

泥火山噴出物流入に伴うインドネシア・ポロン川の河床変動*

東北大学 工学部 森 文章

東北大学 大学院工学研究科 三戸部 佑太

東北大学 災害科学国際研究所 呉 修一

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Suntoyo

東北大学 大学院工学研究科 梅田 信

東北大学 大学院工学研究科 田中 仁

東北大学 災害科学国際研究所 有働 恵子

東北大学 災害科学国際研究所 真野 明

1. はじめに

2006年5月インドネシア・シドアルジョ市で泥火山が発生し、大量の汚泥が噴出した。泥火山とは水を多量に含む粘土が地下からのガスによって押し上げられガス噴出孔のまわりにできる円錐形の丘のことである。インドネシアのジャワ島は世界有数の地殻変動帯であり、泥火山の発生は多くの場所で起こっている。泥火山は数年～数十年に一回程度の間隔で爆発的に活動し、一回の活動で泥火山からの汚泥噴出量は最大数十万 m³になる可能性がある(高橋ら, 2006年)。シドアルジョ市で発生した泥火山の汚泥分析(US Geological Survey, 2013)や泥火山の活動継続期間の解析(Davies et al, 2011)は行われているが、泥火山噴出物流入に伴う河川への影響については十分な検討が行われていない。よって、本研究ではポロン川へ流入する汚泥の堆積状況の評価を目的とし、ポロン川の河床の測量結果を基にその変動と汚泥堆積の関係について検討を行った。

2. 研究対象と被害状況の概要

全長320km、流域面積12,000m²/km のジャワ島第2の河川であるプランタス川は下流域でスラバヤ川とポロン川に分流している(図-1参照)。ポロン川は全長約60kmの河川であり、インドネシア・ジャワ島東部のスラバヤから約30km南に位置している。河川幅は150m～300m、河川勾配は1/3500～1/8000であり、天井川区間が多く存在している。流域の年間雨量は1500～2000mm程度であり、明瞭な雨期(概ね10月～4月)と乾期(概ね5月～9月)が存在する(図-2参照)。

もともとはスラバヤ川が本川であったが、19世紀末にポロン川を洪水排水路として開削した。雨期にはスラバヤ川下流に位置するスラバヤを洪水から守るため、洪水流のすべてをポロン川へ流している。一方で乾期は新レンコンダムによりスラバヤ川とプランタス・デルタ灌漑水路に取水され、ポロン川へはほとんど供給されない。

シドアルジョ市の泥火山では泥の噴出量が最大で約18万 m³/dayにも達し、その後日々に噴

*River bed variation in Prong River in Indonesia due to sediment inflow from mud volcano by Fumiaki Mori, Yuta Mitobe, Shuichi Kure, Suntoyo, Makoto Umeda, Hitoshi Tanaka, Keiko Udo, and Akira Mano

出量が減少しているが、発生から7年以上経過した現在も噴出が続いている（表-1参照）。この災害により避難住民が4万人に達した2006年7月に泥をせき止めるための堤防を設置したが、一部の堤防では決壊や泥の越流が生じ、これにより公共機関への影響も生じている。堆積・貯蔵限界に達した泥は2006年11月22日以降ポロン川へ排出されており、現在でも大量の汚泥がポロン川に排出されている。ポロン川の汚泥流入口は二箇所あり、どちらも河口からおよそ28km地点に存在している。

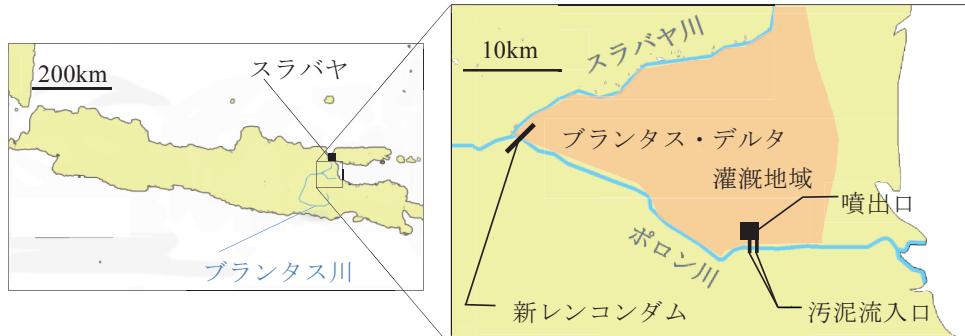


図-1 対象領域

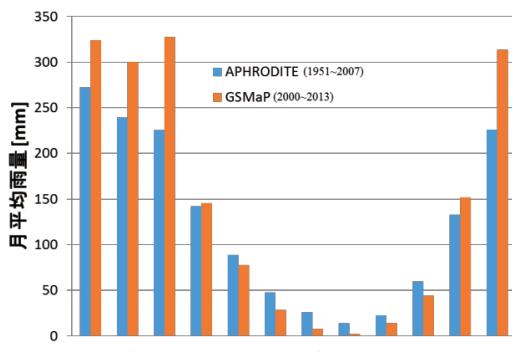


図-2 ブランタス川流域における月平均雨量(呉ら,2013)

表-1 汚泥噴出量(呉ら, 2013)

年	平均噴出量 (千 m ³ /day)	最小噴出量 (千 m ³ /day)	最大噴出量 (千 m ³ /day)
2006	100	90	180
2007	80	60	95
2008	60	20	80
2009	50	5	75
2010	40	1	70
2011	30	0	70
2012	20	0	70

3. 研究方法

インドネシア政府のLumpur Sidoarjo(LUSI)泥火山災害の担当部局であるBPLS (Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo - Sidoarjo Disaster Recovery Agency) が汚泥噴出後に測量した1km毎の河床断面データ(図-3参照)を用いて、河道部の地形変化過程を調べた。ただし、河床断面データの基準点は測量日毎に異なり(図-3(b)参照)、また横断面の測量間隔が一定ではない。そこで時間変動のない堤防位置を基準に補正を行い(図-3(c)参照)、補正後のデータについて線形補間を行うことで横断面方向1m間隔のデータを取得した。これを汚泥噴出量や流量、及びシンガポール国立大学が公開している衛星画像と比較し、汚泥流入が河床変動に与えた影響を評価する。

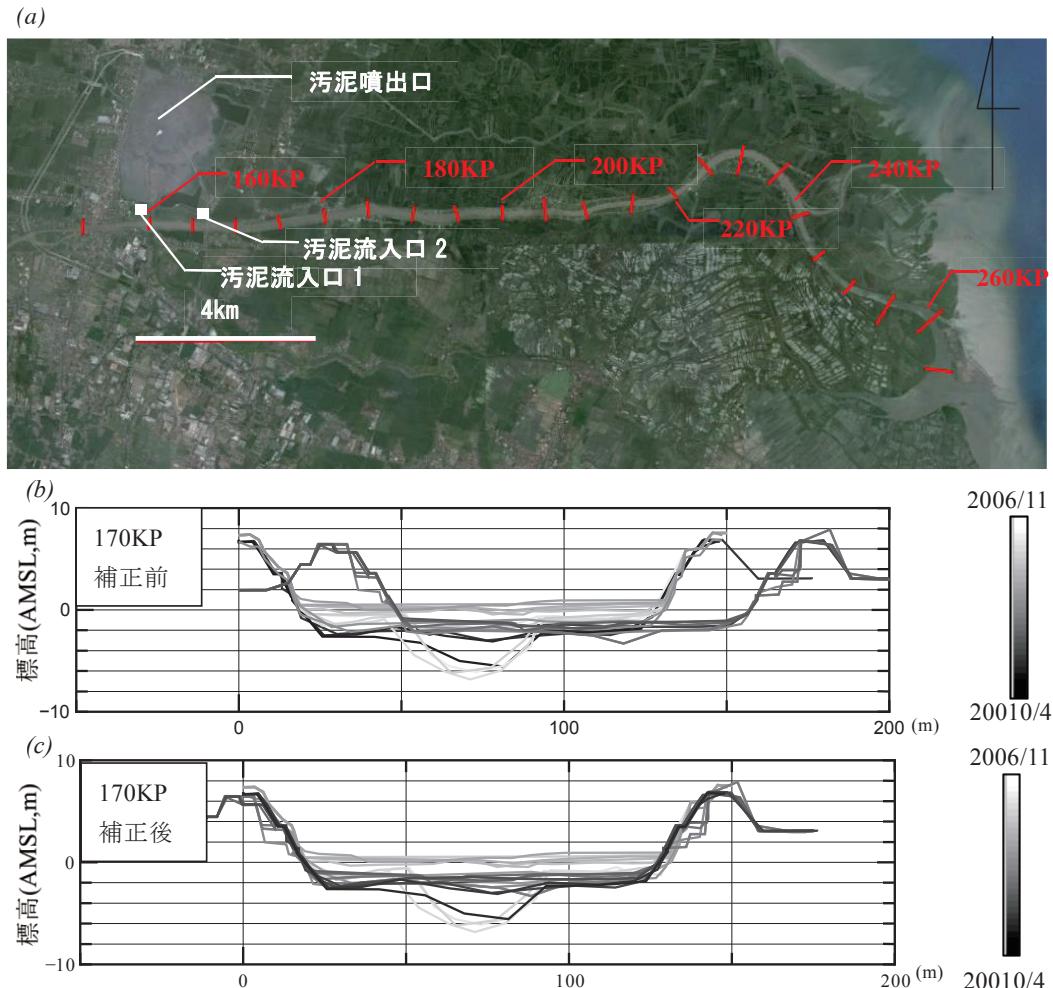


図-4 BPLS による河床測量データ. (a)測量断面, (b)測量データの例(170KP 準正前), (c)測量データの例(170KP 準正後). (b),(c)の線の色は時間を示す

4. 平均河床高

図-4(a)に平均河床高の河道縦断方向分布を示す. 汚泥流入口上流の 152KP では河床変動がほとんどみられない一方で、汚泥流入口より下流側では大きな河床変動が生じておる、流入した汚泥の堆積物がボロン川における河床変動に大きな影響を及ぼしていることがわかる. また乾期での河床上昇量は汚泥流入口付近で最大となっている. 汚泥噴出量が少ない 2009 年の河床変動をみると乾期の間での河床高の増加量は 2007 年乾期の増加量に比べ小さい(図-4(b)参照). 汚泥流入口より下流側では 2007 年乾期(概ね 5 月～9 月)に大きく河床が上昇し、雨期に急激に減少しているが、190KP 付近では 2007 年乾期に河床が上昇した後雨期(2007 年 5 月～2008 年 2 月)での減少量が他の断面と比較して小さい.

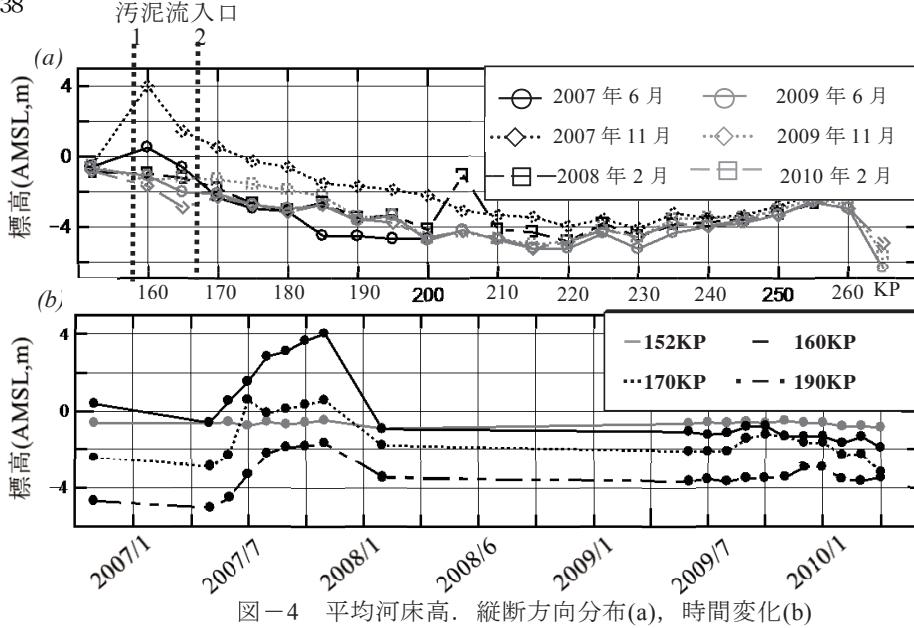


図-4 平均河床高. 縦断方向分布(a), 時間変化(b)

5. 経験的固有関数法による河床変動解析

ボロン川の河床変動の主因を探るため、経験的固有関数による解析を行った。この解析方法は次式のように、地形データ等の時空間分布を空間方向の固有関数 $e_n(x, y)$ と時間方向の固有関数 $c_n(t)$ の積で表す、主成分分析の一種であり、これらの固有関数はデータを基に経験的に決定される（加藤・吉松、1984）。

$$h^*(x, y, t) = h(x, y, t) - h_1(x, y, t) = \sum_{n=1}^k c_n(t) e_n(x, y) \quad (1)$$

本研究では多くの断面で最低河床位となった 2007 年 6 月の河床位 $h_1(x, y, t)$ からの変動量 $h^*(x, y, t)$ について解析を行った。また各モードの寄与率 R_n は対応する固有値 λ_i から以下のように計算できる。

$$R_n = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (2)$$

固有関数 $c_n(t)$ と $e_n(x, y)$ は寄与率 R_n の大きい順に第一モード c_1, e_1 、第二モード c_2, e_2, \dots と呼ぶこととする。

BPLS による測量は月に一度程度の間隔で行われているが一部欠損や不足があり、今回はデータが比較的多い 152KP～200KP の区間で 2006 年 11 月～2010 年 4 月について経験的固有関数解析を行った。図-5(a)に第一モードから第三モードまでの空間に関する固有関数 $e_n(x, y)$ の各断面での平均を、図-5(b)に時間に関する固有関数 $c_n(t)$ を示す。尚、寄与率は第一モードで 83.5%，第二モードで 12.2%，第三モードで 1.3% であり、第二モードまでで 95.7% に達するため第二モードまでの主因の考察を行う。

第一モードの空間関数 e_1 の断面平均値は 152KP～200KP の区間のすべてで正の値を示しており、河床内での全体的な堆積・浸食過程に対応している。第一モードは時間関数 c_1 が増加する

2007年5月～2007年11月（期間I）及び2009年6月～2010年1月（期間I'）では河床上昇に寄与し、時間関数 c_1 が減少する2007年11月～2008年2月（期間II）及び2010年1月～2010年4月（期間II'）では河床減少に寄与している。この時間関数 c_1 の変動を流量（図-6参照）と比較すると流量の少ない乾期に増加し、流量の多い雨期に減少していることがわかる。したがって、第一モードは流量の少ない乾期における汚泥の堆積及び流量の増加した雨期における堆積汚泥の浸食を表している。期間I'の時間関数 c_1 増加量は期間Iに比べ小さく、これは汚泥噴出量減少に伴うポロン川への汚泥流入量の減少を表すものと考えられる。

第二モードの空間関数 e_2 の断面平均値は160KPで負の値のピークがある。160KPでは時間関数 c_2 が減少する期間Iには e_2 と c_2 の積が正となり、河床上昇に寄与しているが、期間I'には時間関数 c_2 にほとんど変化がみられず、河床上昇に寄与していないことがわかる。衛星画像から2007年乾期には汚泥流入口1からの汚泥の流入が確認できるが（図-7(a)参照）、2009年乾期には汚泥流入口1からの流入が確認できない（図-7(b)参照）。したがって、160KPにおける時間関数 e_2 のピークは汚泥流入口の変化による汚泥堆積位置の変化に対応したものと考えられる。

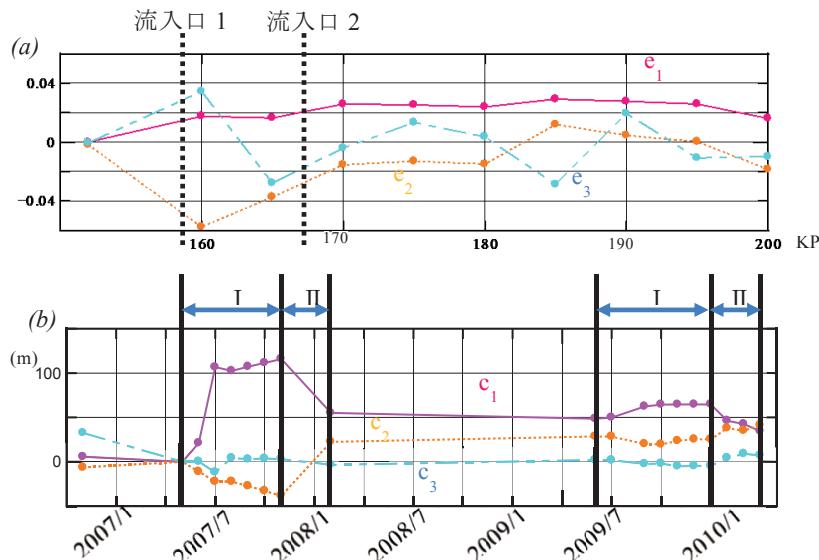


図-5 経験的固有関数. (a)空間関数, (b)時間関数

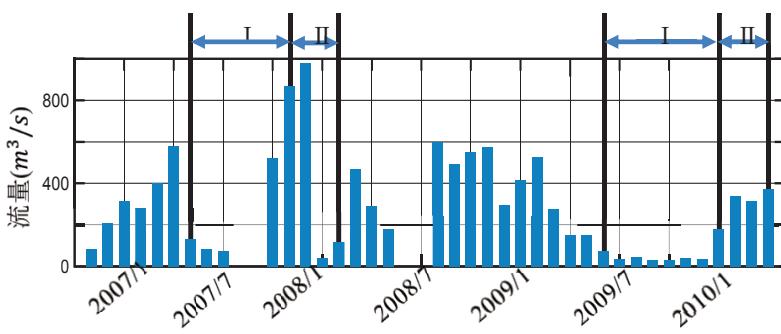


図-6 月平均流量



図-7 IKONOS 衛星画像. (a)2007 年 10 月 20 日, (b)2009 年 11 月 30 日

また 185KP～195KP の区間のみ空間関数 $e_2(x, y)$ の断面平均値が正となっている。第二モードの時間関数 c_2 は第一モードの時間関数 c_1 が減少する期間Ⅱにおいて増加し、その後は大きな変化がみられない。2007 年 11 月～2008 年 2 月での平均河床高の変化をみると(図-4 参照), 185KP～195KP の区間では他と比較して河床の低下が小さく、雨期の後も堆積した汚泥の一部が残っていることがわかる。第二モードにおける 185KP～195KP の符号が正になっている区間は局所的な浸食傾向の違いに起因するものである。以上のように第二モードは局所的な堆積・浸食傾向の差異を表している。

6. おわりに

汚泥流入後のポロン川の河床測量データについて経験的固有関数による解析を行い、ポロン川の河床変動の主因を抽出できることがわかった。第一モードは全体的な汚泥堆積・浸食傾向を表しており、第二モードでは局所的な汚泥堆積・浸食傾向を表している。今後は測量期間が少ない下流域も含めて解析を行い、河道全域での汚泥堆積・浸食過程について検討を行う。

謝辞:本研究は JSPS 科研費(課題番号 24404014 および 24404015)の支援を受けて実施された。

参考文献

- 加藤一正, 吉松晃:三次元の経験的固有関数による深浅図解析法, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp27-47, 1984.
- 吳修一, Bambang Winarta, 武田百合子, 有働恵子, 梅田信, 真野明, 田中仁: インドネシア・ポロン川における泥火山噴出物の流出・堆積状況, 地球環境シンポジウム, 2013.
- 日本工営コーポレーション総合研究所: ブランタス河の開発, 385ページ, 1997年.
- 高橋正明, 森川徳敏, 戸丸仁, 高橋浩大, 和田道子, 竹野直人, 風早康平:遠別旭温泉・歌越別泥火山について, 地質ニュース627号, pp48-53, 2006.
- Davies ,R.J., Mathias,S.A., Swarbrick R.E. and Tingay ,M.J.: Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java, *Journal of the Geological Society*, Vol.168, pp.517-523, 2011.
doi: 10.1144/0016-76492010-129
- US Geological Survey:Preliminary Analytical Results for a Mud Sample Collected from the LUSI Mud Volcano, Sidoarjo, East Java, Indonesia, 2008, 2008.