

2006年7月17日ジャワ島南西沖地震津波による 被災状況と土砂移動現象

七山 太¹⁾・斎藤 文紀¹⁾・Said Aziz²⁾・Jamal, ST²⁾

1. はじめに

2006年7月17日, インドネシア・ジャワ島南西沖を震源としたM7.7の海溝型地震が発生した. その約1時間後に津波がジャワ島南岸を広く襲い, パンガンダランを中心に死者660名を越える惨事となった. ジャワ島では5月27日ジャワ島中部地震 (M6.3) に引き続いての大規模地震災害であり, インドネシアの人たちは大きな衝撃を受けていた.

同7月24~26日, 地質情報研究部門・沿岸都市地質研究グループの斎藤文紀と七山 太は, 西ジャワ州バンドゥーン市にあるインドネシア地質調査センター (Pusat Survei Geologi) に招かれて, 沿岸堆積作用と津波堆積物に関する普及セミナーを行うために渡航した. この直前に今回のジャワ島南西沖で地震津波が発生したことを受け, 今後, 日本とインドネシアの2国間でどのような共同研究ができるかを把握するために, 急遽インドネシア地質調査センターの協力を得て, 3日間, 津波被災地3ヶ所を視察した(第1図).

本稿が執筆された時点(2006年12月)において, 既

に米国海洋大気庁(NOAA), 米国地質調査所(USGS)等の各国の津波研究機関および土木学会, 日本地震学会, 東京大学地震研究所, アジア防災センター, 港湾空港技術研究所等の日本の研究機関からこの津波被害に関する情報が多数発信されているが(例えば, ジャワ島南西沖地震・津波災害現地調査団, 2006; 加藤ほか, 2006; 辰巳, 2006; 都司ほか, 2006; Widjo *et al.*, 2006), これらの報告では, 震源解析を目的とした津波波高分布調査や人的被害状況, 構造物の被災状況の把握およびGPSを用いた地震後の地殻変動観測が主要な内容となっている.

本稿では, 始めに第四紀地質学者もしくは堆積学者の視点から見たジャワ島南西沖地震津波の被害状況と津波による土砂移動現象について論じたいと思う. これに併せて, 5月のジャワ島中部地震によるジョグジャカルタ都市圏の被害状況にも若干ふれてみたい. 最後に, 今回のインドネシア渡航を踏まえた今後のインドネシア地質調査センターとの相互協力の可能性について私見を述べることにしたい.



第1図

インドネシア・ジャワ島および周辺海域の地形とテクトニクスおよび調査地点位置図. USGS (2006) の発表したジャワ島南東沖地震 (M7.7) およびジャワ島中部地震 (M6.3) の震源を★で示す. 基図にGoogle Earthを使用した.

1) 産総研 地質情報研究部門
2) インドネシア地質調査センター (Pusat Survei Geologi)

キーワード: 2006年7月ジャワ島南西沖地震, 津波被害, 土砂移動, ジャワ海溝, ジャワ島, 2006年5月ジャワ島中部地震, ジョグジャカルタ, インドネシア

2. 2006年7月17日ジャワ島南西沖地震・津波被害状況報告

ジャワ島は首都ジャカルタが位置しインドネシア総人口の52%が集中するこの国の中枢であり、しかも我が国と同じ島弧-海溝系のテクトニックセッティングをもつ地震火山災害多発地域でもある。ジャワ島南方沖のインド洋に位置するジャワ海溝では、ジャワ島が位置するユーラシアプレートに対して7cm/年の速度でインド・オーストラリアプレートが沈み込み、これによって頻繁に海溝型地震とこれに伴う津波が発生している。今回の震源地周辺の海域においても、数十年に一度、M6クラスの地震が繰り返し起きていることが知られていた。

現地時間7月17日15時19分(日本時間と同じ)、ジャワ島南西沖200km地点、深さ10km地点において、M7.7の海溝型地震が発生した(第1図)。その約1時間後に津波が発生し、ジャワ島中部のインド洋に面した海岸一帯(西ジャワ州東部~中部ジャワ州~ジョグジャカルタ特別州)が広範囲に被災し、総計660名以上が亡くなった(7/25付けの現地新聞に掲載)。以下に、我々が現地視察を行った3地点で得られた情報を記述する。

2.1 カリプカング

カリプカングは西ジャワ州チアミス県の東縁に位置する小さな集落であり、このうちインド洋に面した海岸低地のみが今回の津波によって被災した。この地にあった44軒の住居のうち42軒が津波によって大破し、この際26名が死亡した。我々が現地を視察した時点で被災後10日が経過していたが、次の津波を警戒して、山間部でテントによる避難生活をおくっている人を道路脇で見かけた。現地住民に確認したところ、この地を襲った津波は1波のみで、“弱い地震の後、大きく海面が後退し、突然津波が襲来した!”との証言を得た。

我々が現地に到達した時点で、被災地の後片付けが住民によって開始されつつあった。そのために、その時点まで津波の痕跡は人工改変を受けずに残されていた。この地を襲った津波の波高は、海岸付近の椰子の木や2階建ての家屋に残された痕跡から4~5m程度と推定できた。津波浸水域は破損した住居や浮遊物の帯状の分布から145m程度と推定された(第

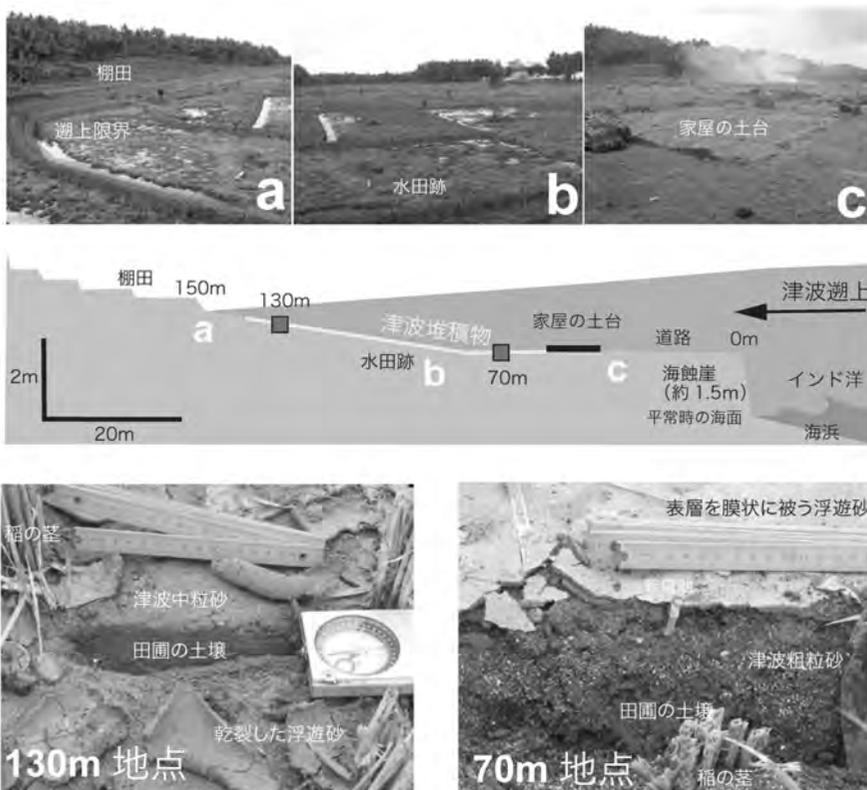
2図)。但し、この付近の海岸にはインド洋の波浪によって生じた高さ1.5m程の海蝕崖が広域に広がっており(第2図)、これが防潮堤の役目を果たしたために、津波の波高と遡上範囲はこれでも低めの値となっていると想像される。

破壊された住居跡の背後には水田が、その背後の丘陵地斜面には棚田が作られていたが、津波は棚田基部付近まで遡上していたことが浮遊物の帯状分布と稲の枯れ方から判断できた(口絵a)。水田跡には衣類や生活用具、家屋の残骸が散在し、窪みには未だに海水が滞水し、その縁には塩が晶出しているのが観察された。

我々が水田跡の表層を掘ってみると、一面に不洩汰な黄色の砂泥層で被われていることが確認できた(口絵c)。その層厚は微地形によって明瞭に支配されており一定では無いが、最大8cm(70m地点)であった。この砂泥層には、住居起源の人工物(瓦、ブロック、柱、衣類、生活用品等)および沿岸~浅海域からもたらされた珊瑚の岩塊、魚、ウニ、ヒトデ、カニ、ゴカイ等の現生の海棲生物遺骸が雑多に散在しており(口絵e, f)、今回の津波遡上によって生じた津波堆積物と認定できた。

津波堆積物は主に海浜砂からなり、珊瑚や貝殻起源の石灰質粒子が散在していた。その層厚と粒径は遡上方向に向かって明確に減衰し、浮遊物の集積帯が示す津波の遡上限界(145m地点)手前の130m+地点まで分布していることが確認できた。現地において津波堆積物は、下位の主体を成す中~粗粒砂層とその表層を薄く膜状に被う泥質な細粒砂層に明確に区分され(第2図、口絵d)、さらに後者は級化構造が明瞭なものと塊状なものに区分された。

これらの産状から、この地の津波堆積物は以下のような過程を経て堆積したものであろう。①津波遡上時に沿岸~浅海域の底質が大規模に浸食され陸域にもたらされて、津波堆積物の起源となった。②陸域においても土壌(泥質な細粒砂)を攪拌しながら遡上流(upflow)として130m+付近まで粒子を運搬した。③この際、津波堆積物の主要をなす中~粗粒砂は掃流粒子として運搬され、流速の減少に伴い粗い粒子から定置し、級化構造が生じた。表層の泥質細粒砂は懸濁粒子として運搬され、海水滞留時に下位の中~粗粒砂をマッドドレープとして被ったものだろう。この場合、主要な堆積場は窪地となっている水田跡で



第2図 カリプカングの被災状況と堆積現象から推定される津波遡上過程。
 (a) 津波の遡上限界地点付近においては、流木、草やゴミ等の浮遊物が帯を成している。棚田には海水が流入せず、稲が生き残っている。
 (b) 水田跡は黄色い津波堆積物によって広く被われている。
 (c) 海岸付近の家屋は大破し、基礎だけが辛うじて残っている。家屋の残骸は背後の水田跡に散乱している。図の下段に汀線から70m地点と130m地点における津波堆積物の層相の比較を示す。

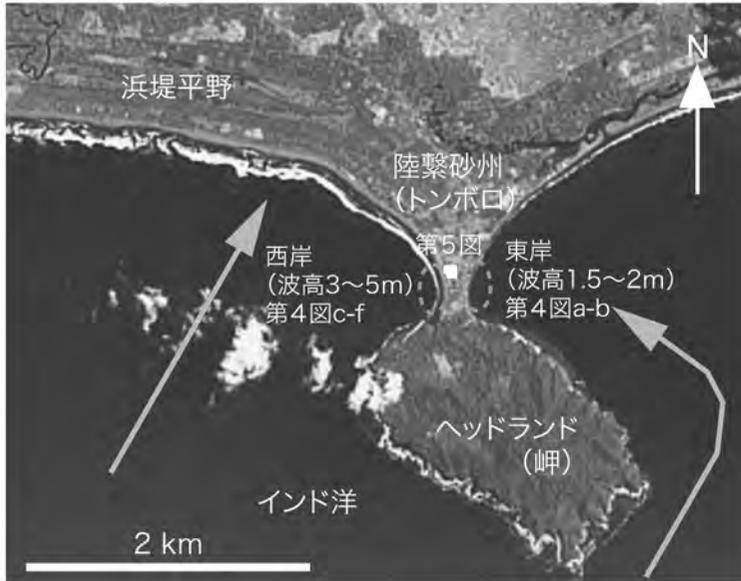
あり、この為戻り流れ (backwash) による再堆積作用は受けなかったと推測される。但し、海岸付近には海側に倒れた草や戻り流れを示唆する洗掘構造が多数認められており、これらは戻り流れの存在を明確に示している(口絵b)。

2.2 パンガンダラン

パンガンダランは西ジャワ州チアミス県最大の観光地であり、ここでの犠牲者数は350名を越え被害の中心となっている。市街地は、国立公園となっているヘッドランド(岬)から伸びた陸繋砂州(トンボロ)上に位置している(第3図)。津波はこの砂州の東岸と西岸の両方を襲った。西岸は津波の直接の襲撃を受け、東岸はヘッドランドを回り込んで来た津波によって襲

われた。その為、津波の被害や浸水規模は西岸の方が有意に大きい。津波波高は東岸で1.5~2m程度、西岸ではその倍の3~5m前後であった。戻り流れによる沿岸浸食の規模も波高に比例し、東岸では0.3~0.5m程度、西岸では0.5~0.8mであり局所的に1mを越える場所もあった(第4図、口絵ji)。これら強い戻り流れによって浸食・運搬された多量 of 海浜砂は、パンガンダラン東西それぞれも海岸の沖合で再堆積しているものと推測される。

特に被害の大きかったパンガンダラン西岸の標高は2.5m以下であり、浜堤の発達も認められない。ここでは津波は海岸沿いの椰子の木の半分ほどの高さ(3~5m)で侵入し、海岸沿いの道路付近で一度碎波し、約1.5mの遡上流となって市街地を襲ったらしい。



第3図

パンガンダラン付近の地形図。矢印はパンガンダラン東岸及び西岸をそれぞれ襲った津波の流れの向きを推定したもの。基図にGoogle Earthを使用した。

この為か、道路より海側では2階部分も被災した構造物が認められるが、市街地側では1階部分のみが浸水し2階は窓ガラスすら割れていないほぼ無傷であった住居が数多く認められた(第5図)。その浸水距離は100~200m程度と見積られる。特にこの地では、地震による家屋倒壊や液状化現象等は全くと言ってよいほど見受けられなかった点は、地震津波被災地としては不思議な風景であった。

パンガンダラン西岸の被災地において、住民5~8名に聞き取り調査を行ったところ、以下の2点の重要な現地情報を得た。

- (1) 津波は、通常感じる程度の規模の大きくない地震があった約5分後に来襲した。津波の約1時間前に発生した本震は感じなかった。
- (2) 津波はほぼ連続して襲来していたが、少なくとも2回の津波遡上があった可能性が高い。1波目は3m程、2波目は5~6m程の波高であった。両者の間隔は3分ほどであった。第2波が携帯電話のビデオに記録されており、その時刻は、現地時間で16時16~18分であった。浸水後、10分ほどで海水は急速に引いた。

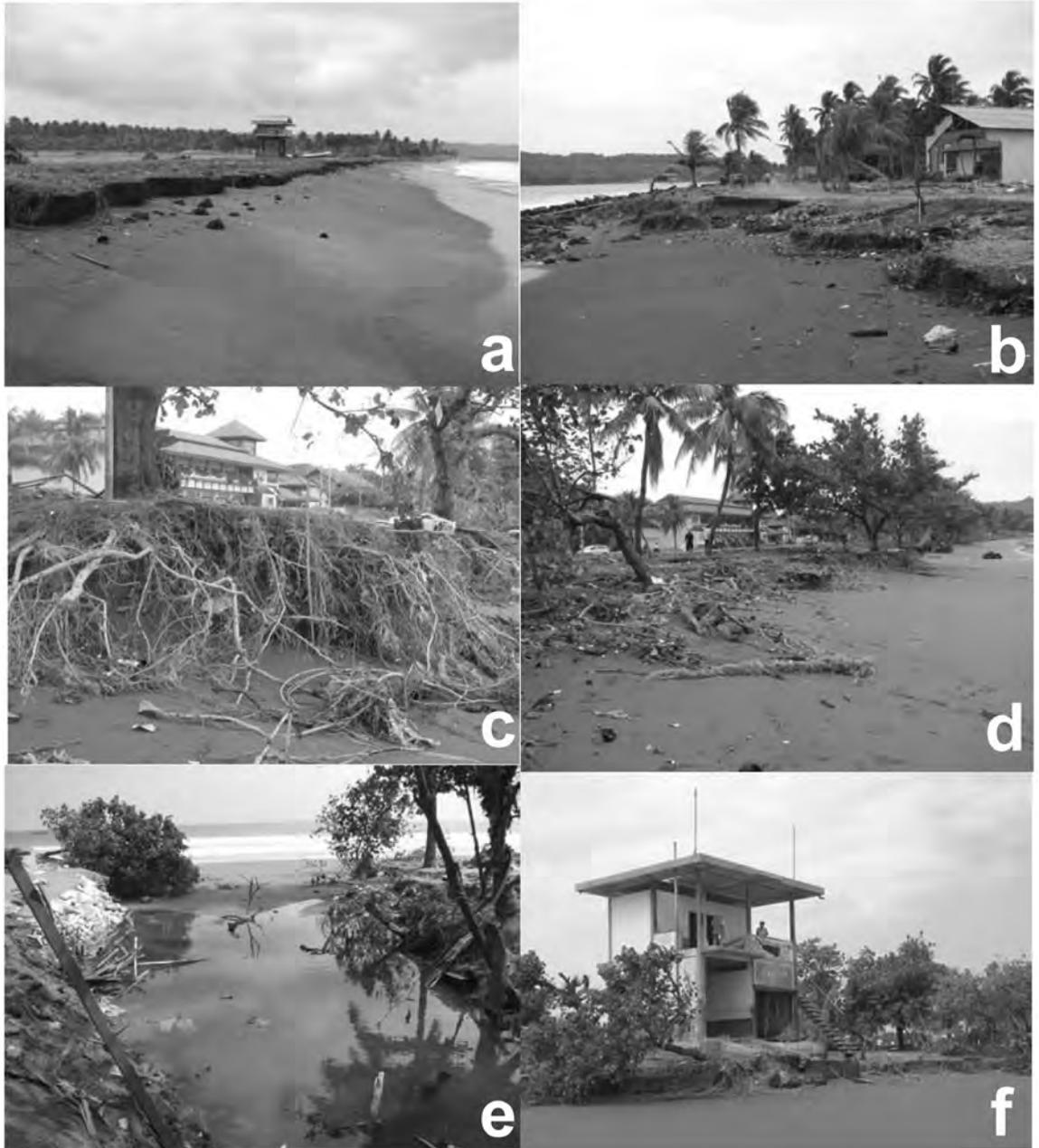
我々の知る限り、本震後の余震で比較的大きなものは、16時13分に起こっていることから、実は現地の人を感じた地震はこの大きな余震のみで、その直後に津波が来襲したものと推定される。よってこれらの

現地情報および被災地の状況は、今回の地震がいわゆる“津波地震”であったとする学説(例えば、Ammon *et al.*, 2006; Fujii and Satake, 2006; 八木, 2006)を、支持しているように私たちには思える。

なお、パンガンダランの西方の地域では、インド洋の強い風波による標高3mを越える浜堤列(=砂丘列)の発達が認められ、それが防潮堤の役目を果たすことによって、被害が比較的少なかったとの現地情報を得た。

2.3 パランガトゥリティス

パントゥール県はジョグジャカルタ特別行政州南方に位置する。今回の津波到達地域東端に位置し、波高が1m以下であり、海岸に5mを越える浜堤列が発達する為に、今回の津波では大きな被害が無かったらしい。但し、パランガトゥリティスの海岸には旅行者向けのリゾート施設があり(第6図)、ここでは僅か0.5~1m程度の波高ではあったものの80m余りも浸水し、この際、旅行者3名が津波に飲み込まれて死亡した。我々が見たところ、この原因はこの施設が浜堤の無い河口付近に位置していたためであり、例えその波高が1mに満たない小津波であったとしても、地形条件によっては危険であることがあらためて実感できた。



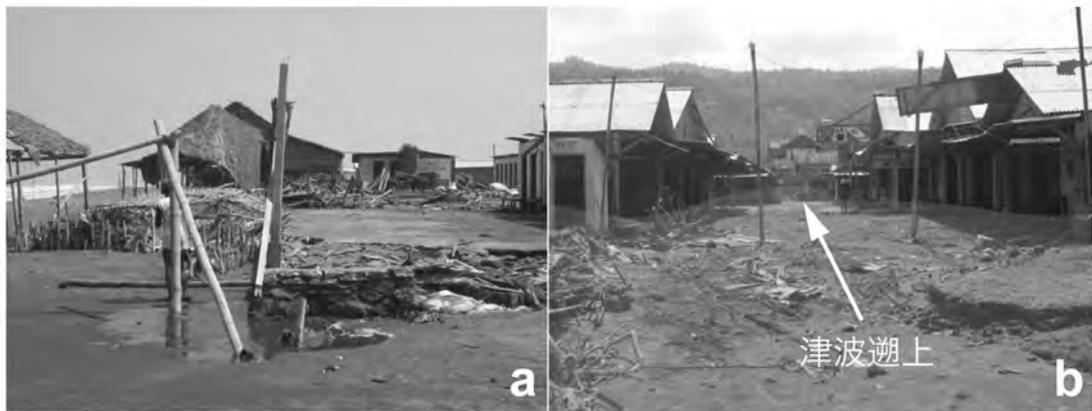
第4図 パンガンダランにおける津波堆積現象。

- (a, b) 東岸の戻り流れによる沿岸浸食の状況。海浜の浸食量は0.3～0.5m程度であった。
- (c, d) 西岸の戻り流れによる沿岸浸食の状況。海浜の浸食量は0.5～0.8m程度、局部的に1mを越えていた。
- (e) 西岸で観察された河口閉塞。
- (f) 展望台に残る津波波高痕跡。展望台の2階部分が破壊されていることから、5m程度の波高が推定できる。さらに、その基部では戻り流れによる1m程の洗掘(沿岸浸食)が認められる。



第5図 パンガンダランにおける津波被害状況。

- (a) パンガンダラン西岸の海岸道路の復旧状況。被災から10日経過し、土砂は概ね除去されていた。
 (b) 海岸道路を越えて打ち上げられたポート。工事現場の窪地には海水が滞留し、その中には家屋の残骸が浮遊・沈積していた(パンガンダラン西岸)。
 (c, d) 家屋の被害。市街地の多くの住居では1階のみ海水の侵入によって被災していたが、2階より上は殆ど無傷であったところが多い(パンガンダラン西岸)。
 (e, f) 家屋の壁に残る泥の浸水痕跡。約1.5m程度の浸水高が確認できた(パンガンダラン西岸)。



第6図 (a) パランガトゥリティス海岸の津波被害. 1m以下の波高ながら3名もの死者が出た。
 (b) 津波は道路を通り抜け、汀線から80m遡上した。

2.4 津波現地情報のまとめ

発生直後、今回の地震が“津波地震”であったかどうかについて震源モデル研究者間で議論が行われていたが(例えば、山中, 2006), 本稿を執筆した2006年12月時点において、これに関する2編の国際誌が発表され (Ammon *et al.*, 2006; Fujii and Satake, 2006), 今回の津波が“津波地震”であった可能性は高まったように思える。今回の津波被害は、インドネシアの津波早期警戒システムの不備が問題であったことがマスコミでも取りざたされていた。これに関して私論を付け加えるならば、“津波地震を当初から想定していなかったこの国の津波警報もしくは津波防災教育のあり方自体に今後の課題が残された”と私たちは感じている。凡に、この付近では1994年6月2日にもこれによく似たタイプ? の津波が発生し、多くの被災者が出ていることは注目すべき点であろう。

ところで、過去に日本でもこの種の“津波地震”が起こっている。本邦における“津波地震”の代表例としては、1896年明治三陸地震津波(M8.5)があげられる(渡辺, 1998)。この地震の震度は2~3程度と殆ど揺れが無く、地震発生から約30分後に突然大津波が三陸海岸沿岸を広域に襲い約2万人の犠牲者が出た、この際、岩手県綾里で波高38.2m(日本最高)が記録されている(渡辺, 1998)。津波地震は我が国でも過去に起こっており将来も起こりうる現象であることを予め理解していること、即ち激しい揺れでなくても大津波は起こりうるという知識こそが、地震津波常襲地帯の住民として重要なのであろう。

一方、今回の津波では観光地であるパンガンダランだけが大きくマスコミに報道されたが、パンガンダランだけ特別に津波が高かったわけではないことが、前述した各機関による津波波高調査の結果、既に明らかにされている。大きな被害が出た地域には①浜堤列が発達していない海岸地域、②津波のエネルギーが集中しやすい河口付近、③漁業や船舶業務従事者が多い地域、等の被害が出やすい諸々の要因があった。今後、経費や時間がかかる津波早期警戒システムや防潮堤等の大型施設の構築以外にも、沿岸低地の土地利用の観点から、日本の研究者がインドネシア側に貢献できることは多々あるであろう。

3. 2006年5月27日ジャワ島中部地震によるジョグジャカルタ都市圏の被災状況

今回の津波災害の発生する1ヶ月あまり前の5月27日午前5時54分に、ジョグジャカルタ都市圏南東部の沖積低地と丘陵の境界に位置する断層帯(オパック断層)でジャワ島中部地震が発生した。今回の渡航中に、ジョグジャカルタの被災地を視察する機会があったので、以下に簡単にふれたい(第7図)。

この地震は死者5,800名以上、負傷者数も38,000人以上をもたらし、13万人が一瞬のうちに住居を失った。M6.3という地震規模に反して被害が甚大に大きかったのは、①破壊が市街地直下のごく浅い場所(恐らく10km程度)で起きた直下型地震であったこと、②地盤がジョグジャカルタ北方に位置するメラピ



第7図 ジャワ島中部地震による建造物の崩壊状況。

(a, b) ジョグジャカルタ市街地の大型建造物の崩壊例。

(c, d) ジョグジャカルタ南東部、オパック断層付近のモルタル住居の崩壊状況。

(f) 津波を恐れて山間部で避難生活をおくる被災者のテント。

火山の噴出物によって厚く被われており、脆弱であったこと、③耐久性の低い煉瓦を積み上げただけの簡素な住居が多かったことが、主要な要因と考えられている。さらに、死者が多く出たのは地震が早朝に発

生したためであり、野外に逃げ遅れて瓦礫に埋もれて圧死したものが大部分であった、とのことである。都市部にある鉄筋コンクリート製の大型建造物であっても、強度が足りなかったものは倒壊したり、壁に亀

裂が生じていた。これらは当初から地震を想定して建設されたものでないことは明確である。

スマトラ島から遠く離れたこの地でも2004年12月インド洋津波の影響があり、被災者は地震後、津波を恐れて丘陵地に向かって逃げ惑ったとの話もある。地震後、2ヶ月が経過していたが、海岸付近に生活していた人は、未だに津波を恐れて内陸部に避難している人が多いと聞いた(Danisworo教授、私信)。

インドネシア側研究者による地震後の調査によれば、現時点においても地表に地震断層は発見されていない、とのことであった。なお、ジョグジャカルタは、インドネシア史上最も重要な古都であり8世紀からの歴史がある。しかし、この地を襲った直下型地震は全く知られていない。よって、この場合、このオパック断層による地震発生間隔も千年以上と見積られる可能性が高い。また、メラピ火山は、地震発生数日前にも噴火していたが、この噴火活動とは直接に関係がないと現地の研究者は考えていた。しかし、この地震が引き金となって今後火山活動が活発化することを警戒している様子でもあった。

ジョグジャカルタの地震被害はオパック断層に近い南東部の沖積低地が主であり、北方の台地側には大きな被害が無いように感じた。事実、ジョグジャカルタ近郊にある有名な世界遺産であるポルプドゥール寺院遺跡群は、殆ど被害を受け無かったことを我々も確認した。但し、もう一方の世界遺産であるプランバナン寺院群においては9世紀の寺院の崩壊など深刻な被害があり、修復の為に筑波大学などからも専門家が派遣されているとのことである。なお、地震後の構造物の倒壊状況については土木学会・日本建築学会合同復興支援団先遣隊(2006)および土木学会のホームページ内の以下のサイトに(http://www.jsce.or.jp/report/37/QuickReport_JSCE-AIJ_Rev2_20060623.pdf)に詳しい報告がある。

4. インドネシア地質調査センターとの今後の研究協力の可能性

ところで、インドネシア地質調査センターには、第四紀地質を専門とする研究者は数名いるが、津波や津波堆積物を専門とする研究者を有していない。このため、2004年12月スマトラ島沖地震およびインド洋大津波被災以降、今回のジャワ島南西沖地震津波に至



第8図 バンドンのインドネシア地質調査センターでの斎藤文紀による普及セミナーの風景。140名を越える聴衆が参加し、講演後、熱のこもった質疑が行われた。

るも、過去の津波履歴研究からの再発頻度や規模などの研究がいまだ十分に進められているとは言いがたい。したがって、同分野における先進国である日本での研究者育成(留学や研修)や、我が国からの技術提供による現地における共同研究を通じての研究者育成が切望されている。また、7月25日に行われた沿岸堆積物と津波堆積物のセミナーでも、大学からの参加者も含めて約140名が参加し、基礎的な講義内容や日本での津波研究事例に非常に高い関心が示され、人材育成に関する要望が大きいことが示された(第8図)。この点を踏まえて、われわれ地質調査総合センター側としては実施可能な具体的な協力施策等を検討する必要がある。

一方、5月のジャワ島中部地震に関しては、震源断層について地震学的な解析がなされているものの、地形・地質学的な情報が十分とは言えず、今後我が国の活断層研究者が実施しているような手法(例えば、トレンチ掘削、ボーリング掘削および物理探査)に基づいて再度インドネシア側と共同で調査を行うことも検討する必要があるかもしれない。

なお、現在、インドネシア地質調査センターでは、Said Aziz氏を中心として、2004年インド洋津波被災地のバンダアチェ付近において、今後の津波被害警鐘のために津波の遡上範囲と高さを示すモニュメントを被災地の数カ所において残すプロジェクトを実施中であり、2007年度中に終了予定とのことである。

謝辞: 斎藤文紀と七山 太のインドネシア渡航に際しては、地質調査情報センター国際担当(当時)の渡辺真人氏にお世話になった。地質情報研究部門の高田 亮氏には、インドネシアの地形地質に関する情報を渡航前にご教示頂いた。活断層研究センターの粟田泰夫氏には、ジョグジャカルタ特別州周辺の活断層についての情報を教えて頂いた。現地調査を遂行するにあたり、インドネシア地質調査センターのIr. Djadjang Sukarna氏ならびに関係各位にはお世話頂いた。西ジャワ州チアミス県内の調査ではSyarif Hidayat氏(西ジャワ州チアミス県鉱床および地下水資源管理事務所)、ジョグジャカルタ特別州内の調査にあたってはDanisworo, C.教授(University of Pembangunan Nasional)にお世話になった。丸山 正編集委員には粗稿をご校閲いただき、有益なご助言を頂いた。以上の皆様に心から感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Ammon, C. J., Kanamori, H., Lay, T. and A. A. Velasco, A. A. (2006) : The 17 July 2006 Java tsunami earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24308.
- 土木学会・日本建築学会合同復興支援団先遣隊(2006) : インドネシア・ジャワ島中部地震(速報). 土木学会誌, 91, 44-47.
- Fujii, Y. and K. Satake (2006) : Source of the July 2006 West Java tsunami estimated from tide gauge records, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24317.
- ジャワ島南西沖地震・津波災害現地調査団(2006) : インドネシアジャワ島南西沖地震・津波(速報). 土木学会誌, 91, 54-55.
- 加藤照之・伊藤武男・Hasanudin Z. Abidin・BPPT Agustan(2006) : 2006年7月17日インドネシアジャワ島南西沖地震に伴う地殻変動・津波調査概要.
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/kato717.pdf>
- 辰巳大介(2006) : 2006年ジャワ島沖地震・津波現地報告. なみふる, no. 58, 2-3.
- 都司嘉宣・韓世燮・Fachrizal・Indra Gunawan(2006) : 2006年7月17日発生のインドネシア国Java島沿岸における津波浸水高調査.
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/tsunami/javasurvey/index_j.htm
- USGS(2006) : Magnitude 7.7 - SOUTH OF JAVA, INDONESIA.
<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/usqgaf/>
- 渡辺偉夫(1998) : 日本被害津波総覧[第2版]. 東京大学出版社, 238p.
- Widjo Kongko, Suranto, Chaeroni, Aprijanto, Zikra and Sujantoko(2006) : Rapid survey on tsunami Java 17 July 2006.
http://nctr.pmel.noaa.gov/java20060717/tsunami-java170706_e.pdf
- 八木勇治(2006) : 津波地震. 地震のホヘト第2回, なみふる, no. 58, 4.
- 山中佳子(2006) : 7月17日ジャワ島の地震(M7.7). EIC地震学ノート, no.181,
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2006/EIC181.html
- NANAYAMA Futoshi, SAITO Yoshiki, Said Aziz and Jamal, ST(2007) : Preliminary reports about tsunami traces and disasters of the 17th July, 2006 Java tsunami.

<受付: 2007年1月5日>