

2010年チリ地震津波の数値解析による 津波被災地の探索と被害の特徴

こしむらしゅんいち
越村俊一

東北大学大学院工学研究科 災害制御研究センター

1. はじめに

2010年2月27日06:34 (UTC)に、南米チリ沖を震源とするマグニチュード8.8 (USGS, 2010)の巨大地震が発生した。この地震により発生した津波は太平洋全体に波及し、特にチリ太平洋岸と日本に甚大な被害を与えた。

巨大災害の発生直後は、激甚な被災地内の情報がある期間欠落し、災害救援活動が難航するとともに、情報の途絶えた激甚被災地が置き去りになる(情報空白期)。この情報空白期を如何にして乗り切るかが国際社会に求められた災害救援上の課題である(たとえば越村, 2007)。地震や津波の発生直後に何処でどのような規模の災害が発生しているかを適切に予測することに加え、限られた資源を効果的かつ効率的に災害救援活動に投入するための意思決定情報が必要である。この情報は、単なる津波の高さの情報だけでなく、どこにどれくらいの規模の人が津波による影響を受けたかといった、地域の津波に対する脆弱性に関する情報として開示する必要がある。

本研究では、2010年チリ地震津波の震源付近海域における津波解析を実施し、予想される津波の被災地を、津波数値計算と人口統計データとの統合分析により明らかにすることを目的とする。これを「津波被災地探索技術」として位置づけ、災害発生後24時間以内に被災地を探索し、予想被災者数の分布を推定することを目指す。

まず地震発生後24時間を目処に得られる地震情報のみ(震源位置、マグニチュード、断層メカニズム、余震分布)を用いて広域津波解析を実施する。

次に、数値解析から得られた津波高予測値と世界の人口統計データをGIS上で統合処理し、津波に曝されている人口(津波曝露人口)を算出し、沿岸津波高との関連で被災地を探索する。ここで津波被災地として探索する基準は、既往の津波災害事例における津波高と建物被害率、死亡率の関係(河田、

1997; 越村ら, 2009)を考慮して決定する。

最後に、得られた被災地探索結果をチリ沿岸部における現地調査結果や衛星画像による観測情報を用いて検証し、本研究で展開する被災地探索技術の意義や探索結果の有効利用のための開示方法について論ずる。

2. チリ地震津波の数値計算と被災地探索

以下では、津波被災地探索の流れについて概説する。

まず、地震津波発生直後に各地の津波来襲状況を推定するための数値解析を実施する。得られた津波高と沿岸部の人口統計データをGISにより統合処理し、津波により影響を受けた人口を推計する(津波曝露人口)。得られた津波曝露人口を評価基準として予想被災地を探索し、航空機や人工衛星による被災地外からの情報収集活動を展開するための地域の特定や現地調査・災害救援活動を展開するための参考情報として活用する。基本となる考え方は、越村(2007)に詳しいので参照されたい。

2.1 津波波源モデルの構築

津波数値解析を実施するための初期条件(津波波源モデル)を検討する。ここでは地震発生から24時間以内に得られる情報という制限下で波源モデルを考える。地震発生から数時間でUSGS(米国地質調査所)がCMT解(Centroid Moment Tensor解)を配信する(USGS, 2010)。この時点で分かることは、観測された地震波形をもっとも良く説明する地震の位置(Centroid)と規模(Moment Magnitude)および発震機構(メカニズム)である。なお、CMT解は2通りの発震機構(断層面の候補)を示唆するので、既往地震のメカニズムやテクトニクスを考慮し、今回は低角逆断層解を選択した。

一方、断層面の位置や断層寸法は、即時的な情報から特定することは出来ない。ここでは、断層面の

位置は震央が断層面中心にあることを仮定し（バイラテラル破壊伝播）、断層面基準点（上端）の深さは23kmとした。また、断層長さ・幅L、Wは、Wells and Coppersmith (1994) による断層モデルの幾何学的経験則に整合するように決定し、断層滑り量Dは地震モーメント $M_0 = \mu DLW$ の関係式から算定した（地盤の剛性率 $\mu = 3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ）。

上記の検討を経て推定した津波波源モデル（断層パラメータ）を表1に示す。このパラメータを元に、Okada (1985) の解析解を用いて計算した地盤変動分布（津波発生時初期水位分布）を図1に示す。

2.2 津波伝播・遡上解析の実施

図1の（45° S、80° W）から（30° S、70° W）までを計算領域として津波の数値解析を行う。計算

表1 2010年チリ地震津波の波源モデル
（断層パラメータ）

断層長さ×幅	450km×100km
走向、傾斜角、滑り角	16°, 14°, 104°
滑り量	15m
地震モーメント	$2.0 \times 10^{22} \text{ Nm}$
地盤の剛性率	$3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

には、非線形長波理論に基づく差分モデルを採用する。空間格子間隔は30秒（約900m）、時間格子間隔は1秒、時間積分は14400step（4時間）とした。海底地形データは、GEBCOの30秒グリッドデータ（IOC、IHO and BODC、2003）を利用した。ここでは陸上遡上も考慮して計算を実施した。

2.3 津波曝露人口の算出

沿岸部における津波被災規模は、単に来襲する津波の高さだけでは規定できない。津波被害の全体像を把握することは、すなわち、津波高さの推計・把握に加え、その津波に曝される社会的条件（脆弱性）を考慮することが津波被災地推定の要件となる。津波災害が社会に与える影響度や地域の津波災害に対する脆弱性を評価する一指標として、沿岸部の津波に曝される人口を津波曝露人口と定義し、それを算出する。津波曝露人口推計モデルは、越村（2007）が提案した Potential Tsunami Exposure (PTE、津波曝露人口) を用いる。PTE算出のための人口統計は、米国Ork Ridge National Laboratoryが公開している LandScanTM (Dobsonら、2000) を利用する。LandScanとは、各国の県・州レベルの人口を、土地の傾斜、土地被覆、主要道からの距離、都市光が観測された頻度で、30秒メッシュに按分することで得られたものである。ここでは、30秒という粗い格

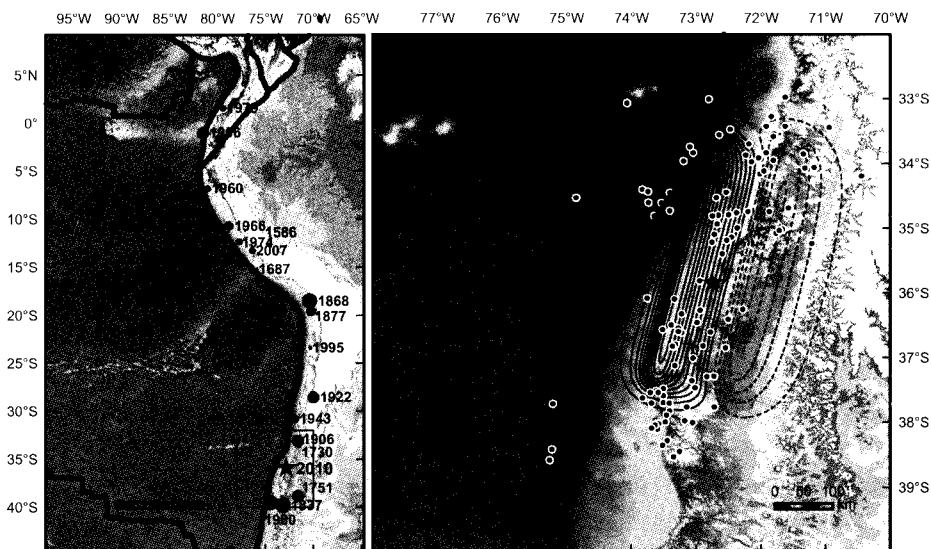


図1 (a)チリの既往地震の分布と(b)2010年の津波波源モデル（地盤変動分布；コンターは0.5m間隔、実線：隆起（最大4.7m）、点線：沈降（最大2.6m））、図の●は本震発生から1日後までの余震分布（USGS, 2010）

子を用いているので、曝露人口を算定すべき陸地の格子を沿岸部標高30m以下を制約条件とし、該当するメッシュから最近隣の海側のメッシュを探索して津波高との関連づけを行う。

計算対象領域全体について、津波曝露人口と津波高を求めた結果を図2に示す。既往の研究（たとえば越村ら、2009；河田、1997）では、沿岸の津波高が4mを超えると家屋破壊率および死亡率が急増することが知られている。ここでは津波曝露人口1000人以上、予想津波高4m以上という基準で被災地を探索した。その結果、被災地の可能性が高い地域が14カ所見つかった（図2の点線で示した地域）。以下では、そのうち津波被災程度が激甚であると考え

られる Dichato、Talcahuano、Constitucion の3地点での結果を示す。

3. 津波被災地の探索結果とその検証

チリ第2の都市である Concepcion に隣接する Talcahuano での結果について述べる（図3(a)）。ここは2010年のイベントにおいて最も津波曝露人口が高い地域であった。津波の予想高は8mであり、現地調査でも最大8mと整合している、人口密度を考慮するとかなりの被害が予想された。

Dichato は BioBio 州 Concepcion 県北部の湾に位置する小規模な沿岸都市である。人口はさほど多くはないものの（2002年統計で3057人）、多くの別荘

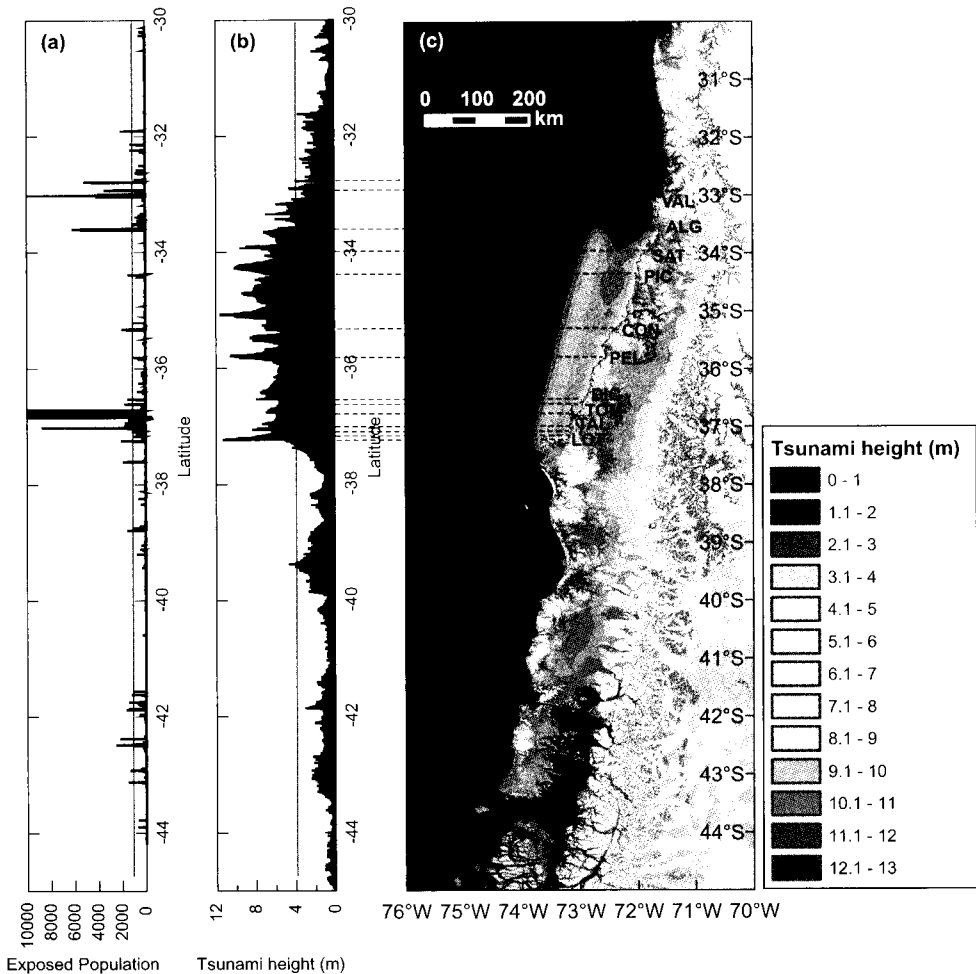


図2 (a) チリ沿岸部の津波曝露人口の分布と (b) 予想津波高および (c) 予想津波被災地（地名略 VAL:Valparaiso, ALG: Algarrobo, SAT:SanAntonio, PIC:Pichilemu, CON:Constitucion, PEL:Pelluhue, DIC:Dichato, TOM:Tome, TAL:Talcahuano, LOT:Lota）。図の赤線は被災地探索の目安とした閾値。

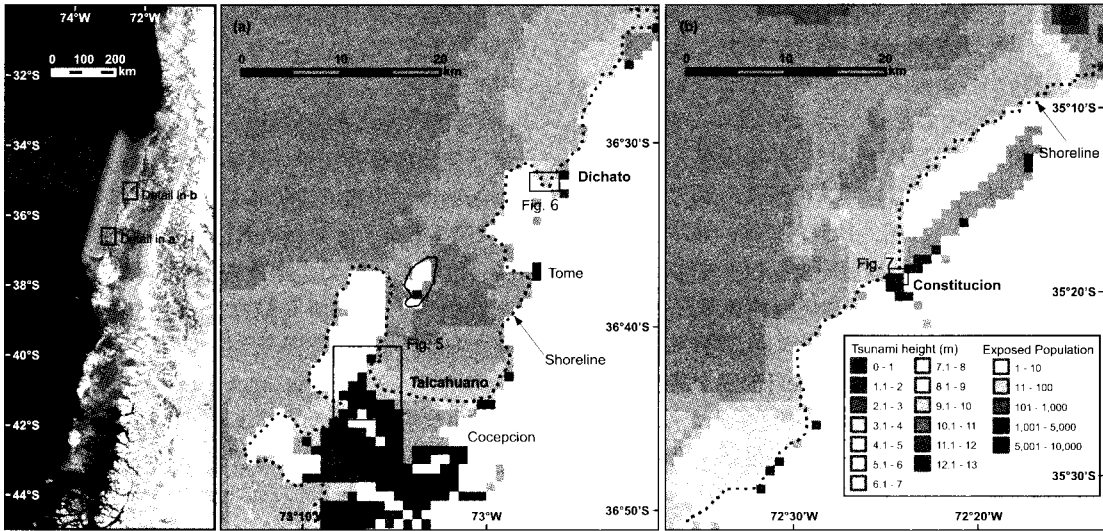


図3 チリ沿岸部の津波曝露人口の分布 (a: Talcahuano および Dichato, b: Constitucion)

地が立ち並ぶ美しい海岸である。ここでの予想津波高は最大8m程度であり、甚大な被害が予想された(図3(a))。

Constitucionにおいても、予想(図3(b)の左岸側で人口が密集)に対して、28m以上の津波遡上が確認されているが(今村ら、2010)、この点については数値解析で予測はできなかった。

上記以外にも、ValparaisoやSan Antonioが津波被災地として挙げられた。いずれの地域においても被害が甚大であることが確認できた。現状で使用している30秒メッシュという粗い地形データを用いた場合には、局所的な津波高の予測に限界があるが、おおむね現地調査結果と整合した被災地探索結果を得ることができた。

4. 現地調査による被害状況の確認

4.1 調査概要

数値解析による被災地探索の結果を踏まえて、著者らのグループは、チリ中部BioBio州の太平洋沿岸部において現地調査を実施した。調査メンバーを表2に示す。調査期間は2010年4月18日から25日の8日間で、BioBio州Concepcion県、Arauco県の2県で計約120地点において津波遡上高、浸水高、浸水深を測定した。図4に調査ルートを示す。調査のベースはConcepcionに置き、車で移動して調査地に向かった。

遡上高は、目撃証言や痕跡による津波の遡上限界

表2 チリ地震津波現地調査メンバー

氏名	所属
越村 俊一	東北大学大学院工学研究科、災害制御研究センター
松園 昌志	産業技術総合研究所、情報技術研究部門
松山 昌史	電力中央研究所、地球工学研究所
吉井 匠	電力中央研究所、環境科学研究所
Erick Mas	東北大学大学院工学研究科 博士課程後期
Cesar Jimenez	Direccion de Hidrografia y Navegacion, Peru (ペルー水路航行部)

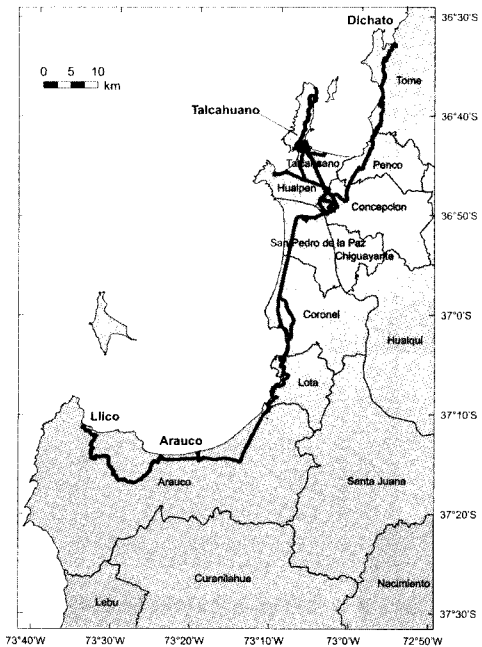


図4 チリ地震津波の現地調査ルート

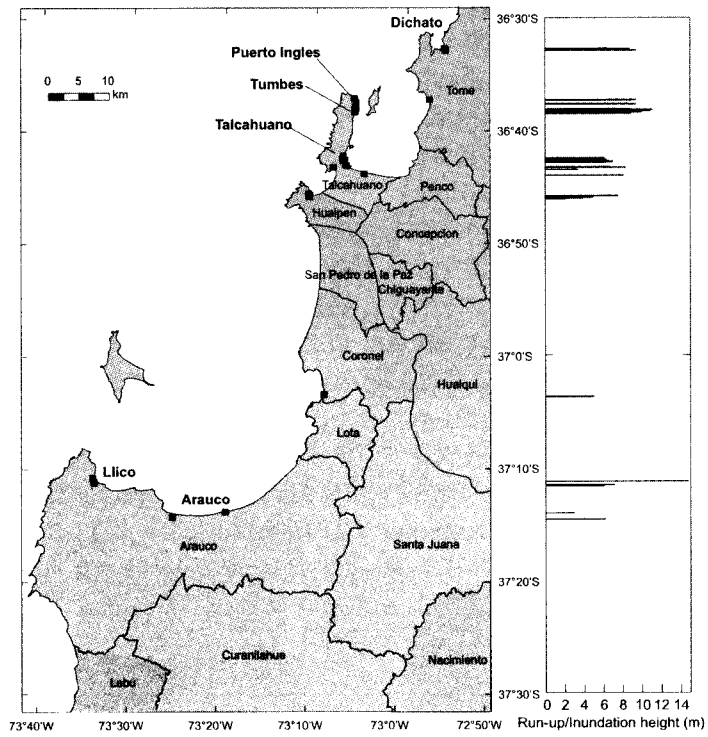


図5 遡上高・浸水高の分布

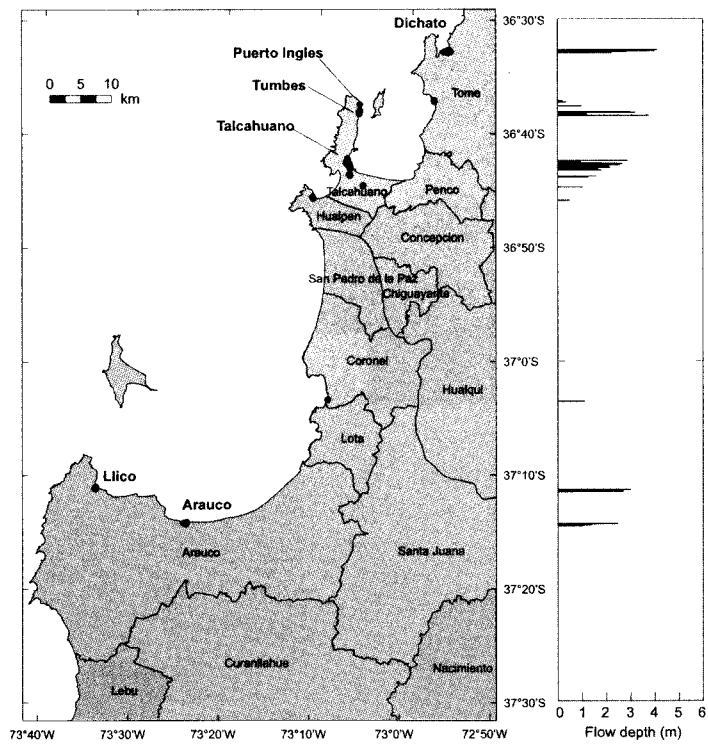


図6 浸水深の分布

地点の高さ、浸水高は建物等に付着した津波浸水の痕跡の高さであり、それぞれ調査時の海面からの高さを測定した後に津波来襲時の海面（Talcahuanoの推算潮位）を用いて補正した。また、浸水深は建物等の津波痕跡の高さをその場の地表からの高さとして測定した。調査地域全体の測定結果を図5および図6に示す。

4.2 Talcahuano

Talcahuanoは、Biobio州 Concepcion県にある人口約250,000人（2002年当時）の港湾都市である。ここでは死者20名、行方不明者18名が報告されている。Talcahuanoの検潮記録は第1波以降が欠測であったため詳細な来襲状況を把握することは難しいが、危機管理局（CATOE: Centro de Alertamiento Temprano y Oficina de Emergencia）で聞き取り調査を行った結果、津波は少なくとも4度来襲し、そ

の周期は1時間～45分ほど、最大波は4波目であったことが分かった。Talcahuanoでは、津波来襲前に津波避難所までの標識を作成して避難計画を準備中であったが、不運にもその対策は活かされなかった。

図7に示すのは、Talcahuano市街地における津波浸水範囲および測定した津波遡上高・浸水高および浸水深である。市街地では6～10mの津波遡上高が認められ、南側の湿地では1km以上内陸に浸水したことが分かった。建物被害については、ところどころ地震の揺れによる被害（建物壁面の亀裂など）や、津波浸水によりシャッターが変形するなどの被害が見られたが、流失した建物は確認できなかった（図7(a)）。市街地内は主に低層の鉄筋コンクリート造の建物が密集しており、3m程度の浸水による流れには耐えることができた。

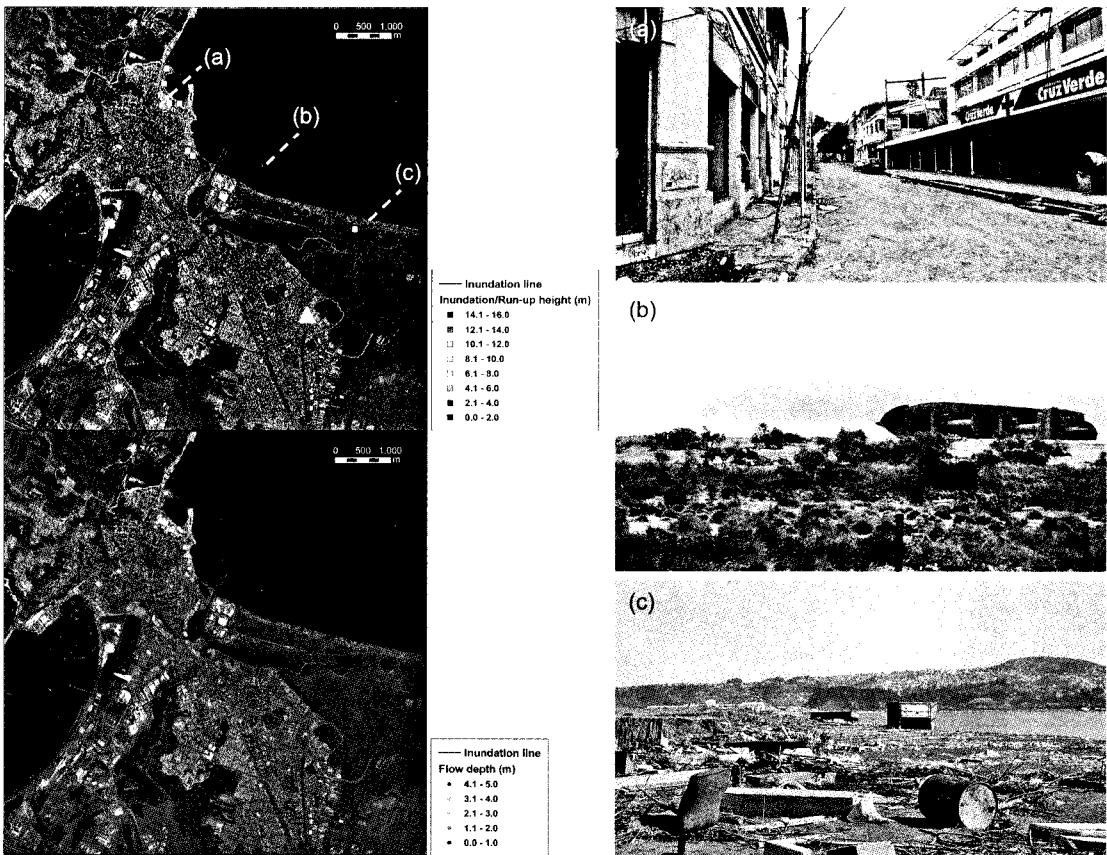


図7 左：Talcahuanoにおける津波浸水範囲と遡上高・浸水高（上）浸水深（下）の分布（白い三角印は植生活性度を測定した地点；図8）。右：（a）市街地の被害状況、（b）津波により転倒した船舶、（c）海岸に漂着した漂流物（撮影地点はそれぞれ左図に記載）

一方、Talcahuano の西側にある港 (San Vicente) では、被害はほとんど見られなかった。目撃証言によると、津波は港の岸壁を越えたが建物は浸水しなかったとのことである。同じ湾の西側と東側できわめて対照的であり、津波発生機構の解明に重要な情報となるであろう。今後詳細な数値計算等で明らかにすべき課題である。

津波の浸水域内では塩水の陸上への浸入により植生の活性度に変化が見られた。例えば、図8に示すのは、Talcahuano 市内 (図7の△印) の地点において、スペクトルカメラ (可視光と近赤外のセンサを

搭載) において撮影した画像 (フォールスカラー) とその画像から計算した NDVI (正規化植生指標) の比較である。この地点では、津波が堤防を越えなかったことが目撃証言より分かっており、堤防上端において植生の変化が見られた。植生が枯死した地点では NDVI が 0.5 程度以下であり、浸水ラインを明確に判別できることが分かった。このような資料を光学衛星画像の解析における浸水域の閾値として利用することで、広域な津波浸水域の把握が可能となる。

また、図9には津波被災前後 (2010年2月16日、

フォールスカラーとNDVI画像

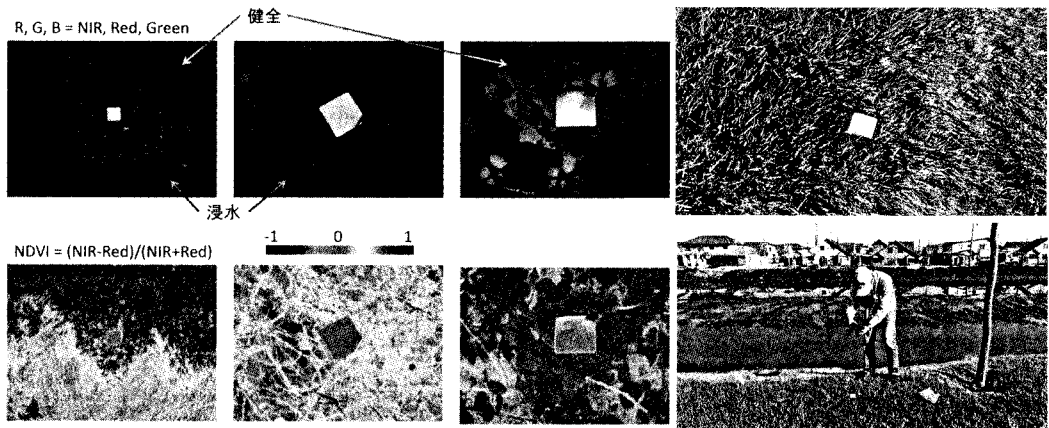


図8 津波浸水域における植生活活性度の変化

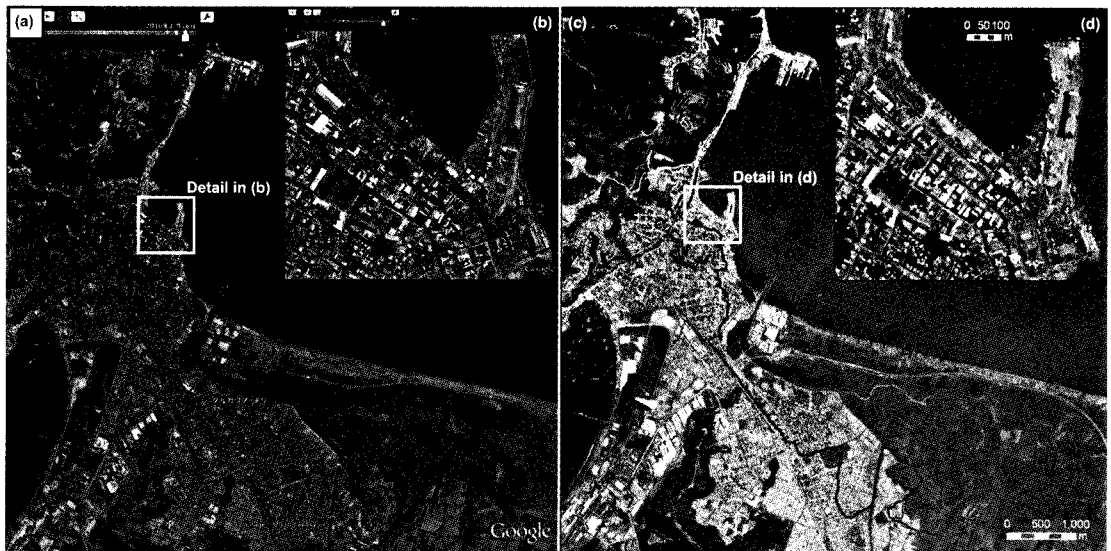


図9 Talcahuano における津波前後の衛星画像の比較 (左: 2010年2月16日、右: 2010年3月6日)

GoogleEarth 画像、2010 年 3 月 6 日撮影 World-View-2 の衛星画像を示している。津波により多くのコンテナが漂流しており、甚大な被害が確認できる。

4.3 Dichato

Dichato の海岸は、別荘が建ち並び、普段は波の穏やかな別荘地である。海岸に立つビル（8階建て）から津波を目撃していたビルの守衛に話を聞いたところ、第 1 波は 5 : 00 頃に到達して 3 度以上来襲し、最大となったのは第 3 波であった。地震の直後、警察や近隣住民同士の声かけもあり、多くの住民が津波来襲前に避難したものの、ここでの死者・行方不明者は 66 人に達し、亡くなった人の多くは観光客や外来者であったと言われている。

Dichato における津波の最大遡上高は 9.4m、浸水深は 3 ~ 5m であった（図 5、6）。ただし、浸水深については流失を免れた家屋の痕跡を基に測定したため、実際の津波よりも低く見積もっている可能性が高い。また、図 10 の衛星画像の比較を見ても分かるように、ここでの家屋の流失率は高く、半数以上の家屋が流失したことが確認された。ここでの家屋の多くは、1 階部分が礎石造で 2 階部分が木造のような特異な構造形式であり、このような構造の津

波への耐力を明らかにすることが課題である。

5. おわりに

巨大地震津波発生直後の被害状況の推定と迅速な災害救援活動への支援を目的とした津波被災地探索技術を開発し、津波数値解析と人口統計データの GIS 分析を統合して、2010 年チリ地震津波の被災地を探索した。津波被災地の目安を、予想津波高 4 m 以上、曝露人口 1000 人以上として探索した結果、被災地の可能性が高い地域が 14 カ所見つかった。特に Talcahuano、Dichato、Conciticucion 周辺の都市で被害が甚大である可能性が高いことが分かった。現在のところ、甚大な被害が報告されているのは Valparaiso、Talcahuano、Conciticucion、San Antonio、Dichato の 5 地域であるが、それ以外にも比較的小規模の集落が被災地、孤立している可能性があることが分かった。本手法に基づき、巨大地震発生から 24 時間以内に被災地を探索し、災害救援が必要な地域や孤立した被災地を見つけ出すことが本研究の目標である。この探索結果に基づき、人工衛星による緊急観測を行うべき地域についてのリクエストを地球観測機関（UNOSAT 等）に提出するなど、迅速な被災地の発見に向けての展開が今後の課題である。それにより災害救援および救命活動の

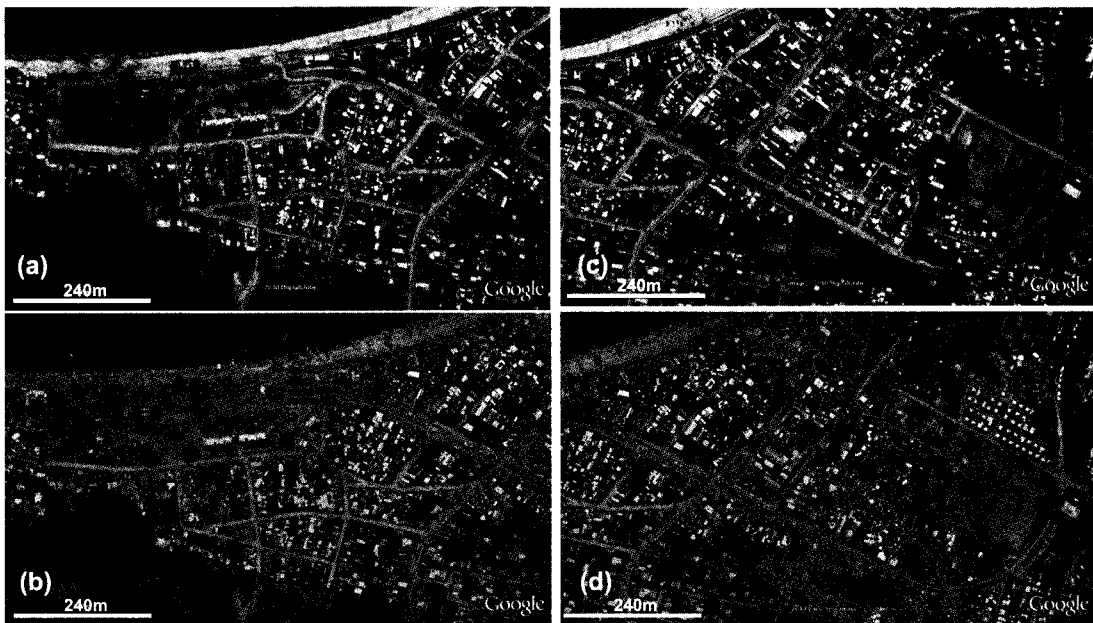


図 10 Dichato における津波前後の衛星画像の比較（いずれも GoogleEarth から。a, c : 2006 年 4 月 26 日、b,d : 2010 年 3 月 5 日）

迅速化や、津波来襲状況の広域把握、津波数値計算精度向上（衛星画像から得られた浸水高等のフィードバック）などが期待できる。

現地調査を実施した Biobio 州では、平均して 6 m 以上、場所により 10 m を超える津波が来襲していたことは分かった。特に Talcahuano 周辺では津波は 4 波ほど来襲し、1 波目が最大ではなかったことが目撃証言より明らかになった。特に被害が甚大であったのは、Talcahuano と Dichato であった。

Talcahuano では、津波浸水による流失家屋・建物は無かったが、船舶やコンテナの漂流など複合的な被害の発生が確認された。一方、Dichato における家屋被害は甚大で、半数以上の家屋が流失した。ここでも津波は複数回来襲し、第 3 波が最大であったという証言が得られた。

しかしながら、津波発生メカニズム、津波来襲状況の全体像は未だつかめていない。特に、なぜ遅くになって最大波が来襲したのか、なぜ湾の表側と裏側で来襲状況に大きな違いが生じたかについての結論は得られていない。今後、生存者が撮影したビデオや目撃証言の分析、津波数値解析を通じて津波来襲状況の全体像を明らかにする必要がある。

チリの人口は日本の約 1/7.5 であり、単純に人口比で考えた場合、同規模の地震・津波が我が国で発生した場合には 3000 人を超える死者を生んでいた可能性がある。チリでの調査・研究を通じて、我が国で発生しうる津波との共通点、起こりうる被害とその発生過程を明らかにし、減災対策への教訓とする必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JST-JICA 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（代表：山崎文雄）」、および平成 20 年度産業技術研究助成事業（代表：越村俊一、プロジェクト ID：08E52010a）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) U.S. Geological Survey (USGS), Magnitude 8.8 - OFFSHORE BIO-BIO, CHILE (オンライン) <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthe-news/2010/us2010tfan/>, 参照 2010-03-01.
- 2) 越村俊一、巨大津波災害の広域被害評価、第四紀研究。Vol.46, pp.499-508, 2007.
- 3) 河田恵昭、大規模地震災害による人的被害の予測、自然災害科学、Vol.16, No.1, pp. 3-13, 1997.
- 4) 越村俊一、行谷佑一、柳澤英明、津波被害関数の構築、土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009.
- 5) Okada, Y. (1985) : Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 4, pp.1135-1154.
- 6) Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994) : New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, 84 (4), pp.974-1002.
- 7) IOC, IHO and BODC (2003) : Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.
- 8) Dobson, J. E., E. A. Bright, P. R. Coleman, R.C. Durfee and B. A. Worley (2000) : LandScan: A Global Population Data-base for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66, No. 7, 849-857.
- 9) 今村文彦、藤間功司、有川太郎、2010 年チリ地震津波の被害調査速報、自然災害科学、Vol. 29, No.1, pp.97-103, 2010.
- 10) 越村俊一、松岡昌志、松山昌史、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－津波来襲状況および建物被害状況について－、第 13 回日本地震工学シンポジウム講演論文集、2010a、印刷中。
- 11) 越村俊一、今村文彦、2010 年チリ沖地震津波の数値解析と人口統計データに基づく被災地の探索、土木学会論文集 B2 (海岸工学論文集、第 57 巻)、Vol. 66, 2010b、印刷中。