

地震災害の被害想定のための 高解像度衛星画像・GPSビデオカメラを用いた 建物インベントリ推定手法の確立 —フィリピンのマリキナ市を事例として—

Development of a Building Inventory Estimation Method Using High Resolution Satellite Imagery
Data and Digital Video Imagery Data with Geo-Locational Data:
An Application for Marikina City, Metro Manila, Philippine

渡邊 学¹, 林 春男², 高島 正典³, 堀江 啓⁴,
田中 聡⁵, 長谷川 浩一⁴, 浦川 豪²

Manabu WATANABE¹, Haruo HAYASHI², Masasuke TAKASHIMA³, Kei HORIE⁴,
Satoshi TANAKA⁵, Kouichi HASEGAWA⁴ and Go URAKAWA²

¹ 京都大学大学院 情報学研究科

Graduate School of Informatics, Kyoto University

² 京都大学 防災研究所 巨大災害研究センター

Disaster Prevention Institute, Kyoto University

³ 東京大学 生産技術研究所

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

⁴ 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター

Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED

⁵ 富士常葉大学環境防災学部

College of Environment and Disaster Research, Fuji Tokoha University

The purpose of this study is to develop a method for estimating the quantity of buildings with different seismic vulnerability according to GESI method in developing countries. At first we selected a learning area with the 25m gridded IKONOS imagery data of Marikina City, Metro Manila, Philippines. Based on the cluster analysis for the distribution patterns of DNAs available in the learning area, we proposed a method to categorize the grids into 7 different land cover pattern. Then we developed a procedure of field investigation using digital video camera with GPS to identify the quantity of buildings with different seismic vulnerability. Finally, we estimated the quantity of buildings with different seismic vulnerability at the entire Marikina City area.

Key Words : risk assessment, building inventory, GESI, IKONOS, geo-location, land cover

1. はじめに

最近の地震では、2001年1月26日のインド西部地震(マグニチュード7.7)では死者20,000人以上、2003年5月21日のアルジェリア地震(マグニチュード6.7)では死者約2,000人以上、2003年12月26日のイラン・バム地震(マグニチュード6.5)でも死者40,000人以上と、途上国において甚大な人的被害が発生している。

このような状況において、地震防災に関する研究は世界のような状況で行われている。また、途上国の地震防災力の向上を直接の目標とした取り組みとして、国際連合を中心とする枠組みの中で、国際防災の10年(IDNDR)におけるRADIUSプロジェクト¹⁾や、GESIプロジェクト²⁾の活動が行われている。しかし、このような途上国の地域性に即した研究の絶対数は多いとはいえない。また、多くの途上国は経済的な問題を多く抱えており、先進国と同じ程度に人、物資、資金、時間といった資源を防災対策に投入すること

が困難である。したがって、途上国の地震防災力向上のためには、途上国の側の能力開発を図る手段として、その国の経済状況に即した地震防災対策手法が必要である。

地震防災力向上のためには、まず、地震災害の被害想定が必要不可欠である。どこに、どの程度の規模の地震がいつ発生するのか、それによって人々の暮らしにどのような被害が生ずるのかを知ることが適切な防災対策を実施する前提となるからである。

地震災害の被害想定には、地震の震源や震度分布といった外力の同定、外力と被害の関係性を表す被害関数、被害の対象となる建物や人の集積状況に関するデータの三つの要素が必要である。まず、途上国における被害想定を考えると、外力については様々な国際的機関が世界的に地震の外力について研究しており、例えば、GSHAP³⁾では、世界における地震動の分布をWEBにおいて提供している。外力と被害の関係を表す被害関数に関しても、様々な機関において研究されており、途上国を対象とした代表的な手法

が GESI であり、比較的簡易で利用性の高い手法を提唱し、すでに世界の 21 の都市において実施されている。最後の被害想定に必要な地域固有の建物や人のデータは、地域それぞれが自ら作成し、所有すべきデータであるが、経済状況などからこうしたデータを用意できない途上国が多い。以上まとめると、途上国において被害想定を行う際のボトルネックは、対象とする地域の建物や人の集積状況、つまりインベントリデータをどのように確保するかであることがわかる。

地震被害は大きく物的被害と人的被害に分けられる。しかし、途上国では人的被害も住宅倒壊による圧死から生じるものが多い。そのため、地震の被害想定には、物的被害、特に住宅被害の想定が必要不可欠である。そこで、途上国において地震防災力の向上の前提として地震被害想定を行う場合には、住宅被害を想定するために必要な建物の棟数、種別といった建物インベントリを簡易に作成する手法の開発が求められている。

本研究では、全世界をカバーする高解像度の衛星画像の解析と GPS と連動したビデオカメラを利用した現地調査を組み合わせて、GESI 法を用いた被害想定を行うために必要となる建物インベントリを簡易に作成する手法を提案する。

2. 研究の概要

(1) 高解像度衛星画像と GPS ビデオカメラを利用した建物インベントリ推定手法の開発プロセス

本研究では、建物インベントリ推定手法を開発するために、以下のような手順で作業を行った。

- ①衛星画像を用いて対象地をメッシュ化した。
- ②多様な土地被覆を有するラーニングエリアを選定した。
- ③ラーニングエリアにおいて、4種類のメッシュサイズで土地被覆分類を行った。
- ④ラーニングエリアに存在する建物ポリゴンデータを用いて、4種のメッシュサイズのうち最適なメッシュサイズを決定した。
- ⑤対象地全域の土地被覆を推定した。
- ⑥ラーニングエリアにおける建物ポリゴンデータを用いて、対象地全域の建物棟数を推定した。
- ⑦ラーニングエリアにおいて現地調査を行い、GPS ビデオカメラを用いて家並みを連続撮影した。
- ⑧撮影資料をもとに、ラーニングエリアのメッシュごとの建物棟数・建物種別を決定した。
- ⑨対象地全域の建物棟数・建物種別を推定した。
- ⑩最後に①～⑨の結果をもとにして、建物インベントリ推定手法を提案した。

(2) 高解像度衛星画像の利用

衛星画像を利用した研究は様々な分野で行われている。特に衛星 LANDSAT を用いた研究は農業、環境、資源などの多くの分野で行われている。LANDSAT では、水面、森林、草地、裸地、市街地といった土地被覆の基礎的な分類が比較的容易である⁴⁾。しかし、LANDSAT が持つ1ピクセル30mグリッドという精度では、市街地をさらに細分化して、建物種別や棟数を判定することは難しいとされている。

本研究では、建物インベントリを作成することが目的であり、市街地をさらに細分化し、建物レベルまでの詳細な分析が必要となる。そこで、1ピクセル1mグリッドの精度を持つ衛星 IKONOS を用いることで、LANDSAT レベル

の精度では、市街地と判定される大きさのグリッドをより詳細に分析する手法の開発を試みた。7バンドのセンサーを持つ LANDSAT では、最小単位である30m×30mの1ピクセルに7データポイントが存在する。これに対して4バンドのセンサーを持つ IKONOS の場合には、LANDSAT に対応する30mグリッドであれば、 $30 \times 30 \times 4 = 3600$ データポイントが存在することになる。つまり、LANDSAT では7センサーの値のパターンで市街地と判定された区域を、1mグリッドで得られる IKONOS の4センサーのそれぞれについて、合計3600データポイントの分布パターンを解析することで、建物種別と棟数を推定することの可能性を検討した。

衛星 IKONOS はスペースイメージング社が1999年に打ち上げた民間の商用衛星である。IKONOS は地球の周りを高度680kmで飛行しており、同一地点を解像度1mなら三日、解像度3mなら1日の周期で撮影することが可能であり、定期的なデータ更新も十分に可能である。そのため、建物インベントリの定期的な更新も可能である。IKONOS には4バンドのセンサーが搭載されており、赤、緑、青、近赤外線の波長帯を捉える。赤、緑、青、近赤外線のバンドを以下では、red, grn, blu, nir と略記する。それぞれのバンドが捉える波の強さは0から2047の2048階調のDN値で表現されている。これらの非常に豊富なデータ量は詳細な土地被覆の分析を可能とすると考えた。

(3) GPS ビデオカメラについて

GPS ビデオカメラは情報通信研究機構 宇治 GIS 研究開発支援センターが開発したシステムである。ビデオを撮影する際に、緯度経度情報をビデオの音声情報に変換して取り込み、GIS 上で位置情報付きでビデオ映像を表示する機能を持っている。この機能を用いて、予め設定された撮影地に赴き、現地において車中から撮影した家並みの映像情報とその緯度経度座標を IKONOS 画像を背景図とした GIS 上で解析し、どこにどのような建物種別を持つ建物が何棟存在するのかを、短時間で調査することに利用した。

(4) 研究対象地・研究手法

研究の対象地については、市中央に南北に大きな断層が走るフィリピンのメトロマニラ圏の都市であるマリキナ市⁵⁾(図1)とした。



図1 マリキナ市における IKONOS

次に、本来、建物インベントリーを作成する際には、GIS上に建物ポリゴンデータを作成し、それを解析することが効果的である。しかし、そのためには非常に多くの費用を要する。例えば、三浦・翠川⁹⁾はIKONOS画像を既存の建物ポリゴンデータの更新に利用する研究を行っているが、ポリゴンデータが全く存在しない状況からIKONOS画像データから建物ポリゴンデータを作成する手法は確立されていない。そこで、本研究では、衛星IKONOSを用い、まず、適当な大きさのグリッドサイズで土地被覆を分類した。その後、GPSビデオカメラを用い現地調査を行い、建物棟数・種別を調査した。最後に、土地被覆分類ごとに建物棟数・種別を平均化し、その関係を用いて対象地であるマリキナ市全域の建物棟数・種別を推定することを行った。また、建物インベントリーを現地調査において作成する手法に関しては、例えば、大角ら⁹⁾がネパールのカトマンズにおいて行った研究が存在する。それは全体のうちの0.4%のサンプルを層化多段階抽出法によって抽出し、建物構造の聞き取り調査、建物状況の目視調査、調査対象物の形状の測定などを行い、そのデータを用いて建物被害想定を行っている。ここでは、100名以上の調査員を動員し、また、調査全てには3ヶ月を要している。時間、費用といった資源を気にしないならば、この種の調査において高い精度の建物インベントリーが得られると考えられる。しかし、例えば、途上国における防災対策を行う際などに、起こりうる被害の概要を把握する際には、そこまでの精度は必要とされない状況が多く存在する。我々の研究の目的とするところは、短期間に、経済的、簡易に建物インベントリーを作成する手法を提示することで、途上国の防災力向上に寄することである。本研究では、現地調査においては、GPSビデオカメラを用いて家並みを撮影することであり、必要な時間は7日間、調査員は二人であるので、研究の目的を満たすことができていると考えている。

3. クラスタ分析による土地被覆分類

(1) 解析のための最適なグリッドサイズの決定

本研究においては、まず、衛星画像のクラスタ分析による土地被覆分類とその分類されたカテゴリーごとの建物棟数の間に関連性があると考えた。また、建物棟数・種別を評価することが目的であり、その際、ある一定の大きさを持ったグリッドにおける建物郡として評価を行うことを考えた。まず、わが国の住宅密集度をみると、岡田ら⁷⁾が関西の住宅地を例に1haあたりの住宅密集度を以下の表1のようにまとめている。この表から明らかなように10mグリッドではデータのばらつきに大きな制約があるため、精度を考慮すると25mグリッドが妥当であることを示唆している。これに基づいて、フィリピンのマリキナ市の衛星画像を目視分析したところ、25m以下のグリッドには収まり切らない建物が多く見られた。また、簡易にサンプルをとったところ、例えば10mグリッドで平均すると、建物では0.7棟以下、その他のエリアでは、0.2棟以下であった。建物郡として評価を行うために、クラスタ分析をする際に、一辺25m、50m、100m、200mの四種類のグリッドサイズでそれぞれ分析を行い、それらの中で最も建物棟数の推定精度が高いと考えられるものに決定することとした。

(2) ラーニングエリアの選定

対象地であるマリキナ市において、マリキナ市全域における土地被覆を有すると考えられる、土地被覆の多様な地域を抽出し、ラーニングエリア(図2)として選定した。この地域を対象にクラスタ分析による土地被覆分類と分類されたカテゴリーごとの建物棟数の分布を分析した。

(3) クラスタ分析による土地被覆分類

上記のラーニングエリアにおいて、まず、25mを単位とするセルであれば、一つのグリッドに対して625のピクセルが存在し、それぞれがred, grn, blu, nirの4バンドのDN値のデータを持ち、4バンドのデータの分布として表現できる。この4バンドのデータの分布を用いて、ラーニングエリアにおける全てのセルをクラスタ分析によって分類し、デンドログラムを作成した。また、DN値の一つ一つの分布が0から2047の範囲をとっている。このままクラスタ分析を行うと、データの幅が広く、甚大な時間を必要とする。そのため、0から2047の範囲を64ごとに幅をとって分割し、0から31までの32段階の値をとるように変換した。デンドログラムのそれぞれの段階の分類ごとに衛星画像を目視分析し、建物棟数を評価することに最も適していると考えられる分類を決定した。分類結果

表1 住宅密集度の分布

グリッドサイズ (m)	100	50	25	10
一戸建て住宅地				
六鶴荘	5.6	1.4	0.4	0.1
帝塚山	28.0	7.0	1.8	0.3
低層団地				
東住吉区山坂町	71.0	17.8	4.4	0.7
町屋・長屋地区				
住吉区万代	95.0	23.8	5.9	1.0
木質アパート地区				
豊中市庄内幸町	255.0	63.8	15.9	2.6
西成区太子	400.0	100.0	25.0	4.0
高層団地				
住之江区趣住吉団地	248.0	62.0	15.5	2.5
城東区森之宮団地	283.0	70.8	17.7	2.8

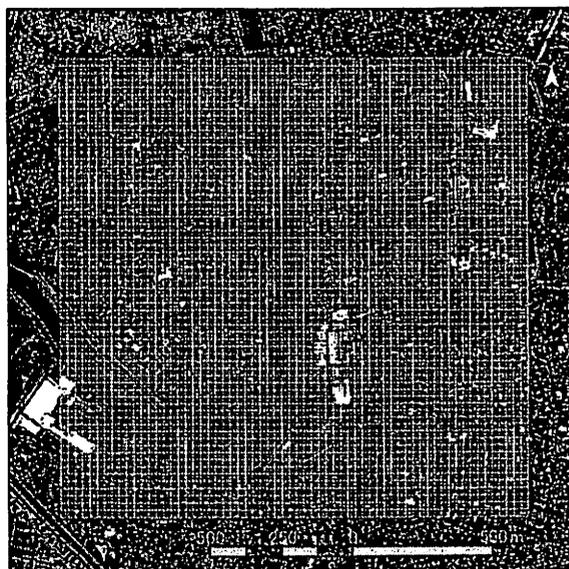


図2 ラーニングエリア

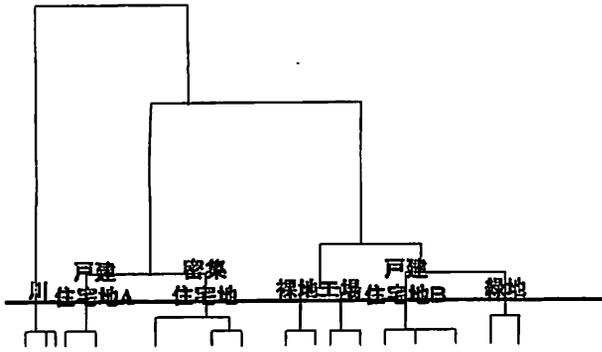


図3 クラスター分類によるデンドログラム

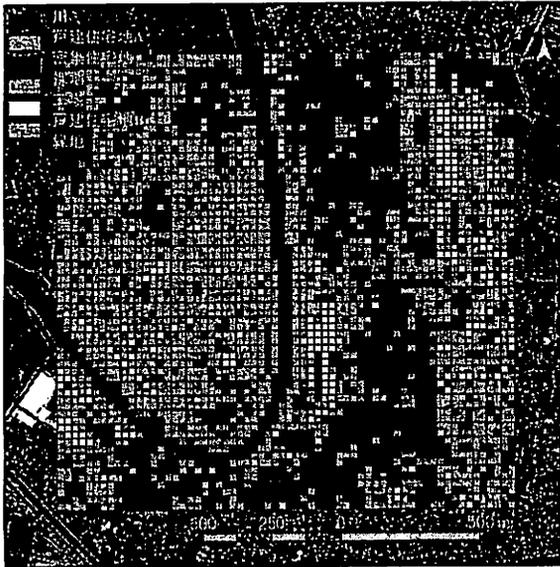


図4 ラーニングエリアの分類結果

を示すデンドログラムとラーニングエリアの図を図3, 4に示す。

上記の一連の土地被覆分類を50m, 100m, 200mのグリッドサイズにおいても同様に行った。結果としては、25mのグリッドサイズにおいては、川、緑地、裸地、工場、戸建住宅地A、戸建住宅地B、密集住宅地の7カテゴリーに分類され、50m, 100m, 200mに関しては、これに川岸を加えた8カテゴリーに分類された。25mにおいては、グリッドがより小さくなっているため、50m以上のグリッドにおいて川岸と判定されたグリッドが裸地のグリッドと川のグリッドに分かれ、川岸のカテゴリーが無くなったと考えられる。

(4) 土地被覆分類と建物棟数分布の関係分析

幸いなことにマリキナ市域のほぼ3/4についてはNAMRIA[®]が1995年に作成した建物ポリゴンデータが存在

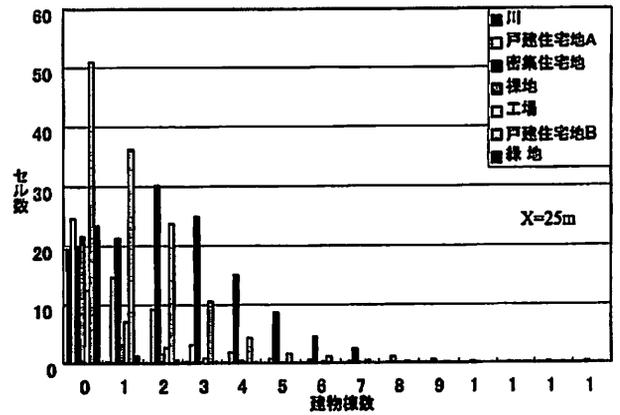


図5 カテゴリーごとの建物棟数

している。そこでNAMRIAデータを利用して、まず、25mのグリッドサイズにおいて、7つの土地被覆カテゴリーについて1グリッド当りの建物棟数の分布(図5)と平均棟数を検討した。

川と分類した土地被覆カテゴリー1はほとんどのセルにおいて建物が0棟である。また、1セル当りの平均棟数が0.06棟と非常に少ない。裸地と分類したカテゴリー4においては建物が1棟も存在しないセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数も0.4棟と少ない。緑地と分類したカテゴリー7は、ほとんどのセルにおいて建物が0棟であり、平均棟数も0.14棟と非常に少ない。

工場と分類したカテゴリー5においては1棟も存在しないセルが最も多く、平均棟数としては、0.74棟である。

戸建住宅地Aと分類したカテゴリー2においては建物1棟以上存在するセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数も1.08棟となっている。

戸建住宅地Bと分類したカテゴリー6は建物が1棟以上存在するセルが過半数を超え、また平均棟数も1.18棟とカテゴリー2の戸建住宅Aと類似した分布を示している。

密集住宅地と分類したカテゴリー3においては建物が2棟以上存在するセルが過半数を超えている。また、1セル当りの平均棟数もカテゴリー3の倍以上で2.52棟となっている。

上記のように、衛星画像のクラスター分析による土地被覆分類に対して、カテゴリーごとの建物棟数が非常に即した形で分布していることが明らかとなった。また、50m, 100m, 200mのグリッドサイズにおいても同様の分析を行い、それらにおいても同様の結果が得られている。四種類のグリッドサイズのカテゴリーごとの建物棟数の平均と分散を表2に示した。

(5) 最適なグリッドサイズの決定

四種類のグリッドサイズについて土地被覆カテゴリーごとの建物棟数の分散を比較すると、25mのグリッドサイ

表2 グリッドサイズごとの建物棟数平均・分散

カテゴリー		川	川岸	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
25m	平均	0.06	/	0.14	0.39	0.74	1.08	1.18	2.52
	分散	0.42	/	0.53	1.01	1.04	1.08	1.38	1.97
50m	平均	0.08	0.76	1.25	0.97	2.08	5.27	5.47	10.86
	分散	0.96	2.92	1.77	3.18	1.98	3.37	4.03	5.83
100m	平均	5.84	11.56	4.13	7.09	5.00	15.33	23.43	40.15
	分散	9.22	16.55	3.46	6.52	3.12	6.54	12.34	17.77
200m	平均	25.67	64.17	26.00	38.89	43.50	96.80	62.33	157.20
	分散	19.77	34.34	18.38	23.68	10.61	44.27	19.21	49.41

ズにおいて、川と分類したカテゴリー以外の全てのカテゴリーにおける分散が最も低かった。最も分散が低いということは、最も平均からの建物棟数のばらつきが少ないため、25mのグリッドサイズにおける土地被覆分類が、建物の棟数に従って最も的確に分類できていると考えた。この後、対象地全域の建物棟数の推定を行うこととなるが、その際、推定建物棟数の真の値からのばらつきは最も小さくあるべきである。そのため、25mのグリッドサイズが建物棟数の推定を最も精度高く行うことができると考えた。

また、マリキナ市でもっとも住宅密集度が高いエリアは河川敷を不法に占拠していた低所得者層に提供した再定住住宅地域である。この地域の建物は間口4m奥行き8mで規格化されている。25mグリッドサイズを採用した場合にも、最大20棟までの分散を得ることが可能であり、25mグリッドの採用が妥当であるといえる。

以上の諸点を考慮して、衛星画像をクラスター分析し、土地被覆分類を行うことで建物の棟数を評価しようとする場合、25mグリッドを単位に実施することが最適であると結論付けた。今後の分析においては、25mグリッドを単位とするため、土地被覆分類カテゴリーとしては、川、緑地、裸地、工場、戸建住宅地A、戸建住宅地B、密集住宅地、の7つを用いることとした。

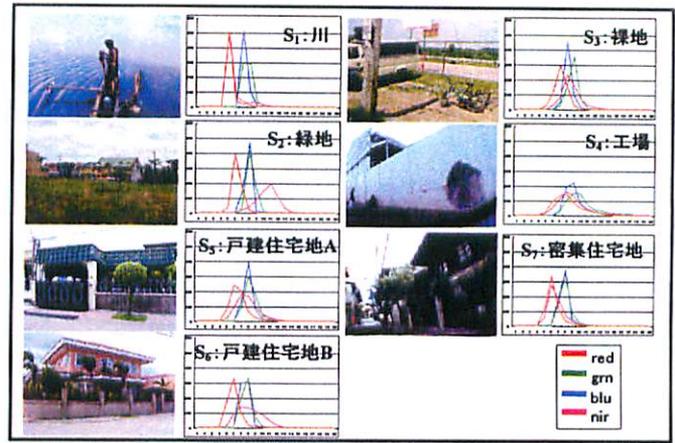


図6 カテゴリーごとの写真とDN値の平均値

4. マリキナ市全域の土地被覆・建物棟数の推定

(1) マリキナ市全域の土地被覆の推定

マリキナ市における土地被覆を25mグリッドで推定する際、ラーニングエリアで得た7つの土地被覆分類カテゴリーを基準として、当該グリッドのDN値の分布がユークリッド空間上で最も近似しているものを当該グリッドの土地被覆と推定することとした。そこで、まず、25mのグ

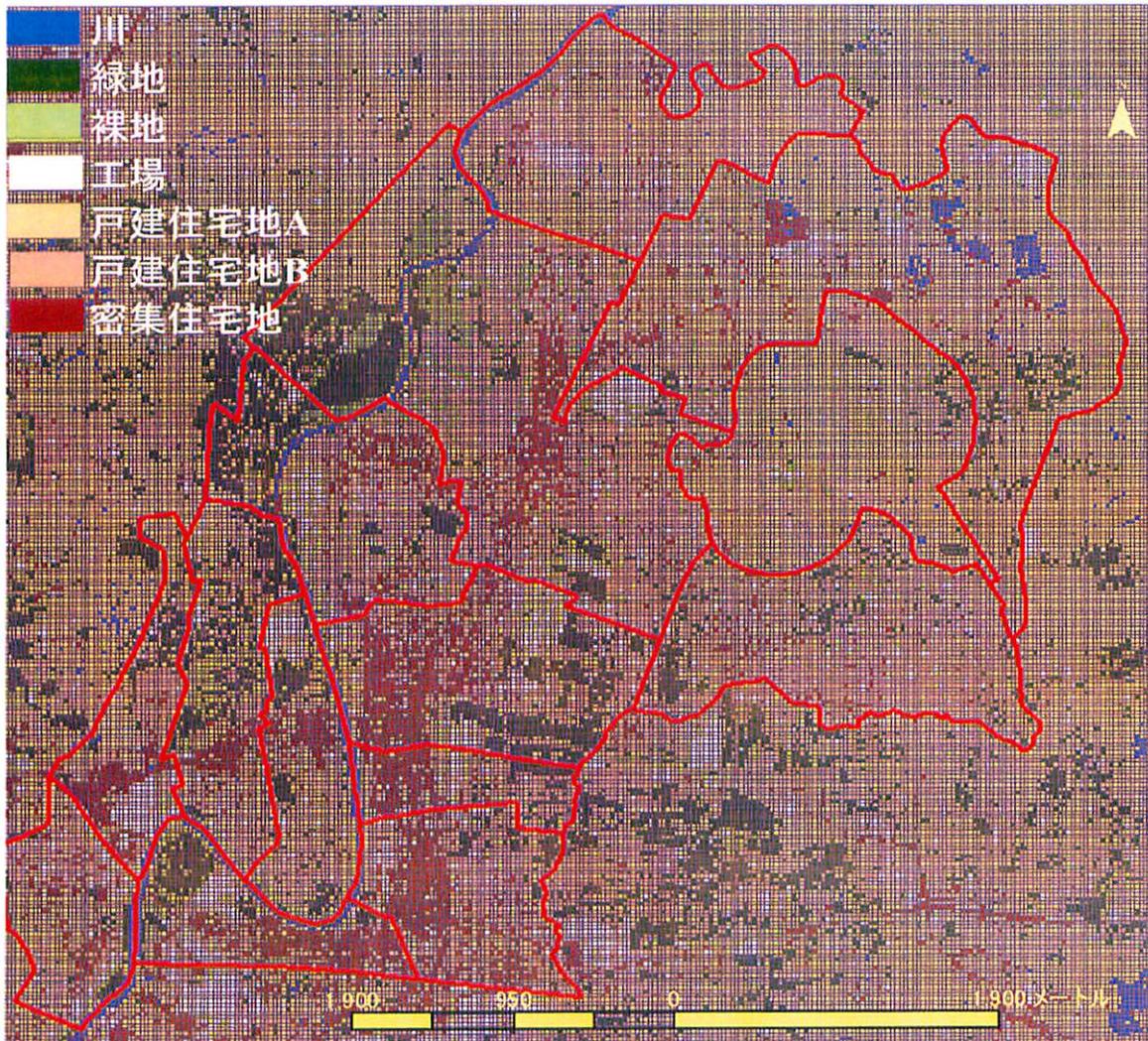


図7 マリキナ市全域の土地被覆推定結果

リッドサイズにおいて、ラーニングエリアで、7つのカテゴリーごとに、DN値の分布の平均をとった。DN値の分布の平均と現地調査の際に撮影したカテゴリーごとの土地被覆を示す画像を図6に表した。前述にもしたが、DN値は0から31までの分布をとっている。これらのカテゴリーごとの1セル当りのDN値の分布の平均を

$$S_{(x,m,n)} \quad (1 \leq x \leq 7, 1 \leq m \leq 4, 0 \leq n \leq 31) \quad [1]$$

と表現する。xはカテゴリーの7種類、mはblu, red, grn, nirの4バンドの4種類、nはDN値の32段階を表す。また、マリキナ市全域において、それぞれ25mのグリッドごとにDN値の分布を求めた。マリキナ市におけるあるセルをAとした場合、そのセルの持つDN値の分布を

$$A_{(m,n)} \quad (1 \leq m \leq 4, 0 \leq n \leq 31) \quad [2]$$

と表現する。ここで、

$$\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^{31} (S_{(x,m,n)} - A_{(m,n)})^2 \quad [3]$$

をx=1から7まで個別求め、その中で、上記の差異の平方和が最小の値をとるxをグリッドAの土地被覆分類とした。この手順でマリキナ市全域のセルの土地被覆を推定した結果が図7である。

(2) ラーニングエリアにおける建物ポリゴンデータを用いたマリキナ市全域の建物棟数の推定

マリキナ市全域の土地被覆を推定する際、3章の(4)で得た25mグリッドによる土地被覆カテゴリーごとの建物棟数の平均値を、それぞれのグリッドに存在する建物棟数の推定値とした(表3)。また、マリキナ市を①, ②, ③, ④の4つの地域に分割した場合(図8)、マリキナ市におけるNAMRIAの建物ポリゴンデータにおいて、①の部分においてデータが欠損している。建物ポリゴンデータが存在する②, ③, ④の3地域においては、建物ポリゴンデータから算出される建物棟数と、対応する地域について本研究で提唱した建物インベントリ推定法の結果を比較することで推定の精度の検証が可能になる。表4は、各地域ごとに、土地被覆カテゴリーごとのセル数の推定値と、そこに土地被覆カテゴリーごとの平均建物棟数を乗じた建物棟数の推定値、さらに対応する地域に存在する建物ポリゴン総数、および誤差率を表した。誤差率は以下のように表現した。

誤差率 = $100 \times (\text{建物ポリゴン総数} - \text{建物棟数推定値}) / \text{建物ポリゴン総数}$

表4の結果を見ると、②, ④の地域の密集住宅地が最も誤差率が高い。しかし、②, ④の地域の建物棟数推定値の合計値19373.42, 16194.59と比べるとその棟数の1355.76, 1391.04はそれぞれ10%に満たないため、その

表3 カテゴリーごとの平均建物棟数

カテゴリー	川	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
建物棟数/1セル	0.06	0.14	0.39	0.74	1.08	1.18	2.52

表4 マリキナ市建物棟数推定値

カテゴリー	平均建物棟数	②				③				④			
		セル数	建物棟数推定値	建物ポリゴン総数	誤差率	セル数	建物棟数推定値	建物ポリゴン総数	誤差率	セル数	建物棟数推定値	建物ポリゴン総数	誤差率
川	0.06	369	21.54	27.00	20.22	524	31.44	23.00	-36.70	126	7.56	84.00	91.00
緑地	0.14	449	62.86	82.00	-1.39	2465	345.10	263.00	-31.22	2583	361.62	414.00	12.65
裸地	0.39	510	198.90	644.00	69.11	1959	764.01	1175.00	34.98	1191	464.49	641.00	27.54
工場	0.74	702	519.48	361.00	-43.80	1949	1442.26	1632.00	11.93	1008	745.92	684.00	-12.34
戸建住宅地A	1.08	12710	13726.80	8263.00	-68.12	4828	5214.24	3027.00	-72.26	5728	6184.08	4000.00	-54.60
戸建住宅地B	1.18	2956	3498.08	3626.00	3.80	5735	6767.30	9174.00	26.23	5966	7039.98	6821.00	-3.21
密集住宅地	2.52	538	1355.76	844.00	-110.52	3518	8880.32	8633.00	-2.93	552	1391.04	626.00	-122.21
合計値	/	18224	19373.42	13627.00	-42.17	20976	23424.67	23927.00	2.10	17152	16194.59	13250.00	-22.22

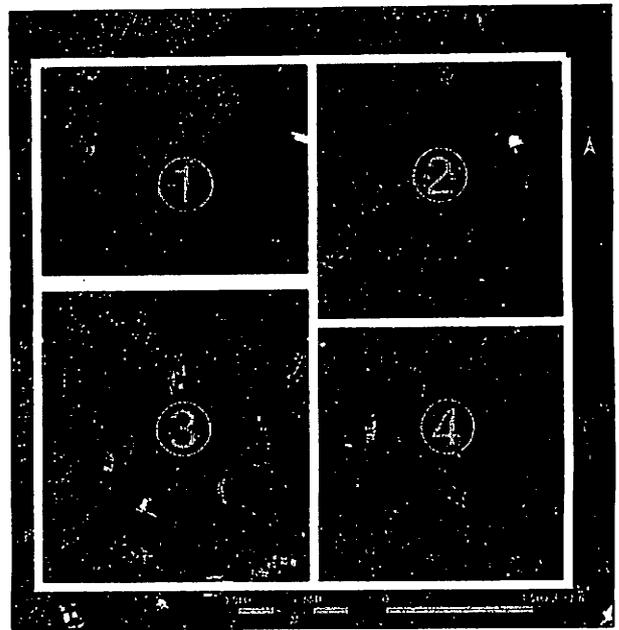


図8 マリキナ市四地域分割

誤差の大きさは大きな問題ではないと考えた。また、②, ③, ④の地域全てにおいて、戸建住宅Aの誤差率が高いがこれに関しては、今後の課題として精度を向上させていく必要がある。②, ③, ④の3地域の建物棟数の合計は、推定値が58992.68棟、実際の棟数が50346棟となっており、高い精度が得られていると判断した。

(3) ラーニングエリアにおける現地調査に基づいたマリキナ市全域の建物棟数推定

a) GPSビデオカメラによる現地調査

マリキナ市の場合には幸運にも市域の3/4の地域で建物ポリゴンデータが存在し、建物棟数の推定法の精度確認を容易にしている。しかし、本研究が対象とする途上国では建物ポリゴンデータがまったく存在していない地域のほうがはるかに多い。そうした状況においては、現地調査を通して、建物種別や建物棟数を推定する方法を構築する必要がある。

本節では、本研究が用いた現地調査による推定法の概要について記述する。ラーニングエリアにおいて、7種類の土地被覆カテゴリーのすべてを含む調査対象地域を選定する。調査効率という観点からはできるだけ隣接した地域を選定することがのがましい。推定精度を考慮すると、各カテゴリーに関して出来るだけ多くのグリッドを調査対象に含めることがのがましい。上記の2つを考慮した結果選定された調査対象地として、図9に示された8地域、計196グリッドに選定した。

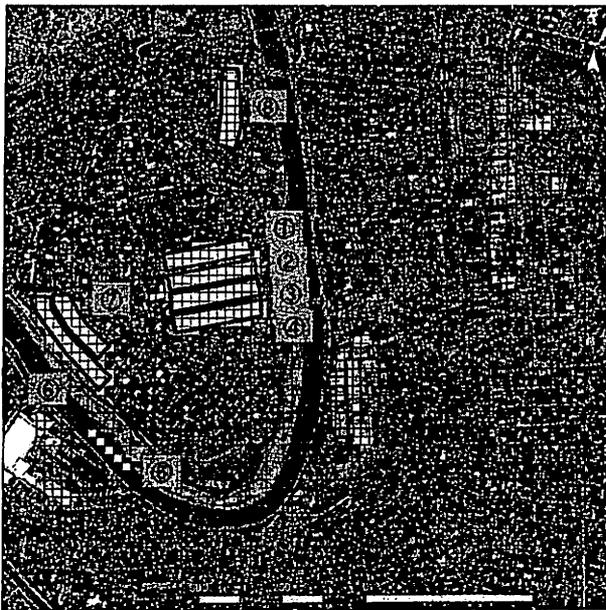


図9 調査対象地

現地調査は2003年11月21日にGPSビデオカメラを用いて、約三時間で撮影を行った。撮影方法としては車内にビデオカメラを設置し、車の進行方向と約45度の角度を持たせ、時速10km程度の速さで車を進めながら撮影を行った。

b) 映像データと衛星画像を用いたグリッド単位の建物棟数の分析

GPSビデオカメラによって得られた映像データをIKONOS衛星画像を背景としたGIS上で、位置情報を確認しながら、GESI法で用いられる建物種別推定法を用いて、1棟ごとに建物種別を検討し、調査対象グリッドの建物棟数を分析した。まず、衛星画像からおおよその建物の存在を確認し、その上でGPSと連動した映像データからその位置と存在を確定した。調査対象セルの建物棟数をカテゴリごとに平均棟数を算出したものが表5である。

ラーニングエリアにおいて建物ポリゴンデータを用いて得たカテゴリごとの平均棟数と比較した。川と判定された土地被覆カテゴリと緑地と判定された土地被覆カテゴリに関しては、それらのセルに建物が存在しなかったため、平均棟数が0となってしまう。建物が存在する工場、住宅地、密集住宅地と判定された5種類の土地被覆カテゴリでは、推定値と非常に近似した値をとっている。本研究においては、建物棟数・種別の推定を目的としており、建物の大部分が存在する5つのカテゴリにおいて、平均棟数が満足できる精度で得られていると考えた。そのため、次に、現地調査による結果を用いて、対象地全域の建物棟数の推定を行った。

表5 現地調査から得たカテゴリごとの平均建物棟数

カテゴリ	川	緑地	裸地	工場	戸建住宅地A	戸建住宅地B	密集住宅地
建物棟数/1セル	0	0	0.60	0.57	1.17	1.08	2.45

表6 現地調査を用いたマリキナ市建物棟数推定値

カテゴリ	平均建物棟数	②				③				④			
		セル数	建物棟数	建物ポリゴン	誤差率	セル数	建物棟数	建物ポリゴン	誤差率	セル数	建物棟数	建物ポリゴン	誤差率
川	0	359	0	27.00	524	0	23.00	126	0.00	84.00	0.00	84.00	0.00
緑地	0	449	0	62.00	2465	0	283.00	2583	0.00	414.00	0.00	414.00	0.00
裸地	0.60	510	306.00	644.00	52.48	1959	1175.40	1175.00	-0.03	1191	714.60	641.00	-11.46
工場	0.57	702	400.14	361.00	-10.84	1949	1110.93	1632.00	31.93	1008	574.56	664.00	13.47
戸建住宅地A	1.17	12710	14870.70	8263.00	-79.97	4828	5648.76	3027.00	-86.61	5726	6689.42	4000.00	-67.49
戸建住宅地B	1.08	2956	3192.48	3626.00	11.86	5735	6193.80	9174.00	32.49	5966	6443.28	8821.00	5.54
密集住宅地	2.45	538	1318.10	644.00	-104.67	3516	8614.20	8633.00	0.22	552	1352.40	626.00	-116.04
合計値	/	18224	20087.42	13627.00	-47.41	20976	22743.09	23927.00	4.95	17152	15784.26	13250.00	-19.13

c) 平均建物棟数による対象地全域の建物棟数推定

現地調査で得られたグリッドごとの平均建物棟数をもとに、(2)と同様のやり方でマリキナ市全域の建物棟数を推定し、建物ポリゴンデータが存在する地域ではその精度を検証した結果を表6に示す。表5で示すカテゴリごとの平均建物棟数が(2)と近い値をとっていることから、誤差率においても近い結果が得られている。②, ③, ④の3地域の建物棟数の合計は、推定値が58614.77棟、実際の棟数が50346棟となっており、現地調査を利用した推定においても高い精度が得られていると判断した。

5. 現地調査による建物種別の推定結果

(1) 現地調査によるGESIの基準に従った建物種別判定

4章の(3)において建物棟数を調査する際に撮影したGPSと連動した映像データを用いてGESIの基準に沿って建物種別の判定を行った。4章の(3)で分析を行った建物のうち、可能な建物に関して判定を行った。まず第一に、そのBuilding Types(構造)をGESI法にもとづいて判定した(表7)。その結果、調査地域の建物は全てR/C, steel infillと判定された。第二に、表8に従って、調査の対象となった建物を一棟ごとに、GESI法にもとづいてdesign(設計)・construction(施工)・materials(材料)の3側面について、建築の質を判定した。design・constructionに関しては4段階、materialsに関しては2段階でそれぞれ評価を行った。design・construction・materialsの評価点の合計を求め、表7において個々の建物がどのVulnerability Curveに属するかを求め、これを建物種別とした。ここでは、アルファベットにおいて、より早いものがより耐震性が高いものとなっている。また、長谷川ら⁹⁾はマリキナ市における市役所、病院、学校など主要施設を対象としてGESIの建物種別を行っている。今回、住宅を主とする建物の種別判定を行う際に、その研究を参考とし、またその研究のメンバーでもあり、建築構造の専門家とともに、まず、Building Types(構造)を決定し、design(設計)・construction(施工)・materials(材料)の3側面についてそれぞれ4, 4, 2段階に判定を行い、最終的に建物の種別判定を行った。

被害想定を行う際は、図10に従い、Vulnerability Curveが決定されれば、その地域を襲う地震外力をPGAで与えることで、None, slight or moderate, Extensive, Partial collapse, Complete collapseの4段階で被害状況(表9)を決定することができる。

(2) 土地被覆分類ごとの建物種別の決定

(1)の調査の結果を、土地被覆のカテゴリごとに調査

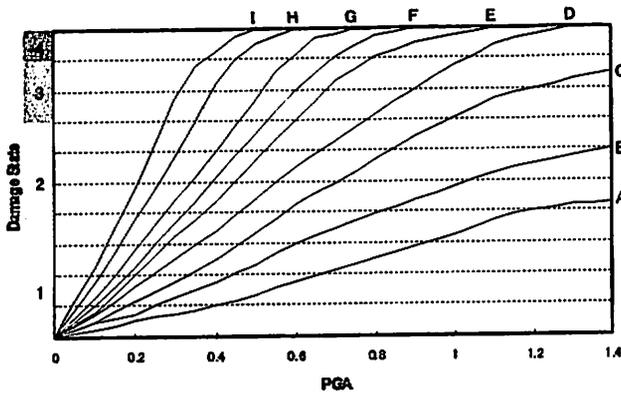


図10 GESI Vulnerability Curve

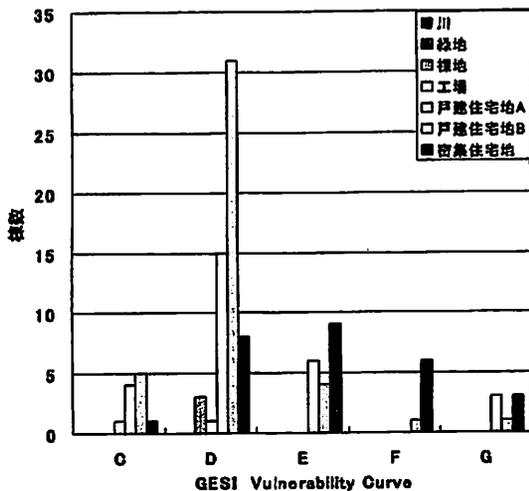


図11 カテゴリーごとの建物種別

を行った全ての建物を集計したものが図11である。図11を見ると、まず、裸地、工場における建物も3棟、2棟とサンプルとするには非常に少なくなっているが、どちらも Vulnerability Curve はCからDと耐震性が比較的高めであった。戸建住宅Aについては全28棟のうち最も多い15棟がDと判定され、4棟がC、6棟がE、2棟がGと判定されている。戸建住宅Bに関しては、全42棟のうち最も多い31棟がDと判定され、5棟がC、4棟がE、1棟がF、1棟がGと判定されている。密集住宅地においては、最も多い9棟がEと判定され、8棟がD、6棟がF、3棟がG、1棟がCと判定されている。

戸建住宅地A、Bと密集住宅地のカテゴリーのGESIの判定の結果を比較すると、戸建住宅A、Bに関しては、比較的耐震性の高いDにその建物棟数の多くが判定され、密集住宅地に関しては、それよりも耐震性の低いEと判定されたものが最も多く、またE、F、Gの中に判定されたものも戸建住宅A、Bに比べ多い。したがって、土地被覆分類におけるカテゴリーとGESIのVulnerability Curveの判定による耐震性の評価に高い相関があることが明らかとなった。

(3) 対象地全域の建物棟数・種別推定

5章の(2)の結果を用いて、GESIのVulnerability Curveの建物の種別判定を加えて、ラーニングエリアで建物棟数・種別を調査した場合に、マリキナ市全体の建物棟数を推定した結果を表10に示した。その際、戸建住宅A、Bに関しては、GESIのVulnerability CurveがDと判定されたものが過半数を超えているため、そこに存在する建物

はDであると設定した。次に、密集住宅地に関しては、最も多い9棟がEと判定され、8棟がD、6棟がF、3棟がG、1棟がCと判定されている。被害想定では、推定を安全側に行うことが通例であるので、本研究では密集住宅地においては、Fと設定した。最後に、裸地、工場においては判定された建物が少ないがともにDと設定した。図12に実際に戸建住宅A、密集住宅地に存在し、それぞれD、Fと判定された建物を示した。

6. 建物インベントリ推定手法の提案

(1) GESI法にもとづく被害想定のための建物インベントリ作成手法の提案

これまでの議論をまとめた本研究における結論として、GESI法による被害想定を行うために必要となる以下のよ

表7 GESI建物種別判定

Building Type	0	1	2	3	4	5	6	7
Wood	A	A	B	B	C	C	C	D
Steel	A	B	C	C	D	D	E	F
R/C	B	C	D	E	E	F	G	H
R/C, steel with masonry infill walls	C	D	D	E	E	F	G	H
Reinforced masonry	C	D	D	E	E	F	F	F
Unreinforced masonry	E	E	F	F	G	G	G	H
Adobe	N/A	N/A	G	H	H	H	H	I
Stone rubble	N/A	N/A	G	H	H	H	H	I
Lightweight shack	N/A	N/A	N/A	H	H	H	H	I

表8 GESI建築の質の判定

Quality of design	Description
0	Engineered with seismic design
1	Engineered without seismic design, or non-engineered using seismic resistant rules of thumb (e.g. lintel band for masonry)
2	Non-engineered, no seismic resistant elements, good proportions (short, wide, symmetric)
3	Non-engineered, no seismic resistant elements, poor proportions (tall, narrow, no-symmetric)

Quality of construction	Description
0	Excellent quality, effective supervision of seismic elements of
1	Good quality, some supervision of seismic elements of construction
2	Moderate quality, no supervision of seismic elements of construction but skilled workers
3	Poor quality, no supervision and unskilled workers

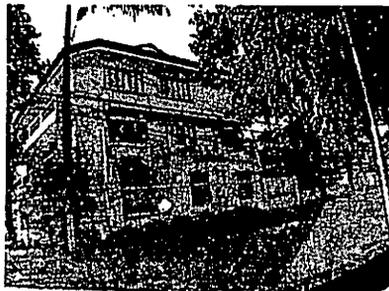
Quality of materials	Description
0	Good quality materials
1	Poor quality materials, or poor maintenance of building

表9 GESIの被害度判定

Damage State	Description
4	Building is entirely destroyed, with significant portions of the building collapsed.
3	Building is entirely structurally compromised and on the verge of collapse or small portions of the building have collapsed.
2	Extensive structural and non-structural damage. Localized life-threatening situations are common.
1	None, Slight or Moderate

表10 マリキナ市建物棟数・種別推定結果

カテゴリー	建物棟数/1セル	セル数推定値	建物棟数推定値	GESI Vulnerability Curve
川	0	1340	0.0	/
緑地	0	7366	0.0	/
裸地	0.60	4834	2900.40	D
工場	0.57	4378	2500.57	D
戸建住宅地B	1.08	17153	18565.80	D
戸建住宅地A	1.17	31595	36980.19	D
密集住宅地	2.45	5144	12626.18	F
合計	/	71808	73552.94	/



土地被覆カテゴリー	Building Types	Curve	
戸建住宅地A	R/C, steel infill	D	
design	construction	materials	total
0	1	0	1



土地被覆カテゴリー	Building Types	Curve	
密集住宅地	R/C, steel infill	F	
design	construction	materials	total
2	2	1	5

図12 GESIによる建物種別判定

うな建物インベントリ作成フローを提案した(図13)。

- 対象地の建物インベントリの整備状況を調査することから始める。対象地に建物ポリゴンデータが存在し、そこに建物種別データが含まれているなら、被害想定を行うことが可能であるので、作業はそこで終了である。建物ポリゴンデータは存在するが種別データが含まれていないか、建物ポリゴンデータ

- 対象地の IKONOS 画像を購入する。
- 対象地の地震動分布データを入手し、その最小グリッドサイズ(X)を調べる。
- 対象地の IKONOS 画像を X を整数倍で割った値で 25 以上、50 以下のもののうち最小の値の大きさを切り分ける。この意味は、分析に用いるグリッドの大きさを、まず、地震動分布データに合わせる必要がある、地震動分布データの最小グリッドの大きさの整数倍である必要がある。次に、3 章(5)で、25m 以下では、建物がグリッドの中に一棟も入らず、データのばらつきにも制約があるので 25m 以上である必要がある。また、25m、50m、100m、200m の中では、25m を最適とする結果を得ている。これに従い、50m より小さく、25m 以上の大きさを地震動分布データのグリッドの整数倍となる中で最も小さいグリッドサイズで分析を行うこととしている。
- IKONOS 画像を目視で分析し、対象地全域の土地被覆を有していると考えられる地域を割り出し、ラーニングエリアとして選定する。現地調査はこのラーニングエリアにおいて行うこととなる。
- ラーニングエリアを、IKONOS 画像を DN 値の分布に従い、クラスター分析により分類する。この後下記の 6. 7. の二つの作業に分かれる。
- 建物棟数の推定を行う。
 - 建物棟数の推定に関しては、建物ポリゴンデータが存在するなら、
 - 建物ポリゴンデータを用いて、対象地全域の建物棟数を推定する。
 - 建物ポリゴンデータが存在しないなら
 - GPS ビデオカメラを用いて、建物棟数を現地調査する。

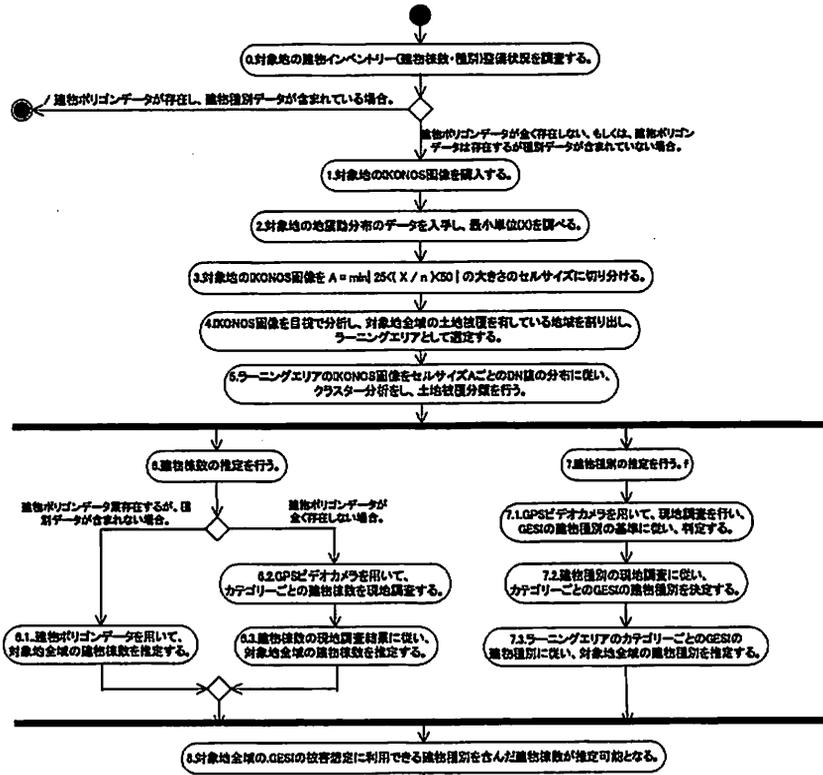


図13 建物インベントリ作成フロー

6. 3. ラーニングエリアにおける建物棟数の調査結果から、対象地全域の建物棟数を推定する。
建物種別に関しては、
7. 建物種別の推定を行う。
 7. 1. GPS ビデオカメラを用いて現地調査で、GESI の建物種別の基準に従い、判定する。
 7. 2. 調査結果を分析し、それぞれの土地被覆分類の 카테고리に対し、GESI の建物種別を決定する。
 7. 3. ラーニングエリアの土地被覆分類の 카테고리ごとの GESI の建物種別に従い、対象地全域の建物種別の推定を行う。
8. このような一連の作業で GESI の被害想定手法に利用できる建物種別を判定した形で対象地の建物棟数が推定可能となる。

7. まとめ

本研究においては、まず、衛星 IKONOS の高解像度の衛星画像を特定の大きさのグリッドでクラスター分析により分類することで、建物種別と建物棟数を評価することが可能であると考えた。その結果、建物の棟数を基準とし、効果的な土地被覆分類を行うことができることを示した。また、土地被覆分類は 25m, 50m, 100m, 200m の四種類のグリッドサイズで行い、その中で建物棟数のばらつきの少ない 25m のグリッドサイズが最も的確に建物棟数に従って分類可能であった。また、一般的な住宅の敷地面積を考慮し、同様に、一辺 25m のセルが適当であると結論付けた。

マリキナ市全域において、土地被覆が多様で、マリキナ市全域の土地被覆を有すると考えられるラーニングエリアにおいて、建物ポリゴンデータから土地被覆の 카테고리ごとの平均建物棟数を求め、それを用いて対象地全域の建物棟数を推定し、高い精度を得た。同様に、ラーニングエリアにおいて、GPS ビデオカメラを用いた現地調査から土地被覆の 카테고리ごとの平均建物棟数を求め、対象地全域の建物棟数を推定し、これにおいても高い精度を得た。

GPS ビデオカメラを用いて現地調査を行い、建物の種別を GESI の基準に従って判定した。その結果、土地被覆分類の 카테고리と GESI の建物種別による耐震性の判定の間に高い相関があることを示した。最後に、各土地被覆の カテゴリに平均の建物棟数・GESI の建物種別を設定し、マリキナ市全域において推定を行った。

これら一連の結果から途上国において建物インベントリーが存在しないときに、高解像度の衛星画像と GPS ビデオカメラを用いた効果的な建物インベントリー作成手法を開発し、建物インベントリーが存在せず、被害想定が行えないような地域において、利用可能な建物インベントリーの作成を含めた被害想定の一連の枠組みを提案した。

今後の研究課題としては、まず、ラーニングエリアの選定方法が挙げられる。本研究の建物インベントリーの精度は選定したラーニングエリアによる影響が小さくない。そのため、現在の目視分析から選定するというラーニングエリアの選定方法では、個人の能力にも依存し、毎回、精度が変わる恐れもある。そこで、個人の能力に依存しないようなラーニングエリアの選定方法が求められていると考えた。次に、建物種別の判定精度についてである。今回は、土地被覆の カテゴリごとに GESI の建物種別を設定し、それをもって対象地全域を推定した。しかし、この推定精

度にはまだ分析が及んでいないため、今後進めていくつもりである。

今後の研究の方向性としては、現在までに一定の精度が得られているので、IKONOS 衛星画像と GPS ビデオカメラを用いて、途上国で GESI 法にもとづく被害想定を行うための、より短期間で、簡易で経済的な手順の開発を進めるつもりである。

謝辞

本研究は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅢ-3 第 5 課題「新公共経営 (New Public Management) の枠組みにもとづく地震災害対応シミュレーターによる災害対応力向上」(研究代表者：林春男 京都大学) および文部科学省科学技術振興調整費 先導的研究等の推進「日本社会に適した危機管理システム基礎構築」(研究代表者：林春男 京都大学) によるものである。

本研究を行う際に、情報通信研究機構 宇治 GIS 研究開発支援センターの연구원の方々には、GPS ビデオカメラの使用法、データの解析など非常にご協力いただきました。本当にありがとうございました。

補注

- (1) マリキナ市は、面積 21.5km²、人口約 42 万人で、メトロマニラ郊外のベッドタウンである。また、フィリピンの製靴産業の中心地としても有名で、現在、マリキナ市は世界の製靴産業の中心地を目指している。

参考文献

- 1) <http://www.geohaz.org/radius/>
- 2) GeoHazards International, United Nations Centre for Regional Development Disaster Management Planning Hyogo Office: Global Earthquake Safety Initiative Pilot Project, Final Report, October 2001
- 3) <http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/>
- 4) 齊藤郁雄・朴明浩・石原修：ランドサット TM データによる土地被覆変化の抽出に関する研究，日本建築学計画系論文集，No. 561, 79-84, Nov., 2002
- 5) 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自動検出手法，地域安全学会論文集，No. 5, 2003. 11
- 6) 大角恒雄・金子史夫・藤谷秀雄：カトマンズ盆地における地震防災のための建築物インベントリ調査と建物分布，地域安全学会論文集，No. 4, 2002. 11
- 7) 岡田光正：建築と都市の人間工学 空間と行動のしくみ，p290-291，鹿島出版会，1977 年 6 月
- 8) <http://www.psdn.org.ph/namria/>
- 9) Kouichi Hasegawa, Haruo Hayashi, Kenneth Topping, Norio Maki, Shigeo Tatsuki, Michiko Banba, Kei Horie, Satoshi Tanaka, Keiko Tamura, Tamiyo Kondo, Yuka Karatani and Yohinobu Fukasawa: INTERACTIVE SEISMIC DAMAGE RISK ASSESSMENT IN MARIKINA CITY, PHILIPPINES, Proc. Of Asian Conference on Earthquake, Manila, March 5-6, 2004.

(原稿受付 2004. 5. 21)