

# 航空機 Pi-SAR-X2 画像による 2016 年熊本地震の建物後方散乱特性に関する基礎的検討

タン ティンシエン<sup>1</sup>・劉 ウェン<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 非会員 千葉大学工学部 学生 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

E-mail:afsa5480@chiba-u.jp

<sup>2</sup> 正会員 千葉大学大学院 工学研究院 助教 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

E-mail: wen.liu@chiba-u.jp

<sup>3</sup> 正会員 千葉大学大学院 工学研究院 教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

E-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

2016年4月16日に熊本県熊本地方でMw7.3の地震が発生した。とくに、熊本県益城町において建物の倒壊をはじめとする、多くの被害が生じた。熊本地震の発生直後、情報通信研究機構(NICT)はXバンドレーダ搭載の航空機Pi-SAR-X2を用いて被災地域を観測した。本研究では益城町を対象地域として、2016年熊本地震の直後に撮影された分解能0.3mの多偏波Pi-SAR-X2画像を使用して、平屋根形式の建物に対してマイクロ波の反射モデルを作成した。SARの斜め照射特性から起こる画像上の倒れ込みやレーダ影といった基本的な特徴を検討して、HH偏波画像における後方散乱係数の平均値を算出し、個別建物の被害状況の把握を試みる。

**Key Words:** Pi-SAR-X2, flat-roof building model, layover, Radar shadow, SAR backscattering

## 1. はじめに

近年、国内外で地震や風水害などの自然災害が多発し、曝露する人口や構造物の増加に伴って、災害リスクが増加している。そのため、自然災害による損失を軽減するために、被害状況を早期把握し適切な緊急対応を取る必要がある。しかし、災害発生時は交通網が寸断して早期に現地へ立ち入ることが困難な場合が多い。このような状況の解決策として、リモートセンシング技術の活用が考えられる。本研究で扱う合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)は、衛星や航空機からマイクロ波を照射し、天候に左右されずに全日に地表面を観測することができる。航空機搭載合成開口レーダ(Pi-SAR)は30cmの高分解能の多偏波SAR画像を取得ことができ、災害発生時には緊急観測ができる点から、被害把握手段として適していると考えられる。

SAR画像を用いた自然災害の被災地域に関する観測と研究は、2011年東北地方太平洋沖地震<sup>1)</sup>や2015年ネパール地震<sup>2)</sup>の例など、これまで多数行われてきた。地震などによって建物に被害が発生した場合、SAR画像上でも災害前後に変化が生じると考えられる。そこで、松岡・山崎<sup>3)</sup>は、建物被害地域の検出方法として後方散乱強度の差分値と相関値を複数時期の衛星SAR画像に適用し、検出精度を明らかにした。井上ら<sup>4)</sup>は、2時期の

Xバンド高解像度衛星SAR画像を用い、災害前後での橋梁周辺の後方散乱係数の差分と相関係数により、橋梁被害の把握を行った。しかし、航空機SARにおいては、同一撮影条件の災害前後画像の取得は一般に困難である。そこで、1時期の高解像度SAR画像から構造物の被害状況を把握することは重要といえる。

本研究では、2016年熊本地震後の1時期の航空機SAR画像からの建物被害抽出を最終目的として、建物の倒れ込みやレーダ影の特徴を利用した建物の後方散乱特性に関する基礎的検討を行った。

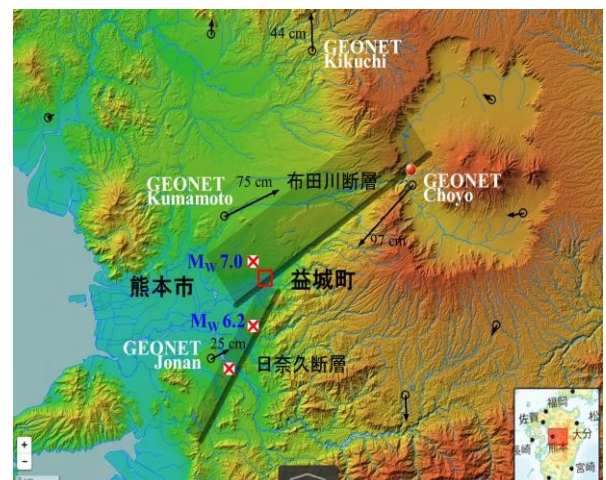


図1 熊本地震の起震断層帯と本研究の対象地域

## 2. 対象地域と使用データ

2016年4月14日21時26分、熊本県熊本地方の深さ11kmを震源とするMw6.5の地震(前震)が発生した。この地震を引き起こしたのは、震源付近を通る日奈久断層帯であると考えられている。この約28時間後の4月16日01時25分に布田川断層帯でMw7.3の地震(本震)が発生した。これらの地震により、熊本県益城町において震度7を2度観測した。図1には、これらの起震断層帯と本研究の対象地域(熊本県益城町)を示す。

本研究では、情報通信研究機構(NICT)<sup>5)</sup>がXバンドレーダ搭載の航空機Pi-SAR-X2を用いて被災地域を2016

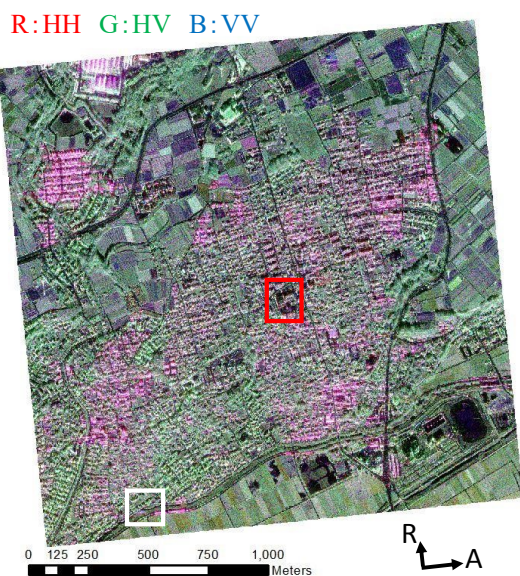


図2 Pi-SAR-X2多偏波画像によるカラー合成図  
(2016年4月17日撮影)



図3 益城町の航空写真(2016年4月23日撮影)

年4月17日に撮影した分解能30cmの4偏波Pi-SAR-X2画像を使用した。図2は多偏波SAR画像によるカラー合成図であり、比較するために益城町における航空写真(アジア航測(株)により撮影)を図3に示す。SARの入射角は37.6度、アジマス(飛行)方向が83.0度となっている。また、原画像のデジタル値(DN)は、式(1)を用いてから単位面積あたりの後方散乱係数( $\sigma^0$ )に変換し、画像解析に使用した。

$$\sigma^0 = 10 \cdot \log_{10}(|DN|^2) + 5.7 \quad (1)$$

## 3. SAR画像上の建物の反射モデル

SARアンテナは、衛星や航空機の飛行(アジマス)方向と直交するレンジ方向へ同心円上にマイクロ波を照射し、その反射波を観測する。観測されたデータは、アンテナと地表を結ぶスラントレンジ上に記録されるが、この観測原理に伴い、倒れこみやレーダ影などのSAR画像特有の幾何学的歪みが生じる。倒れこみやレーダ影の後方散乱特性は、被害抽出に有効と考えられる<sup>6)</sup>。

この幾何学的歪みをよく理解するために、Brunnerら<sup>7)</sup>が提案した平屋根モデルの散乱形式に基づいて、今回はRC造の平屋根形式の建物を選定し、倒れこみとレーダ影が、実際にSAR画像上にどのように表示されるかを検討する。

建物の後方散乱は、建物の屋根形式だけでなく建物の軸方向とマイクロ波の照射方向の角度によって大きく変わることがわかっている<sup>8)</sup>。そこで、建物の選定にあたってはレンジ方向を基準に建物軸方向まで時計回りを正に取った角度(照射角 $\phi$ )を考慮する。図4にレンジ方向と建物軸の照射角 $\phi$ の関係を示す。選定した建物の航空写真を図5に、航空レーザー計測(2016年4月23日、アジア航測(株)撮影)によるDSM(数値表層モデル)を図6に、建物の諸元を表1に示す。

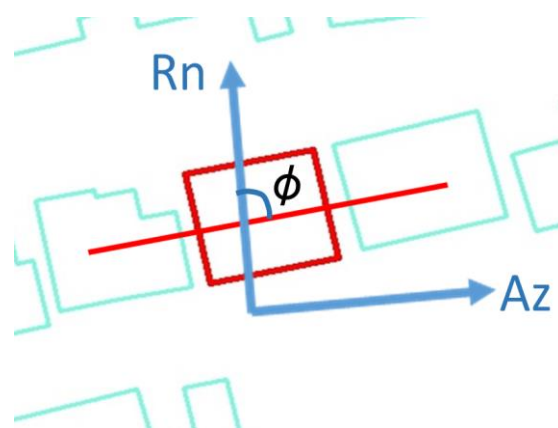


図4 建物軸とSARレンジ方向の照射角 $\phi$ の定義

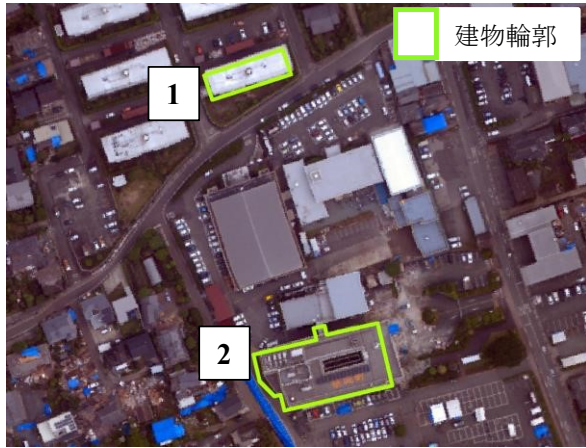


図5 対象としたRC造の平屋根建物

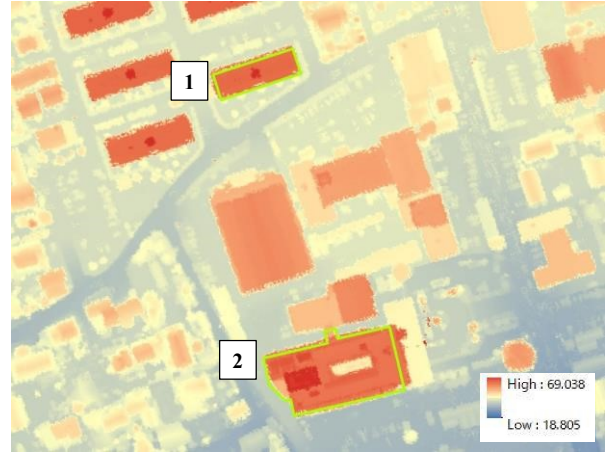


図6 航空レーザー計測（2016年4月23日）によるDSM

表1 平屋根建物の諸元と幾何形状による後方散乱モデル

建物	屋根形式	構造形式	被害度	階数	照射角(°)	高さH(m)	幅W(m)	後方散乱モデル
1	平屋根	RC造	D0	4	80.9	12.1	10.8	$H > W \tan \theta_1$
2			D2	3	80.3	12.8	26.7	$H < W \tan \theta_1$

(1) 平屋根 (Flat-roof) 建物の後方散乱形式

平屋根建物のモデルでは、幅  $W$  で高さ  $H$  の直方体建物を仮定している。SAR センサが入射角  $\theta_1$  で観測した際、地面からの反射散乱を  $a$ 、道路と建物壁などの直角構造で引き起こされる二回反射散乱を  $b$ 、前面壁からの反射散乱を  $c$ 、屋根から反射散乱を  $d$  とする後方散乱が、図7に示すように発生すると考えられる。この場合、地表面に投影された建物の倒れこみ長  $L$  とレーダ影長  $S$  は、式(2),(3)で求められる。

$$L = H \cot \theta_1 \quad (2)$$

$$S = H \tan \theta_1 \quad (3)$$

Brunner ら<sup>9)</sup>は、平屋根建物形式のモデルに対して、建物形状と入射角による条件を3つに分けて、それぞれの後方散乱モデルを提案した。本研究では  $H > W \tan \theta_1$  と  $H < W \tan \theta_1$  という典型的なケースに着目して、SAR画像上に平屋根建物の後方散乱モデルを作成した。

図7に示す  $H > W \tan \theta_1$  の場合では、屋根からの反射散乱  $d$  は二回反射散乱  $b$  よりも先に発生するため、倒れこみ区域は建物の輪郭内に到達しない。図8に示すこのケースの平屋根建物の SAR 画像では、明るく光っている部分（倒れこみ区域）が建物輪郭内に入っていないことが確認できる。

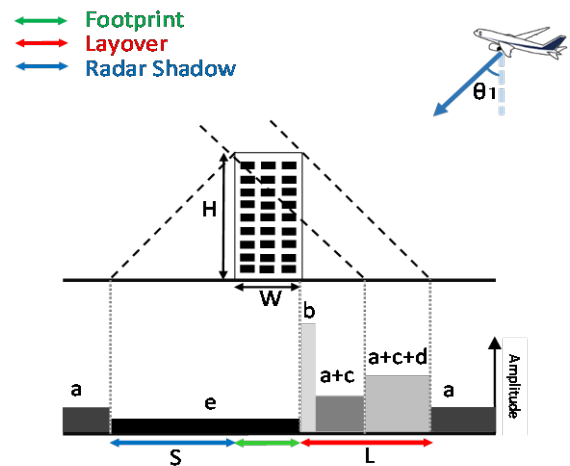


図7  $H > W \tan \theta_1$  の場合の後方散乱モデル

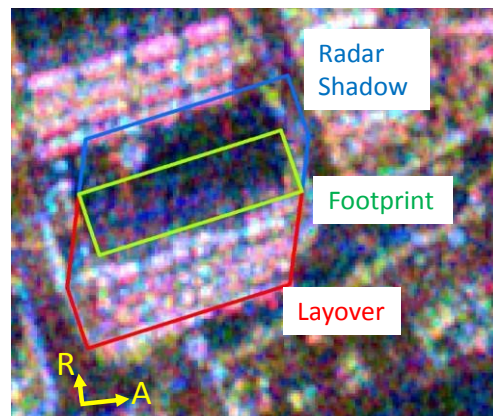


図8  $H > W \tan \theta_1$  の場合の SAR 画像と後方散乱モデル

図9示す  $H < W \tan \theta_1$  の場合は、一部の屋根からの散乱  $d$  が地面からの反射散乱と重なり合って二回反射散乱  $b$  より先に発生するが、残りの屋根からの反射  $d$  は倒れこみ域内に到達する。図10では、倒れこみ域の一部が建物の輪郭内に発生することが確認できる。

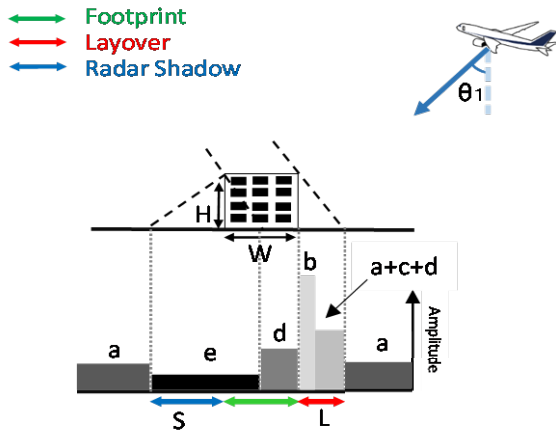


図9  $H < W \tan \theta_1$  の場合の後方散乱モデル

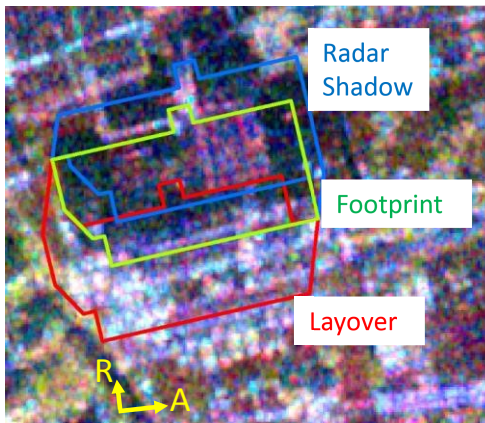


図10  $H > W \tan \theta_1$  の場合の SAR 画像と後方散乱モデル

表2 HH 偏波における後方散乱係数の平均値 (dB)

散乱モデル	Footprint	Layover	Shadow
$H > W \tan \theta_1$	-34.03	-16.04	-36.76
$H < W \tan \theta_1$	-31.88	-36.71	-30.66

以上より、平屋根形式の建物に対して、後方散乱モデルに基づいて作成した建物輪郭、倒れ込み長、レーダ影長を用いて、Pi-SAR-X2 画像の HH 偏波における後方散乱係数の平均値を算出した (表2) に示す。

$H > W \tan \theta_1$  の散乱モデルでは、倒れ込み域の平均値は建物輪郭とレーダ影の値よりも大きい。これに対して  $H < W \tan \theta_1$  の場合は、倒れ込み域の平均値は建物輪郭とレーダ影の値に比べて、大きな差が見られなかった。これは  $H < W \tan \theta_1$  の場合は、屋根からの散乱の一部が建物

輪郭内に発生するので、輪郭内の平均値が大きくなると考えられる。また、今回選定した建物2の屋上は平らではないので、後方散乱が増えたとも考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、災害後1時期の SAR 画像から建物被害を把握するために、平屋根形式の建物について後方散乱モデルの作成を行い、倒れ込みやレーダ影における後方散乱係数の平均値を検討した。今後の課題として、日本の木造住宅に多く存在する切妻屋根形式の建物に対しても後方散乱モデルを作成し、倒れ込みやレーダ影の特性を検討する必要がある。

謝辞: Pi-SAR-X2 画像は、情報通信研究機構と千葉大学との共同研究の一環として情報通信研究機構から提供を受けた。ここに記して感謝を表す。

#### 参考文献

- 1) Liu, W., Yamazaki, F., Gokon, H., and Koshimura, S.: Extraction of tsunami-flooded areas and damaged buildings in the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from TerraSAR-X intensity images, *Earthquake Spectra*, 29(S1), pp. S183-S200, 2013.
- 2) Yamazaki, F., Bahri, R., Liu, W., and Sasagawa, T.: Damage extraction of buildings in the 2015 Gorkha, Nepal earthquake from high resolution SAR data, *Proc. of SPIE* 9877, pp. 98772K-1-11, 2016.
- 3) 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, pp. 53-60, 2002.
- 4) 井上和樹, リュウ・ウエン, 山崎文雄: 高分解能衛星 SAR 画像の変化抽出に基づく津波による橋梁被害把握, *日本地震工学会論文集*, 第17巻, 第5号, pp. 48-59, 2017.
- 5) 情報通信研究機構: 航空機搭載合成開口レーダ観測検索システム. <https://pi-sar.nict.go.jp/>
- 6) Liu, W. and Yamazaki, F.: Monitoring of the recovery process of the Fukushima Daiichi nuclear power plant from VHR SAR images, *Journal of Disaster Research*, 12(2), pp. 226-232, 2016.
- 7) Brunner, D., Lemoine, G., and Bruzzone, L.: Building height retrieval from VHR SAR imagery based on an iterative simulation and matching technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), pp. 1487-1504, 2010.
- 8) Liu, W., Sawa, K., and Yamazaki, F.: Backscattering characteristics of bridges from high-resolution X-band SAR imagery, *International Symposium on Remote Sensing*, Nagoya, Japan, pp. 324-327, 2017
- 9) 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*, 48(5), pp. 2403-2420, 2010.