

バンジャルマシン港航路のシルテーション特性

岡部 保* ・ 入江 功**・ 堀江 毅***
永井康平****・ 浅川 勉*****

1. まえがき

バンジャルマシン港は、インドネシア国南カリマンタン州のバリト川河口上流約 26 km に位置している。バリト川は延長 600 km を越す大河である。その河口から沖の三角洲状の浅瀬の水深は広範囲にわたり基準面 (DL) 下 1~2 m、一部では 0 m しかないため、水深 6 m の進入航路は 14 km の延長が必要となり、インドネシア最大の埋没航路である。本航路は 1975~1976 年に開削されたが、余堀を含め 662 万 m^3 の予定が実際には多大のシルテーションにより、1,300 万 m^3 の浚渫が余儀なくされた。その後、毎年およそ 200 万~300 万 m^3 /年の維持浚渫がなされてきたが、水深 6 m で底幅 60 m の断面を維持することすら困難であった。

このため、インドネシア政府は日本政府に対し、埋没土量の低減策と維持浚渫の能率向上策を開発する技術協力を要請してきた。これに応じて日本政府は国際協力事業団を通じ、「バンジャルマシン港航路維持・浚渫計画調査 (団長・岡部保)」を 1988 年より 1991 年に実施した。

調査は (財) 国際臨海開発研究センターと日本テトラポッド (株) が受託し、運輸省港湾技術研究所の協力を受けて実施された。その内容は、自然条件の現地観測 (1 年間)、2 層流による水理模型実験、底質の各種室内試験および埋没の数値シミュレーションを柱としたもので、多くの興味ある事実が明らかとなった。本論文では当航路のシルテーションの概要を紹介し、シルテーションに関する今後の研究の参考に供するものである。

2. バリト川河口域の自然条件

バリト川の河口は、南緯 $3^{\circ}31'$ 、東経 $114^{\circ}30'$ に位置し、河口幅は約 4 km である。バンジャルマシンまでの河川内は流心部で 5~15 m の水深がある。図-1 に示したとおり、河口の東側は南に向かって岬をなし、西側

は約 30 km でカプアス川、さらに約 20 km でカハヤン川の河口がある。バリト川の河口より沖側は、図-2 のように半円形の浅瀬を形成している。航路は、N 208.5° S の方向にほぼ浅瀬の中央を横断しており、沖の端を Spot No. 0、河口端を No. 14,000 (C 点) と、単位である m を省略して呼んでいる。図中の英文字は現地観測点を示す。

(1) 河川流量と浮遊土砂輸送量

1988 年 9 月~1989 年 8 月までの月 1 回の測量によるバリト川の流量 Q は、F 点 (河口より 17.3 km 上流) で 12 月に最大 4,600 m^3/s 、8 月に最小 700 m^3/s を記録

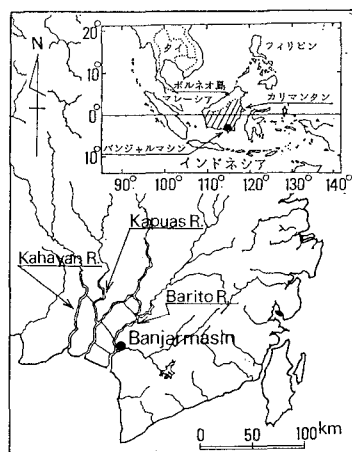


図-1 バリト川の流域

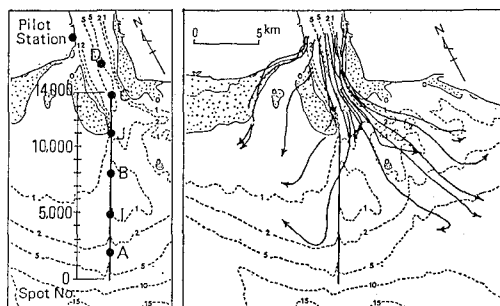


図-2 航路位置および河川流出状況

* 正会員 (社)日本港湾協会会長
前(財)国際臨海開発研究センター理事長
** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水土木工学科
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部長
**** 正会員 工修 (株)日本港湾コンサルタント 調査役
前(財)国際臨海開発研究センター調査役
***** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所副所長

した。雨季は通常11月から5月までであるが、この年の1～2月は例年になく雨が少なく、図-3のように流量も $2,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度にとどまった。浮遊土砂輸送量 S (kg/s) は11月に最大値を記録し、雨季の当初は土砂が多量に排出されるという考え方を裏付けた。しかし全体的には図-4のとおり S は Q の指数に比例していると理解される。

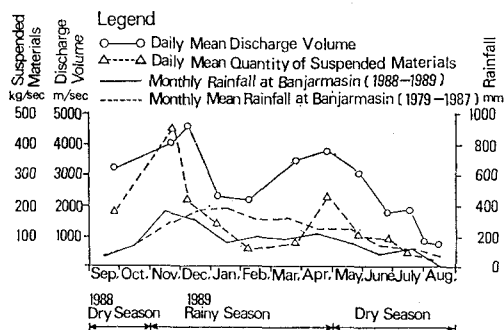


図-3 河川流量、浮遊物質量および雨量の年変化

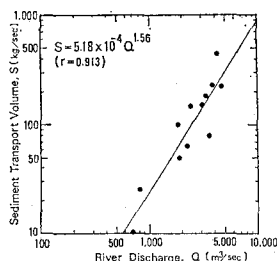


図-4 河川流量と流出土量 (1983～89年)

(2) 潮汐と流れ

河口右岸の Pilot Station での潮汐は日周潮が卓越しており、振幅は $K_1=59 \text{ cm}$, $O_1=30 \text{ cm}$, $M_2=32 \text{ cm}$, $S_2=2 \text{ cm}$ である。平均水位は $DL+1.63 \text{ m}$ 、印度洋大低および大高潮面はそれぞれ $DL+0.40 \text{ m}$ および 2.86 m である。

引き潮時の河川の主流は図-2のようにほぼ南に向かって流出する。流速は最強時で $1.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ に達する急流である。航路に対しては、河口西側の浅瀬（以下サンドスピットと呼ぶ）に沿った流れが No. 11,000 以北で航路を南北方向に横断し、さらに浅瀬沿いに南南西に向きを変えて No. 7,000 付近で再横断する。この流速はほぼ 1 m/s 程度である。

図-5に K_1 成分の潮流楕円を示す。航路東側では楕円は扁平で流向は一定方向を示しているが、航路の西側では浅瀬の影響で丸みを帯びている。

航路内の一周潮平均の流速は、乾季（10月）にはC点以外上流向きであり、雨季（4～5月）でも海底近くで

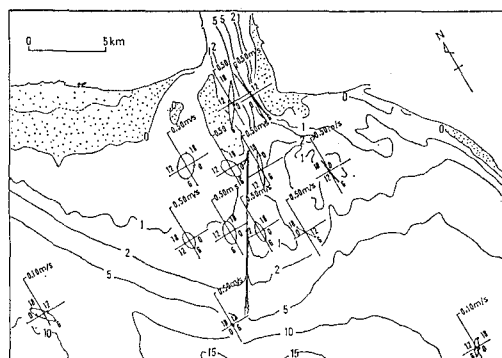


図-5 K_1 成分の潮流楕円 (1988年9月)

は上流向きであるという注目すべき特徴がある。これは水理模型実験においても確認された。

(3) 塩水楔

図-6に示したとおり、塩分濃度 10‰ の海水は、乾季には前述のF点（河川上流）にまで達するが、雨季にはD点（河口）付近に止まっている。雨季のC点では海底まで塩分が少なく、これは地形と流れの影響とも考えられる。

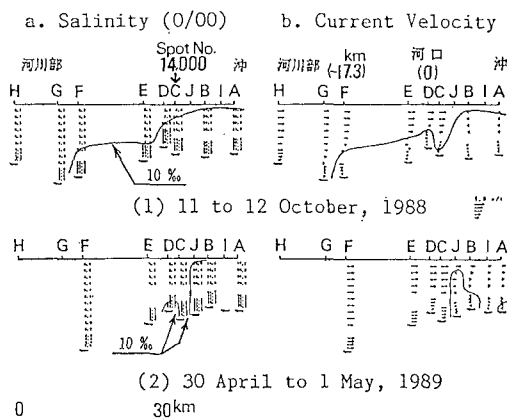


図-6 航路および河川内の塩水楔と流速分布

(4) 波

A点での通年観測の結果では、図-7のとおり高い波は雨季（特に11月～2月）に南西～南南東方向から多く、最高で $H_{1/3}=1.7 \text{ m}$, $T_{1/3}=5.8 \text{ s}$ を記録した。乾季は $H_{1/3}<1.0 \text{ m}$ であり、南の波向が圧倒的である。

(5) 底質

河口域の海底表面の底質分布は、図-8のように一部を除いてシルトと粘土が大部分という細粒土である。例外的に砂が多い場所は航路のほぼ中央の東側Q点とL点、およびその西側O点である。季節的には、9～10月、1～2月、4～5月の3回測定したが、C点を除いては大差なく、C点だけ他の時期に砂分が増えていた。Qと

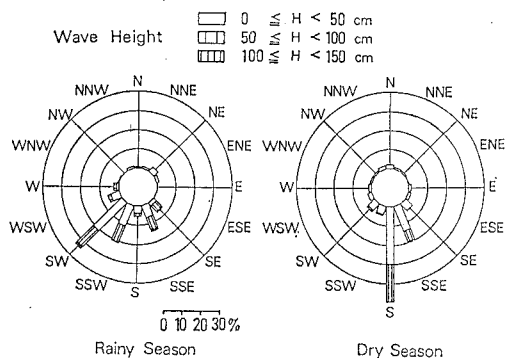


図-7 波向別波浪発生頻度 (1988年9月～89年8月)

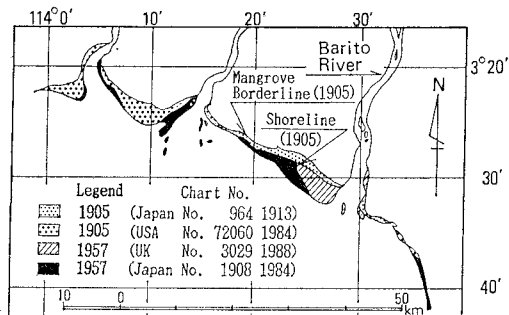


図-9 海図による過去の汀線変化

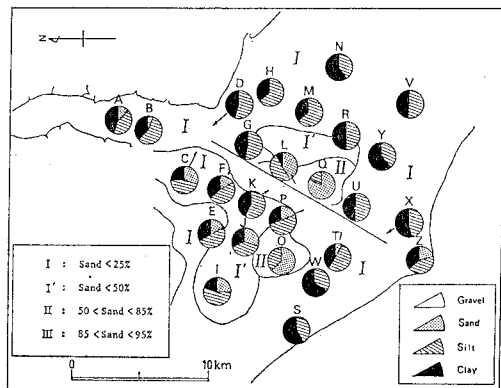


図-8 底質の粒径分布 (1989年1～2月)

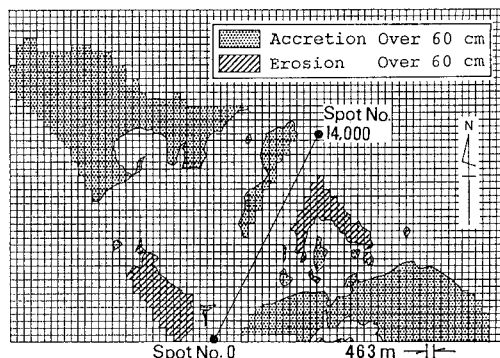


図-10 浅瀬の海底地形変化 (1905～1988年)
60 cm以上の堆積(網)と侵食(斜線)

L点は東側の浅瀬上にあり、C点は砂と泥が互層に堆積している場所である。西側のサンドスピット上では、1990年1月に表層 5～15 cm だけ細砂に覆われていることが観察されている。

航路内の実質的な海底の底質は年間12回、5地点でのサンプリングの結果では、時間的場所的な変動が大きい。全平均では砂分が約 16% であった。この変動の最大の原因は浚渫工事の影響とみられる。なお、航路外の実質的な海底の表面には数 cm 未満の黄褐色の浮泥が存在する時期があることが観察されている。

3. シルテーションの原因と結果

(1) 海浜および海底地形変化

今世紀初頭からの海図および本調査の深浅測量を分析した結果、図-9のような汀線の前進がみられた。特にバリト川河口より西側の海岸は年間 100 m 以上の速度で前進した。この痕跡はランドサットの衛星写真からも読みとれる。浅瀬の海底地形は過去 約 80 年間で図-10のような変化を示した。浅瀬西端、航路上流西側、航路中央東側一帯では堆積、浅瀬中央の航路先端西側、航路上流東側の流心部では侵食が起こった。その規模は2～

3 mの厚さにのぼる。これの原因としては、航路東側では流出流による洗掘とその先の堆積が主要因と考えられる。航路西側では、主に雨季の南西からの波により、浅瀬中央沖先端での洗掘、浮遊土砂の岸向きの輸送、その岸近く(河口の西側約 10 km 付近)での東西への分流通堆積によることが考えられる。

(2) 航路の埋没

航路の埋没量は、断続的に維持浚渫が行われてきたため有意なデータは少ないが、浚渫休止期間の音波探査(周波数 210 kHz; 以下、音探と略称する)の結果では、3～6月で24～86万(3データ)、9～11月で24万(1データ)、11～12月で202万(1データ) m³/月 が得られている。雨季、特にその初期に多く、乾季には少ない。

航路の縦断方向の埋没状況は図-11の例のとおり、航路開削後まず No. 12, 300 付近に常に堰状の堆積(比較的固い土砂)が起こり、その背後に広範な埋没(軟らかい土砂)が生じる。この過程は図-12からも確認できる。No. 13, 000 以北では、水深は安定しており、若干の洗掘もみられる。上の堰はサンドスピットの存在による周辺の洗掘/浮遊土砂の堆積によるものと理解され、その後の大量の埋没は浮遊物質と流泥(Fluid Mud)の堆積によるものと考えられる。

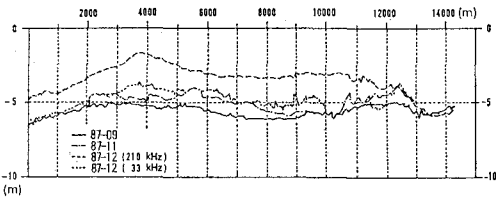


図-11 航路中心線上の埋没状況

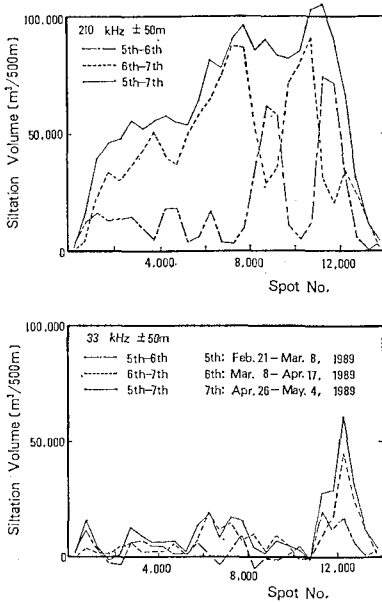


図-12 航路縦断方向(幅±50 m)の埋没進行状況

航路埋没の速度は、定期航行している客船の音探(周波数 200 kHz)によれば、3～6月期で、No. 5,000～10,000において2.0～3.1 cm/日(2データ)である。

(3) 航路内堆積土の構造と挙動

航路の横断方向にとった音探(周波数 210 および 33 kHz)記録は図-13のようなものであり、底泥の航路両側からの流入をうかがわせるものである。これは浚渫終了後2.5ヶ月たった5月中旬の状況である、

その時の航路中心付近の底泥の鉛直単位体積重量(γ_t)分布を竹竿(各節の平均間隔 40～45 cm, 平均容量 450～670 cc)で採取・測定した結果を図-14に示した。航路は約6 mまで浚渫された後であり、図中最深の値はほぼその付近のものである。図の縦軸は表層の海水($\gamma_t=1.02 \text{ gr/m}^3$)から密度変化を生じる面(210 kHzの反射面から10～50 cm上)を1とし、厚さ1～3 mの流泥層の底を0として無次元化している。

これより、 γ_t は表層より連続的に 1.17 gr/cm^3 程度まで上昇した後、一旦 1.12 gr/cm^3 に減少し、それ以降では急激に増加していることが分かる。このような谷が生じる理由は明らかではないが、流泥の沈降流動(沈降速

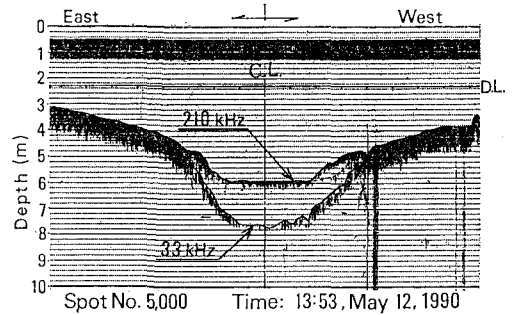


図-13 航路内の流泥の横断構造

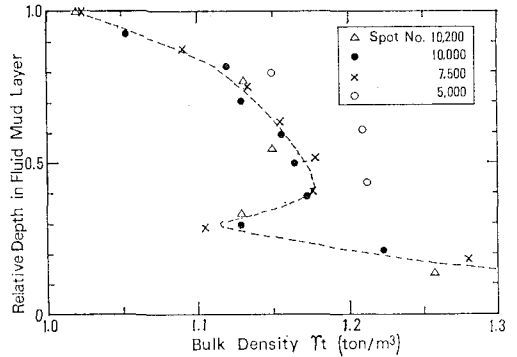


図-14 流泥層内の泥の鉛直密度分布

度は図-15参照)と圧密(平均圧密荷重 0.01 kg/cm^2 で圧密係数 C_α は $1 \text{ cm}^2/\text{日}$ と極めて緩やかな)状態の境界に関係する可能性が考えられる。 γ_t の最初のピークの上の曲線が外に凸であるのは、 γ_t が上がる(水深が深まる)に従って沈降速度が遅くなるためと理解される。

この流泥層の表面は210 kHzの音探で容易に検知されるが、その反射面の水深が2時間20分で60 cmほど変化した現象が観測された。これは流泥層の少なくとも上層が流動している傍証であると共に、音探結果の利用に際し注意を要する点である。

なお、このような γ_t の変化をもつ海底の何処を「海底」と定義するかは、いわゆる Nautical Depth の問題にも関係し、別稿に譲る。

(4) 航路埋没のシミュレーション

流れと波による底泥の浮遊・拡散・沈降を取り込んだ鶴谷他(1990)による多層レベルモデルにより、1989年3～5月の浚渫休止期間中の航路(水深6 m, 底幅60 m)の埋没量(g/cm^2)を計算し、実測値(210 kHz面以下を $\gamma_t=1.09 \text{ t/m}^3$, 含水比 $w=1,000\%$ と $\gamma_t=1.21 \text{ t/m}^3$, $w=300\%$ に分け、33 kHz面以下を $\gamma_t=1.45 \text{ t/m}^3$, $w=110\%$ として換算)と比較した結果は図-16のとおりであり、両者はかなり良く合っている。それに基づき同モデルで平均的埋没量(砂の比重2.65, 空隙

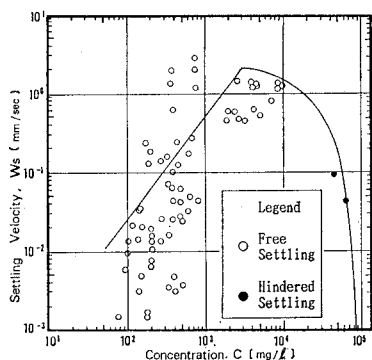
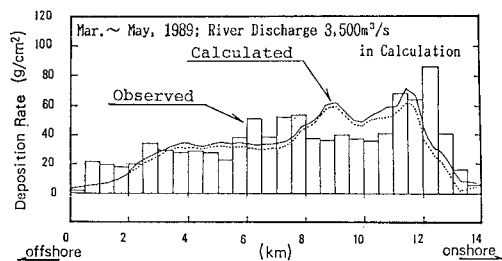


図-15 航路底泥の沈降速度

図-16 航路埋没の実際(棒)と計算値(折線)
(点線は砂分を除いた泥分の量)

る特徴のあることが判明した。

1) 広域的、長期的には、三角洲状の浅瀬はバリト川の供給土砂で発達しているが、浅瀬の中央先端での洗掘、西端および東側中央部での堆積、航路上流部への西からの土砂供給というパターンがあると説明できる。

2) 河川流量、塩水楔、波などの影響で、雨期特にその初期において多量の航路埋没が発生する。

3) 雨期、乾期共に航路内の平均流速は、特に底層では、航路入口部を除き上流向きであり、掃流によるフラッシュ効果を弱めている。

4) 航路上流西側のサンドスピットの影響で、航路内に堰が形成され、これがその背後下流側に多量の流泥が堆積するのを助長している。

5) 航路内の流泥の単位体積重量は、表層で薄く底層で 1.3 t/m^3 程度まで上がる鉛直分布をもち、その上層部は流動している。

6) 現状での航路埋没量は、多層レベルモデルで計算した結果、年間 400 万 m^3 を越すと推算される。

最後に、本調査を実施し、本稿の発表許可を頂いた国際協力事業団ならびに調査団活動にご助力頂いた日本およびインドネシアの政府関係者に深甚なる謝意を表す。なお本調査研究は、運輸省港湾技術研究所の小林正樹、村上和男、鶴谷広一、加藤一正の各室長および日本テトラポット(株)田中則夫取締役技術部長他多くの方々に協力いただいた。

参 考 文 献

鶴谷広一・村上和男・入江 功(1990): 多層レベルモデルによる港湾埋没の数値計算モデルの開発—熊本新港の適用例—, 港研報告, 21巻, 1号, pp. 3-51.

4. あとがき

以上のように、バリト川という大河の河口外の航路の埋没現象は大規模かつ複雑であるが、以下のような主た

率 40%, 泥の $\gamma_t=1.45 \text{ t/m}^3$, $w=110\%$) を推定した結果、航路全体で雨期270万, 乾期150万, 合計年間420万 m^3 程度となることが予測された。