



撮影方向の異なる高分解能 SAR 画像を用いた 建物被害の検出精度の向上に関する研究

三浦弘之¹⁾, 翠川三郎²⁾, 松岡昌志³⁾

1) 正会員 広島大学 大学院工学研究院, 准教授 博士 (工学)

e-mail : hmiura@hiroshima-u.ac.jp

2) 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科, 教授 工博

e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

3) 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科, 准教授 博士 (工学)

e-mail : matsuoka.m.ab@m.titech.ac.jp

要 約

高分解能SAR画像による建物被害の検出精度の向上を目指して、2010年ハイチ地震の被災地を対象として、撮影方向が異なる2ペアの地震前後のSAR画像を用いて、個々の建物の倒壊の有無を判別する解析を行った。まず、撮影方向がほぼ同一の1ペアの画像と建物フットプリントデータを用いて、地震前後の強度差分値と相関係数に基づく線形判別解析から、それぞれの検出精度を比較したところ、画像の撮影方向と建物の立地方向の関係によって精度が変化することを明らかにした。さらに、2ペアの画像を用いた判別解析を行い、1ペアの画像解析に比べて検出精度がやや向上することを示した。

キーワード： 人工衛星リモートセンシング, SAR, 建物被害, 撮影方向

1. はじめに

都市域の近傍で大地震が発生すると広域で建物被害が生じる。このような広域災害に対して、地震直後の被害対応や早期の復旧計画を考えるために、できる限り迅速に被害の分布を把握する必要がある。リモートセンシングは現地調査をせずとも現地の様子を面的に把握することができることから、近年では災害直後の被害把握や復旧・復興モニタリングなどの災害対応における様々な局面で活用されている^{1~3)}。特に最近では、地表分解能1m以下の高解像度なリモートセンシング画像を利用して、個々の建物の被害を判読することで詳細な被害分布図を作成することが可能となった^{4,5)}。

人工衛星リモートセンシングによる観測のうち、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) による観測では、マイクロ波からなるレーダを衛星から能動的に照射し、その反射波の強度と位相を観測することにより地表面の状況が把握される。単偏波観測の場合は画像が白黒で情報量が少なく、目視による判読が容易でないという欠点があるが、天候条件によらず撮影が可能のため、災害直後の緊急時に画像が取得しやすく、光学センサによる観測に比べると防災上有利である。

SAR画像による建物被害の検出に関しては、地震前後のSAR強度画像の強度差分や相関係数を用いて被害地域を推定する手法が提案されており⁶⁾、複数の地震被災地に対して提案手法を適用することでその有用性が示されている⁷⁾。一方で、詳細な被害分布を得るには、建物一棟ごとの被害を判別することが望ましいが、従来のSAR画像の空間分解能は10m程度のものがほとんどであり、個々の建物の被害

を判読することは困難であった。最近では、TerraSAR-XやCOSMO-SkyMedのように空間分解能1m程度の高解像度なSAR画像が得られるようになり、個々の建物被害の判別にも利用されるようになってきた^{8~10)}。また、筆者らは、2010年ハイチ地震における被災地を対象として、地震前後の高分解能SAR画像と建物フットプリントデータを用いて、個々の建物に対して倒壊の有無を判別する手法について検討してきた^{11,12)}。ただし、これらの検討では、同一の撮影条件からなる地震前後の1ペアの画像のみを利用して、SAR画像は、対象地域に対してある一方向から照射したマイクロ波の反射を画像化したものであるため、地物の立地方向とマイクロ波の照射方向（撮影方向）の関係によって画像の特徴が大きく変化し、建物被害の検出精度も変化する可能性がある。しかし、SAR画像の撮影方向が異なることによって、建物被害の検出精度がどの程度変化するのかについて、定量的に評価した例はみあたらない。そこで本研究では、撮影方向の異なる2ペアの地震前後の高分解能SAR画像を用いて、各ペア画像による建物被害の検出を行うことで、撮影方向の違いによる検出精度の比較を行い、その要因を検討する。さらに、両ペアの画像を用いた解析を行うことで、より精度の高い検出を試みる。

2. 使用したデータ

2010年1月12日に発生したハイチ地震 ($M_w7.0$) では、首都ポルトープランスを中心に甚大な建物被害、人的被害が発生した。この地震により、死者・行方不明者は約32万人、20万棟以上の家屋に被害が生じ、そのうち約10万棟が倒壊した¹³⁾。図1に本地震に断層位置、ポルトープランス周辺における推定被害分布を示す。被害分布はUNITAR/UNOSAT¹⁴⁾により航空写真や衛星画像から判読したものを示している。図中の赤色や紫色で示された地域が甚大な被害が発生した地域を表している。本研究では、図1中の枠に示すようにポルトープランスの市街地の中でも被害が甚大だった南北約1000m、東西800mの範囲を対象地域とした。対象地域において、地震前の高分解能光学画像から読み取った建物フットプリントに、UNITAR/UNOSATにより公開されている被害区分のデータ¹⁴⁾を与えた建物被害データ¹⁵⁾を用いた。被害区分については、図2のイラストに示すようなEMS-98による被害区分¹⁶⁾に基づき、G1（無被害）、G3（中破）、G4（大破）、G5（倒壊）の4種類に分けられている。使用した建物被害データの分布を図3に示す。対象地域には計2434棟の建物が含まれており、G1建物、G3建物、G4建物、G5建物の棟数およびその割合はそれぞれ1038棟（42.6%）、137棟（5.6%）、533棟（21.9%）、726棟（29.8%）である。

本研究では、ドイツの人工衛星TerraSAR-Xにより撮影されたSAR強度画像を利用した。使用した画像の諸元と画像をそれぞれ表1、図4に示す。本研究では、Ascending（上昇）軌道により撮影された地震前後の画像およびDescending（下降）軌道により撮影された地震前後の画像の2ペア計4枚の画像を利用した。Ascending軌道とは、対象地域に対して人工衛星が南から北方向へ移動する際に撮影する軌道であり、図4中の矢印で示すように、ほぼ西方向（約N260E度）からマイクロ波は照射される。Descending軌道は、逆に人工衛星が北から南方向へ移動する際に撮影する軌道であり、図4中の矢印で示すように、ほぼ東方向（約N100E度）からマイクロ波は照射される。表1に示すように、Ascending画像として地震前の2008年

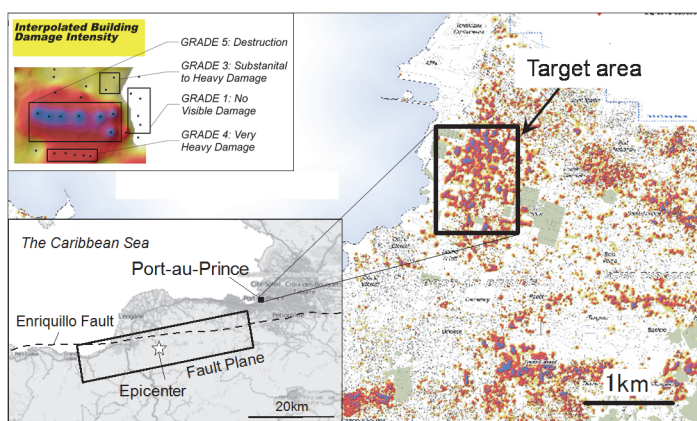


図1 2010年ハイチ地震の断層位置、被害分布¹⁴⁾および対象地域

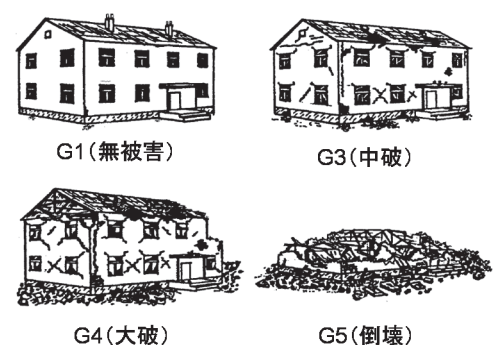


図2 EMS-98による建物の被害区分¹⁶⁾

9月と地震から2日後に撮影されたものを使用し、Descending画像として地震前の2009年10月と地震から8日後に撮影されたものを使用した。なお、全てStripMapモード、HH偏波で撮影されたものであり、画像のピクセルサイズは1.25mで、単偏波による白黒画像となっている。

3. 高分解能SAR画像における倒壊建物の特徴

SAR強度画像による既存の建物被害検出に関する研究では、被害建物では地震後に強度が低下する傾向を利用して、地震前後の強度差分と相関係数を説明変数とした合成変量から被害の有無を判別する手法が提案されている^{6,7)}。これは、地震前では建物の壁面等でマイクロ波が強く反射するのに対して、地震後に倒壊した建物ではマイクロ波が散乱するために反射強度が低下するためと考えられる。しかし、本研究で用いる地表解像度1m程度の高分解能なSAR画像では、地震後に強度が低下する倒壊建物がある一方で、地震後に強度が上昇する倒壊建物もみられた^{11,12)}。これは、対象地域のように建物が密集する地域では、地震前には隣接建物により当該建物が隠れてしまい、マイクロ波の反射がほとんど観測されないのに対して、地震により周辺の建物が倒壊すると、隣接建物による遮蔽がなくなり、当該建物の反射が相対的に高くなるためと考えられる。そこで、本手法では地震前後の強度差分の絶対値と相関係数を利用することとした。強度差分絶対値と相関係数は以下の式から算出した。

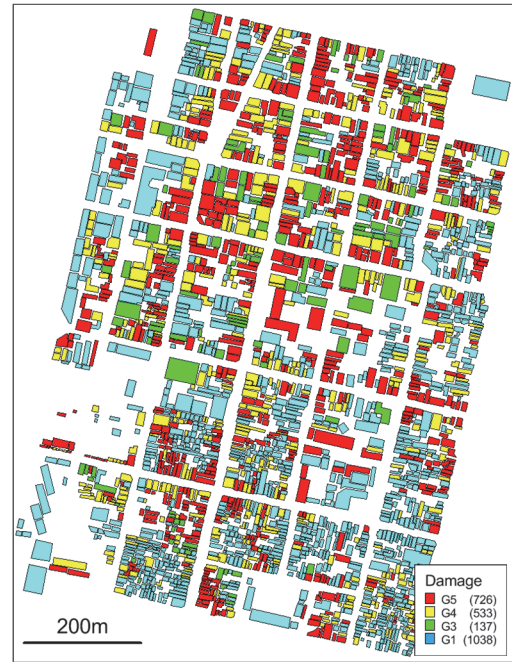


図3 対象地域における建物被害分布

$$|d| = |10 \cdot \log(\overline{Ia_i}) - 10 \cdot \log(\overline{Ib_i})| \quad (1)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N Ia_i \cdot Ib_i - \sum_{i=1}^N Ia_i \sum_{i=1}^N Ib_i}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N Ia_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N Ia_i \right)^2 \right) \cdot \left(N \sum_{i=1}^N Ib_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N Ib_i \right)^2 \right)}} \quad (2)$$

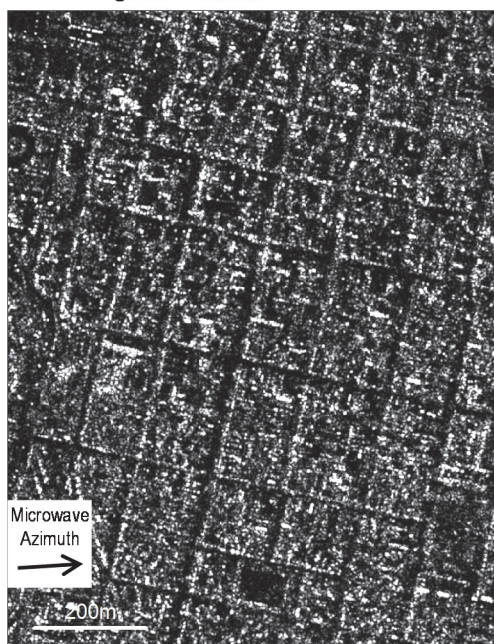
ここで、 $|d|$ と r は強度差分絶対値、相関係数を表し、 Ia_i と Ib_i は地震後、地震前の画素値を表す。 N は小ウィンドウ内の画素数を表し、本研究ではウィンドウサイズを11×11ピクセルとしたので、 N は121個となる。 $\overline{Ia_i}$ と $\overline{Ib_i}$ は小ウィンドウ内における画素値の平均値を表す。

Ascending軌道の画像ペアおよびDescending軌道の画像ペアそれぞれに対して、強度差分の絶対値と相

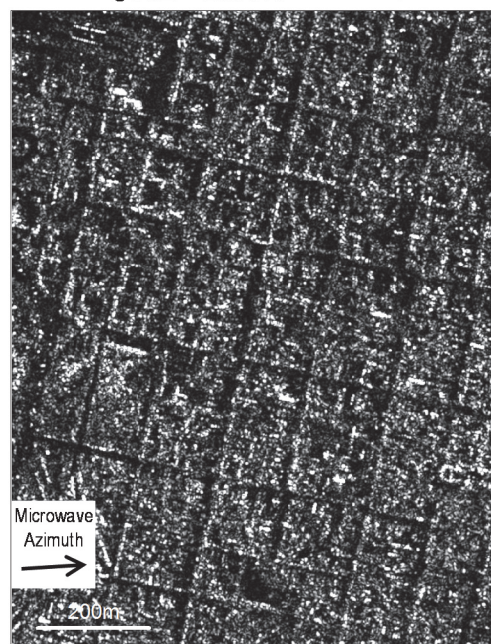
表1 使用した TerraSAR-X 画像の諸元

撮影軌道	時期	撮影年月日	撮影モード	偏波	入射角 (度)	ピクセル サイズ(m)
Ascending	地震前	2008/9/17	StripMap	HH	39.3	1.25
	地震後	2010/1/14	StripMap	HH	39.3	1.25
Descending	地震前	2009/10/13	StripMap	HH	39.1	1.25
	地震後	2010/1/20	StripMap	HH	39.1	1.25

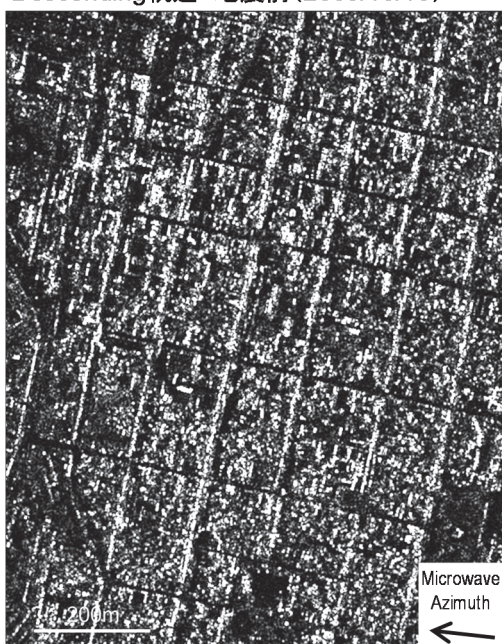
Ascending軌道 地震前(2008/9/17)



Ascending軌道 地震後(2010/1/14)



Descending軌道 地震前(2009/10/13)



Descending軌道 地震後(2010/1/20)

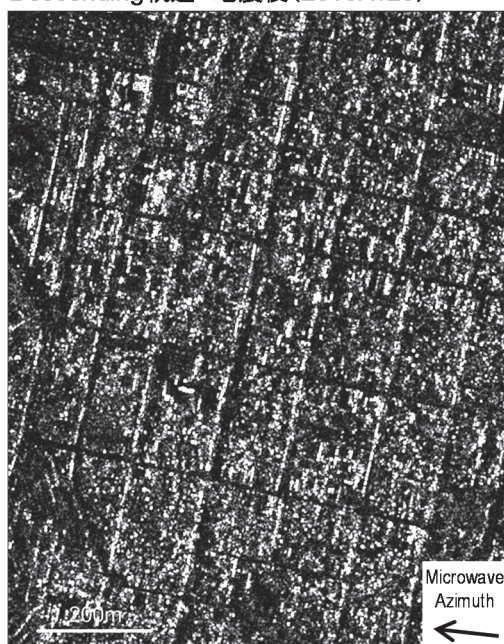


図4 Ascending 軌道, Descending 軌道の地震前後の SAR 画像

関係数を算出し、図3に示す被害区分ごとに建物ポリゴン内の画素数を求めることで、被害区分ごとの強度差分絶対値と相関係数のヒストグラムを求めた。SAR画像では建物屋根面は撮影方向に倒れ込むように投影されるため、文献^{9,12)}の方法と同様に、倒れ込み距離の分だけ建物ポリゴンを平行移動させて、ポリゴン内における各指標の統計値を算出した。各建物の倒れ込み距離は、表1に示す入射角と、建物高さから求められる。各建物の階数や高さの情報は得られていないことから、文献¹²⁾と同様に、全ての建物を階高3mの2階建て、すなわち建物高さ6mと仮定して、倒れ込み距離を算出した。図5、6に作成したヒストグラムを示す。それぞれの図(a)は強度差分絶対値の頻度分布、(b)は相関係数の頻度分布、(c)は強度

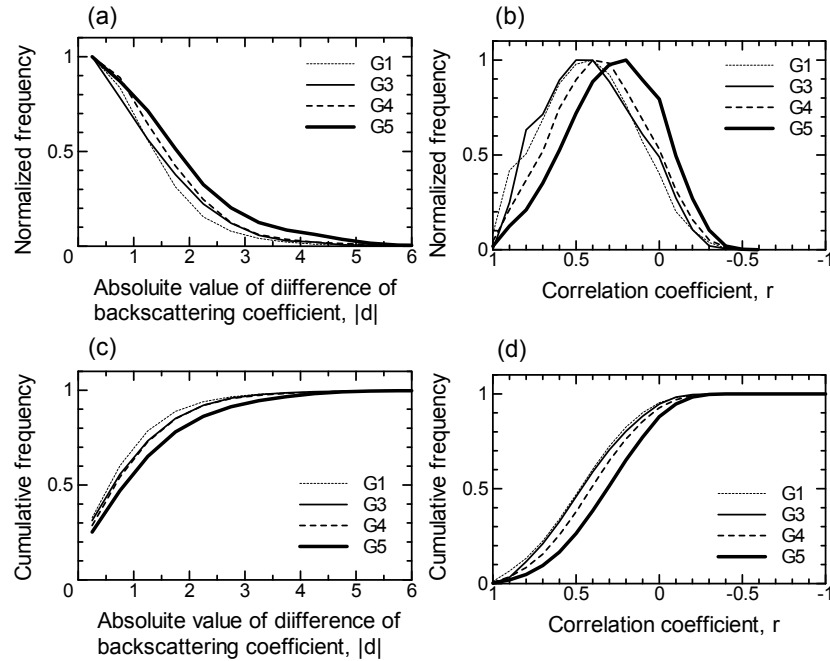


図5 Ascending 画像の強度差分絶対値、相関係数の頻度分布および累積頻度分布

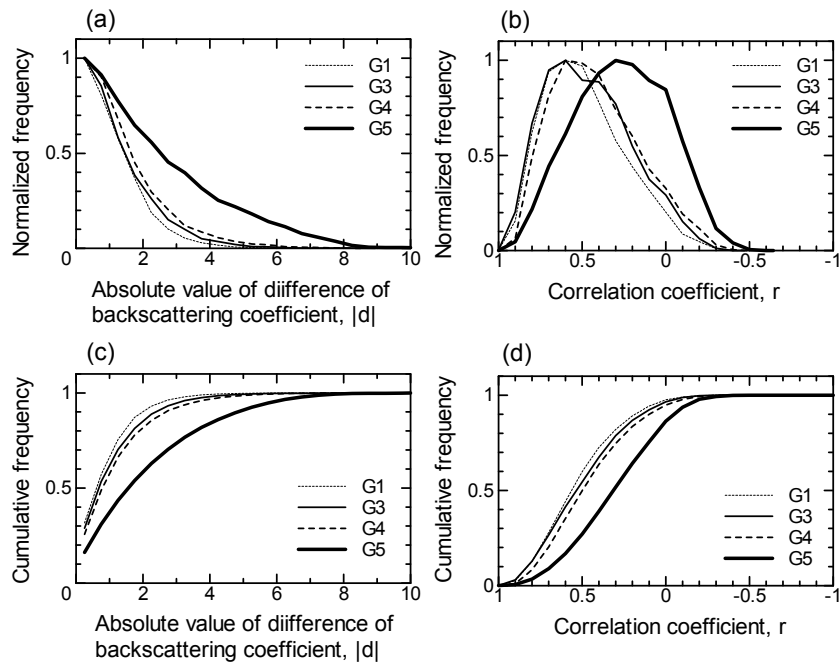


図6 Descending 画像の強度差分絶対値、相関係数の頻度分布および累積頻度分布

差分絶対値の累積頻度分布、(d)は相関係数の累積頻度分布を表す。これらの図をみると、いずれの図においてもG1、G3、G4建物の間に各指標の違いは明瞭にみられず、画像からG1～G4の被害を判別することは困難である。一方で、G5建物だけは、他の被害区分に比べて強度差分絶対値は大きく、相関係数は小さい傾向がみられる。このことは、本研究で使用する高分解能SAR画像からは建物の倒壊（G5）の有無が判別できる可能性を示唆している。また、Ascending画像とDescending画像を比較すると、Descending画像に比べるとAscending画像の方がG5建物とG1～G4の建物間の指標の違いは小さい。このため、対象地域ではAscending画像の方が建物被害の判別が比較的困難になることが予想される。

4. 地震前後のSAR画像による建物被害の判別

各建物ポリゴン内における強度差分絶対値と相関係数の平均値を算出し、それらの分布を被害区分ごとに図化したものを図7、図8に示す。ここで、G1～G4建物の棟数（計1708棟）はG5建物（計726棟）に比べて2倍以上多い。両者を判別する解析を行うにあたり、それぞれの棟数の多寡による偏りを軽減するために、G1～G4建物のうちG1建物を代表的な建物と考え、計1038棟の中からランダムに726棟を選択し、それらを以降の検討で利用することとした。図7、8の左側はランダムに選択されたG1建物の計726棟における分布、右側はG5建物の計726棟における分布を表し、それぞれ横軸が強度差分絶対値、縦軸が相関係数を表す。なお、ランダムに選択したG1建物とG1～G4の全建物を比較したところ、強度差分絶対値と相関係数の分布に大きな違いはみられないことを確認している。図中の黒丸とエラーバーはそれぞれの値の平均値と標準偏差を表している。これらを見ると、G1建物に比べてG5建物は、強度差分絶対値は大きく、相関係数は低くなっている傾向が確認できる。次に、両指標を用いてG1建物とG5建物を判別する指標を求めるために線形判別分析を行った。線形判別分析は、単数ないし複数の説明変数を用いて目的とする二群を判別する方法のひとつ¹⁷⁾であり、本研究では強度差分絶対値と相関係数を説明変数として、G1建物群とG5建物群を判別する指標を求めた。解析の結果得られた線形判別関数を以下に示す。

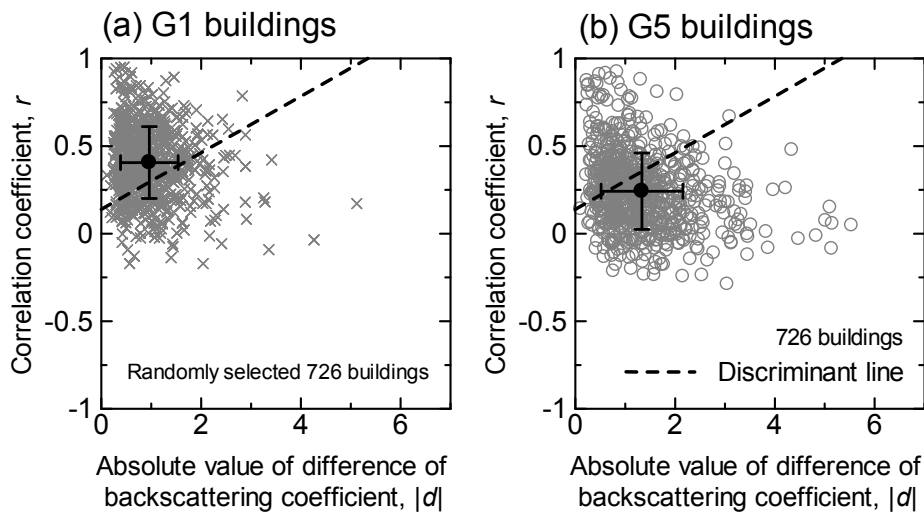


図7 Ascending 画像による強度差分絶対値と相関係数の分布（G1 建物と G5 建物）

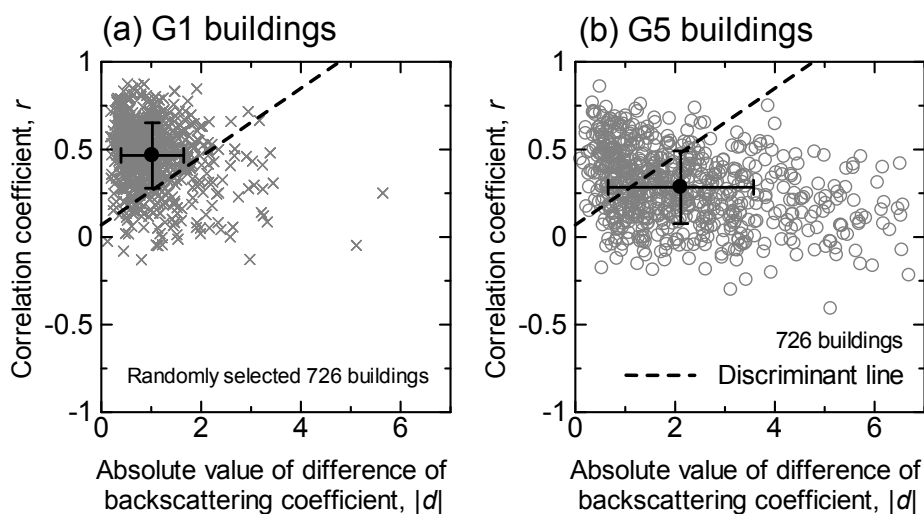


図8 Descending 画像による強度差分絶対値と相関係数の分布（G1 建物と G5 建物）

$$z_A = 0.615 |d| - 3.812r + 0.530 \quad (3)$$

$$z_D = 0.581 |d| - 2.977r + 0.205 \quad (4)$$

ここで、 z_A と z_D がそれぞれAscending画像ペアとDescending画像ペアで得られた合成変数を表す。図7、8中の破線がそれぞれの合成変数がゼロとなる境界線を表す。境界線より右下の領域（ $z \geq 0$ ）にある建物群はG5建物と判別され、左上の領域（ $z < 0$ ）にある建物群はG1建物と判別される。

式（3）、（4）による式を用いて、建物ポリゴン内の合成変数の平均値が正であった建物はG5建物として判別し、負であった建物はG1～G4建物であると判別した。全建物に対する判別結果を表2に示す。表2(a)がAscending画像ペアを用いた結果、表2(b)がDescending画像ペアを用いた結果を表す。表の横軸は建物被害データの区分、縦軸は画像解析による判別結果を表す。表中のProducer精度とは対象とする建物のうち、解析で正しく検出できた建物数の割合（検出率）を表し、User精度とは画像解析により推定された建物のうち、正解だった建物数の割合（正解率）を表す。ここでは、合成変数の大きさごとの棟数およびUser精度も併せて示しており、灰色で示した箇所が正解だった棟数と割合を表している。結果をみると、合成変数の大きさによってUser精度は異なり、G5建物に対しては合成変数が大きいほどUser精度が高く、逆にG1～G4建物に対しては合成変数が小さいほどUser精度が高い傾向がみられた。また、G5建物に対するProducer精度はAscending画像、Descending画像ともに70%弱で大きな違いはみられなかったが、画像解析でG5建物と判別された建物に対するUser精度は、Ascending画像よりもDescending画像の方が約10%高い傾向がみられた。このため、全体精度はDescending画像で74%であるのに対して、Ascending画像では69%とやや低い値となった。このことは、画像の撮影方向によって検出精度が変化することを表している。

表 2 線形判別分析による建物被害の判別結果

(a) Ascending 画像による結果

Ascending画像による結果	建物被害データ				User精度(%)	
	G5		G1-G4			
	棟数	割合(%)	棟数	割合(%)		
G5 ($z_A \geq 1.0$)	210	28.9	131	7.7	61.6	45.8
G5 ($0.0 \leq z_A < 1.0$)	287	39.5	458	26.8	38.5	
G1-G4 ($-1.0 \leq z_A < 0.0$)	166	22.9	712	41.7	81.1	83.0
G1-G4 ($z_A < -1.0$)	63	8.7	407	23.8	86.6	
合計	726	100.0	1708	100.0	—	
Producer精度(%)	68.5		65.5		全体精度(%) =68.97	

(b) Descending 画像による結果

Descending画像による結果	建物被害データ				User精度(%)	
	G5		G1-G4			
	棟数	割合(%)	棟数	割合(%)		
G5 ($z_D \geq 1.0$)	226	31.1	102	6.0	68.9	55.8
G5 ($0.0 \leq z_D < 1.0$)	263	36.2	286	16.7	47.9	
G1-G4 ($-1.0 \leq z_D < 0.0$)	182	25.1	870	50.9	82.7	84.8
G1-G4 ($z_D < -1.0$)	55	7.6	450	26.3	89.1	
合計	726	100.0	1708	100.0	—	
Producer精度(%)	67.4		77.3		全体精度(%) =74.32	

一般に災害直後対応を考えると、災害後すぐに得られたSAR画像を用いて被害把握解析が行われる。今回のケースでは、表1に示したように災害直後に撮影されたのはAscending画像であった。しかし、表2に示したように、Ascending画像のみを使った解析ではやや精度の悪い結果しか得られないことになる。このため、撮影方向が被害の検出精度に及ぼす影響について検討し、より精度の高い検出手法について検討する必要があるものと考えられる。

5. 撮影方向と検出精度の関係

前述したように、SAR画像はある一方向から照射されたマイクロ波の反射を画像化したものであるため、照射方向によっては画像の特徴が大きく変化する。図4に示すように、Ascending画像は約N260E度方向から照射されており、Descending画像では約N100E度方向から照射されている。一方で、図3に示すように、対象地域では北北東-南南西方向あるいはそれに直交な東南東-西北西方向に道路が存在し、ほとんど全ての建物はこれらの道路に平行に立地している。これらの位置関係を図化すると図9のようにな

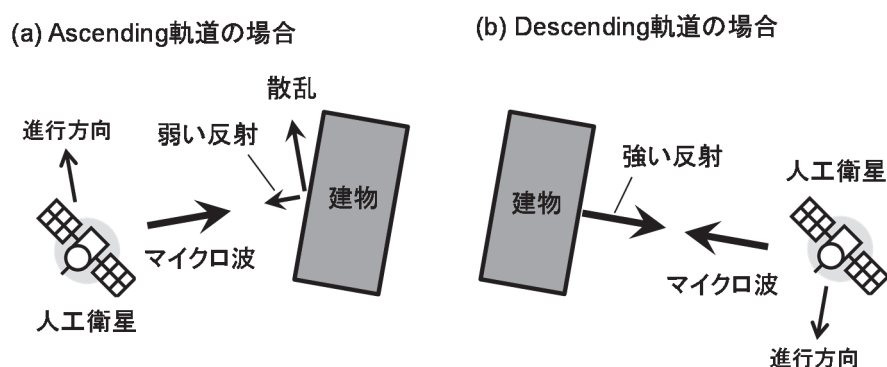


図9 Ascending 軌道と Descending 軌道によるマイクロ波の照射と建物の位置関係（平面図）

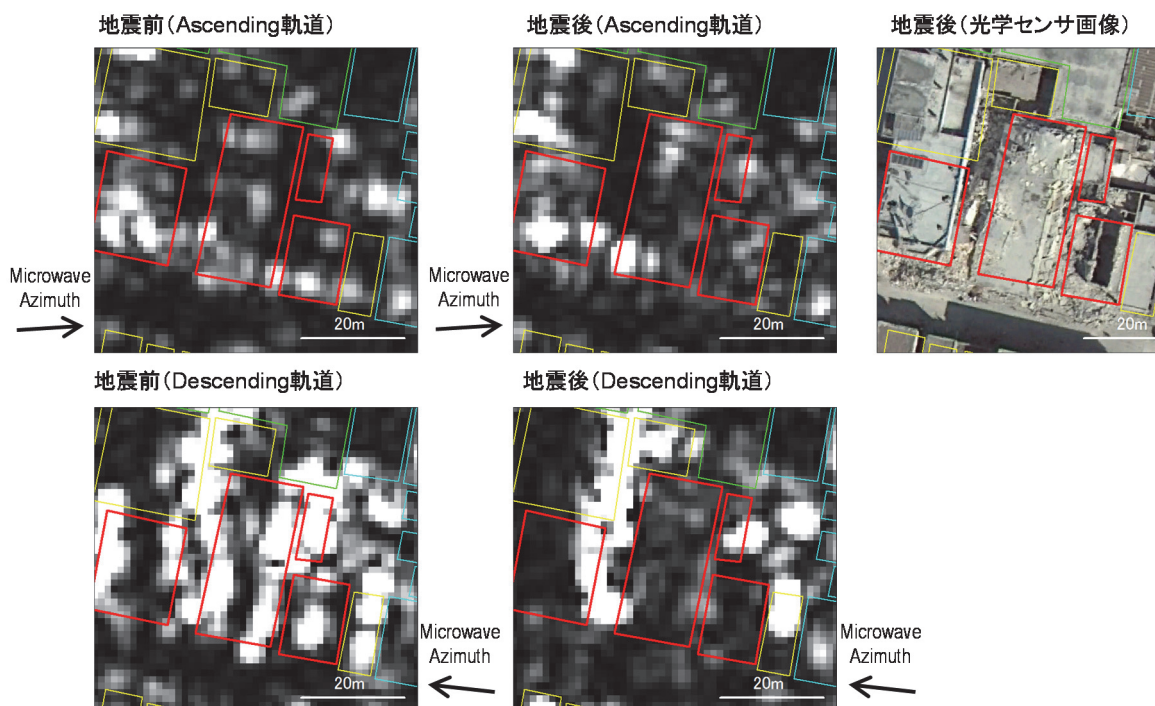


図10 Ascending 画像と Descending 画像による倒壊建物の見え方の比較

る。Ascending画像の場合、マイクロ波の照射方向と建物の立地方向が直交しないため、壁面における散乱により、人工衛星方向へのマイクロ波の反射は弱まってしまう。一方で、Descending画像の場合、マイクロ波の照射方向と建物の立地方向がほぼ直交しているため、壁面で強い反射が発生し、それが人工衛星方向へ反射される。このため、Ascending画像よりもDescending画像の方が画像から建物の存在を明瞭に確認することができ、これらの建物が倒壊した場合、反射強度がより大きく変化するので画像上の変化をとらえることが比較的容易となる。

一例として、ある倒壊建物の拡大図を図10に示す。図中の枠線は建物の輪郭を表し、赤線は倒壊（G5）建物を表す。図中の光学センサ画像に示したように、中央の建物は倒壊し、瓦礫が散乱している。図の上側に示すAscending画像では、地震前後の画像に顕著な変化はみられず、倒壊の有無を判別することは困難である。一方で、図の下側に示すDescending画像では、地震前画像では建物の東側壁面で白いピクセルが多く集中しており強い反射がみられるのに対して、地震後画像をみるとこれらの反射が顕著に低下しており、画像から変化をとらえることが比較的容易になっている。

以上から、高分解能SAR画像から個々の建物の被害を判別する際には、画像の撮影方向と建物の立地方向の関係によって検出精度が変化し、建物群の立地方向が撮影方向と直交する場合には、直交しない場合に比べて、より精度良く被害を検出できることがわかった。

6. 撮影方向の異なる2ペアの画像を用いた建物被害の判別

6.1 各ペア画像の合成変量の正負による分類

大地震等の巨大災害後には人工衛星から集中的に被災地の撮影が行われる場合が多い。このため、SAR画像においてもAscending軌道あるいはDescending軌道の一方向から撮影した画像だけでなく、両軌道による画像が得られる可能性は高い。そこで、両軌道による2ペアの地震前後の画像を用いることで、建物被害の検出精度がどの程度向上するか検討した。

まず、最も簡便な方法として、それぞれのペア画像の合成変量の正負に基づく判別を試みた。表2に示す結果から、G5建物、G1～G4建物それぞれに対して、①いずれの画像ペアでも合成変量が正の値となったもの（つまり、 $(z_A \cdot z_D) \geq 0$ かつ $(z_A + z_D) \geq 0$ ）、②一方の合成変量は正、他方は負で、両者の和が正となるもの（ $(z_A \cdot z_D) < 0$ かつ $(z_A + z_D) \geq 0$ ）、③一方の合成変量は正、他方は負で、両者の和が負となるもの（ $(z_A \cdot z_D) < 0$ かつ $(z_A + z_D) < 0$ ）、④いずれの画像ペアでも合成変量が負の値となったもの（ $(z_A \cdot z_D) \geq 0$ かつ $(z_A + z_D) < 0$ ）、の4種類に分類した。表3にそれぞれの棟数と割合を示す。G5建物については、①に分類されたものが50%強で、②または③に分類されたものがあわせて30%強、④に分類されたものが約15%であった。つまり、G5建物の約半数は画像の撮影方向によらず検出できた一方で、約15%の建物はどちらの画像ペアでも検出できなかった。また、一方の画像ペアでは検出できたが、他方の画像ペアでは検出できなかったものが約30%あり、これらの建物が撮影方向によって検出精度が変化する建物を表している。逆に、G1～G4建物については、①に分類されたものが10%強、②または③に分類されたものが30%強、④に分類されたものが50%強となった。この結果は、G5建物と同様に、G1～G4

表3 各ペア画像の合成変量の正負に基づく分類結果

Ascending画像とDescending画像 による結果	建物被害データ				User精度(%)	
	G5		G1-G4			
	棟数	割合(%)	棟数	割合(%)		
① $(z_A \cdot z_D) \geq 0$ かつ $(z_A + z_D) \geq 0$	380	52.3	184	10.8	67.4	55.3
② $(z_A \cdot z_D) < 0$ かつ $(z_A + z_D) \geq 0$	140	19.3	236	13.8	37.2	
③ $(z_A \cdot z_D) < 0$ かつ $(z_A + z_D) < 0$	87	12.0	375	22.0	81.2	86.2
④ $(z_A \cdot z_D) \geq 0$ かつ $(z_A + z_D) < 0$	119	16.4	913	53.5	88.5	
合計	726	100.0	1708	100.0	—	
Producer精度(%)	71.6		75.4		全体精度(%) =74.28	

建物の約半数は画像の撮影方向によらず検出でき、約10%はどちらの画像ペアでも検出できず、約30%が撮影方向によって検出精度が変化したことを表している。ここで、②と③に分類された建物の割合を比較すると、G5建物では②の方が割合は大きく、G1～G4建物では③の方が割合は大きい。このことは、各ペアの合成変量の和が正の値となる建物の方がG5である確率がやや高く、逆に合成変量の和が負の値となる建物の方がG1～G4建物である確率がやや高いことを表している。

そこで、①と②に分類された建物をG5と、③と④に分類された建物をG1～G4に分類したときの結果を図11に示す。図中の赤色及び橙色の建物がそれぞれ①、②に分類されたもの、灰色と白色がそれぞれ③、④に分類されたものを表す。比較のために図12に建物被害データによるG5建物の分布を示す。また、そのときのUser精度とProducer精度および全体精度を表3に併せて示す。表2に示すAscending画像による判別結果と比較すると、いずれの精度も向上しており、特にG5建物に対するUser精度やG1～G4建物に対するProducer精度が5～10%程度向上している。また、全体精度も約5%向上した。一方で、表2のDescending画像による判別結果と比較すると、G5建物に対するProducer精度やG1～G4建物に対するUser精度はやや向上しているものの、その他の精度は大差なく、全体精度もほぼ同程度であった。つまり、2ペアの画像によるそれぞれの判別結果を用いて被害判別を行うと、検出に不利なAscending画像による結果と比べると、判別精度は数%～10%程度向上するものの、もともと検出に有利なDescending画像による結果と比べると、判別精度はそれほど向上しなかった。

6.2 2ペア画像に基づく線形判別分析

次に、2ペア画像における各指標を用いて線形判別分析を試みた。ここでは、Ascending画像による強度差分絶対値と相関係数、Descending画像による強度差分値と相関係数の4つの指標を説明変数として、判別分析を行った。解析の結果得られた線形判別関数を式(5)に示す。

$$z_c = 0.280d_A + 0.454d_D - 1.645r_A - 2.343r_D + 0.378 \quad (5)$$

ここで、 z_c が2ペア画像による合成変量を表し、 d_A と d_D がそれぞれAscending画像とDescending画像の強度差分絶対値、 r_A と r_D がAscending画像とDescending画像の相関係数をそれぞれ表す。本研究で利用した画像の場合、Descending画像の方が被害検出性能は高いことから、式(5)における各指標の係数はDescending画像の方が大きくなっていることが確認できる。

得られた合成変量から被害を判別した結果を図13に示す。ここでは、合成変量の大きさごとに色分けし、赤色および橙色で示した建物がG5と判別された建物、灰色および白色の建物がG1～G4建物と判別された建物を表す。図11に示す被害データによるG5建物の分布と比較すると、規模の大きなG5建物は本判別方法により概ね正しく検出されており、G5建物が集中する地域においても多くの建物が検出されていることがわかる。一方で、規模の小さなG5建物の検出率はやや低いようにみえる。判別精度をまとめ

表4 2ペアの画像の合成変量による判別結果

Ascending画像とDescending画像 による結果	建物被害データ				User精度(%)	
	G5		G1-G4			
	棟数	割合(%)	棟数	割合(%)		
G5 ($z_C \geq 1.0$)	258	35.5	84	4.9	75.4	56.6
G5 ($0.0 \leq z_C < 1.0$)	258	35.5	312	18.3	45.3	
G1-G4 ($-1.0 \leq z_C < 0.0$)	153	21.1	815	47.7	84.2	86.2
G1-G4 ($z_C < -1.0$)	57	7.9	497	29.1	89.7	
合計	726	100.0	1708	100.0	—	
Producer精度(%)	71.1		76.8		全体精度(%) =75.10	



図 11 各ペア画像の合成変量の正負に基づく分類結果

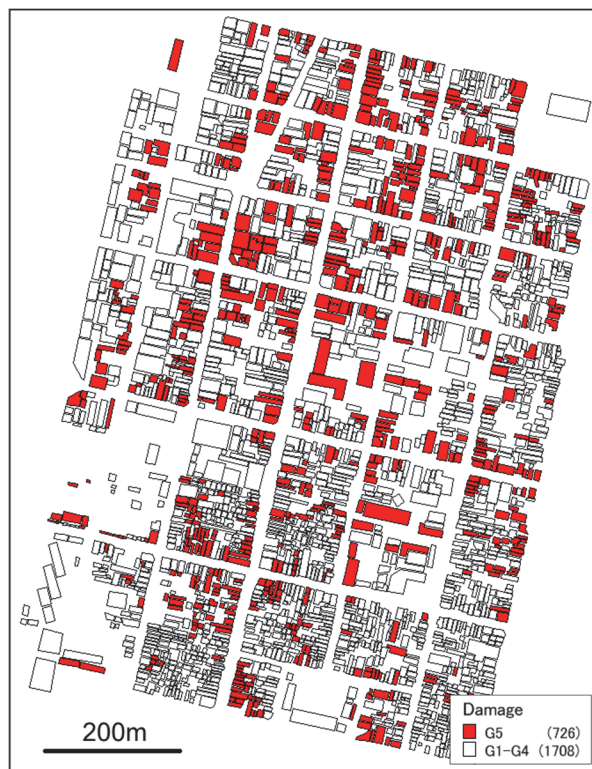


図 12 建物被害データによる G5 建物分布



図 13 2 ペアの画像の合成変量による判別結果

たものを表4に示す。合成変量の値が大きいほど、G5建物に対するUser精度は高くなっていることが確認できる。表2に示すAscending画像ペアのみによる結果に比べると、G5建物のUser精度とG1～G4建物のProducer精度が10%前後上昇し、全体精度も約5%上昇した。一方で、Descending画像での結果に比べると、ほとんどの精度が上昇してはいるものの、その上昇幅は1～4%程度とやや小さかった。表3による結果と比較すると、G5建物に対するProducer精度は若干低下しているものの、その他の精度は高くなっており、全体精度もわずかながら向上した。

以上の検討から、2ペアの画像を用いることにより、1ペアでの画像に比べてより精度の高い被害検出が可能になることが確認された。ただし、検出に有利なDescending軌道によるペア画像の結果に比べると、精度の上昇はそれほど大きくはなく、検出に不利なAscending軌道によるペア画像を解析に加えても、それほど検出精度は向上しないことがわかった。本研究による対象地域では、街路が基盤の目状でほぼ同じ方向に立地する建物が多かったが、様々な方向に立地する建物が混在している地域では、それぞれの軌道による画像で検出に有利な建物群が存在することとなる。このような場合、1ペアの画像よりも、撮影方向の異なる複数ペアの画像を用いた方が検出精度の向上がより高まるものと考えられる。

7. 結論

本研究では、2010年ハイチ地震におけるポルトープランスの市街地を対象として、撮影方向の異なる2ペアの地震前後の高分解能SAR画像を用いて、個々の建物倒壊の有無を判別する手法について検討した。撮影条件がほぼ同一な1ペアの画像に対して、地震前後の強度差分絶対値と相関係数を説明変数とする線形判別解析を行い、建物の倒壊の有無を判別する関数を求めた。それぞれのペア画像による判別結果から、撮影方向が建物と直交する場合には、直交しない場合に比べて検出精度が高くなり、撮影方向と建物の立地方向の関係が判別精度に影響を及ぼすことがわかった。さらに、撮影方向の異なる2ペアの画像を用いて建物倒壊の判別解析を行ったところ、1ペアの結果に比べると検出精度は数%程度向上することを示した。一般に、画像の撮影方向と建物の立地方向は画像や地域によって様々であることから、撮影方向の異なる画像を用いれば、それぞれの画像で検出に有利な建物群が存在する可能性が高くなる。このため、高分解能SAR画像を用いて建物被害の検出を行う際には、災害直後に撮影された1ペアの画像だけでなく、撮影方向の異なる複数ペアの画像を用いた方が、より高い精度で被害を検出できるものと期待される。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：24241059）によるものである。本研究で利用したTerraSAR-X画像は株式会社パスコから提供されたものである。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Rathje, E. M., and Adams, B. J.: The role of remote sensing in earthquake science and engineering: Opportunities and challenges, *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.2, 2008, pp.471–492.
- 2) Duda, K. A., and Jones, B. K.: USGS Remote sensing coordination for the 2010 Haiti earthquake, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.77, No.9, 2011, pp.899-907.
- 3) Takagishi, S., Yoshikawa, K. and Shibayama, T.: Disaster monitoring by multi-temporal images of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Society (IGARSS)*, 2011, Paper No. TH4.T07.5.
- 4) Ghosh, S., Hyuck, C. K., Greene, M., Gill, S. P., Bevington, J., Svekla, W., DesRoches, R. and Eguchi, R. T.: Crowdsourcing for rapid damage assessment: The global earth observation catastrophe assessment network (GEO-CAN), *Earthquake Spectra*, Vol.27, No.S1, 2011, pp.S179-S198.
- 5) Gokon, H. and Koshimura, S.: Mapping of building damage of the 2011 Tohoku earthquake tsunami in Miyagi prefecture, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 2012, Paper No. 1250006.

- 6) 松岡昌志、山崎文雄：人工衛星SAR強度画像による建物被害地域の検出手法、日本建築学会構造系論文集、No.551、2002年、pp.53-60.
- 7) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Comparative analysis for detecting areas with building damage from several destructive earthquakes using satellite synthetic aperture radar images, *Journal of Applied Remote Sensing, SPIE*, Vol.4, No.1, 2010, 041867 [doi:10.1117/1.3525581].
- 8) Brunner, D., Lemoine, G., and Bruzzone, L.: Earthquake damage assessment of buildings using VHR optical and SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.48, 2010, pp.2403-2420.
- 9) リュウ・ウェン、山崎文雄、郷右近英臣、越村俊一：高解像度SAR画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波湛水域と建物被害の抽出、日本地震工学会論文集、第12巻、第6号、2012年、pp.73-85.
- 10) Uprey, P., Yamazaki, F. and Dell'Acqua, F.: Damage detection using high-resolution SAR imagery in the 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.29, No.4, 2013, pp.1521-1535.
- 11) Miura, H. and Midorikawa, S.: Preliminary analysis for building damage detection from high-resolution SAR images of the 2010 Haiti earthquake, *Joint Conference Proceedings of 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, 2012, Paper No.01-212.
- 12) Miura, H., Midorikawa, S. and Matsuoka, M.: Building damage assessment using high-resolution satellite SAR images of the 2010 Haiti earthquake, *Earthquake Spectra*, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1193/033014EQS042M>, (印刷中) .
- 13) Government of the Republic of Haiti: Action plan for national recovery and development of Haiti –Immediate key initiatives for the future-, [http://www.haitireconstructionfund.org/system/files/Haiti Action Plan.pdf](http://www.haitireconstructionfund.org/system/files/Haiti%20Action%20Plan.pdf), 2010.
- 14) UNITAR/UNOSAT: *World Bank and EC joint research Centre: Joint remote sensing damage assessment database, Haiti earthquake 12 January 2010, In support to post disaster needs assessment and recovery framework (PDNA)*, <http://www.unitar.org/unosat/haiti-earthquake-2010-remote-sensing-based-building-damage-assessment-data>, 2010.
- 15) 三浦弘之、翠川三郎、Soh Hui Chen：2010年ハイチ地震における被害地域検出のための高分解能衛星画像のテクスチャ解析、日本地震工学会論文集、第12巻、第6号、2012年、pp.2-20.
- 16) Grunthal, G. (ed.): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Vol.15, 1998, 99p.
- 17) 奥野忠一、久米 均、芳賀敏郎、吉澤 正：改訂版 多変量解析法、日科技連出版社、1981年、430p.

(受理：2015年3月26日)

(掲載決定：2015年10月20日)

Accuracy Improvement of Building Damage Detection Using High-Resolution SAR Images Observed from Different Directions

MIURA Hiroyuki ¹⁾, MIDORIKAWA Saburoh ²⁾ and MATSUOKA Masashi ³⁾

1) Member, Associate Professor, Hiroshima University, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

3) Member, Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

The effect of observation direction on building damage detection from high-resolution SAR images is discussed by using two pairs of TerraSAR-X images and building damage data in the area damaged by the 2010 Haiti earthquake in order to improve the detection accuracy. The ascending pair and the descending pair of the images observed before and after the earthquake are analyzed. Linear discrimination analysis is applied to the pairs of the images in order to identify the collapsed buildings. The result shows that the accuracy of the damage detection depends on the relation between the observation direction and the building direction. The analysis based on the two pairs of the images achieves higher accuracy than the analysis based on a pair of the images.

Keywords: Satellite remote sensing, SAR, Building damage, Observation direction