

2006 年インドネシア・ジョグジャカルタ地震のメカニズムと被害

名古屋大学環境学研究科地震火山・防災研究センター

*安藤雅孝・Irwan Melano・木股文昭・奥田 隆・田所敬一・中道治久・武藤大介

バンドン工科大学測地工学科

Hasanuddin Z. Abidin, Bambang Setyadji, Mipi A. Kusuma, Heri Andreas, M.Gamal, Arif Rahman

Seismic source and associated damages of the 2006 May 27, Yogyakarta - Indonesia earthquake

*Masataka Ando, Meilano Irwan, Fumiaki Kimata, Takashi Okuda,

Kenichi Tadokoro, Haruhisa Nakamichi and Daisuke Muto

Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster Mitigation, Nagoya University

Hasanuddin Z. Abidin, Bambang Setyadji, Mipi A. Kusuma, Heri Andreas, M.Gamal, Arif Rahman

Dept. of Geodetic Eng, Institute of Technology Bandung

State Ministry of Research and Technology – Indonesia

Aftershocks of the 2006 Mw 6.3 Yogyakarta earthquake were located using temporal seismic stations around the seismic fault. The aftershock zone has a N50E strike with a total area of distribution of 20 km in length scattered over a width of 10 km. The seismicity is mainly concentrated between 5 and 15 km at depths. There is no obvious fault trace in the area but many cracks and fissures at the surface were observed that seemed to have been produced by the strong ground motion. An inversion of teleseismic P waveforms from broad-band seismograms was carried out also to estimate the slip distribution on the basis of the aftershock observations. Inversion results showed a major slip located about 5 km southwest of the USGS estimated epicenter. Although the distances of the heavily-damaged areas such as Bantul and Klaten are 10 to 50 km, respectively from the seismic source, the soft sedimentary soil could most likely be the major contributing factor to the very strong ground motions within the area. Field surveys to estimate damage levels at more than 600 locations were undertaken on the basis of house collapsed ratios. Heavily damaged locations in the area with dense population were mostly distributed in the western part of the fault. The subsurface fault in this area is underlain by about 200m thick young volcanic deposits from Mt. Merapi, which is likely to amplify seismic waves. Comparing the heavily damaged area with the surface-projection of maximum slip, most of the heavily damaged region is related with the amount of maximum slip during the earthquake.

§ 1. はじめに

ジョグジャカルタ州は、ジャワ島中部に位置し、広大な水田や畑地が広がり、南部はインド洋に面している。特徴的な地形は、ジョグジャカルタ (Yogyakarta) 市の北方のメラピ火山 (Merapi) と、東方を走る直線状のオパック (Opak) 断層崖 (図 1) である。断層に沿う山の高さは 300m 程度である。今回の地震で最大の被害を受けたバントゥール県 (Bantul, ジョグジャカルタ市の南東) は、この活断層のすぐ西側に位置している (図 2)。インドネシア地質調査所の地質図幅ジョグジャカルタによると、断層の東側 (隆起側) は、中新生

の火山性海成および陸性堆積物からなり、西側 (沈降側) はメラピ火山の泥流や火砕流堆積物で覆われている。なお、この地質図では、オパック断層を正断層としている。

§ 2. 余震分布と断層モデル

米国地質調査所によると、本震の発震時は、2006 年 5 月 27 日 5 時 53 分 58 秒 (世界時間 5 月 26 日 22 時 53 分 58 秒)、震央は 7.962°S, 110.458°E、深さは 10km、モーメントマグニチュード Mw6.3 である。

2.1 余震観測

本研究では、地震発生後の6月4日から4日間、臨時観測点6カ所に3成分地震計(2Hz 速度型)を設置し、余震観測を実施した。余震は数千個記録されたが、そのうち全観測点に収録された比較的大きな地震を選び、震源を決定した(図3)。この図からは、余震の深さは15km、長さは20km程度であった。余震分布は、オパック断層崖より東に数キロずれていた。インドネシア地質調査所の地質図には、2本の断層が並走しているように描かれているが、このうちの東側が地震断層に相当するかもしれない。

2.2 断層面上のすべり分布

山中(2006)による遠地P波波形解析(改訂版)では、破壊開始点は深さ20km付近から始まり、浅い方向に15kmほど進行したとされる。八木(2006)の解は、初期破壊の深さを15kmとして、破壊域は北東方向に50km伸びたとされている。

本研究でも、Kikuchi and Kanamori (1991)の手法を用いて、広帯域地震計のP波波形解析を行った。解析の対象とした記録は、震源距離30°から100°の範囲の広帯域地震記録で、ノイズレベルの大きな観測点は除いた。図3の余震分布を参考にして、断層の広がり鉛直方向および水平方向共に30km以内とした。このようにして求めた断層面上のすべり分布を図4に示した。余震分布は、地震断層の広がりをほぼ示すとすれば、本研究および山中(2006)の解が八木(2006)の解より適切と思われる。断層上の主要なすべりは、オパック断層南部の初期破壊の周辺に集中している。さらに北に伸びた破壊領域(図4の右下の深さ22km付近)が分布するが、ここでの地震モーメント放出は、10~20%程度であり、解析上生じたノイズに過ぎないだろう。波形解析から得られたモーメントマグニチュードMwは、6.3である。

§3. 被害と地盤・断層との関係

ジョグジャカルタ地震の発震時は、イスラム教の1日の最初のお祈りの直後だった。強い揺れが始まって家が潰れるまで一瞬のことだった。また、強震動は1分程度続いたと、多くの被災者が述べている。正確に強震動継続時間を推定する方法はないが、1分も短かったと推定される。しかし、被災者が極めて長い揺れと感じたのは間違いない。

3.1 被害分布調査

本合同調査隊は、上記調査期間中に2班に分かれ、道路沿いの家屋の倒壊率((全壊戸数+半壊戸数)/全戸数)の調査を基に、被害レベル(表1)を推定した。被害レベルは、おおよそ10~30軒毎に求めた。

表1 被害算定基準

被害レベル	倒壊率
1	0-3%
2	3-20%
3	20-50%
4	50-80%
5	80-100%

被害率の分布は図2にコンターで示した。これらの結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 死者数および死亡率の高い地域は、地震断層の近傍に集中している。
- 2) 被害分布は、断層の西側に集中し、地盤条件の良い東側は相対的に低く、地盤条件との相関が高い。
- 3) 断層の北東40kmに位置するクラテン(Klaten)でも大被害を生じたが、家屋の倒壊率が高い割に、死者数は多くなかった。クラテンはかつての湖のため、軟弱な地盤により被害が増大した。
- 4) 断層沿いの尾根にも被害は集中しており、地形による増幅効果が働いた可能性が高い。
- 5) 道路上の割れ目、橋や用壁などの土木構造物への被害、電柱の破断、電柱が電線に引きずられ傾く、などの現象もほとんど見られなかった。
- 6) 斜面崩壊が小規模で、液状化現象もそれほど多く見られなかった。
- 7) 兵庫県南部地震(Mw6.9)、新潟県中越地震(Mw6.7)、福岡県西方沖地震(Mw6.6)などと比較すると、建物以外の被害はそれほど小さくなく、最大震度は気象庁スケールで5強と推定される。

3.2 歴史的建造物の被害

ジョグジャカルタ州には、世界遺産にも指定されたヒンズー教のプランバナン寺院(Prambanan Temple)、仏教のボロブドール寺院(Borobudur Temple)などの石積みの寺院が古くから建造されてきた。プランバナン寺院では、一部被害が生じ、閉鎖されていたが(図5)、ボロブドール寺院には被害は全くなかった。これ

らの寺院は、20 世紀に発見され、再建されたものだが、発見された際には、崩壊した石材が地中に埋もれていたとのことである。これらの寺院が崩壊したのは、地震によるものか、メラピ火山の火砕流によるものか、または人為的に破壊されたものかは、インドネシアの研究者にも明らかでなかった。

3.3 レンガと被害

ジョグジャカルタでの甚大な地震被害は、脆弱なレンガの建造物が原因である(図 6)。レンガとレンガをつなぐモルタルの強度がほとんどない家屋が多かったとの指摘もある。インドネシアでは、1970 年代よりレンガが住宅の建築資材として使われ始めたらしい。安価で、比較的堅く、かつ漆喰を塗れば、見栄えのする住宅が建設できるので、レンガ造りはまたたく間に広がった。ジャワ島内陸部には、この数十年間、大地震がほとんどなかったため、大きな地震災害は起きていない。このため、ジョグジャカルタの家屋は、レンガ造りが主だった。これまで被害がなかったのは、木材や竹で造られた住居が多かったためであるが、今後は地震が起きるたびに、甚大な被害を起こす恐れがある。ジョグジャカルタ地震は、モーメントマグニチュードは 6.3 であり、日本で起きたなら、死者がほとんど出ない程度の地震規模である。

3.4 年齢層別死亡率—神戸市との比較

今回の地震による死者は、約 5700 名といわれている。年齢別の死亡率は、Tabuchi (2006) により求められている(図 7)。図によると、高齢者の死亡率が若年者の 10~20 倍、女性の死亡率は男性の死亡率よりも 1.5~2 に達している。この図には、阪神淡路大震災での神戸市の死亡率も一緒に示されているが、ジョグジャカルタのパターンに似ているのがわかる。神戸市での死者の多くが、築数十年の古い家に住む高齢者で、しかも高齢者の多くは 1 階に住み、家具や家の下敷きとなって圧死したといわれている。

しかし、ジョグジャカルタでは、木造家屋は少なく、2 階屋も少なく、しかも高齢者だけが住む家族は少ない。このように住環境が異なるにも関わらず、二つの地震の死亡分布パターンが極めて似ているのは興味深い。二つの被災地の条件は種々異なっても、災害弱者としての高齢者の死亡率が著しく高くなるのが、この調査でも明らかになった。今後、地震防災には、「高齢者が死なない」対策を取らないと、死者数はいっこうに減らないことを示している。

神戸とジョグジャカルタでの顕著な違いは 10 歳以下の子供の死亡率であろう。この年齢層では、神戸での死亡率は低いものの、ジョグジャカルタでは高い。これは、神戸市では、10 歳以下の子供を持つ家族数は、震災の帯といわれた地域には少なく、新しいマンションの多い山手側に住んでいたためかもしれない。日本では核家族化と年齢層による地域の棲み分けが進んでいのかかもしれない。

§ 4. 歴史地震

インドネシアの人口の 70% が住む、政治・経済・文化の中心のジャワ島の地震活動は、それほど高くない。最近 200 年間に於ける大地震は、スマトラ島、バリ島、フローレス島など人口密度の低い島々に発生している(図 8)。1960 年以降のマグニチュード 6 以上の地震活動(図 9)を日本列島と比較すると、面積の広いインドネシアの方が、日本より低い。インドネシア全域を「地震多発国」と決めつけられないところに、深刻な問題がある。それだけに、一度地震が発生すると甚大な被害をもたらす要因となる。

過去 200 年間のジャワ島での宇津による被害地震は図のように示される。1840 年には、内陸部に被害を与える地震、1867 年には津波を伴う地震が発生しているとのことだが、ジョグジャカルタ市とソロ市(Solo)に死者をもたらした。津波を引き起こしているため、オーストラリアプレートの沈み込みに伴う地震と思われる。いずれにしても今後の歴史地震および活断層の分布や活動度の検討が不可欠である。

§ 5. まとめ

2006 年 5 月 27 日、インドネシアのジョグジャカルタ州に起きた Mw6.3 の地震は、死者 5700 人、負傷者 3 万人の大被害を与え、全壊・半壊家屋は 20 万戸におよんだ。本研究では、臨時余震観測を実施し、余震がほぼオパック断層に沿い、長さ 20km、深さ 10km の広がっていることを示した。また、P 波逆問題により、断層面上のすべりは、深さ 10km を中心に広がっていることを明らかにした。

被害は、オパック断層に沿った「バンツール県」に集中すると共に、断層の北東の延長 50km 先にも離れて生じた。後者は厚い湖性堆積層により地震動が増幅されたためと考えられる。また、最大震度は気象庁で 5 強程度と推定される。ジャワ島では、地震活動は相対的に低いが、歴史地震の低頻度の災害への対策が必要であろう。

謝辞

東大地震研山中佳子氏には、P 波波形解析法の講習をしていただくともに、その後の解析の段階でも繰り返しご教示いただいた。気象庁石川有三氏には、図8と図9を作成していただいた。名大地震火山・防災研究センターの学生諸君には余震の記録の読み取りをお願いした。現地では、地震直後の困難な時期にも関わらず、Mepi 氏とご家族に、一方ならぬお世話をいただいた。このような協力がなければ現地調査はできなかつたであろう。査読者からは、原稿中のいくつかの間違いを指摘していただいた。上記の方々に記して感謝の意を表します。

文献

Kikuchi, M., and Kanamori, H.,1991, Inversion of complex body waves - III., Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2335-2350.

Sukandarrumidi, W. and H.M.D Rosidi, 1995, Geological map of the Yogyakarta Sheet, Jawa, Geological Research and Development Center.

Tabuchi, R., 2006, Changing family structures after the tsunami, *International Joint Workshop on Comprehensive Understandings of the 2004 Sumatra Earthquake/Tsunami and its Affects, Mitigation and Rehabilitation of Tsunami Disaster in the Banda Ache Region in the Banda Ache, Indonesia*, Banda Ache.

八木勇治, 2006,
http://www.geo.tsukuba.ac.jp/press_HP/yagi/EQ/2006Jawa/.

山中佳子, 2006, EIC 地震学ノート,
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2006/EIC180N.html.

宇津徳治, 2006, 「世界の被害地震」の表,
<http://iisee.kenken.go.jp/utsu/>



図1 オパック断層の断層崖(南西方向から撮影). 断層崖の高さは約 300m である. 甚大な地震災害は, 断層に沿う平野側に起きた.

Fig. 1 Photo showing a scarp of the Opak fault, taken from southwest. The ridge, northwest of the fault, is about 300m high. Most serious damaged areas were distributed along the foot of the fault scarp.

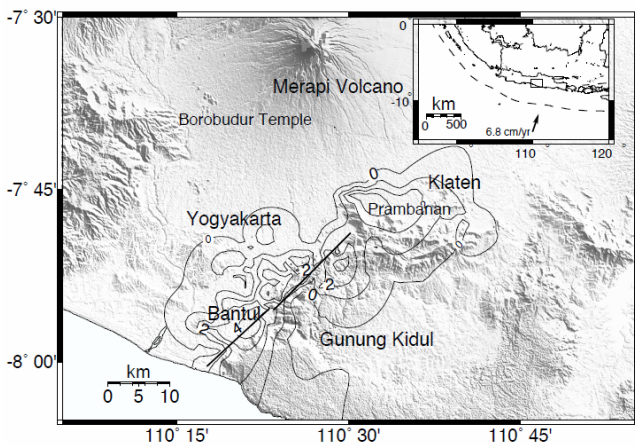


図2 ジョグジャカルタ市付近の地図. バントゥール, メラピ火山, クラテン, ボロブドール寺院, プランバナン寺院の位置も示した. コンターは被害率(3.1 節参照)の分布. 直線は, インドネシア地質調査所ジョグジャカルタ地質図上の断層.

Fig. 2 Map showing locations of Yogyakarta, Bantul, Klaten, Brobudur Temple and Prambanan Temple. Contours with numerals are the ratio of collapsed houses at each site (see section 3.1). Straight lines are the geologic faults after the geologic map of Yogyakarta [Sukandarrumidi and Rosid (1995)].

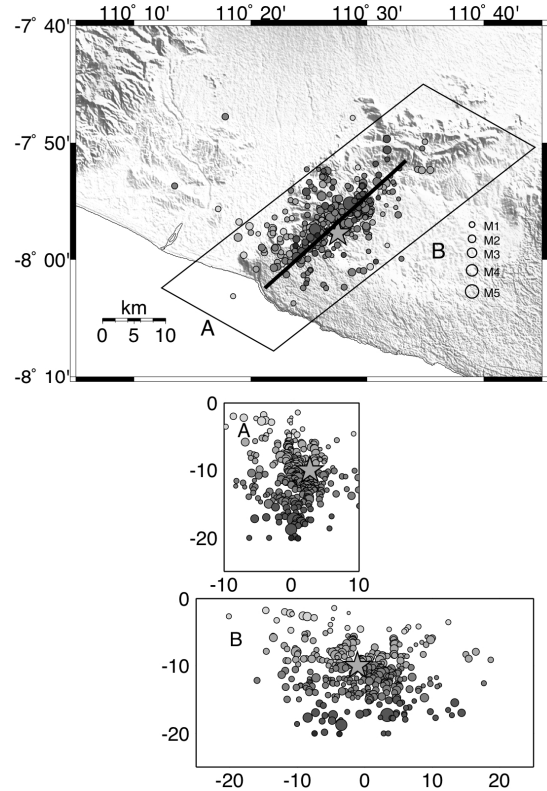


図3 本研究で観測および震源決定した2006年ジョグジャカルタ地震の余震分布. 中段と下段は A と B 面に投影した余震分布. ■印は臨時地震観測点, ★印は本震の震源の位置を示す.

Fig. 3 Map view and cross-sections of aftershock distribution of the Yogyakarta earthquake of May 26, 2007, observed and located by this study. ■ and ★ denote the temporal seismic stations and the hypocenter of the main shock, respectively. Cross-sections A and B show the projections looking from southwest and southeast, respectively.

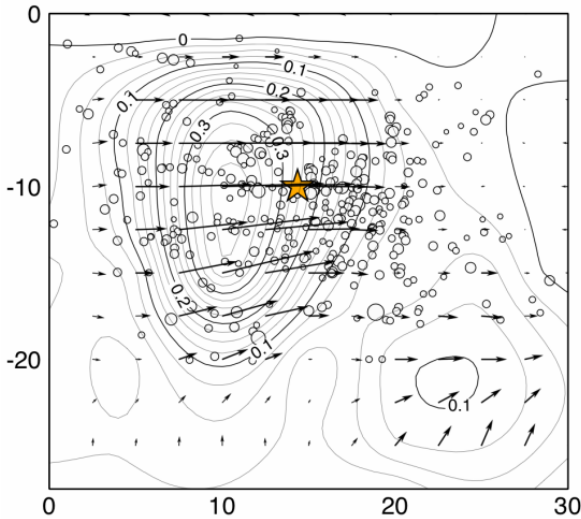


図 4 ジョグジャカルタ地震の断層面上のすべり分布. すべり量の単位は m, コンター間隔は 0.1m. 破壊開始点(★)は, 米国地質調査所の決定した震源の位置と等しいと仮定した. 矢印は断層面上のすべり(南東ブロック)を表す. 丸印は断層面上に投影した余震を示す.

Fig. 4 Contours of fault slip on the 2006 Yogyakarta earthquake (unit: 1m). The interval of the counter is 0.1 m. Star denotes the initial rupture point that is assumed to be the same as the hypocenter determined by the USGS. Arrows represent the slip vectors on the southeast plane of the fault showing a nearly pure strike-slip fault. Open circles are the aftershocks projected on the fault plane.



図 5 軽微な被害を受けたヒンズー教プランバナン寺院中の1つのお寺. お寺の敷地内には, 寺院の飾りや壁から落ちた石の破片が散乱していた.

Fig. 5 One of the temples of Hindu Prambana compound that was slightly damaged by the 2006 Jogjakarta earthquake. Pieces of stone walls are scattered surrounding the temple as seen in the photo's foreground.



図 6 崩壊したレンガ造りの家屋(バントゥール県).

Fig. 6 One of the collapsed brick houses in Bantul after the May 26, 2006 earthquake.

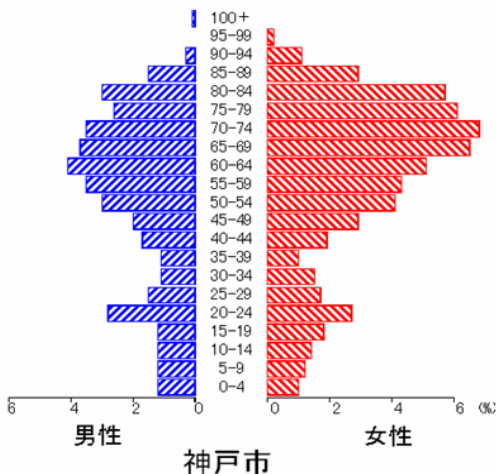
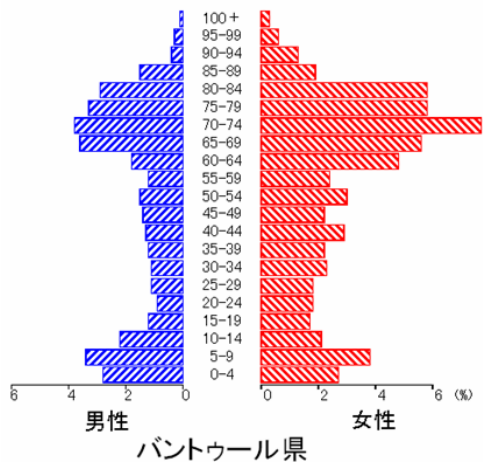


図 7 地震による年齢層別死亡率. 左は男性, 右は女性. (上段)2006 年ジョグジャカルタ地震によるバンツール県における死亡率, (下段)1995 年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)における神戸市での死亡率. 二つの分布がよく似ていることが注目される.

Fig. 7 Death rates for Bantul prefecture during the 2006 Jogjakarta earthquake (upper plot) and for Kobe city during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake (Haish-Awaji earthquake) (lower plot). Right and left bars show the male and female death rates, respectively. It is noticeable that the two death rate distributions are quite similar with each other except for the ages between 0 and 10.

1800 1/1 0:0 -- 2006 5/28 24:0

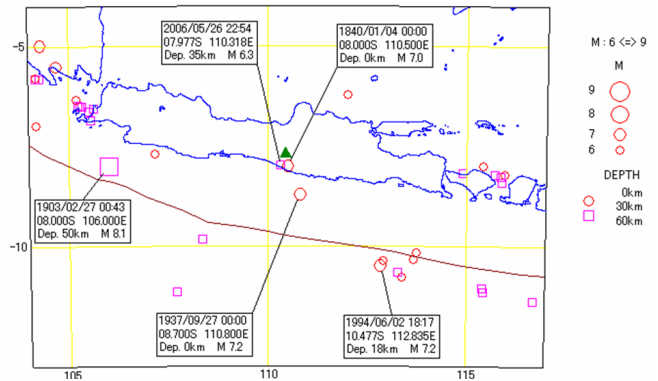


図 8 1800 年以降のインドネシア・ジャワ島付近で発生した被害地震(宇津徳治, 『世界の被害地震』より). ジョグジャカルタ付近には, 1840 年 1 月 4 日に M7.0 が発生している. この地震が, オパック断層に関連するかは明らかでない.

Fig. 8 Destructive earthquakes in and around Java island since 1800 A.D. after the Destructive Earthquakes in the World by T. Utsu (1995). Note that an earthquake of M 7.0 occurred near Yogyakarta on January 4, 1840. However, it is uncertain if this event was related to the Opak fault.

1964 1/1 0:0 -- 2006 5/27 24:0

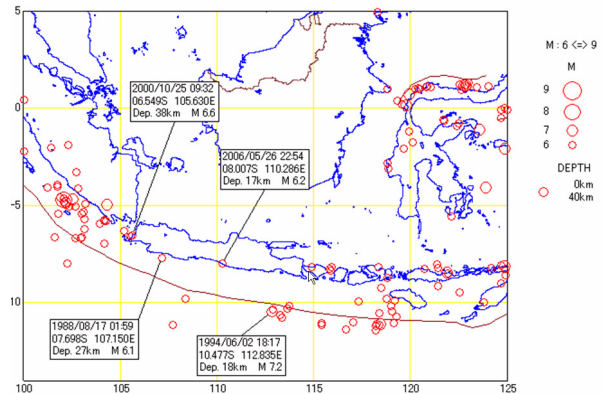


図 9 インドネシア・ジャワ島付近の地震活動(M>6.0, 40km 以浅). データソースは PDE(Preliminary Determination of Epicenters by USGS). ジャワ島付近の地震活動は周囲に比べ低い.

Fig. 9 Seismicity map for the vicinity of Java island, Indonesia from January 1, 1964 and May 27, 2006 taken from the PDE catalogue. Seismicity around Java is relatively low compared with the surrounding regions.