

## 衛星画像を用いたペルー・タクナ市における 地震被害予測のための建物インベントリデータ構築の試み

鈴木賢太郎<sup>1)</sup>, リュウ・ウェン<sup>2)</sup>, 松岡昌志<sup>3)</sup>, 山崎文雄<sup>4)</sup>

- 1) 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻, 博士前期課程  
e-mail : kentaro\_suzuki@chiba-u.jp
- 2) 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻, 助教 博(工)  
e-mail : wen.liu@chiba-u.jp
- 3) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科, 准教授 博(工)  
e-mail : matsuoaka.m.ab@m.titech.ac.jp
- 4) 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

想定地震による被害予測を行うためには、建物インベントリデータが必要である。しかし、発展途上国ではそのようなデータが整備されていない地域が多く、現地踏査によるデータの構築には多くの労力を伴う。一方、リモートセンシングは宇宙や上空から広域を観測できる利点があり、近年地上分解能が1m以下の光学衛星が数多く打ち上げられている。これにより、建物を一棟単位で詳細に把握できる高解像度衛星画像が取得できるようになった。本研究では、地震国ペルーのタクナ市を対象地域として、WorldView-2画像のオブジェクト分類を用いた建物インベントリの構築手法を検討した。

キーワード: WorldView-2, 建物インベントリ, 建物抽出, オブジェクト分類

### 1. はじめに

建物インベントリデータは、想定地震による被害予測を行うためには、地震動や各種建物の耐震性能の評価に加えて不可欠なものである。しかし、建物の位置や種類などのデータを構築するには、多大なコストや労力を要する。また、データの構築手法としては、地上調査により得られたものや、課税台帳から集約して用いることが一般的である。しかし発展途上国では、地震被害想定に用いることができる形式で土地台帳データが整備されていない場合が多い。そのため、現在Global Earthquake Model (GEM) Foundation<sup>1)</sup>がリモートセンシングと地上調査による建物インベントリ情報の共有化を推進するため、Inventory Data Capture Tool (IDCT)プロジェクトを推進している<sup>2),3)</sup>。

一方、近年地上分解能が1.0m以下の高解像度衛星が数多く登場してきた。1999年に打ち上げられたIkonosの光学センサは地上分解能1.0mを有し、2001年に打ち上げられたQuickBirdは地上分解能0.6mである。これらの衛星は高解像度衛星の第一世代と位置づけられる。さらに、2008年に打ち上げられたGeoEye-1と2009年に打ち上げられたWorldView-2はともに地上分解能0.5mで、第二世代に分類される。これらのマルチスペクトル光学センサによって得られた画像を用いて、都市のモニタリングや災害把握

に関する研究は多く行われてきた。例えば、三浦・翠川<sup>4)</sup>はIkonos画像を用いて、フィリピンのマニラの地震被害想定に用いるGISデータの更新を行った。その結果、中高層建物は画像解析により抽出することが可能であったが、低層の密集住宅地域ではこれが困難で、土地被覆分類によって建物数を推定した。Sarabandiら<sup>5)</sup>は、英国ロンドンを対象として、高解像度衛星画像とMIHEA (Mono Image Height Extraction Algorithm)ツールを用いることで建物の高さや形状などの情報を抽出した。Marangozら<sup>6)</sup>は、トルコにおいてIkonos画像を用いてピクセルベースとオブジェクトベースによる教師付き分類を行い、オブジェクトベースの方がピクセルベースより誤差が少ないことを示した。災害前後の2時期の画像を用いたオブジェクトベースによる建物被害の抽出は、QuickBirdを用いた2007年インドネシア・ジャワ島地震における研究<sup>7)</sup>や航空写真を用いた2007年新潟県中越沖地震における研究<sup>8)</sup>などがある。これらの研究においても、ピクセルベースよりオブジェクトベースの分類が高解像度衛星画像に有利な点を指摘している。

本研究では、ペルーのタクナ市を対象地域として、WorldView-2画像を用いたオブジェクトベースによる地震被害予測のための建物インベントリデータの構築手法を検討する。はじめに、タクナ市の土地利用を把握するために、ピクセルベースの教師付き分類を行った。次に、この分類結果と国勢調査データから、街区ごとの植生割合と人口密度を求め、建物抽出を行う代表的な住宅地を対象地域として選出した。さらにこの対象地域において、オブジェクトベースの教師付き分類を行い、目視判読の結果と比較し、その精度評価を行った。

## 2. SATREPSプロジェクトと対象地域

国際協力機構(JICA)と科学技術振興機構(JST)による「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム」(SATREPS)の一環として、2009年より「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」が日本とペルーの研究者の間で進められている<sup>9)</sup>。このプロジェクトの目的は、ペルーにおける地震・津波災害の軽減を図ることであり、以下の5つのトピックからなる；1) 地震動予測と地盤ゾーニング；2) 津波予測と被害軽減；3) 建物の耐震性向上；4) 空間基盤データ構築と被害予測；5) 地域減災計画。このプロジェクトのスタディエリアとしてリマ市とタクナ市が選ばれている。本研究ではSATREPSペループロジェクトの一環として、タクナ市の建物インベントリデータ構築を検討した。

地震被害予測のためのシナリオ地震は近年の研究をもとに決定され<sup>10), 11)</sup>、過去にペルーに大きな被害を及ぼした2つの地震が選ばれている。1つめは、1746年に発生してリマ市を中心とする地域の建物に甚大な被害をもたらした、死者約6,000人を出したリマ・カヤオ地震(マグニチュード8.6)である。もう一方

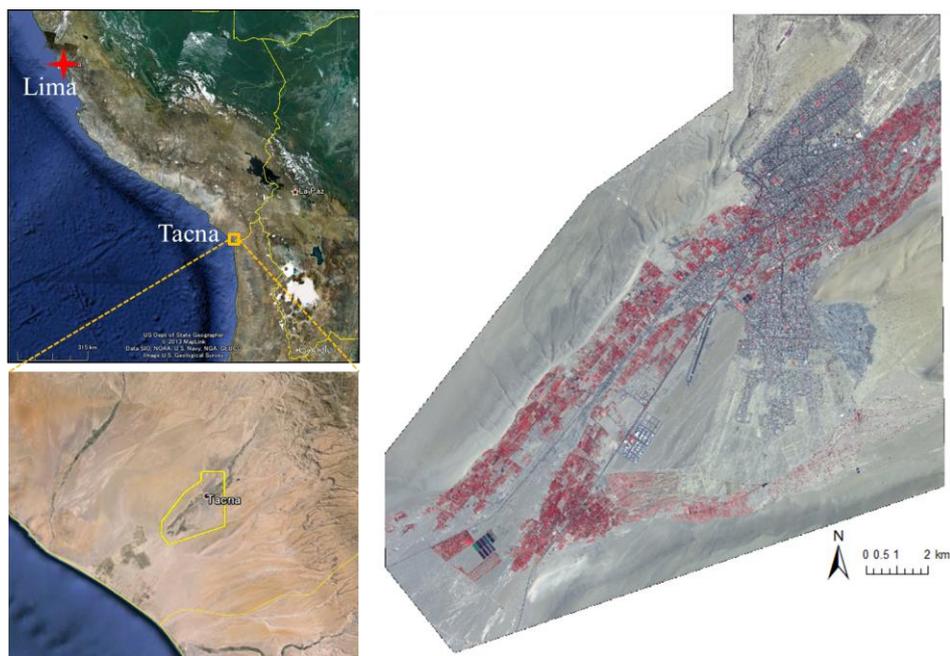


図1 ペルーにおけるタクナ市の位置(左)と使用するWorldView-2 フォールスカラー画像(右)

は、1868年にペルーとチリに跨る沿岸部で発生し、タクナやアリカ、アレキパなどで約25,000もの死者を出したペルー南部地震（マグニチュード8.8）である。そして今後もペルーとチリの沿岸部においてこのような巨大地震の発生が懸念されている<sup>12)</sup>。

タクナ市は図1に示すようにペルーの南部に位置する人口24万人、平均標高552mのタクナ州の州都である。また、チリと国境を接しており、周りを砂漠と太平洋に囲まれている。本研究で用いるWorldView-2画像は2010年3月6日に撮影されたものであり、図1の黄色い線に囲まれた範囲を使用する。地上分解能はパンクロマチック(PAN)バンドで0.5m、マルチスペクトル(MS)バンドで2.0mであり、これらのパンシャープン化によって、分解能0.5mのMS画像が得られる。WorldView-2のMSバンド数は8であるが、本研究においてはPANバンドと4つのMSバンド(Blue, Green, Red, NIR-1)である。

### 3. 土地被覆分類と比較対象地域の選択

ペルーでは、建物インベントリデータは地震被害予測に用いることができるGIS形式で整備されておらず、その構築は重大な課題である。SATREPSペループロジェクトにおいては、Estradaら<sup>13)</sup>や松岡ら<sup>14)</sup>が高解像度衛星画像(WorldView-2)と多時期のLandsat画像やデジタル標高モデル、国勢調査データなどに基づいた建物インベントリ構築手法を提案した。これらの手法をリマ首都圏に適用し、現地調査結果や目視判読結果と比較した。しかし、現地調査による正解データが不足しているため、実用化のためには今後さらなる検証が必要である。これより本研究では、タクナ市において同様に高解像度衛星画像を用いた建物インベントリの構築手法を検討する。

オブジェクトベースの建物抽出には、建物用途（戸建て住宅、集合住宅、工場など）や周辺環境（市街地、郊外、農地など）を考慮して、適切にパラメータを選定し、その値を設定する必要がある。よって、タクナ市の建物の空間的特徴を考慮するために、WorldView-2のパンシャープンMS画像を用いて土地被覆分類を行った。

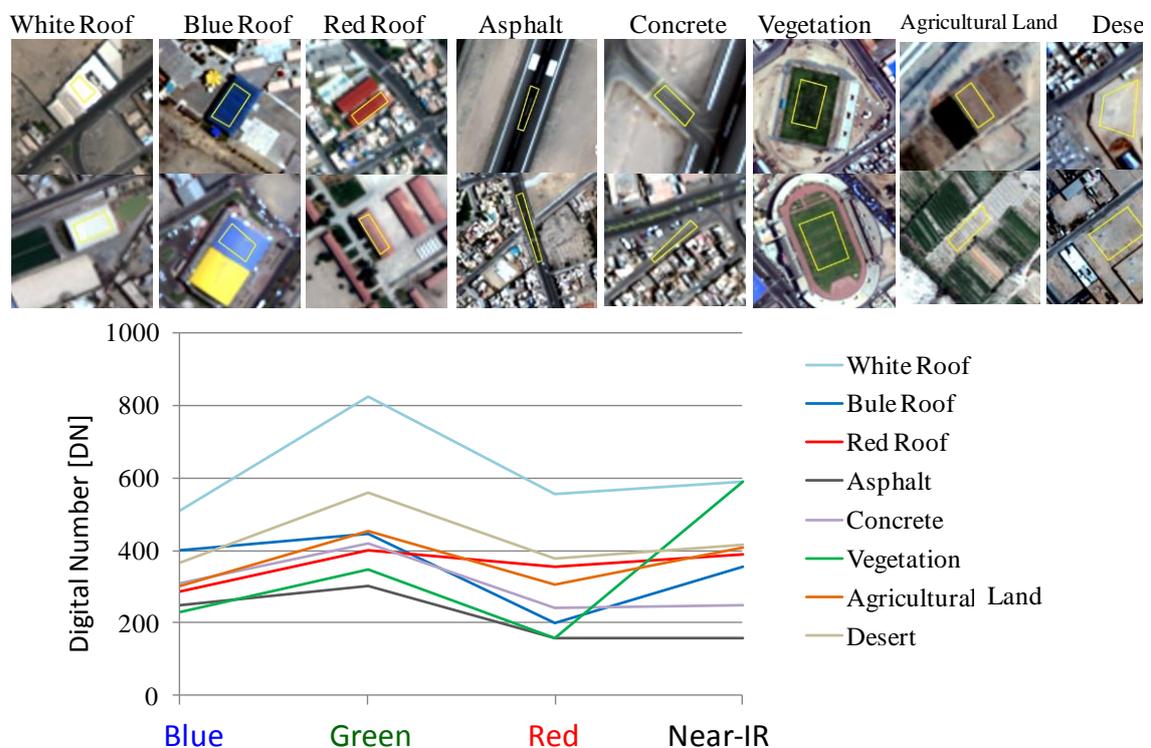


図2 教師データの種類とその範囲およびそれらのMSバンドの平均DN値

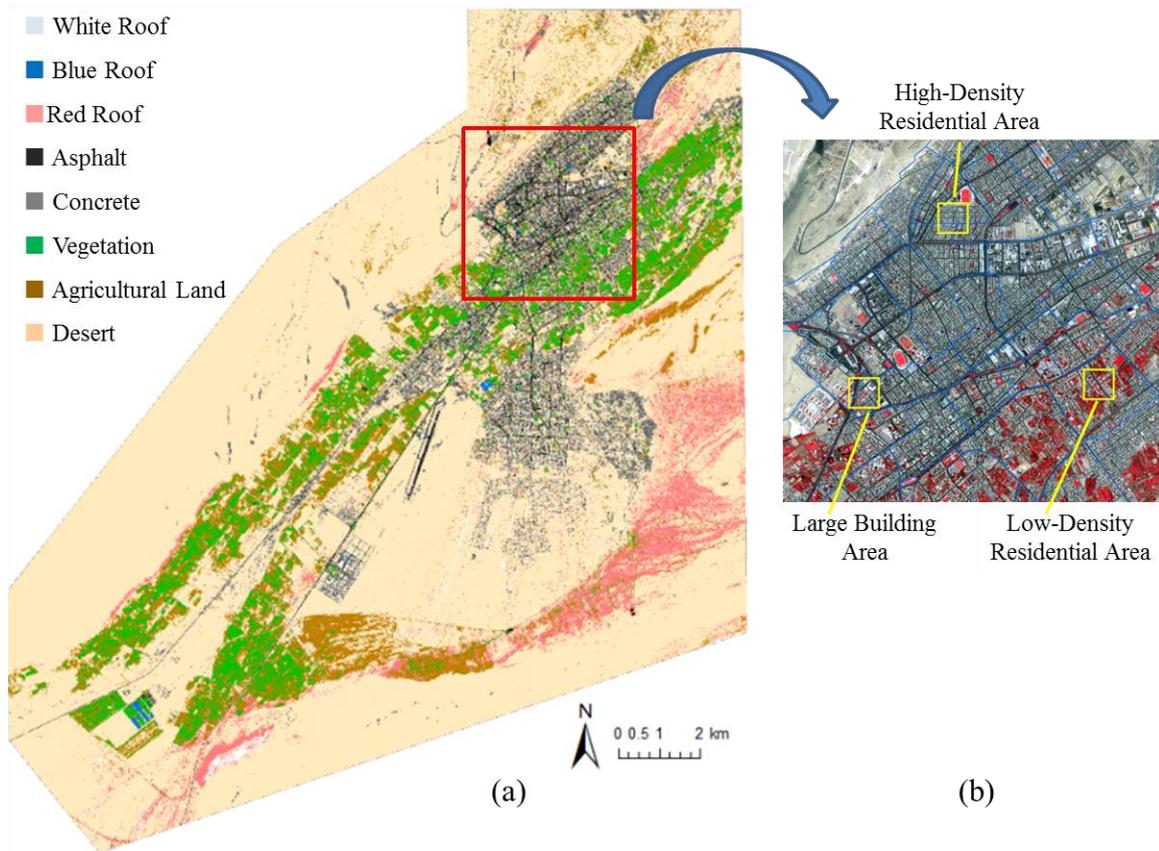


図3 WorldView-2 画像のピクセルベース教師付き土地被覆分類結果(a)と市街地の検討範囲(b)

第一段階として、K-means法による教師なし分類をクラス数を変えながら行い、教師付き分類の適切なクラス数を決定した。そして、分類クラスを8 (white roof, blue roof, red roof, asphalt, concrete, vegetation, agricultural land, desert) とした最尤法による教師付き分類を行った。図2に教師データの種類とその範囲およびそれらのMSバンドの平均DN値を示す。教師付き分類の結果を図3に示すが、砂漠の中の川沿いの地域に、植生と市街地が広がっていることがわかる。

この土地被覆分類結果から得られた植生割合を市街地ブロックごとに求め、図4(a)に示す。この図より、植生割合は市の中心部で高く、南部では非常に少ないことがわかる。次に、国勢調査データを用いて市街地ブロックの人口密度を求めた(図4(b))。この図より、人口密度が高い地域は市の北部に多く、逆に低い地域は南部に多いことがわかる。これら2つの図を組み合わせることにより、タクナ市の市街地は人口密度から住宅地域と商業地域(もしくは工場地域)に分類でき、さらに住宅地域は植生の割合から中高層住宅地と低層密集住宅地、郊外住宅地に分類することができる。

以上の考察から、本研究ではタクナ市の代表的な市街地域を以下の3パターンに分類した: 1)中高層住宅や大きな商業施設、工場などが多い中高層地域、2)植生の割合が多い郊外住宅地、3)人口密度が高く植生の割合が低い低層密集住宅地。さらに、図3(b)に示す3カ所の300m x 300mの範囲をこれらの典型的な検討地区として選定し、オブジェクト分類による建物抽出を行った。

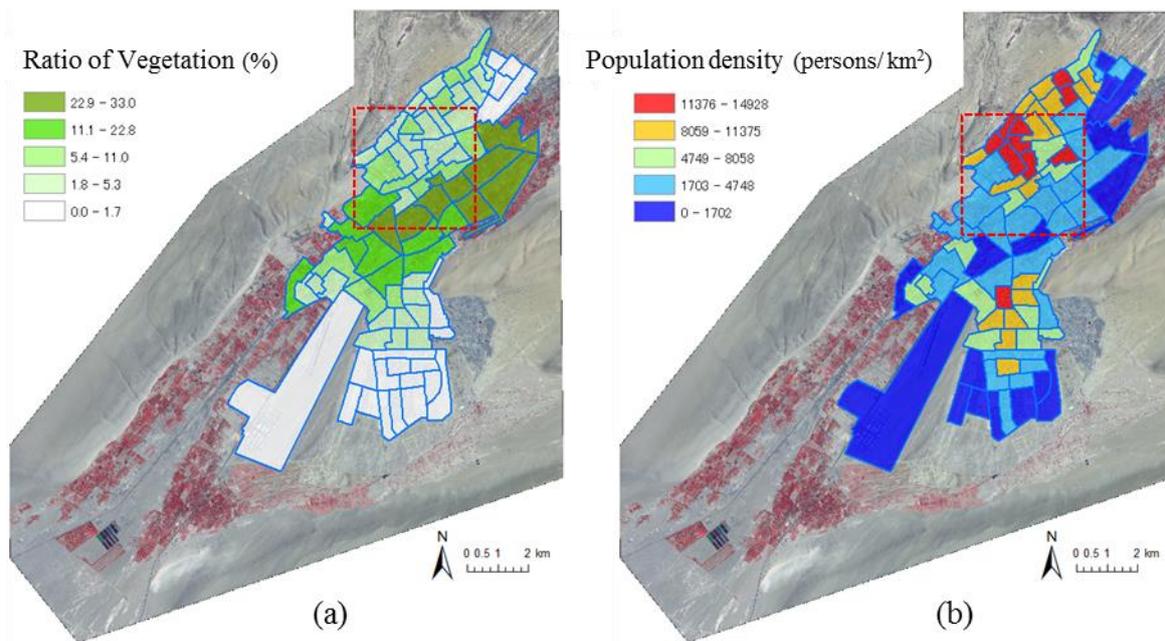


図4 土地被覆ピクセル分類から求めた市街地ブロックごとの植生割合(a)と  
国勢調査から求めた市街地ブロックごとの人口密度(b)

#### 4. オブジェクト分類

オブジェクト解析にはDefiniens Professional 5を用いた。まず、画像に対してセグメンテーションを行い、「オブジェクト」を作成した。セグメンテーションには、*Layer Weight*, *Compact Weight*, *Smooth Weight*, *Shape Factor*, *Scale Parameter*の5つのパラメータの値を設定する必要がある。*Scale Parameter*はオブジェクトのサイズを決定するパラメータであり、対象地区の建物の大きさに合わせて決定する。本研究では*Scale Parameter*は中高層地域、郊外住宅地、低層密集住宅地にそれぞれ150, 100, 80と設定した。*Shape Factor*は、セグメンテーションにおいて画像のスペクトル特性を重視するか、エッジを重視するかを決めるパラメータである。本研究では、建物の形状をオブジェクトとして抽出することが目標なので、*Shape Factor*は画像のエッジを重視する0.9に設定した。*Layer Weight*は、スペクトル特性を利用する際のバンドごとの重みを決めるパラメータであり、本研究ではすべてのバンドに対して1を与えた。一方、*Compact Weight*と*Smooth Weight*は、エッジの抽出を行うパラメータである。*Compact Weight*を大きくするとオブジェクトは丸型に近づき、*Smooth Weight*を大きくするとオブジェクトは直線型になる。本研究では、建物の輪郭は直線であるため、*Compact Weight*と*Smooth Weight*を0:1に設定した。これらのパラメータによりセグメンテーションされた結果を図5(左)に示す。

次に、セグメンテーションにより作成されたオブジェクトに対して、最近接法を用いたオブジェクトベースの教師付き分類を行った。分類クラス数は中高層地域と低層密集住宅地においては7、郊外住宅地においてはwaterを付け足した8とした。分類結果を図5(中央)に示す。中高層地域に対する結果では、屋根の色が均一な集合住宅と工場は正確に抽出されている。郊外住宅地に対する結果では、建物の輪郭がすべて抽出されてはいるが、建物の位置をおおむね推定することができる。低層密集住宅地に対する結果では、さまざまな形状や色をした建物が非常に密集して存在しているため、建物の抽出はオブジェクト分類においても目視判読においても困難である。そのため、低層密集住宅地においては、個々の建物を抽出する代わりに、街区を囲む道路を抽出し、街区ごとの建物数は現地調査や国勢調査データから推定することにする。

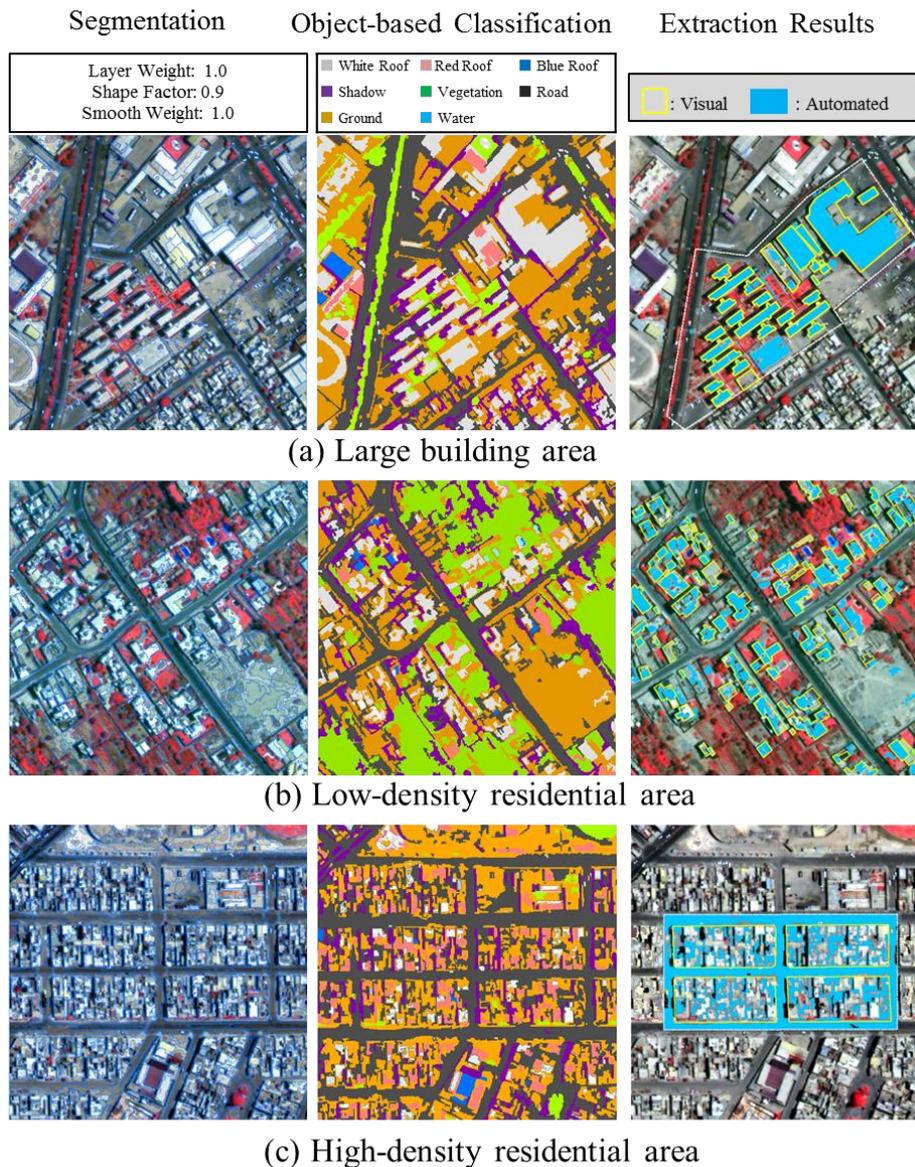


図5 3カ所の検討範囲のセグメンテーション結果（左）とオブジェクト分類結果（中央），およびオブジェクト分類と目視判読から抽出した領域の比較（右）

## 5. 建物抽出と精度の評価

建物抽出の精度を評価するため、中高層地域と郊外住宅地では建物輪郭を、低層密集住宅地では街区をオブジェクト分類の結果から抽出し、目視判読で作成した輪郭と比較を行った（図5（右））。抽出精度は表1～3に示すエラーマトリクスで評価する。ユーザ精度は、オブジェクト分類により抽出した輪郭が正解データである目視で抽出した輪郭と一致した割合を表す。また、プロデューサ精度は、目視で抽出した輪郭がオブジェクト分類で抽出された割合を表す。

中高層地域ではユーザ精度は87.6%と非常に高く、プロデューサ精度も75.7%と高い結果になった。この結果から、建物が画像の分解能よりも十分に大きく、密集せずに建っていればオブジェクト分類による建物抽出の精度は高いといえる。一方、郊外住宅地では、ユーザ精度が75.2%と高いが、プロデューサ精度が47.6%と低い結果となった。これは、多くの建物が様々な屋根の色や材質を持っているため、

道路や地面と混同されたことが原因として考えられる。さらに、低層密集住宅地では、街区抽出のユーザ精度が89.5%と非常に高く、プロデューサ精度は68.3%とユーザ精度と比べると低い結果となった。この結果から、密集住宅地では街区抽出すらも難しいことを示しているといえよう。

本検討では、ペルーの中規模都市を対象に高分解能衛星画像を用いて、オブジェクト分類により建物インベントリデータの構築を試みた。このような建物データ構築は、市街地環境や建物特性に大きく依存すると考えられることから、今後とも事例検討を多数行って、地域特性に応じた適当な手法を構築する必要があると考える。

表 1 中高層地域におけるエラーマトリクス

		Visual Inspection (m <sup>2</sup> )			User's Accuracy
		Building	Others	Sum	
Extraction Result (m <sup>2</sup> )	Building	7874	1112	8986	87. 6%
	Others	2526	19818	22344	88. 7%
	Sum	10400	20930	31330	
Producer's Accuracy		75. 7%	94. 7%	Overall Accuracy	88. 4%

表 2 郊外住宅地におけるエラーマトリクス

		Visual Inspection (m <sup>2</sup> )			User's Accuracy
		Building	Others	Sum	
Extraction Result (m <sup>2</sup> )	Building	6904	2274	9179	75. 2%
	Others	7608	73213	80821	90. 6%
	Sum	14512	75488	90000	
Producer's Accuracy		47. 6%	97. 0%	Overall Accuracy	89. 0%

表 3 低層密集住宅地におけるエラーマトリクス

		Visual Inspection (m <sup>2</sup> )			User's Accuracy
		Building Block	Road	Sum	
Extraction Result (m <sup>2</sup> )	Building Block	12435	1456	13891	89. 5%
	Road	5771	8253	14024	58. 8%
	Sum	18206	9708	27915	
Producer's Accuracy		68. 3%	85. 0%	Overall Accuracy	74. 1%

## 6. まとめ

建物インベントリデータは地震被害予測を行う際に必要な重要なものである一方、発展途上国では整備されていない場合が多く、その構築には多大な労力とコストが発生する問題がある。そこで本研究では、ペルーのタクナ市を対象地域として、高分解能衛星WorldView-2の画像を用いた建物インベントリの効率的な構築手法について検討した。まずはじめに、市街地の土地利用と土地被覆を調べるため、パパンシャーブン化した4バンドのマルチスペクトル画像を用いて、ピクセルベースの土地被覆分類を行った。この結果から市街地ブロックごとの植生の割合を求め、同じく国勢調査から市街地ブロックごとの人口密度を求めた。これらの結果を組合わせて、タクナ市の代表的な市街地地域を1)中高層地域、2)郊外住宅地、3)低層密集住宅地の3地域に分類した。そしてこれらの地域から検討対象地区を選出し、オブジェクト分類を行った。オブジェクト分類では、対象地区の建物の大きさや形状を考慮して閾値を設定し、セグメンテーションを行った。さらにこの結果に対し、オブジェクトベースの教師付き分類を行い、中高層地域と郊外住宅地では建物輪郭を抽出し、低層密集住宅地では街区を抽出して目視判読結果と比較

を行った。これらの結果から、中高層地域と郊外住宅地での建物の抽出精度は高いが、低層密集住宅地では、街区ですら抽出精度が低いことが確認された。

今後はさらに多くの事例に対して同様の検討を行い、市街地環境や建物特性に応じた建物インベントリ構築法の高度化を進める必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) GEM Foundation, Available online: <http://www.globalquakemodel.org/>
- 2) Inventory Capture Tools, Available online:  
<http://www.globalquakemodel.org/what/physical-integrated-risk/inventory-capture-tools/>
- 3) Wieland M., Pittore M., Parolai S., Zschau J. : Remote sensing and omnidirectional imaging for efficient building inventory data-capturing: Application within the Earthquake Model Central Asia, 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, pp.3010 - 3013.
- 4) Miura H., and Midorikawa S. : Updating GIS building inventory data using high-resolution satellite images for earthquake damage assessment: application to metro Manila, Philippines, *Earthquake Spectra*, 22(1) , 2006, pp.151-168.
- 5) Sarabandi P., Chung H-C., and Adams B.J. : Remote sensing for building inventory updates in disaster management, *Proc. of SPIE*, (6178) 10, 2006.
- 6) Marangoz A. M., Oruç M., Karakiş S., Şahin H. : Comparison of pixel-based and object-oriented classification using IKONOS imagery for automatic building extraction– Safranbolu testfield, Fifth International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days", Berlin Technical University, 2006, pp.28-31.
- 7) 松本和貴, Tuong Thuy Vu, 山崎文雄 : 2006年ジャワ島中部地震における高解像度衛星画像を用いた建物被害域の抽出, 日本リモートセンシング学会第41回学術講演会論文集, 2006, pp.55-56.
- 8) 鈴木大輔, 丸山喜久, 山崎文雄 : デジタル航空画像を用いた新潟県中越沖地震の建物被害抽出, 日本地震工学会論文集, Vol. 10, No. 3, 2010, pp.33-45.
- 9) Yamazaki, F. and Zavala, C.: SATREPS project on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru, *Journal of Disaster Research*, 8(2), 2013, pp.224-234.
- 10) Sladen A., Tavera H., Simons M., Avouac J. P., Konca A. O., Perfettini H., Audin L., Fielding E. J., Ortega F., and Cavagnoud R. : Source model of the 2007 Mw 8.0 Pisco, Peru earthquake: Implications for seismogenic behavior of subduction megathrusts, *Journal of Geophysical Research*, 115, B02405, 2010.
- 11) Pulido N., Tavera H., Aguilar Z., Chlieh M., Calderon D., Nakai S., Sekiguchi T., Yamazaki F. : Mega-earthquakes Rupture Scenarios and Strong Motion Simulations for Central Andes, Peru, The International Symposium for CISMID 25th Anniversary, Lima, Peru, CD-ROM, Paper No. TS-6-2, 2012, pp.8.
- 12) Okal, E.A., Borrero, J.C., and Synolakis, C.E. : Evaluation of Tsunami Risk from Regional Earthquakes at Pisco, Peru, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5), 2006, pp.1634–1648.
- 13) Estrada M., Miura H., Yamazaki F., and Midorikawa S. : Land use evaluation using satellite imagery for urban inventories, 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2011, pp.93-96.
- 14) Matsuoka M., Miura H., Midorikawa S., and Estrada M. : Extraction of urban information for seismic hazard and risk assessment in Lima, Peru using satellite imagery, *Journal of Disaster Research*, 8(2), 2013, pp.328-345.

# **Development of Building Inventory Data for Earthquake Damage Assessment in Tacna, Peru Using Satellite Imagery**

SUZUKI Kentaro <sup>1)</sup>, LIU Wen <sup>2)</sup>, MATSUOKA Masashi <sup>3)</sup>  
and YAMAZAKI Fumio <sup>4)</sup>

1) Graduate School Student, Department of Urban Environmental Systems, Chiba University

2) Assistant Professor, Department of Urban Environmental Systems, Chiba University, Dr. Eng.

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

4) Professor, Department of Urban Environmental Systems, Chiba University, Dr. Eng.

## **ABSTRACT**

In conducting damage assessment for scenario earthquakes in high seismic risk regions, building inventory data are required as well as building fragility functions and strong-motion distributions. But inventory data with the locations and characteristics of buildings are not so easy to construct, especially for developing countries. Hence in this study, an approach to construct building inventory data is sought as an alternative of cadastral data and field surveys. Using a high-resolution optical satellite image acquired by WorldView-2, this paper tries to develop building inventory data for earthquake damage assessment in Tacna, Peru. First, Pixel-based classification was carried out to examine basic land-cover and land-use of the urban area. Object-based building extraction was then conducted for three selected areas as an attempt to develop building inventory data.

*Keywords: WorldView-2, building inventory, building extraction, damage assessment*