

## 2010年チリ地震における リモートセンシング画像を用いた広域被害把握

山崎 文雄<sup>1</sup>, 丸山 喜久<sup>1</sup>, 三浦 弘之<sup>2</sup>, 松崎 志津子<sup>1</sup>, ミゲル・エストラダ<sup>3</sup>

Fumio YAMAZAKI<sup>1</sup>, Yoshihisa MARUYAMA<sup>1</sup>, Hiroyuki MIURA<sup>2</sup>,  
Shizuko MATSUZAKI<sup>1</sup>, and Miguel ESTRADA<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> 千葉大学大学院工学研究科
- <sup>2</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科
- <sup>3</sup> ペルー国立工科大学日本ーペルー地震工学センター

本報告では、JSTとJICAが共同で推進する地球規模課題対応国際科学技術協力事業の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」について、まず簡単に紹介する。つぎに、JSTの援助を受けたペルー・プロジェクトの一環としての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による広域被害把握と、道路・インフラ被害データ収集に関する調査結果を報告する。広域被害把握は、地震前後の光学衛星画像と現地調査結果の比較をコンセプト、コンステイトゥション、タルカについて行い、地震による建物やインフラの被害がどの程度把握できるか検討した。

キーワード：2010年チリ地震、地球規模課題、被害調査、衛星画像、インフラ被害

### 1. はじめに

2010年2月27日午前3時34分（現地時間）頃、チリ中部の太平洋岸で、マグニチュード8.8の強い地震が発生した。震源は首都サンティアゴの南西約325キロの太平洋沿岸で、震源深さは約35kmである。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<sup>1)</sup>。この地震では、津波によるチリ沿岸の被害が甚大であったほか、Biobio州やMaule州などの広い範囲で建物倒壊、道路損壊、橋梁落下などの被害が発生した<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(略称SATREPS)<sup>7)</sup>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」<sup>8)</sup>の一環として独立行政法人 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、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

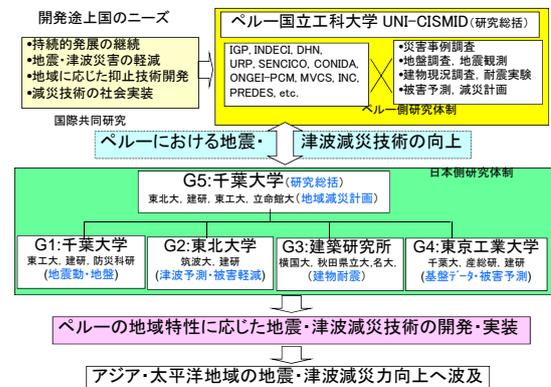


図1 JST-JICA ペルー・プロジェクトの組織構成

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(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。プロジェクトの組織構成を図1に示す。

日本側は千葉大学が研究代表機関（研究代表者：山崎文雄）となり、地震動・地盤（G1:千葉大学他）、津波（G2:東北大学他）、建物耐震（G3:建築研究所他）、被害予測（G4:東京工業大学）、減災計画（G5:千葉大学他）の5つ研究グループで構成される。

ペルー側はUNIの日本ーペルー地震防災研究センター(CISMID: Carlos Zavala所長)を代表機関として、地球物理学庁(IGP)、市民防衛庁(INDECI)、水理航行部(DHN)、国立建設産業訓練機構(SENCICO)などの機関や、自治体などの研究者・実務者が参加する。

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。

- ・第1班：リモートセンシング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）

このうち本文においては、第1班の調査報告を行う。他の調査チームの被害調査報告は文献<sup>9)-12)</sup>を参照されたい。

## 2. 調査概要と行程

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発ち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日にサンティア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，サンティア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。

JST調査団第1班の調査目的は，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を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，土木学会の報告書<sup>13)</sup>に詳しいので参照されたい。

## 3. コンセプションの被害状況と衛星画像

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・センサとパンクロマティック・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2 JST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



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

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、全て地図上に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<sup>3)</sup>(e)は1930年代に建設されたRC単純橋であるが、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. コンスティトゥションの津波被害と衛星画像

コンスティトゥションは、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<sup>14)</sup>、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7には筆者らの現地調査ルートとONEMIによる津波浸水範囲<sup>14)</sup>、および現地写真撮影をGoogle Earth上に表

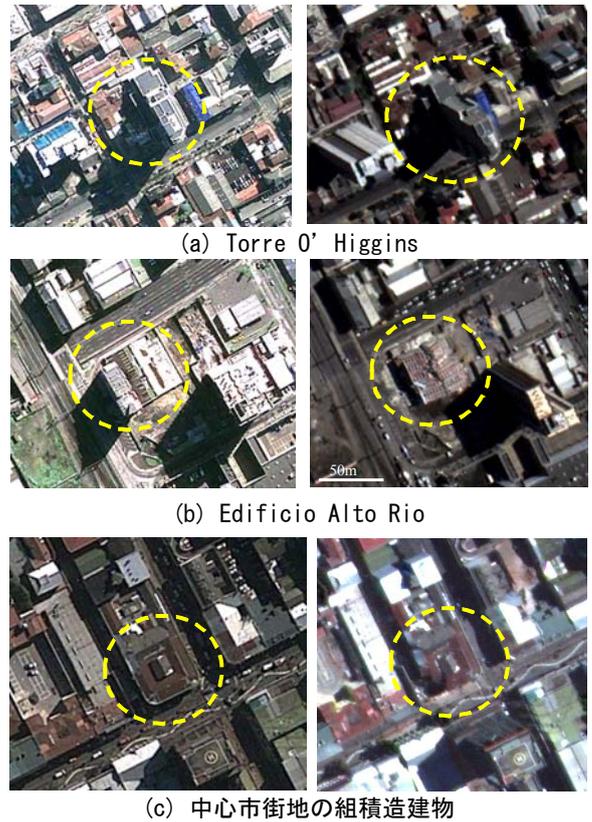


図5 コンセプションの主な被害建物の地震前後の衛星画像比較(左:2009/9/2, 右:2010/3/6)

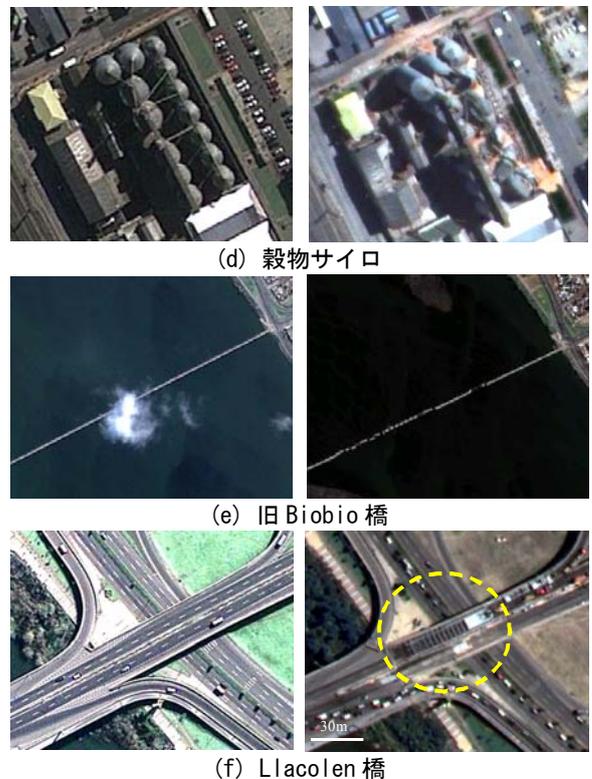


図6 コンセプションの穀物サイロと橋梁の地震前後の衛星画像比較(左:2009/9/2, 右:2010/3/6)



図7 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)



図8 コンステイトゥシオンの津波被害の現地写真

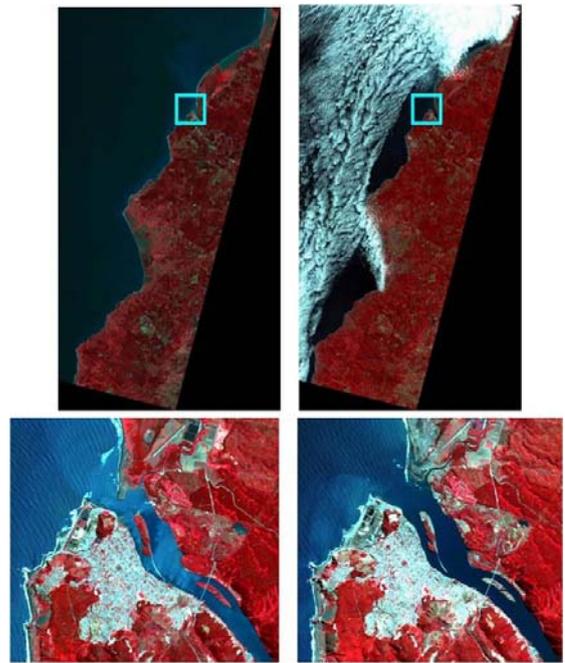
示している。図8は津波被害の代表的な現地写真である。①に示すように、津波はマウレ川から市街地に浸入したと見られ、川沿いでは②のように広い範囲で建物が倒壊・流出していた。河口付近に位置するRC造建物では③のように2m程度の津波の湛水跡が残されていた。川から数百m離れた住宅地においても④のように1m程度の津波の痕跡を観測することができた。

コンステイトゥシオ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9には地震前(2009/12/2)と地震後(2010/3/4)のフォールカラー合成画像を比較する。コンステイトゥシオ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。

## 5. タルカの被害状況と衛星画像

タルカはマウレ州の州都であり、人口約20万人、震央から約60km離れた都市である<sup>15)</sup>。著者らの現地調査では、アドベ造や無補強組積造建物の多くに、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<sup>1)</sup>。

図10はタルカ中心部におけるGoogle Earthの画像に筆



地震前 2009/12/2 地震後 2010/3/4  
図9 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

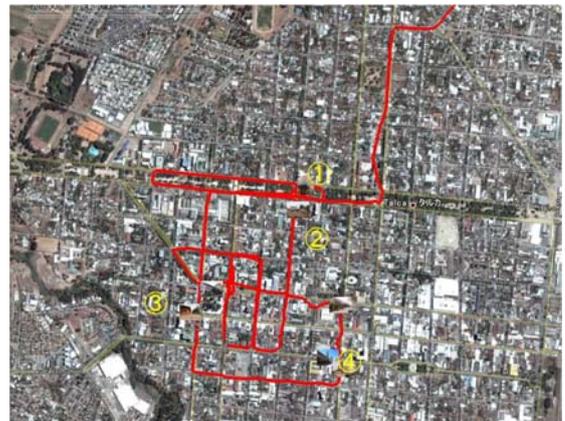


図10 タルカの調査ルートと現地写真

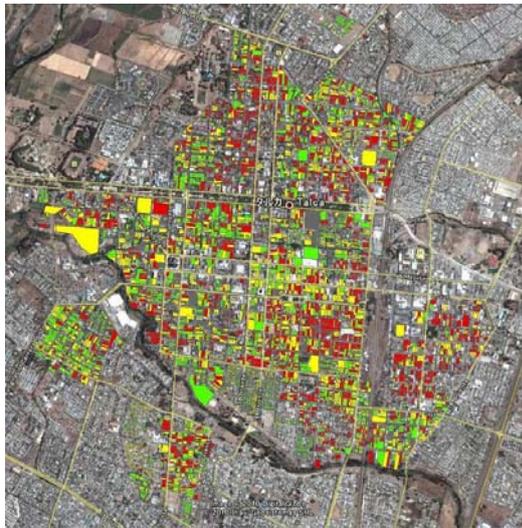


図 11 タルカの建物被害地図の地理座標系への投影

者らの調査ルートを表示したものと、代表的な現地の被災状況を示している。写真①に示すように市内は低層建物が多く、その屋根はスレートや金属とともに、瓦葺きも多く見られその被害割合は高い。写真②や③に見られるように、倒壊や全壊した建物は、主に無補強レンガ造やアドベ造が多い。被害を受けていない状態では判別しにくい、市内の建物は意外とアドベの割合が高いように思われる。写真④ではレンガ造の教会が大破しているが、隣の RC 造 3 階建て建物や奥に見える高層建物には被害は見られない。したがって、タルカ市街地の建物被害を統計的に分析するには、地震動の評価とともに、構造種別の情報を集めることが極めて重要と考えられる。

2010 年 4 月 7 日にタルカ市役所にてヒアリング調査を行い、市中心部の建物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 2010 年 3 月 31 日時点での建物の被害程度(4 分類)の情報を表示したものである。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 11)、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。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<sup>16)</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いる<sup>16)</sup>。

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>17), 18)</sup>。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



(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



(d) 地震前画像



(e) 地震後画像と目視判読による変化域



(f) GIS データ

図 12 タルカの地震前後の衛星画像の比較

衛星画像として、2010 年 3 月 10 日に撮影された 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 12 に、地震前後の衛星画像と GIS データを比較した例を示す。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考えられる。

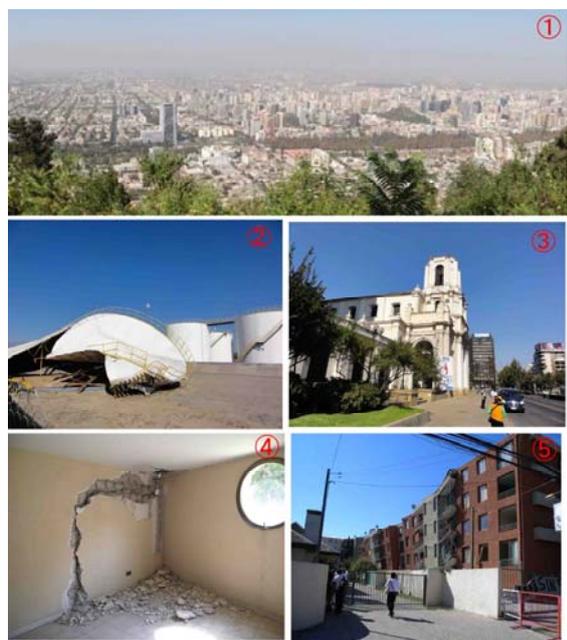
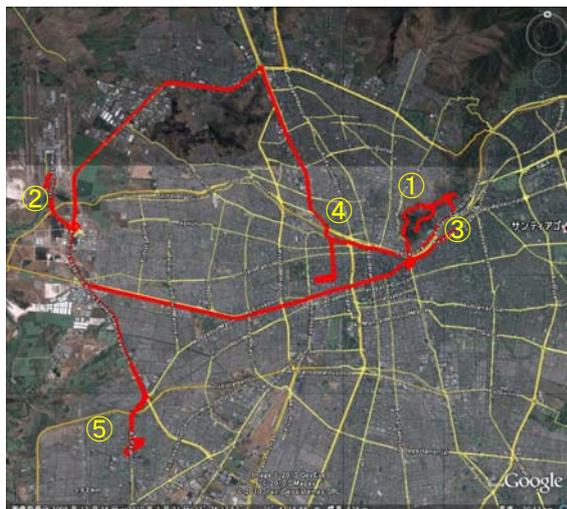


図13 サンティアゴの調査ルートと現地写真

## 6. サンティアゴの被害状況

首都サンティアゴはチリ中央の盆地に位置する、人口500万の大都市である。震央から約335km離れているが揺れの強さはメルカリ震度階級VIIと推定されており<sup>1)</sup>、今回の地震の震源域の大きさを示している。

図13はサンティアゴにおけるGoogle Earthの画像に筆者らの調査ルートを表示したものと、代表的な現地の被災状況を示している。写真①にみられるように都心部には高層・超高層ビルが数多く建てられている。②は空港近くのタンクの被害である。③は地震によって前面の頂塔部が崩落した教会、④は20階建ての共同住宅Edificio Central Park(2003年建築)で、1・2階に壁・柱のせん断ひび割れや柱の座屈がみられる。⑤は市郊外Maipu区の5階建て共同住宅Edificio D on Tristan(2005年建築)で、1階(半地下)のピロティが層崩壊した。

しかしRCの中・高層建物のうち⑤のように大破したものはごく少数で、被害のほとんどは壁・柱の仕上げ部分等一部の損傷にとどまっている。

## 7. まとめ

本報告では、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」の一環としての2010年チリ地震現地調査の体制を紹介し、第1班が行ったリモートセンシングによる広域被害把握と、道路・インフラ被害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](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) 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(SATREPS), <http://www.jst.go.jp/global/>.
- 8) 国際協力機構：平成21年度「地球規模課題対応国際科学技術協力」案件の実施決定について，[http://www.jica.go.jp/press/2009/20090422\\_01.html](http://www.jica.go.jp/press/2009/20090422_01.html).
- 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) 川島一彦，運上茂樹，星隈順一，幸左賢二：土木学会2010年チリ地震による橋梁の被害調査報告，2010。
- 14) Sistema Nacional de Informacion Territorial (SNIT): <http://hosting.snit.cl/terremoto2010/>, 2010.
- 15) Humboldt State University Preliminary Tsunami Survey Team Report April 3, 2010, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/>
- 16) MCEER: Preliminary Damage Reports from the Chile Earthquake: February 27, 2010, <http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/Chile2-27-10/damage-reports.asp>
- 17) 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.
- 18) Yamazaki, F., Yano, Y. and Matsuyoka, 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.