

2010年チリ地震における現地調査と 衛星画像による広域被害把握

山崎文雄¹・丸山喜久²・三浦弘之³・松崎志津子⁴・Miguel ESTRADA⁵

¹正会員 千葉大学教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

²正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yamaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

³非会員 東京工業大学助教 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)
E-mail:hmiura@enveng.titech.ac.jp

⁴非会員 千葉大学 大学院工学研究科 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

⁵非会員 ペルー国立工科大学准教授 日本-ペルー地震工学センター
(Av. Túpac Amaru 1150, Lima 25, PERÚ) E-mail:estrada@uni.edu.pe

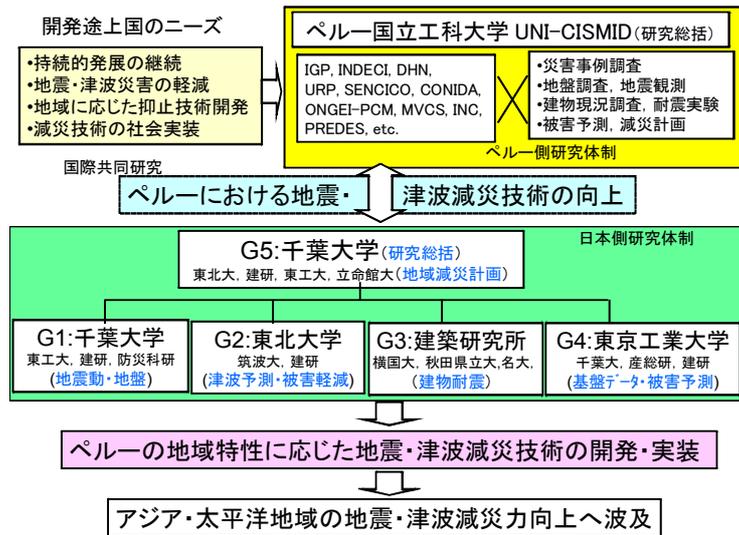
筆者らは、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」の一環として、JSTからの援助を受け、2010年2月27日に発生したチリ地震の被害調査を実施した。調査は地震から約1ヶ月後の4月2～8日にかけて実施した。本報告では被害調査の概要と調査結果および地理情報システム(GIS)を用いた分析を行い地震、津波被害の特徴について述べる。具体的には、被災地域における衛星画像と現地調査写真を比較し、地震による建物被害がどの程度把握できるか検討を行う。また、標高データ(DEM)を利用し、津波被害が生じている地域の地形的特徴を分析する。

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

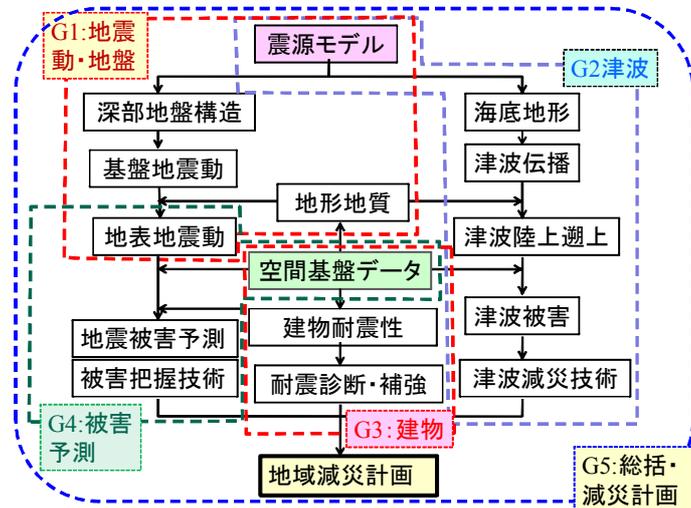
1. はじめに

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。震源は首都サンチャゴ(Santiago)の南西約335km、コンセプション(Concepción)の北北東約105kmに位置し、震源に近いタルカワノ(Talcahuano)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¹⁾。また、首都サンチャゴでの揺れの強さはメルカリ震度階級VIIと報告¹⁾されており、道路橋やRC造構造物に被害が生じた²⁾⁵⁾。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⁶⁾。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⁶⁾。

著者らは、地球規模課題対応国際科学技術協力事業(略称SATREPS)⁷⁾「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」⁸⁾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。SATREPSは、独立行政法人科学技術振興機構(JST)と独立行政法人国際協力機構(JICA)が連携して、平成20年度より開始した日本が主導する国際共同研究の枠組みの1つである。国際社会が共同で取り組むことが求められている地球規模課題を対象として、開発途上国と我が国が国際共同研究を推進することにより、課題の解決および科学技術水準の向上につながる新たな知見を獲得すること、および開発途上国の自立的な研究開発能力の向上と持続的活動体制の構築を図ることを目的としている。筆者らが防災分野で提案した「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」は、2009年4月に条件付採択課題に選ばれた。その後の数カ月わたるペルー側との調整を経て、2010年1月15日にペルー国立工科大学(UNI)、ペルー国際援助庁(APCI)とJICAの間で討議議事録



(a) 研究組織構成



(b) 研究項目と分担

図-1 ペルー・プロジェクトの組織構成および研究項目

(R/D) が署名され、JICAの技術協力プロジェクトの1つとして、2010年3月よりが正式に開始した。本プロジェクトの組織体制および研究項目を図-1に示す。

本プロジェクトは南米のプレート境界地震による災害軽減を目的としており、ペルーの隣国チリの地震・津波は、プロジェクト遂行上、極めて重要な研究事例になると考えられた。そこで、本プロジェクトとして、ペルーおよびチリの研究者とも連携して、独自の災害調査を実施することとした。JSTから支援を受けて、本プロジェクトの調査団は以下の3班に分けた被害調査を行うことになった。

- ・第1班：リモセンによる広域被害把握、道路・インフラ被害データ収集 (2010.4.1-4.10, G4+G5)
- ・第2班：津波の遡上範囲・浸水高計測、津波被害観測 (2010.4.17-4.27, G2+電力中央研究所)
- ・第3班：建物被害の詳細把握、地震動・地盤の評価 (2010.4.26-5.3, G1+G3+日本建築学会)

このうち、本報告では第1班の「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」が行った被害調査結果に関する報告を行う。地理情報システム (GIS) を用いた分析を行い、地震および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。なお、他の調査チームの被害調査報告は文献9)-12)を参照されたい。



図-2 調査団第1班の調査ルート・地点



図-3 5号線に沿った道路被害と写真

2. 調査概要

JST調査団の第1班は、千葉大学の3人（山崎文雄，丸山喜久，松崎志津子）と三浦弘之（東京工業大学），ミゲル・エストラダ(UNI/CISMID)からなる。現地調査は、2010年4月1日に東京発，米国を経由して2日朝にサンティアゴに到着し，現地で6泊，帰りは8日夜にサンティアゴを立ち10日東京着の日程で実施した。

チリ国内での調査ルートと調査地点を図-2に示す。4月2日にサンチャゴ市内の調査を行った後，3日にパンアメリカン・ハイウェイ(5号線)を南下してコンセプションまで移動，4日はコンセプションとタルカワノを調査，5日はディチャトまでの海岸線を調査した。6日は5号線を再び北上しコンスティトゥションの津波被害を調査，7日はタルカ市内の調査と役所等を訪問した後，サンチャゴに戻りチリ大学を訪問，8日はバルパライソとビニャ・デル・マルを調査した後，帰国の途に就いた。

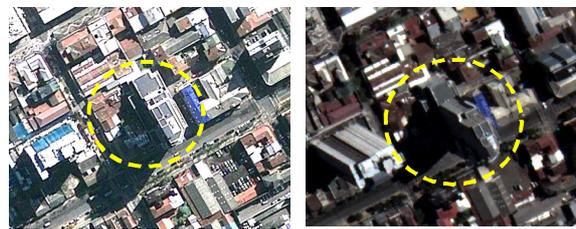
調査団第1班の目的は，リモートセンシング画像による広域の被害把握のための現地検証データの収集と，道路等のインフラ被害調査である。したがって調査に際しては，ハンドヘルドGPS持参して調査ルート記録するとともに，GPS付きカメラを使用して撮影位置と方位が写真画像ファイルに記録されるようにした。図-3は5号線に沿った道路被害の例をGoogle Earth上に表示させたものである。地震発生当初は，このチリ国内の南北に繋ぐ最重要幹線は大渋滞したが，地震後1か月を経過した筆者らの調査時点では，渋滞もなく通行できた。しかし②に示すような跨道橋の被害は多数見られ，応急対策が施されていた。また③のような落橋もあって，上下4車線のうち被害のない2車線を対面通行させている箇所も多く見られた。国土面積は日本の約2倍あるのに，人口は約1/8というチリの社会環境もあって，地震後の交通混乱も早期に収拾できたと考えられる。道路橋被害の特徴や原因に関しては，本報告書の3章を参照されたい。

3. コンセプションの衛星画像と現地の被害状況

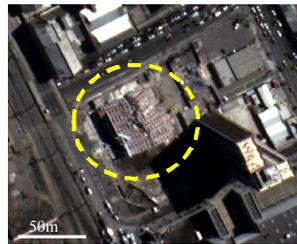
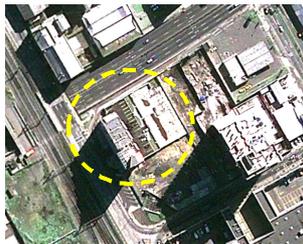
2010年のチリ地震の前後には，多数の人工衛星が被災地域を観測している。コンセプション・タルカワノ地域



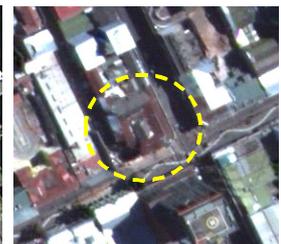
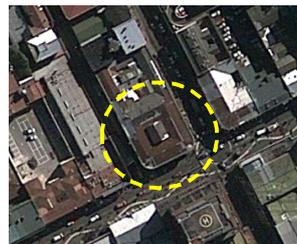
図-4 コンセプションの WorldView-2 衛星画像，現地調査ルートおよび主な被害構造物位置



(a) Torre O'Higgins



(b) Edificio Alto Rio



(c) 中心市街地の組積造建物

図-5 コンセプションの主な被害建物の地震前後の衛星画像比較（左：2009/9/2，右：2010/3/6）

に関しては、WorldView-2衛星が2010年3月6日に鮮明な画像を取得している。WorldView-2は、8バンドのマルチスペクトル・センサとパナクロマティック・センサを搭載した最新の光学センサ商業衛星で、解像度0.5mのパンシャープン（カラー）画像を作成することができる。

図-4にはコンセプションでの調査ルートと主な被災構造物の写真をWorldView-2衛星画像上に示す。このように我々の撮影した現地写真は、Exifに位置情報が書き込まれているため、全て地図上で位置を特定することができる。図-5には地震前の衛星画像（Google Earthより）と地震後の衛星画像を主な被害建物について比較する。21階建てRC造の高層建物Torre O' Higgins (a)は中間層崩壊して上層部が傾いていたが、地震後の衛星画像は緊急撮影のため垂直から26.7度傾いており、被災箇所は死角になって見ることができない。(b)に示すRC集合住宅Edificio Alto Rioは転倒した状況が、衛星画像からも明瞭に観察できる。また(c)に示す中心市街地の組積造建物は、屋根の変形と周辺に散らばった瓦礫は判読できるが、垂直方向の撮影であるため、被害状況はそれほど明瞭には観察できない。

図-6には被災した穀物サイロと橋梁の地震前後の衛星画像を比較する。金属製の14基の穀物サイロ群(d)は、東側の列のものが全て大破し側壁が挫屈した状態で、穀物が敷地に散らばっていた。地震後の衛星画像からもサイロの大変形の様子や散らばった穀物が確認できる。Biobio川を渡る旧Biobio橋³⁾(e)は1930年代に建設されたRC単純桁橋であるが、老朽化が著しく地震前には既に使用されてはいなかった。多数の橋桁が川に落下しており、衛星画像からもその状況が明瞭に観察できる。その北のLlacolen橋(f)はアプローチ桁の1スパンが落橋した。この橋

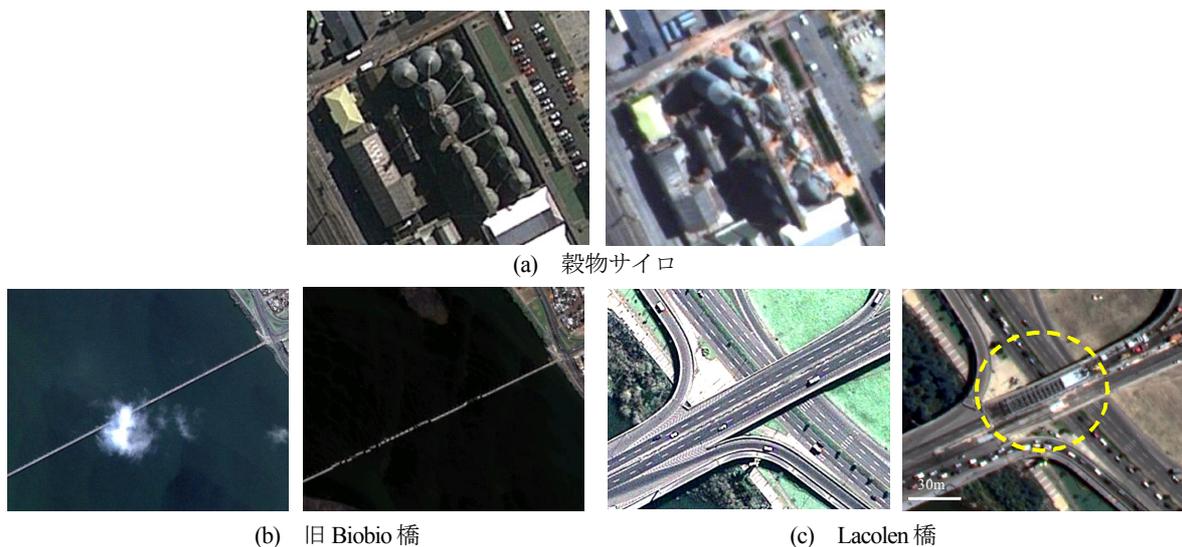


図-6 コンセプションの穀物サイロと橋梁の地震前後の衛星画像比較（左：2009/9/2，右：2010/3/6）

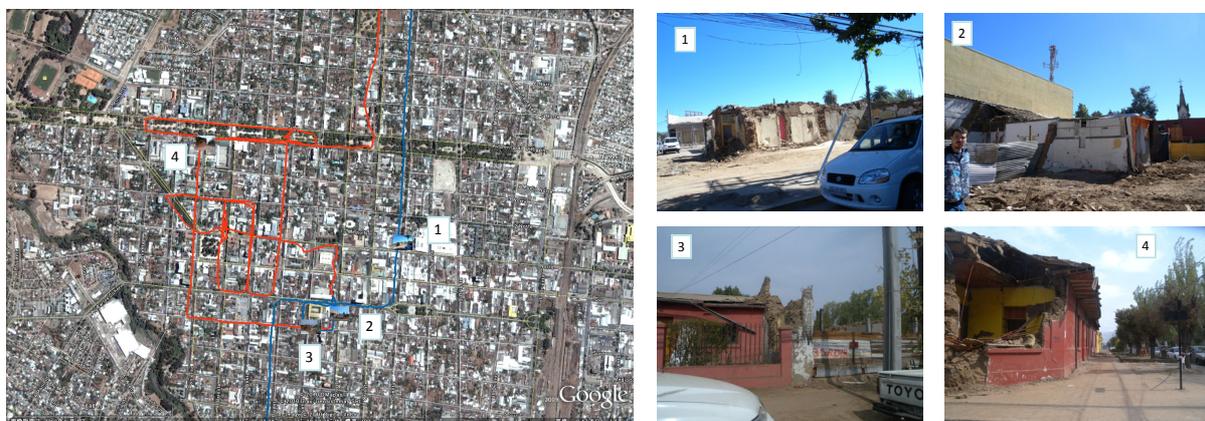


図-7 タルカの調査ルート（青：2010年4月3日，赤：2010年4月7日）と主な被害写真

は対岸とを結ぶ重要な道路に架かっているため、地震直後から応急復旧が進められたようで、筆者らの調査時点では落下した橋の上に仮設の鋼桁が架けられ既に供用されていた。地震後の衛星画像からも、施工中と思われる仮設桁を観察することができる。

4. タルカの衛星画像と現地の被害状況

タルカ（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¹³⁾。著者らの現地調査では、図-7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、揺れの強さはメルカリ震度階級VIIと推定されている¹⁾。

2010年4月7日にマウレ州役場にてヒアリング調査を行い、タルカ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。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、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-8）、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

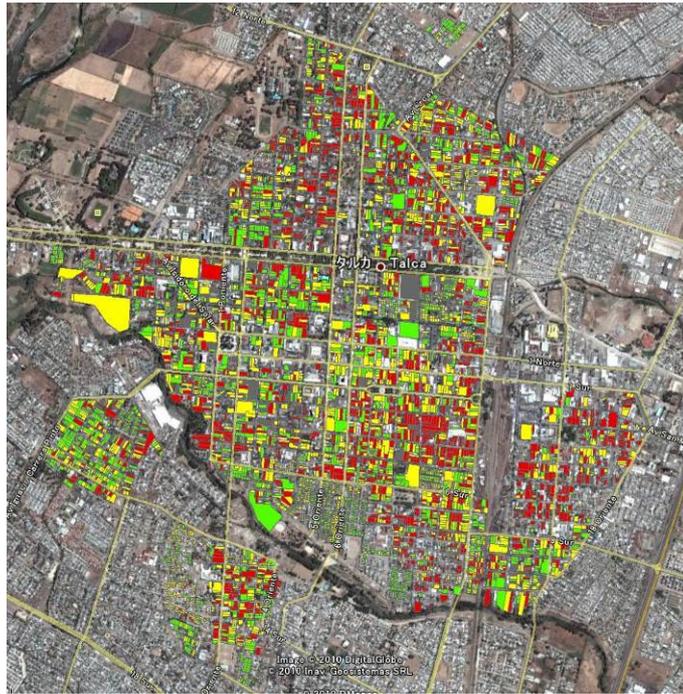


図-8 タルカの建物被害地図画像の地理座標系への投影

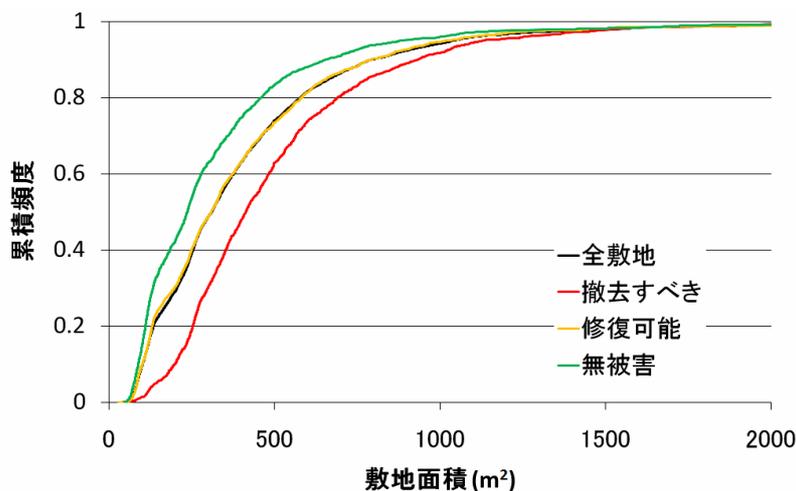


図-9 建物被害程度ごとの敷地面積の累積頻度分布

(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。タルカ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¹⁴⁾、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いる¹⁴⁾。

図-9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430m²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340m²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510m²と最も大きいことが分かる。この結果には、図-8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150m²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。

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^{15), 16)}。そこで、タルカ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-8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



(a) 地震前画像



(b) 地震後画像と目視判読による変化域



(c) GIS データ

図-10 タルカを撮影した地震前後の衛星画像の比較



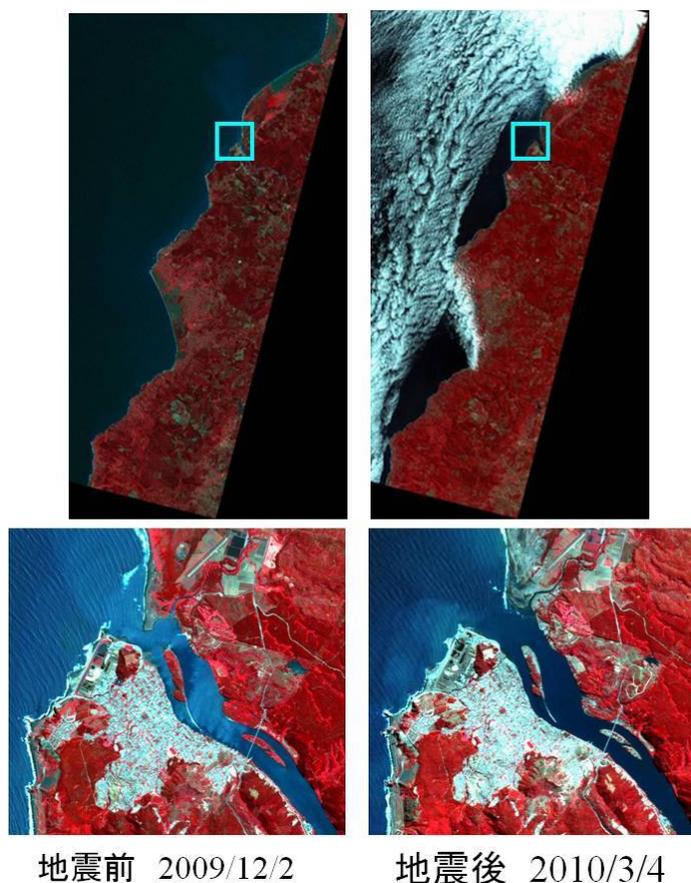
図-11 コンステイトゥシオンの調査ルート、津波浸水範囲、および現地写真撮影位置(①-④)

WorldView-2画像を用いた。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QuickBird衛星画像を用いた。

図-10に、地震前後の衛星画像とGISデータを比較した一例を示す。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、タルカ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タルカの建物被害を把握することは難しいと



図-12 コンステイトゥシオンの津波被害の現地写真



地震前 2009/12/2

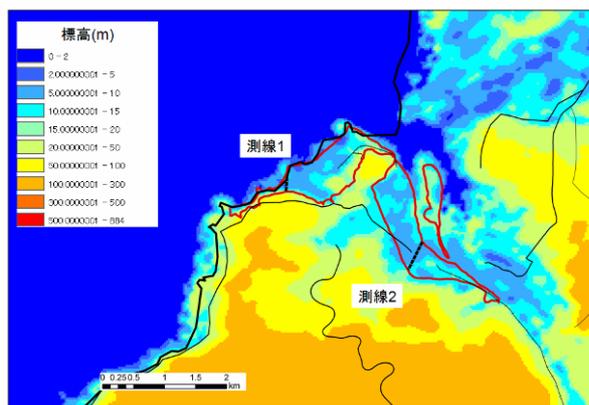
地震後 2010/3/4

図-13 ALOS/AVNIR-2による地震前後画像の比較とそのコンステイトゥシオン付近の拡大図

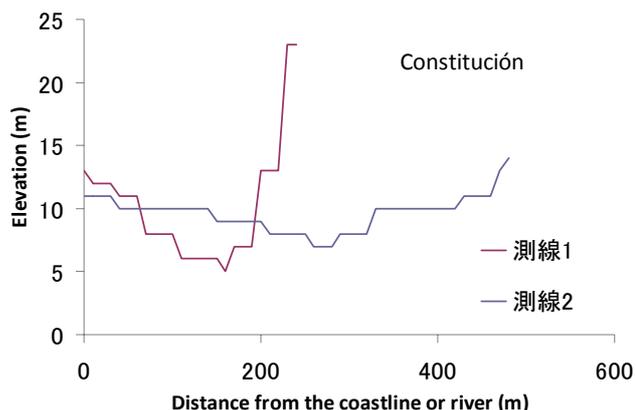
考えられる。

5. コンステイトゥシオンの津波被害と現地調査

コンステイトゥシオンは、サンチャゴから南西約250km、マウレ川の河口の太平洋岸に位置する人口約3.6万人の都市である。チリ内務省緊急事態局(ONEMI)の集約した被害状況によれば¹⁷⁾、地震後に襲ってきた津波により、約1万棟の住宅のうち約3千棟の住宅に被害が生じと推定されている。図-11には筆者らの現地調査ルートとONEMIによる津波浸水範囲¹⁷⁾、および現地写真撮影をGoogle Earth上に表示している。図-12は津波被害の代表的な現地写真である。①に示すように、津波はマウレ川から市街地に浸入したと見られ、川沿いでは②のように広



(a) 津波浸水域と標高



(b) 津波浸水域の標高変化の例

図-14 コンステイトゥシオンの津波浸水域と標高分布

い範囲で建物が倒壊・流出していた。河口付近に位置するRC 造建物では③のように2m程度の津波の湛水跡が残されていた。川から数百m離れた住宅地においても④のように1m程度の津波の痕跡を観測することができた。

コンステイトゥションを含む広い範囲の被災地域に関しては、日本の地球観測衛星ALOS（日本名：だいち）に搭載された光学センサAVNIR-2（空間分解能10m）が地震前後の画像を取得している。図-13には地震前（2009/12/2）と地震後（2010/3/4）のフォールスカラー合成画像を比較する。コンステイトゥション付近の拡大図を見ると、津波によって河口付近の地盤が洗掘されて海岸線が後退している様子や、川の中の島や川に沿った地域の植生が減少している様子を確認することができる。このように衛星画像は、津波などによる地表面の大規模な変状把握に極めて有効な手段といえる。

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¹⁷⁾。そこで、公開されているコンステイトゥションの津波浸水域を表す地図画像を地理座標系へ投影し、GISデータ化した。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、本報告では、ASTER全球3次元地形データ¹⁸⁾を利用して地形的な分析を行う。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¹⁸⁾。

図-14(a)に、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¹⁹⁾から取得したデータである。津波浸水域の標高は概ね20m以下であることが大別できるが、一部地域については、標高20m以上であっても津波が到達していることが分かる。図-14(a)に示したように、津波浸水域に2本の測線を設定し標高値を取得すると図-14(b)のようになる。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³⁾付近に設定している。本報告で用いている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、今村による報告³⁾（63.5%）とほぼ同程度の値を示している。

6. まとめ

本報告では、JSTとJICAが共同で推進する地球規模課題事業の1つとして採択された「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」の一環としての2010年チリ地震現地調査の体制を紹介するとともに、第1班として行ったリモートセンシング画像を用いた広域被害把握に関する調査結果を報告した。

今後は衛星画像などの解析を進めて、地震被害把握手法の適用性を検証するとともに、空間基盤データや地震被害関数の構築を進めて、中南米地域の地震被害想定や減災計画の立案に役立てていきたいと考えている。

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
- 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) 越村俊一，松岡昌志，吉井匠，Erick Mas, Cesar Jimenez, 山崎文雄：2010年チリ地震・津波災害の現地調査ー津波来襲状況および建物被害状況についてー，第13回日本地震工学シンポジウム，2010.
- 10) 関口徹，ネルソン プリード，庄司学，Jorge Alva, Fernando Lazares, 斉藤大樹：2010年チリ地震・津波災害の現地調査ー強震観測点とその周辺における地震動と地盤特性ー，第13回日本地震工学シンポジウム，2010.
- 11) 斉藤大樹，河野進，楠浩一，谷昌典，金裕錫，松井智哉，日比野陽：2010年チリ地震・津波災害の現地調査ー建物被害調査と被害要因の分析ー，第13回日本地震工学シンポジウム，2010.
- 12) 庄司学，ネルソン プリード，関口徹，Jorge Alva, Fernando Lazares, 斉藤大樹：2010年チリ地震・津波災害の現地調査ー地震と津波の荷重を連鎖して受けた家屋等構造物の被災に関する2，3の考察ー，第13回日本地震工学シンポジウム，2010.
- 13) Humboldt State University Preliminary Tsunami Survey Team Report April 3, 2010, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/>
- 14) MCEER: Preliminary Damage Reports from the Chile Earthquake: February 27, 2010, <http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/Chile2-27-10/damage-reports.asp>
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Sistema Nacional de Informacion Territorial (SNIT): <http://hosting.snit.cl/terremoto2010/>
- 18) ASTER GDEM: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>
- 19) みんなの地球地図プロジェクト： <http://globalmap.org/index.html>

DETECTION OF DAMAGE DISTRIBUTION AFTER THE 2010 CHILE EARTHQUAKE BASED ON FIELD SURVEY AND SATELLITE IMAGES

Fumio YAMAZAKI, Yoshihisa MARUYAMA, Hiroyuki MIURA,
Shizuko MATSUZAKI 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 usefulness of satellite images captured after the earthquake is discussed with the aid of the GIS. 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).