石垣島川平湾における物理環境と濁りの特性に関する現地調査

Field Observations of Physical Environments and Characteristics of Turbid Water in Kabira Bay, Ishigaki Island

神尾光一郎¹・矢代幸太郎²・田中亮三³・森重輝政⁴・鉢嶺 亮⁵・中村由行⁶

Koichiro KAMIO, Kotaro YASHIRO, Ryoza TANAKA, Terumasa MORISHIGE
Ryo HACHIMINE and Yoshiyuki NAKAMURA

Field observations were conducted to investigate physical environments and characteristics of turbid water in Kabira Bay. It was suggested that the anticlockwise circulation from the bay-mouth to central bay prevailed along the trench, however, during a period of high wind, wind-driven flow promoted vertical circulation. Wind-driven flow and cooling of surface water promoted vertical mixing in the water column, and thus, transported the high turbid water mass from the deeper to the upper layer. The flux of turbidity in the steep slope area along the trench was estimated to be directing toward the deeper layer, therefore, terrestrial fine sediments were estimated to be responsible for the high turbidity in the deeper layer.

1. はじめに

沖縄県沿岸域では、陸域からの赤土等の流入による水質汚濁が進行し、サンゴ礁等の沿岸生態系 (Honjoら, 2013) や水産業・観光業 (沖縄県水産試験場, 1979; 大見謝, 1992) に悪影響を与えている。平成7年に「沖縄県赤土等流出防止条例」が施行され、海域への赤土等の流出削減が図られてきたものの、閉鎖性の強い内湾域等では過去に流入した赤土等が未だに堆積していることが指摘されている (大見謝ら, 2002)。海域に堆積した赤土等は波浪等による再懸濁によって水質汚濁の原因となっている可能性がある。

本研究の対象海域である川平湾は、2つの水道で湾外と連結する閉鎖性の高い内湾であるが (図-1)、湾内にはサンゴ群集や干潟・海草場等の貴重な生態系が存在している。また、グラスボートやダイビング等の観光業、真珠養殖や定置網等の漁業が営まれている。しかしながら、過去の開発等に伴い湾内に赤土等が流入・堆積し、湾内の濁りの原因となっている可能性が住民より指摘されている (沖縄県, 2013)。本湾では、流動等の物理環境や濁り輸送に関する現地調査が実施されているが (神野ら, 2007; 前田ら, 2008)、流動パターンや濁り輸送に関する知見は十分と言えない。また、川平湾には、西水道か

図-1 調査点の配置

ら湾奥にかけて湾を縦断するように連続した水深約15～18mの深みが存在し、底層では高い濁りがみられている (沖縄県, 2013)。さらに、この底層の高い濁りは、滞筋から浅所に向かう斜面部での巻き上がりにより生じている可能性が指摘されている。

以上のことから、本研究では、川平湾において広域的かつ詳細な時間間隔で流動等の物理環境と濁りに関する現地調査を実施し、流動特性と滞筋底層の濁り原因について明らかにすることを目的とした。

1	修(水)	(株)東京久栄技術本部エンジニアリング部 主任研究員
2	修(理)	(株)東京久栄技術本部環境部 主任研究員
3	正会員	(株)東京久栄福岡支店 支店長
4		(株)東京久栄技術本部環境部 副部長
5		沖縄県環境部環境保全課 主査
6	正会員 工博	横浜国立大学大学院都市イノベーション 研究院 教授

表-1 連続観測の各調査点の水深、測定項目、設置水深

調査点	水深 (D.L.)	測定項目	設置水深
No.1 (水路)	-8m	水温、塩分、 水位	0.5, 2, 6m
No.2 (西水道)	-4m	流向流速 (EM), 水温、 塩分、濁度	水温・塩分: 0.5m, B+0.5m その他: B+0.5m
No.3	-14m	水温、塩分	0.5, 2, 5, 12m
No.4 (湾中央)	-16m	流向流速 (ADCP), 水温、 塩分、濁度	流向流速: B+0.3m その他: 0.5, 2, 5, 10, 14m,
No.5 (湾奥)	-14m	水温、塩分、 濁度	0.5, 2, 5, 10, 12m
No.6 (東水道)	-1m	流向流速 (EM), 濁度	B+0.5m
No.7 (礁池)	-3m	水位	B+0.5m
No.8 (湾外)	-15m	波高・周期	B+1.0m
L2	D.L.-2, -5, -10mの3箇 所に設置	流向流速 (EM), 水温、 塩分、濁度	B+0.2m
L4			
L5			
L6			

※設置水深は海面下からの深さを表すが、B+●は海底面からの高さを表す。

2. 現地調査の方法

(1) 調査エリアの概況

調査エリアは、川平湾とそれに連結する裾礁型サンゴ礁海域周辺とした(図-1)。湾口部の西水道から湾外にかけては、礁池を水路が貫いて沖合へ接続しており、湾内外の海水交換は、主に西水道を通じて行われる。前述し

たとおり、湾内には水深約15~18mの深み(以下、滞筋部)が存在し、滞筋部の底質は泥質となっており、陸域から流入した赤土等の土砂が堆積している。流入河川は14本あり、常時流入があるのは川平地区近傍の2本と湾奥部の3本で、南東端から流入する下田原川が最も大きい。

(2) 連続観測

2013年8月26日~9月30日の期間において、図-1に示す湾内外のNo.1~No.8の計8地点で、流速計(EM; JEEアドバンテック社, ADCP; RD-Instrument), 濁度計(CW; JFEアドバンテック社), 水温・塩分計(C-CT; JFEアドバンテック社), 波高計(WH-401; アイオーテック社), 水位計(C-WH; JFEアドバンテック社)を設置し連続観測を行った。各地点での測器の設置概要は、表-1に示すとおりである。なお、湾内の滞筋沿い斜面部(以下、斜面部)については、4ヶ所に設けた測線のD.L.-2m, -5m, -10mの地点(計12点)において、海底上から0.2mの高さに測器を設置した。データ取得間隔は、波高計60分、その他の測器10分とし、流速計、濁度計、水位計、波高計については、1回の測定毎に1~2Hzで10秒~1200秒間計測された結果の平均値を解析に用いた。

(3) 底質調査

連続観測期間中の8月26日~27日に、斜面部の各測線において、ダイバーによる海底面から厚さ5cm程度までの採泥を行い、粒度を分析した。

3. 結果

(1) 観測期間中の気象と流動の変化

観測期間中の気象・海象条件と湾中央(No.4)及び両水道部(No.2, No.6)の24時間移動平均流動ベクトルを

図-2 風速ベクトル(a), 湾外(No.8)の有義波高と礁池(No.7)と水路(No.1)の水位差(b), 潮位(水路の水深)(c), 湾中央(No.4)と西水道(No.2)と東水道(No.6)の24時間移動平均流動ベクトル。風速は石垣市伊原間のアメダスデータ。水位差は24時間移動平均した値を表し、プラスの場合水路よりも礁池で水位が高いことを表す。流速の測定層は、湾中央は海底上8m, 西水道と東水道は海底上0.5m。

図-3 期間中の風速・潮位(水路の水深)(a), 日間降水量・日平均気温(b), 湾中央(No.4:海底上8m)の北方成分流速(c), 湾奥(No.5)の海面下0.5m及び12mの水温(d), 湾奥(No.5)の海面下10m及び12mの濁り(SS)(e). 風速・日平均気温は石垣市伊原間, 日間降水量は川平地点のアメダスデータ.(e)の点線は水産用水基準2mg/Lを表し, グレーのラインは24時間移動平均値を示す.

図-2に示す.

湾中央(No.4:海底上8m)では, 概ね北向きの流れがみられたが, 8月29日～9月1日の南風が卓越した期間においては, 湾奥へ流入する流れがみられた. なお, ここでは示していないが, 同期間において表層(海底上15m)の流れは概ね風の方向に一致し, 西水道(No.2)では湾内へ流入する流れがみられた.

湾外(No.8)において波高1m以上となる高波浪の期間が, 9月2日～4日, 9月16日～21日, 9月26日～27日の3回確認され, 同期間において礁池(No.7)と水路(No.1)で水位差が生じていた(図-2(b)). また, 9月3日～5日においては, 西水道で湾外へ流出, 東水道で湾内へ流入する流れがみられた.

(2) 湾奥部における水温鉛直構造の経時変化

観測期間中の気象・海象条件, 湾中央(No.4:海底上8m)の北方成分の流速, 湾奥(No.5)の各層水温の経時変化を図-3に示す. 流速の変動幅は, 風速が強い期間に

大きい傾向がみられた(図-3(c)). 水温の鉛直差は, 風が強い期間や気温が低い期間に小さくなり, 風が弱い期間や小潮期に大きい傾向がみられた.

(3) 湾奥部の濁りの鉛直分布と経時変化

観測期間中の湾奥(No.5)におけるSSの経時変化を図-3(e)に示す. SSは濁度から換算式により算定した. なお, 湾奥部で実施された濁度の鉛直分布観測では, 海底から1m程度の高さの範囲で2FTU以上の高い濁度が確認されたことから(沖縄県, 2014), 海面下10m層と12m層について示した. SSの経時変化は, 半日から日周期の変動のほか, 観測前半(8月29日～9月5日)と後半(9月19日以降)において高くなっており, 特に海面下12m層では水産用水基準の2mg/Lを超えていた.

(4) 斜面部の濁りの経時変化

斜面部の流速と濁度の経時変化の一例を図-4に示す. 斜面部の濁度は, D.L.-10m地点で高く, 変動幅も大きかったが, D.L.-10mの流速は概ね5cm/s以下と小さく, 流速と濁度の関連性は見出せなかった.

(5) 斜面部の底質

斜面部の底質は, サンゴ礫とシルト・粘土分が混在し, その割合は水深に応じて変化していた. D.L.-2mは, 各測線ともシルト・粘土分20%未満の砂・礫分主体であったが, 水深が深くなるほどシルト・粘土分が多くなる傾向がみられた.

図-4 斜面部(L6, D.L.-10m)における流速(a)と濁度(b)の経時変化の一例. 濁度のグレーのラインは24時間移動平均値.

4. 考察

(1) 流動特性のパターン

観測期間中、24時間移動平均流速ベクトルは、湾中央 (No.4) において概ね北向きの流れがみられたことから (図-2)、湾中央部において循環流の存在が示唆される。そこで流動シミュレーションにより、半日周期の潮位を外力条件として流動場の再現計算を行った。モデルは、非圧縮粘性流体のナビエストークスの運動方程式とオイラーの連続式を基礎式とする多層レベルモデルを用いた。シミュレーションより得られた1周期平均流ベクトルは (図-5)、湾中央部付近に反時計回りの循環流が形成されており、観測で得られた湾中央の北向きの流れと定性的に一致している。以上の結果より、西水道から湾中央部にかけて潮汐を外力とした潮汐残差流の存在が強く示唆される。

また、観測前半の南風が卓越するような場合では、湾外から湾内の中層に深に海水が流入、表層は流出するという鉛直循環流のパターンが観測データから確認され (図-2)、神野ら (2007) による鉛直循環流の強弱は風に支配されているという報告と概ね一致した。

なお、前田ら (2008) は、高波浪時 (湾外の有義波高 2m 程度) において、礁池内で WAVE-SET UP による水位上昇が起これ、湾内の循環流に影響を与えていたことを報告している。本研究においても9月2日～4日において WAVE-SET UP の効果により礁池での水位上昇とそれに関連した流れが水道部で確認されたものの (図-2)、湾内の循環流に影響を与えていなかったと考えられる。本研究で観測された有義波高は 1m 程度と前田ら (2008) と比べると小さく、湾内の循環流に影響を及ぼす程ではなかったと推察される。

(2) 成層構造の変動要因

水温の鉛直差は、風が強くなる期間や気温が低下する

図-5 シミュレーションによる1周期平均流速ベクトル。流速ベクトルは各メッシュの全層平均を表す。図中グレーの領域は湾中央No.4の位置。

表-2 重回帰分析による標準偏回帰係数と重相関係数

目的変数	説明変数				重相関係数
	水温差	平均風速	気温	潮位差	降水量
No.4	-0.681*	0.612*	0.007	-0.063	0.843*
No.5	-0.641*	0.570*	-0.075	-0.039	0.791*

*は統計的に有意 ($p < 0.05$) であることを示す。

期間に小さくなり、風が弱い期間や小潮期に大きくなる傾向がみられた (図-3)。そこで、湾中央 (No.4) と湾奥 (No.5) それぞれの地点について海面下0.5mと最下層の水温差を目的変数として重回帰分析を行った。説明変数は、日平均風速、日平均気温、日間での潮位差、日間降水量とした。重回帰分析結果を表-2に示す。重相関係数は湾中央 (No.4)、湾奥 (No.5) とともに0.7以上と高い相関が得られた。風速及び気温の標準偏回帰係数の結果からは、水温差に対して風速は負、気温は正の相関関係が得られた。これらの結果は、吹送流による湾内の鉛直循環流の強化や気温低下に伴う海面冷却が鉛直混合を促進し、水温の成層構造に影響を及ぼしていることを示唆している。一方、潮位差や降水量との関係性は低く、潮汐流や降雨が水温成層に及ぼす影響は少ないと判断される。湾中央での流速の調和解析結果では、平均大潮期 ($M_2 + S_2$ 分潮) の潮流楕円長軸の大きさが 5cm/s 以下と小さく、また、観測期間中の日間降水量は最大で 15mm と顕著な淡水流入はなかったと推察されることから、潮汐流や淡水流入が水温の成層構造に与える影響は小さいと考えられる。

(3) 滞筋部における濁り拡散特性

滞筋の下層の濁りは水温差が小さいほど増加する傾向がみられた (図-3)。湾中央 (No.4) 及び湾奥 (No.5) の水温の鉛直差 (海面下0.5m層と最下層の差) と、海面下 10m 及び最下層の濁りの相関図を図-6に示す。この結果は、滞筋の下層の濁りは水温差が小さいほど高くなる傾

図-6 濁りと水温差の関係。水温差は海面下0.5mと最下層 (No.4: 海面下14m; No.5: 海面下12m) の差。

図-7 斜面部の濁度の期間平均値と底質のシルト・粘土分の関係

向を示している。すなわち、底層の高い濁りは、静穏時には成層により鉛直混合が抑制され海底上1m程度の範囲に留まるが、吹送流による鉛直循環流の強化や気温低下に伴う海面冷却により鉛直混合が促進されると上方へと拡散していくと考えられる。なお、図示していないが、海面下0.5m, 2m, 5mのSSは、観測期間中、水産用水基準2mg/Lを超えることはほとんどなかった。この結果より、滞筋下層の濁りの上方への拡散は、水産用水基準2mg/Lで見れば、海面下5mまでには達しないと推察される。

(4) 斜面部における再懸濁の可能性

沖縄県 (2013) は、曳航式ADCPで測定した滞筋底層の流れが概ね5cm/s未満と小さく、斜面部 (D.L.-2～12m) においては5～10cm/s程度の流れがみられたことから、底質の巻き上がりは滞筋底層ではなく斜面部で生じている可能性を指摘している。斜面部での濁度の期間平均値とシルト・粘土分の相関を図-7に示す。両者は正の相関関係が認められたことから、斜面部の濁りは、底質中のシルト・粘土分の巻き上がりにより生じた可能性が示唆される。しかしながら、本研究の観測で得られた斜面部の流速は5cm/s程度と小さく、巻き上りを裏付ける

濁度と流速との相関は見出せなかった (図-4)。今後、濁度と流速の関係を明らかにするためには、より短い時間スケールに着目した観測が必要であると考えられる。

(5) 斜面部での濁質輸送と滞筋底層の濁りへの寄与

斜面部における濁質の輸送を調べるため、斜面部の流速と濁度から求めた濁度のフラックスを図-8に示す。濁度のフラックスは概ねL2で岸側、L4で等深線に向かう方向が卓越し、L6やL5は滞筋に向かうフラックスが卓越していた。河川から海域に流入した赤土等の土砂は、堆積・巻き上がりを繰り返しながら輸送されると考えられるが、L5やL6のような滞筋へのフラックスが卓越している地点では、濁質成分を滞筋へと輸送していると考えられる。この結果より、滞筋底層の高い濁りの層は、斜面部から輸送された濁質が沈降・集積したことで形成されている可能性が示唆される。

5. おわりに

川平湾において流動等の物理環境と濁りに関する現地調査を実施し、流動特性と滞筋底層での濁りの原因について明らかにした。西水道から湾中央では、反時計回りの潮汐残差流の存在が強く示唆され、南風が卓越する場合表層で湾外へ流出、中層以深で湾内へ流入する鉛直循環流が強化されると考えられる。滞筋底層の高い濁りの層は、斜面部から輸送された濁質が沈降・集積したことで形成されている可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、沖縄県の「閉鎖性海域における堆積赤土等の対策事業」の一環として行われた。

参考文献

- 大見謝辰男 (1992)：沖縄県における赤土汚染の現状，沖縄県公害衛生研究所報，第26号，pp. 87-96.
- 大見謝辰男・比嘉榮三郎・仲宗根一哉・満本裕彰 (2002)：赤土条例施工前後における沖縄沿岸の赤土堆積状況比較，沖縄県衛生環境研究所報，第36号，pp. 77-84.
- 沖縄県 (2013)：平成24年度閉鎖性海域における堆積赤土等の対策事業報告書，459p.
- 沖縄県 (2014)：平成25年度閉鎖性海域における堆積赤土等の対策事業報告書，530p.
- 沖縄県水産試験場 (1979)：昭和53年度沖縄県水産試験場事業報告書，pp.59-63.
- 神野有生・鯉淵幸生・磯部雅彦 (2007)：川平湾周辺のサンゴ礁海域における物理・栄養塩環境，海岸工学論文集，第54巻，pp. 1051-1055.
- 前田勇司・灘岡和夫・金城孝一・山本高大・有坂和真・仲宗根一哉・与儀喜真・山中精一・宮川勝司・小谷和彦・飯田仁士 (2008)：干潟連成型および内湾連成型サンゴ礁域における海水流動ならびに赤土輸送特性，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1101-1105.
- Honjo, C. and Y. Hiroya (2013): Species-Specific responses of coral to bleaching events on anthropogenically turbid reefs on Okinawa Inland, Japan, over a 15-year period(1995-2009), PLoS ONE, Vol.8(4), pp. 1-9.

図-8 斜面部の各測線における濁度の期間平均フラックス。点線は等深線の方角を表す。