



光学センサ画像における日影長さと SAR 強度画像における倒れ込み量 に基づく建物高さ地震による倒壊の検出

岩崎洋志¹⁾、リュウ・ウエン²⁾、山崎文雄³⁾

1) 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻、大学院生

e-mail: yoji_iwasaki@chiba-u.jp

2) 学生会員 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻・日本学術振興会特別研究員、修(工)

e-mail: wen_liu@graduate.chiba-u.jp

2) 正会員 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻、教授 工博

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

要約

衛星光学センサ画像を用いた建物被害把握は、これまでに数多く行われてきたが、直下視による衛星画像からは建物上面しか観察できないため、中間層倒壊などの被害を判読することが困難であった。そこで本研究では、地震前後画像から建物の影の長さを計測することで建物高さを求め、それらの差分から倒壊などの大被害を把握することを試みた。2003年アルジェリア地震において多数の建物被害が発生したBourmerdes市を対象として、地震前後に観測された QuickBird衛星を使用した。その結果、目視により大きな被害を判読できなかった幾つかの建物について、高さの変化により倒壊と判断することができた。しかし、建物が密集していたり周囲に障害物があるような場合では、影長さの計測が困難であった。また、影計測が不可能な曇天時や夜間における建物高さの推定法として、SAR強度画像上の建物の倒れ込み長を計測し、建物高さを求める検討も行った。その結果、画像分解能の制約から建物倒壊の把握という点では課題があるもののその有効性が示された。

キーワード： 建物倒壊，衛星光学画像，合成開口レーダ，日影長さ，倒れ込み，太陽高度，SAR入射角

1. 研究背景と目的

地震や風水害などの災害時には、早急で正確な被災状況把握が必要である。しかし、災害発生時は交通ネットワークが麻痺し、早期に現地へ立ち入ることが困難となることが多い。また被害が広域にわたる場合には、情報収集に多大な時間を要する。このような課題の解決策として、リモートセンシング技術の活用が考えられる。災害後の早期被害把握では、青木ら¹⁾や三富ら^{2),3)}は空撮画像を利用して、地震後1時期画像の画像処理により自動的に建物被害範囲を抽出する手法を研究している。また、高速道路や墓石転倒の自動抽出に関する試みも見られる^{4),5)}。

最近では、解像度が最大50-60cm程度の高解像度光学センサ衛星が次々に打上げられて、画像から構造物の詳細な形状を把握することも可能になった。得られた画像を利用して、市街地モデルの構築や

災害状況把握の高度化が期待されており、実際に2001年インド・グジャラート地震⁶⁾以降、2004年イラン・バム地震⁷⁾、2006年インドネシア・ジャワ島中部地震⁸⁾などの建物被害把握に利用されてきた。2010年ハイチ地震では、災害後のGeoEye-1やWorldView-2といった高解像度衛星による画像を用いて、国連機関のUNOSATなどによる被災地図の緊急作成が行われている⁹⁾。また”Crowdsourcing”という、多数の画像判読ボランティアに頼って広域の被害目視判読を分担で行う試みも行われている¹⁰⁾。しかし、当然ながら判読結果に個人差があり、その精度は高いとは言い難い。とくに、ほぼ直下視の衛星画像を用いた被害判読では、建物の上面しか確認することができず、壁などの側面の被害や、中間層崩壊などの被害パターンは判読が困難で、実際の被害を過小評価してしまう恐れがある。

このような被害パターンの検出に関しては、ほぼ同時期にやや違う位置から撮影された2枚の航空写真¹¹⁾や光学衛星画像の立体視により、建物高さを求めることも可能である。しかし、地震前と地震後で計4枚の画像が必要となり、地震前のデータセットが存在しない場合も多く、コスト的にも困難なことが多い。そのような問題点を解決するため、本研究では建物により生じる日影を計測することで建物高さを求め、地震前後の変化から倒壊などの大被害を検出することを考えた。これまでに、カイリルら¹²⁾が広域仮想都市構築を目的として、航空写真から3次元情報を抽出するための影解析手法を提案している。また、三浦・翠川¹³⁾は都市圏における建物GISデータを更新することを主たる目的として、高解像度光学センサ衛星画像からの建物自動検出手法を提案し、その中で建物の影長さをを用いることで、高い精度で階数を推定できることを示した。このように、高解像度光学センサ衛星画像において、建物高さや樹木の高さを測定する手段として、日影を計測する手法は既に広く行われている。しかし、影長さから建物被害を面的に推定して、現地調査データと比較するような定量的な研究ははまだ見当たらない。

本研究では、2003年アルジェリア地震前後に得られた高解像度光学センサ衛星画像¹⁴⁾における日影から建物高さを計測し、その高さの変化を利用することで、倒壊などの形状変化をもたらす大被害の把握を行い目視判読の精度の向上を試みる。また、影計測が不可能な曇天時や夜間における建物高さの推定法として、合成開口レーダ（SAR）衛星で得られた強度画像上の建物の倒れ込み長を計測し、それから建物高さを求める手法についても検討も行う。

2. 光学センサ衛星画像における日影の変化による建物倒壊の検出

2.1 対象地域と使用データ

2003年5月21日19時44分（現地時間）、アルジェリア北部の地中海岸のBourmerdes県Zemmouri市の北約7kmの海底を震源とするマグニチュードMw=6.8の地震が発生した。震央は北緯36.90度、東経3.71度、震源深さは約10kmであった。被害状況は死者2,268名、負傷者10,261人で、1,200以上の建物が倒壊または、損傷を受け、150,000人が家を失った¹⁵⁾。USGSによると¹⁶⁾、アルジェリアは過去にも多くの地震被害を経験しており、1980年10月10日にはEl Asnam市でマグニチュード7.1の地震が起こり5千人以上が亡くなった。Orleansville市では、1954年9月9日にマグニチュード6.7の地震が発生し千人以上が死亡し、1989年10月29日にはマグニチュード5.9の地震が同市の約110km西で発生し少なくとも30人が死亡した。

QuickBird衛星は、2001年に打ち上げられた米国の商業衛星である。可視域の3バンド(BGR)と近赤外(NIR)バンドのマルチスペクトル(MS, カラー)計4バンドと、広い波長領域で感度を有するパングロマチック(Pan, 白黒)バンドを有している。これら約0.6m解像度のPan画像と、約2.4m解像度のMS画像を組み合わせること(パンシャープン化)で、約0.6m解像度のマルチスペクトル4バンド画像を作成することができる。この高い解像度によって、QuickBird衛星画像は様々な地表観測の目的で使用されており、GoogleEarth上でも世界各地のQuickBird画像を見ることができる。

2003年アルジェリア地震の被災地域に対して、QuickBird衛星は地震発生の約1年前の2002年4月22日、地震発生2日後の2003年5月23日、28日後の6月18日に撮影を行っている¹⁷⁾。本研究では、アルジェリア地震において建物倒壊が多数発生したBourmerdes市を対象として、2002年4月22日に撮影された地震前画像と2003年5月23日に撮影された地震後画像の2つを用いて、建物高さの変化計測を行う。図1に使用した画像とその諸元を示す。



(a)2002/04/22 地震前



(b)2003/05/23 地震後

	地震前	地震後
衛星高度 λ [°]	78.5	64.2
衛星方位角 α [°]	352.6	276.2
太陽高度 λ [°]	61.3	68.2
太陽方位角 α [°]	144.2	133.2

図1 2003年アルジェリア地震前後のBourmerdes市のQuickBird画像とその諸元

2.2 衛星画像の目視判読と地上調査による建物被害区分

本研究では、Meslemら¹⁷⁾によるQuickBird衛星画像の目視判読結果と現地調査に基づく被害データセットを用いる。この被害判読は、事前画像と事後画像を目視で比較して1棟単位でEuropean Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)¹⁸⁾の判定基準を用いて、5段階の被害ランクを付けたものである(図2)。ここで、G1は無視しうる軽微な損傷、G2が中程度の損傷、G3がかなり重大な損傷、G4が重大な損傷、G5は破壊である。現地調査も同様にEMS-98に基づき5ランクで行われている。ただし、G1とG2の判別は衛星画像による目視判読ではほぼ不可能なので、G1 & 2で1つのランクとし、実際はG1 & G2, G3, G4, G5の4段階に分類されている¹⁷⁾。図2右の写真に示すように、G5の被害は衛星画像からも明白である。G4は建物上面に損傷部が判読できる場合もあるが、周囲の瓦礫から判断する場合もある。G3はほとんどが瓦礫による判断であり、建物外面の被害は直下視の画像からは見えない側面の場合が多い。

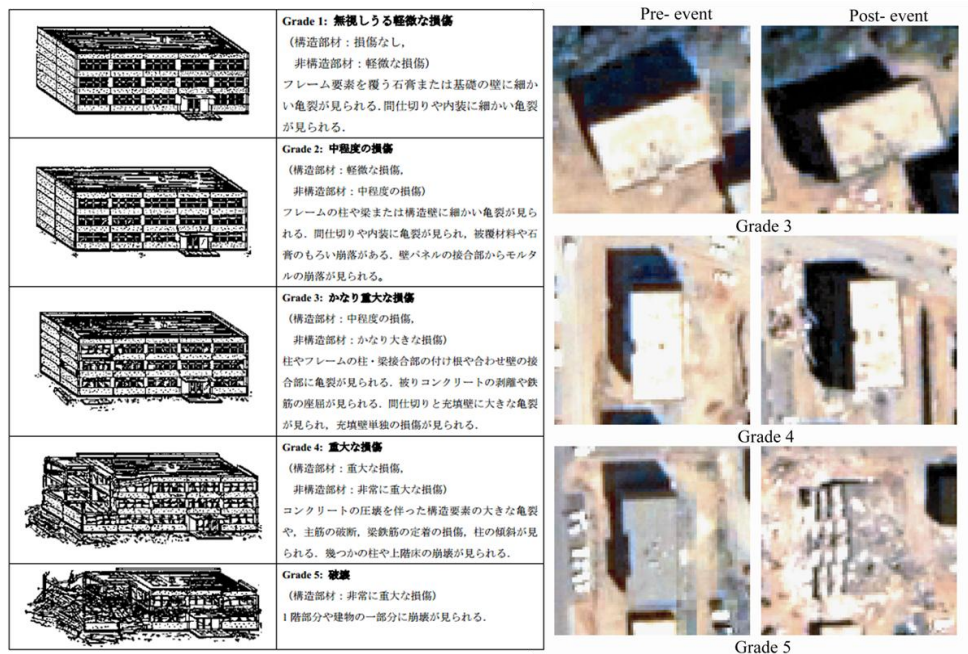


図2 EMS-98における被害分類¹⁹⁾とGrade 3, 4, 5の建物のQuickBird衛星画像の例

2.3 影の計測による建物高さの算出

衛星画像上で表される建物や日影は、衛星センサの位置や首振りの角度によって見え方が大きく変わってくる。本研究では、画像上に投影された建物の頂点からその頂点に対応する影の先端までの長さを計測し、太陽、衛星、建物の位置関係、および太陽と衛星センサの高度と方位角を用いて、実際の建物高さを算出する。図3は衛星と太陽の位置関係を3次元的に表したものと、衛星画像上での対応関係を示したもので、衛星高度を λ 、衛星方位角を α 、太陽高度を λ' 、太陽方位角 α' としている。この図より建物を衛星から撮影した際に画像上に投影される建物は L_{ib} として表され、太陽によって作られる日影は L_{is} として表すことができる。3次元での建物の頂部(Top)が2次元衛星画像上のI点に対応し、B点、S点がそれぞれ基部(Base)、頂部影(Shadow)に対応することが分かる(図3(b))²⁰⁾。

これにより、図3(a)における底面の三角形(三辺の長さ： L_{ib} , L_{sb} , L_{is})における余弦定理より式(1)が得られる。

$$L_{is}^2 = L_{ib}^2 + L_{sb}^2 - 2L_{ib}L_{sb} \cos(\alpha - \alpha') \quad (1)$$

また、衛星方向に対する長さ L_{ib} は式(2)として得られ、太陽方向に対する長さ L_{sb} は同じく式(3)として得られる。この式(2)、式(3)を式(1)に代入し、 H を求める形に変形させることで式(4)を導くことができる。この式(4)を用いて、本研究では図3における L_{is} をそれぞれ3回ずつ計測し、その平均値を用いることで建物高さ H を算出する。

$$L_{ib} = H / \tan \lambda \quad (2)$$

$$L_{sb} = H / \tan \lambda' \quad (3)$$

$$H = \frac{L_{is}}{\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \lambda'} + \frac{1}{\tan^2 \lambda} - \frac{2 \cos(\alpha - \alpha')}{\tan \lambda' \cdot \tan \lambda}}} \quad (4)$$

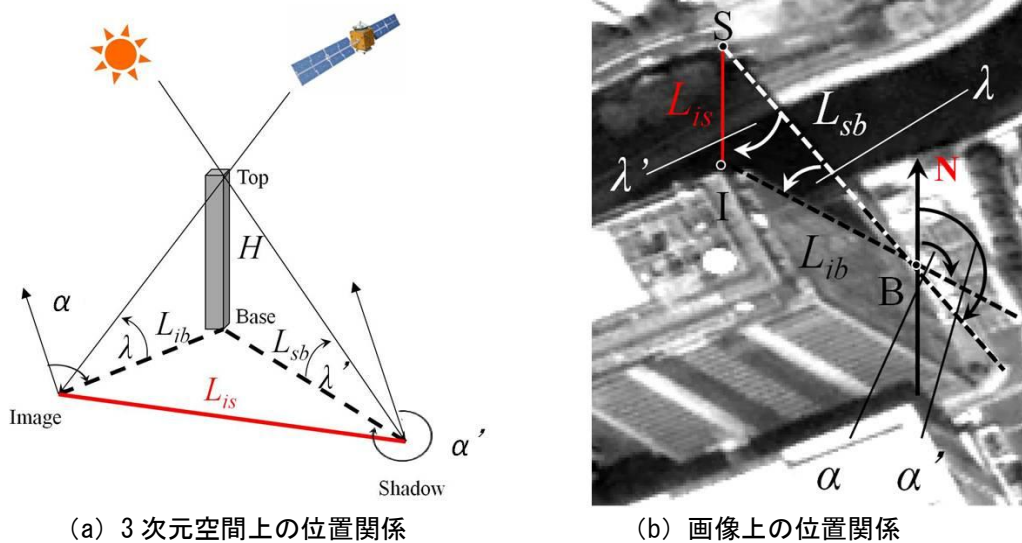


図3 3次元空間上と2次元画像上の太陽、衛星、建物、および影の位置関係

2.4 建物倒壊の推定結果

今回Bourmerdes市のとくに建物被害が多く出た地域(図1の赤枠内)に対し建物の影長さの測定を行った。図4(a)に対象地域の地震前の推定建物高さを示す。これより対象とした地区では、10m から25mの中層住宅が分布している。影の計測による倒壊の判別には、地震前後の画像でそれぞれ最大1ピクセルの誤差が出ると考え、高さに換算すると地震前画像で0.73m、地震後画像で0.84mの誤差として、最大計1.57mの誤差が生じる可能性があることがわかった。そこで倒壊を判別する閾値として2mを用い、それ以上の差(建物高さの減少)が出た場合を本研究では倒壊と判定することとした。計測結果は、地震前後の高さの差の大きさにより7ランクに分け色を付けた。各ランクは-0.5m以下、-0.5~0.0m、0.0~0.5m、0.5~1.0m、1.0~1.5m、1.5~2.0m、2.0m以上とした。また、灰色で示した建物では周囲に障害物があり、影が計測できなかったため計測不可とし検証から除外した(図4(b))。

図4の(c)、(d)より、現地調査結果と目視判読結果を比較すると目視判読ではG3の被害を無被害に近いG1&2として判定しており、実被害より低く被害を判定する傾向にあることがわかる。また、目視判読結果ではG3やG4が少なく、被害の見逃しが多く発生していることがわかる。G3、G4は建物の形状に大きな変化があまり見られない被害であり、衛星画像による目視判読では側面の損傷を確認することが困難であるためこのような結果となったと考えられる。

図4の丸で囲った建物ではEMS-98に基づく現地調査では倒壊を示すG5であったが、目視判読でG4と判読されていた。本研究の建物高さ変化からはG5の倒壊であると判断され、目視判読の見逃しを把握することができた。これらの建物のQuickBird画像を図5に示す。QuickBird画像を確認するとわかるように、建物上面には損傷がなく、周囲に瓦礫が散乱している。このようなテキスト情報のみで判断したため、建物の倒壊を把握できなかったと考えられる。

図6に示す建物では、周囲に瓦礫が散乱していたため誤計測された。この建物は、現地調査でG4に分類されたが、影の長さを測定した結果、倒壊を示すG5と判定された。これは建物の影が、倒壊した隣接建物の瓦礫の上に重なってしまい、瓦礫の厚さ分、影が短く計測されたためと考えられる。

以上より、日影の長さを計測し、建物高さを求め、地震前後の高さの差を求めることで、建物倒壊を検出することが可能であると判断できる。また、問題点として建物周辺の環境により、計測に誤差が生じたり、計測自体が困難になったりする場合もあることが明らかになった。

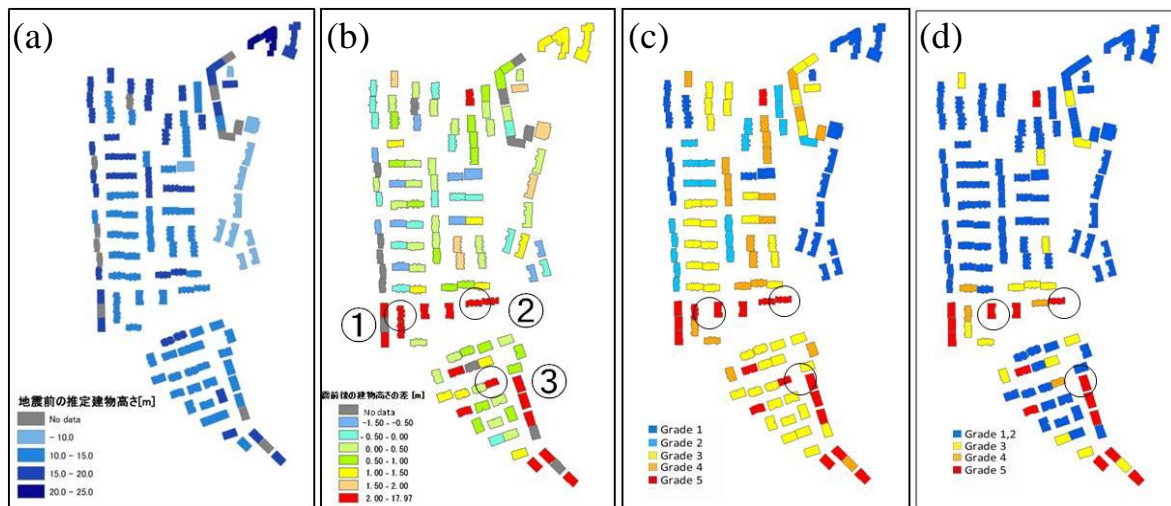


図4 (a) 地震前の推定建物高さの分布, (b) 影計測による高さ変化, (c) 現地調査結果の被害ランク, (d) 目視判読結果の被害ランク

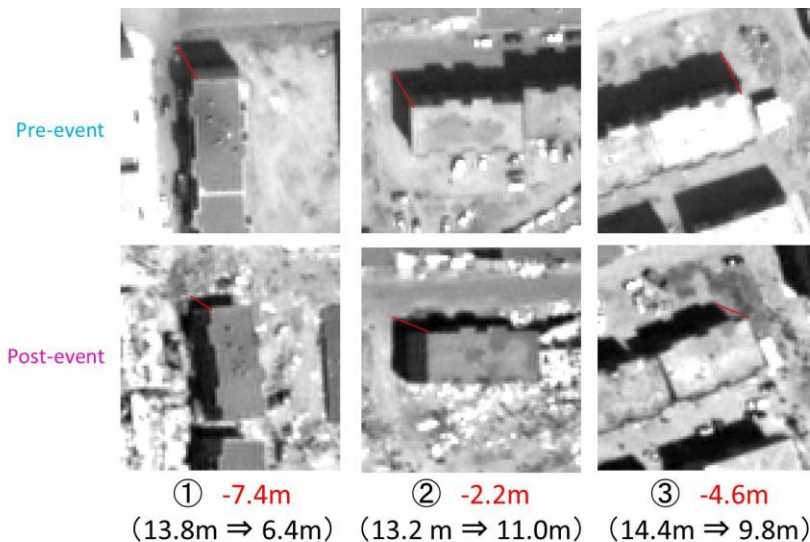


図5 図4の建物①, ②, ③における QuickBird 画像の地震前後比較 (目視判読で G4)

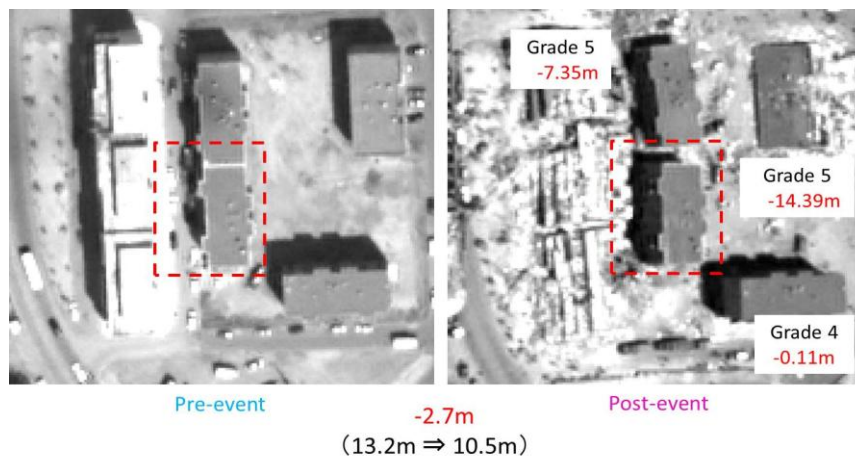


図6 周囲の瓦礫の影響で誤計測があった建物

2.5 影計測を反映させた目視判読結果の精度

表1に影計測を行った範囲についての目視判読結果、表2に目視判読結果に影計測結果を加味したもののエラー・マトリックスを示す。表1よりG1からG4のユーザー精度は、どれも50%以下と低い結果になっている。これは、G1&2と判定したものがG4であるなど、判読結果に見逃がしが多かったことを示している。これは2.4でも述べたように、衛星画像による目視判読では側面の被害を確認することが困難であるためこのような結果となったと考えられる。とくにこの対象地域はRC造の建物が多く、上面から判読しにくい被害パターンが多かったものといえよう。一方、日本のように木造建物が多い場合は、建物上面も変状が生じやすいため、ユーザー精度が向上する可能性もある。

表1と表2を比較すると、図6に示す建物で誤推定が起こったため、G5におけるユーザー精度は93.8%から90.0%に減少する結果となったものの、プロデューサー精度は図4に示す建物で目視判読の見逃しを検出した結果100%となり、総合精度も2.4%向上させることができた。

今回の事例はサンプルの数が少ないため一概には言えないが、提案する手法は建物倒壊が含まれる衛星画像における被害目視判読の精度向上に役立つものと考えられる。しかし、建物が密集した地域や障害物が周囲にある場合には影計測が難しいという問題もあり、本手法の適用には限界がある。

表 1 対象地域における目視判読結果の精度

Field Survey \ QuickBird	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Total	User's Accuracy
Grade 1,2	23	18	36	13	0	90	45.6%
Grade 3	0	1	7	8	0	16	43.8%
Grade 4	0	0	1	0	3	4	0.0%
Grade 5	0	0	0	0	15	16	93.8%
Total	23	19	44	21	18	126	
Producer's Accuracy	100.0%	94.7%	15.9%	0.0%	83.3%	Overall Accuracy	50.0%

表 2 対象地域における目視判読結果に影計測を反映させた精度

Field Survey \ QuickBird	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Total	User's Accuracy
Grade 1,2	23	18	36	13	0	90	45.6%
Grade 3	0	1	7	7	0	15	46.7%
Grade 4	0	0	1	0	0	1	0.0%
Grade 5	0	0	0	1	18	20	90.0%
Total	23	19	44	21	18	126	
Producer's Accuracy	100.0%	94.7%	15.9%	0.0%	100.0%	Overall Accuracy	52.4%

3. SAR画像の倒れ込み長さによる建物高さの把握

3.1 対象地域と使用データ

本研究では、合成開口レーダ(SAR)衛星TerraSAR-X (TSX)による強度画像を用いる。TSXは2007年6月に打ち上げられた衛星で、世界で初めてXバンドのマイクロ波センサを搭載した地球観測衛星である²¹⁾。雲や雨などを透過できるマイクロ波を衛星に搭載したアンテナから照射し、地表や構造物からの反射波や散乱波を観測するため、昼夜・天候を問わず地上の状態を把握することができる。

StripMapモードでは、30km×50kmの撮影範囲を有し、約3mと高い空間分解能である。この画像を用いた研究としては、2011年東北地方太平洋沖地震前後に得られた強度画像を比較して、地殻変動の検出や²²⁾、津波による湛水域や流出建物の抽出が行われている²³⁾。また、2008年6月の岩手・宮城内陸地震の直後に得られた高分解能SAR画像のテクスチャ解析から、地すべりや斜面崩壊、土石流の地域の抽出が行われた²⁴⁾。

本研究のTSX画像を用いた建物高さの把握では、2つの事例について倒れ込み長さの計測を行った。1つ目は東京スカイツリー、横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイを計測対象とし、東京都23区や横浜市を含む地域を同じ条件で撮影した多時期のTSX画像を利用して、東京スカイツリーの建設工程の進展による高さの変化を計測し、横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイではこの手法による精度検証を行った。この事例では、2008年5月23日、2008年10月13日、2009年11月2日、2009年11月24日、2010年6月21日、2010年9月6日、2010年11月22日に撮影された7時期のTSX画像を用いた。いずれの画像も下降軌道からHH偏波で観測された。観測角度は約41-43°であり、StripMapモードで撮影された。解像度はアジマス方向が約3.5 m、レンジ方向が約3.3 mである。用いた画像は、幾何補正(EEC)後に1.25 m/pixelの解像度にリサンプリングされたものである。

2つ目は月島駅周辺の高層マンション(センチュリーパークタワー、スカイライトタワー)を対象に、影長さ計測手法とSAR倒れ込み長さ計測手法を用いて、両手法で得られた結果と実際の高さの比較を行った。2つ目の事例では、2008年5月23日のTSX画像と2007年3月20日のQuickBird画像を用いた。TSX画像は前述したもので、QuickBird画像は空間分解能が0.6mで、撮影条件は衛星高度 $\lambda=78.9^\circ$ 、衛星方位角 $\alpha=109.1^\circ$ 、太陽高度 $\lambda'=51.5^\circ$ 、太陽方位角 $\alpha'=153.3^\circ$ である。

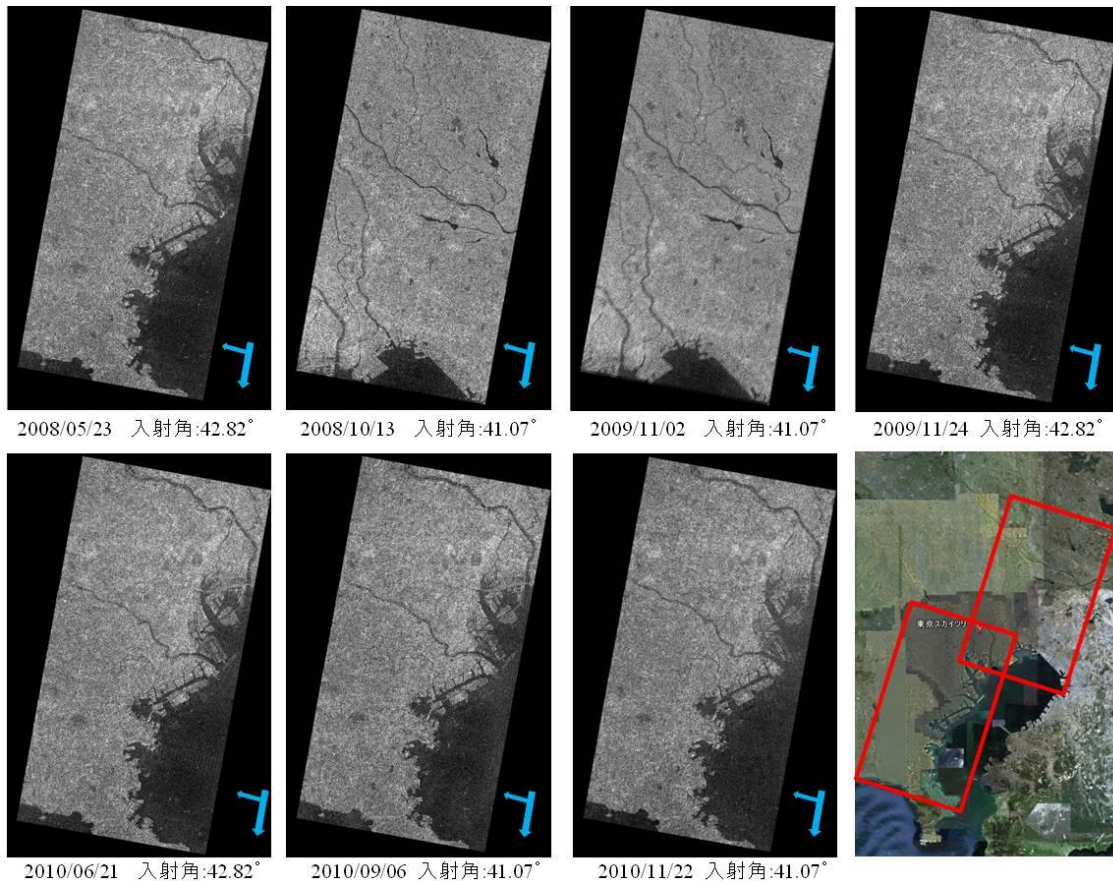


図7 使用した東京、横浜地域の TerraSAR-X 画像の範囲とその諸元

3.2 倒れ込み長さの計測による建物高さの算出

SAR画像では衛星が照射したマイクロ波の後方散乱を観測することによって構造物等を認識する。そのため、地表上に標高差がある場合、標高の高い場所が衛星に近い位置と誤って判断される Foreshortening現象が起り、高い建物などでは倒れ込みが起こる(図8(a), (b))。この現象を利用して、SAR強度画像上における建物の倒れ込みの長さと照射したマイクロ波の入射角を用いて建物高さを求める。

本研究ではまず前処理としてSAR強度画像(DN値)を後方散乱係数 σ^0 へと変換した²⁵⁾。次にLeeフィルタ²⁶⁾を適用しスペックルノイズを低減させた。フィルタの大きさは、平滑化で建物の輪郭がぼやけるのを防ぐために、最低限の 3×3 を用いた。

建物高さを算出する方法としては、衛星が照射するマイクロ波が同心円状に広がり、その円が対象物に比べ十分に大きく接線が直線として近似できるという特性(図8(a))を利用し、画像上に倒れ込むように投影される建物の基部からその頂点までの長さ L を計測した。その各3回ずつ計測を行って、それらの平均値を用いて、式(5)より高さ H を算出する。SAR画像では、光学衛星と異なり建物タワーなどの構造物の基部を明確に把握することは困難である。本研究では、タワーの場合、基部の輪郭線の中心から対応する頂点までの長さを L として用いた。

$$H = L \tan \theta \quad (5)$$

ここで、計測対象へのマイクロ波入射角 θ を求めるため、図9に示すように画像が長方形であり、 θ_A と θ_C 、 θ_B と θ_D がそれぞれほぼ等しい値であるという特徴を用いて、直線ABの一次関数から直線 ℓ の一次関数を求め、点BD間の一次関数から点P'の座標を求める。点P、点P'の座標より、直線PP'の長さを求

め、直線ABと直線PP'の長さとの比から対象物への入射角 θ を求めた。

図8(c)に、東京スカイツリー周辺地域のQuickBird画像を示す。QuickBird画像では、東京スカイツリーの影が周囲の建物に重なっていることがわかる。そのため、前述した日影を用いた手法では、正確な建物高さを計算することは困難であるといえる。一方、SAR強度画像では、倒れ込み長さが周囲の建物に重なることで変化するということがない。このことは、SAR強度画像を用いる1つの利点といえる。しかし、隣接する建物が高い場合は、そのレーダ影に入る可能性もあり、その場合は倒れこみ長さの計測は不能となる。

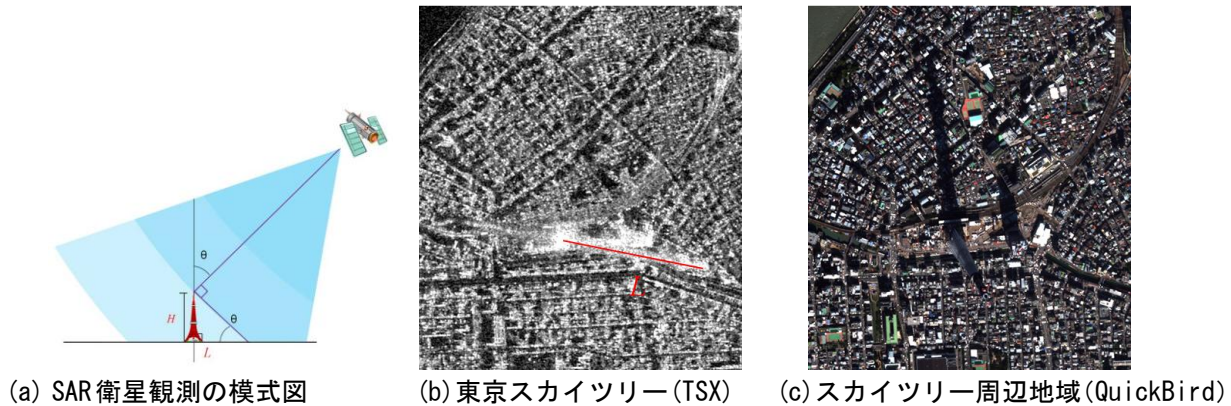


図8 マイクロ波とグランドレンジ画像上に投影される構造物位置の関係

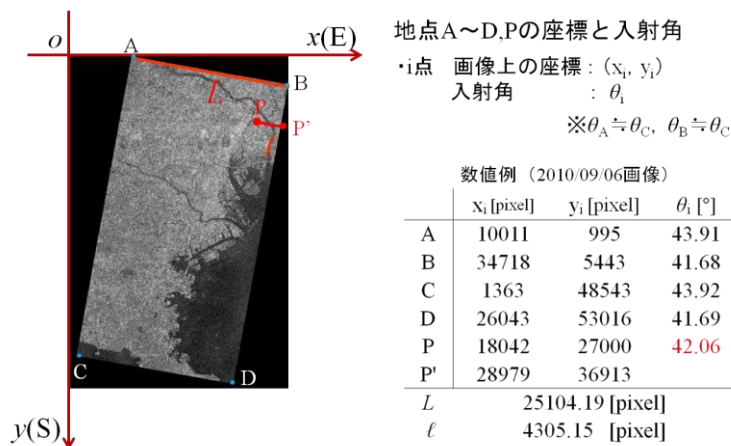


図9 計測対象物への入射角の計算例（東京スカイツリー）

3.3 東京スカイツリー建設の時間経過に伴う画像上の変化

図10に各時期の東京スカイツリー周辺地域のSAR画像と、計算した入射角を示す。2008年5月23日の画像と2008年10月13日の画像を比較すると、赤丸で囲った範囲に後方散乱係数の変化が確認でき、カラー合成画像からもこの変化を見ることができる。東京スカイツリーは2008年6月に着工したため、この変化は東京スカイツリー基礎工事によるものと考えられる²⁷⁾。また、2009年11月02日から2010年11月22日の画像を比較すると、スカイツリーの建設過程を見て取ることができる。一般に、更地などの平坦な地域ではマイクロ波が地表で多方向に散乱し、後方散乱係数は小さくなる。一方、構造物のある地域では、地表と建物の間でのマイクロ波の複数反射（カージナル効果）により後方散乱係数は大きくなる。このため、構造物が新設された地域については、TSX 画像による後方散乱係数に大きな変化が見られる。

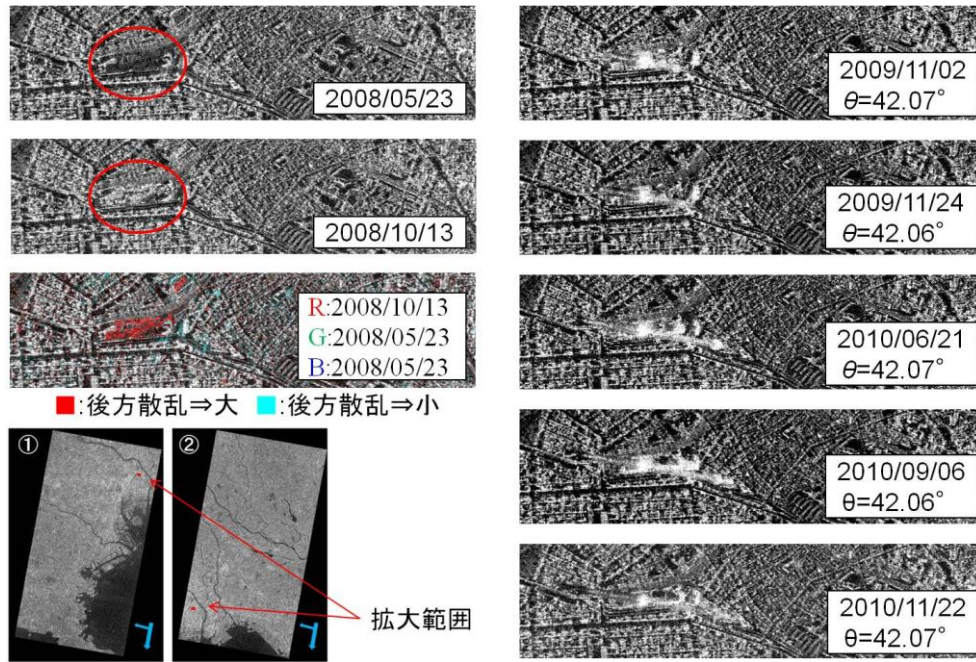
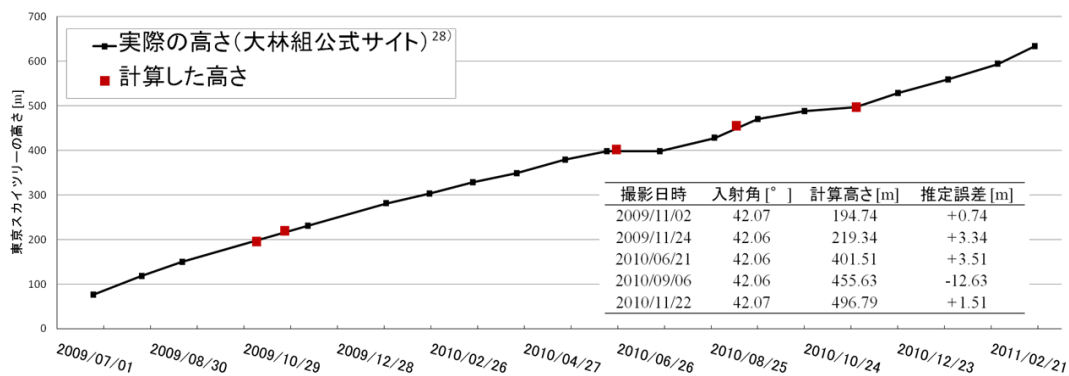


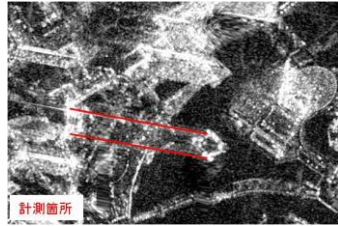
図 10 東京スカイツリーの建設過程における TerraSAR-X 強度画像の変化

3.4 各対象物の倒れ込み長さの計測結果

東京スカイツリーの倒れ込み長さの計測結果と、建設過程における公表された高さを図11に比較する。SAR画像の計測結果は、2009年11月24日、2010年6月21日、2010年9月6日の画像では、3m以上の誤差が出ている。2009年11月24日、2010年6月21日の画像は、タワー脚部の見誤りによる誤計測や、衛星画像撮影日のタワー高さを直線補間によって推定したことによる実際の高さとの違いによると考えられる。2010年9月6日の画像に関しては、大林組サイトよりの建設工程を確認してみたところ²⁷⁾、タワーの中央にシャフトと呼ばれるエレベーターや設備配線・配管などが入る躯体を組み立てる工程であったことから、急激に高さが伸びたことが予想され、これが原因による誤差であると考えられる。

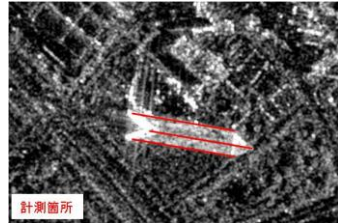
また、横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイの計測結果をそれぞれ図12、図13に示す。横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイの計測結果は誤差が出たものの、すべての計測結果は3m以内であり、画像解像度が3mであるTSX 画像 (StripMapモード) では3m以下の高さを求めることは困難であることから、この結果は許容範囲内であり妥当といえる。以上の検討より、SAR画像上の構造物の倒れ込みの長さマイクロ波の入射角から構造物高さを算出する方法の有効性を示すことができたといえよう。





撮影日時	入射角 [°]	計算高さ [m]	誤差 [m]
2008/05/23	42.87	297.1	-0.77
2009/11/24	42.87	298.76	-2.43
2010/06/21	42.87	297.21	-0.88
2010/09/06	42.88	297.72	-1.39
2010/11/22	42.87	295.7	0.63

図 12 横浜ランドマークタワー (296.3m)²⁹⁾ の SAR 画像計測結果と実際の高さの比較



撮影日時	入射角 [°]	計算高さ [m]	誤差 [m]
2008/10/13	40.48	171.75	2.85
2009/11/02	40.47	172.13	0.47

図 13 幕張アパホテル東京ベイ (174.6m)²⁹⁾ の SAR 画像計測結果と実際の高さの比較

3.5 日影を用いた手法と倒れ込み長さを用いた手法の比較

月島駅周辺の高層マンションであるセンチュリーパークタワーとスカイライトタワーを対象に、影計測手法と倒れ込み長さによる手法を用い、それぞれの手法で得られた結果と実際の高さを比較し、考察を行っていく。表3、表4に2棟の建物の計測結果を、図14にそれらの計測箇所を示す。両手法の結果を比較すると結果にばらつきがあるものの、日影を用いた手法の方が、やや精度の高い結果を示している。この原因として、倒れ込み長さによる手法では構造物の基部が判別しにくく、これにより計測に誤差が含まれやすくなってしまうこと、今回用いたTSX画像の解像度が約3mと光学センサ衛星画像の0.6mより劣ることが挙げられる。TSXにおいても解像度が約1mのSpotLightモードもあり、これを用いれば精度の向上を図ることができる。

以上の結果より、影計測が不可能な曇天時や夜間における建物高さの推定法として倒れ込み長さを用いた場合を想定すると、中間層崩壊では一層が崩壊した場合 2m程度の高さの変化が予想され、3m以上の誤差が生じる可能性のある倒れ込み長さを用いた手法では精度面でやや不十分であるといえる。しかし、周囲に障害物があった場合、日影を用いる手法では計測ができないが、倒れ込み長さを用いた手法の場合、障害物の影響を受けず計測できる利点がある。したがって、SpotLightモードといったより高解像度のSAR画像を用いるなど精度を向上させた上で、両者を併用することでより有用性が高まると考えられる。

また、今回は試みとして倒れ込み長さを用いた手法を行ったこと、使用した画像が解像度約3mのTSX画像であったことから計測が比較的容易な高さ100m以上の超高層建物を対象とした。しかし、実際に建つ構造物の多くは10m~30m程度である。そのため、この手法の層崩壊の把握への汎用性を検討するためにも、今後高解像度SAR画像を用いた中高層建物に対する検証を行っていく必要があるといえる。

表 3 センチュリーパークタワー (180m)²⁹⁾ の計測結果と実際の高さの比較

手法	衛星	撮影日時	計算高さ [m]	誤差 [m]
倒れ込み	TerraSAR-X	2008/05/23	176.8	-3.2
日影	QuickBird	2007/03/20	180.021	0.021

表 4 スカイライトタワー (139.2m)²⁹⁾ の計測結果と実際の高さの比較

手法	衛星	撮影日時	計算高さ [m]	誤差
倒れ込み	TerraSAR-X	2008/05/23	139.9	0.7
日影	QuickBird	2007/03/20	139.83	0.63

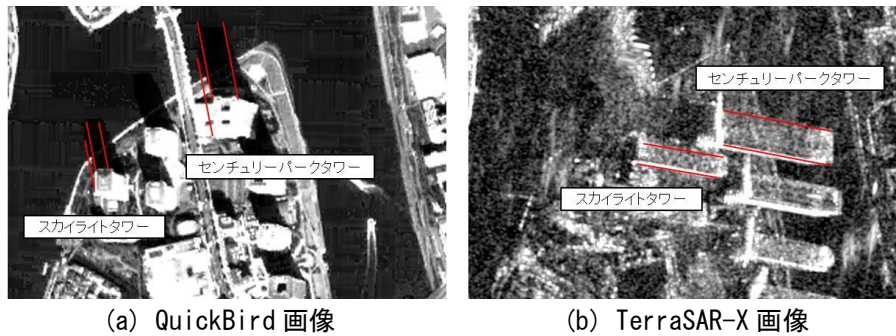


図 14 センチュリーパークタワー、スカイライトタワーにおける各画像の計測箇所

4. まとめと今後の展望

本研究では、光学センサ衛星画像上の建物の影の長さより建物の高さを推定し、その地震前後の変化によって倒壊などの大被害の把握を試みた。2003年アルジェリア地震を対象に、現地調査結果と被害の目視判読で差異の生じた建物に関して、中間層崩壊などの直下視の衛星画像からは検出が難しい被害パターンを、本手法によって把握できるか検討した。その結果、建物周囲の環境によっては計測が困難になるものの、倒壊被害の見逃しを高さ測定より検出し、目視判読の精度を向上させることができた。

また、SAR強度画像上の構造物の倒れ込み長さを計測して、構造物の高さを求める手法も試みた。その結果、手法によって建物高さを求める有効性を東京首都圏の高層建築物について確認することができた。この方法は、構造物の周辺の建物等の影響が小さいなどの利点があるが、現時点の解像度は光学センサより低いため、層崩壊を検出するという用途では、日影長さの計測の方がやや精度は優れている。

今後は、より高解像度のSAR画像を用いて中高層建物に対し倒れ込み長さからその高さを求め、この手法の汎用性と精度を検証していきたい。また、手動で計測した影の長さや、SAR画像上の倒れ込み長さを画像解析で求めることにより時間を短縮し、テクスチャ情報と併用することで、有用性のある被害把握手法として発展させたいと考えている。

謝 辞

この研究で用いたTerraSAR-X 画像は、SAR 技術応用研究会のH23 年度研究課題として、株式会社パソコから提供されたものである。

参考文献

- 1) 青木久, 松岡昌志, 山崎文雄: 空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出, 写真測量とリモートセンシング, 日本写真測量学会, Vol. 40, No. 4, 2001, pp. 27-36.
- 2) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 空撮画像を用いた汎用的な建物被害抽出方法に関する考察, 土木学会論文集, No. 710/I-60, 2002, pp. 413-425.
- 3) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄, 谷口仁士, 小川雄二郎: 航空機 MSS の多バンド画像を用いた 1995 年兵庫県南部地震の建物被害地域の抽出, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2002, pp. 2323-2328.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 航空写真の画像解析による高速道路被害把握に向けた基礎的検討: 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, Paper No. 289, 2006, pp. 1262-1265.
- 5) 日塔哲広, 山崎文雄: 航空写真の画像解析による墓石転倒率の推定のための基礎的検討, 地域安全学会論文集, No. 8, 2006, pp.121-126.
- 6) Saito, K., Spence, R. J. S., Going, C., and Markus, M: Using high-resolution satellite images for post-earthquake building damage assessment: A study following the 26 January 2001 Gujarat earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 1, 2004, pp. 145-169.

- 7) Yamazaki, F., Yano, Y., Matsuoka, M.: Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.21, No. S1, 2005, pp. S329-S336.
- 8) 三浦弘之, 松岡昌志, 山崎文雄, 砂金伸治: 人工衛星リモートセンシングから見た 2006 年ジャワ島中部地震の被害, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, Paper S2-3, 2006, pp. 92-95.
- 9) UNOSAT: <http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/UNOSAT-EQ-201001-HTI.asp>
- 10) Ghosh, S., Huyck, C, K., Greene, M., Gill, S, P., Bevington, J., Svekla, W., DesRoches, R., Onald, R., Eguchi, 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.
- 11) 田代啓, 丸山喜久, 山崎文雄: デジタル空中写真測量に基づく新潟県中越沖地震における建物倒壊の把握, 地域安全学会論文集, No. 13, 2010, pp.379-386.
- 12) カイリル・アズミ, 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史: 広域仮想都市構築のための航空写真影解析による 3 次元情報復元, 第 3 回 ITS シンポジウム, 2004.:
<http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/papers/all/661.pdf>
- 13) 三浦 弘之, 翠川 三郎: 建物 GIS データの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物の自動検出手法, 地域安全学会論文集, No.5, 2003, pp.37-44.
- 14) Yamazaki, F., Kouchi, K., Matsuoka, M., Kohiyama, M., Muraoka, N.: Damage Detection from High-Resolution Satellite Images for the 2003 Boumerdes, Algeria Earthquake: 13th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No. 2595, 2004, 13p.
- 15) Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Laouami, N., Benkacic, N.: Site-Response characteristics evaluated from strong motion records of the 2003 Boumerdes, Algeria, earthquake, Earthquake Spectra, Vol.26, No. 3, 2010, 803-823.
- 16) USGS: http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2003/eq_030521/
- 17) Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Kibboua, A., Mehani, Y.: The Effects of Building Characteristics and Site Conditions on the Damage Distribution in Boumerdes after the 2003 Algeria Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.28, No. 1, 2012, pp. 185-216.
- 18) European Seismological Commission, 1998. European Macroseismic Scale 1998.
- 19) 国土交通省 社団法人 国際建設技術協会: 平成 14 年度 建設技術移転指針策定調査報告書, 2003.:
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/inter/keizai/gijyutu/pdf/risk_judge_j1.pdf
- 20) Huang, X., Kwoh, L, K.: 3D Building Reconstruction and Visualization for Single High Resolution Satellite Image, IGARSS, 2007, pp. 5009-5012.
- 21) PASCO ホームページ: <http://www.pasco.co.jp/products/survey/satellite/terrasarx/>
- 22) リュウ・ウエン, 山崎文雄: TerraSAR-X 強度画像を用いた東北地方太平洋沖地震における地殻変動の検出, 日本リモートセンシング学会第 51 回学術講演会論文集, 2011, pp.7-10.
- 23) リュウ・ウエン, 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浸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 (特集号), 2012, pp.73-85.
- 24) 翠川 三郎, 三浦 弘之: 高分解能 SAR 画像による 2008 年岩手・宮城内陸地震での斜面災害地域の抽出, 日本地震工学会論文集, 第 10 巻, 第 3 号, 2010, pp.25-32.
- 25) Infoterra: Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data:
http://infoterra.de/fileadmin/Verzeichnisordner/Dokumente/2_AboutUs/0207_FormalDocs/TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_I1.00.pdf
- 26) Lee, J. S, Jurkevich, L, Dewaele, P, Wambacq P., and Oosterlinck, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images, A review, Remote Sensing Reviews, 1994, 8: 4, pp.313-340.
- 27) 大林組東京スカイツリーチャンネル: <http://blog.skytree-obayashi.com/?month=201012>
- 28) 大林組東京スカイツリー建設プロジェクト-GO!GO! TOKYO SKY :
<http://www.skytree-obayashi.com/pointview/>
- 29) BLUE STYLE COM: <http://www.blue-style.com/index.html>

(受理 : 2012年3月 1日)
(掲載決定 : 2012年8月31日)

DETECTION OF BUILDING HEIGHT AND COLLAPSE MODE FROM THE MEASUREMENT OF SHADOW LENGTH IN OPTICAL IMAGES AND LAYOVER IN SAR INTENSITY IMAGES

IWASAKI Yoji¹⁾, WEN Liu²⁾ and YAMAZAKI Fumio³⁾

1) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba University.

2) Student Member, PhD. Student, Graduate School of Engineering, Chiba University; JSPS research fellow.

3) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Visual interpretation of optical satellite images is widely used to detect building damages after recent earthquakes in the world. However, since optical satellites images are acquired from the vertical direction, they can observe only roofs of buildings. Building damages such as mid-story collapse are often overlooked because the upper surfaces of buildings do not change so much. This paper proposes the method to detect this kind of building collapses from the change in building heights, estimated from the shadow lengths in optical images measured before and after an earthquake. Boumerdes city, Algeria, is selected as a case study site where many buildings were collapsed in the 2003 Boumerdes Earthquake. Two QuickBird images, taken before and two days after the earthquake, were employed. Based on the measurement of shadow lengths, some mid-story collapses were successfully detected. The measurement of building heights was also carried out using layover effects in SAR intensity images. The tests for TerraSAR-X images in Tokyo Metropolitan area showed good level of accuracy in building height measurement. These methods may provide useful information in detecting building damages, as well as from texture information.

Key Words: Building Collapse, Optical Satellite Image, Synthetic Aperture Radar, Shadow Length, Layover, Sun Elevation Angle, SAR Incidence Angle.