

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1389 September 2021

インドネシア・Patimban 海岸周辺海域での季節変動を考慮した土砂移動に関する現地調査

中川 康之, 伴野 雅之, 小碓 大地, 田村 仁, A. Bagyo Widagdo, Dinar C. Istiyanto

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 調査対象海域の概要	4
2.1 調査海域の気象・海象概況	5
2.2 対象海域への流入河川	5
2.3 沿岸域の地形と底質	5
3. 現地調査の内容	6
3.1 観測時期.....	6
3.2 観測項目と方法	6
4. 観測結果.....	7
4.1 塩分の鉛直分布	7
4.2 濁度の鉛直分布	9
4.3 底泥密度（湿潤密度）の鉛直分布	9
5. 考察	10
6. まとめ	11
7. おわりに	11
参考文献	12
付録 塩分・濁度鉛直分布図（本文未掲載分）	13

Field measurement of seasonal variation in sediment transport around the Patimban coast, Indonesia

Yasuyuki NAKAGAWA*

Masayuki BANNO**

Taichi KOSAKO***

Hitoshi TAMURA****

A. Bagyo Widagdo*****

Dinar C. Istiyanto*****

Synopsis

It is important to understand the sediment transport processes around port facilities, especially for minimizing siltation in navigation channels. Sedimentary processes are often due to several site-specific parameters, such as weather and maritime conditions and sediment properties. In this study, the targeted site is the Patimban coast on the north coast of west Java in Indonesia, where a new port is under construction, and field measurements were carried out to elucidate the supply process of fine sediments through the Cipunagara river, which flows into the coastal area.

Considering the characteristics of climate with seasonal monsoons in the tropical rainforest area, field surveys such as water quality measurement were carried out in the rainy season and the dry season. In addition to the data acquisition of seasonal fluctuations in salinity and turbidity through the water column around the estuary, the in-situ measurement for the bulk density of the near bottom deposits to detect the fluid mud transportation. The field observations were carried out in February (the local rainy season) and August (the same dry season) of 2017, with the cooperation of the Agency for the Assessment and Application of Technology (BPPT), under the joint research project. The observed data shows the apparent difference in salinity and turbidity distributions between the rainy and dry seasons around the area, corresponding to the seasonal change in the freshwater and sediment discharge through the river. Furthermore, in the rainy season, the existence of a fluid mud layer with the thickness of about 15 cm was detected by using an in-situ densimeter.

Key Words: Java Sea, Monsoon, Field monitoring, Fine sediments, Fluid mud

* Head of Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
** Senior Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
*** Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
**** Senior Researcher, Marine Information Group
***** The Agency for the Assessment and Application of Technology (BPPT), Indonesia
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5051 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakagawa@p.mpat.go.jp

インドネシア・Patimban 海岸周辺海域での季節変動を考慮した土砂移動に関する現地調査

中川 康之*・伴野 雅之**・小裕 大地***・田村 仁****
A. Bagyo Widagdo*****, Dinar C. Istiyanto*****

要 旨

航路や泊地の整備においては、船舶の航行安全を確保するための水深の維持管理がまず重要となる。これに対し、河川からの流下土砂が堆積する河口域や、波浪等による漂砂が卓越する浅海域など、土砂移動が活発な海域内の航路・泊地においては、浚渫後の埋め戻しなどにも配慮しつつ、効率的な水域施設の維持管理を行う必要がある。そのためには、対象水域周辺における土砂移動の特徴を把握しておくことが重要であり、気象や海象、さらには堆積物の性状など、地域固有の自然条件への配慮が重要となることも多い。本研究では、インドネシア・ジャワ島の北西部に位置し、ジャワ海に面した Patimban 海岸を対象とし、同海岸域に流入する Cipunagara 川の河口における現地観測を通じて、陸域から供給される懸濁物の海域への輸送過程の把握を試みた。

現地観測は、インドネシア政府機関の一つである技術評価応用庁 (BPPT) との共同研究として実施し、季節風や河川流量の季節変化に伴う土砂動態の違いの把握を目的として、2017 年 2 月 (雨季調査) および 8 月 (乾季調査) に、対象河川の河口周辺において実施した。塩分や濁度の空間分布に関する基本データのほか、高濁水域の土砂輸送過程で重要となる Fluid mud 形成にも注目し、現地式浮泥密度計による基礎データの獲得を試みた。淡水供給量の季節変化に対応した海域での淡水や懸濁物の濃度分布の差異を明らかにし、さらに、淡水供給量が增大する雨季においては、河口部直近の水底では微細泥粒子の集積による、層厚 15 cm 程度の Fluid mud 層の存在が現地式密度計を用いた観測により確認された。

キーワード：ジャワ海，季節風，現地調査，懸濁物輸送，Fluid mud

* 沿岸環境研究領域長 (沿岸土砂管理研究グループ長兼務)
** 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 主任研究官
*** 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 研究官
**** 海洋利用研究領域 海象情報研究グループ 主任研究官
***** インドネシア技術評価応用庁
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5051 Fax：046-844-1274 e-mail:nakagawa@p.mpat.go.jp

1. はじめに

沿岸域における土砂輸送は、河口から海浜域に供給された土砂が、潮流や波浪などの作用外力の下で生じ、供給量と外力による再移動量の収支の結果として、沿岸地形は変化していく。このような地形変化のプロセスの把握は、沿岸域の適切な利用・保全において重要となることは言うまでもない。港湾における航路や泊地の整備においても、浚渫域周辺で土砂移動が生じやすい場合には、航路や泊地の利用に支障が出ないように、水深維持に必要な何らかの対策が求められる。どのような対策が適切かを判断するに際しては、土砂供給や移動に関与する外力条件に加え、流入土砂の性状の把握も必要になるなど、対象域ごとに異なる土砂輸送環境を把握することが重要となる。

航路・泊地の埋没対策は、国内のみならず、陸域からの豊富な土砂供給のある世界各国の港湾整備における共通の課題であり、これまでも東南アジアをはじめ諸外国各港での土砂流入過程の特徴をふまえ、対策案の検討が行われてきた（たとえば入江ら，1991；PIANC，2007）。特に近年では、大型コンテナ船の利用を想定した大水深の岸壁と航路の整備が求められる中、大河川河口など厳しい自然条件における港湾立地が求められることも多く、依然として、対象国や地域での気象条件などに起因する土砂輸送の特徴を十分に把握しつつ、合理的な維持管理が求められる。

このような背景をふまえ、日本国内とは異なる気象・海象条件下における海岸域の地形変化過程の把握、さらには予測技術の向上を目指し、本研究ではインドネシア・ジャワ島西部の北岸にあるPatimban海岸を対象として現地調査を2017年の2月および8月に実施した。現地調査は、熱帯域特有の雨季／乾季の間で生じる河川流量の大きな変化に注目し、各時期における河川流下土砂の海域への流入過程の差異について、塩分や濁度等の水質観測を行った。特に細粒懸濁物の供給が豊富な河口部周辺で生じる、Fluid mudと呼ばれる海水よりも比重の大きい高濃度濁水塊（たとえばKinekeら，1996）の形成に関する実態把握を試みた。さらに、土砂移動に関連する対象水域の特徴をふまえた今後の研究課題についてもとりまとめた。現地調査はインドネシア政府機関の一つである技術評価応用庁（以下、BPPTと記す）との共同で実施した。

なお、同海域では日本政府の有償資金協力事業として、2017年11月以降に新港建設の工事が進み、その一部は2020年12月に完成し、首都ジャカルタ近郊の物流拠点となりつつある。本港のプロジェクトを進めるに際しては、

将来の港湾の維持管理に必要とされる航路や泊地での維持浚渫量の予測も含めた、入念な事前検討も当然実施されている（JICAら，2017）。これに対し、本研究では既往の検討手法等では解明が困難であった事象の把握や、新たな現地データ等の蓄積に基づく解析方法の改良を通じて、これまで地形変化に関する既往知見を補強し、将来的な港湾の維持管理のさらなる合理化に寄与することも目的とする。

2. 調査対象海域の概要

2.1 調査海域の気象・海象概況

調査対象とした海域は、インドネシアの首都ジャカルタの約100km東方に位置する、ジャワ島西部北岸のPatimban海岸である（図-2.1）。当該海域にはCipunagara川が流入し、その河口周辺にはデルタ地形の発達が見られる。ここでは、JICAによる調査報告書（JICA，2017；JICAら，2017）を参照し、対象地域の気象および海象の概況を記す。

ジャワ島西部は、熱帯雨林気候に区分され、2007年～2016年の当該地域で得られた気象データの整理によると、

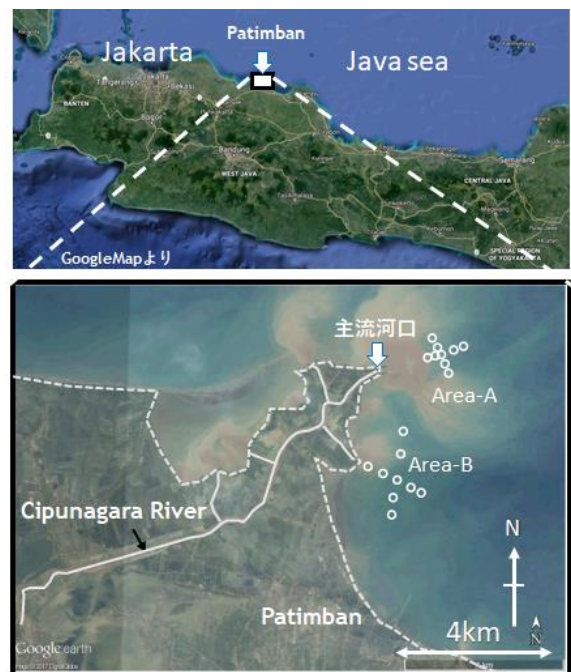


図-2.1 Patimban海岸の位置と調査対象域
(下図は現地調査当時のGoogleEarthによる衛星画像(2017年)に、おおよその海岸線(白破線)、Cipunagara川流路(白実線)、調査実施点(白丸)をそれぞれ記しており、現在建設中のPatimban港はArea-Bの沖合(南東側)に位置する。)

雨季（およそ10月～5月）の中では1月の平均雨量が273 mmと最も多く、一方、乾季（6月～9月）においては8月の平均雨量が36 mmと最小になる。また、雨季と乾季では異なる風向からの季節風（モンスーン）が卓越し、雨季には北西風が、乾季には南東風がそれぞれ支配的となることが、気象再解析データにより確認されている。さらに、このような季節ごとの大局的な風場の場に加え、海陸風の発達も顕著であり、特に日中には北方からの成分が卓越することは、風波の発達に影響を及ぼすことを考慮すると重要な気象現象である。

波浪情報に関しては、実測データに基づく情報は少なく、ジャカルタ沖を対象とした波浪推算結果（JICA, 2017）によれば、年間での有義波高1.5 m以下の波浪の出現確率が99.3%を占め、波向きとしては16方位においてWからの頻度が最も多く全体の10.5%と見積もられている。また、季節風等の平均的な風場に対する波浪以外にも、上述の気象概況で記した海陸風の日周変動のうち、特に海風時の波浪発達も顕著であり、対象海域の底質移動や地形変化を評価するうえでは、これらを考慮した解析（小裕ら, 2021）も重要と考えられる。なお、潮汐条件については、日周潮が卓越し大潮時には約1mの潮位差であり、雨季・乾季に関わらず、潮汐による流れは年間を通じて底質輸送現象における基本外力となる。

2.2 対象海域への流入河川

調査対象海域に流入する主な河川はCipunagara川であり、河口部から主に南方向に広がる流域を有し、その面積は約1,300～1,500 km²と見積もられる（Nurdiyanto, 2019, Milliman et al. 2013）。流量については、前述の雨量の季節変動に対応することになり、たとえば同河川の流域内を対象とした2011～2013の各年における日流量データ（図-2.2）によれば、雨季には200～300 m³/sまで増大するのに対し、乾季においては50～100 m³/s程度で推

移していることがわかる。また、他の年を対象とする流量の推定値（Nurdiyanto, 2019, Suzuki et al. 2019）においても、やはり雨季には150～300 m³/s、乾季には～10m³/sのオーダーとなっている。なお、図-2.2にて2011年の流量が年間を通じて少なくなっており、例えばエルニーニョ現象の発生年には、インドネシア地域では年間雨量が減少（ラニーニャ発生時は雨量増大）することが指摘されている（例えば、BAPENAS,2012）ものの、2011年にはエルニーニョ現象は確認されず（気象庁, 2012）、ここでの雨量データにみられる当該年の少流量の理由については現時点では不明である。

2.3 沿岸域の地形と底質

河川による海域への淡水供給と共に、陸域からは主にシルト・粘土の細粒分を主体とする土砂も同時に供給される。本調査では、図2-1中に示したCipunagara主流河口よりも東側の海域を調査対象としており、そこでの海底地形（図-2.3）に注目すると、主流河口部の周辺では干潟浅海域が広がり、その北側で比較的急勾配の海底斜面

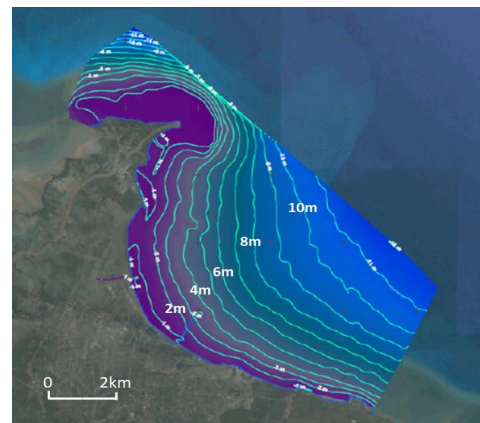


図-2.3 Cipunagara河口デルタおよびPatimban海岸沖の水深分布（Patimban港建設前、BPPT提供）

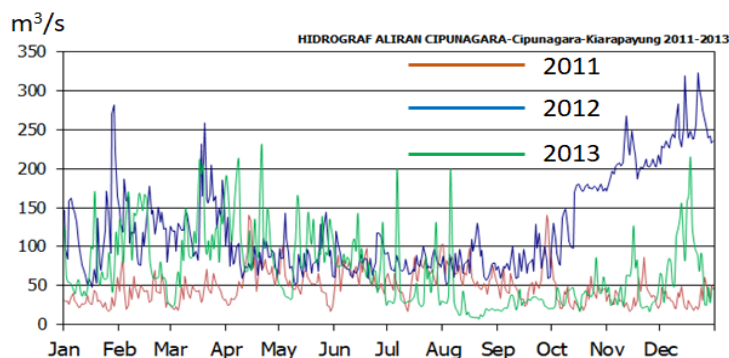


図-2.2 Cipunagara川の流量データ
（2011年～2013年の日平均流量、BPPT提供）

に接続する，いわゆる河口デルタ地形の発達が見られる．一方，主流河口部よりも南東側の海域においては，海底勾配が3/1000程度の非常に緩やかな遠浅の海岸になっている．これらの海域における水深10 m以浅の13地点から採取された底質分析の結果（JICAら，2017）によると，シルト・粘土分の重量割合が88.7～99.9 %（平均97.8 %）を占め，泥分が主体となっている．なお含水比は65.85～216.0 %（平均100.8 %）となっている．

一方，当該海域の地形変化の履歴について，たとえばNurら（2020）は，1978年以降の海岸線をとらえた衛星画像を用いることにより，特に河口デルタ周辺の地形変化量について検討している．その結果によると，当該河口域では1978年から1996年にかけては侵食傾向にあったものの，それ以降は堆積傾向に転じた結果，1978年を基準とすると2020年までの42年間に，約206 ha（2.06 km²）の陸地化が生じたと見積もられている．

3. 現地調査の内容

3.1 観測時期

本研究では，対象水域への土砂流入特性の把握を目的として，雨季と乾季のそれぞれにおける，Cipunagara河口沖での水質計測等を実施した．雨季調査は2017年2月17日～18日に，乾季調査は同年8月8日～9日に実施した．

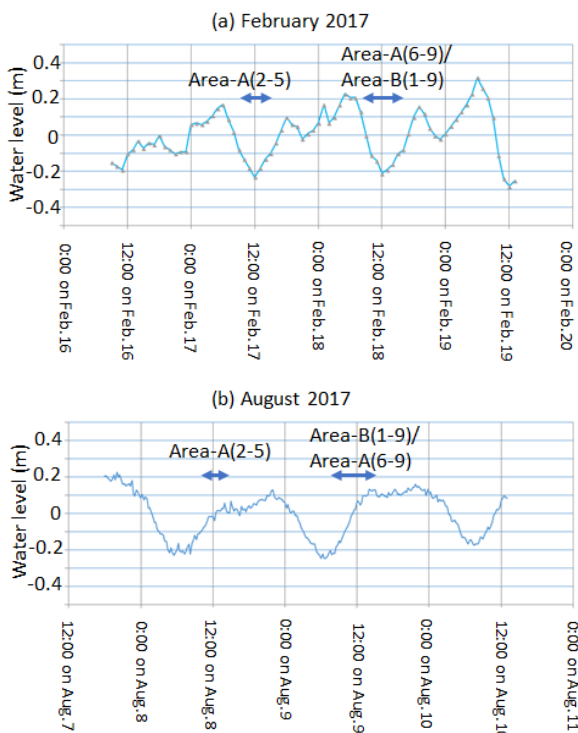


図-3.1 調査時の潮位と水質調査の実施時間帯
（潮位データはいずれもBPPT提供）

水質観測の実施日を含む潮位の計測結果（図-3.1）に，Area-AとArea-Bにおける各測点の船上調査を実施した時間帯を矢印でそれぞれ示す．また，Cipunagara川の流量については，対象流域内で計測された雨量データから推定された約2週間ごとの平均流量（Nurdiyanto，2019）によると，観測時期が含まれる2月の前半・後半で28 m³/s・79 m³/s，一方，8月の前半においては23 m³/sとそれぞれ算定されており，雨季，乾季での河川からの淡水流入の違いが確認できる．

3.2 観測項目と方法

調査項目として，多項目水質計（JFE-アドバンテック社製）による水温，塩分，濁度の鉛直分布計測のほかに，現地式密度計（Hydramotion社製）による底泥の湿潤密度計測（中川ら，2004）を，いずれも調査船からの測器の上げ下ろしにより実施した．調査対象点は図-3.2に示すCipunagara川の主流河口（Area-A）と支流河口（Area-B）の2か所の水域を対象として，表-3.1に示す座標位置

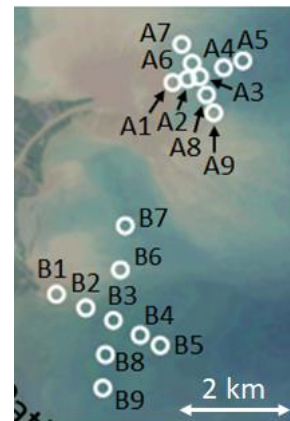


図-3.2 水質等観測点位置と測点番号

表-3.1 水質等観測点の座標一覧

Stn. No.	Latitude	Longitude
A-1	6° 10'55.61"S	107° 54'46.71"E
A-2	6° 10'53.99"S	107° 54'53.07"E
A-3	6° 10'52.69"S	107° 54'58.63"E
A-4	6° 10'48.96"S	107° 55'08.95"E
A-5	6° 10'45.57"S	107° 55'17.37"E
A-6	6° 10'46.65"S	107° 54'55.41"E
A-7	6° 10'38.87"S	107° 54'50.92"E
A-8	6° 11'00.63"S	107° 55'01.54"E
A-9	6° 11'08.90"S	107° 55'04.45"E
B-1	6° 12'27.71"S	107° 53'54.62"E
B-2	6° 12'33.38"S	107° 54'07.30"E
B-3	6° 12'38.57"S	107° 54'19.03"E
B-4	6° 12'44.96"S	107° 54'30.52"E
B-5	6° 12'49.45"S	107° 54'39.14"E
B-6	6° 12'16.82"S	107° 54'22.49"E
B-7	6° 11'57.69"S	107° 54'25.01"E
B-8	6° 12'53.17"S	107° 54'15.53"E
B-9	6° 13'07.27"S	107° 54'14.17"E

を目標点として、GPSにより調査船を誘導、投錨のうえ停泊して計測作業を実施した。

4. 観測結果

4.1 塩分の鉛直分布

まず対象域への淡水供給の影響を評価するため、各観測エリアで計測された塩分の特徴を以下に示す。ここでは、代表測線として各エリアの岸沖ライン上の観測点における、塩分の鉛直分布の測定結果を図-4.1 (Area-A) および図-4.2 (同B) に示す。(沿岸方向の測線の結果については巻末付録に示す。) 図-4.1および図-4.2には、雨季・乾季の調査結果を黒線とオレンジ線でそれぞれ示し

ている。なお、A1測点については、調査時の水深が小さく、十分な計測データが得られていないため、A2よりも沖合での計測結果を示している。Area-AおよびBのいずれの海域においても、雨季調査(2017年2月)の観測結果には、水表面での塩分の低下、すなわちCipunagara川からの淡水供給の影響が確認できる。一方、乾季(2017年8月)においては、河川流量が少ないことにより、どの地点も塩分は表層付近においても32 PSU程度であり、鉛直方向にほぼ様な分布となっている。

雨季における塩分分布の特徴について詳しく見ると、たとえば、Cipunagara川主流の河口部に相当するArea-Aでは、下層の塩分が32 PSU程度となる海水層に対して、淡水供給の影響を受けた水面表層では、わずかではある

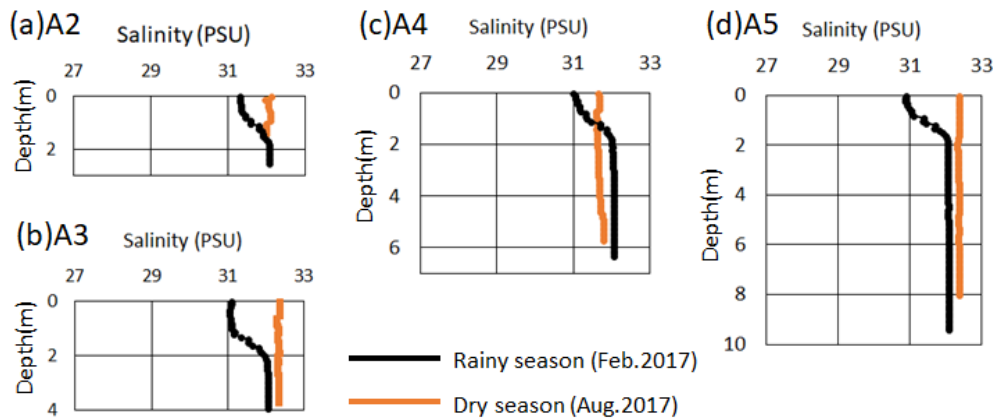


図-4.1 主流河口沖 (Area-A) での塩分の観測結果

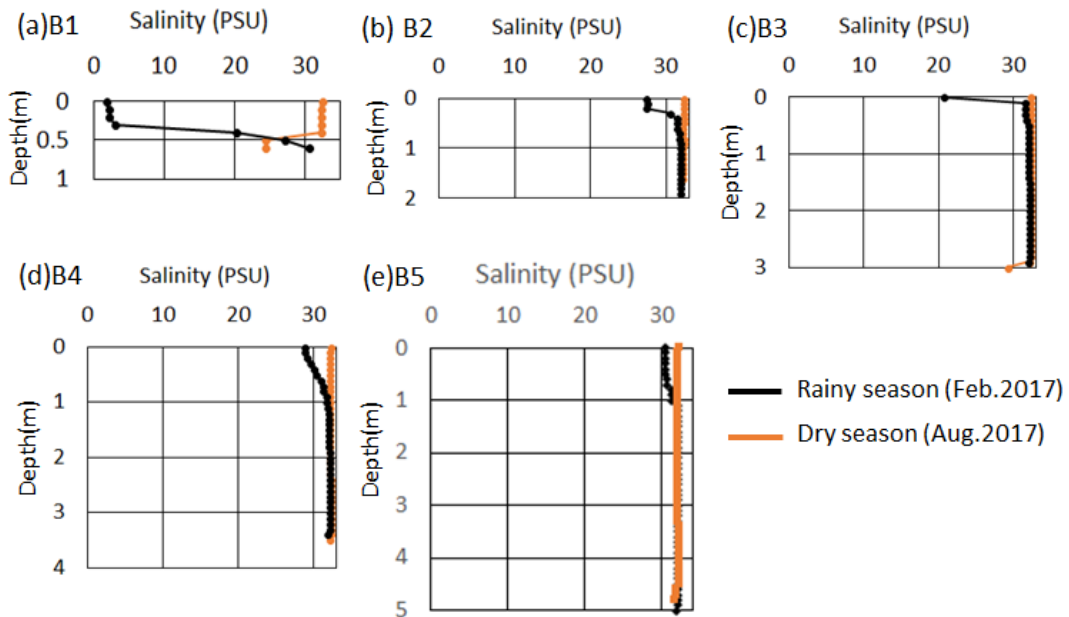


図-4.2 支流河口沖 (Area-B) での塩分の観測結果

が1 PSU程度の塩分低下が確認でき、最も沖側のA5地点（観測時の水深9.5 m）でも、塩分躍層が形成されていることがわかる。一方、支流河口部の沖合であるArea-Bの観測域では、水表面の塩分低下量がさらに増大し、B4地点までは30 PSU以下となっている。さらに、河口に最も近いB1地点では、塩分が上層の2 PSUから底面近傍では30 PSU以上まで上昇しており、淡水が海域に流入した直後の河口域特有の塩淡水境界が捉えられていることがわかる。なお、上述のとおり塩分の変動範囲がArea-AとBでは大きく異なるため、図-4.1と4.2の横軸スケールが異なることに注意されたい。

エリアごとに塩分分布の特徴が異なる理由については、海域に流入した後の淡水の拡散状況の違いを示している

ものと考えられる。すなわち、海域側に突き出た岬地形の先端部に位置する主流河口域（Area-A）の沖合では、Area-Bを含むPatimban海岸の沿岸部に比べて、潮汐流が速くなるのが数値シミュレーションの結果において確認されており（小碓ら，2021）、水域ごとの流況特性の違いによる鉛直混合の差異が、その理由の一つと考えられる。

なお、岸沖測線と直角方向の測線上に位置する沿岸測線の計測結果については、一部スポット的な表層塩分の極端な低下（地点B6）がみられる地点を除き、各領域では上述のA3やB3と同様な傾向が示されている。（巻末付図-1,3参照）

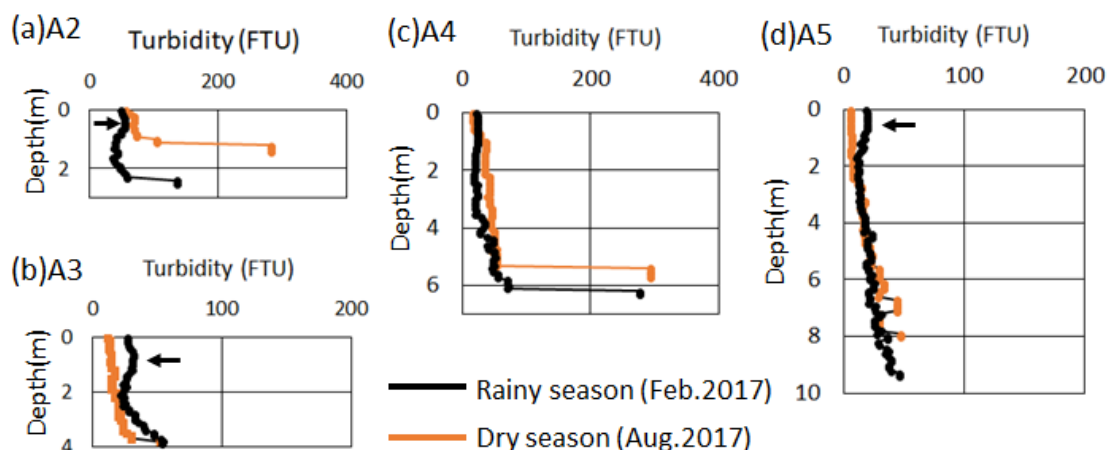


図-4.3 主流河口沖（Area-A）での濁度の観測結果

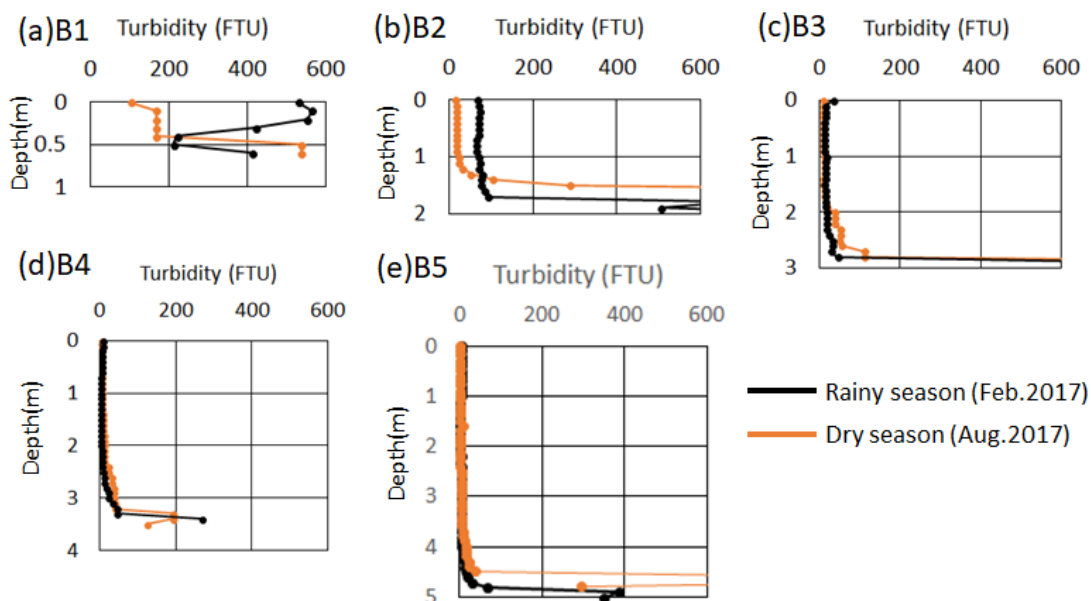


図-4.4 支流河口沖（Area-B）での濁度の観測結果

4.2 濁度の鉛直分布

前節と同様に、各エリアの岸沖測線上の各地点での濁度の計測結果を図-4.3および4.4に示す。同図では、多項目水質計の光学式濁度センサーで計測された濁度（FTU単位）の結果を示している。まず、Area-Aにおける濁度分布の特徴としては、いずれの地点においても、底層に近づくほど濁度が上昇する傾向にあるのに加え、雨季調査の結果においては、表層付近にも濁度の増大がみられ（図中に←で示す）、塩分分布で確認された淡水流入の影響と同様に、河川由来の懸濁物供給の増減に応じた濁度分布の季節変化をとらえているものと考えられる。

一方、Area-Bにおいては、特に河口に近いB1やB2地点では、雨季と乾季での差が著しく、雨季になると表層付近の濁度の上昇が顕著であることがわかる。参考までに雨季調査の際に、船上より撮影された写真を図-4.5に示す。たとえばB1地点の濁度の鉛直分布（図-4.4(a)）について、図-4.2(a)の塩分分布と比較してみると、水表面付近の淡水層は濁度500 FTUを超える極めて高濁度な状態にあり、それよりも下層で塩分が増大する海水層では、いったん濁度が200 FTU程度まで減少していることがわかる。すなわち、低塩分・高濁度の河川由来の懸濁水塊と、それよりも濁度が低く高塩分の海水由来の水塊との間で、密度躍層が形成されていることがわかる。沖合の各点（B3, B4）においては、河口近傍のような雨季と乾季の差異はみられない。しかし、河口近傍の2地点（B1, B2）でみられる濁度分布の特徴は、河口域から海域への懸濁物流入量を評価するうえで重要な情報であり、水域での土砂移動予測を目的とする数値シミュレーショ



図-4.5 B2付近における観測時の濁りの様子
(2017年2月観測時に撮影)

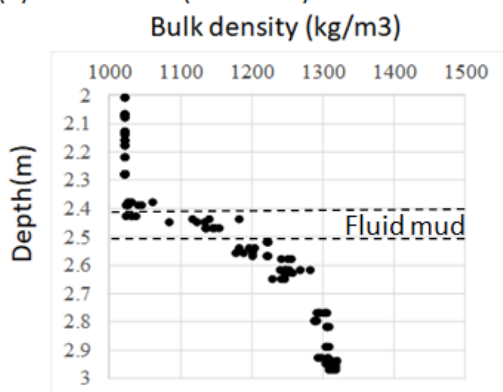
ン等の境界条件において考慮すべき事項となる。

なお、沿岸測線の各点での濁度の計測結果については、領域AおよびBそれぞれの沖合部の結果（図-4.3のA3や図-4.4のB3）と、ほぼ同様な結果を示している（巻末付図-2,4参照）。ただし、A9地点のように、局所的に濁度が高い特異な地点もみられる。この点については、数値シミュレーションも活用しつつ、水質分布の時空間変動の特徴を精査していく必要がある。

4.3 底泥密度（湿潤密度）の鉛直分布

シルト・粘土の微細粒子の沈降による、水底付近での高含水比泥（Fluid mud）の集積状況が確認された、河口直近のA2とB1地点における、現地式密度計による底泥密度の鉛直分布の測定結果を図-4.6および4.7にそれぞれ示す。（図-4.6（A2地点）においては、海水層から圧密した堆積泥の湿潤密度（1,300 kg/m³程度）以上に遷移する深度での密度の鉛直分布に注目するため、海水層の密度（1,023 kg/m³程度）から明らかに密度が上昇し始める深度

(a) Wet season (Feb.2017)



(b) Dry season (Aug.2017)

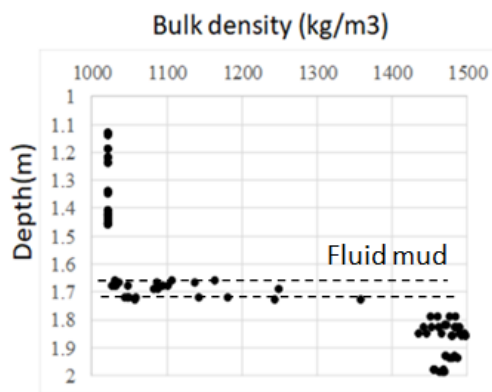


図-4.6 A2地点で計測された(a)雨季と(b)乾季の底泥密度の鉛直分布

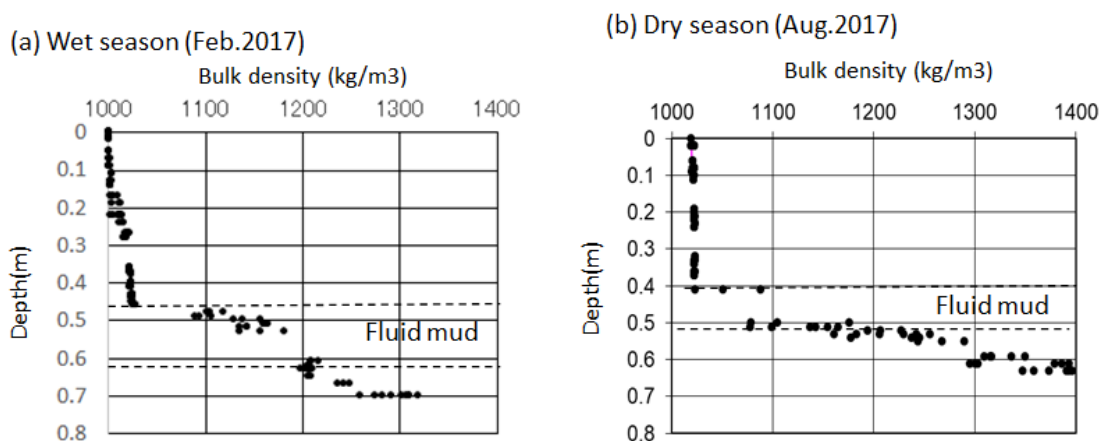


図-4.7 B1地点で計測された(a)雨季と(b)乾季の底泥密度の鉛直分布

より、50~70 cm程度上方の海水層以下の範囲を図示している.)

各地点ともに、乾季の観測結果においては、海水層から底泥密度が急激に増大する鉛直分布を示しており、密度が上昇し始めてから、いわゆるFluid mud層の上限の目安となる $\rho_B=1,200 \text{ kg/m}^3$ を超えるまでの層厚が10 cmに満たない状況であることがわかる。一方、雨季の観測結果においては、海水層から密度が増大し始めてから、乾季に比べて緩やかに密度が上昇しており、Fluid mud層の上限目安の $\rho_B=1,200 \text{ kg/m}^3$ を超えるまでの層厚が、A2およびB1地点で10~15 cm程度となっている。すなわち、乾季と雨季との間での、河川を通じた土砂供給条件の違いにより、このような河口部での底泥密度の鉛直分布にも、明らかな差異が生じることが確認された。特に、湿潤密度 ρ_B が $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下のFluid mudの形成は、重力流的な挙動を示す(たとえば、Whitehouseら・2000)ため、河川流や潮汐流などの一般的な流れに伴う土砂粒子の移流・拡散輸送とは異なる取り扱いが求められる。

5. 考察

インドネシア・ジャワ島西部の北岸、Patimban 海岸における、Cipunagara 河口沖での現地観測を通じて、雨季・乾季の河川流量の季節変動に伴う淡水(塩分)や濁度の拡散状況などの基礎情報の蓄積や、さらには水底付近での Fluid mud の形成という新たな情報の獲得にも成功した。一般的に河口域での地形発達には、河川を通じた淡水流量と懸濁物濃度、さらに海水との混合状態によって形成される空間的な密度分布の特徴に応じて、鉛直方向に密度が一様化する場合(Homopycnal-condition)、淡

水供給による低塩分層が海域側に広がる密度躍層が形成される場合(Hypopycnal-condition)、さらに懸濁物濃度の上昇による底層付近の密度上昇が生じる場合(Hyperpycnal-condition)に分類できる(たとえば Masselink et al.2011)。本調査の結果によれば、当該河口域においては雨季と乾季でこれらの分類も異なることになり、乾季には Homopycnal-condition、一方、雨季には Hypopycnal-condition と、底層付近での懸濁物集積による Fluid mud 形成にも関係する Hhyperpycnal-condition が複合的に生じた様相を呈している。このような密度分布に基づく各条件の違いは、河口域での土砂の集積域の変化を通じて、デルタ地形の岸沖断面プロファイルの形成パターンを支配するものであることから、調査対象域では季節ごとにデルタの発達傾向が変化する可能性があることを意味する。

一方、季節変動よりも長期的な、数年から数十年におよぶ時間スケールでの沿岸地形の変化に注目すると、2章でも述べたように Cipunagara 川の河口デルタにおいては大規模な地形変化が生じており、Google earth により公開されている衛星写真によれば、たとえば 1984 年から 2020 年までの海岸線の変化は図-5.1 のように示される。同図を見るとわかるように、沖合に向けて河口デルタが延伸していく中で、その先端部が西方から東方に偏向していく様相も呈しており、海域に通じる河川流路位置の変化に連動した”delta switching”(Masselink et al.2011)と呼ばれる土砂堆積域の変化を示している。また、このようなデルタ地形発達の方で、岬部西側の沿岸部では海岸線後退の傾向もあり(Achiari et al. 2015, Suzuki et al. 2019)、沿岸域一帯での長期的な地形変化の特徴を議論する上では、河口での土砂堆積のみならず潮



図-5.1 Patimban 海岸周辺の海岸線の経年変化

汐流や波浪などの外力による土砂の再移動にも留意する必要がある。

本調査で確認された、河口域の底層での Fluid mud の形成は、デルタ地形の発達を予測するためのモデルを構築していく上で重要な情報となる。Fluid mud の重量流的な泥の輸送が生じる場合には、流れや波の作用に起因する底質の巻き上げ、移流・拡散、沈降（堆積）という一般的な土砂の移動プロセスだけでは、航路埋没を含めた沿岸域の地形変化の予測が困難となる。このため、本海域においても、本調査で得られた観測データを活用しつつ、Fluid mud 輸送を考慮した底泥輸送モデルによる地形変化予測の検証が、今後の研究課題として挙げられる。なお、Fluid mud の特徴を考慮した底泥輸送モデルについては、これまでもいくつか提案されてきているものの、河川からの流下土砂量などの外部要因に依存した Fluid mud の層厚の変化や、それに伴う輸送量の時空間変動など、その動態が十分に再現可能なモデル化には至っていない。この点については、Fluid mud の水平輸送フラックスなど、モデルの検証に必要な定量データが十分ではないこともその要因の一つと考えられ、底泥層の輸送量評価のための計測技術の確立も今後の課題である。

一方、本調査の観測結果は、調査海域の沖合で工事が進みつつある港湾の航路や泊地にも、当該河川から供給される細粒土砂が Fluid mud の状態で集積する可能性があることを示唆する。細粒土砂が集積しやすい航路や泊地においては、特に Fluid mud の航行船舶への影響を考慮した水深の評価方法（可航水深）を適用する港湾も諸外国には多く見られる（たとえば PIANC・2008）など、軟泥の集積を前提とした航路や泊地の維持管理の効率化

にも留意しておく必要がある（中川，2019；坂田ら，2019）。この点については、浚渫した航路内への土砂の集積状況など、現地モニタリング等を通じた実態の把握を通じて、航路等の維持管理の効率化に備えることが重要である。

6. まとめ

熱帯雨林地域の河川周辺での地形変化に関するメカニズム解明を目的として、雨季と乾季の2時期それぞれにおける、流況計測や濁度等水質計測などの現地観測を行った。土砂動態の季節変動に関する基本データのほか、現地式浮泥密度計を導入することにより、浮遊土砂のみならず Fluid mud 層の形成に関する実態解明に資する基礎データの獲得を試みた。観測は現地の共同研究機関であるインドネシア技術評価応用庁（BPPT）と実施し、2017年2月（雨季）および8月（乾季）に、対象河川の主流部および支流部の河口周辺で実施した。観測結果からは、河口沖における塩分や濁度の空間分布の特徴から、淡水供給量の変化に対応した海域での懸濁物輸送の差異を明らかにした。さらに、雨季には淡水供給の増大に伴い、河口部直近の水底では微細泥粒子の集積による、層厚15 cm程度の Fluid mud 層の存在が現地式密度計を用いた観測により確認された。

7. おわりに

日本国内とは異なる気象・海象条件下における海岸域の地形変化過程の把握、さらには予測技術の向上を目指し、ここではインドネシアの Patimban 海岸を対象とした現地調査を実施した。まずは、河川流下土砂の海域への

流入過程について、塩分や濁度等の水質観測および河口部底層で生じるFluid mud形成の実態把握を試み、これらの雨季と乾季での際について実態を把握し、地形変化モデルの構築における基礎データを獲得した。

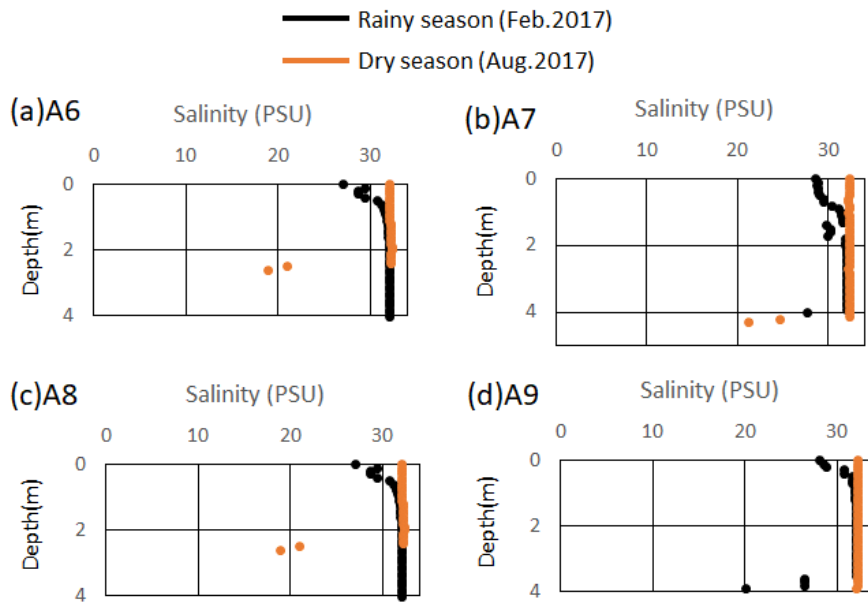
本研究を通じて得られた知見を基に、対象海岸における気象および海象特性を配慮した海岸部での底質移動予測モデルの構築も進めつつある。今後はFluid mud輸送の取り込みのほか、建設工事が進みつつある港湾の外郭施設や水域施設などの地形条件も考慮し、土砂移動および地形変化の予測ツールとしての改良を進める予定である。

謝辞：本調査は、インドネシア技術評価応用庁（BPPT）と港湾空港技術研究所との間での研究連携協定に基づいた共同研究の一環として実施したものである。協定締結に際して、協力を得た多くの関係者皆様に謝意を表します。また、本研究の一部は科研費（課題番号：16H05749）の助成を受けて実施したことを付記します。最後に、部内討議会における沿岸・海洋部門メンバーとの質疑や東島義郎特別研究主監（国際主幹）をはじめとする公表審査会委員メンバーによる査読を通じて、多くの貴重な意見を頂いたことを付記して謝意を表します。

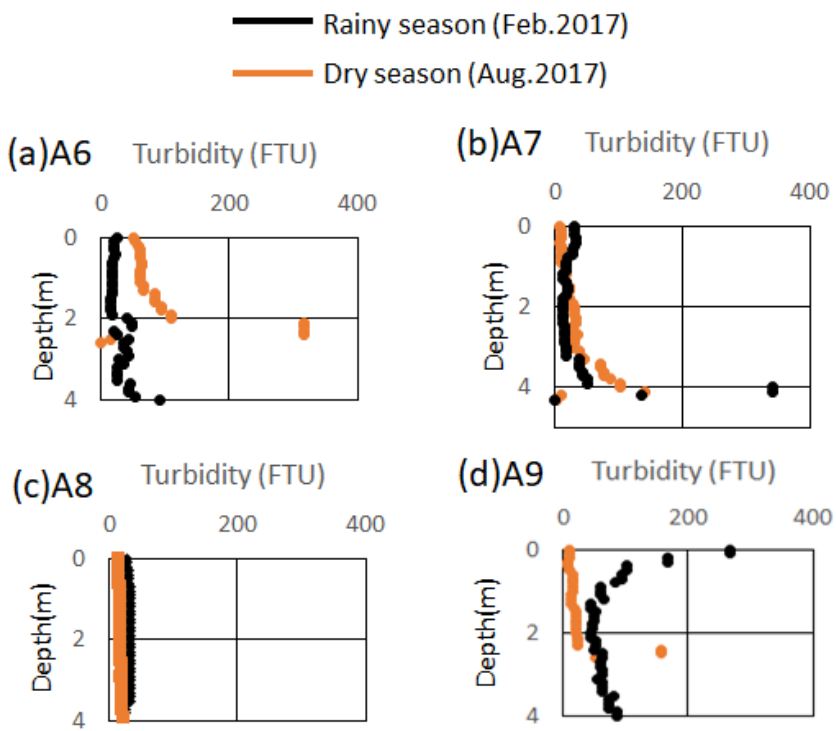
(2021年8月5日受付)

参考文献

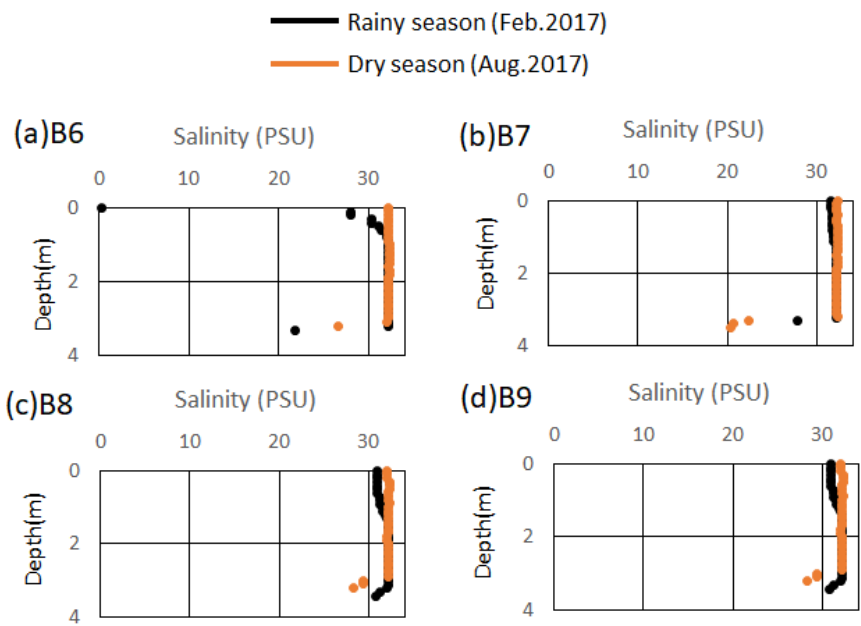
- 入江功・村上和男・鶴谷広一（1991）：シルテーションによる航路・泊地埋没の水理機構に関する研究，土木学会論文集，No. 438，II-17，pp. 1-12.
- 気象庁（2012）：気象変動監視レポート2011，62p.
- 小裕大地・田村仁・Aloysius Bagyo Widagdo・Dinar Catur Istiyanto・中川康之（2021）：海陸風に伴う波浪変動がジャワ島北西部沿岸域の底質移動に及ぼす影響，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.77，No.2（印刷中）。
- 坂田憲治・井山繁・中川康之・岩波光保（2019）：浮泥堆積域における音響測深による観測海底面と底泥密度の関係性に関する評価，海岸工学論文集，第75巻，pp.493-498.
- 中川康之（2019）：航路・泊地の浮泥埋没に対する維持管理の効率化に関する研究，（一財）港湾空港高度化センター，平成30年度研究開発助成成果報告書，15p.
- 中川康之・高嶋紀子・篠澤巧（2017）：新潟西港内での土砂堆積特性の解明に関する現地調査と水理実験，港湾空港技術研究所資料，No.1334，14p.
- 中川康之・渡邊和重・谷川晴一・黒田祐一（2004）：海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握，海岸工学論文集，第51巻，pp.986-990.
- Achiari, H., Wiyono, A. and Sasaki, J. (2015) : Current characteristics and shoreline change at Pondok-Bali, North coast-Weat Java of Indonesia. *Procedia Earth and Planetary Science* 14, p.161-165.
- Japan International Cooperation Agency (JICA) (2017) : Environmental impact assessment report of new port development project in eastern metropolitan area (Patimban), 418p.
- Japan International Cooperation Agency (JICA), Ides Inc., Oriental Consultants Global Co., Ltd., and The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (2017) : The preparatory survey on Patimban port development project in the republic of Indonesia, Final report, 780p.
- Masselink, G., Hughes, M. G. and Knight, J. (2011): Introduction to coastal processes and geomorphology, Second edition, Routledge, 416p.
- Milliman, J.D. and Farnsworth, K.L. (2013) : River discharge to the coastal ocean (paper back edition), Cambridge university press, 384p.
- Ministry of National Development Planning/ National Development Planning Agency (BAPPENAS) (2012) : National Action Plan for Climate Change Adaptation (RAN-API), Synthesis report, 74p.
- Nur, W. H., Hendrizan, M., Nurhidayati, A. U. and Ismayanto, A. F. (2020) : Estuary changes of Cipunagara and Cimanuk river using landsat imagery spatial analysis, *Bulletin of the Marine Geology*, Vol. 35, No.2, pp.65-78.
- Nurdiyanto, N (2019) : Water balance for irrigation area, *Journal of Physics: Conf. Series*, doi:10.1088/1742-6596/1360/1/012025
- PIANC (2008): Minimising harbour siltation, PIANC Report No.102, 75p.
- Suzuki, T., Kikuyama, S., Sasaki, J. and Achiari, H. (2019) : Potential use of discharge channel for beach recovery in Pamanukan – Subang regency, Indonesia, Proc. 8th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR), Tokyo.
- Whitehouse, R., R. Soulsby, W. Roberts and H. Mitchener (2000): Dynamics of estuarine muds, Thomas Telford Publishing, 210p.



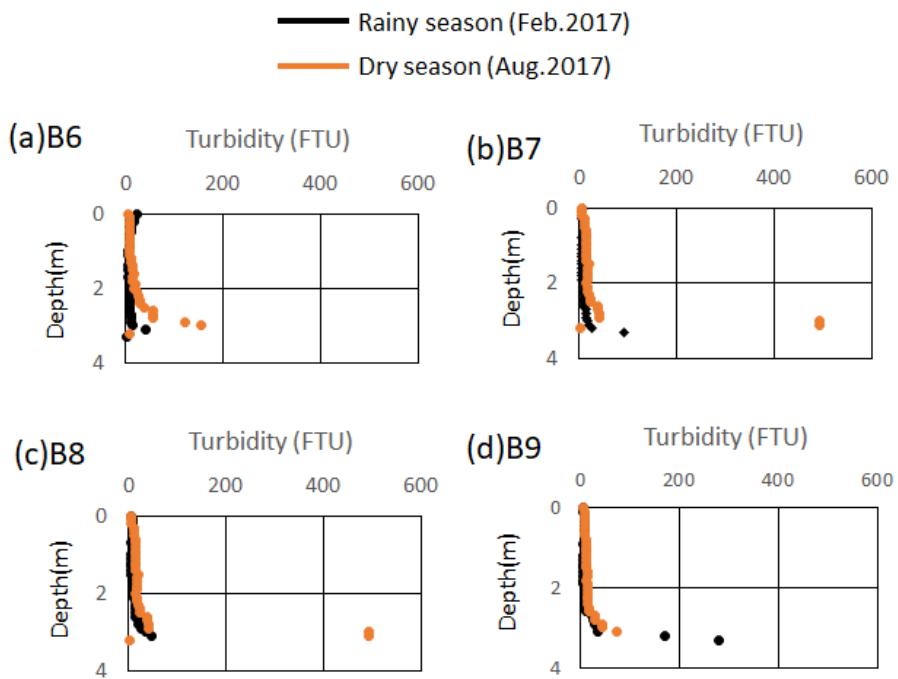
付図-1 Area-Aにおける沿岸測線 (A6,7,8,9) の塩分計測結果



付図-2 Area-Aにおける沿岸測線 (A6,7,8,9) の濁度計測結果



付図-3 Area-Bにおける沿岸測線 (B6,7,8,9) の塩分計測結果



付図-4 Area-Bにおける沿岸測線 (B6,7,8,9) の濁度計測結果

港湾空港技術研究所資料 No.1389

2021.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。