

ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究 —2010～2014 年度 SATREPS 課題の概要—

山崎文雄

1. SATREPS ペルー・プロジェクト

地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) は、科学技術振興機構 (JST) と国際協力機構 (JICA) が連携して平成 20 年度より開始された日本が主導する国際共同研究の枠組みの 1 つである。地球規模課題を対象として、開発途上国とわが国が国際共同研究を推進することにより、課題の解決と科学技術水準の向上につながる知見を獲得することを目指している。研究分野の 1 つとして「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」が指定されている。

筆者らは、ペルー側と事前協議を重ねたうえで、2008 年 11 月に提案書を JST に提出し、2009 年 4 月に条件付採択課題に選ばれた。同年 6 月に、JST と千葉大学で暫定研究の契約を締結し、日本側でのプロジェクトが開始された。研究代表者 (山崎) は、2009 年 8 月に JICA の詳細計画策定調査団の一員としてペルーを訪問して討議を行い、JICA 調査団長とペルー国立工科大学 (UNI) 学長との間で合意文書が取り交わされた。このあと 2010 年 1 月に、JICA, UNI, ペルー国際援助庁 (APCI) の間で討議議事録 (R/D) が署名された。これにより、SATREPS ペルー・プロジェクトが正式に開始された。本文では、5 年間にわたる研究活動を紹介する。

2. プロジェクトの背景と目的

ペルーは、日本と同様に環太平洋地震帯に属する地震・津波の多発国である。近年においても、2001 年 6 月 23 日に、ペルー南部の沿岸部を震源

とするマグニチュード 8.4 の地震が発生し 100 人を超える死者が生じるとともに、4 万棟を超える建物が倒壊・大破した。また 2007 年 8 月 15 日にも、ペルー中部 (イカ州ピスコ沖) でマグニチュード 8.0 の地震が発生し、500 人を超える死者が生じるとともに、8 万棟を超える建物が倒壊・大破した。いずれの地震も、ナスカプレートが南アメリカプレートに沈み込む境界で発生した海溝型地震で、津波による被害や犠牲者も発生している (図 1)。

このように地震・津波災害の危険性の高い国はアジア太平洋地域に数多いが、なかでもペルーは日系移民が多いなど日本と関係が深く、地震工学・地震防災の分野でも、国立工科大学 (UNI) の土木工学部の中に日本-ペルー地震防災研究センター (CISMID) が 1987 年に設立されるなど、永年にわたって交流が続いてきた。しかし、1990 年代に入って政情不安や治安悪化などが深刻となり、関係がやや疎遠になった。しかし、近年は政情も安定し、科学技術分野での交流も復活の兆しにある。このような背景のもとで、永年培ってきたペルーとの地震防災分野での交流を再び活性化し、持続性のある技術協力関係を築くことは両国にとってきわめて重要と考えられた。日本に留学して学位を取得した研究者達も、地震防災分野における指導的な立場になり、ペルーで頻発した大地震による社会的関心の向上と合わせて、ペルーと日本の関係を深める絶好の時期といえた。以上の背景より、アジア太平洋地域の中から、地震・津波による災害軽減のニーズが高いペルーを科学技術協力事業の対象国として選んだ。

本研究では国際的・学際的な連携のもとに、フィールドに立脚した実践的研究を推進し、ペ

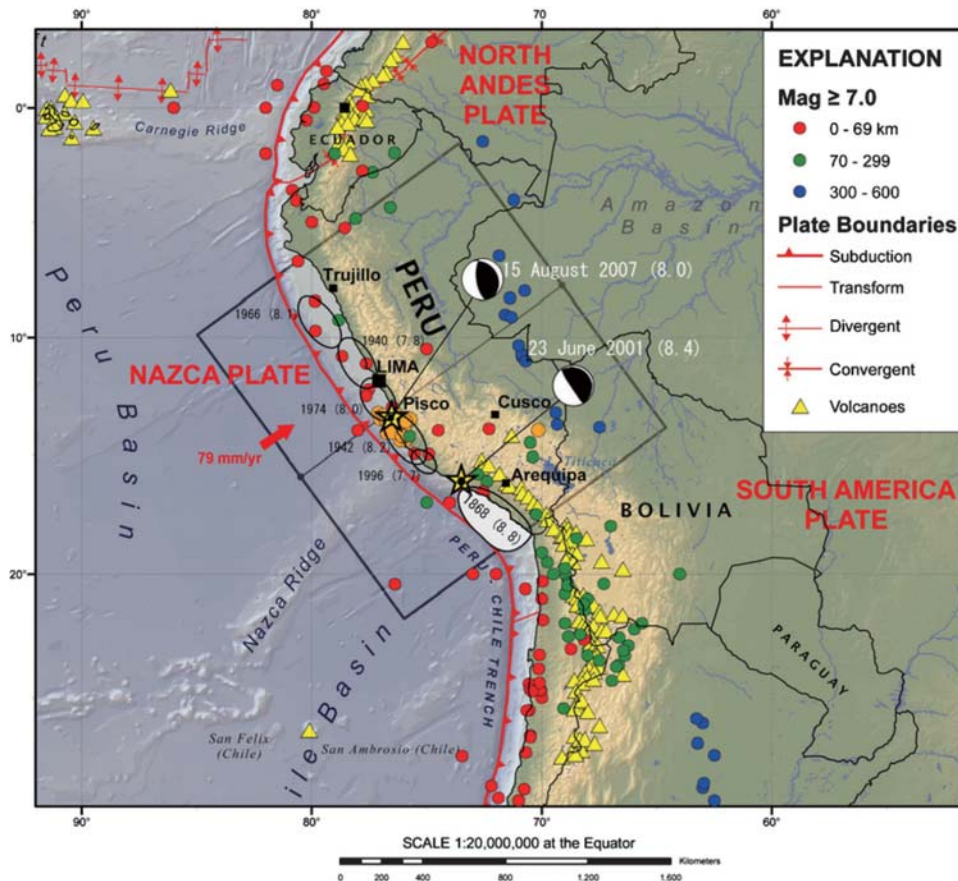


図1 ペルーとその周辺のプレート境界と発生地震 (文献^{1,2)} に加筆修正)

ル社会への地震・津波技術の実装を目指した。地震動予測と地盤ゾーニング (G1), 津波予測と被害軽減 (G2), 建物耐震性の向上 (G3), 空間基盤データ構築と被害予測 (G4), 地域減災計画 (G5) の5つのグループを設け、密接な連携のもとに、地域特性を考慮した総合的な共同研究を推進した。

3. 研究プロジェクトの概要

研究プロジェクトの組織構成を図2に示す。日本側は千葉大学が研究代表機関となり、山崎文雄が研究代表者とG5のリーダーを務め、中井正一がG1のリーダーを務めた。主たる共同研究機関としては、東北大学 (G2: 越村俊一), 建築研究所 (G3: 斉藤大樹), 東京工業大学 (G4: 翠川三郎) が加わり、さらに多数の研究機関の研究者が参加した。

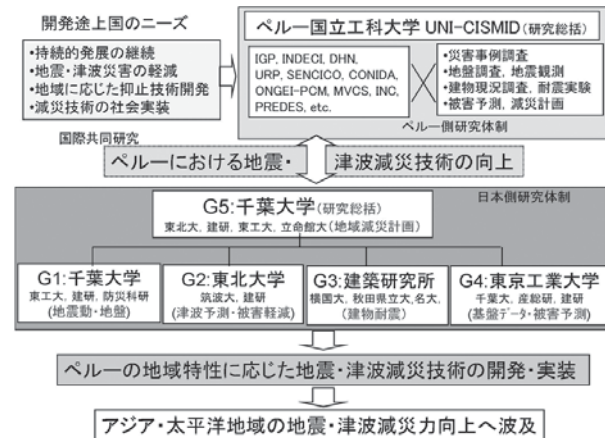


図2 ペルー地震・津波減災プロジェクトの組織構成

ペルー側はUNI-CISMIDを代表機関として、Carlos Zavalaを研究代表者として、CISMIDの研究者が多数参加した。このほか、地球物理庁 (IGP), 市民防衛庁 (INDECI), 水理航行部 (DHN), 航空宇宙研究開発委員会 (CONIDA), 防災研究センター (PREDES), 文化庁 (INC),

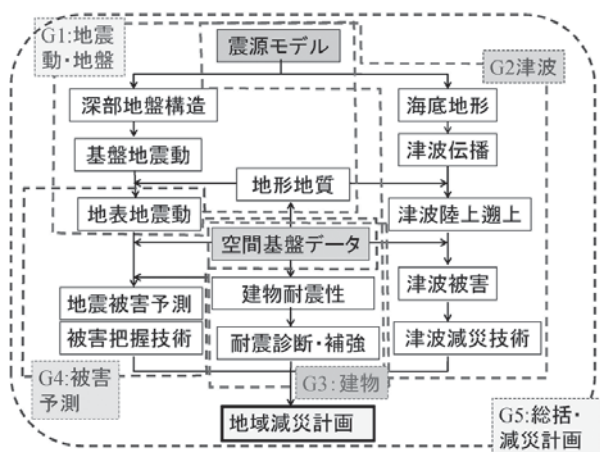


図3 研究項目とその関係および各グループの分担

住宅建設衛生省 (MVCS), 国立建設産業訓練機構 (SENCICO), Ricardo Palma 大学 (URP), 国家電子情報局 (ONGEI-PCM), さらに対象地域の自治体などの技術者・実務者が参加した。

研究項目とそれらの関係を図3に示す。震源モデルから始まり、地震動や津波を予測し、建物耐震性を評価し、被害予測と減災計画立案という、一連の防災研究の流れとなっている。

4. プロジェクトの実施内容

4.1 地震動予測と地盤ゾーニング

リマ首都圏と南部のタクナを対象に、地震観測や微動観測を通じてこれら地域の深部地盤構造を把握するとともに、表層地盤ゾーニングを行った。また、歴史地震の被害記録や近年の地震記録の分析に基づき、発生が懸念されるプレート境界型巨大地震を設定し、地震動予測を行った。また、地形・地盤構造に着目した斜面の震動特性についても検討した。

ペルーではプレート境界付近における海溝型巨大地震が頻発することを考慮し、IGP, CISMID と共同で1746年ペルー中部地震、1868年ペルー南部地震の2つの巨大地震を選定した(図4)。このシナリオでは、これらの地震と同等のものが周期的に起こると仮定しており、ペルー中部では長さ約500km、幅約160kmの震源域を持つ M_w 8.9の震源モデルを設定した。Inter-Seismic Cou-

pling (ISC) 手法の結果、2つの強く固着しているプレート境界の領域の存在が示唆され、1つはリマの沖合でもう1つはピスコの沖合にある(図5)。広帯域震源モデルを構築し、空間的なランダム位相を使うことにより、12の広帯域すべり震源モデルを作成し、9つの異なる破壊開始点(図5の星印)を仮定し、合計108の断層破壊シナリオを計算した³⁾。最終的に、シナリオ地震によるリマ首都圏における地震動のPGA, PGV(最大地動加速度, 速度)の分布を求めた。図6はすべての想定破壊開始点についてのPGAおよびPGVの平均値分布である。平均値+標準偏差を用いた場合には、PGA, PGVがそれぞれ1G, 100cm/sを超えた地点もある。

また、微動観測と地震観測による表層地盤増幅特性の検討結果に基づき、リマ市全体における表層地盤の固有周期と増幅率のマイクロゾーニング図を作成した(図7)。

4.2 津波予測と被害軽減

ペルーにおける既往の地震津波災害履歴と被害の状況を検証し、発生位置・規模・被害・復興状況についての基礎情報をまとめた。次に、地域ごとの津波予測を行うための海底・陸上地形、土地利用、建物のデータを整備し、既往地震や想定地震に基づく津波伝播・浸水シミュレーションを実施した。この結果に基づき、ペルーにおける津波災害の被害および社会的影響を評価した。

代表的な成果としては、リマの沿岸部を対象領域として、津波の陸上遡上に伴い発生し得る建物被害とインフラ被害を推定した。津波遡上シミュレーションから得られる津波外力(波高・浸水深・流速)と、津波外力に応じた被害率曲線を組み合わせ、津波氾濫流により発生し得る家屋被害の棟数と程度を推定した。地震シナリオとしては、最新のプレートのカップリングを考慮した12ケースのシナリオと、既往最大とされる1746年の津波記録から復元したシナリオを採用し、それぞれに対する津波浸水解析を行った。その結果を図8に示す。上記の結果を用いて、Callao市La Punta地区の建物被害推定を行った(図9)。東日本大震災の事例から得られた被害関数を適用

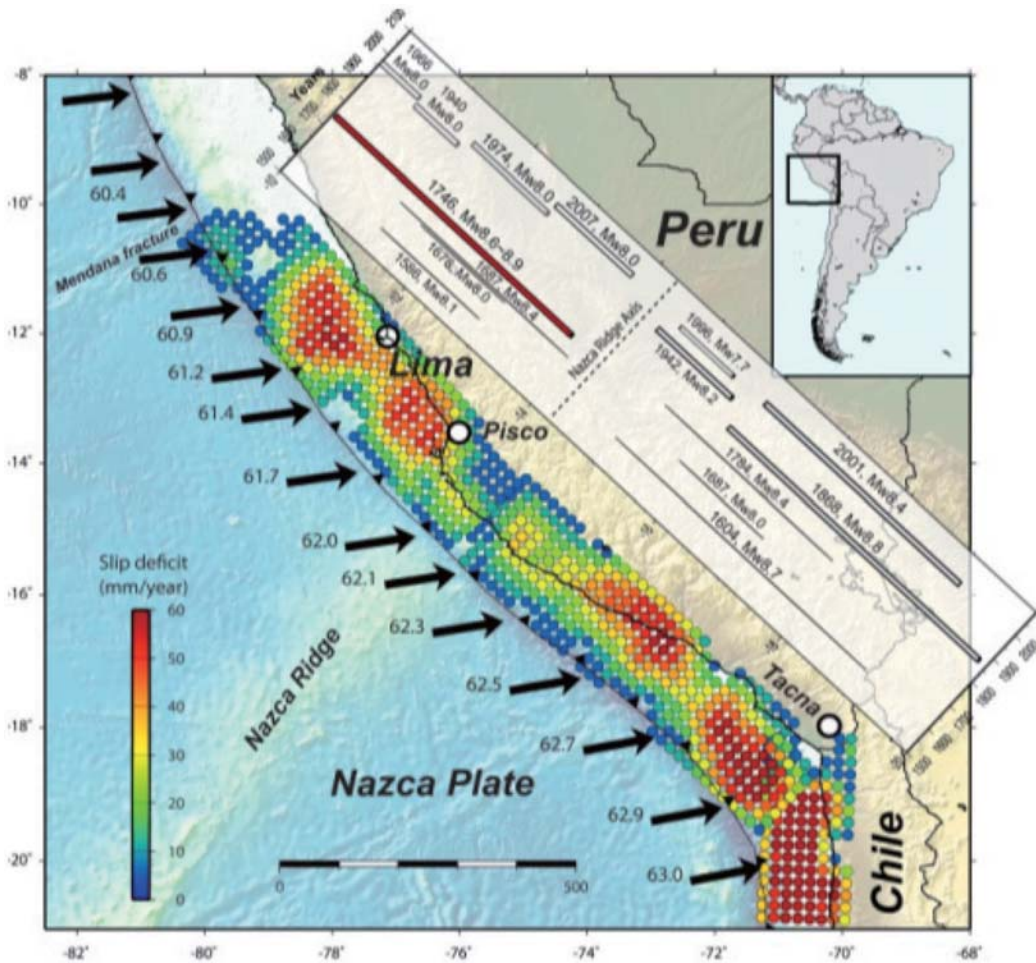


図 4 ペルーにおける測地測量³⁾ から得られたプレート境界のすべり遅れ分布とナスカ沈み込み帯に沿った歴史地震の範囲

して、予測した津波浸水深に対する建物被害の有無を推定することができた。

次に、津波浸水予測結果を用いて、Callao 市 La Punta 地区での避難計画をマルチエージェントシミュレーションにより評価した。さらに、社会実装の一環として、CISMID, INDECI, DHN および Callao 市の協力を得て、La Punta 地区の避難訓練を実施し、児童を含む市民約 2,000 人（地区人口の 40%）の参加を得ることができた（図 10）。

4.3 建物の耐震性向上

ペルーの都市および地方の建物現況調査および過去の地震被害分析等から、都市・地域の建物群の脆弱性を評価し、その耐震化戦略を構築した。次に、耐震性向上のための補強技術を開発し、その効果を構造実験や数値解析により検証した。ペ

ルーの建物は、都市部では鉄筋コンクリート造や組積造が、山村部などでは日干しレンガ造などが多く、さらに歴史的建築物や世界遺産も数多いことから、それぞれの構造様式・用途に応じた耐震性向上を目指した。

代表的な研究成果としては、ペルーの建物構造種別に応じた耐震診断法および耐震補強技術を開発し、都市・地域の建物群の脆弱性評価と耐震化戦略に繋げた。また、リマ市内の複数の建物に強震計を設置し、地震時の建物性能をモニタリングするシステムを構築した（図 11）。

また、CISMID に構造実験装置を搬入し（図 12）、ペルーに特徴的な低靱性 RC 壁の破壊実験を行い、その部材性能を明らかにした。また、煉瓦壁の面外崩壊挙動を解明するための振動台実験と個別要素法を用いた解析手法の開発を行い（図

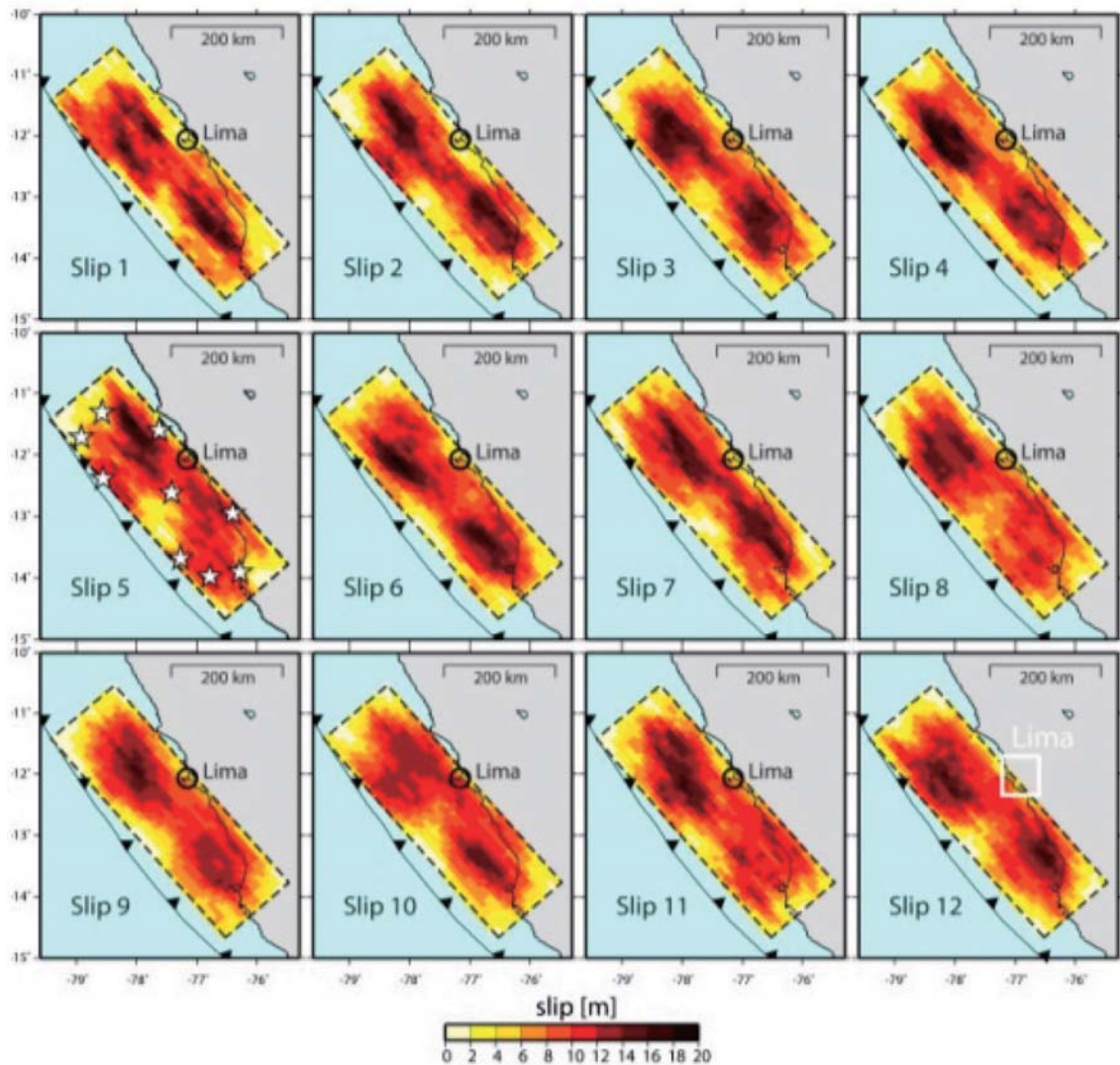


図 5 広帯域震源モデル³⁾

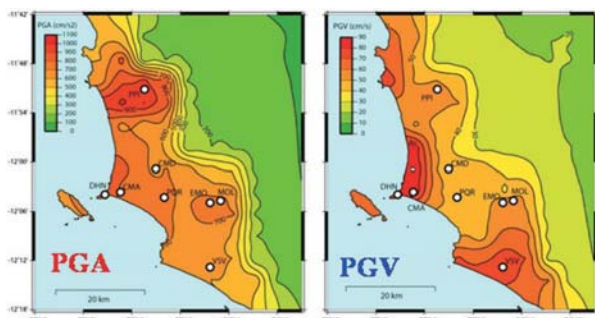


図 6 リマ市の想定地震シミュレーション結果 (Slip 5 の平均)

13), 高度な耐震診断を可能とした。さらに, 低靱性 RC 壁の補強方法として, 炭素繊維シートを部分的に用いた安価な補強技術を提案し, その性

能検証実験を行った (図 14)。

4.4 空間基盤データ構築と被害予測

リモートセンシング技術を利用して, 建物台帳データを構築するとともに, 衛星画像の立体視による広域での標高・地形モデルを構築した。また, 2007 年ピスコ地震の前後の衛星画像を用いて被害検出を行い, 現地調査結果と比較して被害把握手法の適用性を検証した。これらのデータを用いて, シナリオ地震に対する被害予測を行った。

具体的な成果としては, 国勢調査統計データや現地調査した建物情報および衛星画像に基づき作成した数値表層モデル (DSM) を利用して, 建物高さや構造形式を考慮した世帯数の推定手法を提案し, リマ市全域について建物台帳データを構

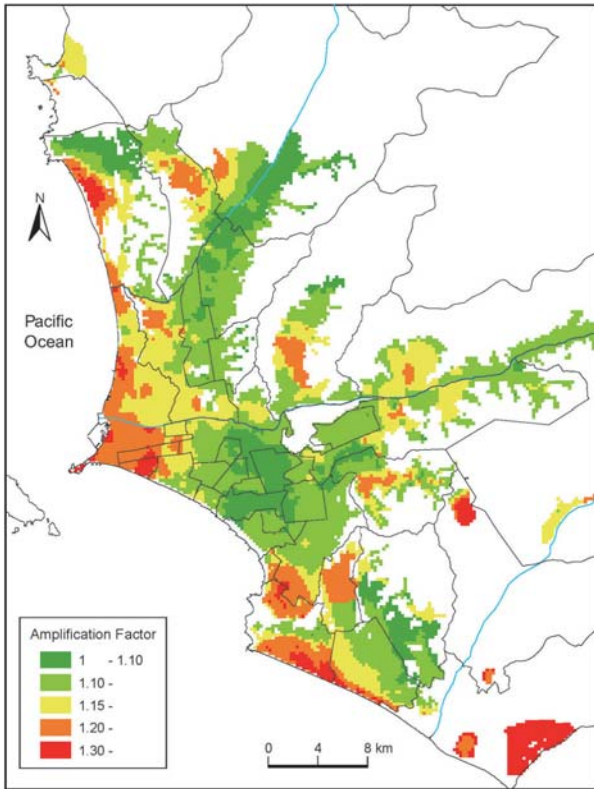


図 7 推定されたりマの表層地盤増幅特性

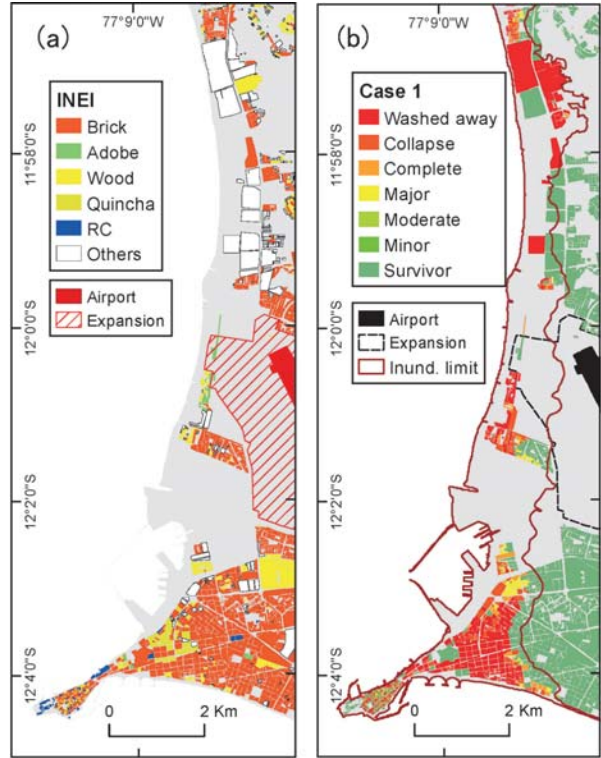


図 9 (a) 建物構造別分布と (b) 推定津波被害分布

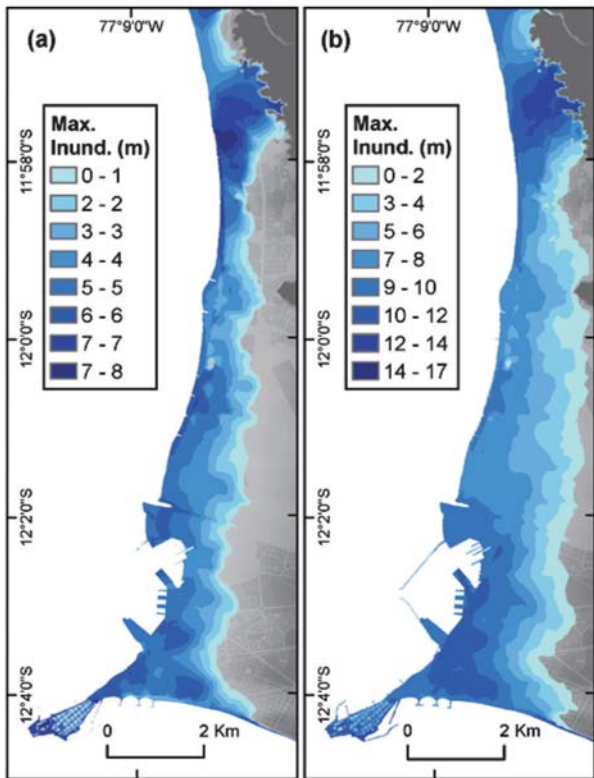


図 8 想定地震シナリオによる津波の予測浸水深 (a) Pulido *et al.*³⁾ のシナリオ, (b) 1746 年地震の復元



図 10 (a) Callao 市 La Punta 地区の避難訓練のバナー, (b) 海軍学校校舎への避難状況, (c) 避難訓練後に開催された市長や関係者との協議の様子

築した。図 15 は、構造形式や建物高さごとに構築した建物台帳データの一例として、全建物に対するアドベ造および耐震性の低い組積造建物の割合を示したものである。

また、衛星搭載の合成開口レーダ (SAR) 画像を利用したペルーにおける地震被害域の早期かつ半自動的な把握技術手法について検討した。2007 年ペルー地震のピスコ市における建物被害

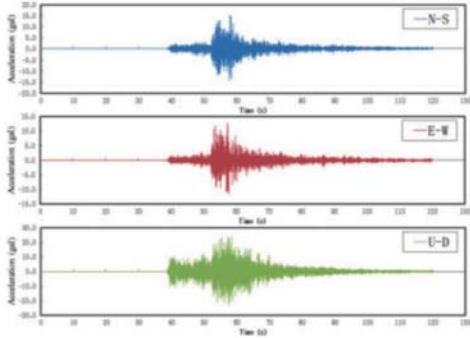


図 11 リマ市内の複数建物へのネットワーク強震計の設置。日本からもインターネット経由で地震時建物挙動をモニタリング可能

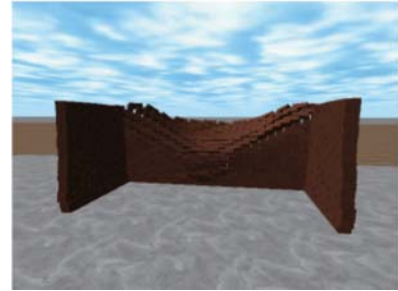


図 13 煉瓦壁の面外破壊挙動を再現する振動台実験（上）とそのシミュレーション解析（下）



図 12 CISMID に導入した油圧式加力システム



(a) 補強無し (b) 全体補強 (c) 部分補強

図 14 炭素繊維シートを用いた RC 壁の補強実験

の現地調査データを活用することで、ペルーの構造物や被害の特徴を考慮した建物被害率の推定手法に改良した。ALOS PALSAR 画像から推定した建物被害率の分布を図 16 に示す。さらに地震の震度情報に基づく被害関数と統合し、より精度よく建物被害率を推定するモデルへと拡張した。

これに加えて、リマ首都圏の地震被害予測を

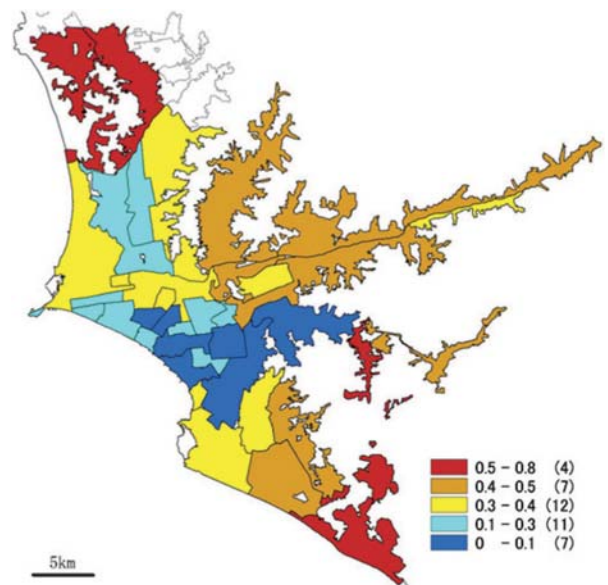


図 15 国勢調査統計データ、衛星画像および現地調査による建物情報を利用して構築した建物台帳データ（全建物に対するアドベ造と耐震性の低い組積造建物の割合の分布）

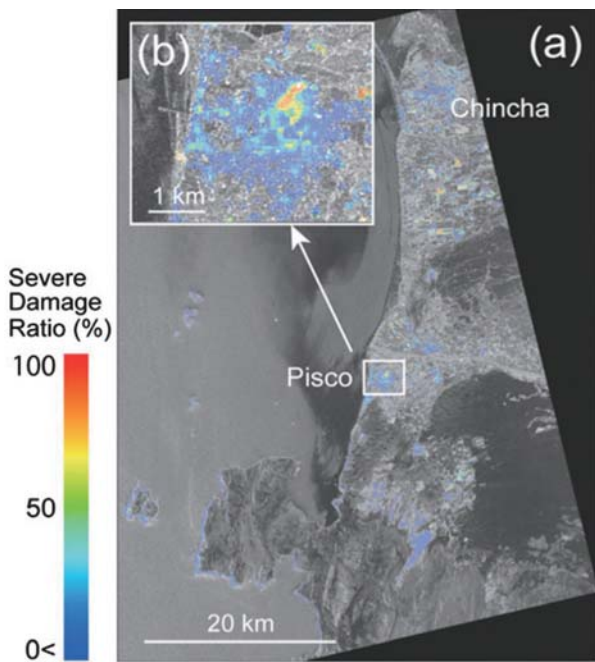


図 16 ALOS PALSAR 画像による 2007 年ピスコ地震の建物被害率推定

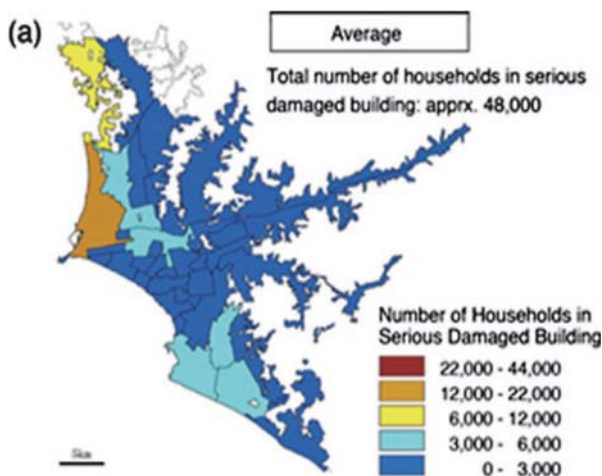


図 17 想定リマ沖地震に対する被害予測結果

行った。PGA の平均値を入力した場合の大被害世帯数の分布を図 17 に示すが、PGA が相対的に大きい地域および耐震性が低い組積造建物が多く分布している地域で大きな被害が予測された。

4.5 地域減災計画

シナリオ地震に対する被害予測結果にペルーの生活習慣や文化に起因する地域特性を考慮して、ペルーの研究機関と共同でリマにおける将来的な地域減災計画のあり方をシナリオ・シミュレーションにより検討した。リマでは 20 世紀後半に、

地方からの居住者が急増してきたが、多くは不法滞在者となり、都市整備の行われていない地区に住み、劣悪なスラム街を形成してきた。こうして拡大してきたリマの人口増加傾向を考慮して、将来的な土地利用と耐震化等の施策による減災効果を評価した。

過去 10 年間（2003～2013）の人口の自然増加傾向を用いて、2030 年における人口を推計した。そのうえで、減災戦略として、(X1) 建物耐震化（耐震化率 20% と、60% の 2 パターン）と (X2) 土地利用規制（全規制、半規制、規制なしの 3 パターン）の 2 つの政策を設定した。また減災効果を推定するために、(X3) 地震シナリオ（地震の有無）を設定した。シミュレーション・モデルにより、減災戦略全 6 パターンの地震の有無による地区ごとの脆弱性（人口と建物）を推定した。リマ首都圏の行政界区分を考慮し、それらを 30 地区に分割した。入手したデータを利用して、当該地域の土地利用、人口、建物の脆弱性、土地価格等を地区ごとに算出したうえで、分析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 厳格な土地利用規制を布いた場合、中央部の人口増加が抑制され、人口は郊外に分散される。また地震後に、人口は東部と北部の郊外地区に移動する。
- 2) 耐震化が成功すれば、人口急増地区において脆弱な建物の比率を有効に低下させることになる。逆に耐震化がうまくいかないと、被災後の脆弱な建物比率をいっそう増加させてしまう。
- 3) 厳格な土地利用規制を布いた場合、脆弱な地域に住んでいる人口を低減させることができる。また地震の発生は、すべての地区で脆弱地域の人口を増加させる傾向がある。

5. 研究成果のまとめ

当初設定した研究目標は、ほぼ達成することができた。各グループにおける共同研究の成果は、原著論文（和文誌 9 件、英文誌 51 件）を始めとして、国際学会論文 86 件および主要な国内学会論文 31 件などの成果をあげることができた。と



図 18 キックオフ全体ワークショップ (2010年3月リマで開催)



図 19 第2回全体ワークショップ (2011年3月千葉市で開催)

くに本プロジェクト^{4,5)}で Journal of Disaster Research 誌に2度にわたって特集号を発行できたことは、この成果につながったものとする。

本プロジェクトの最大の成果としては、準備研究も含めると6年間にわたる共同研究において、日本、ペルー2国間の研究機関、政府防災機関の間で、強い人的な繋がりができたことをあげたい。とくにペルーから、文部科学省国費留学生(博士後期課程)をSATREPS枠で5人、その他で2人受け入れることができたことは、将来にわたって両国の交流を続けるのに大いに役立つものと思う。また、日本から短期派遣した研究者は延べ80人を数え、その半数以上は40代以下の若手研究者や大学院生であり、今後の交流を続ける礎になると期待している。

具体的な成果としては、複数の最新の実験・観測機器をペルー側に提供したことで、先方の研究体制の飛躍に繋がった。たとえば、CISMIDに提

供した地震計10台を中心とする観測網で得られた地震記録は、ペルーで初めてインターネット上で公開されている。また、具体的に提示した地震動予測や地盤ゾーニングは、ペルーの国の基準に反映されることになった。新たに提供した構造実験設備を使って、すでにペルーに特有な建築構造形式の実験が行われ、耐震基準の見直しに取り入れられる見込みである。また、地震防災に関するソフト技術も、ペルー側に多数伝授された。たとえば、震源断層モデルによる地震動シミュレーション、津波の伝播・遡上シミュレーション、避難シミュレーション、建物の崩壊シミュレーション、リモートセンシングと現地調査による建物台帳構築技術、都市施策効果シミュレーションなどは、これまでペルー側に経験のないもので、今後これらの技術をペルーの実情に沿うように、防災実務へ適用していくことが期待される。

プロジェクトの進捗を確認するために、毎年3月にペルーと日本で交互に計5回、全体ワークショップを開催した(図18, 19)。この全体ワークショップに合わせて、また8月に開催した合同調整会議に合わせて何度も公開シンポジウムを開催し、広報普及活動に努めた。とくに、2013年8月にLa Puntaで実施した津波避難訓練は、メディアなどからも大きく注目された。また2014年3月には、SATREPSチリ・プロジェクトと合同で、東京にて「中南米地域の地震・津波防災に関する国際シンポジウム」を開催し、本プロジェクトの成果の中南米諸国への展開を図った。

謝辞

本研究の実施に当たっては、JICA 地球環境部、同ペルー事務所、JST 地球規模課題国際協力室、在リマ日本国大使館など、多数の方々のご支援を受けたことを記す。

参考文献

- 1) Chlieh, M., de Chabalier, J.B., Ruegg, J.C., Armijo, R., Dmowska, R., Campos, J. and Feigl, K.L. 2004. Crustal deformation and fault slip during the seis-

- mic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations. *Geophys. J. Int.*, **158**, 695-711.
- 2) USGS. 2007. Poster of the Ica, Peru Earthquake of 15 August 2007—Magnitude 8.0, Earthquakes Hazard Program USGS.
- 3) Pulido, N., Aguilar, A., Tavera, H., Chlieh, M., Calderon, D., Sekiguchi, T., Nakai, S. and Yamazaki, F. 2015. Scenario source models and strong motion for future mega-earthquakes : application to Lima, Central Peru. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 368-386.
- 4) Yamazaki, F., Zavala, C. *et al.* 2013. Special issue on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru. *J. Disas. Res.*, **8**, 224-234.
- 5) Yamazaki, F., Zavala, C. *et al.* 2014. Special issue on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru (II). *J. Disas. Res.*, **9**, 916-924.

山崎文雄

[やまざき ふみお]

現職 防災科学技術研究所災害過程研究部門主幹研究員/千葉大学名誉教授

略歴 東京大学大学院修士課程修了。清水建設株式会社大崎研究室研究員，東京大学生産技術研究所助教授，千葉大学大学院工学研究科教授を経て，2019年4月より現職。工学博士

研究分野 都市インフラ，地震工学，防災科学

