

ブランタス河の土砂流出と河床変動に関する研究
 Sediment runoff and river changes in Brantas River

澤井健二* , 江頭進治**

Kenji SAWAI and Shinji EGASHIRA

1. はじめに

著者らは京都大学防災研究所国際防災十年プロジェクトのメンバーとして、7年前からたびたびブランタス河を訪れ、現地調査と資料収集を行うとともに、1次元ならびに2次元河床変動解析による現象の再現と予測を進めてきた。本論文は、その経緯を要約し、ブランタス河の治水と河道維持における問題点について考察するものである。

2. ブランタス河流域の概況

ブランタス河は図-1に示すようにジャワ島東部に位置し、流域面積12000km²を持つ、この島で2番目に大きな河川である。本川は約320kmの長さで、アンジャスモロ山を源とし、アルジュノ、アンジャスモロ、クワイ、ブタック、クルー山を取り巻くように流れ、モジョケルト市近郊の新レンコンダムで、スラバヤ市のある北岸と東へ流れるポロン川とに分かれてマドゥラ海峡へと注いでいる。中流部での川幅は70~320m、河床勾配は1/2500~1/1300である。ブランタス河はクルー火山(1731m)、スメル火山(3676m)に代表される火山群を源流としており、多数の支川の中の何本かはクルー火山を源としている。

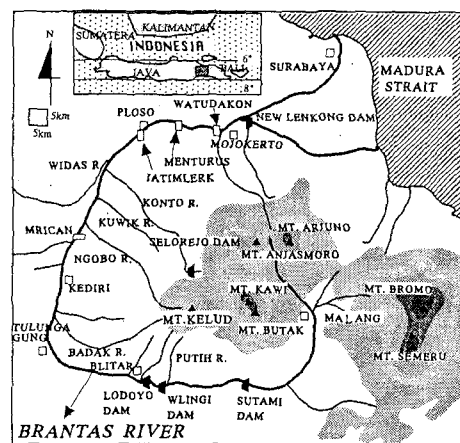


図-1 ブランタス河流域図

3. クルー火山の噴火と十砂流出

クルー火山は今世紀に入って1901, 1919, 1951, 1966, 1990年に噴火しており、平均15年に1回の割合で噴火を繰り返すと言われている。1回の噴出物の総量は1～2億m³と推定されており、これは自然界のみならず、地域社会に大きな影響を与えている。

クルー山頂には火口湖があり、噴火時、河口湖の水は噴出土砂とともに熱い泥流となって流下する。これは一次ラハールと呼ばれて被害が大きく、これを防止するために河口湖の水位を低下させる延長874mの排水トンネルが建設されているが、噴火のたびに破壊されて修復を繰り返している。

噴火によって流域内に堆積した土砂は、その後の強雨によって泥流となって流れ下るが、これは2次ラハールあるいは単にラハールと呼ばれる。そこで、1966年の噴火後、クルー火山の南および西斜面に

キーワード：ブラントス，インドネシア，河床変動，土砂流出，国際共同研究

・ 摂南大学工学部 教授 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, sawai@civ.setsunan.ac.jp)

*立命館大学理工学部 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1, egashira@bkc.ritsumeij.ac.jp)

対して砂防工事が実施されることになった。クルー火山砂防プロジェクトは、1969年以来実施され、クルー山噴火による影響地域内のブランタス河支川のレクソ川、プティ川、バダック川、ンゴボ川、コント川を含む2003km²を対象として、多くの砂防施設が建設された。また、流域保全の観点から、シングルダムへの流入土砂抑制対策として、ブランタス河上流の支川レスティ川に砂防ダムおよび植林事業を実施する計画があり、将来的には合計100万m³の容量をもつ砂防ダム計画がある。

1990年の噴火は、クルー火山南西斜面に大量の噴出物をもたらした。それらの多くはバダック川とプティ川を通して本川やダム貯水池に流出したが、一部はこれらの支川の河道に貯留されている。バダック川はクルー山の河口湖を水源としているため、最も噴出物が流れ易くなっており、大量の土砂流出のある川のひとつである。そのため、多くの砂防構造物が築造されており、現時点での計画堆砂量は目標値の61%に達している。しかしながら、完成済みの砂防構造物のほとんどは満砂状態にある。

4. ウリンギダムの堆砂とその防除

4. 1 流入土砂の概要

ウリンギダムでは、クルー火山の支川からの流入土砂が以前から大きな問題となっていたが、1990年2月10日のクルー火山の噴火、および3月7日の2次泥流の流入により、貯水池はほとんど満杯状態となり、ウリンギ発電所の水車内にも土砂が流入堆積し、それ以後約1年間、発電停止を余儀なくされた。

ウリンギダムへの流入土砂は、主として、クルー火山南側斜面のプティ川、ガルンガン川、ジャリ川、レクソ川から運ばれる。噴火によりクルー火山から噴出した砂の平均粒径は0.1~0.2mm程度で、浮遊砂濃度はウリンギ発電所が停止した前日の3月6日にプティ川で230,000ppmを記録した。プティ川については、上流に大きな砂溜工（サンドポケット）を有しており、そこで分級作用が働いて、主に粒径の細かいものが流出する。レクソ川は比較的粗い礫を生産する河川であるが、上流に砂防ダムが建設されており、今回は噴火に伴う降灰による土砂が流出した。いずれにせよ、今回の噴火によりウリンギダム貯水池へ流入した土砂は、砂防ダム等で捕捉することの困難な浮遊砂である。

4. 2 フラッシング¹⁾

クルー山の4支流はダムの右岸側に流入しており、洪水吐と発電所取水工は左岸側に位置する。特に流入土砂の多いプティ川は、ダム直上流に流入する。プティ川からの流入土砂のため、デルタの先端部は噴火前に既に洪水吐ゲートの前面近くまで到達していたと推定される。泥流発生後、貯水池水位を低水位まで下げたところ、ほぼ満砂状態で、洪水吐ゲートの操作およびダム安全確保のため、直ちに排砂することが必要であると判断された。

フラッシングは、1990年8月から12月にかけて、合計4回行われた。洪水吐ゲートを利用した排砂は例が少なく、貴重な資料が将来の参考ともなるので、排砂に際してはできる限りの計測が行われた。主な項目は、(1)ウリンギ・ロドヨ貯水池のフラッシング前後の深淺測量、(2)浮遊砂・掃流砂の測定、(3)流量観測所での水位流量観測である。また、ブランタス河の水は、下流で様々な目的に利用されているため、フラッシングに際しては、利水に支障を来さないよう、ロドヨ貯水池を利用して、下流への放流量ができるだけ一定となるようにされた。

第1回目のフラッシングでは予想以上の排砂量があったが、最も効率よく排砂されたのは第2回目である。フラッシングの際には、まず、ロドヨ貯水池の水位を事前に下げておき、ウリンギからの段波の受け皿とされた。ウリンギ貯水池は時間をかけて水位を下げる予定であったが、容量が減少していたため、水位は急降下し、洪水吐ゲート前面の土砂が巻上がり、やがて河床が現れて約200m上流地点で常流から射流への遷移が生じた。その後、河床を削りつつ遷移点は上流へ遡上する一方、洪水吐の前面に堆砂の段丘が現れ、水位降下によって滑落しつつ、削られていった。（当時の目撃者によれば、その有様はまるで地滑りのスローモーションを見ているようであった。）洪水吐から前面に排出される水は、黒

色を呈し、9月5日15時には最高濃度189,700ppmを記録した。測定の結果、第2回目の排砂量は450,000 m^3 と算定されている。

このように、洪水吐ゲートを用いて、ゲート近傍の細かい粒子の堆砂は、経済的、効率的かつ安全に排砂できるが、上流にいくに従い、流路幅は狭くなり、フラッシングの効果は落ちる。そこで、ウリンギ貯水池ではその後、容量の回復のため、6,000,000 m^3 の浚渫が実施された。

4.3 バイパス水路²⁾

1990年の噴火後、ウリンギダム堆砂対策の一環として、図-2に示すようにプティ川の流入部分をショートカットしてダム下流部で本川に合流させている。これにより、年1,600,000 m^3 の流入土砂の内、530,000 m^3 がカットされる計画である。ところが、合流部から数km下流にはロドヨ貯水ダムがあるため、ダム堆砂はここでも問題となっており、さらに下流部へ合流させるショートカットを現在建設中である。

しかし、その下流にはトゥルンガグンの河道屈曲部が控えており、ここでも過度の土砂流入は問題となる。そこで、インドネシア政府ではさらにブランタス河から南方のインドネシア海に直接排砂する長さ13.2km（内トンネル部分5.5km）、流下能力600 m^3/s のバイパス水路の建設を構想中である。

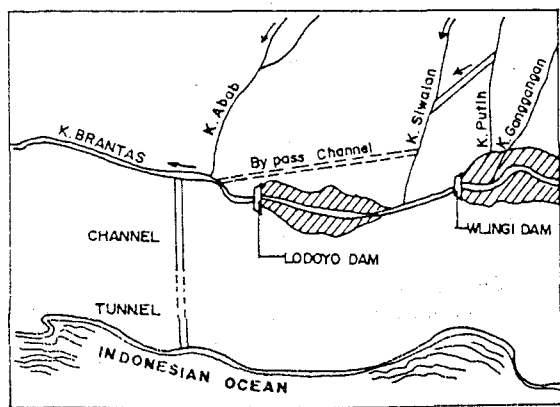


図-2 バイパス水路（構想中のものも含む）

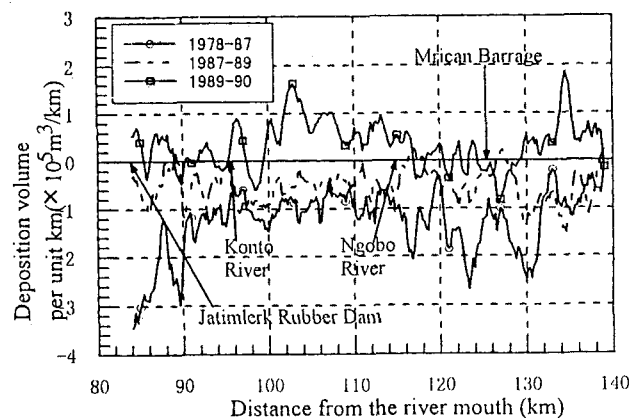


図-3 ブランタス河中流部の河床変動の実態

5. ブランタス河中流部の河床変動とその解析^{3,4)}

5.1 河床変動の実態

1978, 87, 89および90年に測定された河道縦・横断測量データをもとに、クディリ（河口から139km）からモジョケルト（河口から47km）までのブランタス河の河床変動の実態を示したのが図-3である。縦軸は1km当りの土砂の変化量で、正は堆積、負は侵食を表している。これによると、1978～1987年はほぼ全域で河床が低下しており、侵食総量は $2 \times 10^7 \text{m}^3$ 程度に見積られる。1978年以降、本川、支川の両方において建設骨材として大量の土砂が浚渫されている。一方、ウリンギダムにおける年間の堆砂量は $1.5 \times 10^6 \text{m}^3$ で、9年間の堆砂量は 10^7m^3 以上に推定される。支川においては、1966年のクルー火山の噴火をきっかけにチェックダムやステップダムなど多くの砂防施設が築造され、本川への土砂供給量は減少している。1987～1989年においても1987年までと同様に河床低下の傾向は続いているが、1989年～1990年は上昇に変わっている。これは1990年2月のクルー火山の噴火が原因である。

5.2 1次元解析

ブランタス河の河床変動は、長期的にはクルー火山の噴火、降雨などの自然的な条件の他に、ダム・砂防施設などの設置や土砂浚渫などの人工的なものを受けている。そこで、まず、支川からの土砂流入、貯水ダム、砂防施設などの人工建造物と上流域の支川のショートカットの影響、クルー火山の噴火、浮遊砂や掃流砂などの流砂形態、粒度構成などを考慮して、防災上意義のあるシナリオを想定し、1次元河床変動計算を行った。

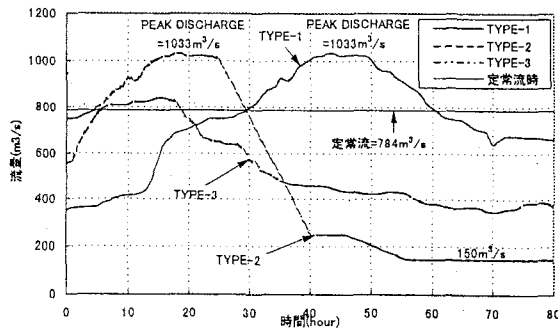


図-4 洪水ハイドログラフ

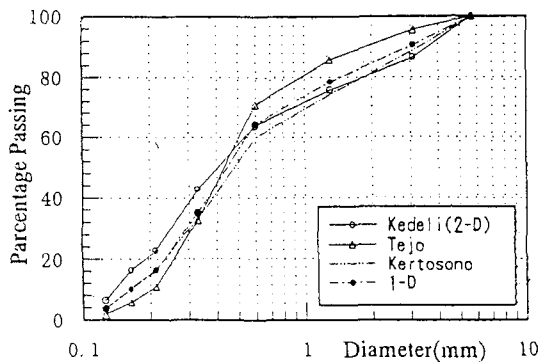


図-5 河床材料の粒度分布

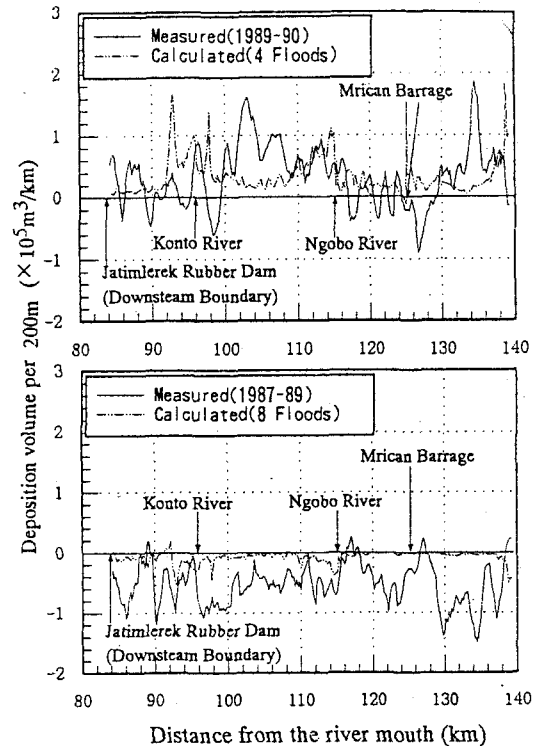


図-6 河床変動計算結果と実測との比較

なお、非定常計算に用いたハイドログラフは図-4に示す1985年3月に記録されたクディリ市付近のもの(TYPE-1)から、ピーク流量 $1033 \text{ m}^3/\text{s}$ を中心とする72時間を1ステップとして取り出し、それを反復させた。定常計算での流量は $797 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。混合砂の計算に用いた河床材料の粒度分布は図-5に示すとおりで、一様砂の場合は D_{65} に相当する 0.6 mm を用いた。

図-6は計算結果の一例を示したものである。平衡給砂で定常流を与えたRun-1ではンゴボ川が流入する 115 km 付近から河床の上昇が顕著に見られる。同様に 96 km 付近より流入するコント川の影響が河床位と水位の上昇に現れている。河床位の大幅な上昇は、 84.2 km を境に見られなくなるが、この地点にはジャティムレックダムがある。これより 15 km 上流つまり $100 \text{ km} \sim 85 \text{ km}$ 部の川幅は他の $100 \sim 150 \text{ m}$ に比べて広く、 $250 \sim 500 \text{ m}$ ある。なお、土砂の堆積は河床材料の細粒化を伴っている。

砂防ダムや貯水ダムが完全に能力を発揮し、土砂をせきとめているような場合を想定して、上流端や支川からの給砂を排し、洪水ハイドログラフを与えたRun-3では、ダム直上流を除いて河床は全体的に低下し、河床材料は粗粒化している。

クルー火山の噴火後の土砂流入の影響を見るため、本川と支川からの給砂量を平衡状態の3倍にしたRun-4では、支川合流部とジャティムレックダム地点で河床位、水位とも急激に上昇している。

プティ川のショートカットが完成した場合を想定して本川からの給砂量を平衡状態の2倍としたRun-5においては上流端での堆積が著しく、細粒化が上流側より下流側へ徐々に伝播する。

なお、河床材料を一様であるとした計算では、河床変動が過大に算出されることがわかった。また、土砂輸送形態を掃流砂のみにした計算では結果がかなり異なり、不十分であることがわかった。

5.3 2次元解析

次に河道形態や流れの変化がブラントス河中流部の河床変動に及ぼす影響を見るために、河口から $125 \text{ km} \sim 136 \text{ km}$ 区間を取り上げ、2次元河床変動計算を行った。計算においては、湾曲河道の特性を把握しやすくするため、初期河床としては1991年の現地測量データを横断方向に平均した平坦河床を与えた。河床材料は1994年にクディリ地点で採取したものを与えた。ハイドログラフは図-4に示す3つのタイプのものを与え、定常の場合は $784 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。

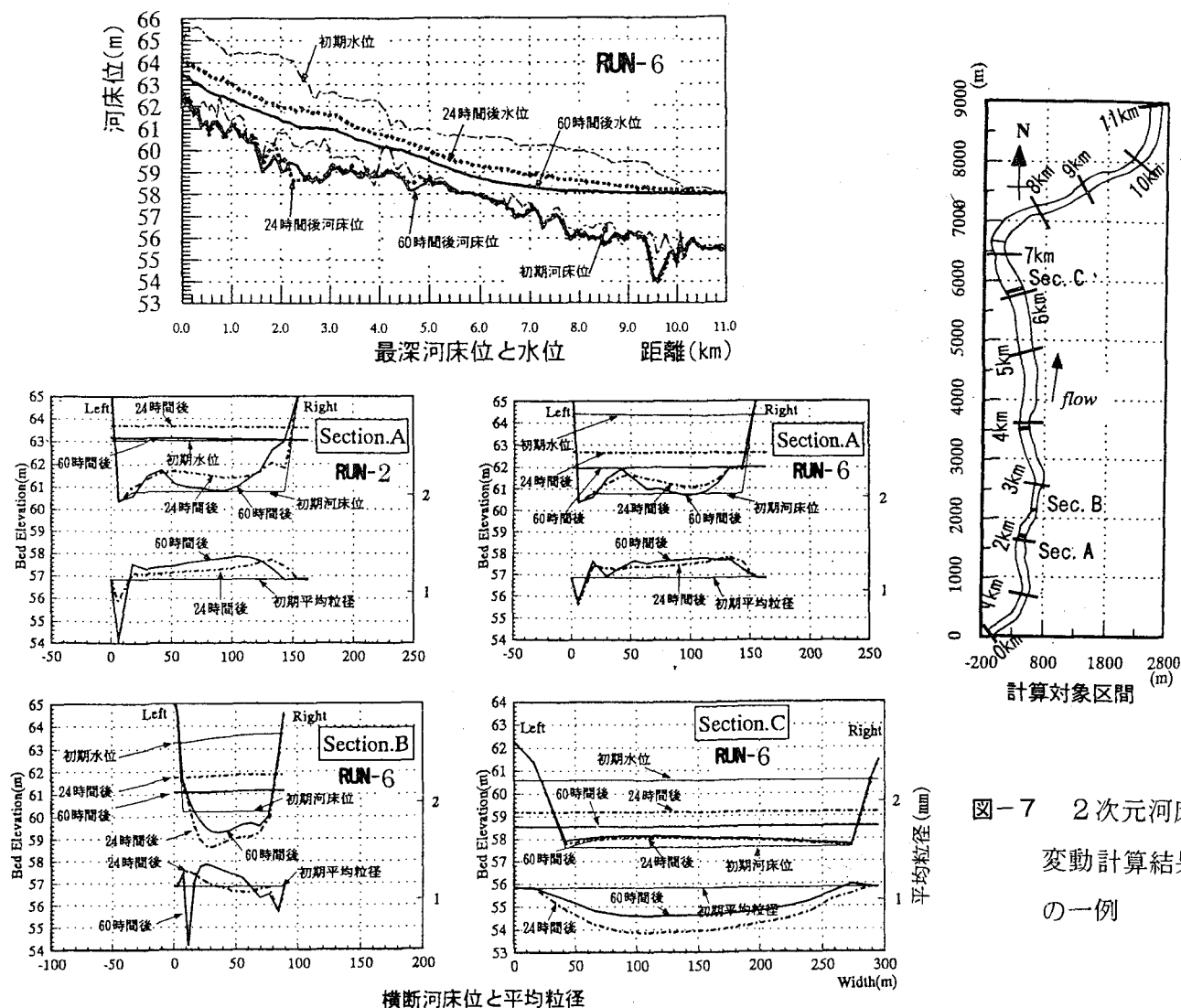


図-7 2次元河床
変動計算結果
の一例

図-7は計算結果の一例である。定常流を与えたRun-1では、7箇所深掘れが見られるが、1箇所を除いてすべて湾曲部か狭小部である。大きな湾曲部では外岸で侵食、内岸で堆積が生じているが、内岸部の堆積土砂に粗粒化が見られるのは興味深い。これは、湾曲部で浮上した粒子が、堆積区間で比較的大きなものから沈降しはじめることによると推測される。

TYPE-1の非定常流を与えたRun-2では、ピーク流量が $1033\text{m}^3/\text{s}$ と大きいのが、徐々に流量を下げていくため、48時間後の最深河床位はRun-1の場合よりも低いのに、流量が $650\text{m}^3/\text{s}$ となる72時間後には侵食がそれほど進んでいない。TYPE-1のピーク部を与えた後、急速に流量を小さくしたRUN-6, 7では60時間後に所々で浮き州の形成が見られた。また、全区間で埋め戻し現象が見られ、TYPE-1に比べて最終的には河床位の変化が小さくなり、平均粒径は全体的に小さくなった。TYPE-3のハイドログラフを与えたRun-8では著しい深掘れは起こっていない。

6. ブランタス河河口部の河道変動

図-8はブランタス河の放水路であるポロン川河口におけるデルタの変遷を示したものである。ポロン川は1914年から1954年までの40年間に河口部に $280,000,000\text{m}^3$ の土砂を堆積させ、デルタが約4 km前進した。さらに1945年から1964年の間に3 km, 1964年から1970年の間に2 km, デルタが前進している。

1977年から1985年の8年間には約 $36,000,000\text{m}^3$ の土砂が堆積したが、堆積はショートカットの右岸側に生じており、左岸側では旧河道も含めてほとんど地形が変化していない。

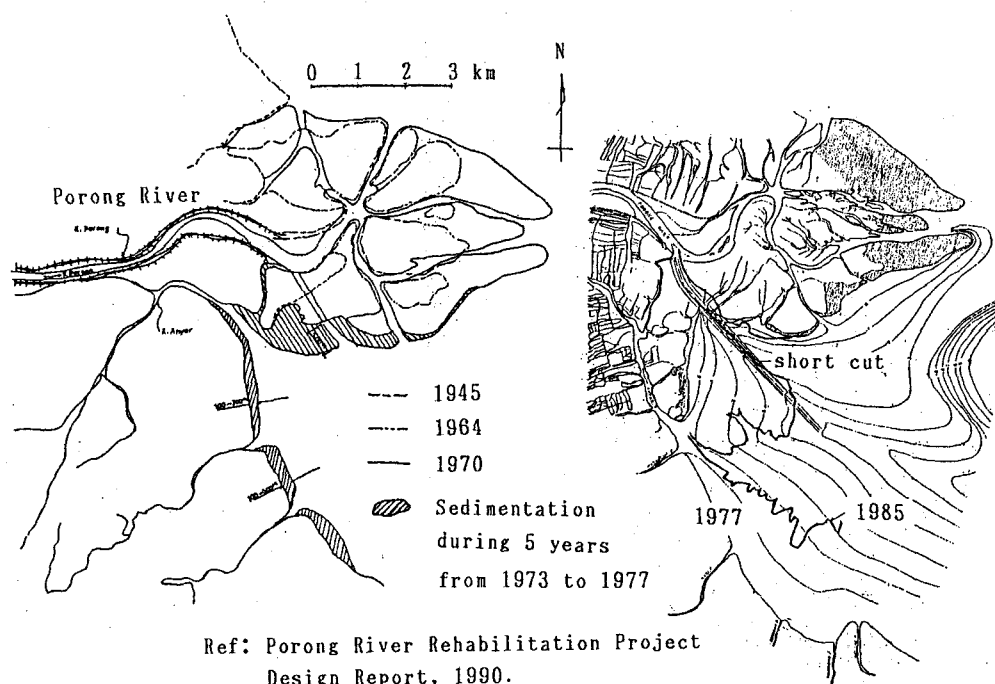


図-8 ポロン川河口におけるデルタの発達

いずれにせよ、ポロン川の河口堆積は非常に活発で、なんらかの対策が必要である。従来は浚渫が主要な対策であったが、現在潮汐エネルギーによる河口堆積制御の可能性についても検討を行っている⁵⁾。

7. おわりに

以上、ブランタス河の土砂流出と河床変動について、上流から下流まで、その特徴と問題点を考察した。これらが今後の対策の参考になれば、幸いである。

謝辞：本研究は、文部省特別事業国際共同研究「中国及びインドネシアにおける自然災害の予測とその防御に関する研究 (IDNDR)」の研究経費，ならびに文部省科学研究費補助金・国際学術研究（共同研究）「洪水，土砂流出および海岸侵食による災害とその防御に関する研究」（No.09044188, 研究代表者：江頭進治立命館大学教授）の補助を受けている。また，インドネシア公共事業省及び国際協力事業団（JICA）には，現地調査，資料収集などにおいて多大な協力を得ている。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 水原嘉男，橋本和治，大内 実，福田信彦：ウリンギ貯水池のフラッシング，日本工営資料，1991。
- 2) Isunugroho and Dyah, R.P.: Water and Sediment Balance in Wlingi Reservoir and its Correlation with Brantas River Bed Change, International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1997, pp.191-198.
- 3) 望戸昌観：ブランタス川の河床変動と治水対策，立命館大学修士論文，1998。
- 4) 増田亜友美，江頭進治，金 海生，望戸昌観，藤田正治：ブランタス河蛇行部の河床変動と砂の分級，平成10年度関西支部年次学術講演概要，土木学会関西支部，1998，pp. II-97-1-2.
- 5) Sawai, K. and Nakade, S.: Estuary Sedimentation Control by Means of Tidal Reservoirs, Proceedings of Workshop on Disasters Caused by Floods and Geomorphological Changes and their Mitigations, 1996, pp.149-156.