

# 2010年チリ地震に関する 広域被害分析に向けたGISの構築

丸山喜久<sup>1</sup>・松崎志津子<sup>2</sup>・山崎文雄<sup>3</sup>・三浦弘之<sup>4</sup>・Miguel ESTRADA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻 准教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:yamaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>2</sup>千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻 博士後期課程 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:10td0309@graduate.chiba-u.jp

<sup>3</sup>千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻 教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>4</sup>東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻 助教  
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259) E-mail: hmiura@enveng.titech.ac.jp

<sup>5</sup>ペルー国立工科大学 日本-ペルー地震工学センター 准教授 (Av. Túpac Amaru 1150, Lima 25, PERÚ)

E-mail:estrada@uni.edu.pe

筆者らは、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」の一環としてJSTからの援助を受け、2010年2月27日に発生したチリ地震の被害調査を実施した。調査は地震から約1ヶ月後の4月2～8日にかけて実施した。本論では被害調査の概要と調査結果および地理情報システム(GIS)を用いた分析を行い地震、津波被害の特徴について述べる。具体的には、被災地域における衛星画像と現地調査写真を比較し、地震による建物被害がどの程度把握できるか検討を行う。また、標高データ(DEM)を利用し、津波被害が生じている地域の地形的特徴を分析する。

**Key Words :** *The 2010 Chile earthquake, GIS, building damage, tsunami inundation area, digital elevation model (DEM)*

## 1. はじめに

2010年2月27日AM 03:34、チリの太平洋沿岸部でモーメントマグニチュード( $M_w$ ) 8.8の巨大地震が発生し、チリ国内の広い範囲で地震と津波による甚大な被害が発生した。震源は首都Santiago(サンチャゴ)の南西約335km、Concepción(コンセプション)の北北東約105kmに位置し、震源に近いTalcahuano(タルカワノ)などでは、修正メルカリ震度階級VIIの揺れに見舞われたと報告されている<sup>1)</sup>。また、首都Santiagoでの揺れの強さは修正メルカリ震度階級VIIと報告<sup>1)</sup>されており、道路橋やRC造構造物に被害が生じた<sup>2)5)</sup>。この地震、津波によって180万人以上の人々が被害を受け、犠牲者は486人、行方不明者は79名に上っている<sup>6)</sup>。地震による被害総額は150-300億米ドルと見積もられており、チリのGDPの10-15%程度に相当する<sup>6)</sup>。

著者らは、地球規模課題対応国際科学技術協力事業<sup>7)</sup>「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」<sup>8)</sup>の一環として科学技術振興機構(JST)からの援助を受け、チリ地震の被害調査を実施した。本研究課題の対象地域はペルーであるが、

隣国のチリとはテクトニクス環境や自然・社会環境が類似しており、チリでの巨大地震で得られる知見はペルーにも適用できる部分が多いとともに、中南米諸国への波及効果も大きいと考え、ペルーの研究者と合同で、計3つのチームによる被害調査を実施した<sup>5)</sup>。

本論では、3チームの第1陣として、ペルー研究課題の「空間基盤データ構築と被害予測グループ」および「地域減災計画グループ」が行った被害調査報告を行う。また、現地で収集した被害データや様々な機関が衛星画像などをもとに公開している広域被害分布に関する情報を、地理情報システム(GIS)を用いて統合し、地震および津波被害が生じている地域の地形的特徴などを分析した。

## 2. 調査の概要

著者らによる現地調査は、地震発生後約1ヶ月が経過した2010年4月1日に東京を出発、2日にSantiagoに到着し、8日にSantiagoを立ち10日に東京着となる現地6泊の日程で実施した。



図-1 著者らの主な被害調査場所



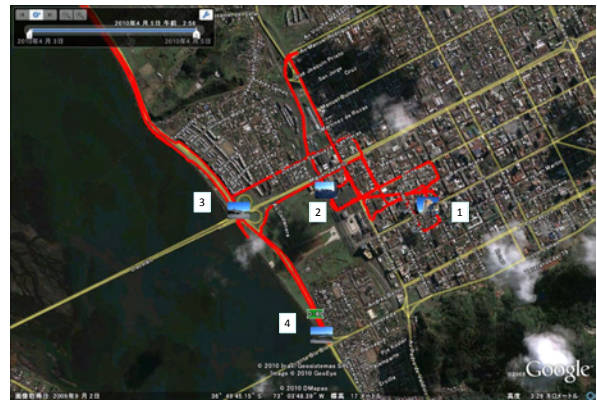
(a) 調査ルート (2010年4月2日)



(b) 主な被害写真

図-2 Santiago の調査ルートと主な被害写真

図-1に著者らが行った被害調査の主な調査地点を示す。4月2日にSantiago市内の調査を実施した後、3日にConcepciónへ陸路にて移動、4日にConcepción、



(a) 調査ルート (2010年4月4日)



(b) 主な被害写真

図-3 Concepción の調査ルートと主な被害写真

Talcahuano, 5日にDichato (ディチャト), 6日にConstitución (コンスティトゥション), 7日にTalca (タルカ) 8日にValparaíso (バルパライソ), Viña del Mar (ビニャ・デル・マール) を主に調査した。

図-2にSantiago市内における被害調査ルートと主な被害写真を示す。調査ルートは、ハンドヘルドGPS<sup>9)</sup>で記録したルート Google Earth上で表示させたものである。また現地にて撮影した写真もExifに位置情報が書き込まれているため、位置の特定が可能である。Santiagoでの地震被害の例としては、調査ルートの1で示している地点で20階建ての集合住宅(2003年築, RC造)の低層部の柱や壁がせん断破壊している様子が見られた。地点2では、環状高速道路の道路橋が落橋している。地点3では、5階建ての集合住宅(2005年築, RC造)の1階部分が層崩壊した。

Concepciónでの調査ルートと主な被害写真を図-3に示す。地点1では、市街地に位置する21階建てRC造の高層オフィスビルが、正面12階付近の中間層で層崩壊して上層部が道路側に傾いていた。地点2では、15階建てRC造の集合住宅が1階部分から完全に転倒していた。地点3, 4では、Biobío川を渡るLlacolén橋や旧Biobío橋<sup>3)</sup>の落橋被害がみられた。と



(a) 調査ルート (2010年4月5日)



(b) 主な被害写真

図-4 Dichatoの調査ルートと主な被害写真

くに、Llacolen橋はBiobio川を渡す重要な道路であることから、地震から2日後には落下した橋の上に仮設の橋が架けられたとの証言が得られた。また市街地では、レンガ造やアドベ造で被害を受けた建物も複数確認された。

津波による被害が甚大であった都市の一つであるDichatoにおける調査ルートと主な被害写真を図-4に示す。Dichatoでは町の80%以上が津波による被害を受け<sup>10)</sup>、地点1の2枚の現地写真のような様子であった。海岸付近には、1階部分が津波によって流されている建物が存在したり(地点2)、川を遡上して流された船が地点3で確認された。

### 3. 地震・津波被害GISの構築

#### (1) Talcaにおける建物被害GIS

Talcaはマウレ州(Región del Maule)の州都であり、人口約20万人、震央から約60km離れた都市である<sup>10)</sup>。著者らの現地調査では、図-5に示すように、アドベ造、無補強組積造構造物の多くに甚大な被害が生じていた。USGSによると、揺れの強さは修正メルカリ震度階級VIIと推定されている<sup>1)</sup>。

2010年4月7日にマウレ州役場にてヒアリング調査



(a) 調査ルート  
(青: 2010年4月3日, 赤: 2010年4月7日)



(b) 主な被害写真

図-5 Talcaの調査ルートと主な被害写真

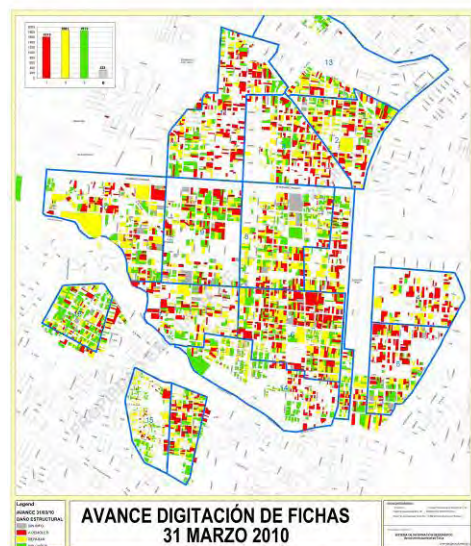


図-6 Talca 中心部の建物被害地図 (赤: 撤去すべき, 黄: 修復可能, 緑: 無被害, 灰: 情報無し)

を行い、図-6に示すTalca中心部での建物の被害程度を表す地図画像を入手した。これは、現場での建物被害調査をもとに、敷地を表すポリゴンに建物の被害程度(4分類)の情報が与えられたものである。

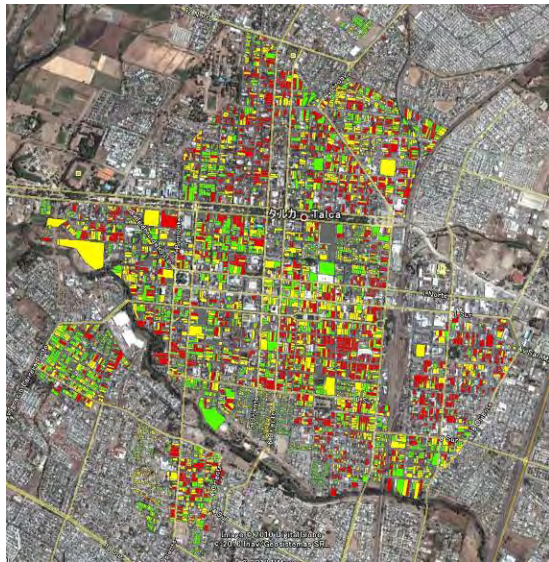


図-7 Talcaの建物被害地図の地理座標系への投影

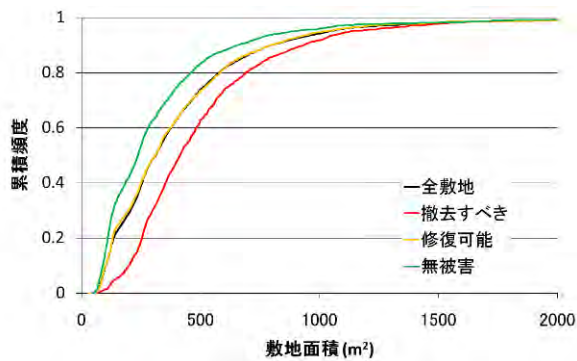


図-8 建物被害程度ごとの敷地面積の累積頻度分布

ただし、これは3月31日時点での情報を図化したものである。

そこで、本研究ではこの画像データをArcGIS上で地理座標系に投影し、被害程度を属性データにもつ敷地を表すポリゴンを作成した。この際には、Google Earthで表示される道路線をベースマップとしてArcGISのジオリファレンス機能を用いて位置合わせを行った。作成したGIS形式ファイル（shpファイル）をGoogle Earth形式（kmlファイル）に変換し表示したところ（図-7）、位置合わせは良好に行えたことが確認できた。

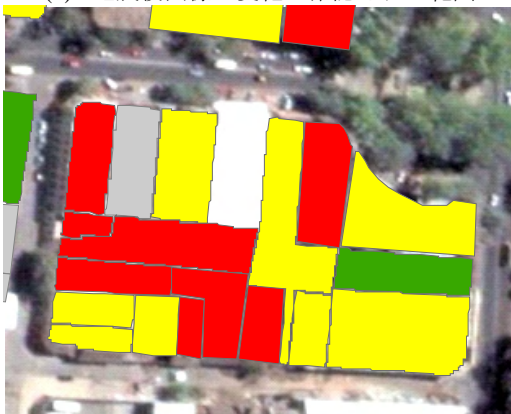
地理座標系に投影することができた敷地区画の総数5617のうち撤去すべき（赤）と判定されている建物は1559棟（27.8%）、修復可能（黄）は1872棟（33.3%）、無被害（緑）は1864棟（33.2%）、情報無し（灰）は322棟（5.7%）となっている。3月31日時点で登録されている地域のほぼ全域に撤去すべきと判定されている建物が分布していることが確認できる。Talcaの典型的な建物タイプは1960年代～70年代に建てられたアドベ造または無補強組積造であり<sup>11)</sup>、それらが多大な被害を受けている。一方、現行の耐震基準に則って建設された構造物は修復可能な軽微な被害にとどまっていることが報告されて



(a) 地震前画像



(b) 地震後画像と変化が確認された範囲



(c) GISデータ

図-9 Talcaを撮影した地震前後の衛星画像(1)

いる<sup>11)</sup>。

図-8に、建物の被害程度ごとの敷地面積の累積頻度分布を示す。地理座標系に投影できた敷地の平均面積は約430m<sup>2</sup>であり、修復可能と判定された建物の敷地の平均面積はほぼ等しい値を示している。一方、無被害と判定された建物の平均敷地面積は約340m<sup>2</sup>と最も小さく、撤去すべきと判定された建物の平均敷地面積は約510m<sup>2</sup>と最も大きいことが分かる。この結果には、図-7に示した南部の敷地に無被害と判定されている建物が多く、それらの敷地面積は約150m<sup>2</sup>程度と小さいことが影響していると考えられる。新しく建てられた建物が区画整理などを実施した後に小さな敷地に建てられている可能性もあるが、本データには建築年代に関する属性は付与されていないので、今後の検討課題と考えている。



(a) 地震前画像



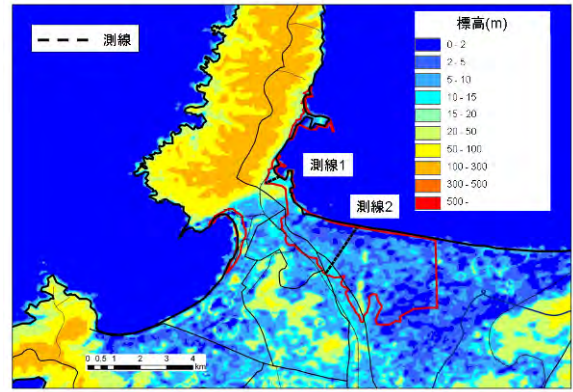
(b) 地震後画像と変化が確認された範囲



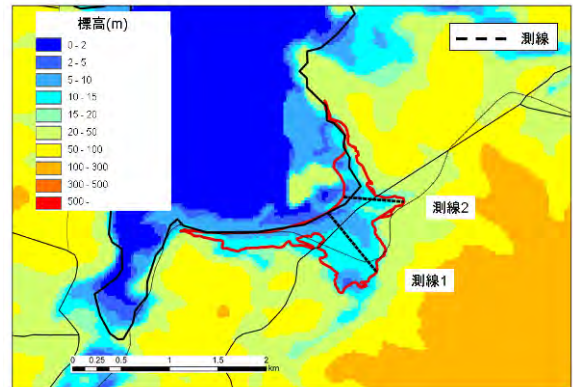
(c) GIS データ

図-10 Talca を撮影した地震前後の衛星画像(2)

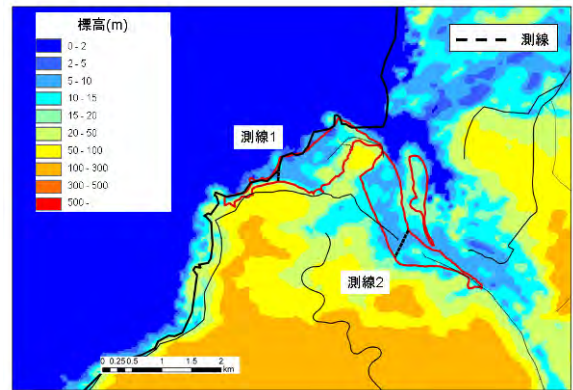
高解像度衛星によって取得されるリモートセンシング画像を用いて目視判読を行うと、建物被害を把握することが可能な場合もある<sup>12), 13)</sup>。そこで、Talca を対象として高解像度衛星画像が捉えた建物被害の特徴を、図-7に示したGISデータと比較して考察する。地震後に撮影された衛星画像として、2010年3月10日に撮影されたWorldView-2<sup>14)</sup>画像を用いた。WorldView-2は、8バンドのマルチスペクトルセンサとパンクロマティックセンサを搭載しており、解像度0.5mのパンシャープン<sup>15)</sup>画像を得ることができる。地震前に撮影された画像には、Google Earthで公開されている2008年1月1日に撮影された



(a) Talcahuano



(b) Dichato

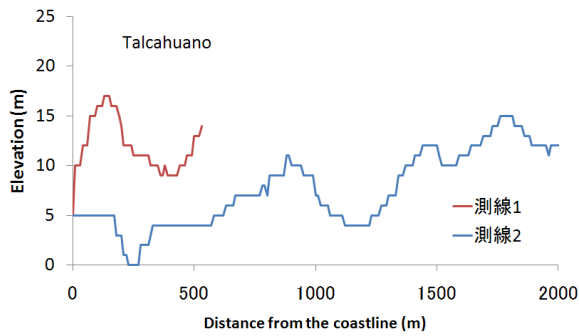


(c) Constitución

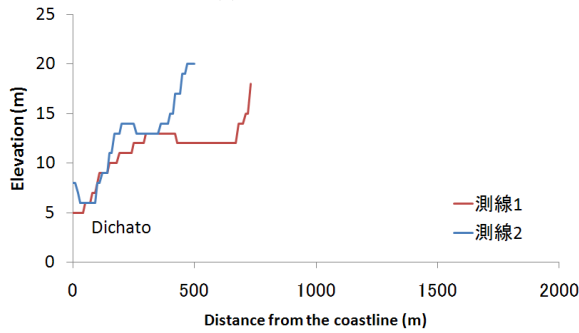
図-11 津波浸水域<sup>17)</sup>の地理座標系への投影

QuickBird<sup>16)</sup>衛星画像を用いた。

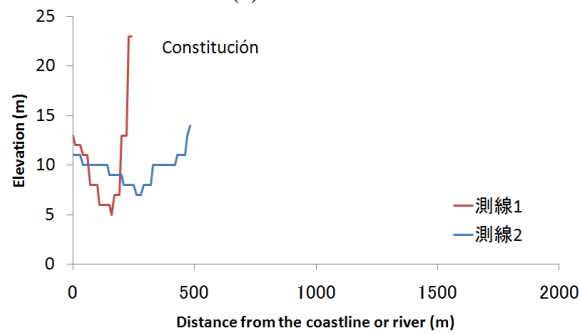
図-9、図-10に、地震前後の衛星画像とGISデータを比較した例の一部を示す。撤去すべき建物と判定されている敷地内に、地震前後の画像で何らかの変化があったことは確認される。しかし、地震後の緊急撮影でWorldView-2によって取得された画像は、オフナディア角が40.3度と撮影条件があまり良好ではなく、鮮明な画像は得られていない。なお、事前にQuickBirdによって撮影された画像のオフナディア角は3度である。さらに、Talcaでは屋根全体が崩壊するほどの被害建物はそれほど多くなく、衛星画像を用いた被害判読では建物内部や壁面の被害を把握することは困難である。このため、全体としては衛星画像を用いてTalcaの建物被害を把握すること



(a) Talcahuano



(b) Dichato



(c) Constitución

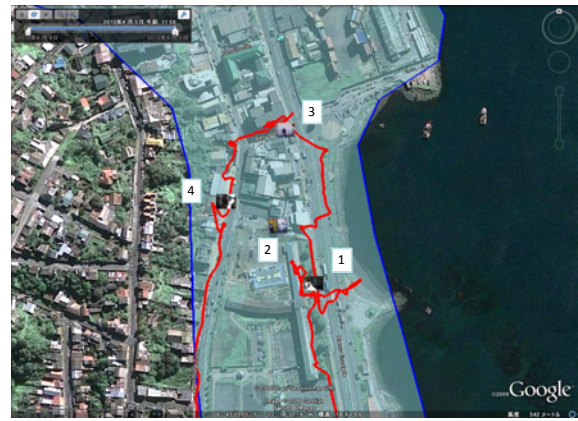
図-12 津波浸水域の標高変化の例

は難しいと考えられる。

## (2) 津波浸水マップのGIS化

チリ地震発生後に様々な機関が、人工衛星から取得した画像を用いて地震被害を推定し、その結果がインターネット上に公開されている。例えば、ReliefWebでは、合成開口レーダー衛星の一つであるCOSMO-SkyMed衛星が取得した画像を用いて、地震前後の画像中の変化域を抽出している<sup>17)</sup>。

チリ国家緊急対策室 (ONEMI) では、航空写真や衛星画像を用いた津波の浸水域の判読および被災者数、被災住宅の推定が行われ、その結果が公開されている<sup>18)</sup>。本研究では、公開されている地図画像を地理座標系へ投影し、GISデータ化した。対象地域は、著者らが現地調査を行った Talcahuano, Dichato, Constitución とした。津波の浸水域には津波の波高、流速に加えて、標高が関係するものと考えられることから、本研究では、ASTER 全球3次元地形データ<sup>19)</sup>を利用して分析を行う。この地形データは、ASTERの直下視と後方視の画像から立体画



(a) 調査ルート (赤線) と津波浸水域 (青色)



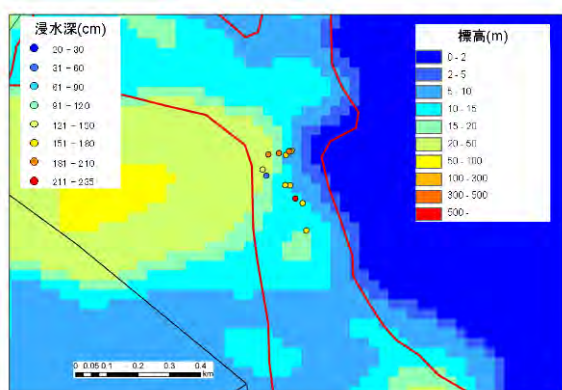
(b) 浸水深の計測結果

図-13 Talcahuano での浸水深の計測 (2010年4月4日)

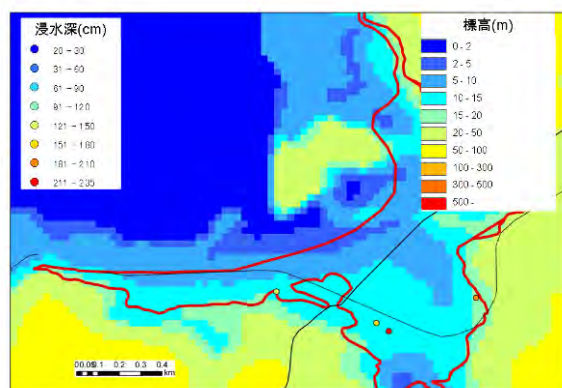
像を取得し、3次元地形データを作成したものである。ピクセル間隔は30mで高さ精度 (標準偏差) は7m~14mである<sup>19)</sup>。

図-11に Talcahuano, Dichato, Constitución における津波浸水域を地理座標系に投影した結果と標高データを示す。図中には、チリの海岸線、主要道路、鉄道網も示しているが、これらはみんなの地球地図プロジェクト<sup>20)</sup>から取得したデータである。これによると、各地域の浸水域は Constitución の一部範囲を除き、標高が20m以下であることが大別できる。

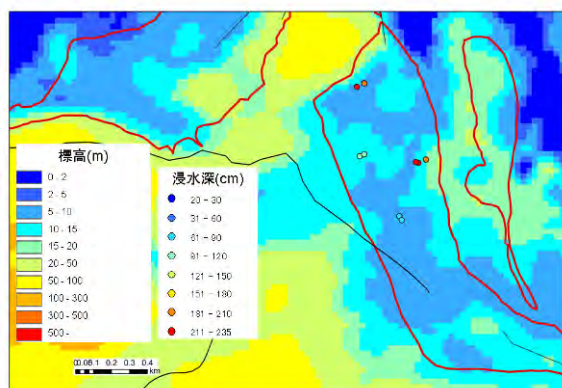
津波浸水域の地形をより詳細に把握するため、図-11に示すように、各地域の津波浸水域に測線を2本ずつ設定し、標高を取得した。その結果を図-12に示す。グラフの横軸は海岸線からの距離を表しているが、Constitución の測線2は Maule 川からの距離である。Talcahuano の2測線に関しては、なだらかな勾配を示している測線2の到達距離が大きく、約2000mを示している。Dichato に関しても、標高が低く勾配が小さい範囲が長く続く測線2の方が、測線1よりも津波の到達距離が約200m程度大きい。Constitución の測線1については、今村によって遡上高28.3mが観測された<sup>3)</sup>付近に設定している。本研究で用いているDEMは30mメッシュのデータであるため測線1の遡上限界は標高23m程度と推定されるが、遡上限界付近の勾配は約67%であり、今村による報



(a) Talcahuano



(b) Dichato



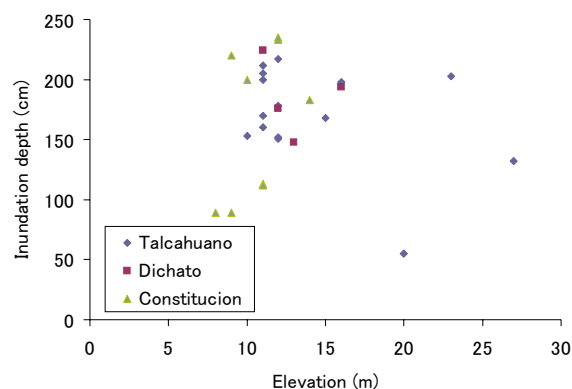
(c) Constitución

図-14 津波被災地域での浸水深計測点

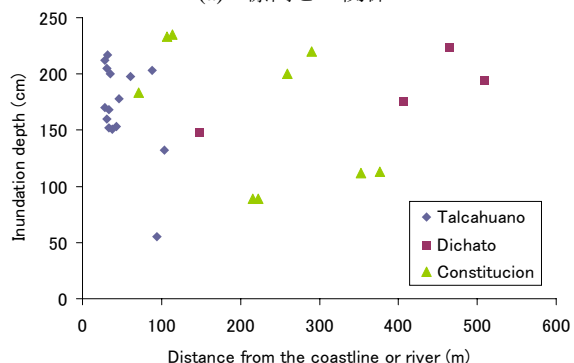
告<sup>3)</sup> (63.5%) とほぼ同程度の値を示している。

これら3地域では、図-13のTalcahuanoでの例のように津波の浸水深<sup>21)</sup>を計測した。海岸側の通りの地点1~3では150cm以上の浸水深を確認したが、その裏側の通り（地点4）では55cmだった。図-14に、各地域での浸水深の計測点を示す。Talcahuanoでは15地点、Dichatoでは4地点、Constituciónでは9地点、それぞれ測定した。計測点の位置は、ハンドヘルドGPS<sup>9)</sup>で記録したものである。

計測結果を図-15にまとめる。ASTER全球3次元地形データ<sup>19)</sup>から取得される標高、海岸線からの距離との関係を示す。なお、Constituciónでの計測結果については、図-12の測線2と同様にMaule川からの距離で表している。Talcahuano、Dichatoでの計測



(a) 標高との関係



(b) 海または河川からの距離との関係

図-15 津波被災地域での浸水深計測結果のまとめ

結果に関しては、概ね150cm以上の浸水深を示しており、大きいところでは200cmを超えている。Constituciónは、100cm程度の計測結果も得られているが、これら3地域の浸水深は、場所によっては200cm以上を示したものと推測される。著者らの計測結果では、標高と浸水深には明瞭な関係は見られなかった。海岸線または河川との距離と浸水深の関係については、TalcahuanoとConstituciónでの計測結果は、距離が大きくなるにつれて浸水深が小さくなる傾向があるが、Dichatoについては、計測点が少ないこともあるが、そのような関係性は見られなかった。

#### 4. まとめ

本論では、著者らが2010年4月2日~8日に現地にて行ったチリ地震の被害調査を報告した。さらに、現地にて入手したTalcaにおける建物被害程度を表す地図画像を地理座標系に投影し、GISを用いた分析を行った。地震前後の衛星画像からTalcaの建物被害把握がどの程度可能か検討し、その際に構築したGISデータを精度の検証に用いた。また、チリ国家緊急対策室 (ONEMI) が公開している航空写真や衛星画像を用いた津波の浸水域の判読結果をGISデータ化し、標高や海岸線からの距離と浸水域の関係、現地にて計測した浸水深の関係を検討した。

Talcaの建物敷地面積と被害程度の間を見るとき、

無被害と判定された建物の平均敷地面積が最も小さく、撤去すべきと判定された建物の平均敷地面積が最も大きかった。Talcaでは、1960年代～70年代に建てられたアドベ造または無補強組積造が多大な被害を受けており、現行の耐震基準に則って建設された新しい構造物は修復可能な軽微な被害にとどまっていることが報告されている。このことをふまえると、新しく建てられた建物が区画整理などを実施した後に小さな敷地に建てられている可能性もあるが、本データには建築年代に関する属性は付与されていないので、今後の検討課題である。また、地震前後の衛星画像を用いて建物被害を目視判読したところ、Talcaでは屋根全体が崩壊するほどの被害建物はそれほど多くないため、全体としては衛星画像を用いて建物被害を把握することは困難であることが分かった。

津波浸水域をGISデータ化し、ASTER全球3次元地形データと比較したところ、一部の地域を除き標高が20m以下であった。標高が低く地形の勾配が小さいTalcahuanoの一部地域では、海岸線の津波の到達距離が大きかった。現地にて取得した浸水深の結果によると、Talcahuano, Dichato, Constituciónの一部地域では、200cm以上に達したものと推測される。標高と浸水深には明瞭な関係は見られなかったが、海岸線からの距離が大きくなるにつれて浸水深が小さくなる傾向がある地域も確認された。

今後は、現地にて取得された地震被害データの詳細な分析を行い、本プロジェクト課題の対象地域であるペルーの地震・津波減災に役立てる予定である。

**謝辞：**本調査を実施するにあたり、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」（研究代表者：山崎文雄 千葉大学教授）の一環として、科学技術振興機構(JST)からの援助を受けた。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) U.S. Geological Survey: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2010tfan/>
- 2) 日本地震工学会・日本建築学会調査団：2010年2月27日チリ・マウレ地震被害調査報告書，2010.
- 3) 土木学会地震工学委員会・海岸工学委員会：チリ地震から何を学ぶー巨大地震に対する我が国の備え

- は十分か？ー，2010.
- 4) 地盤工学会：2010年チリMaule地震による被害に対する災害緊急調査団報告書，2010.
- 5) 2010年チリ地震・津波災害 JST-JICA地球規模課題調査団報告会：[http://ares.tu.chiba-u.jp/peru/meetings/meeting\\_100520.html](http://ares.tu.chiba-u.jp/peru/meetings/meeting_100520.html)
- 6) Bray, J. and Frost, D.: Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake, 2010.
- 7) (独)科学技術振興機構 地球規模課題対応国際科学技術協力事業：<http://www.jst.go.jp/global/>
- 8) Yamazaki, F., Zavala, C., Nakai, S., Koshimura, S., Saito, T., Midorikawa, S.: Enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru: A SATREPS project, *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, pp. 1501-1506, 2010.
- 9) GARMIN：<http://www8.garmin.com/buzz/oregon/>
- 10) Humboldt State University Preliminary Tsunami Survey Team Report April 3, 2010, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/>
- 11) MCEER: Preliminary Damage Reports from the Chile Earthquake: February 27, 2010, <http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/Chile2-27-10/damage-reports.asp>
- 12) Saito, K., Spence, R., 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, pp. 145-169, 2004.
- 13) Yamazaki, F., Yano, Y. and 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, pp. S329-S336, 2005.
- 14) DigitalGlobe: <http://worldview2.digitalglobe.com/>
- 15) 高木幹雄，下田陽久：新編 画像解析ハンドブック，東京大学出版会，2004.
- 16) DigitalGlobe: <http://www.digitalglobe.com/index.php/85/QuickBird>
- 17) ReliefWeb: <http://www.reliefweb.int/rw/dbc.nsf/doc108?OpenForm&emid=EQ-2010-000034-CHL&rc=2>
- 18) Sistema Nacional de Informacion Territorial (SNIT): <http://hosting.snit.cl/terremoto2010/>
- 19) ASTER GDEM: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>
- 20) みんなの地球地図プロジェクト：<http://globalmap.org/index.html>
- 21) 首藤伸夫，今村文彦，越村俊一，佐竹健治，松富英夫：津波の事典，朝倉書店，2007.

(原稿受理2010年7月23日)



## DEVELOPMENT OF GIS DATASET FOR DAMAGE DISTRIBUTION ANALYSIS AFTER THE 2010 CHILE EARTHQUAKE

Yoshihisa MARUYAMA, Shizuko MATSUZAKI, Fumio YAMAZAKI,  
Hiroyuki MIURA and Miguel ESTRADA

This paper presents the results of field survey conducted by the authors after the 2010 Chile earthquake. The authors visited the affected area about a month after the earthquake occurrence. The GIS datasets for building damages in Talca and tsunami inundation areas are constructed in this study and a series of fundamental analyses are performed using the digital elevation model (DEM). In addition to that, the availability of satellite images captured after the earthquake to detect damaged buildings in Talca is discussed using the GIS data constructed in this study.