

地震・火山・津波

インドネシアは自然災害の宝庫である。火山噴火、地震、津波などのありとあらゆる災害がインドネシアで起こった。

A. Merapi火山の噴火



ジョグジャカルタのMerapi火山は、ジャワ島で最も活発な火山の一つである。溶岩ドームの崩壊による火砕流は、火山噴火においてよく知られた現象である。火砕流は高温のガスと岩の混合物で、火山から離れたところまで移動していく。2010年10月26日に、Merapi山は、高度12kmにまで達する火山灰の噴煙を生じ、その爆発的な性質を見せつけた(図1)。そして、生じた火砕流により、火山の周りに住む20,000人以上の住民が避難を余儀なくされた。

(Fig. 1: Merapi山の噴火時の噴煙。ジョグジャカルタの Volcanological Office の好意による, BPPTKG)

2010年のMerapi山での一番大きかった噴火の原因を見てみよう。地球物理学者たちの研究によって、外部からマグマに流入する水が火山噴火の爆発に大きく影響することがわかっている。(これを水蒸気爆発という。) マグマ粒子と水との混合物として火山を扱うことができると仮定しよう。噴火口と大気とがこの系の境界条件を与える。爆発的噴火は二つの段階で起きるものと考えられる。(1)瞬間的なマグマと水の相互作用と、(2)系の膨張である。第一段階では、絶対温度 T_m をもつ質量 m_m のマグマが絶対温度 T_w をもつ質量 m_w の外部からの水と混ざる。熱力学的平衡状態はほぼ瞬間的に実現される。この相互作用はほぼ体積一定の過程とみなすことができる。水の蒸発に伴う潜熱やマグマの融解に伴う潜熱は無視できるものとする。

A.1	第一段階における平衡状態の温度を、マグマと水、それぞれの質量(m_m, m_w)および単位質量あたりの比熱(c_{Vm}, c_{Vw})を用いて求めよ。	0.5 pt.
A.2	マグマと水の混合物は理想気体であるとモデル化できるものと考え、第一段階における平衡状態での圧力を求めよ。混合物の単位モルあたりの体積を v_e とせよ。	0.3 pt.

(第二段階での) 系の膨張はいくつかの原因によって引き起こされる可能性がある。そのうちの一つは熱爆発である。この過程は非常に複雑なのだが、経験的な方法によって噴出する混合物の速度を測ることができる。噴火の間の噴出ガスの速度は、火山の火道(マグマが噴火口に上がる通り道の管)にある混合物の圧力 p 、質量 m およびの体積 V に依存する。

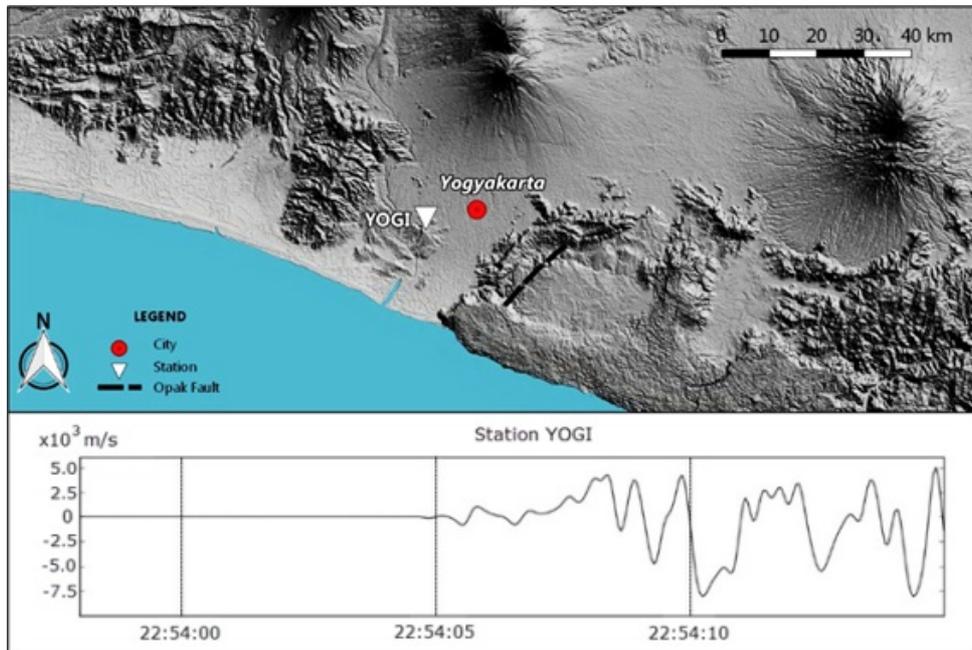
A.3	噴火の間の噴出ガスの速度が p, m, V にどのように依存するか示せ。全体にかかる比例定数を κ としてよい。	0.5 pt.
-----	---	---------

観測される圧力のオーダーは100MPa程度である。この圧力により、噴火の速度は弾丸の速度ほどに大きくなる。

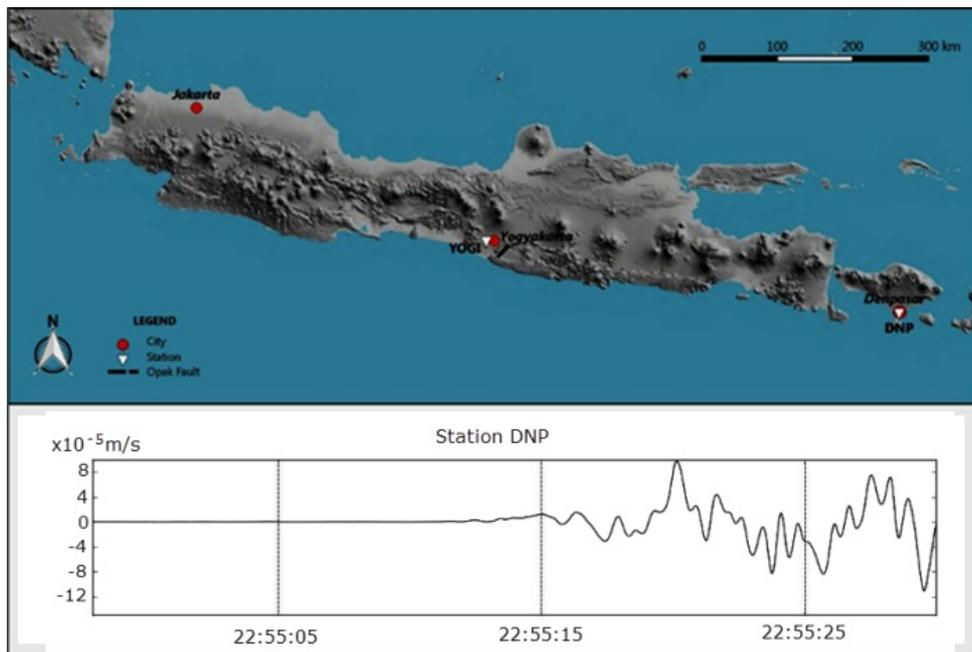
B. ジョグジャカルタ地震

2006年に起きたマグニチュード $M_w = 6.4$ のジョグジャカルタ地震は、現地時間の05:54:00、世界標準時(UTC)では22:54:00に発生し、バンチュルやジョグジャカルタ地域の多くの建物が破壊された。地震はオパック断層帯が突然変位したことにより引き起こされた(図2)。震源の深さは地表から15kmであった。

地殻を伝播した地震波は地震計を用いて記録することができる。地震計によって得られたグラフは、震動図と呼ばれる(図2及び図3の下側のグラフ)。震動図は地面の垂直方向の速度を時間の関数として表している。図2はジョグジャカルタ(YOGI)の地震観測所、図3はバリ島のデンパサール(DNP)の地震観測所でそれぞれ記録されたものである。一般に地震波は3種類の波から構成される。縦波すなわち最初に到達する波(P 波)、横波すなわち2番目に到達する波(S 波)、それに表面波である。 P 波と S 波は地下を伝播するのに対し、表面波は地表に沿って伝播する。地下を通過して観測所に伝播する地震波は直線的に伝わるもの、地層の境界で反射されるもの、さらには屈折して次の層に入るものに分けられる。縦波(P 波)は最も速度が速く、それに対して表面波は最も遅く、 P 波の60%程度の速度である。



(図2: YOGIの位置を示す地図とそこで観測された震動図)



(図3: DNP (Denpasar)の位置を示す地図とそこで観測された震動図)

震央（震源の地表面への射影）とYOGI観測所およびDNP観測所との距離は、それぞれ22.5 km 及び500 km である。インドネシアのジャワ島の地殻の厚さは30 kmである。地殻の下にはマントル層がある。他の波の現象と同様に地震波もスネルの屈折の法則に従う。また地震波の一部はマントル層によって反射される。この問題では地球の曲率は無視できると仮定する。

B.1	図2はYOGI観測所で記録された震動図を示している。このデータを用いて地殻中の P 波の速度を求めよ。	0.5 pt.
B.2	ジョグジャカルタ地震において、デンパサールのDNP観測所に直接到達した P 波、および、反射して到達した P 波の伝播時間をそれぞれ求めよ。	0.6 pt.

地球の構造が、「地殻」と「マントル」のただ2つの層から成ると仮定する。 P 波は、地殻およびマントルを異なる速度(層内では一定)で進む。マントル中を進む速度のほうが、地殻中を進む速度より速い。マントルに屈折角 90° で進入した P 波は、地殻とマントルの境界に沿って伝播した後に、その一部が再び屈折によって地殻にもどる。

B.3	マントル中の P 波の速度を求めよ。	1.2 pt.
-----	----------------------	---------

より現実的な地球の構造では、地殻はいくつもの薄い層に分けられるため、地震波の速度は深さ z の関数として $v(z) = v_0 + az$ と表すことができる(a は定数)。以下では震源は地表にあると仮定する。このモデルでは、地震波の軌道は曲線を描く。

B.4	パラメータ $p = \sin\theta(z)/v(z)$ を定義する。ここで、 $\theta(z)$ は波の進行方向と地層面の法線とが成す角度である。パラメータ p で決められる地震波が観測所に到達するとし、震源と観測所間の距離を p, v_0, a によって表せ。ただし、震源は地表に十分近いものとする。	1.4 pt.
B.5	震源から任意の観測所までの伝播時間 T を、 z についての積分の形で求めよ。	1.0 pt.

地球がそれぞれ伝播速度 v_i , 厚さ δz_i の一様な層が積層してできているとする。

B.6	震源は地表にあるとして、震源からDNPの地震観測所までの伝播時間 T を求めよ。ただし、地殻は3つの層からなるものと仮定し($i = 1, 2, 3$)、以下の数値を用いよ。 $v_1 = 6.65$ km/sec, $v_2 = 6.97$ km/sec, $v_3 = 6.99$ km/sec, $p = 0.143$, $\delta z_1 = 6.0$ km, $\delta z_2 = 9.0$ km, $\delta z_3 = 15$ km.	1.0 pt.
-----	--	---------

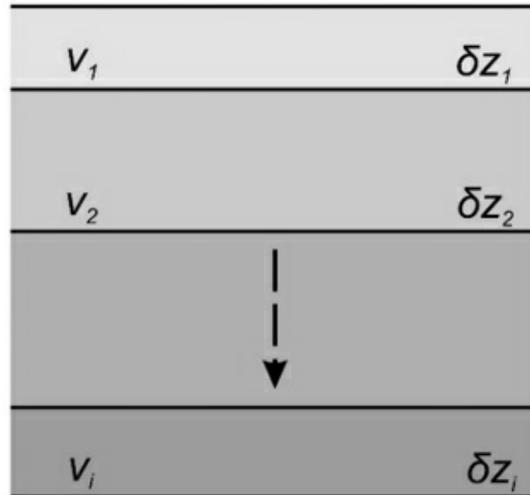


図4: 単純化した地球の層構造モデル

C. ジャワ津波

2006年のパンガンダラン地震および津波は、7月17日の現地時間15:19:27にジャワ島の西部・中央沿岸部の沖合いで発生した。震源の断層が海底にあるような地震では、断層が変位することによって津波と呼ばれる巨大な波が発生することがある。つまり津波とは、微小な振幅によって浅瀬に引き起こされる超長波長の波(浅水波)にほかならない。断層の急激な動きによって図5のように海底の一部が持ち上がることを想定しよう。地震のエネルギーは、持ち上げられた海水のポテンシャルエネルギーに変換されたものと仮定せよ。簡単なモデルとして、持ち上げられた海水は直方体形状で、その面積が $\lambda L/2$ ($L \gg \lambda$ とする)、高さが h であるものとする。

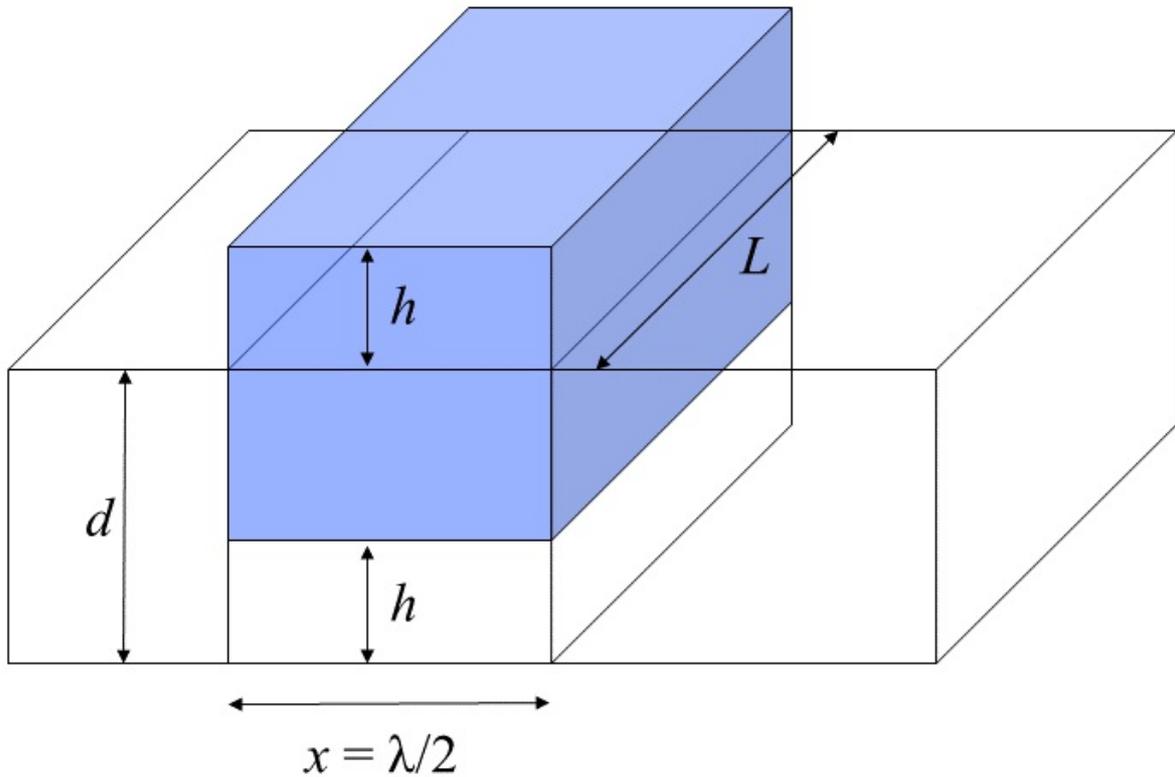


図5 津波の模式図。 d は海の深さ。

C.1	地震直後に、海面より上に持ち上げられた海水が蓄えているポテンシャルエネルギー(海面を基準とする)を求めよ。海水の密度を ρ とする。	0.5 pt.
C.2	津波の速さを無次元の比例定数も含めて求めよ。	1.2 pt.
C.3	エネルギーを考察することで、津波の振幅を水深の関数として決めよ。ただし、水深はゆっくりと変化するとし、水深 d_0 における津波の振幅が A_0 であるとせよ。	1.3 pt.