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

Searching tsunami affected area by the 2010 Chilean earthquake tsunami

越村俊一¹・今村文彦²

Shunichi KOSHIMURA and Fumihiko Imamura

The present paper reports a preliminary result of searching tsunami-affected area using recent advances of GIS analysis and remote sensing combined with a numerical modeling of tsunami propagation/inundation and world population database. Applying the method of searching tsunami affected area to the 2010 Chilean earthquake tsunami, the potential tsunami affected area have been detected at some coastal cities/communities from Biobio to Maule regions.

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。地震発生から数日間は被災地の状況が断片的にしか伝えられず、特に津波およびその被害に関する情報が不足した。

一般に、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。

本研究では、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。

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	450 km×100 km
走向, 傾斜角, 滑り角	(16°, 14°, 104°)
滑り量	15 m
地震モーメント	2.0×10^{22} Nm
地盤の剛性率	3.0×10^{10} N/m ²

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. 津波被災地の探索

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。

(1) 津波波源モデルの構築

まず、津波数値解析を実施するための初期条件 (津波

1 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科
2 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

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).

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・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) 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.

(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LandScan™ (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.

3. 津波被災地の探索とその検証

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

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: San Antonio, PIC: Pichilemu, CON:Constitucion, PEL:Pelluhue, DIC:Dichato, TOM:Tome, TAL:Talcahuano, LOT:Lota)。左図の実線は被災地探索の目安とした閾値。

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。

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))。GoogleEarthの機能を利用することで被災前後の衛星画像を閲覧することができる(津波発生直後に撮影されたWorldView衛星画像(2010年3月5日)を公開)。津波前後の比較を図-4に示す。ここで示したのは2006年4月6日撮影のQuickBird画像と2010年3月5日撮影のWorldView画像の比較である。特に海岸線付近の家屋が多数流失し、瓦礫・船舶を含む

漂流物が内陸まで到達していることが分かる。

次に、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))。Talcahuanoは人口約250000人(2002年統計)の港湾都市である。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。図-5は津波前のGoogleEarth衛星画像(2006年1月13日)と津波後のWorldView(True Color, Pan-sharpen 合成画像, 2010年3月6日撮影)の比較である。特に港の突堤付近において津波の浸水によるコンテナの流失が目立つ。Talcahuano市街地での家屋の流失は少なかったものの、津波は市街地に浸水し、特にコンテナや船舶等漂流物被害が多く見られた。また、周辺の小規模な集落が全滅し孤立した状態であることも確認できた。

Constitucionにおいても、予想(図-3(b))の左岸側で

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)

図-4 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)

人口が密集) に対して, 図-6で見られるとおり甚大な被害が衛星画像からも確認できる. また, 著者らの現地調査によるとConstitucionの海岸では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. 結論と今後の課題

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. 津波はBioBio州からMaule州に至る1000km以上の海岸に來襲し, 特にTalcahuano, Dichato, Conctitucion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.

津波被災地の目安を, 予想津波高4m以上, 曝露人口1000人以上として探索した. 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. 現在のところ, 甚大な被害が報告されているのはValparaiso, Talcahuano, Conctitucion, San Antonio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

図-5 Talcahuanoにおける津波前後の衛星画像の比較 (a : GoogleEarth, 2006年1月13日撮影, b : WorldView, 2010年3月6日撮影)

図-6 Constituciónにおける津波前後の衛星画像の比較 (いずれもGoogleEarthから, a : 2009年7月23日, b : 2010年3月2日)

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。

謝辞：本研究の一部は平成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)，およびJST/JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業(代表：山崎文雄)の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 今村文彦・藤間功司・有川太郎 (2010) : 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.
- 河田恵昭 (1997) : 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.
- 越村俊一 (2007) : 巨大津波災害の広域被害評価, 第四紀研究, Vol.46, pp.499-508.
- 越村俊一・行谷佑一・柳澤英明 (2009) : 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.320-331.
- 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.
- 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.
- 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.
- U.S. Geological Survey (USGS), Magnitude 8.8 - OFFSHORE BIO-BIO, CHILE (オンライン)
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfn/>, 参照2010-03-01.
- 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.