

海藻養殖の障害となる濁りの発生機構に関する研究 —的矢湾奥伊雑ノ浦ヒトエグサ (*Monostroma nitidum*) 漁場における事例研究—

田崎智晶^{1†}, 赤司有三², 加藤敏朗³, 宮向智興⁴, 今尾和正⁴, 鈴木輝明⁵, 高部昭洋⁶

Study on the generation mechanism of turbidity that obstructs seaweed aquaculture: A case study of an aquaculture field for *Monostroma nitidum* in Izonoura, inner side of Matoya Bay

Tomoaki TASAKI^{1†}, Yuzou AKASHI², Toshiro KATOU³, Tomoki MIYAMUKAI⁴, Kazumasa IMAO⁴,
Teruaki SUZUKI⁵ and Teruhiro TAKABE⁵

三重県志摩市の的矢湾奥に位置する伊雑ノ浦は、ヒトエグサ (*Monostroma nitidum*) の養殖が盛んで、1970年頃は300tを超える生産量があった。しかし1980年頃から生産量が急激に低下し、漁業者はその原因究明を求めている。そこで、2014年の春季および夏季に濁度を含む様々な海域環境を気象状況とともに連続的に観測し、濁りの現状および発生要因を明らかにした。その結果、ヒトエグサ葉体の成長に影響を与える濁度7FTUを超える時間の割合は春では17–66%、夏では26–73%と極めて高かった。高濁度が常態化した要因としては以下のことが推測された。i) ダム建設等に伴う河川流量の減少により、浦奥から浦奥にかけての平均流が弱体化し、かつ時計回りの環流傾向となった。ii) 接続水域からの表層流出が相対的に弱まり、流入SS (Suspended Solid) および浦内で生産および再懸濁したSSが浦内から流出し難くなった。iii) 浦内に滞留、沈降したSSは、風のみならず潮汐によっても常時再懸濁するようになった。iv) SSの堆積が浦内の底質環境の悪化と底生生物の減少を招き、底泥の自浄機能を低下させた。

キーワード：ヒトエグサ、底泥、濁り、巻き上げ、連続観測

Izonoura—located in the inner area of Matoya Bay in Shima City, Mie Prefecture—prospered in the aquaculture of *Monostroma nitidum*, whose amount of production was over 300 tons per year in the 1970s. However, the production decreased rapidly after the 1980s, and the fishermen have demanded an investigation into its cause. We conducted observations of several environmental elements, including turbidity and weather, throughout the spring and summer of

2016年7月27日受付, 2017年6月19日受理

¹ 新日鐵住金株式会社名古屋製鐵所資源化推進部, 〒476–8686 愛知県東海市東海町5–3

Resource Recycling Division Nagoya Works Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 5–3 Tokai-machi, Tokai, Aichi 476–8686, Japan

² 新日鐵住金株式会社本社スラグセメント事業部, 〒100–8071 東京都千代田区丸の内2–6–1

Slag & Cement division Head office Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 2–6–1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100–8071, Japan

³ 新日鐵住金株式会社先端技術研究所環境基盤研究部, 〒293–8511 千葉県富津市新富20–1

Advanced Technology Research Laboratories, Technical Research & Development Bureau, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 20–1 Shintomi, Futtsu, Chiba 293–8511, Japan

⁴ 株式会社日本海洋生物研究所中部支店, 〒466–0031 愛知県名古屋市昭和区紅梅町3–9–2

Chubu branch, Marine Biological Research Institute of Japan Co., Ltd., 3–9–2 Koubai-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466–0031, Japan

⁵ 名城大学大学院総合学術研究科, 〒468–8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1–501

Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1–501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya, Aichi 468–8502, Japan

⁶ 名城大学大学院総合学術研究科理工工学部, 〒468–8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1–501

Graduate School of Environmental and Human Sciences Faculty of Science & Technology, Meijo University, 1–501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya, Aichi 468–8502, Japan

† tasaki.pr5.tomoaki@jp.nssmc.com

2014 and analyzed the generation mechanism of high turbidity. It was found that the turbidity was higher than 7 FTU—17–66% and 26–73% of the time in spring and summer, respectively—which is considered to affect the growth of *Monostroma nitidum*. The following factors were considered to cause high turbidity: i) Decrease in river flow accompanied by dam construction reduced the mean flow from the inner to the central area, which would induce a clockwise circulation flow, ii) The surface residual outflow current through the canal weakened. Then, SS (Suspended Solid) from the river and that produced and re-suspended in Izonoura, does not readily outflow from Izonoura, iii) SS was re-suspended not only by the wind but also by the usual tidal current, and iv) Excess sedimentation of SS has caused the deterioration of bottom environments, benthic communities, and the self-purification function of the bottom.

Key words: *Monostroma nitidum*, Sea bottom sediment, turbidity, re-suspension, continuous observation

はじめに

我が国の海藻類養殖業は、海域の栄養塩を有効に活用し食糧生産と海域環境保全の両面で重要な役割を果たしており、三重県ではヒトエグサ (*Monostroma nitidum*) 養殖業が盛んである。本研究で観測の対象とした伊雑ノ浦 (Fig. 1) は、三重県志摩市の的矢湾の奥に位置する静穏な海域で、1955年頃からヒトエグサの養殖が始められ、ピーク時の1970年頃には年間300t以上の生産量があった (Fig. 2) (http://www.satoumi-shima.jp/aosanori/data/tiku_data.pdf, 2016年2月11日)。

しかし、1980年頃から生産量は徐々に減少し、漁業関係者を中心に原因究明と対策を望む声が強くなってきている。地元漁業者は、生産量減少の主な原因として「濁り」の増加をあげている。藻類の着生時におけるSS (Suspended Solid) の影響に関する研究例は数種で報告されており、例えばノリ殻胞子の着生に及ぼす影響濃度としては1~2mg・l⁻¹ (鈴木ら, 1997), ワカメ遊走子の着生に及ぼす影響濃度として20mg・l⁻¹ (鈴木ら, 1998) が報告されている。しかし、着生後の生長に与える影響に関する研究例は少なく、アマノリの光合成に与える影響として10mg・l⁻¹ (日本

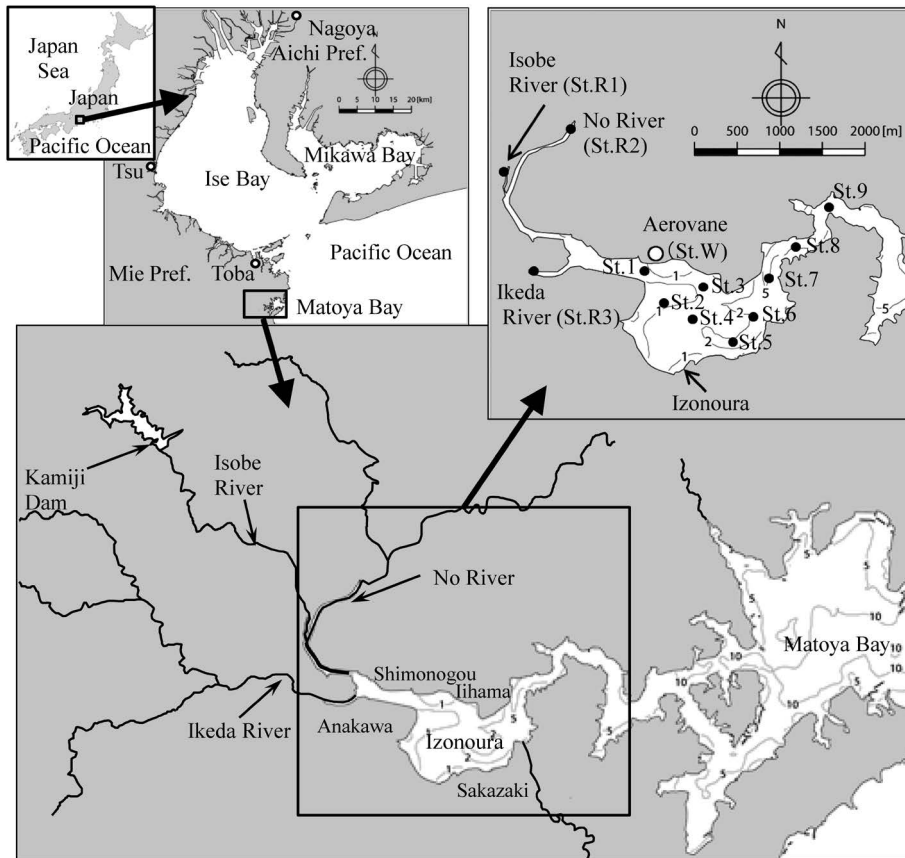


Figure 1. The maps show the monitoring area and each monitoring station. Bottom map shows Izonoura, Isobe River, No River, Ikeda River, Kamiji Dam, and Matoya Bay. Upper right hand map shows topography and location of monitoring stations in Izonoura. Stations marked by black dots are the monitoring stations of water quality, and that marked by a white dot is the monitoring station of the aerovane. Values of the bathymetric isolines are in meters.

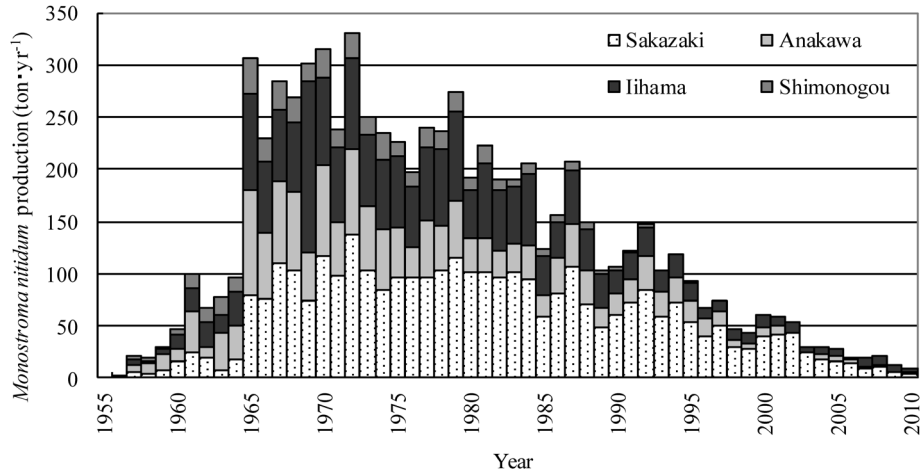


Figure 2. Annual changes in the production of green laver (*Monostroma nitidum*) in Izonoura (http://www.satoumi-shima.jp/aosanori/data/tiku_data.pdf, 11 February 2016).

水産資源保護協会, 1992), ワカメの幼葉期の光合成に与える影響として $5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (徳島県水産試験場, 1972) が報告されている. しかし今回対象としたヒトエグサの生長に及ぼす影響については, 喜田・前川 (1978) の研究があるのみである. この研究では, ヒトエグサ葉体の生長に影響を与える濃度の目安は $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ とされている.

伊雑ノ浦における濁りが悪化した原因については, 伊雑ノ浦へ流入する河川の上流域での1971年のダム建設 (志摩市上下水道部, 2007), 河口域を中心とした圃場整備および都市開発など, 伊雑ノ浦周辺の陸域環境の変化が地元漁業者から指摘されているが, このような陸域環境の変化が浦内の濁りに影響を及ぼした可能性についての詳細な研究報告はない. 三重県水産研究所 (2013) は, 2010年のチリ津波および2011年の東日本大震災での津波により, シルト・粘土分が浦内に堆積し, 濁りが発生しやすい環境になっていると指摘しているが, 津波による海底堆積物の増加が濁りに及ぼす影響に関する研究事例もない. 海域における濁りは, 河川からの流入負荷以外にも底質および海域の気象・海況条件や隣接海域とのSS収支など, 様々な環境要素が複雑に絡み合うため, 原因の究明には詳細な現地調査が不可欠である. 本研究では, 詳細な濁度, 潮流等の連続観測およびバッチ観測により, 当海域の濁りの現況, その発生要因および悪化原因について明らかにすることを試みたので報告する.

材料と方法

観測海域および観測時期

調査を実施した伊雑ノ浦の位置および水深と観測地点を Table 1 および Fig. 1 に示す. 伊雑ノ浦は, 磯部川河口の延長上に位置する約 2.3km^2 の閉鎖性海域で, 河口部から浦中央部までの水深は CDL (Chart Datum Level 潮位表基準面)

Table 1. Latitude, longitude and depth of the investigation position.

Point	Latitude	Longitude	Depth (CDL (m))	
Sea	St. 1	34°21'50.1"	136°49'20.2"	-0.3
	St. 2	34°21'35.6"	136°49'31.2"	+0.2
	St. 3	34°21'41.1"	136°49'52.0"	-0.1
	St. 4	34°21'28.5"	136°49'44.0"	-0.2
	St. 5	34°21'22.5"	136°49'57.2"	-1.0
	St. 6	34°21'33.2"	136°50'08.8"	-0.9
	St. 7	34°21'48.8"	136°50'20.2"	-4.2
	St. 8	34°21'59.1"	136°50'33.4"	-5.1
	St. 9	34°22'16.0"	136°50'46.3"	-11.0
River	St. R1	34°21'50.5"	136°48'36.3"	
	St. R2	34°22'34.6"	136°48'19.4"	
	St. R3	34°22'40.6"	136°48'41.8"	
Land	St. W	34°21'53.9"	136°49'24.8"	

-1m程度 (St. 1-St. 6) で, リアス式の海峡付近 (以下, 接続水域) から水深が CDL -11m程度 (St. 9) まで深くなり矢湾を経て太平洋に接している. 主要河川は二級河川の磯部川, 野川および池田川があり, それぞれの流域面積は 10.8km^2 , 20.5km^2 , 26.3km^2 である (関・柴原, 1972). 磯部川の上流には1971年に竣工した神路ダムがあり, ダム上流の流域面積は 5.0km^2 , 有効貯水量は $2,789,000\text{m}^3$ で全量上水道に利用している. 竣工当初の1日あたりの最大給水量は $10,840\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ であったが, 1975年には $31,000\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ まで増加し, 1992年から南勢志摩水道より $10,000\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ の給水を受け, 2007年には $41,000\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ となっている (志摩市上下水道部, 2007). 観測地点は伊雑ノ浦の9地点, 流入河川の3地点, 陸上の1地点である.

観測項目および観測時期を Table 2 に示す. 水域におけ

Table 2. Sampling items and the period of field study.

Items			2014									
			Apr.		May		Aug.			Sep.		
			15	24	7	15	8	19	27	3	8	16
Continuous observation	Salinity	Sea area	←→				←→					
	Turbidity·Chl-Flu.	(St. 1, St. 5, St. 9)	←→				←→					
	Current condition	(St. 3)	←→				←→					
	Wind condition by aerovane	Land (St. W)	←→				←→					
Periodical observation	Check of equipment and data collection		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Salinity	Observation with the equipment (St.1-St.9)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Turbidity	Water sampling (St.1, St.5, St.9 St.R1-St.R3 Each upper layer) (St. 3)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Chl-Flu.		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	SS		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
VSS		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
River discharge	Observation with the equipment (St. R1-St. R3)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

る塩分、濁度、蛍光クロロフィル（以下Chl-Flu.）および流向・流速の連続観測、陸域における風向・風速の連続観測、水域における塩分、濁度、Chl-Flu.およびSS等を対象とした鉛直的なバッチ観測を実施した。バッチ観測は連続観測期間中に5～12日間隔で実施した。バッチ観測時には、流速断面積法により河川流量の測定を行った（国土交通省水管理・国土保全局，2014）。

観測時期は、ヒトエグサ養殖の終期にあたる①春季（2014年4月15日～5月15日）と、種付け時期にあたる②夏季（2014年8月8日～9月26日）である。なお、St.3は連続観測およびバッチ観測ともに夏季のみ実施した。

観測および分析手法

浦奥部のSt.1、浦央北部のSt.3、浦央南部のSt.5、接続水域のSt.9の4地点の表層（センサー部分が海面下0.5m）およびSt.9の底層（センサー部分が海底上1m）において、後方散乱式蛍光クロロフィル・濁度計（INFINITY-CLW, JFEアドバンテック株式会社製）、塩分計（INFINITY-CTWまたはCompact CT, JFEアドバンテック株式会社製）および流向・流速計（INFINITY-EMまたはCompact EM, JFEアドバンテック株式会社製）を設置した。また、陸上のSt.Wにセンサー部分が地面から約1.5mとなるように風向・風速計（センサー部分はKDC-S04, 記録計はKADEC21-KAZE-C, ノースワン株式会社製）を設置した。

いずれの機器も10分間隔で測定し、観測期間中に5～12日に1回の頻度で機器の点検およびデータの回収を行っ

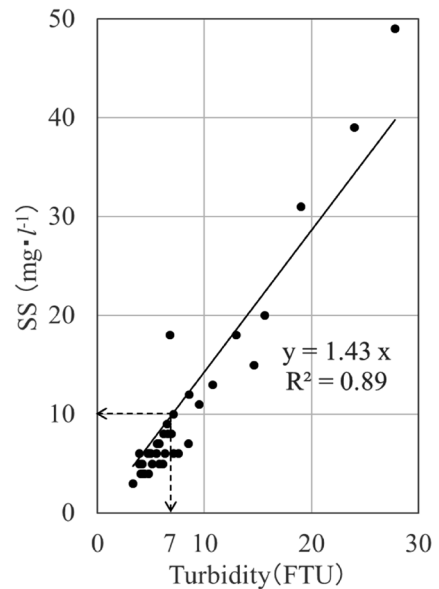


Figure 3. Relationship between turbidity (FTU) and suspended solids ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$). The figure shows the result of observation from 15 April to 15 May and from 8 August to 26 September in 2014.

た。連続観測ではSt.9の底層を除き表層の情報に限定されるため、鉛直方向の情報を得る目的で点検時に海域の9地点（St.1-St.9）において多項目水質計（AAQ-RINKO AAQ 176, JFEアドバンテック株式会社製）を垂下し、海

面から海底まで0.1m間隔で塩分、濁度およびChl-Flu.を測定した。

濁度の観測はホルマジン標準液（日本工業規格JIS K 0801-1986）で校正された機器を用い、観測結果はFTU（Formazin Turbidity Unit）（日本工業規格JIS K 0101-1998）で表記した。懸濁物質については表層水をバケツで採取し、冷蔵状態で実験室に持ち帰り、GF/Bフィルター（粒子保持能1.0 μ m）でろ過した後、SS（日本工業規格JIS K0102-2013 14.1）およびVSS（日本工業規格JIS K0102-2013 14.5）を分析した。VSSを有機物、SSからVSSを減じたもの（SS-VSS）を無機物とした。

使用した後方散乱式濁度計で測定される濁度は、土砂粒子に反応するものであり、植物プランクトン（クロロフィルa）との間には相関はみられない（海洋理工学会, 2015）ため、植物プランクトン量の指標としてChl-Flu.を測定した。Chl-Flu.は現場での蛍光強度の計測値（ppb）をそのまま表記した。したがってChl-Flu.は海洋観測ガイドライン第4巻（日本海洋学会, 2016）に記載されている蛍光法によるキャリブレーションを行っていないため、クロロフィルa濃度を直接表すものではない。

観測期間中の降水量は気象庁のAMeDASデータ（鳥羽）を、潮位は海上保安庁の推算潮位（対象港；的矢）を用いた。

また、SSがヒトエグサ葉体の生長に影響を与える目安は10mg \cdot l $^{-1}$ との報告（喜田・前川, 1978）があることから、本調査で得られた濁度とSSの関係式（Fig. 3）により7 FTU以上をヒトエグサの生長に影響を及ぼす濁度と考えた。

結果

濁度の連続観測

春季（2014年4月15日～5月15日）の結果

春季の濁度、塩分、Chl-Flu., 降水量、風向・風速、潮汐の測定結果をFig. 4に示す。濁度の突出したピークが4月21日、4月30日および5月10日付近で見られた。

4月21日付近の濁度は浦奥部のSt. 1で50 FTUと最も高く、次に浦中央部のSt. 5で22 FTU、的矢湾との接続水域のSt. 9の表層で16 FTUと、浦奥部から接続水域に向かうにつれて低下した。4月20日から4月21日にかけて最大で6mm \cdot h $^{-1}$ の降雨があり、St. 1, St. 5およびSt. 9の表層で塩

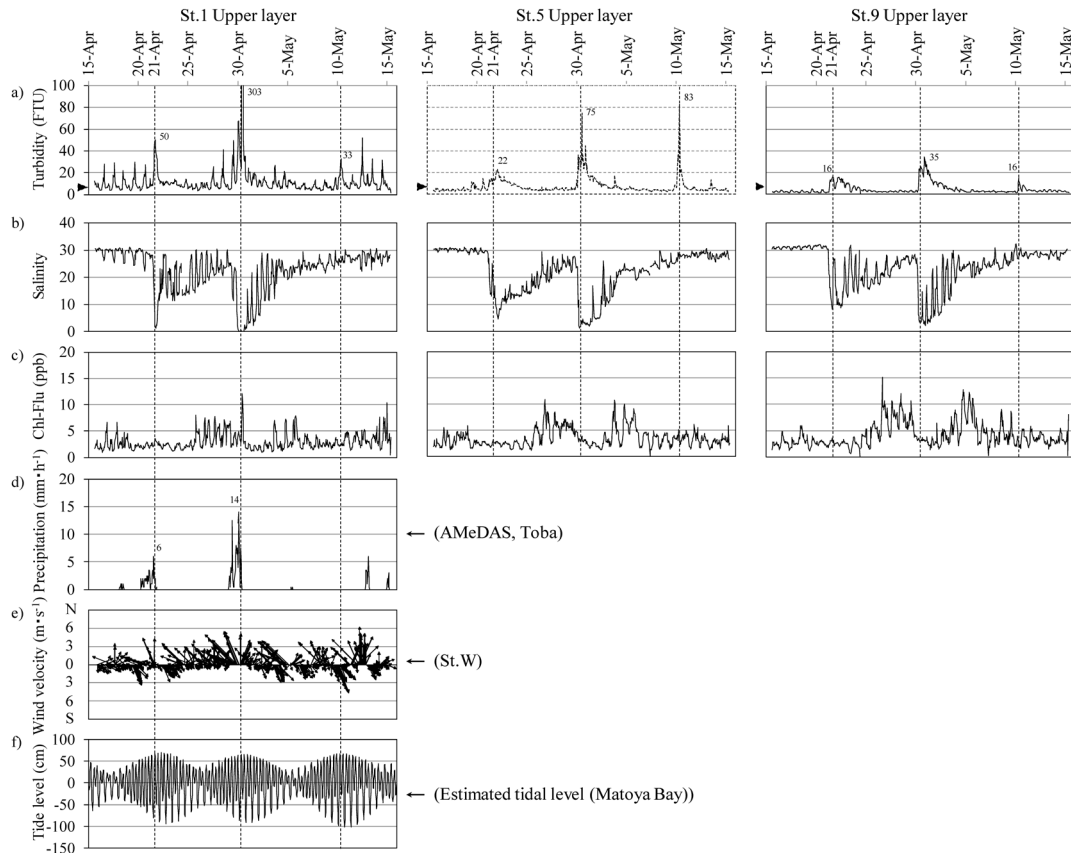


Figure 4. Time-series changes in turbidity (a), salinity (b), Chl-Flu. (c), precipitation (d), wind direction and velocity (e) and tide level (f) at the upper layer (St.1, 5 and 9) from 15 April to 15 May in 2014. The arrow (▶) in the figures of the turbidity shows 7 FTU. Vertical dotted lines show the typical days with very high turbidity, 21 April, 30 April, 10 May.

分が低下し, $4.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南南東の風が観測された。濁度がピークから上昇前の値に回復する日数は, St. 1で約1日であったのに対し, St. 5およびSt. 9の表層では2~3日であった。

一方, 塩分が出水前の約30に戻るまでの日数は, St. 1,

St. 5およびSt. 9の表層でいずれも8日程度であった。4月30日付近も4月21日と同様に濁度はSt. 1で303 FTUと最も高く, 次にSt. 5で75 FTU, St. 9の表層で35 FTUと濁度のピークは浦奥部ほど高く接続水域に向かうにつれて低下した。4月29日から4月30日にかけて最大で $14\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の

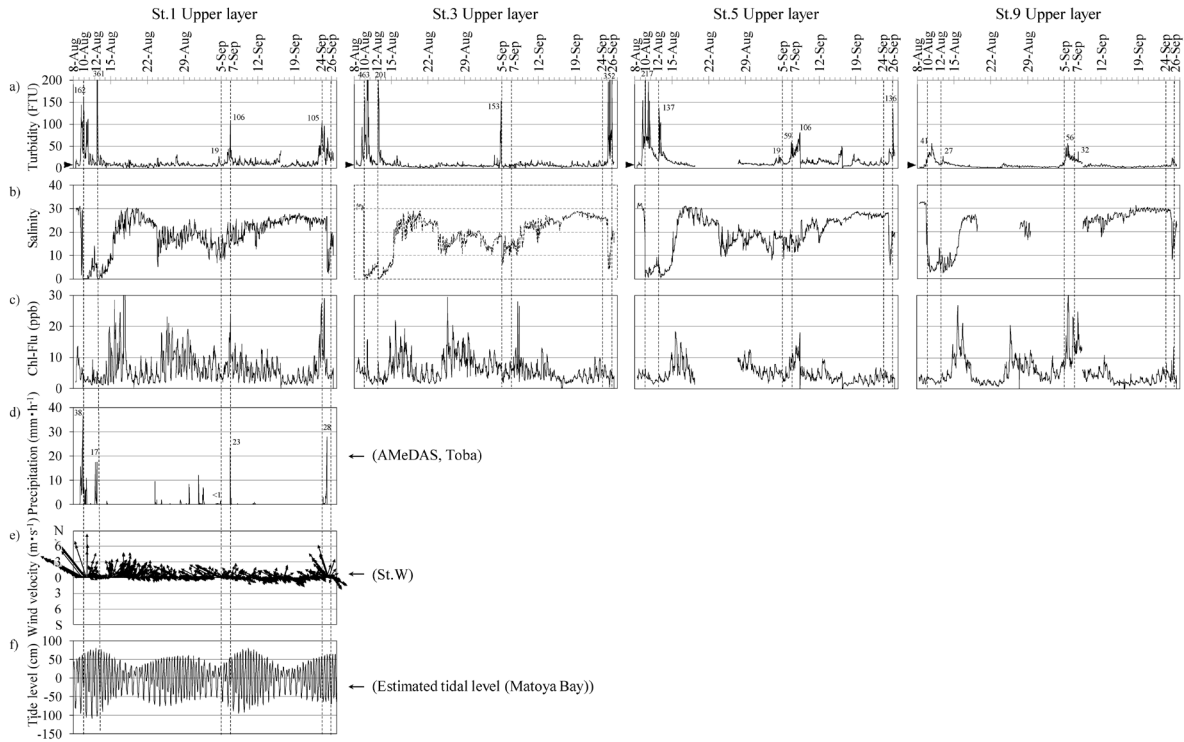


Figure 5. Time-series changes in turbidity (a), salinity (b), Chl-Flu. (c), precipitation (d), wind direction and velocity (e) and tide level (f) at the upper layer (St.1, 3, 5 and 9) from 8 August to 26 September in 2014. The arrow (▶) in the figures of the turbidity shows 7 FTU. Vertical dotted lines show the typical days with very high turbidity, 10 August, 12 August, 5 September, 7 September, 24 September, 26 September.

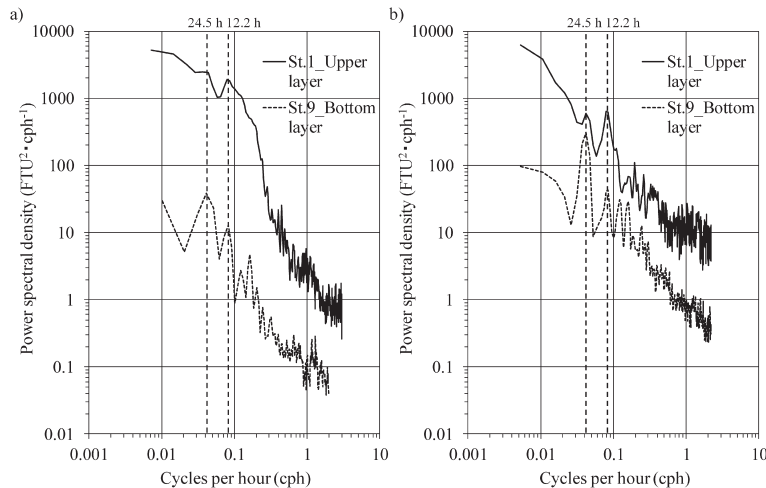


Figure 6. Power spectral density of turbidity was calculated for the period from 16 April to 14 May (a) and from 17 August to 26 September (b).

降雨があり, St. 1, St. 5およびSt. 9の表層で塩分が低下し, $6.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南南東の風が観測された. 濁度の回復はSt. 1で約1日であったのに対し, St. 5およびSt. 9の表層では2~3日を要した.

一方, 塩分が出水前の約30に戻るまでの日数は, St. 1, St. 5およびSt. 9の表層でいずれも8日程度であった. 浦央南部のSt. 5および接続水域のSt. 9の表層では, 4月21日および4月30日の出水後, 塩分が20程度に回復したときにChl-Flu. が10ppb程度まで上昇した.

5月10日の濁度は浦央南部に位置するSt. 5で83 FTUと最も高く, 浦奥部に位置するSt. 1で33 FTU, 接続水域のSt. 9の表層で16 FTUであった. 5月10日は風速4.9mの北北西の風が観測されたが, 降雨は観測されず塩分の低下も見られなかった.

これらの突出したピーク以外にも, 浦奥部を中心に濁度

が25~30 FTUに達する周期的なピークが観測された. 春季の全観測時間のうち, 7 FTUを超える時間の割合はSt. 1で66%, St. 5で28%, St. 9の表層で17%であった.

夏季 (2014年8月8日~9月26日) の結果

夏季の濁度, 塩分, Chl-Flu., 降水量, 風向・風速および潮汐の測定結果をFig. 5に示す. 濁度の突出したピークが8月10日, 8月12日, 9月5日から9月7日および9月24日から9月26日付近で見られた.

8月10日付近の濁度は, 浦央北部のSt. 3で463 FTUと最も高く, 次に浦央南部のSt. 5で217 FTU, 浦奥部のSt. 1で162 FTU, 接続水域のSt. 9の表層で41 FTUであった. 8月9日から10日にかけて最大で $38\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降水があり, St. 1, St. 3, St. 5およびSt. 9の表層で塩分が低下し, $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南の風が観測された. このとき, 濁度がピークから上昇前の値に回復する日数は, St. 1およびSt. 3で約1日であった

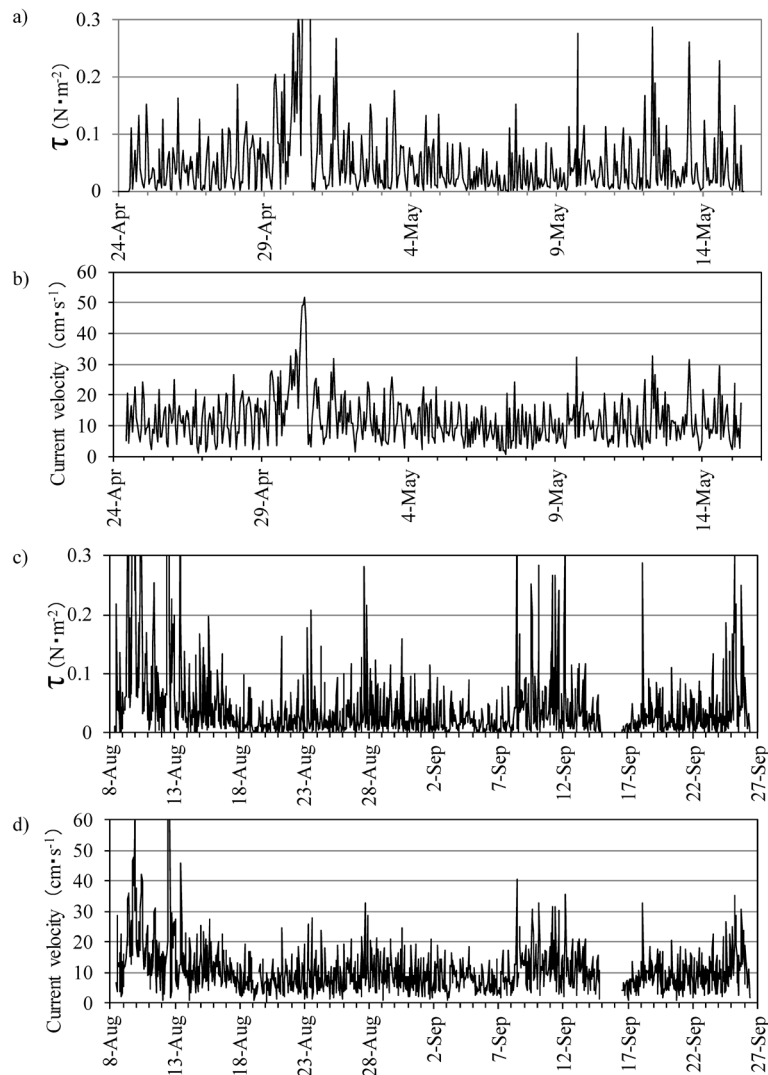


Figure 7. Time-series changes in shear stress τ from 24 April to 15 May in 2014 (a), current velocity from 24 April to 15 May in 2014 (b), shear stress τ from 8 August to 27 September in 2014 (c), and current velocity from 8 August to 27 September in 2014 (d).

のに対し, St. 5およびSt. 9の表層では2~3日であった。一方, 塩分の回復が出水前の約30に戻るまでの日数は, St. 1, St. 3およびSt. 5でいずれも8日程度であった。

8月12日付近の濁度は, 浦奥部のSt. 1が361 FTUと最も高く, 次に浦央北部のSt. 3で201 FTU, 浦央南部のSt. 5で137 FTU, 接続水域のSt. 9の表層で27 FTUであり, 浦奥部ほど高く接続水域に向かうにつれて低下した。8月12日は最大で $17\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降雨があり, St. 1, St. 3, St. 5およびSt. 9の表層で塩分が低下し, $1.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南東の風が観測された。濁度がピークから上昇前の値に回復する日数はSt. 1およびSt. 3で約1日であったのに対し, St. 5およびSt. 9では3~4日であった。一方, 塩分の回復はSt. 1, St. 3およびSt. 5でいずれも出水前の約30に戻るまでに6日程度であった。St. 1, St. 5およびSt. 9の表層では, 8月10日および8月12日の出水後, 塩分が20程度に回復した時に, Chl-Flu. が20 ppb程度に上昇した。

9月5日の濁度は, 浦央北部のSt. 3が153 FTUと最も高く, 次いでSt. 9で56 FTU, St. 1およびSt. 5は19 FTUであった。降雨は $1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 未満であり, $6.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の東南東の風が観測された。9月7日の濁度はSt. 1で106 FTUと最も高く, 次いでSt. 5で59 FTU, St. 9で32 FTUであった。降雨は最大 $23\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ であり, $2.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南東の風が観測された。塩分の変化は, 8月中旬から断続的に降り続いた雨の影響が強く不明瞭であった。St. 9では濁度の高かった9月5日~7日にかけてChl-Flu. が25~30 ppbと高く, St. 5でも1日程度の遅れでChl-Flu. が15 ppb, 濁度が106 FTUとい

ずれも高く, Chl-Flu. と濁度との間に関連性が見られた。

9月24日から9月26日にかけての濁度は, 9月24日のSt. 1で105 FTU, 9月25日のSt. 3で352 FTU, 9月26日のSt. 5で136 FTUであった。9月24日から26日は台風16号が通過し, 最大で $28\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降雨があり $6.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の風が観測され, 風向は9月24日では南南東, 9月25日では南, 9月26日では西北西と変化した。塩分の回復過程は9月26日以降の測定データがなく不明である。上述した濁度の突出したピーク以外にも, 周期的に10~20 FTUに達するピークが観測された。夏季の全観測時間のうち, 濁度が7 FTUを超える時間の割合はSt. 1で66%, St. 3で42%, St. 5で73%, St. 9の表層で26%であった。

底層における濁度のパワースペクトル

Fig. 4およびFig. 5の濁度の観測結果に一定の周期性が見られたため, 春季および夏季のSt. 1およびSt. 9底層の連続測定結果から, 濁度についてパワースペクトル解析を行った (Fig. 6)。いずれも潮汐周期である12.2時間と24.5時間にピークが存在した。

底面のせん断応力 τ

底泥の巻き上げの指標とされている底面のせん断応力 τ を計算した。 τ は以下の式で与えられる。

$$\tau = \rho \cdot \gamma_B^2 |U_K \cdot U_K| \quad (1)$$

ここで, τ はせん断応力 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), ρ は海水密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), γ_B^2 は底面摩擦係数 (0.0026), U_K は海底直上の流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

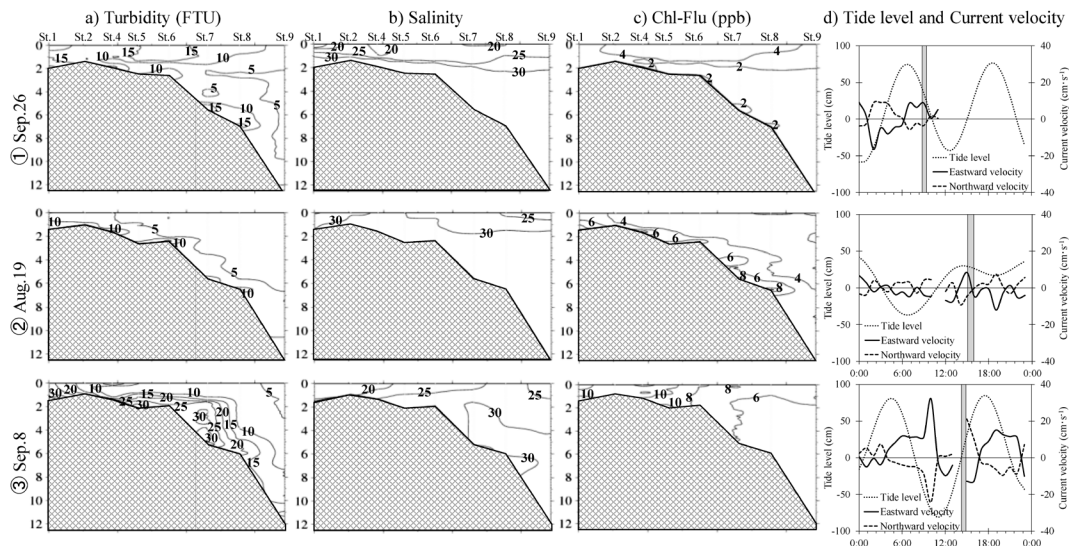


Figure 8. Observed concentrations of turbidity (a), salinity (b), and Chl-Flu. (c) along the longitudinal cross section from St.1 to St.9 of the Izonoura estuary, and tide level and the current velocity at St.1 on investigation day (d). ① shows the vertical condition on 26 September where the influence of heavy rain is notable, ② shows the vertical condition on 19 August where the influence of tide flow is notable, ③ shows the vertical condition on 8 September where the influence of Chl-Flu. is notable. The vertical lines in the graphs (d) show investigation time, the dashed line denotes northward velocity of tide flow, the solid line denotes eastward velocity of tide flow, and the dotted line denotes tide level.

である。

4月24日から5月15日および8月8日から9月27日のSt. 1の τ と流速をFig. 7に示す。春季および夏季とも平常時の平均流速は約 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ で、計算される τ は $0.03\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度であり、風等により海底直上の流速が $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上に増加した時、 τ は $0.1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上となった。

バッチ観測による濁度の鉛直分布

春季と夏季の濁度の連続観測では、出水時、強風時に特に高い値が観測され、潮汐によると思われる周期性を持った

上昇も見られた。また、本来Chl-Flu.と濁度とは相関しないが、Chl-Flu.が高い場合の濁度上昇が夏季の9月7日前後に浦中部から接続水域で見られた。これら連続観測の情報は表層と接続水域の底層に限定されているため、特徴的な時期について、夏季のバッチ観測時の鉛直断面データから濁度の上昇要因について検討した。Fig. 8に代表的な出水時、平常時、プランクトン増殖時における濁度、塩分、Chl-Flu.の鉛直断面図、および観測時の潮位とSt. 1表層の流れの東西成分と南北成分を示す。

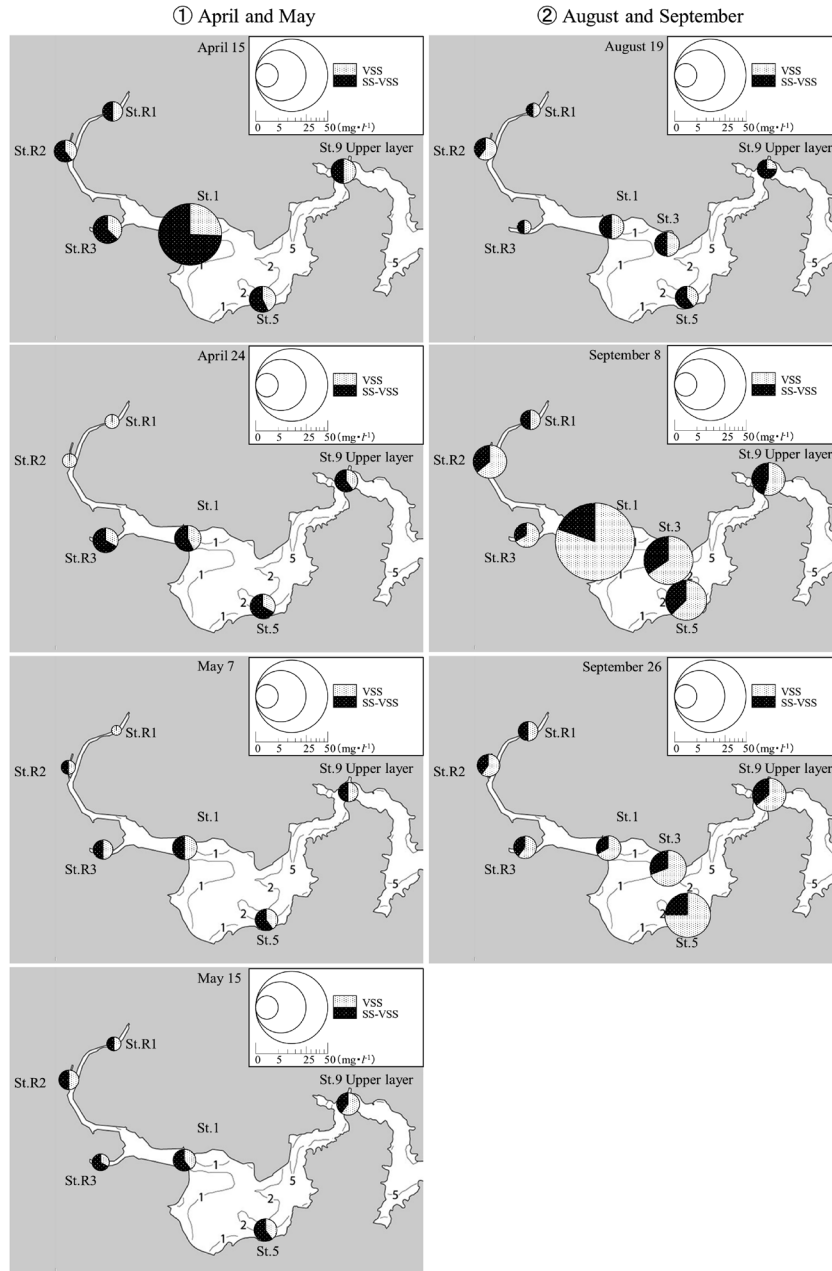


Figure 9. The concentration on distribution of particle matter and the ratio of organic (VSS) and inorganic (SS-VSS) matter. Size of circle shows concentration of SS.

Fig. 8-①に台風16号通過後の出水時の9月26日の観測結果を示す。前日の最大 $28\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降水の影響で、観測時は出水があったが、風は $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の北西の微風であった。潮汐は下げ潮に相当し、東南東方向に $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の流れが観測された。海面から水深1m付近までは、出水の影響によりSt. 1から接続水域のSt. 9まで塩分0–25の低塩分層が見られ、濁度は、浦内全域の表層で10–15 FTUの高い値が観測された。また、St. 4–St. 6, St. 7–St. 8の底層付近でも10–15 FTUの高い値が見られた。

Fig. 8-②に出水や強風が観測されなかった平常時の、8月19日の観測結果を示す。観測時は下げ潮に相当し、東南東方向に $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の流れが観測された。表層では塩分は特に低い値は観測されず、濁度も0–10 FTUと浦内全域で低い値であった。一方、底層では10 FTU程度の濁度が全域に渡って観測された。Chl-Flu.も濁度と同様に底層付近でやや高い値が観測された。

Fig. 8-③にChl-Flu.が高かった9月8日の観測結果を示す。観測時は $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の西南西の風で、降雨は無かった。潮汐は上げ潮に相当し、西北西方向に $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の流れが観測された。8月31日からの断続的な降雨の影響により、浦奥部のSt. 1からSt. 5付近までの表層に20以下の低塩分層が広がり、Chl-Flu.は低塩分層において10ppb程度の値が観測された。また、その下流側のSt. 5–St. 8では、中層から底層にかけて濁度が20–30 FTUの高い値が観測された。

SS濃度とその有機物・無機物の割合

St. 1, St. 3, St. 5およびSt. 9の表層水中のSS濃度とVSS, (SS–VSS)の割合をFig. 9に示す。春季と夏季でSSの質を比較すると、春季では4月15日に典型的に示されるようにVSSの割合が低く、夏季では逆に9月8日に典型的に示されるようにVSSの割合が高い傾向が見られた。

潮流の連続観測結果

潮流調和分解

潮流調和分解の結果、主要分潮のうち最も卓越したのは M_2 分潮であった。例としてSt. 1の4月16日から5月14日の M_2 分潮の結果をFig. 10-a)に示す。流向は東南東から西北西で振幅は $11\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。また、St. 1の8月17日から9月26日の分解結果をFig. 10-b)に示す。流向は東南東から西北西で振幅は $9\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

平均流向・流速

連続測定の大観測地点について期間平均流向・流速を求めた(Fig. 11)。春季の平均流向・流速は、St. 1では東南東で $1.7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 5では南南西で $0.9\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 9の表層では東北東で $6.8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 9の底層では西南西で $3.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

夏季の平均流向・流速は、St. 1では東南東で $1.4\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 3では南東で $3.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 5では西南西で $1.6\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 9の表層では北東で $5.2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, St. 9の底層では西北西で $3.4\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。なお、St. 1の調和分解で得られた残渣流成分は春季で $1.7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 夏季で $1.4\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ で上述の平均流向・流速と同じであった。

接続水域におけるSSの収支

St. 9を設けた東西方向の水路部断面でのSS収支をTable 3に示す。この測点では上層流出・下層流入のケースが多く、エスチュアリー循環が卓越している。したがって、1日あたりでの流量収支がバランスする上下層境界水深を求めた後、接続水域幅(232m)から上・下層それぞれの断面積を求め、それに日平均東方流速および日平均SS濃度を乗じることで、1日当たりのSS収支を求めた。その際、バッチ観測時の濁度の鉛直分布を考慮し、表層と底層に設置した濁度計の濃度から境界水深の濃度を補間したうえで、境界水深濃度と表層濃度、底層濃度との各平均値を上・下層断面平均SS濃度とした。1日当たりの断面収支は、春は上層で $38.9\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ の流出、下層で $38.9\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ の流入と

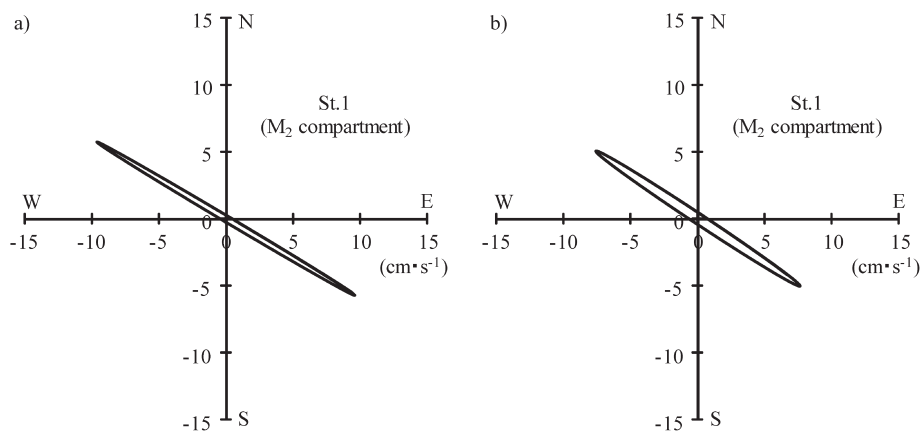


Figure 10. M_2 compartment of surface tidal current at St.1 calculated from 16 April to 14 May (a), and from 17 August to 26 September (b).

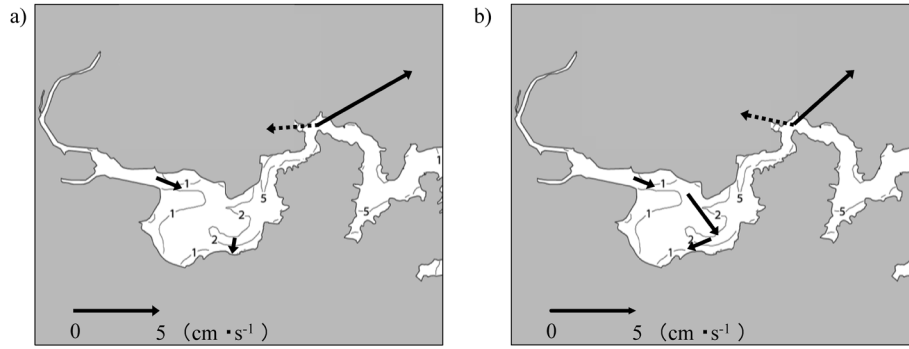


Figure 11. Residual current at St.1, 5 and 9 averaged from 15 April to 15 May (a). The solid lines denote the upper layer (0.5m below sea level), and the dotted line denotes the bottom layer (1.0m above sea bottom). Residual current at St. 1, 3, 5 and 9 averaged from 8 August to 26 September (b). The solid lines denote the upper layer (0.5m below sea level), and the dotted line denotes the bottom layer (1.0m above sea bottom).

Table 3. SS budget through the canal between Izonoura and Matoya bay and SS load from the river

		Spring		Summer	
		Upper	Bottom	Upper	Bottom
SS budget	(t·d ⁻¹)	38.9	-38.9	60	-53.7
Total SS budget through the canal	(t·d ⁻¹)	0.0		6.3	
Average SS load from the river	(t·d ⁻¹)	0.3 (0.5)*		1.5 (1.4)*	

なり断面全体での流出・流入は0.0t·d⁻¹となった。夏は上層で60.0t·d⁻¹の流出、下層で53.7t·d⁻¹の流入となり断面全体では6.3t·d⁻¹の流出となった。また、同じ観測期間中での河川からの平均SS負荷量は、春では0.3t·d⁻¹、夏では1.5t·d⁻¹となった。河川負荷量は、連続観測期間の数回のバッチ観測時のSS濃度と流量から求めた平均値であるが、出水時の負荷量が過小評価されている可能性があるため、別途、流出解析から求める推測流量と河川負荷量の関係式(L-Q式)から求めた値(田崎ら、未発表)とも比較した結果、両者はほぼ同じであった。

考察

ヒトエグサ養殖の盛期である秋季・冬季については、今後の調査が必要であるが、今回の春季・夏季の結果からみると、ヒトエグサの生長に影響を及ぼすとされている7FTUを超える時間の割合は春季では17-66%、夏季では26-73%と極めて高かった。このことから伊雑ノ浦では聞き取り結果から推測されたように、長期にわたり濁りが継続し、ヒトエグサ養殖に影響を及ぼしている可能性が高いことが明らかになった。また濁りの要因としては、出水、風、潮汐および植物プランクトンの増殖が考えられた。そこで各要因による濁りの状況について代表的な観測結果をもとに以

下に考察する。

出水による濁り

降雨時には、いずれも例外なく濁度の高いピークが表れ、ピーク値は浦奥部のSt.1が最も高く、次に浦央北部のSt.3、浦央南部のSt.5、接続水域のSt.9の表層の順であった(Figs. 4, 5)。これは、出水による河川からのSS負荷が大きくなったためと考えられる。塩分および濁度が出水前の値に回復するまでの時間は、4月21日および4月30日(Fig. 4)、8月12日(Fig. 5)のケースを見ると、塩分はいずれの地点でも約8日であったが、濁度はSt.1およびSt.3は約1日であったのに対し、St.5およびSt.9の表層では3-4日であり、観測地点により差が生じた。降雨後の塩分回復は、本海域の空間スケールではいずれの地点でもほぼ同じ時間スケールで起こるが、濁度の回復はSSの沈降速度の差により地点間の差が生じる。河川から流入した様々な粒径のSSについては、ストークス則が支配的なため、粒径が大きいものは流入後速やかに沈降するが、粒径が小さいものは沈降に時間を要し、浦央から接続水域まで移動したためと考えられる。既往の調査結果(三重県水産研究所, 2013)でも、浦奥部では砂礫(最大粒径19mm)が75%、浦央部ではシルト(最大粒径0.075mm)が95.7%と報告されている。

風による濁り

5月10日は4.9m·s⁻¹の北北西の風が観測され、濁度のピークは浦央南部に位置するSt.5で最も高く、9月5日は6.4m·s⁻¹の東南東の風が観測され、浦央北部に位置するSt.3で最も高かった(Figs. 4, 5)。

いずれの観測時も降雨はなく、濁度が顕著に上昇したのは風下の地点であり、風波により流速が増加し底泥が巻き上げられたためと考えられる。12時間移動平均した τ と濁度との関係(Fig. 12)をみると、その時々流速の増加に伴う τ の上昇により濁度が直線的に上昇し、その傾向は春季、夏季ともにほぼ同じであることが明らかになった。こ

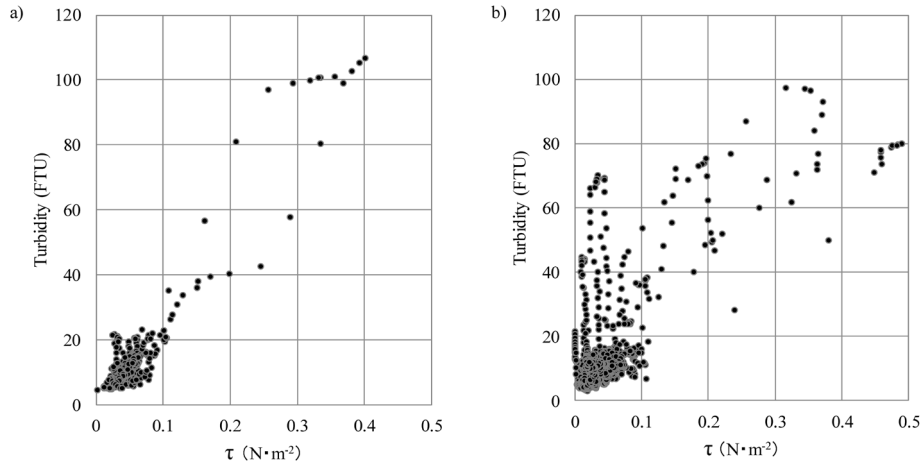


Figure 12. Relationship between 12 h simple moving average of shear stress (τ) and 12 h simple moving average of turbidity at St.1. The figure shows the result of observation from 15 April to 15 May (a) and from 8 August to 26 September (b) in 2014.

の風による濁度上昇時には、出水時と異なり濁度が上昇前の値に戻るまでに要した時間は、地点による差は見られなかった。これは河川から流入したSSの沈降粒子が波浪流や吹送流により何度も再懸濁、移動、滞留および沈降を繰り返す中で、浦全体の底泥表層の粒径分布が均一化したためと考えられる。

雨と風による濁り

8月10日は最大で $38\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降水および $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南風が観測され、浦中央部のSt.3で463 FTUと最も高く、次に浦中央南部のSt.5で217 FTU、浦奥部のSt.1で162 FTU、接続水域のSt.9の表層で41 FTUであった。8月10日はいずれの地点でも濁度は上昇したが、特に風下に位置するSt.3で顕著であった (Fig. 5)。雨と風が同時に発生した場合、出水により流入したSSが沈降するのを風波が阻害し、さらに流入淡水と風波により流速が大きく上昇するため底泥の巻き上げが助長され (Figs. 7, 12)、浦中央部や接続水域の濁度上昇が長期化すると考えられる。雨と強風による濁り発生の例としては、東京湾多摩川沖の観測において、台風通過後の出水によりSSが東京湾中央部へ移送され、長期間の濁度上昇が起きることが報告されている (中川ら, 2008)。

潮汐による濁り

観測中は出水や強風の影響とは異なる周期的な濁度の上昇が見られた (Figs. 4, 5)。St.1およびSt.9の底層の濁度のパワースペクトル (Fig. 6) では、いずれも半日周期、日周期でピークが見られたことから、周期的な濁度の上昇には潮流の影響が強く現れていると考えられた。

カオリナイトを用いた波による巻き上げ実験 (鶴谷ら, 1990) において、含水比243.5%の底泥の限界せん断応力 (τ_c) は $0.024\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下と報告されている。また、熊本現地泥を用いた実験 (運輸省第四港湾建設局, 未発表) にお

いて、含水比160–170%の底泥の τ_c は0.03と報告されている。潮流調和分解の結果から、卓越分潮である M_2 分潮の潮流楕円の振幅は、春季および夏季ともに約 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 10) であり、 τ は式 (1) より $0.027\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ となる。このことから含水比160%以上の底泥では出水や風による影響がなくとも潮汐のみで巻き上がる可能性が高いと推測される。Fig. 8-①、②の濁度の鉛直断面図を見ると、St.1–St.8の底層で10–15 FTU程度の比較的高い濁度が観測された。この場所の底泥直上の流速は今回直接観測出来なかったが、St.1での流速 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 8-①-d, ②-d) を適用すると、この底層付近の濁りは含水比が160%以上の底泥が巻き上がったものと推測される。

一方、底泥表面の τ_c は、同じ粒径でも堆積厚みの増加により τ_c は低下することが報告 (鶴谷ら, 1990) されているが、浦中央付近には長期的なシルト分の堆積に2010年および2011年のイベント (津波堆積物) が加わったことでシルトの堆積厚が1mを超えており (三重県水産研究所, 2013)、このことも底泥の巻き上げを容易にする一因であると考えられる。

植物プランクトンなど有機物による濁り

常時の潮汐により巻き上がる底泥は、含水率160%以上の浮泥状態のものと推測されたことから、その由来が問題となる。夏季に顕著に見られたように、浦内で増加するSSはVSSの割合が高いこと (Fig. 9)、9月8日に顕著にみられるように浦奥部から接続水域に行くにつれて、SSが急速に減少しVSSの占める割合も低下していることなどから、植物プランクトン由来のVSSが浦内で沈降している事が示唆される。したがって、これら植物プランクトンに由来するデトリタス状のものが含水率160%以上の浮泥の由来と考えられ、特に夏季に増加するものと思われる。Chl-Flu.を春季 (Fig. 4) と夏季 (Fig. 5) で比較すると、

夏季の方が2倍程度高い。これは、降雨による栄養塩の供給が夏季に大きく、水温、日照など植物プランクトンが増殖する条件も、夏季の方が適していたためと考えられる。

9月7日前後に浦中部や接続水域にかけて、濁度の上昇がChl-Flu.の増加と共に観測された (Fig. 5)。その時期の濁度の鉛直分布 (Fig. 8-③) を見ると、St. 5-St. 8の浦中部の中・下層に20–30 FTUの高濁度領域が存在している。この高濁度の原因としては、観測日の9月8日以前に、植物プランクトンの増殖が3回 (8月15日~17日, 8月25日~28日, 9月5日~8日) 観測されたこと (Fig. 5) から、これらを由来とする沈降デトリタスに無機物が凝集した浮泥状のものが、西北西 $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の流れにより、底泥と共に巻き上げられたためと推測される。 $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の τ は $0.1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ と計算される。含水比110%の熊本現地泥を用いた実験 (楠田ら, 1989) で τ_c は $0.1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ であると報告されている。この実験結果からすれば、浦中部底層付近の高い濁度は、浮泥に加え含水比100%強の底泥まで巻き上がったものと推測される。このような植物プランクトン由来の有機物を主とした底泥の巻き上げが、9月7日前後の濁度上昇の要因と思われる。通常、海域の底質環境が健全で底生生物が存在している状況であれば、VSSは底生生物の摂食により減少し、底生生物自身も高次の生物に捕食され食物連鎖が拡大していくが (武田ら, 2007)、三重県水産研究所 (2013) の底生生物調査では、St. 9付近が単位面積 (1m^2) 当たり36種類、102gであるのに対し、St. 3付近が11種類、9g、St. 5付近では15種類、10gであり、浦中部の底生生物は種類・量ともに非常に少ないことが報告されている。これはVSSの堆積に伴う底質環境の悪化が原因と考えられ、このような状態は更なる底生生物の減少と濁りの増加に繋がる可能性が示唆される。

濁りの悪化原因

計算された矢湾との接続水域でのSSの断面収支 (Table 3) では、春季では上層からの流出が下層からの流入と等しくなり、夏季では上層流出が下層流入を上回り $6.3\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ の流出となった。河川からの平均SS負荷量は、春季では $0.3\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ 、夏季では $1.5\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ となり、春季は河川からの流入分や再懸濁分が浦内に留まる傾向にあること、夏季は河川からの流入分に加え、浦内で生産、沈降、再懸濁するSSの一部が矢湾側に流出していることが伺える。

現在の浦内の平均流速は、春季は $0.9\text{--}1.7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、夏季は春季の倍程度であるものの $1.4\text{--}3.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ と微弱であり、またその平均流向は時計回りの循環になっている (Fig. 11)。そのため、現在の浦内のSSは、接続水域からの矢湾側に排出され難く、潮汐等により巻き上げおよび沈降を繰り返しながら、浦内に留まる傾向が強くなっているものと推測される。

このような状況は、ヒトエグサ養殖量の推移 (Fig. 2) や漁業者からの聞き取りから、1980年頃から徐々に顕著

になったと推定される。浦内の濁りの状況が悪化したことと、過去の様々な事象との関連については不明な点が多いが、一つの要因として1971年のダム建設による淡水流量の減少が考えられる。限定された期間ではあるが、ダム建設前の1969年の磯部川、池田川、野川の4~5月の合計流量 (関・柴原, 1972) と今回測定した2014年の4~5月の3河川の合計流量とを比較すると、平均流量が約30–50%に減少している。磯部川、池田川、野川の流域面積 10.8km^2 、 20.5km^2 、 26.3km^2 の合計 57.6km^2 と、ダム上流の流域面積 5.0km^2 から推算される流域面積の減少率が約10%程度であると考えれば、流量減少率にかなりの乖離があるが理由は不明である。考えられる要素としては、ダム建設前と今回の比較可能な月が4~5月のみである事、1969年の河川の個別データが示されていないこと、測定方法等の情報が記載されていないこと等があり、今後のさらなる検討が必要である。しかし、1971年のダム建設およびその後の上水道の需要増加により、磯部川から伊雑ノ浦への淡水供給量が減少したことは事実である。これにより、浦奥から浦央にかけて平均流が時計回りの閉鎖的な循環流に変わり、かつ接続水域からの表層流出が相対的に弱まりSSが浦内から流出しにくい構造になった可能性は十分考えられる。また、これらの長期的な主要因に加え、2010年および2011年のイベント (津波堆積物) が重なることで、現在の状況になったと推定される。

常態化した濁りの抑制策としては、①浦内に堆積した含水率の高い底泥の浚渫、②浦内の海底地形の改変、③河川流量の回復、④覆砂によるアマモや底生生物の生息に適した環境の回復 (柿野, 2006) などの対策が挙げられる。これら今後の環境修復策の検討に際しては、今回実施できなかった浦中部底層の潮流観測、含水率等を含む底泥の詳細な観測および秋季・冬季の状況把握が必要である。さらに生態系シミュレーションによる観測結果の再現性の検証をふまえた事前評価が必要である。

謝 辞

本研究に有益なご助言を賜った三重大大学の前行幸名誉教授、株式会社サイエンスアンドテクノロジーの市川哲也博士、現地調査にご協力いただいた鳥羽磯部漁業協同組合の北村亨理事、伊雑ノ浦の過去の状況調査にご協力頂いた鳥羽磯部漁業協同組合の藤原隆仁常務理事をはじめ組合関係の皆様へ深く感謝する。なお、本研究の一部は、新日鐵住金 (株) と名城大学大学院総合学術研究科との共同研究により実施された。

引用文献

海洋理工学会 (2015) 「海の姿を測る—海洋計測の原理と進化する技術」。78。

柿野 純 (2006) アサリの減耗に及ぼす物理化学的環境の影響に

- 関する研究. 水産工学, **43**, 117-130.
- 喜田和四郎・前川行幸 (1978) 座可賀島周辺の海洋環境および養殖生物に関する研究II 泥の濁りが養殖ヒトエグサに及ぼす影響. 三重大水実研報, **1**, 21-30.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 (2014) 国土交通省河川砂防技術基準調査編 第2章4節2 流量観測の方法, 2-4.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡 了 (1989) 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げに関する実験的研究. 海岸工学論文集, **36**, 314-318.
- 三重県水産研究所 (2013) 伊雑ノ浦環境改善事業効果観測業務, 8-9.
- 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木 宏・灘岡和夫・田中 晋 (2008) 東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測. 土木学会海岸工学論文集, **55**, 516-520.
- 志摩市上下水道部 (2007) 水道ビジョン2007, 5-6.
- 鈴木祥広・丸山俊朗・三浦昭雄 (1997) 懸濁物質がノリ殻胞子の着生に及ぼす影響. 土木学会論文集, **580**, 19-26.
- 鈴木祥広・丸山俊朗・高見 徹・三浦昭雄 (1998) 海水懸濁粒子の沈降・堆積がワカメ遊走子の着生とその生長におよぼす阻害作用. 水環境学会誌, **21**, 670-675.
- 日本海洋学会 (2016) 植物色素. 海洋観測ガイドライン, **4**, 32-36.
- 日本水産資源保護協会 (1992) 環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と事例, 4-23.
- 関 政夫, 柴原敬生 (1972) 志摩用水事業が的矢湾漁業に及ぼす影響. 三重県水産試験場研究報告, **1**, 1-32.
- 武田和也・石田基雄・家田喜一・石田俊朗・桑江朝比呂・鈴木輝明 (2007) 人工干潟域における埋在性メガベントス群集の生物生産機能および水質浄化機能. 水産工学, **44**, 11-19.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜 (1990) 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界. 港湾技研資料, **674**, 3-13.
- 徳島県水産試験場 (1972) ワカメの光合成に与える浮泥の影響. 本州四国連絡架橋漁業影響調査報告 (生理・生態班試験研究結果集), 151-157.