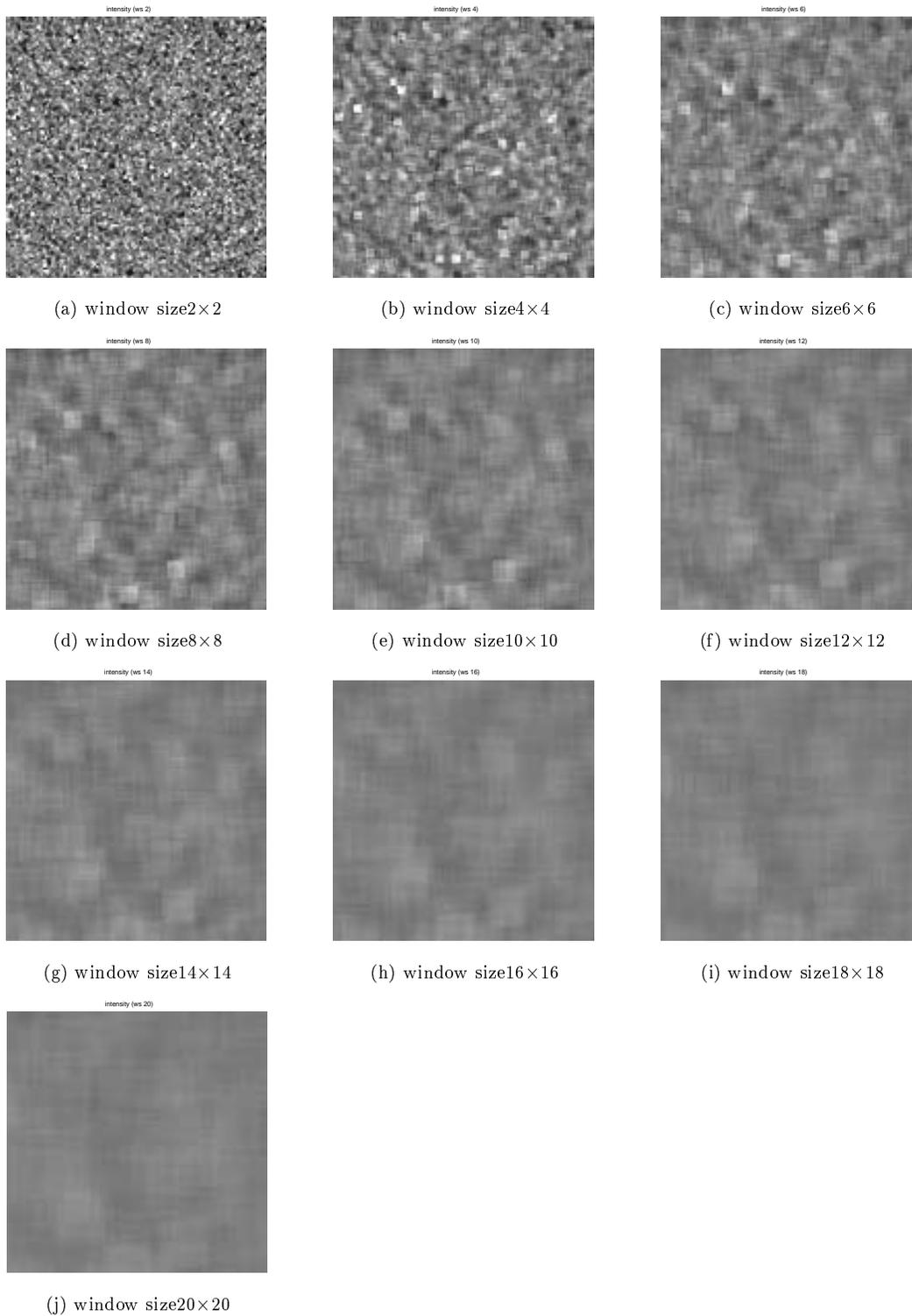


Figure A.2: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $4 \times 4$

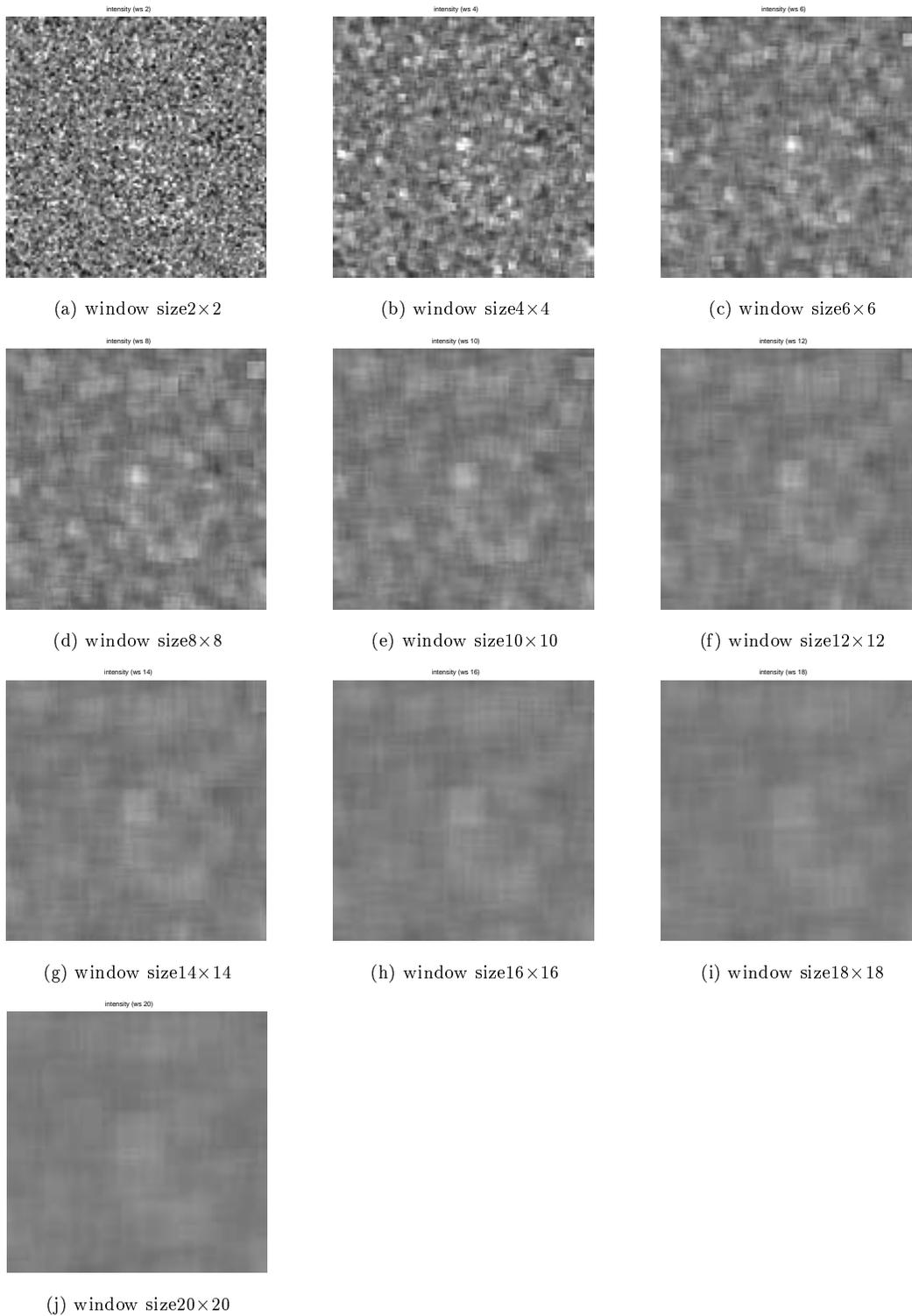


Figure A.3: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $6 \times 6$

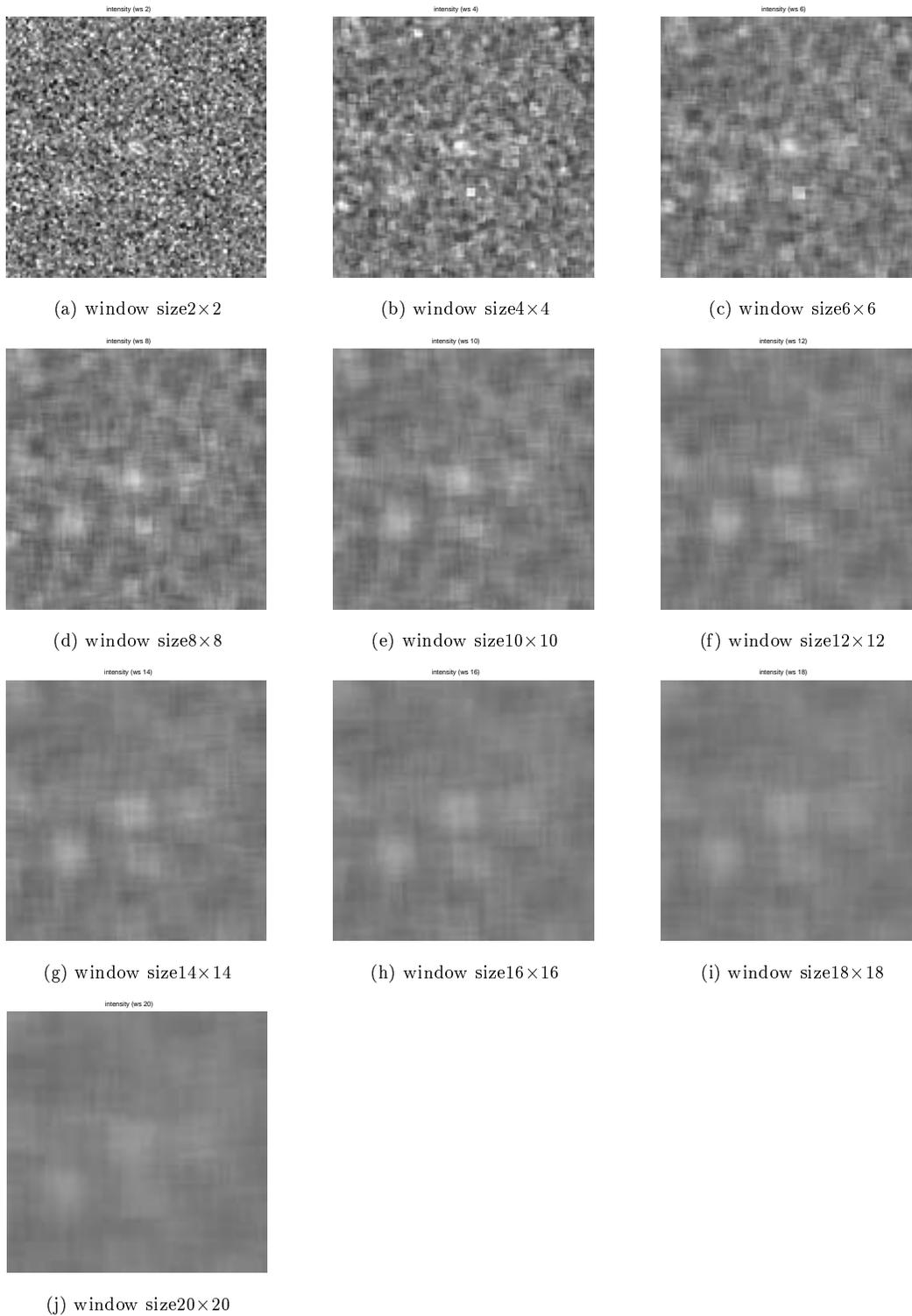


Figure A.4: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $8 \times 8$

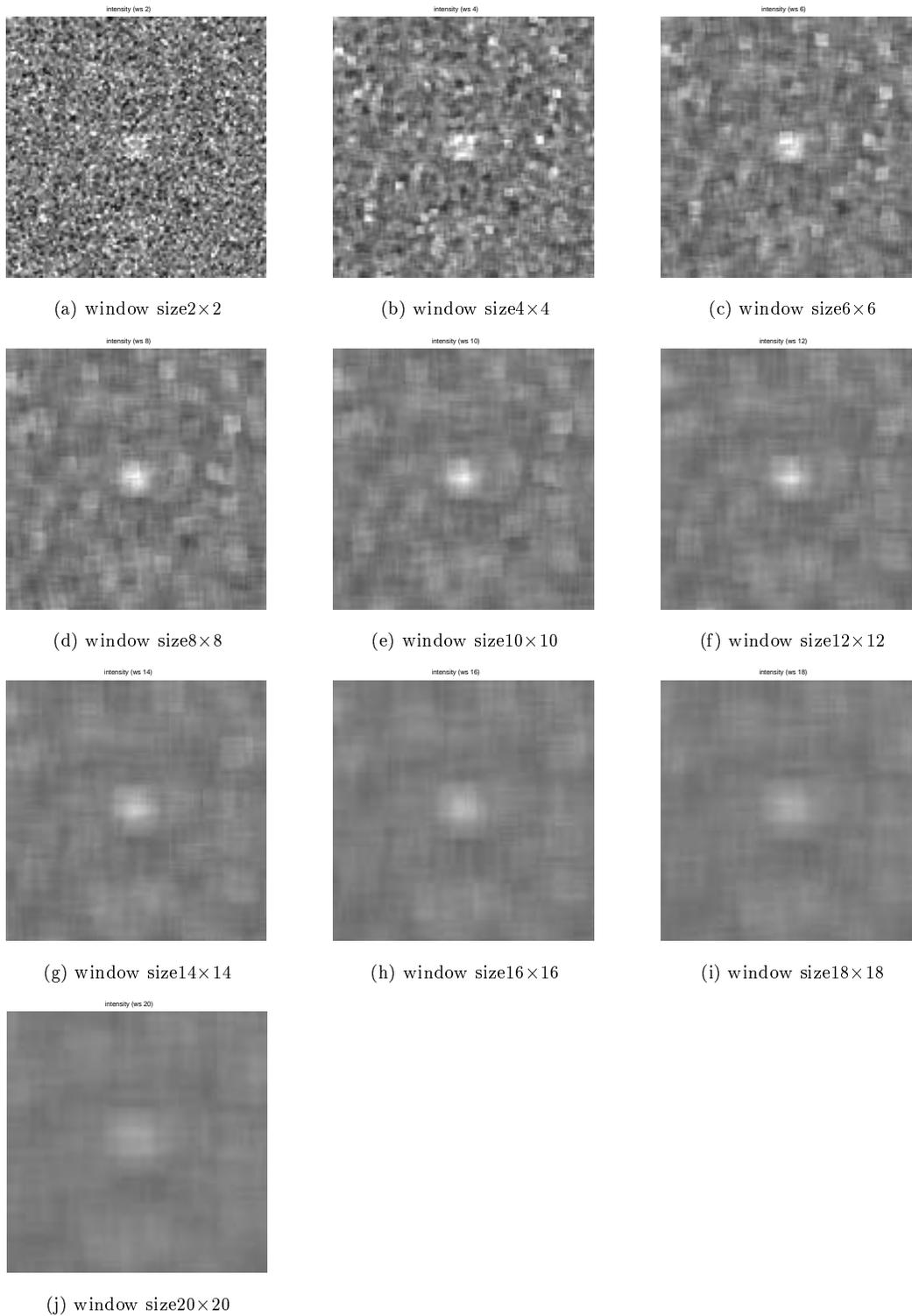


Figure A.5: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $10 \times 10$

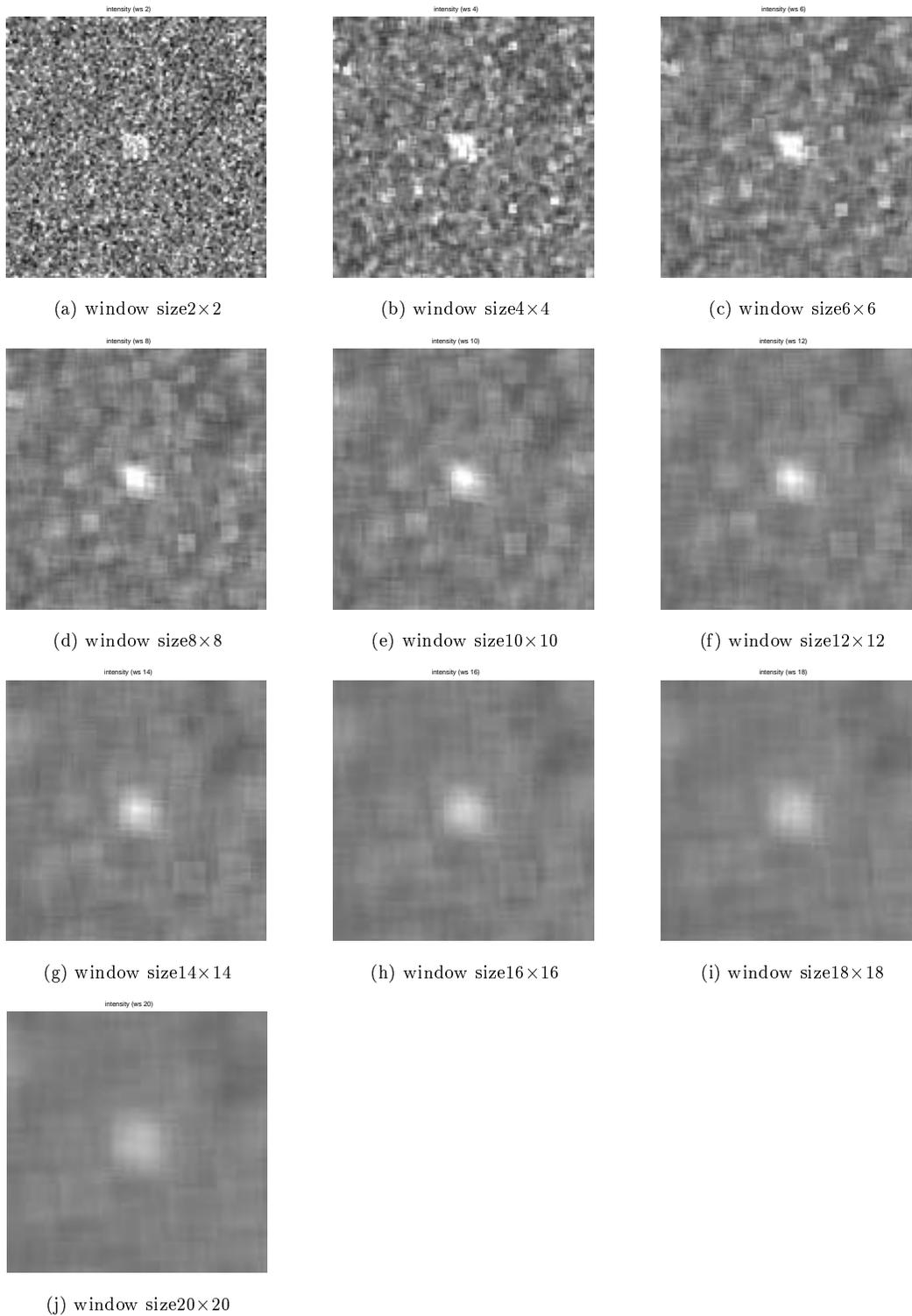


Figure A.6: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $12 \times 12$

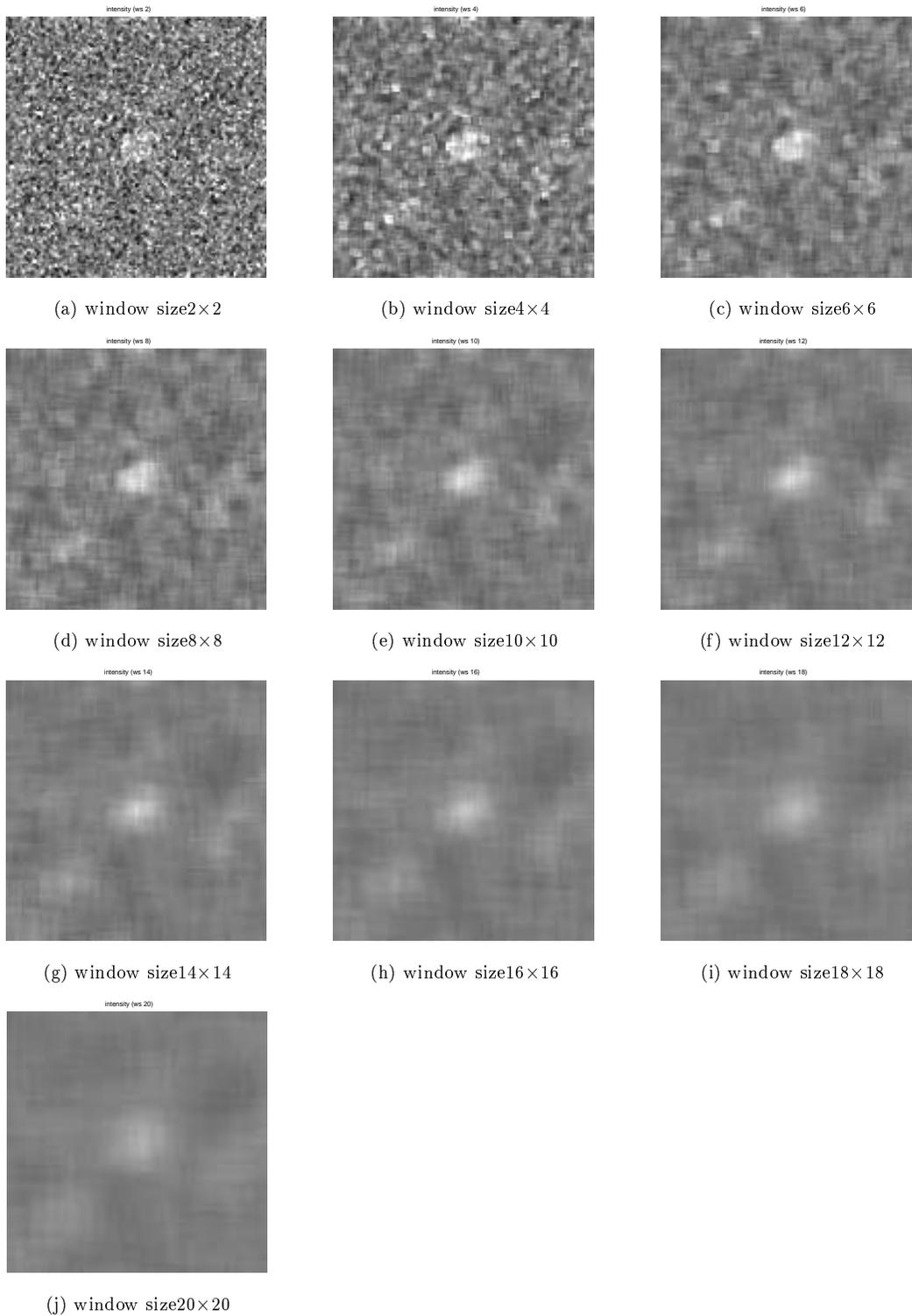


Figure A.7: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $14 \times 14$

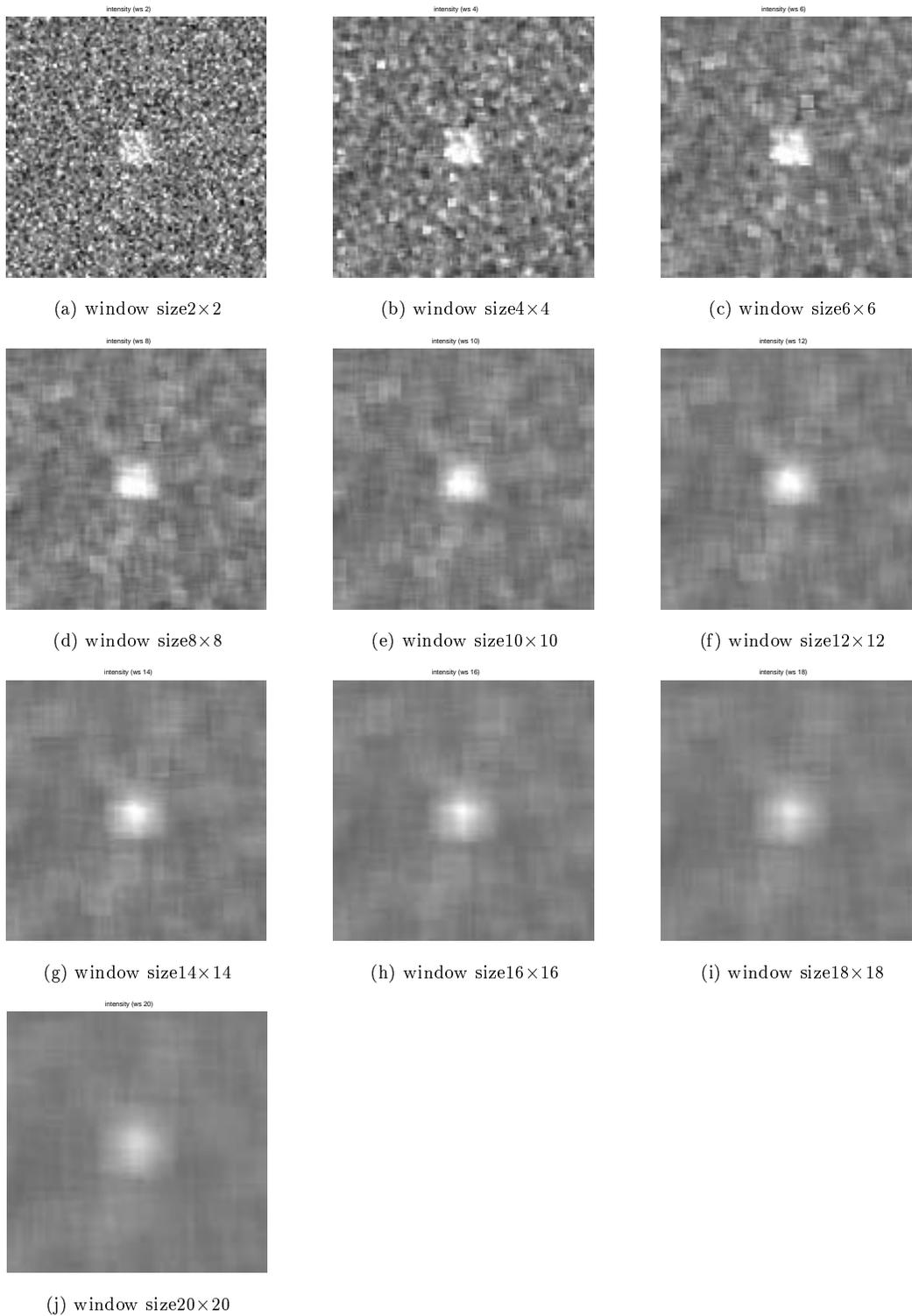


Figure A.8: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $16 \times 16$

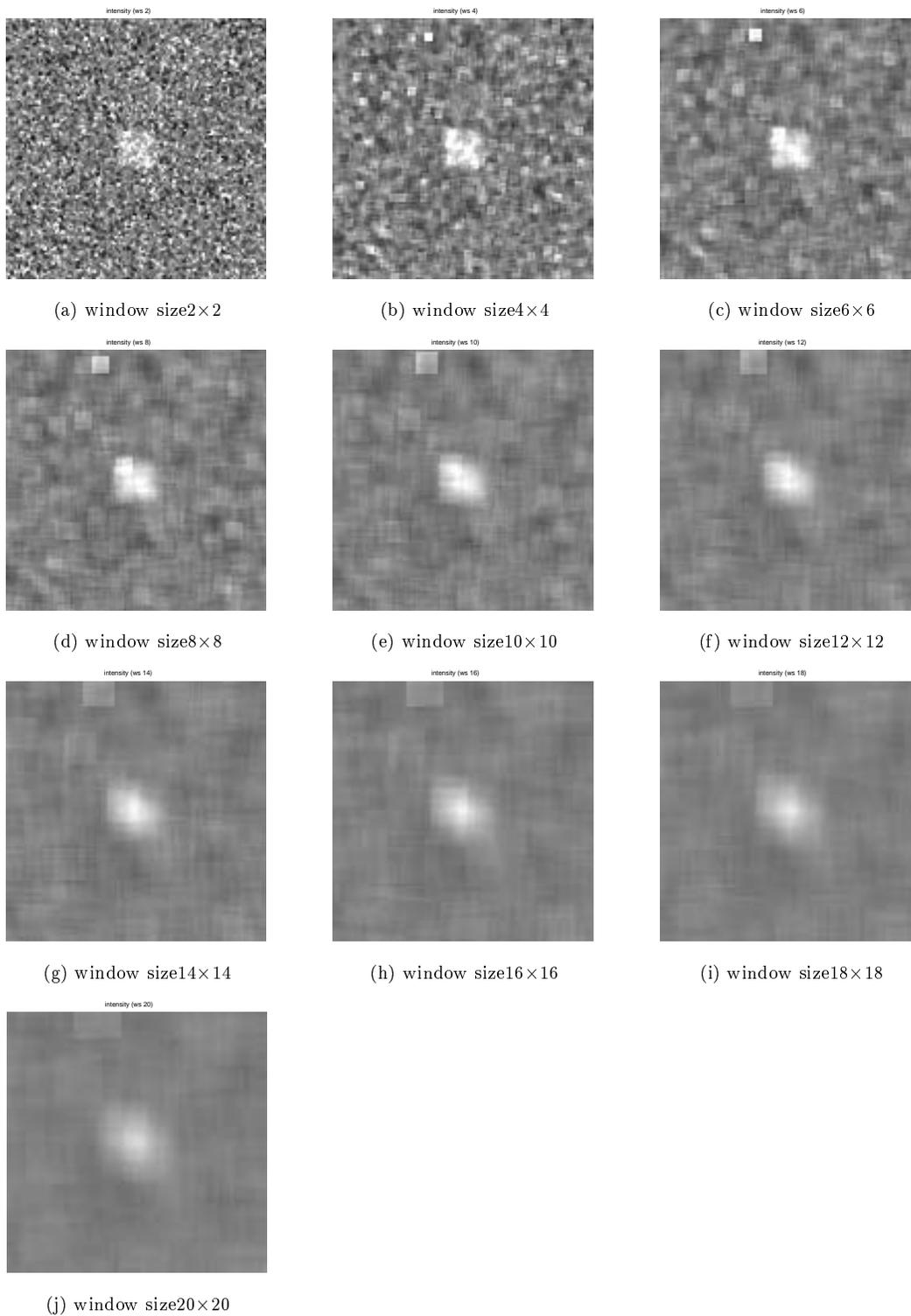


Figure A.9: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $18 \times 18$

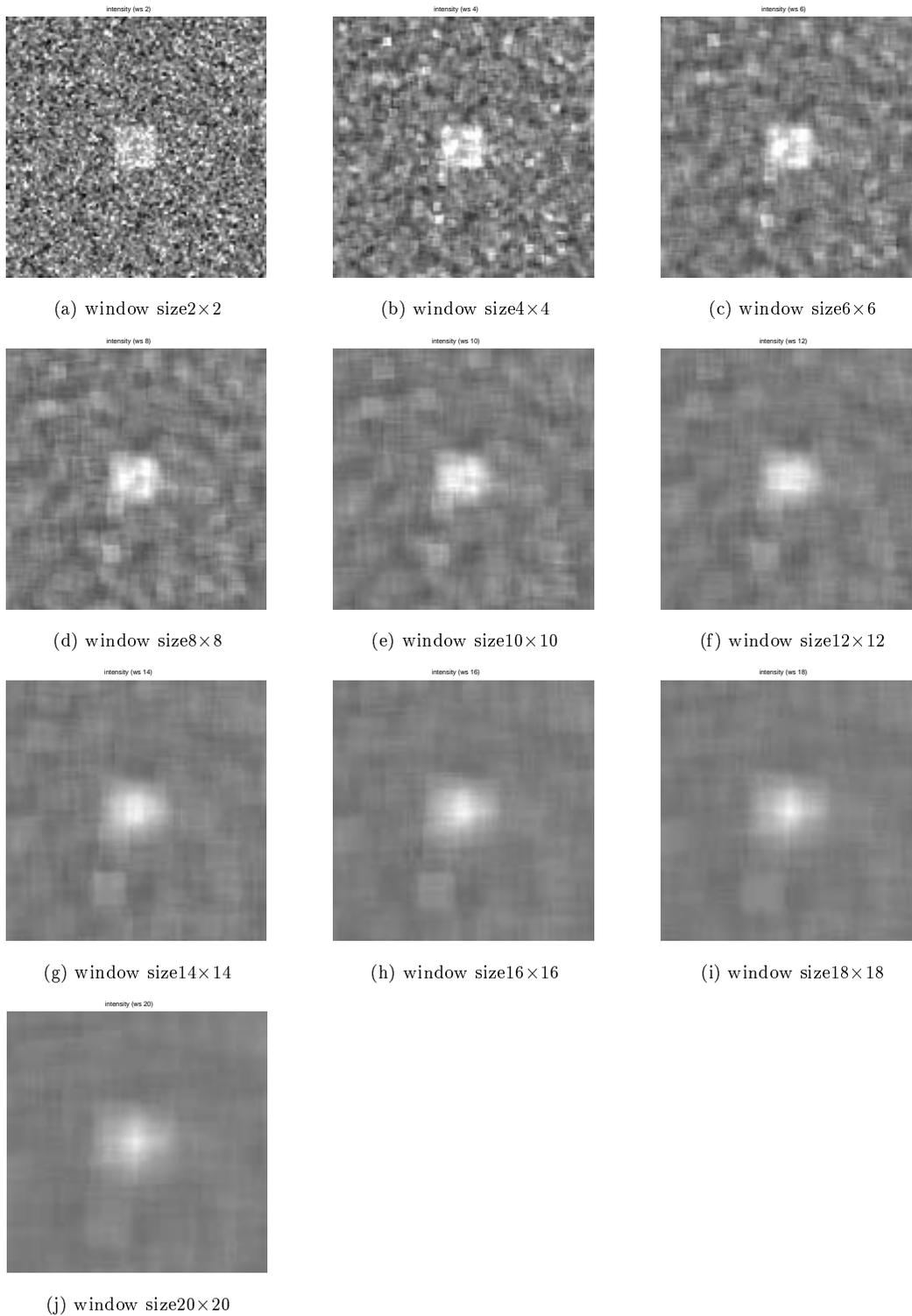


Figure A.10: 強度相互相関画像ターゲットサイズ  $20 \times 20$

## A.2 複素相互相関画像

Figure A.11 ~ Figure A.20 に本研究で算出された複素画像の相互相関画像を示す。

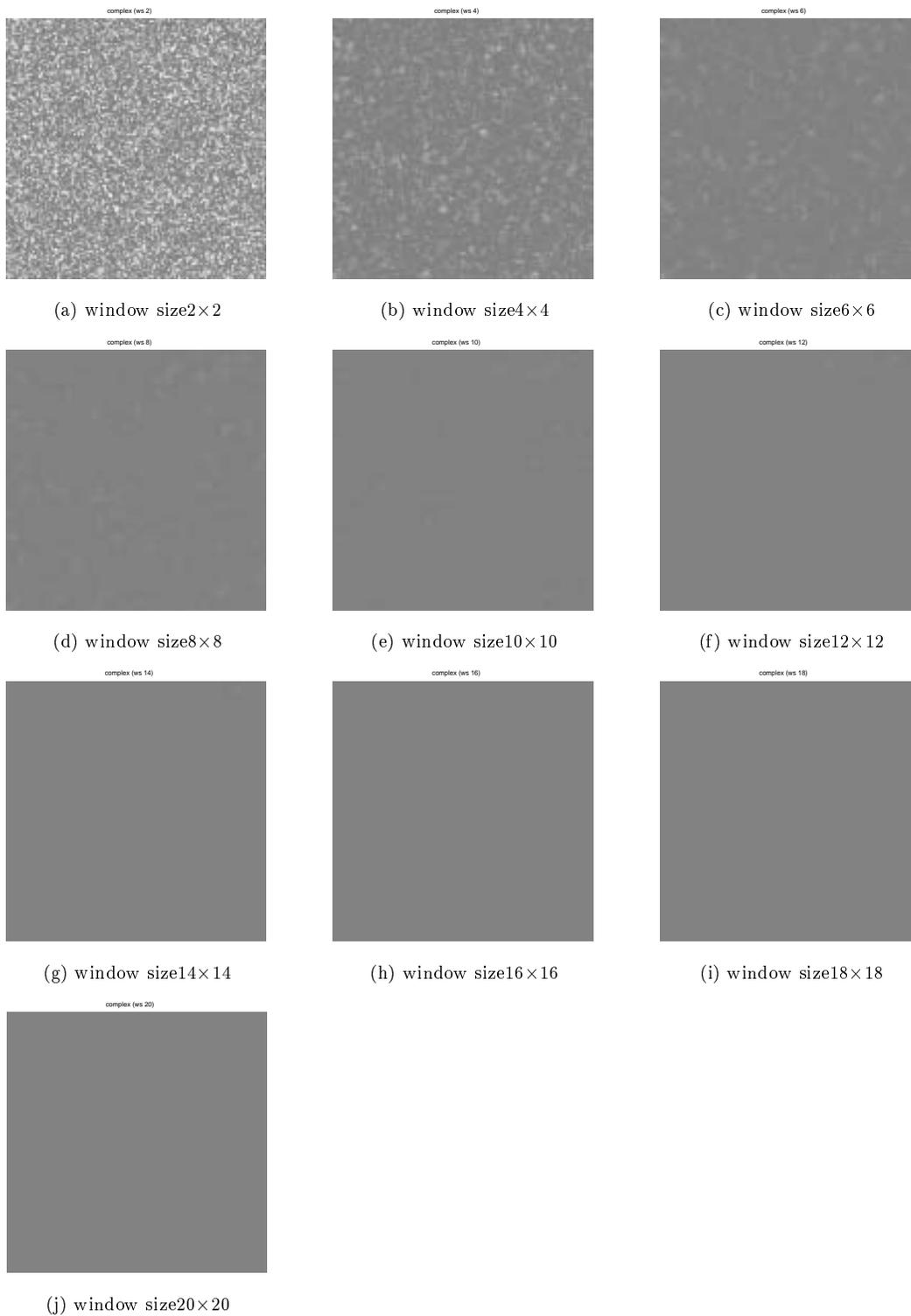


Figure A.11: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $2 \times 2$

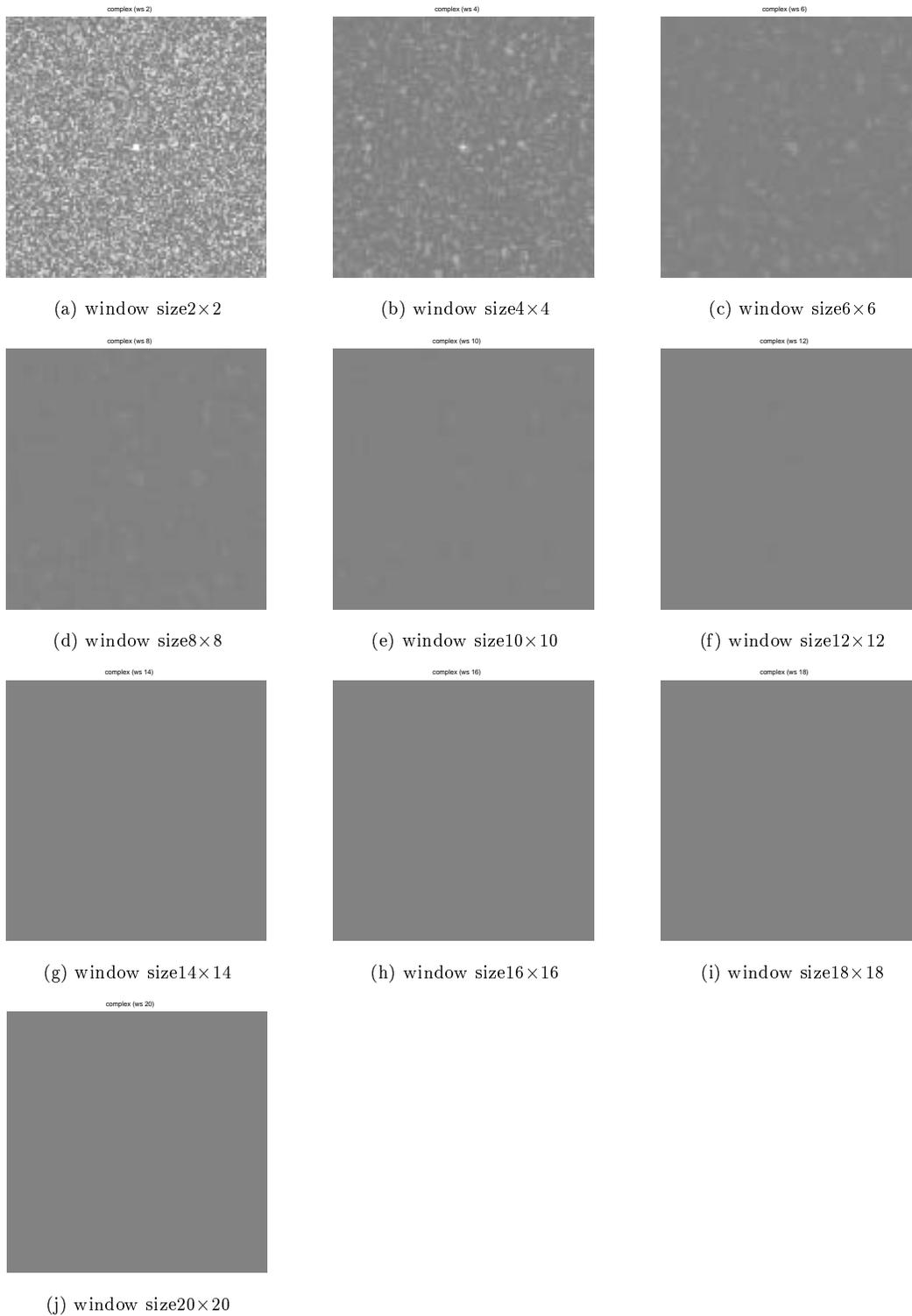


Figure A.12: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $4 \times 4$

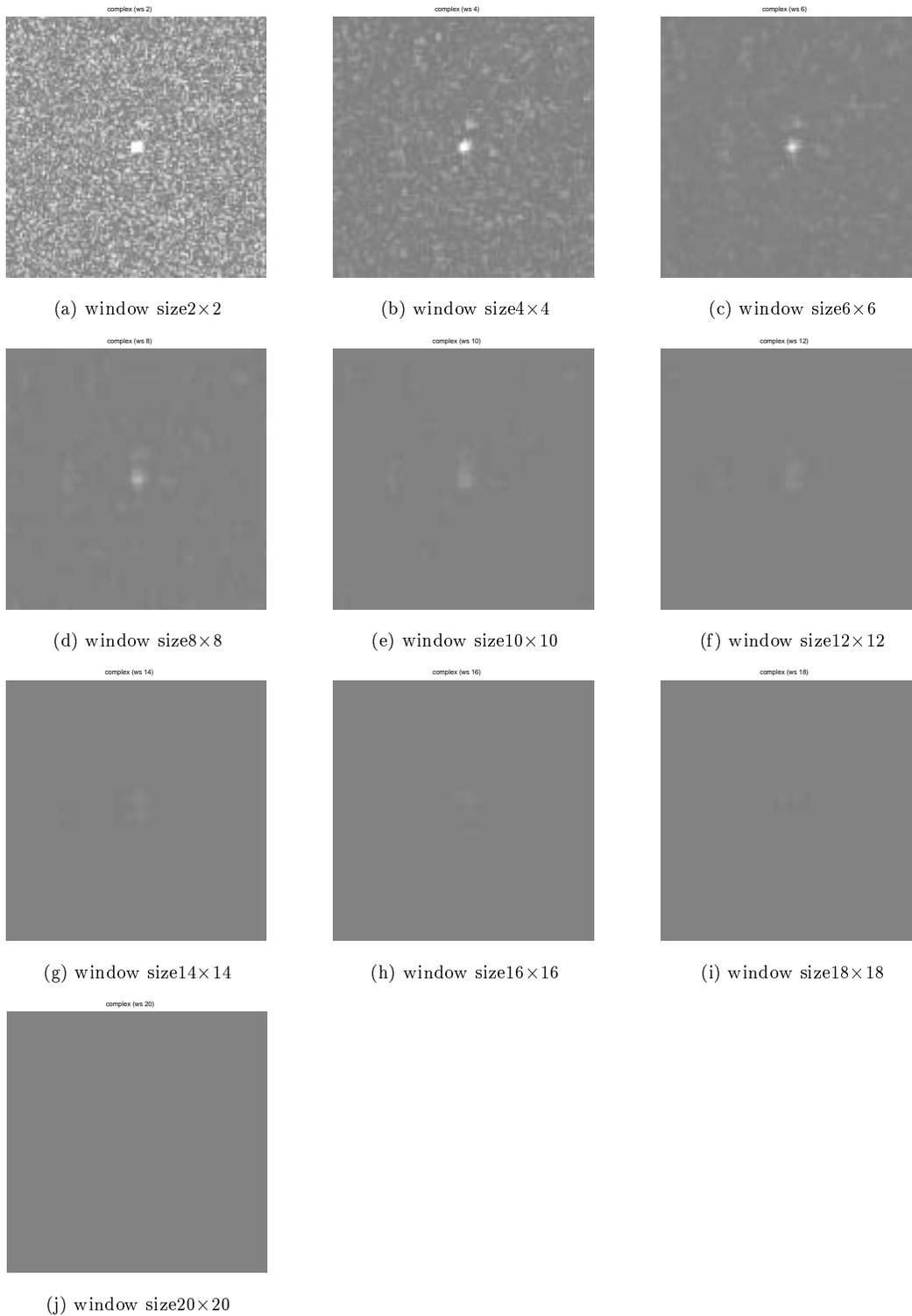


Figure A.13: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $6 \times 6$

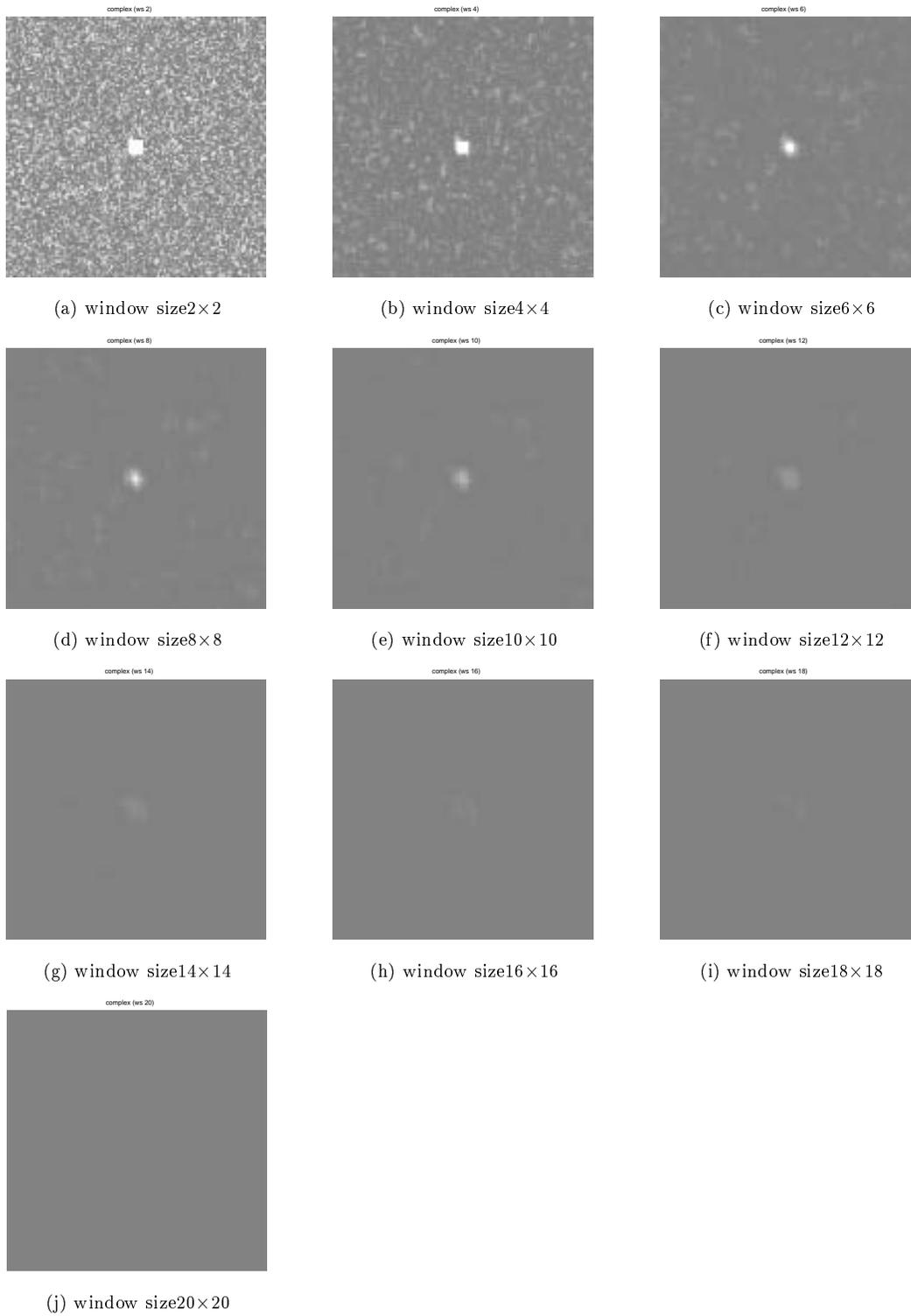


Figure A.14: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $8 \times 8$

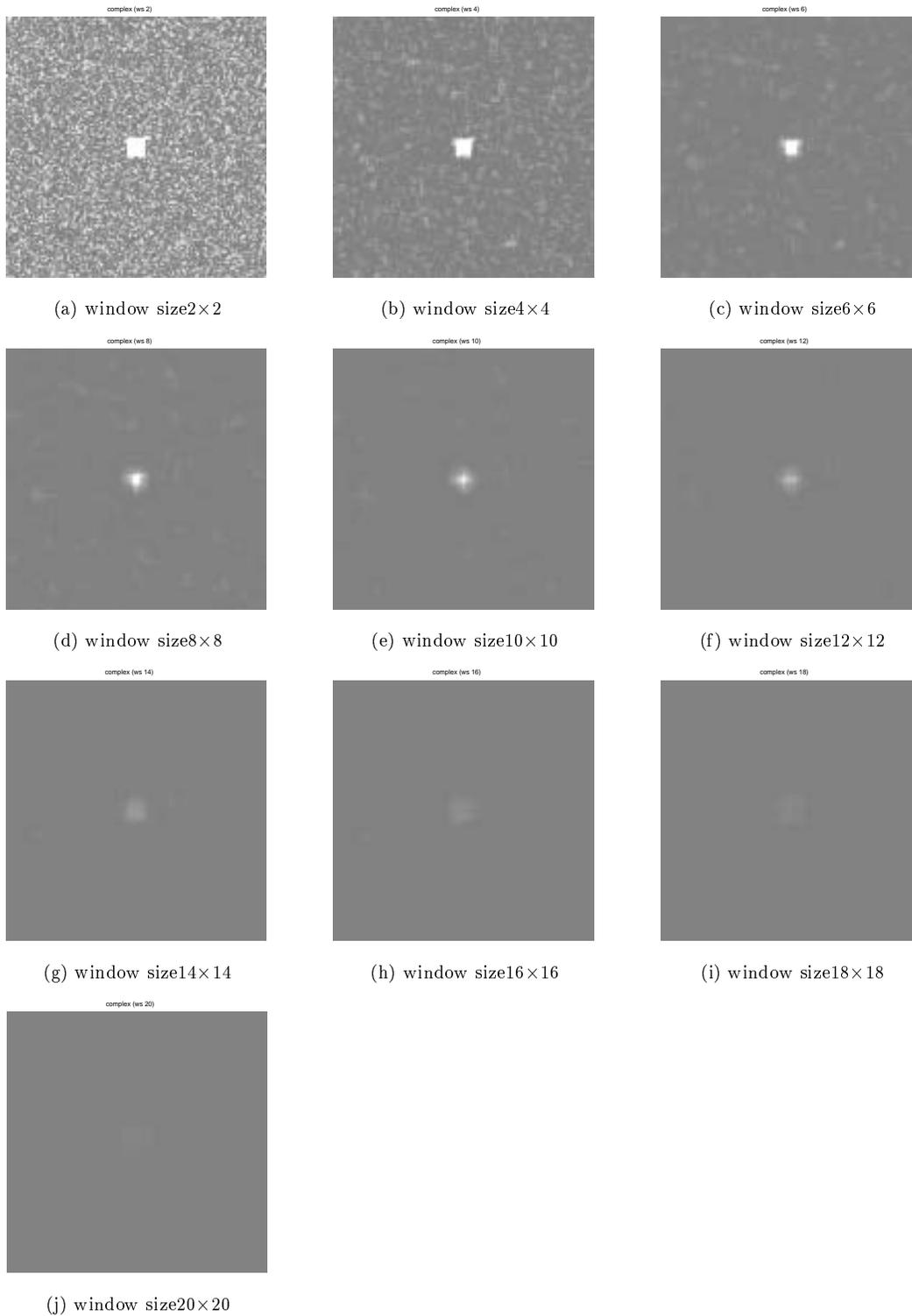


Figure A.15: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $10 \times 10$

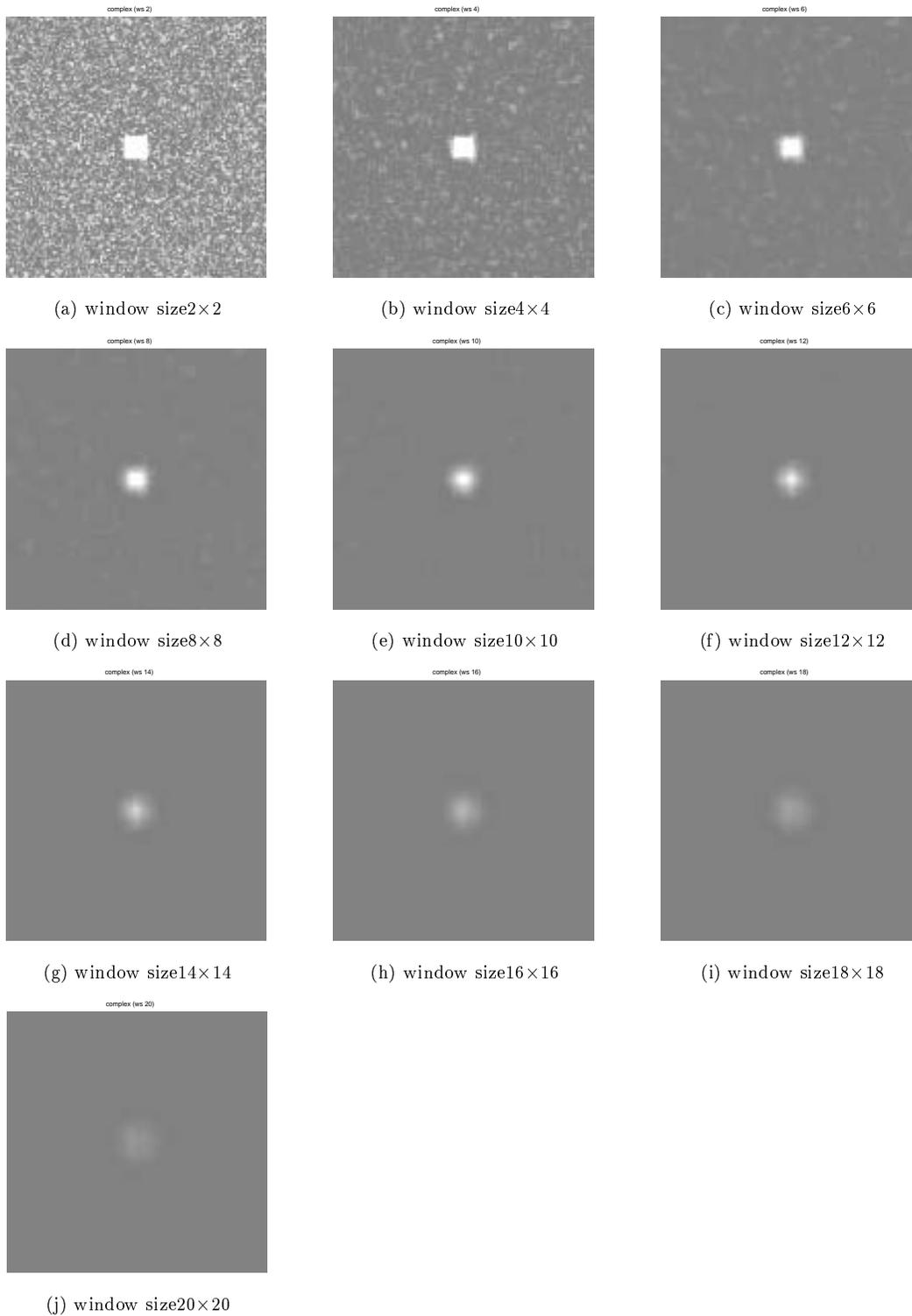


Figure A.16: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $12 \times 12$

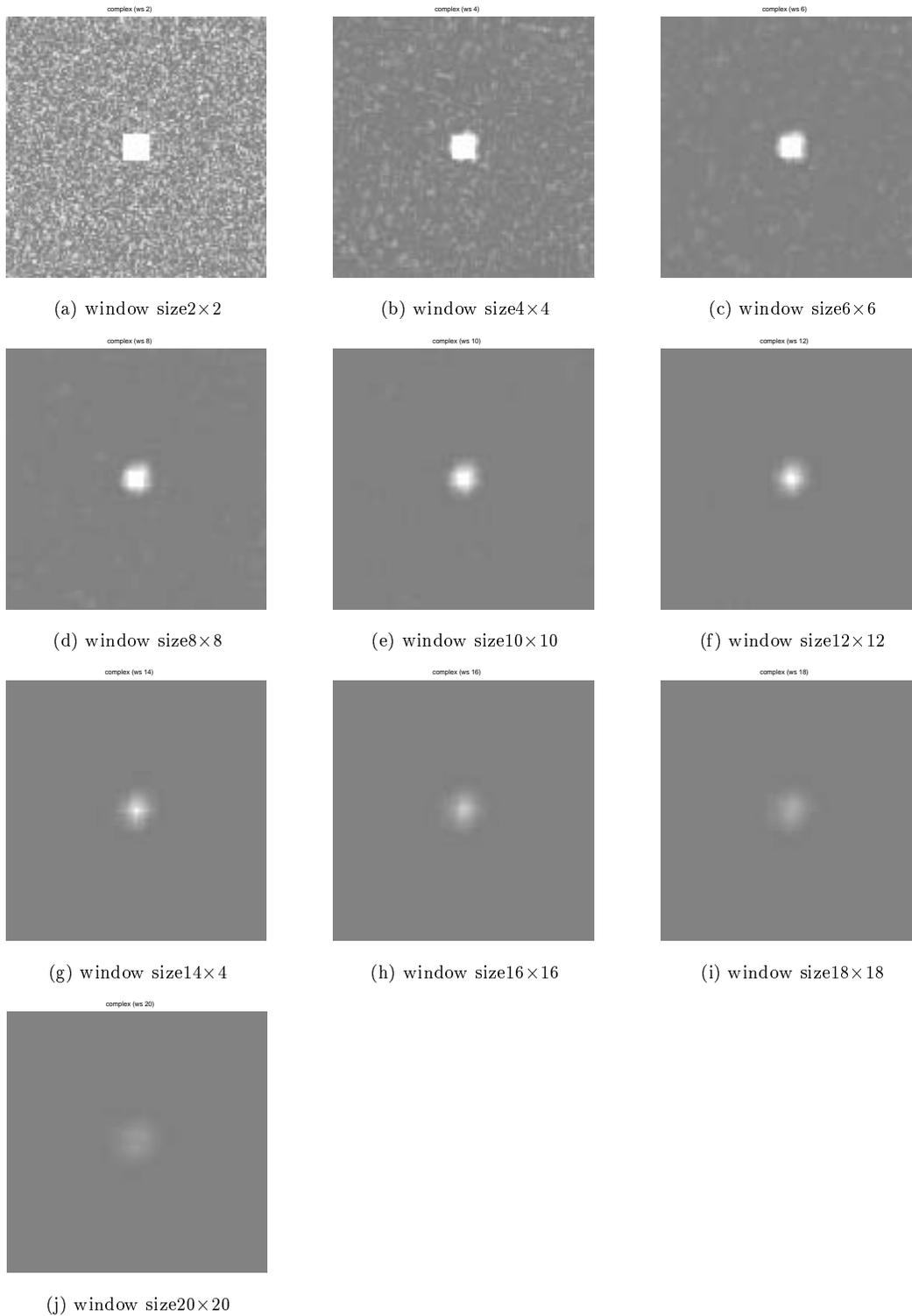


Figure A.17: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $14 \times 14$

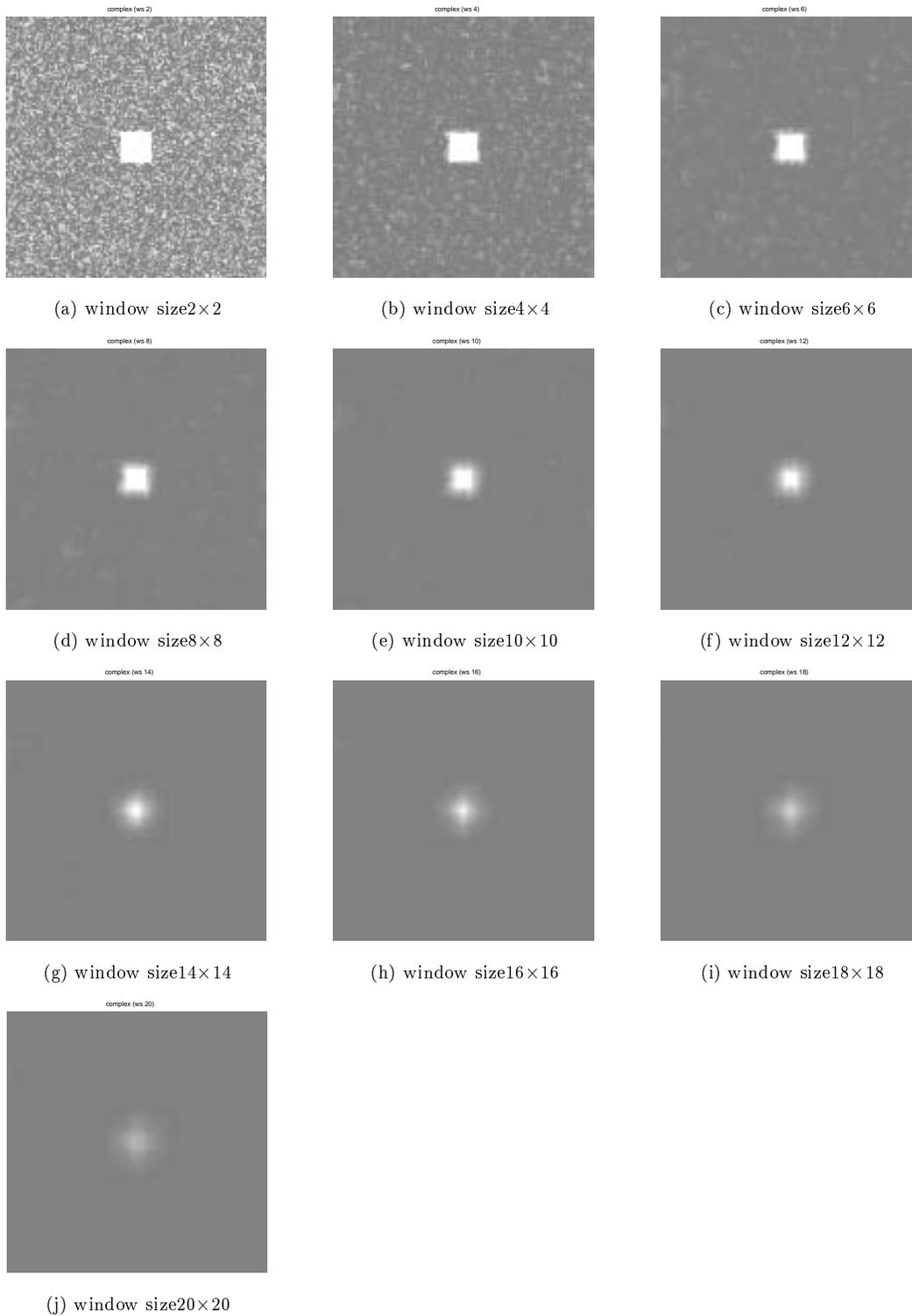


Figure A.18: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $16 \times 16$

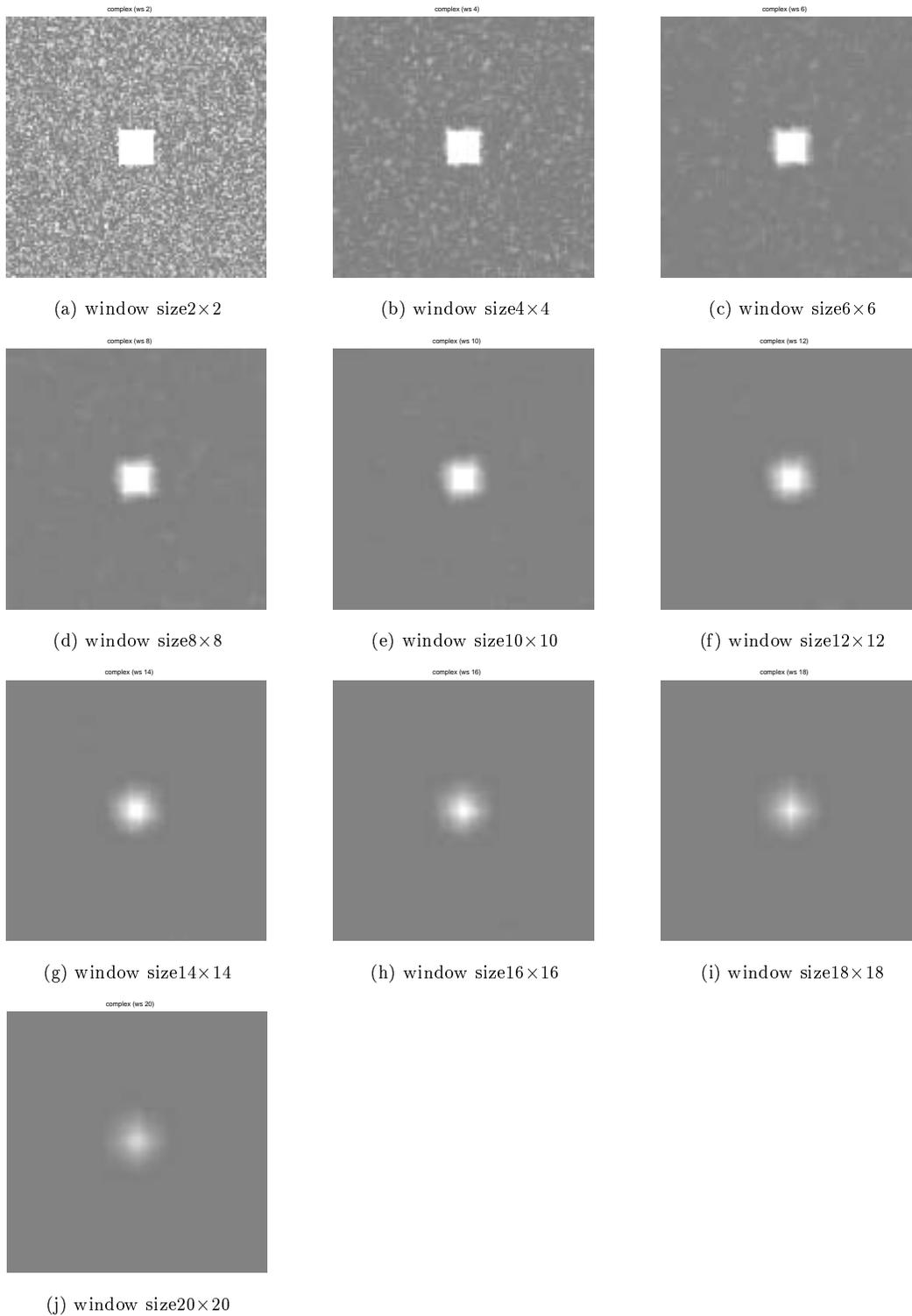


Figure A.19: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $18 \times 18$

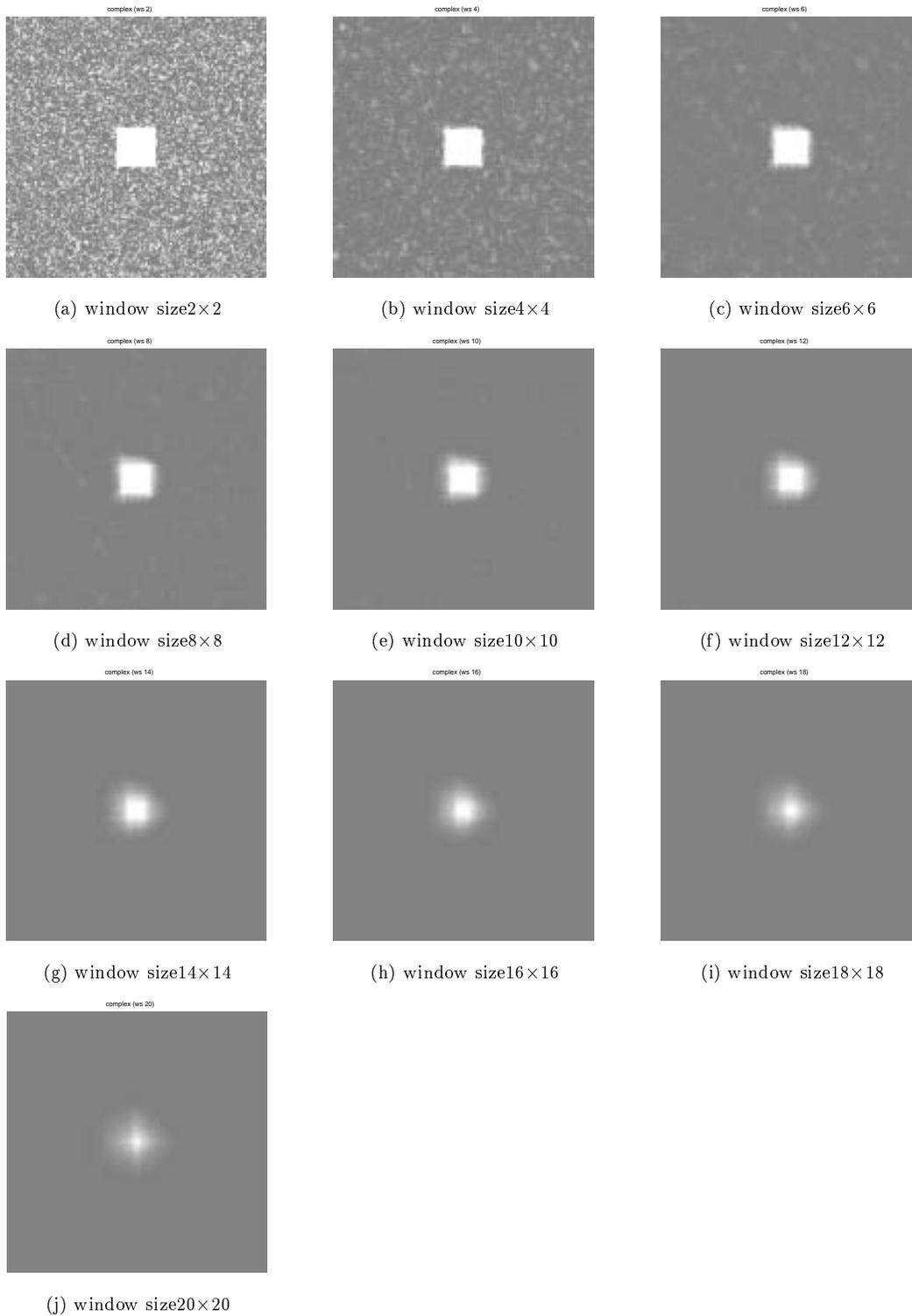


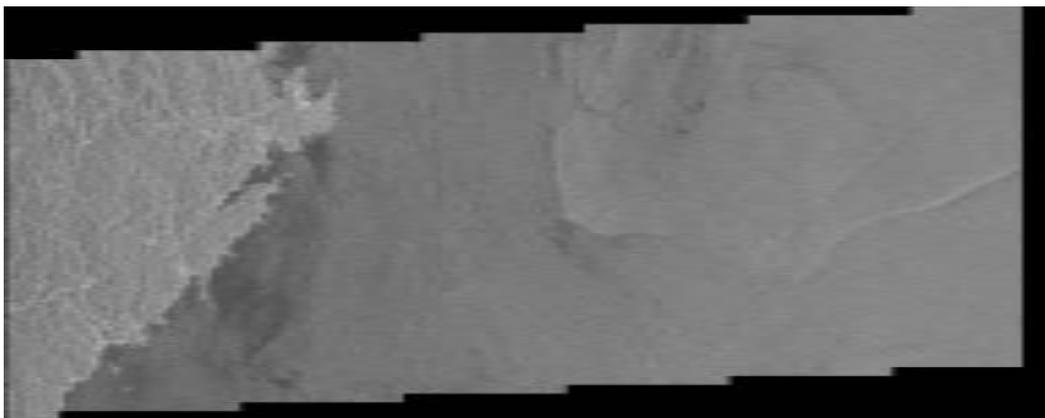
Figure A.20: 複素相互相関画像ターゲットサイズ  $20 \times 20$

## 付録B スライド・ルック画像

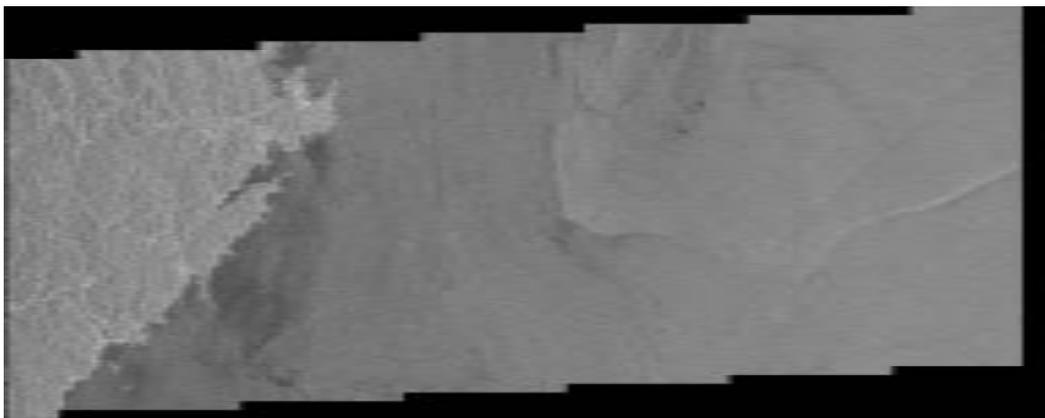
本研究で作製したスライド・ルック画像を示す。

### B.1 全体画像

Figure B.1 ~ Figure B.4 に本研究で再生した全体画像を示す。

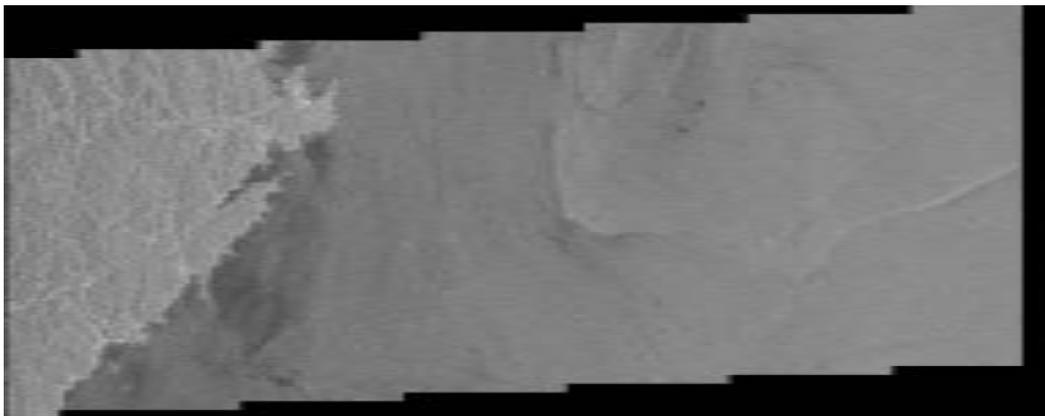


(a) 中心周波数  $-250\text{Hz}$

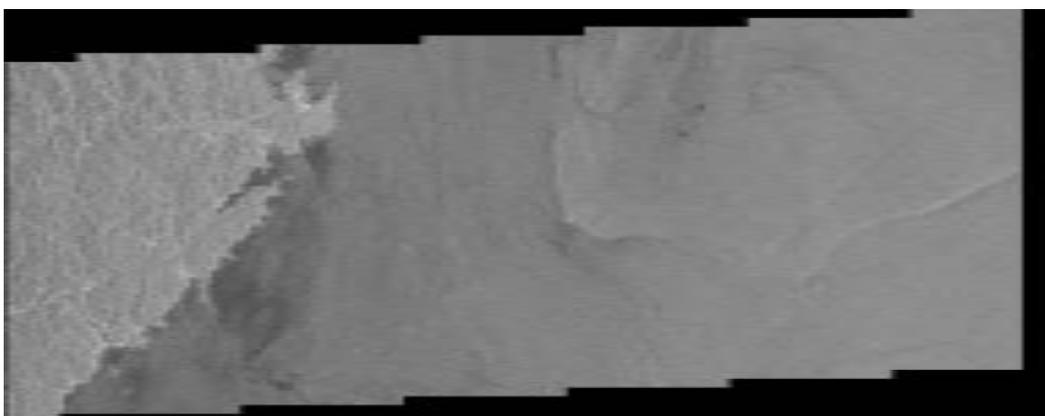


(b) 中心周波数  $-200\text{Hz}$

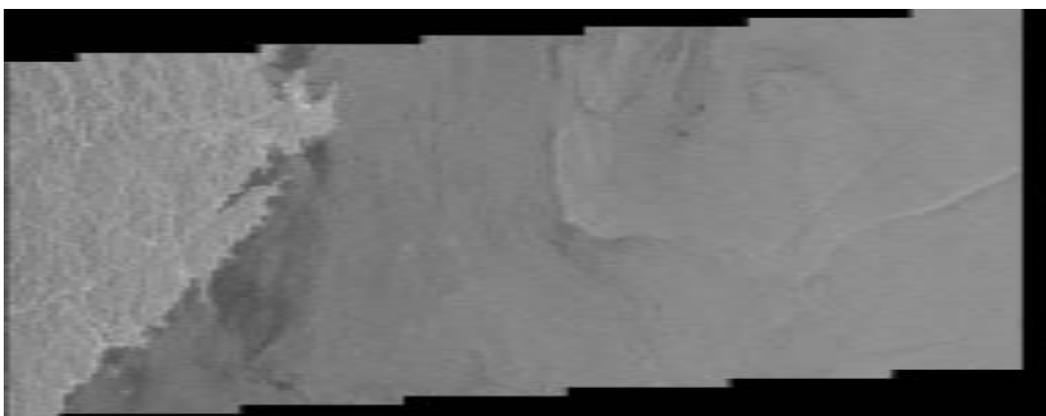
Figure B.1: 中心周波数  $-250\text{Hz} \sim -200\text{Hz}$  の全体画像



(a) 中心周波数  $-150\text{Hz}$

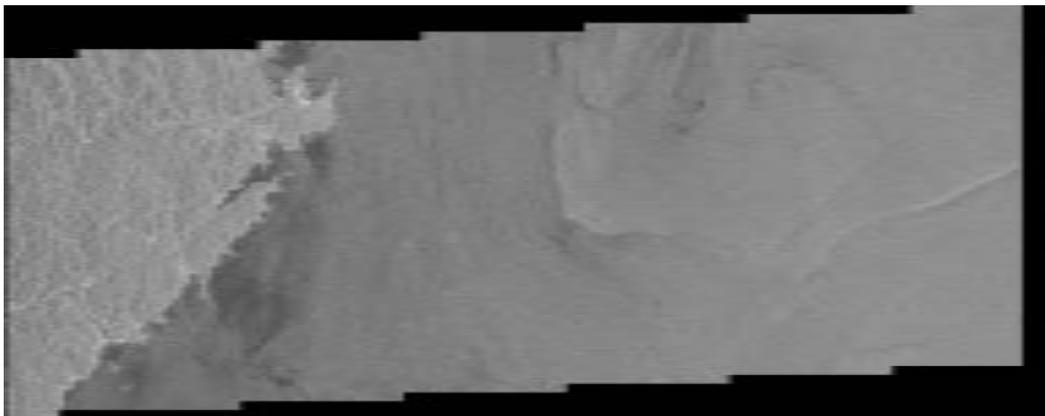


(b) 中心周波数  $-100\text{Hz}$

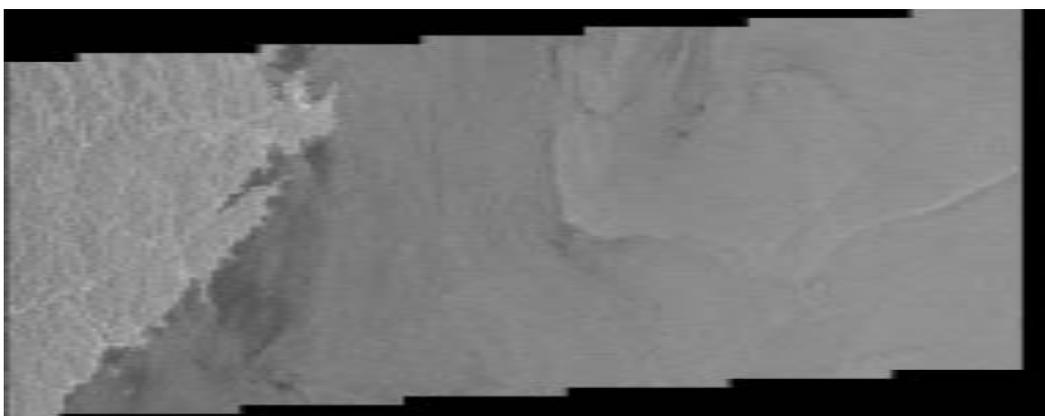


(c) 中心周波数  $-50\text{Hz}$

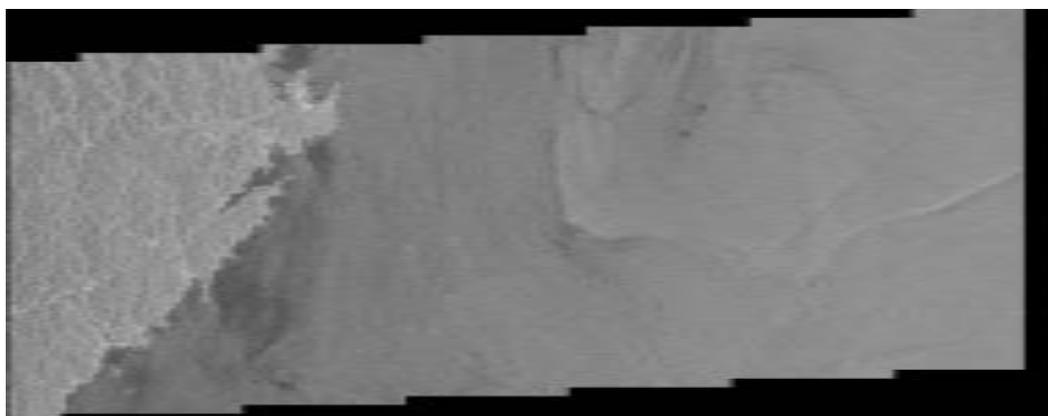
Figure B.2: 中心周波数  $-150 \sim -50\text{Hz}$  の全体画像



(a) 中心周波数 0Hz

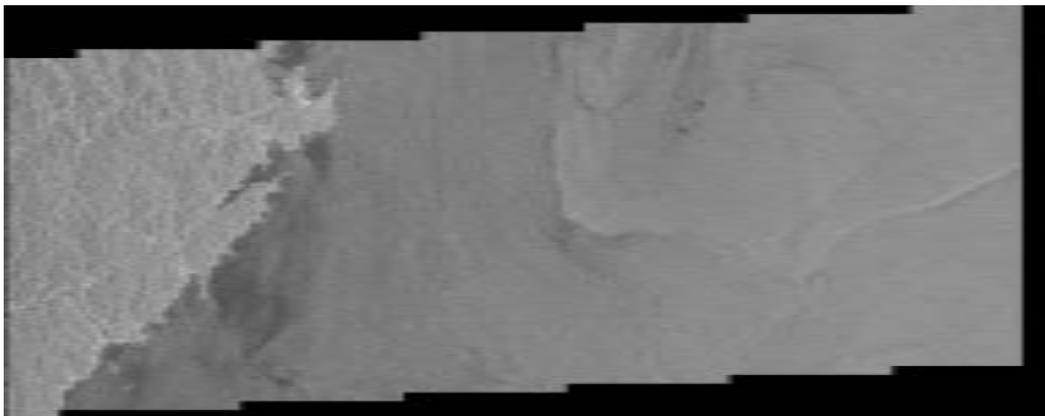


(b) 中心周波数 +50Hz

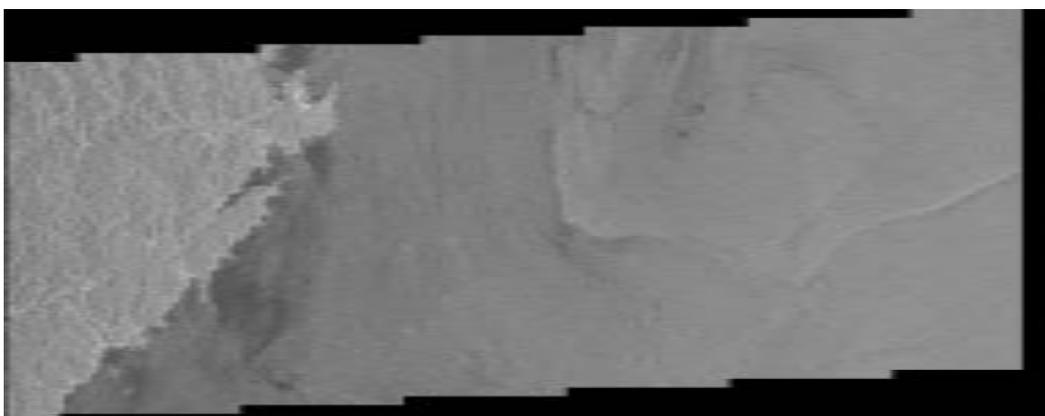


(c) 中心周波数 +100Hz

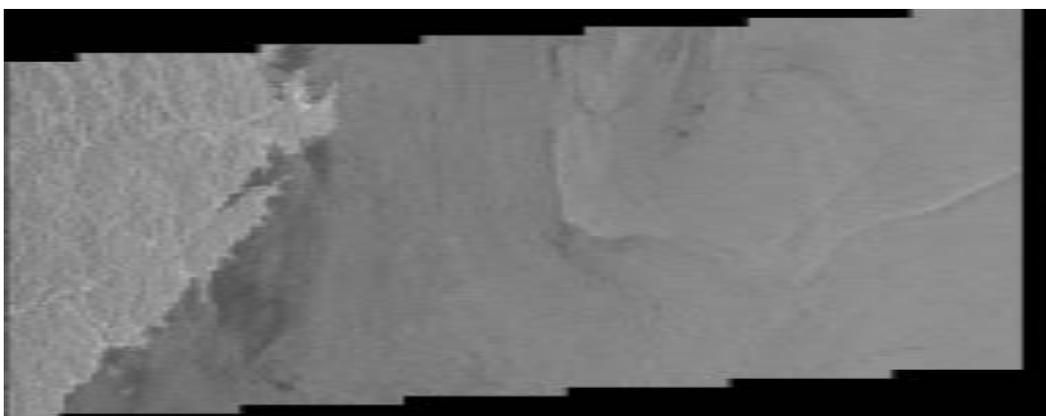
Figure B.3: 中心周波数 0Hz ~ +100Hz の全体画像



(a) 中心周波数 +150Hz



(b) 中心周波数 +200Hz



(c) 中心周波数 +250Hz

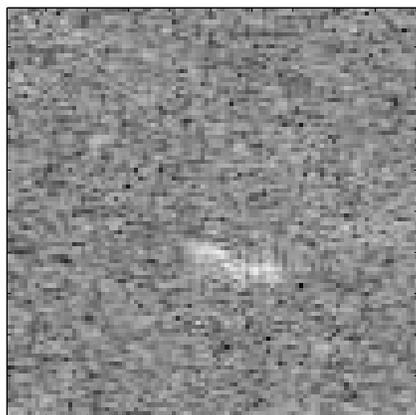
Figure B.4: 中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の全体画像

## B.2 スライド・ルック処理された船舶画像

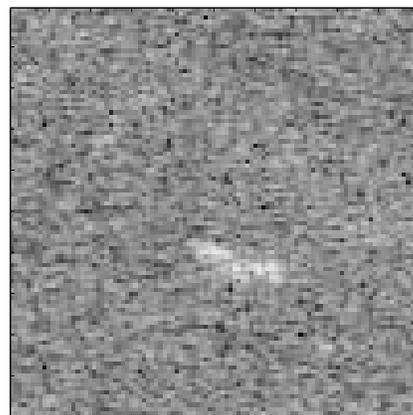
解析に用いた船舶のスライド・ルック画像を示す。

### B.2.1 SHIP A

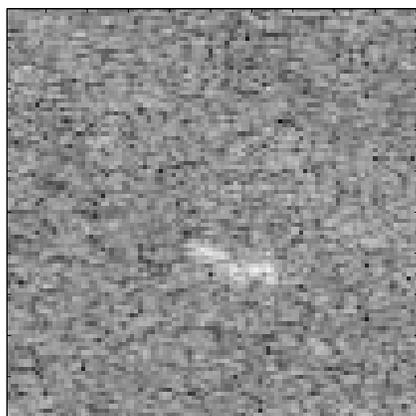
Figure B.5 ~ Figure B.7 に SHIP A のスライド・ルック画像を示す。



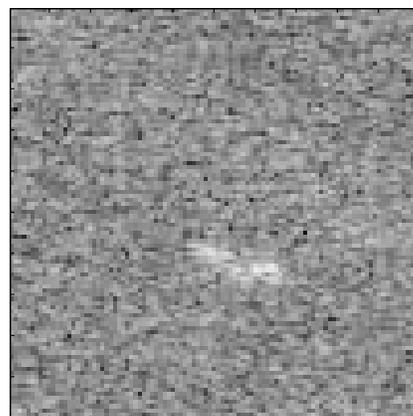
(a) 中心周波数  $-250\text{Hz}$



(b) 中心周波数  $-200\text{Hz}$

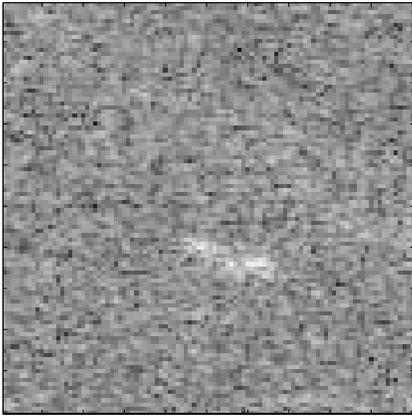


(c) 中心周波数  $-150\text{Hz}$

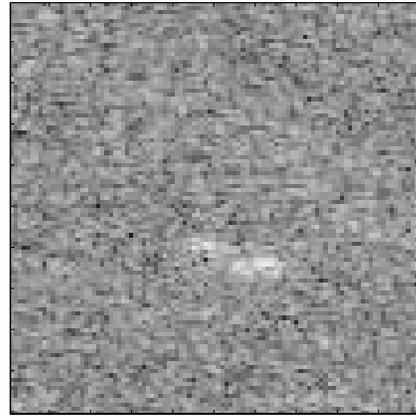


(d) 中心周波数  $-100\text{Hz}$

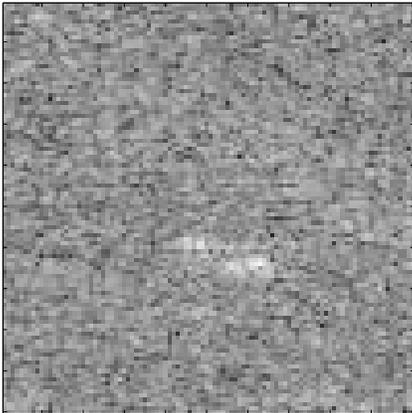
Figure B.5: 中心周波数  $-250\text{Hz}$  ~  $-100\text{Hz}$  の SHIP A の画像



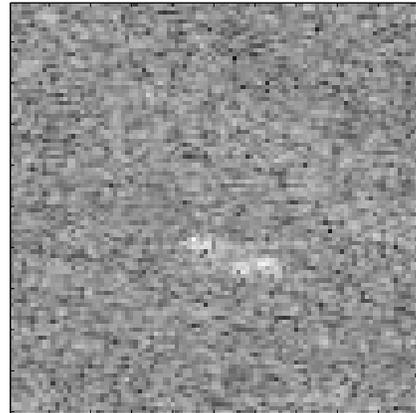
(a) 中心周波数  $-50\text{Hz}$



(b) 中心周波数  $0\text{Hz}$

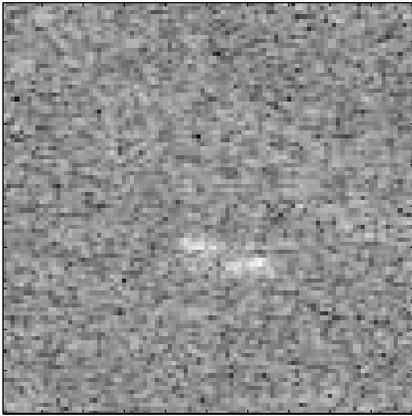


(c) 中心周波数  $+50\text{Hz}$

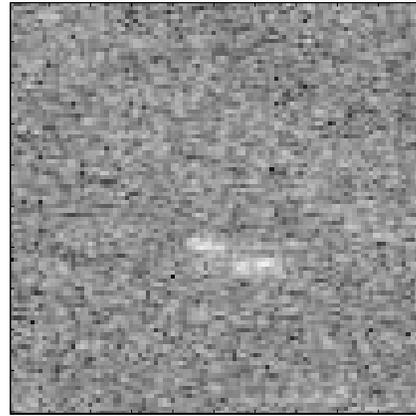


(d) 中心周波数  $+100\text{Hz}$

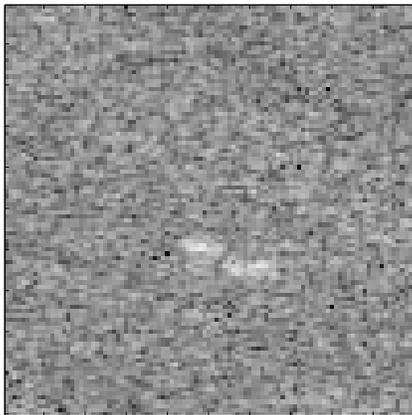
Figure B.6: 中心周波数  $-50\text{Hz} \sim +100\text{Hz}$  の SHIP A の画像



(a) 中心周波数 +150Hz



(b) 中心周波数 +200Hz

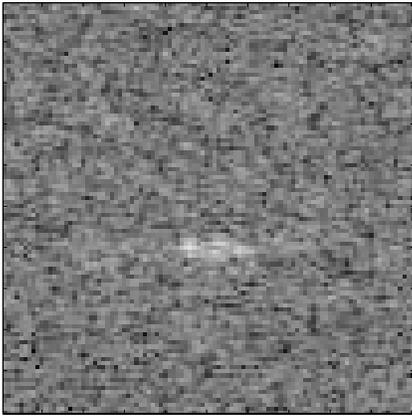


(c) 中心周波数 +250Hz

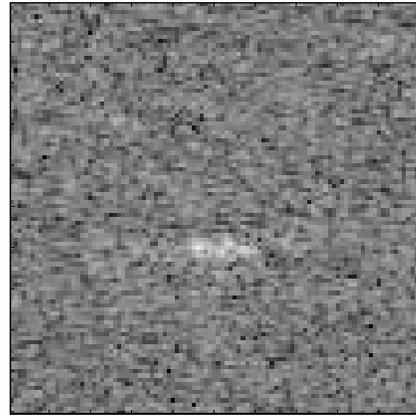
Figure B.7: 中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の SHIP A の画像

## B.2.2 SHIP B

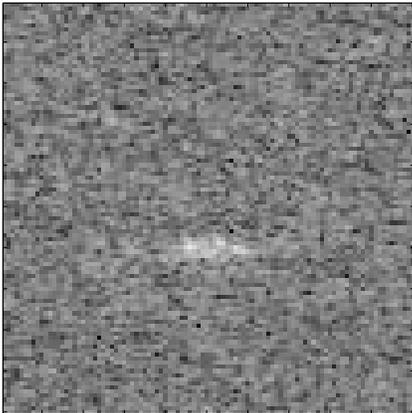
Figure B.8 ~ Figure B.10 に SHIP B のスライド・ルック画像を示す。



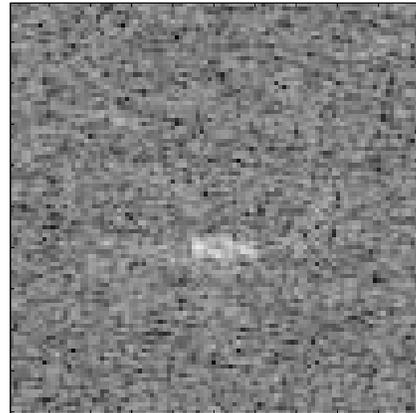
(a) 中心周波数  $-250\text{Hz}$



(b) 中心周波数  $-200\text{Hz}$

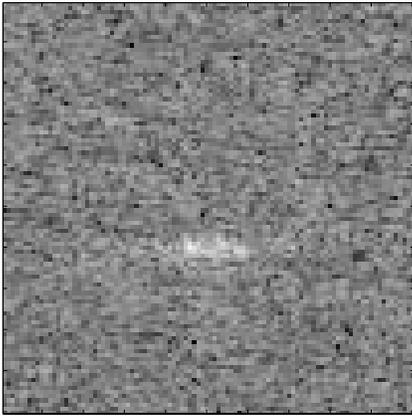


(c) 中心周波数  $-150\text{Hz}$

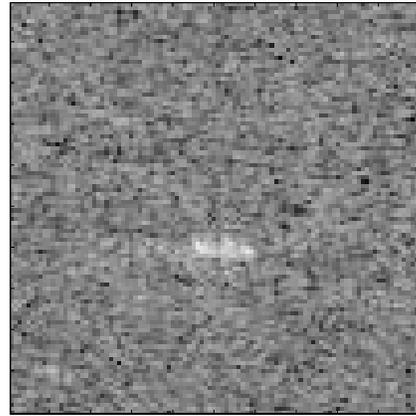


(d) 中心周波数  $-100\text{Hz}$

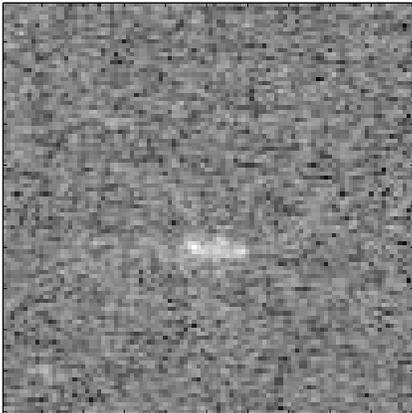
Figure B.8: 中心周波数  $-250\text{Hz}$  ~  $-100\text{Hz}$  の SHIP B の画像



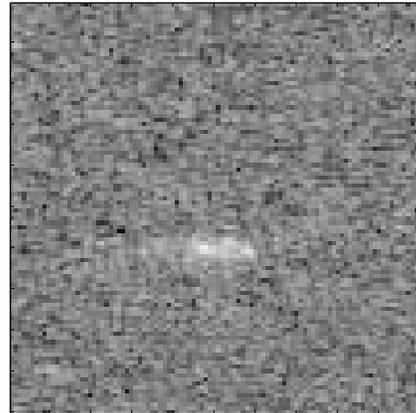
(a) 中心周波数  $-50\text{Hz}$



(b) 中心周波数  $0\text{Hz}$

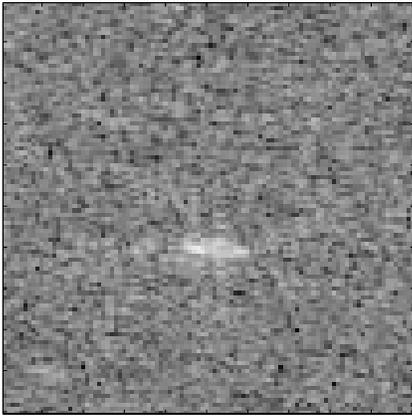


(c) 中心周波数  $+50\text{Hz}$

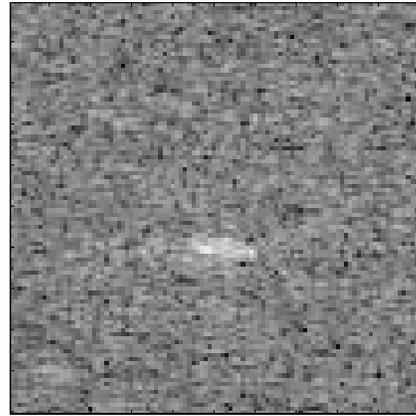


(d) 中心周波数  $+100\text{Hz}$

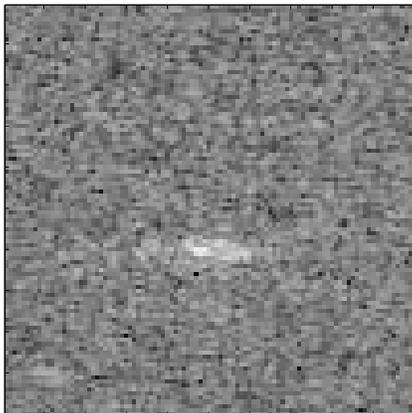
Figure B.9: 中心周波数  $-50\text{Hz} \sim +100\text{Hz}$  の SHIP B の画像



(a) 中心周波数 +150Hz



(b) 中心周波数 +200Hz



(c) 中心周波数 +250Hz

Figure B.10: 中心周波数 +150Hz ~ +250Hz の SHIP B の画像

# 付録C 切り出すサイズを変化させた相関画像

本研究で算出された、切り出したサイズを変化させたときのスプリット・ルック、スライド・ルック画像の相互相関画像を Figure C.1 ~ Figure C.8 に示す。

## C.1 スプリット・ルック画像による相互相関画像

### C.1.1 SHIP A

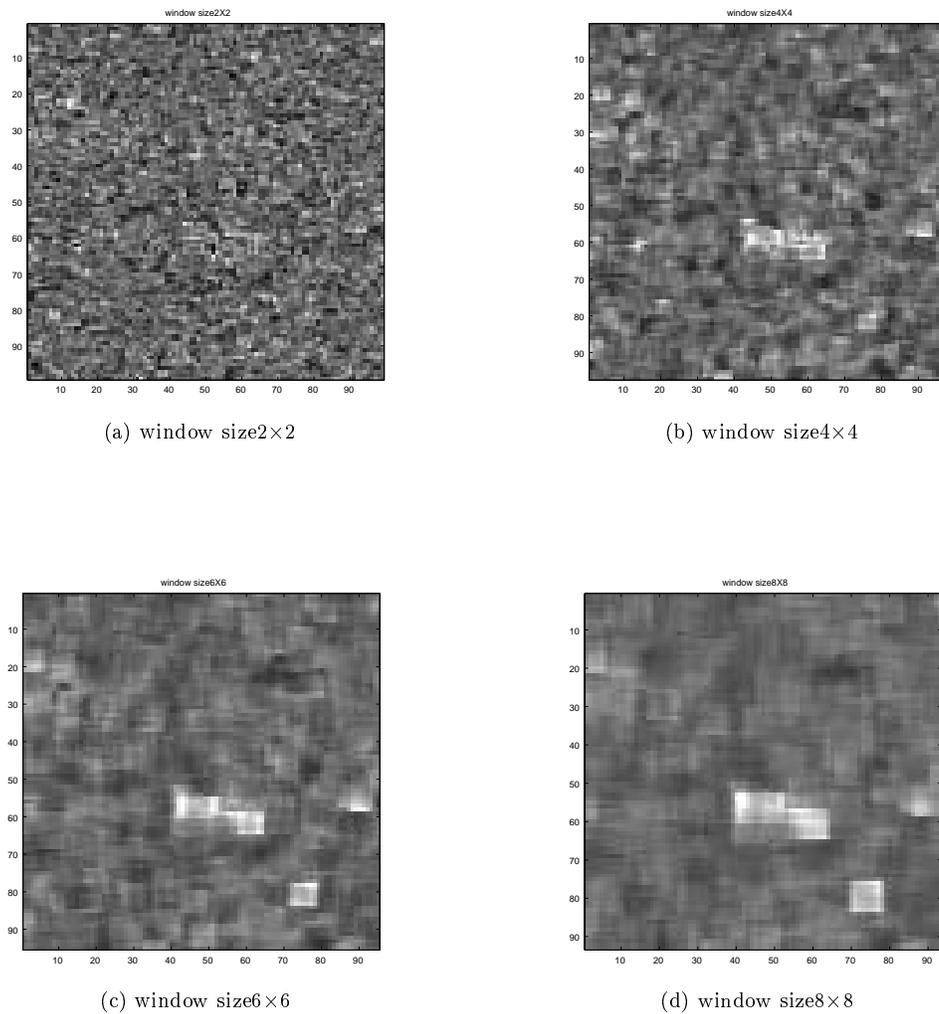
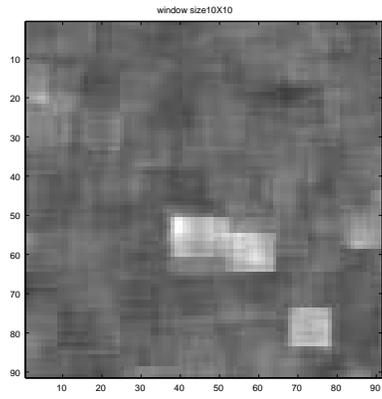
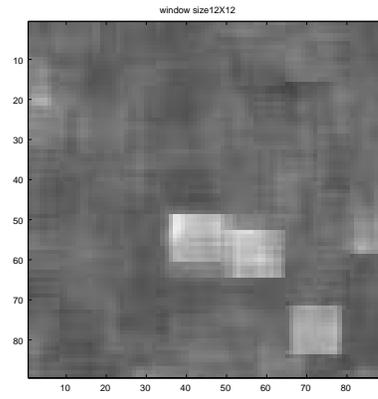


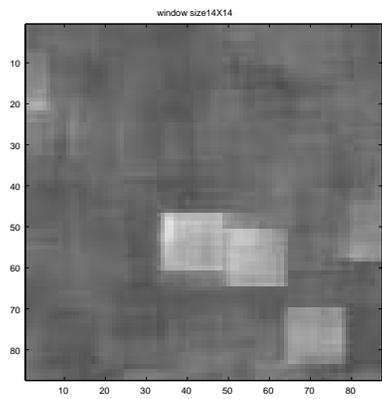
Figure C.1: SHIP A の相互相関画像 (ウィンドウサイズ 2x2 ~ 8x8)



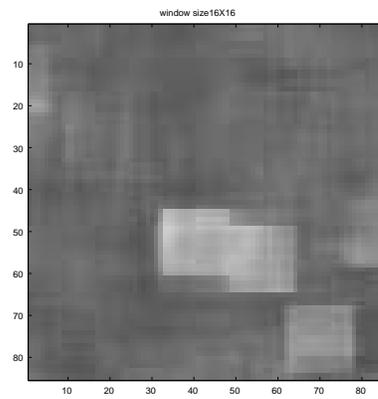
(a) window size  $10 \times 10$



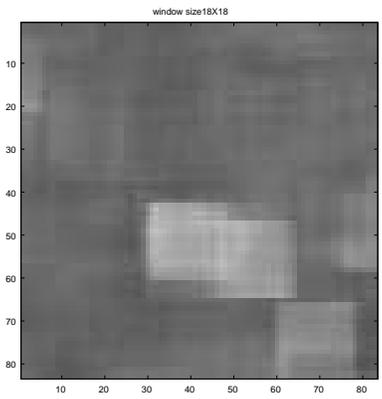
(b) window size  $12 \times 12$



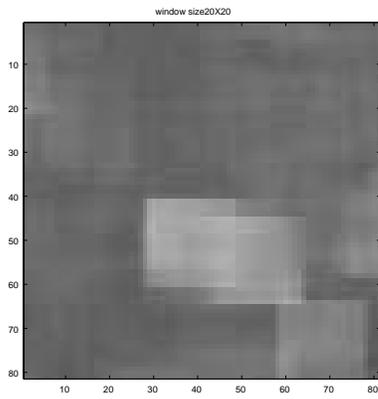
(c) window size  $14 \times 14$



(d) window size  $16 \times 16$



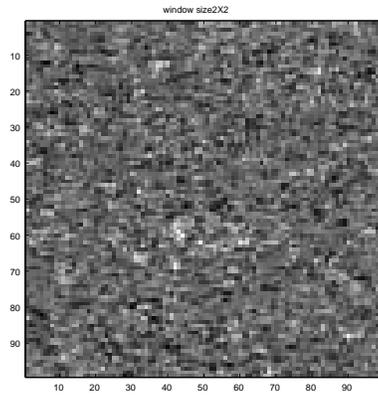
(e) window size  $18 \times 18$



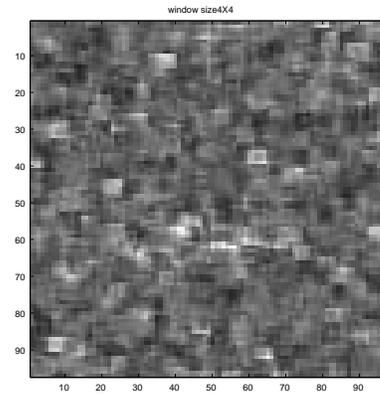
(f) window size  $20 \times 20$

Figure C.2: SHIP A の相互相関画像 (ウィンドウサイズ  $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ )

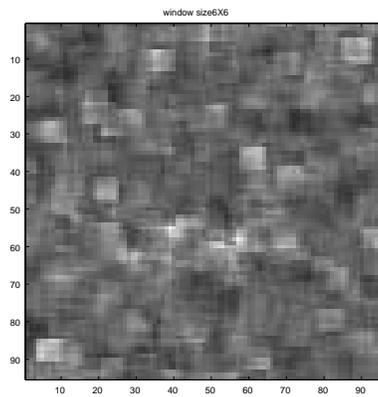
### C.1.2 SHIP B



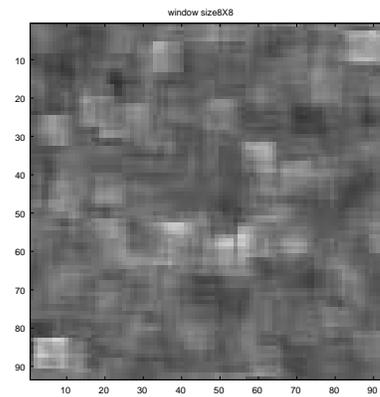
(a) window size $2\times 2$



(b) window size $4\times 4$

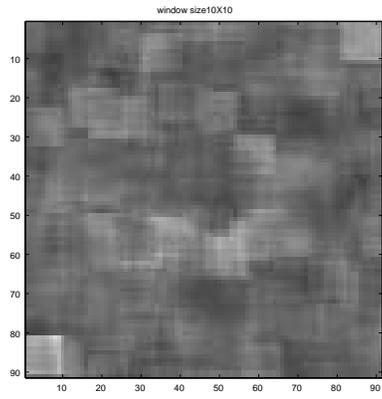


(c) window size $6\times 6$

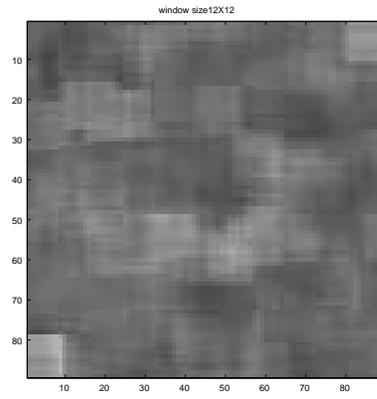


(d) window size $8\times 8$

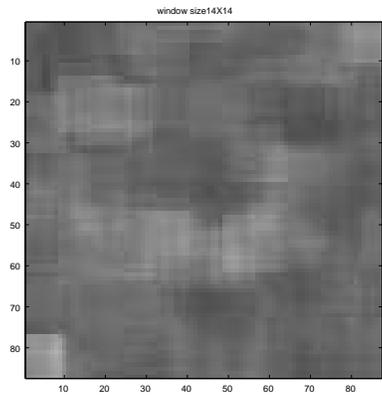
Figure C.3: SHIP B の相互相関画像 (ウィンドウサイズ  $2\times 2$  ~  $8\times 8$ )



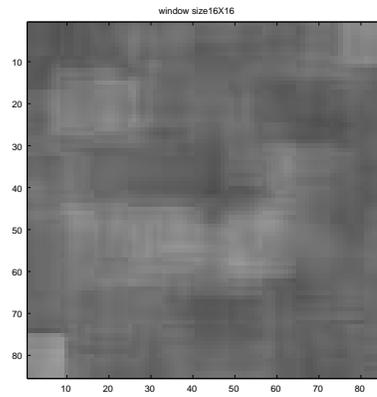
(a) window size10×10



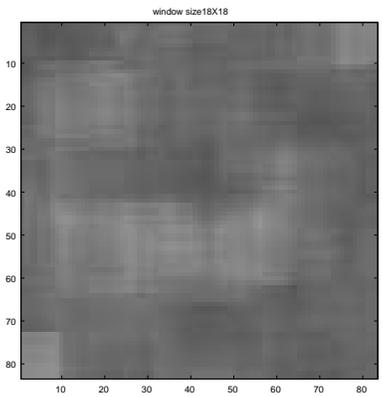
(b) window size12×12



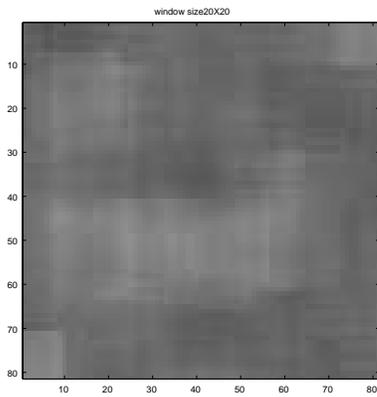
(c) window size14×14



(d) window size16×16



(e) window size18×18

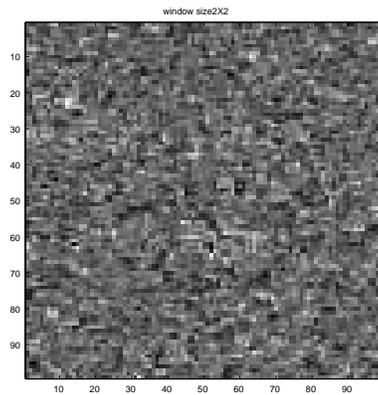


(f) window size20×20

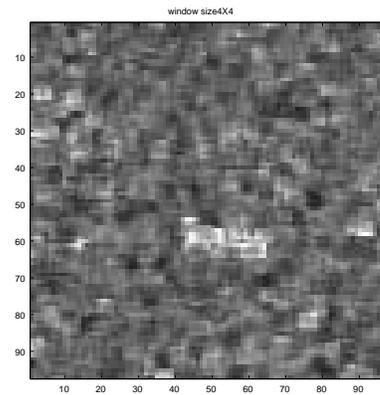
Figure C.4: SHIP B の相互相関画像 (ウィンドウサイズ 10×10~20×20)

## C.2 スライド・ルック画像による平均相互相関画像

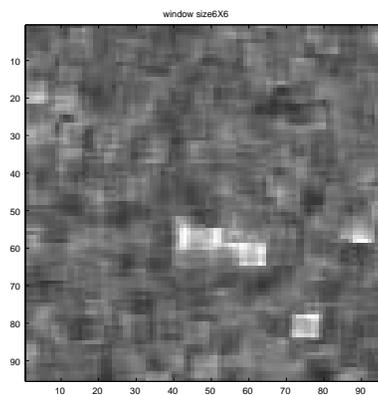
### C.2.1 SHIP A



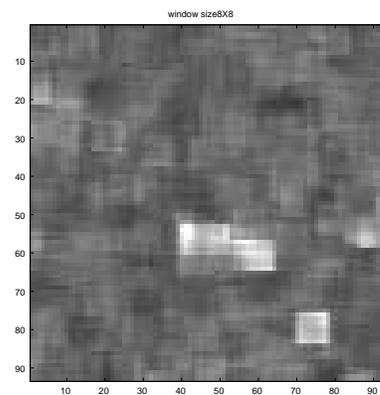
(a) window size 2x2



(b) window size 4x4

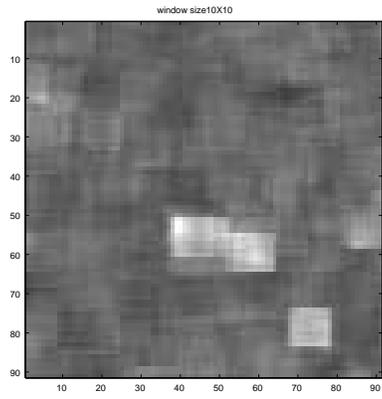


(c) window size 6x6

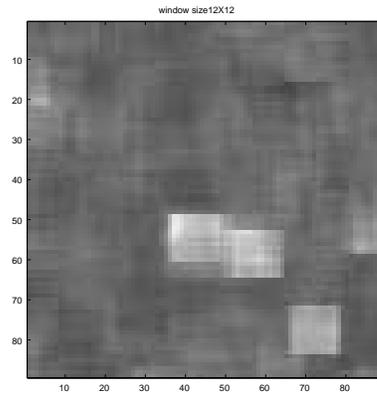


(d) window size 8x8

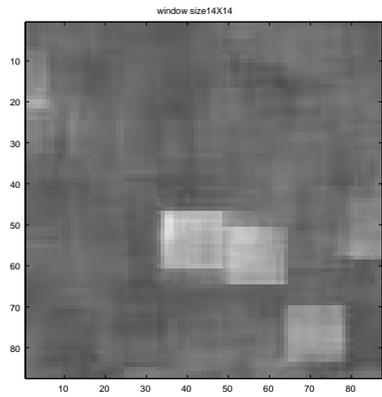
Figure C.5: SHIP A の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ 2x2 ~ 8x8)



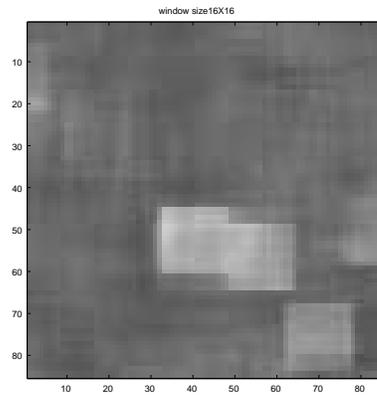
(a) window size10×10



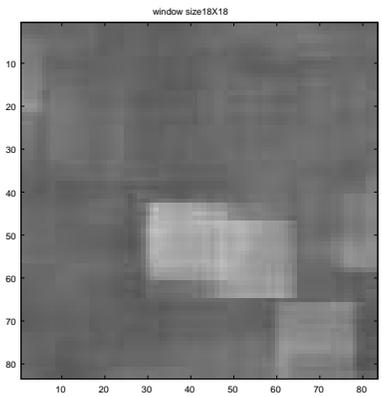
(b) window size12×12



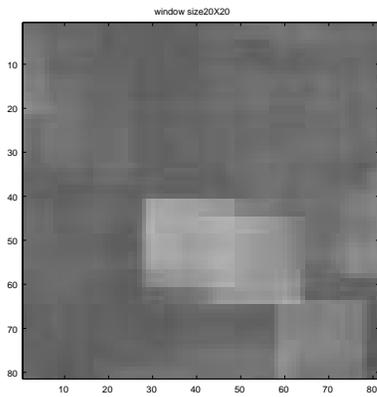
(c) window size14×14



(d) window size16×16



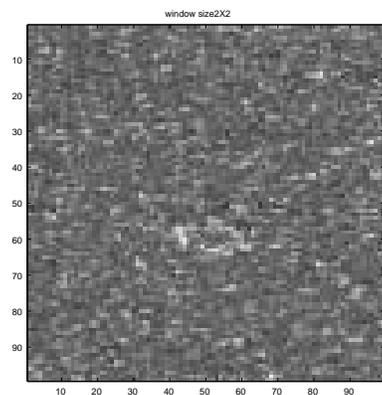
(e) window size18×18



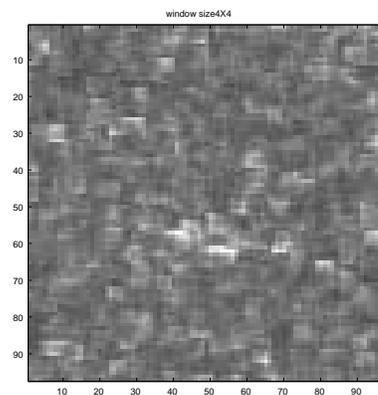
(f) window size20×20

Figure C.6: SHIP A の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ 10×10 ~ 20×20)

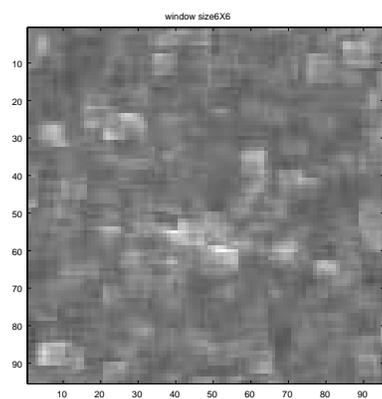
## C.2.2 SHIP B



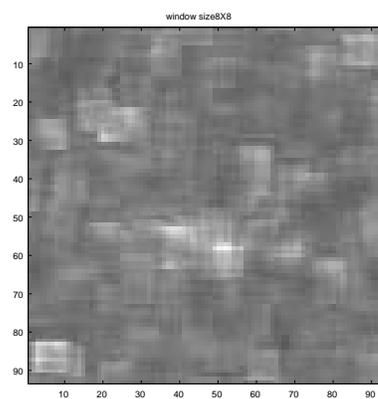
(a) window size $2\times 2$



(b) window size $4\times 4$

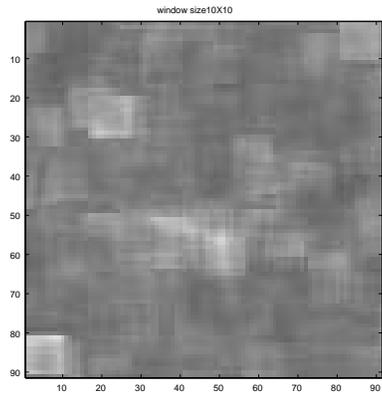


(c) window size $6\times 6$

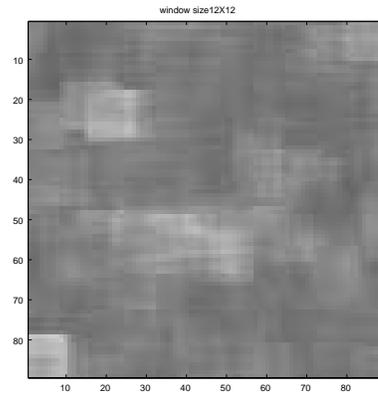


(d) window size $8\times 8$

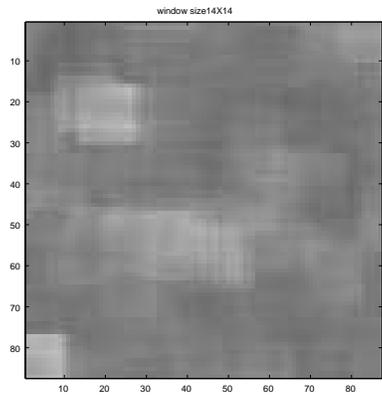
Figure C.7: SHIP B の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ  $2\times 2 \sim 8\times 8$ )



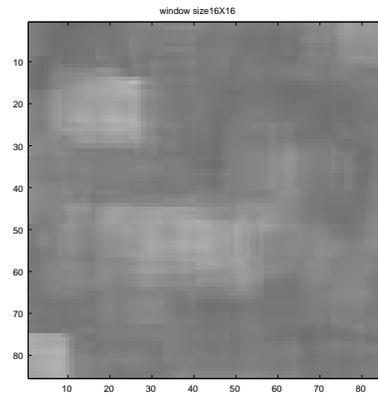
(a) window size10×10



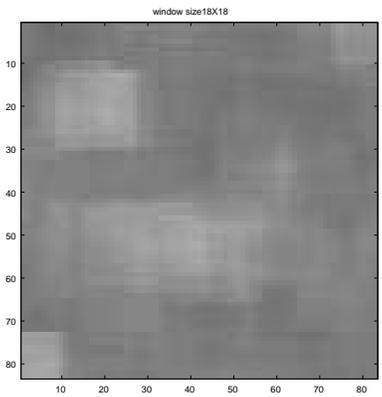
(b) window size12×12



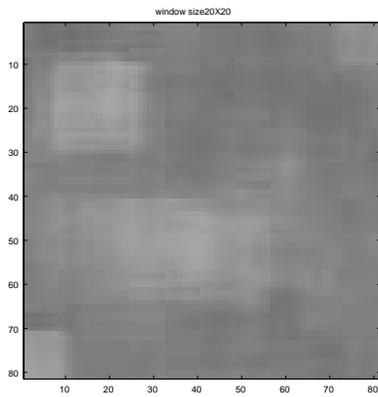
(c) window size14×14



(d) window size16×16



(e) window size18×18



(f) window size20×20

Figure C.8: SHIP B の平均相互相関画像 (ウィンドウサイズ 10×10 ~ 20×20)

## 参考文献

- [1] K.Ouchi, "On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-33, pp.823-827, 1985.
- [2] K.Ouchi, "Multilook images of ocean waves by synthetic aperture radars," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, pp.313-317, 1987.
- [3] K.Ouchi, S.Tajbakhsh and R.E.Burge, "Dependence of speckle statistics on backscatter cross-section fluctuations in synthetic aperture radar images of rough surfaces," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-25, pp.623-628, 1987.
- [4] 宅原雅人、大内和夫、高見勲、森村弘一、熊野信太郎, "SAR スプリット・ルック画像を利用したシークラッタ中の船舶検出法," *Proc. SAR Workshop 2001*, (社)資源協会地球科学技術推進機構, 東京, pp.83-86, 2001.
- [5] 矢口英暢、大内和夫, "スプリット・ルック SAR 画像の相互相関を用いた船舶検出のシミュレーション," 第 31 回日本リモートセンシング学会学術講演論文集, pp.113-116, 2001.
- [6] 玉木慎祐、大内和夫, "スプリット・ルック画像の相互相関を利用した船舶の検出," *Proc. SAR Workshop 2003*, 宇宙開発事業団 地球観測利用研究センター (NASDA-EORC), 東京, 2003.
- [7] 土屋清, リモートセンシング概論, 朝倉書店, 1990.
- [8] 日本リモートセンシング研究会, 図解リモートセンシング, 社団法人日本測量協会, 1992.
- [9] 財団法人資源観測解析センター, 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ 合成開口レーダ (SAR), 財団法人資源観測解析センター, 1992.
- [10] 日本測量学会, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998.
- [11] 財団法人資源・環境観測解析センター, リモートセンシング用語辞典, 財団法人資源・環境観測解析センター, 1998.
- [12] 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電気大学出版, 2003. (出版予定)

# 謝辞

本研究は、高知工科大学物質・環境システム工学科の大内和夫教授の御指導の下、行いました。研究を進めるにあたり、実験、データの解析、及び本論文の作成に際し、御指導並びに御鞭撻を賜りました大内和夫教授に厚く御礼申し上げ、ここに謝意を表します。

本研究における実験やプログラミング、論文作成の際に、高知工科大学物質・環境システム工学科、特別研究員 Glen Davidson 博士には、様々な助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、高知工科大学物質・環境システム工学科 4 年生、石田晃基氏、石橋弘氏、杉原一成氏、原利允氏には多大なる協力を頂きました。御礼申し上げます。

本研究で使用いたしました Radarsat データは、カナダ宇宙局 (Canadian Space Agency:CSA) の所有であり、Radarsat International 社 / リモートセンシング技術センターを通じ購入しました。生データの知的所有権は全て CSA にあります。本研究の Radarsat データは、高知工科大学で映像化致しました。

本研究は財団法人日本科学協会の平成 14 年度笹川科学研究助成により行われたものであります。