地震による長距離流動の発生メカニズムに関する一考察

東京電機大学　名誉会員　○安田　進

１．はじめに

2018 年 9 月 28 日にインドネシアのスラウェシ島で発生した地震（M_W=7.5）により、Palu 市の数地区の緩やかな傾斜地盤で長距離流動が発生した。被害のメカニズムの解明や今後の防災のために JICA で「インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」の調査の一環として検討を進めてきており、筆者もそこに参画してきた。地震とともに大量の地下水が噴き出したり湧き出しており [1)]、この地下水が長距離流動を発生させたと考えられているが、そのメカニズムとして、①浅層地盤が液状化して地下水が噴き出した、②東や西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の地下水が被圧していて噴き出した、③横ずれ断層の割目や破砕帯にあった被圧水が噴き出した、といった三つの可能性があり、国内支援委員会の検討書 [2)] ではこれらが併記されている。筆者はこのうち③のような稀にみる特異な現象が起きたのではないかと考えているので、そのような考えに至った経緯を述べてみる。なお、②に関しては Balaroa には灌漑用水はない。

２．地形および地震動、被害の概要

Palu 市はスラウェシ島の中部に位置する。この付近は三つのプレートの三重会合点にあたり、時計回りに回転し、左横ずれの断層が生じている。変位速度は非常に早く年間約 40mm と推定されている。今回の地震では最大約 5m の変位が発生した。断層に伴うプルアパート堆積盆にあたる沈降帯により、北北西から南南東にかけて最大幅 10km 程度の細長い平野が形成されている。平野中央部の深い所では約 300m の厚さで第四系堆積物が堆積している。平野の西側には 2000m 級の山が、東側には 1000m 級の山が北北西から南南東に連なっている。中央には南から北へ Palu 川が流れており、東西両側から川に向って 1～3%程度の緩やかな傾斜地盤が形成されている。この表層は東西両側の山から流出した土砂で形成されている。なお、近くに温泉がある。

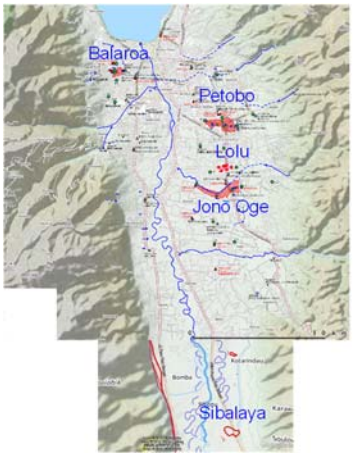

図１　長距離流動発生地区 [2)]

この地震により Palu 市で記録された最大加速度は EW 方向 281cm/s^2、NS 方向 203cm/s^2、UD 方向 335cm/s^2 であり、震動による建物の被害は多くはなかった。ただし、図 1 に示す西側の 1 地区、東側の 4 地区の緩やかな傾斜地盤で、長さ 1～3km、幅数百 m の表層土が滑って流動した。自宅ごと流された住民の方の動画や種々の痕跡から判断すると、数百 m といった驚くべく長い距離を自転車程度の速さで土塊が流れていっている。

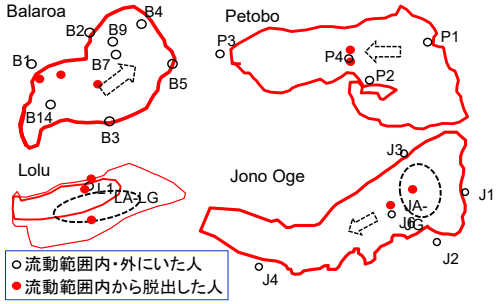

図２　ヒアリングを行った人々の位置 [2)]

本プロジェクトでは、種々の地盤調査・土質試験に加えて、図 2 の箇所にいた人々から詳細なヒアリングが行われた。その結果を筆者が解釈したものを図 3 に示す。これから判断すると、①地震の主要動の水平揺れが終わったと同時に 10 秒程度大きな鉛直動や盛り上がりが発生した、②地盤の唸りや壊れる音が発生した、③水平動が終ったと同時とか 2 分程度以内に地下水（一部は温水）が噴き上げたり湧き出した、④同じ頃に地盤の流動変位も発生したようである。

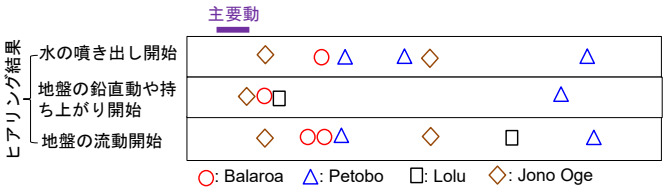

図３　ヒアリングで分かった発生した現象の時系列

キーワード　地震，長距離流動，砂質土，地下水の噴出，断層
連絡先　〒350-0394　埼玉県比企郡鳩山町石坂　東京電機大学理工学部　ＴＥＬ049-296-0362

© Japan Society of Civil Engineers

３．断層割目や断層帯から常時湧水しているメカニズムに関して

流動範囲内には傾斜に直交する線上に図 4 に示すように湧水帯が形成され、常時地下水が湧き出ている。地震後に採水した湧水の水質検査の結果によると、Jono Oge の湧水は図 5 に示すように天水線から少し「有馬型」の深部のスラブ起源流体と古海水の間に寄る結果となった。この水は地震の約 1 年後に採ったもので、地震前の湧水や地震時の噴水そのものではないので断定できないが、湧水帯は断層の割目や破砕帯に沿って地下から湧き上がってきている深層水に、表層の天水（東西両側の山とか、灌漑用水、南の山地からの浸透水を含む）が加わって希釈された水が、地表に湧き出して形成されているのではないかと筆者には考えられた。その場合、①深部に海洋プレートが沈み込んでいてスラブ起源流体による、②平野の下には堆積岩が存在しジオプレッシャーが貯留している、③断層面に接して下部に高温の花崗岩が貫入していて比較的浅部の地下水が沸騰してそれが地表に向かって湧き出している、といった三つの発生源の可能性があるのではないかと考えられた。これらの発生源の深度のイメージを図 6 に示す。ただし、これは検討書[2] の断面図に深さ 5 km までの断層面を推測して破線で付け加え、①～③の発生源を推測して記入してみたものである。したがって、単なる概念図にすぎないことをお断りしておく。これらの三つとも可能性があり、また、複数の発生源が合わさって湧水が発生していることも考えられる。

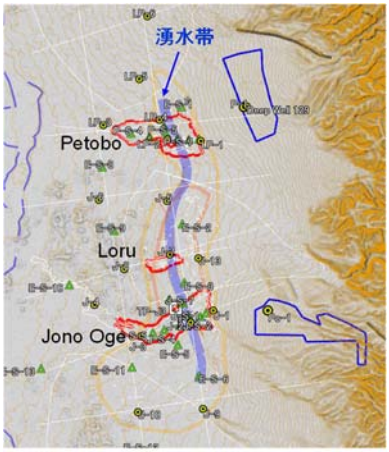

図 4　Petobo から Jono Oge にかけての湧水帯[2]

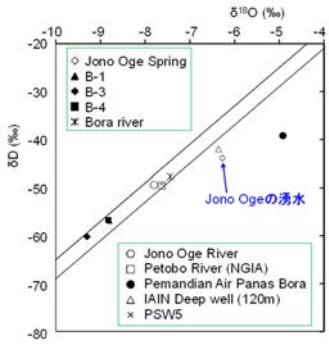

図 5　水素・酸素同位体比の関係図[2]

４．地震時に湧水帯および付近で地下水が噴き出したメカニズムに関して

上記の深層の地下水が地震の際に地下水が噴き出したメカニズムとして以下の二つが挙げられる。

①地震時に断層変位が急速に発生したことにより、温泉などの流体が通る岩盤内のクラックが突然繋がって、深部の高い圧力が浅部に急速に伝わり、その加圧によって浅部の地下水が押し出された。

②断層の急速な動きで浅層の砂礫層内で正のダイレタンシーが生じて地下水の圧力が急減し、沸点が下がって沸騰して蒸気が発生し、それが浅部の地下水を押し上げて噴出が生じた。このようなことが起きるのかどうか分からないが、地震の主要動の直後に地盤の唸りや地盤が壊れる音とともに高い水圧で水が一気に噴き出したとの証言から考えると、可能性はあるのではないかと考えられる。

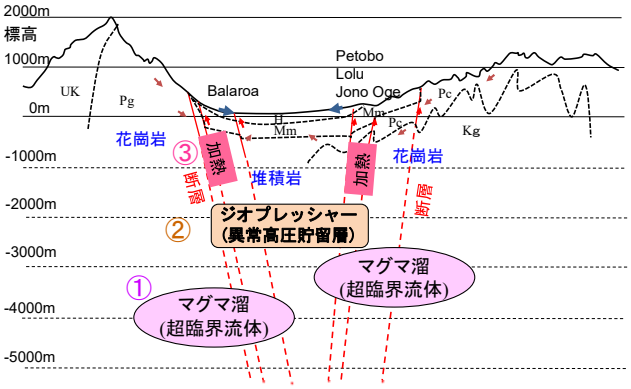

図 6　深層水の発生源の概念図

５．あとがき

地震時に熱水が噴き出す現象は 1999 年トルコ・コジャエリ地震の際にイズミット湾の南岸のデイールメンデレで同様な現象が発生した可能性がある[3]。ここでは海岸の流出が発生し、ホテルなどの建物と人々が地盤と一緒に海中に没した。助かった従業員などから、①地震と同時に海中からなにか火山爆発のような熱い物が吹き上げた、②海に投げ出されたときあたりに沸騰していない湯をかけられた時のような火傷を負った、といった証言が得られている。なお、末筆ながら本プロジェクトの関係者に謝意を表する次第である。

参考文献：1）Kiyota, T., Furuichi, H., Hidayat, R. F., Tada, N. and Nawir, H. : Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, Vol.60, pp.722-735, 2020.　2) JICA：液状化地すべり（内陸部）に関する国内支援委員会技術検討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト（作成中）.　3) 地盤工学会：1999 年トルコ・コジャエリ地震調査報告書、2000.

© Japan Society of Civil Engineers