

論文

三重県伊勢市宮川河口における洪水堆積物の 干潟環境への影響の地球化学的評価

石賀 裕明*・坂矢 愛美**・坂本 京**・長谷川美華**
Young Sansfica Marlyn***・Ibrahima M'bemba Diallo***

Geochemical evaluation of the effect on a tidal flat environment by fluvial flooding in the Miyagawa River mouth estuary, Ise area, Mie Prefecture Japan.

Hiroaki Ishiga*, Megumi Sakaya**, Miyako Sakamoto**, Mika Hasegawa**
Young Sansfica Marlyn*** and Ibrahima M'bemba Diallo***

Abstract

The western side of Ise Bay, central Japan is characterized by a long arched coastline over 68 km in length. This is composed of continuous coasts, Ise, Matsusaka, Tsu and Suzuka, from south to north. The development of wide plains behind these coasts is related to the deposition of sediments by fluvial systems. The Ise and Matsusaka coasts contain estuaries where large tidal flats developed due to significant tidal changes. Typhoons have often passed these areas, and fluvial flooding can thus change the geomorphology of the estuary and marine environments. Geochemical analysis of tidal flat sediments was conducted in the Ise area to evaluate changes of sediment quality after a fluvial flood event. Sediments derived by fluvial flooding from typhoon No. 4 in June, 2012 formed a tidal delta some 200m in length, and mud was deposited on the tidal sand flat. Wood chips and wood derived from the fluvial flooding accumulated along the shoreline. Sediments in the new tidal delta have lower concentrations of heavy metals (Zn and Cu) and P_2O_5 than of samples collected at the same site in March and April, 2012. The Cr concentration is exceptionally high (over 80 ppm) due to high concentrations of this element in the source (mafic rocks distributed in the Sanbagawa Belt). These compositional changes are suggestive of new sediment supply, with relatively lower contaminants. An organic-rich mud bed overlies coarse sand of the previous tidal sand flats. The organic bed is covered by dark coarse sand derived from new delta, suggesting rapid burial of organic material and formation of relatively reducing conditions.

Key words: tidal flat, fluvial flooding, sediments, geochemistry, Ise Bay, Miyagawa River

はじめに

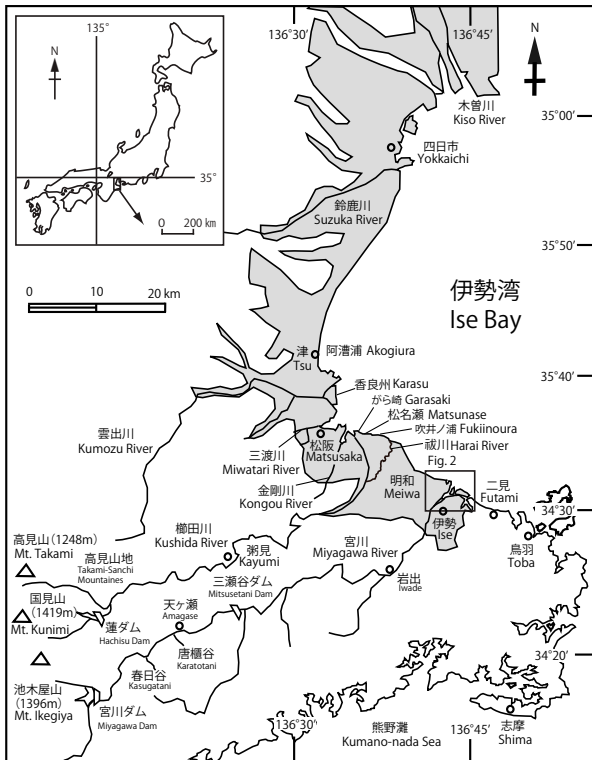
東海地方の太平洋沿岸には延長の長い海浜が多数存在する。中でも伊勢湾西部の沿岸は伊勢市から松阪市にかけての北西-南東方向に延びる海岸と津市から四日市市にかけての北北東-南南西方向の直線的な海岸が特徴的である(第1図)。これらの海岸の背後には平野が発達する。平野の形成は河川と密接な関係があり、伊勢地域には宮川をはじめとする河川が、松阪地域には櫛田川や雲出川などの河川が流入し、いずれも河口デルタが形成されている。伊勢湾は潮位差が大きく、春の大潮時では2.5 mもの潮位差を持つ。そのため、干潮時には広大な干潟があらわれ、松阪地域の松名瀬

海岸や伊勢地域の大湊海岸は潮干狩りでも良く知られている。これらの干潟環境の調査は環境保全や環境再生を行うための基礎的情報である。伊勢湾では水産資源再生の取り組みが行われ、その1つとして伊勢湾南部地域で藻場再生が推進されている(国分, 2009; 国分ほか, 2007)。松阪地域の松名瀬海岸ではアマモがみられる(阿部ほか, 2004; 小松ほか, 2006)。このような沿岸の海洋環境は河川からもたらされる碎屑物や栄養塩との関連が重要である。宮川や櫛田川は流域延長がそれぞれ91 km, 85 kmに達する大きな河川で洪水時には多量の土砂を運搬する。特に台風に伴う降雨時には河川の高水による泥水の沿岸域への流入が著しい。山下ほか(2011)は櫛田川河口干潟で発生した洪水起源堆積物の形成について堆積学的な詳しい検討を行っている。筆者の一人は日本の代表的な干潟環境の調査を継続して行ってきた(石賀ほか, 2010)。また、三河湾での干潟環境の調査も行った。それらとの比較研究のために2012年より本報告地域の干潟での調査を始めた。その折、2012年6月に台風4号が伊勢、松阪地域を通過し、宮川、櫛田川等の河川では大規模な出水が生じた(内閣府, 2012)。特に、宮川では泥水とともに上流から流木や木片が多

* 690-8504 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域
Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

** 690-8504 島根大学総合理工学地球資源環境学領域 Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

*** 690-8504 島根大学総合理工学研究科特別プログラム地球資源環境学専攻 Graduate Course in Earth Science and Geoenvironmental Science, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan



第1図 三重県伊勢地域の位置図。伊勢湾に面する平野（灰色）の発達と伊勢湾に流入する宮川、榑田川、雲出川を示す。

量に流入して、河口干潟を被覆した。また、9月にも台風17号が同様に通過して出水が生じた（津地方気象台, 2012）。このような出水に伴われる干潟地形の変化と有機質堆積物の干潟環境への影響について検討したので報告する。

調査地域

伊勢湾西部の松坂および伊勢の両地域は河口デルタの発達が目立ち、港湾地域を除いて自然の海岸地形が残されている。また、潮位差が大きいため、河口干潟が発達する。前浜は中～粗粒砂が卓越し、低潮位時には広大な干潟が現れる。伊勢湾が太平洋側に位置することから、このような干潟の堆積物は上げ潮流の受けた細粒～中粒砂からなることが多い。そのため先に述べたような有名な潮干狩りの海浜が多いといえる。しかし、伊勢地域大湊の東部では前浜と砂州の間の潮汐低地にはシルト質堆積物がみられることもある。

伊勢地域では河口デルタは比較的対称に近い地形を持つ。大湊はおおよそ1.4 kmの海岸線をもつ二等辺三角形に近い地形を持つ（第2図）。東方では五十鈴川の流入で二見町は長い砂州（幅6.5 km、長さ600 m）となっている。宮川河口中央には長さ1.2 km程度の中州がある。西側では外城田川の流入で砂嘴が発達して内部は半閉鎖的な環境となり、中央に中州が有る。これより西方の明和町では北西～南東方向に海岸線が変わり、2 km前後のやや弓なりでない直線的な海岸が発達する（第1図）。

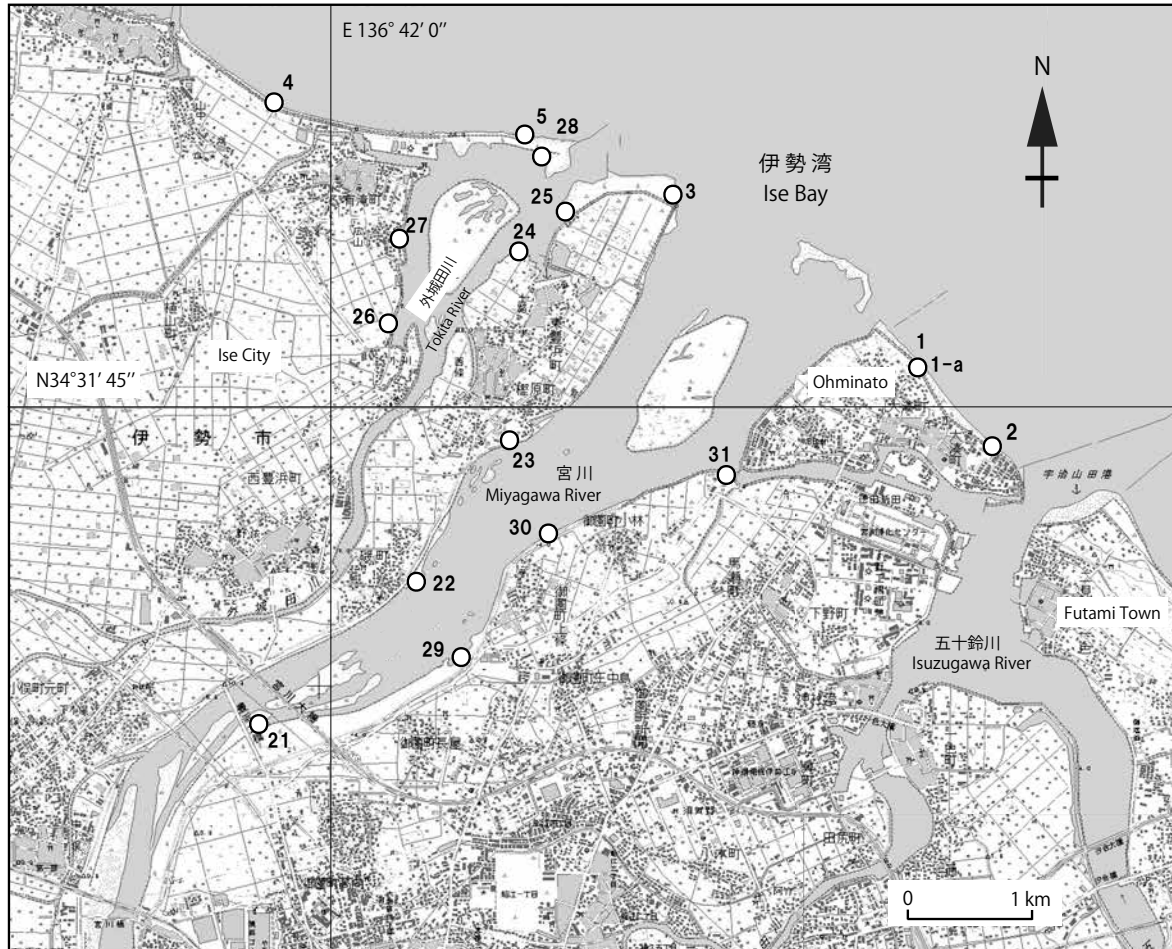
松坂地域はこの海岸線から連続する。明和町の西では海岸

線はほぼ東西となり、吹井ノ浦から松名瀬海岸に続く。明和町被川河口からがら崎までは5 kmある。松坂地域では西から榑田川、金剛川、三渡川、雲出川などが流入して複雑な海岸となっているがほとんどが、松坂港をはじめ埋立てや護岸壁の形成などで人工的な海岸となっている。榑田川河口から約1.25 km付近では中州が発達する。雲出川河口は河口デルタとなり長さ2.75 kmの海浜（香良州浜）となっている。松坂地域から北部は阿漕浦のようなやや弓なりの長い海岸（約3 km）が発達する。これより南北から北東～南西方向に方向が変化するが30 kmにわたり海浜が発達する。

地質的には中央構造線が伊勢市南部の二見を通り、西方では粥見を通る（第1図）。そのため宮川の後背地の大半は三波川変成帯である。また、三波川変成帯には苦鉄質岩体が伴われる。領家帯内でも苦鉄質岩石の分布が知られている。領家帯内では新第三紀鈴鹿層群が広く分布する（三重県, 1970；シームレス地質図データベース Web GIS版）。

宮川流域の斜面崩壊と土石流の発生

西南日本の太平洋沿岸地域は台風にもなう激しい降雨による被害を受けることが多い。特に紀伊半島東部はこれまでに多数の台風が通過し、山地での土砂災害や平野での洪水等の被害が大きい。歴史的には1959年9月の伊勢湾台風の影響が良く知られている。伊勢地域は最近では2004年台風21号による洪水、土石流、地すべり、斜面崩壊などの被害が大きかった。宮川ダム（三重県観測点）では最大時間雨量119 mm（9月29日、9時～10時）、連続雨量930 mmであった。そのため、宮川流域の春日谷（柏木, 2006a, b）、唐櫃谷、天ヶ瀬（松坂建設事務所災害復旧室, 2004）などでは大規模な地すべりと斜面崩壊が生じた（林ほか, 2004）。また、29日には岩出水位観測所（河口から11.6 km付近）では10.16 mの水位を記録した。この観測地点での氾濫危険水位は7.0 m、計画高水位は9.61 mである。また、2011年台風12号では9月4日における岩出水位観測所の水位は10.01 mと高くなった（国土交通省観測点）。2012年6月19日には台風4号が伊勢、松坂地域を通過した。そのため、この台風により宮川流域での6月18日から20日までの1時間降水量は最大値69 mm、24時間降水量405.5 mmに達した（国土交通省観測点）。岩出水位観測所では6月19日に5.52 mまで水位が上昇した。また、9月30日には台風17号が17時半頃志摩半島を通過しており、降水量は大台町宮川で267.5 mm、岩出水位観測所での水位は3.18 mが観測されている（津地方気象台, 2012）。このように繰り返し通過する台風の降雨によって流域の山地は地すべりや斜面崩壊により土石流が発生し、岩塊、土壌と樹木（木材）などが流出している。それらは下流の三瀬谷ダムに蓄積し、放水とともに流下する。春日谷での斜面崩壊と地すべりの記載は柏木（2006a, b）に詳しいが、春日谷の河床を厚い土石流堆積物が被覆している。宮川との合流点から1.26 km上流に建設された砂防ダムは土砂で埋められている。ここでは地すべりの調査研究の進んでいる春日谷を取り上げたが、宮川流域には航空写真を見る限り多数の地



第2図 三重県伊勢市宮川河口域の地形を示す図。大湊は典型的な河口デルタである。試料採取位置を示す地形図(1/2.5万地形図「明野」を使用)。

すべり地形が有る。そのため台風による降雨により繰り返し斜面崩壊が発生して、土砂と樹木が流出していると考えられる。なお、河川の高水データは国土交通省川の防災情報から、降雨量は地方気象台データから得た。

2012年7月の伊勢地域大湊海岸の状況について

流木や有機物片の集積について

7月6日には大湊海岸西部では多量の流木と有機物片がみられた(第3図, a)。流木は長さ10m以上の大きなものから1m前後まで様々であるが、後浜に多くが集積していた。有機物片は木質チップが多く、数cmから数mmまで様々である。木質チップは汀線で浮遊し、一部は沈水している。これらは多量に集積して数10cm程度の層をなしている。一部はすでに軟らかな腐食物質に変化しているものもある。このような状態のものは地元の人々によって回収され肥料成分として活用されている。また、木質チップは低潮位時には潮汐低地に広がり、リップルマークのくぼみに集積している(第3図, d)。7月には流木と木質チップは大湊海岸の広い範囲に分布していた。これらは8月には大湊海岸の西部では依然として認められたが、細粒の木質チップはやや減少した。

大湊海岸の東部ではやや少なくなった。10月にも8月と同様に木質チップは残存していた。

砂礁(潮汐デルタ)の出現について

7月6日の調査の時に大湊海岸西部にマウンド状の潮汐デルタが形成されていることが観察された(第3図, b)。これは洪水による堆積物が砂州の上に堆積し、砂礁として形成されたと考えられる。その後、波浪と潮汐の影響を受けて変形したものといえる。満潮時にも丁部が現れているので潮汐デルタと呼ぶ。地形的には幅のある弧状を示し、干潮時の長さが約180m、中心の幅が約95mある(第4図)。計測は8月3日に行った。陸側で最も地形的に高くなり、丁部は潮汐低面から約1.4mある。これより海側に緩やかに潮汐低面まで傾斜する。陸側の縁では急傾斜となり、西端では長さ10mあまりの切れ込みが形成されている。マウンドの上部は7月には中レキ(長さ2~3cm)が多くみられた(第3図, c)。これらのレキは頁岩が多く細長い形状を持つ。岩種は他にチャートや砂岩がみられる。基質は淘汰の悪い中~粗粒砂で泥混じりであった。まばらに貝殻が伴われていた。7月には潮汐低地では泥の堆積がみられ、厚い部分では10cmに達した。8月3日にはマウンド上部で貝殻が多く、レキはやや少なくなった。



第3図 a: 2012年6月の台風4号の通過によってもたらされた三重県伊勢市大湊海岸西部 (Loc. 1, 第2図) における流木や木質チップの分布状況 (7月6日撮影)。
 b: 2012年6月の台風4号の通過によって伊勢地域大湊海岸西部 (Loc. 1-a, 第1図) に出現した洪水による砂礁 (潮汐デルタに変形) の写真 (8月3日撮影)。形状については第3図参照。
 c: bの潮汐デルタ上のレキ質堆積物の様子。細長い頁岩のレキが目立つ (7月6日撮影)。ボールペンの長さ15 cm。
 d: 伊勢地域大湊海岸西部 (Loc. 1, 第1図) における潮汐デルタと前浜の間のリップルマークとそのくぼみを埋める木質チップの様子 (2012年8月2日撮影)。ボールペンの長さ15 cm。

試料採取と分析方法

1. SS (浮遊性物質質量; mg/L) の測定

2012年4月7日, 6月6日, 8月3日, 10月2日に昼間の最干時を挟んで2Lの採水を行い, 冷蔵保存して石英フィルター (ワットマン石英ろ紙QM-A) に通水してSSを測定した (第1表)。その石英フィルター試料を蛍光X線分析装置により元素組成を測定した。元素分析の方法は以下に述べる堆積物の場合と同じである。フィルター上には十分な量のSSが捕集されており, 元素分析を行う上で必要なX線強度が得られている。

2. 堆積物の採取と試料作成

宮川河口域及び大湊海岸において堆積物を500g以上採取した (第2図)。宮川河口には潮汐作用による泥質堆積物が発達しており, これらの試料についてpH, ORP (酸化還元電

位) の測定をガラス電極 (ホリバD-54) を用いて行った (第2表)。洪水後に現れた砂礁 (mound) では頂部の試料 (top A, top B) と測線上の試料 (0 m, 50 m, 100 m, 150 m) を採取した (第4図)。

堆積物の約100g程度の試料を160℃の乾燥器で48時間以上乾燥させた。これにより水分および揮発性分を取り除いた。その後自動メノウ乳鉢を用いて粉体試料を作成した。

3. 砂礁の外縁における柱状試料について

上述の潮汐デルタの発達とここに示した有機質堆積層の関係を検討するために, デルタの東側で柱状試料を採取した。コアの長さは14cmで岩相の特徴から上位からA層 (0~6 cm), B層 (6~10 cm), C層 (10~14 cm) に区分される (第5図)。

C層の層厚4cmで全般に細粒~中粒砂からなるが, 下部の2.5cm程度はやや粗く赤みを持つ (マンセル土色標ではYR

第1表 三重県伊勢市大湊における海水のSSおよびその元素組成、干潮時の潮位は気象庁データ(潮位表基準面を用いて)を示している。

Ise area sample	Trace elements (ppm)														Major oxides (wt%)					SS mg/L	ebb time	typhoon			
	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	Sr	Y	Nb	Zr	Th	Sc	TS	F	Br	Cl	TiO ₂	Fe ₂ O ₃				MnO	CaO	P ₂ O ₅
2012 April, 7																									
9:00	2	10	24	23	28	13	31	-	2	2	19	1	4	5451	300	20	69451	0.28	0.81	0.07	1.12	0.17	15.5		
10:00	4	10	35	35	32	46	94	12	4	3	25	2	12	5335	10	26	50988	0.58	3.00	0.12	1.43	0.15	36.0		
11:00	2	9	21	27	28	11	27	-	2	2	12	-	-	3599	419	13	46261	0.20	0.55	0.05	0.89	0.15	11.0	12:17	
12:00	1	10	21	19	27	4	13	-	2	2	18	-	-	2440	382	10	28275	0.12	0.23	0.03	0.80	0.12	9.5	(-2.5cm)	
July, 6																									
11:00	1	10	22	28	26	9	24	-	2	2	13	-	2	5095	56	15	57528	0.20	0.62	0.09	0.92	0.21	18.3		No. 4
12:30	2	10	29	24	32	19	33	-	3	2	19	1	2	5601	18	18	58505	0.29	0.88	0.10	0.84	0.28	18.7	13:05	June, 19
14:00	1	10	22	20	23	6	15	-	2	2	17	-	-	7302	15	27	77732	0.10	0.28	0.08	0.80	0.17	19.9	(14cm)	
August, 3																									
10:10	2	10	26	20	26	4	5	-	2	2	17	-	1	4881	89	22	53247	0.08	0.07	0.24	-	0.16	16.4		
11:10	2	10	32	26	29	24	50	3	3	2	17	1	3	6274	152	29	66688	0.44	1.41	0.12	0.93	0.18	24.0		
12:40	1	11	29	22	25	14	25	-	3	2	19	1	2	9054		33	89660	0.30	0.83	0.19	0.90	0.25	19.2	12:47	
13:30	2	10	28	20	24	9	26	2	3	2	19	2	4	7785		31	84028	0.25	0.63	0.18	0.88	0.18	19.1	(20cm)	
14:30	3	9	41	31	32	37	74	5	4	2	18	1	6	6997	42	35	81932	0.55	2.09	0.14	1.02	0.25	42.8		
October, 2																									
11:20	4	12	41	30	43	64	132	5	5	3	29	3	11	1015	121	6	2633	0.78	4.28	0.19	0.96	0.15	76.0		No. 17
12:10	3	9	28	33	34	43	88	3	4	2	18	1	8	1379	72	7	10126	0.58	2.67	0.15	0.98	0.15	46.3	12:47	Sep, 30
13:08	2	9	31	28	33	37	85	-	4	2	17	2	6	738	40	3	1658	0.50	2.42	0.09	0.76	0.15	29.0	(77cm)	
14:08	3	11	33	32	35	53	111	3	4	3	21	1	9	1057	-	4	3064	0.73	3.36	0.17	0.85	0.15	56.8		

2/5). 上部はやや暗色で (YR 2/5), 細粒である。最上部はレキ質でさらに貝殻が重なる。この部分は砂質潮間低地の堆積物である。

B層は層厚は変化するが厚い部分で4 cmで灰色シルト (YR 2/5) と中部の1.5~2.0 cmの有機質堆積物からなる。このコアを採取した約30 cm側近でも同様に有機質堆積物がみられ、木片や木質チップの腐植からなる。B層は洪水により潮汐低地に運搬された有機質堆積物と考えられる。

A層は淘汰の悪い中粒砂からなる。色調はやや暗色 (YR 2/5) である。これらの試料は上記と同様に粉体試料として元素分析に用いた。

4. 元素組成の検討

堆積物の乾燥試料は蛍光X線分析装置 (リガク RIX 2000) を用いて、粉末プレス法により微量元素組成 (As, Pb, Cu, Zn, Cr, V, Sr, Zr, Th, Sc, TS, Br, I, Cl [ppm]), 主元素組成 (TiO₂, Fe₂O₃*, MnO, CaO, P₂O₅ [wt%]) を求めた (第3表)。Fe₂O₃* は全鉄を示す。

分析結果

1. SS

干潟は満潮時においても水深が浅いため、SS値はほとんどが10 mg/L以上である (4月の12:00の試料を除く、第1表)。4月の10:00 (36.0 mg/L), 8月の14:30 (42.8 mg/L) が高い (第1表)。これは大湊では波浪の影響が強くと干潮時を除く時間ではSSが高く、逆に干潮時で低くなる傾向がある。10月2日の試料ではSSはいずれの試料も高く、11:20で最大となる (76.0 mg/L, 第1表)。これは9月30日に台風17号が伊勢湾を通過したため、濁りが残ったことによる。2012年では6月19日に台風4号が伊勢湾を通過しており、先に記述したように海岸に多量の木片や木質チップが流入した。そのため、河川からの濁水の流入や沿岸での底質の巻き上げは大きかったと考えられる。しかし、採水日が7月6日で台風通過から2週間以上が経過していたため、SSは低下していたと考えられる。

2. 堆積物の pH および ORP

河口の泥質堆積物の pH については6.7~7.5の範囲にある (第2表)。ORPは-40 mV から158 mVまで変化に富む。特に低いのは地点22 (-40 mV), 地点27 (-27 mV), 地点29 (10 mV) など、還元的な底質である。地点22と29は宮川河口より約3 km上流の河口の堆積物である (第2図)。地点27は外城田川 (ときたがわ) 河口の砂嘴と中州の発達する部分の干潟堆積物である。宮川河口は平穏時には潮汐作用の影響が大きくなるために、満潮時には還元的な堆積環境となることが予想される。

3. 元素組成 SS について

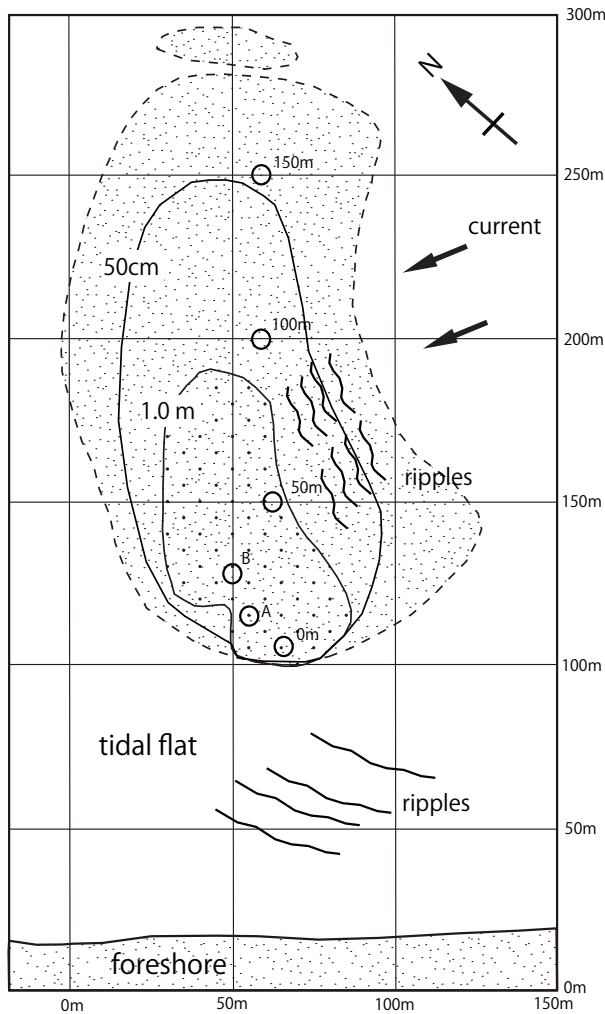
Asおよび重金属についてはAs, Pb, Zn, Cuでは潮位変化と季節の大きな変化は無い。しかし、Ni, Cr, Vについては10月2日の試料が他の季節の試料に比べて高くなっている。Srは多くの試料で低く検出限界前後である。Y, Nb, Zr, Th, Scも含有量は低い。TSとClについてみると4月、7月、8月の試料ではTSは0.36~0.9 wt%の範囲にあるが、10月の試料では0.07~0.14 wt%と明瞭に低下する。ClとBrについても同様の傾向がある。主元素ではTiO₂, Fe₂O₃は10月の試料が他の季節の試料よりも高い。MnO, CaO, P₂O₅では大きな変化は認められない。Ni, Cr, V, TiO₂ および Fe₂O₃ の含有量が10月の試料で増加するのは後背地からの供給物の変化によると考えられる。また、10月2日の試料のTS, Clは低く、台風で出水した河川水の影響が強いことを示す。

堆積物について

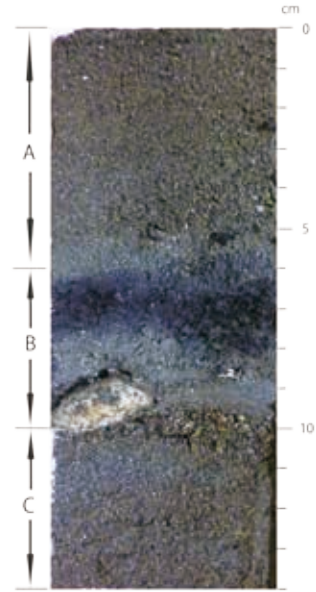
堆積物の元素組成について前浜堆積物 (Foresore) と河口の干潟堆積物 (Estuary) について概観すると (第3表)、河口堆積物ではほとんどの元素が前浜堆積物よりも高い。これは前浜堆積物が中粒~粗粒砂からなるのに対して、河川デルタ堆積物が潮汐作用を受けて形成され、シルト~細粒砂で構成されていることによる。重金属についてみると前浜堆積物のPb (8~12 ppm) に対して、河口堆積物ではPb (14~31 ppm)

第2表 三重県伊勢市大湊における河口堆積物のpHおよびORP(酸化還元電位 mV)と潮位変化を合わせて示す。

no.	pH	ORP (mV)
22	7.5	-40
23	7.3	62
24	7.3	92
25	7.2	148
26	7.0	69
27	7.3	-27
28	7.4	47
29	7.4	10
30	6.9	103
31	6.7	158



第4図 2012年6月の台風4号の通過によって三重県伊勢市の大湊海岸西部(Loc. 1-a, 第1図)に出現した洪水による砂礁、後に潮汐デルタ(flood ramp)に変形した形状と試料採取位置を示す図(8月3日に作成)。マウンドの実線部は干潟から約50cm, 1m以上の高さを持つ部分。点線は最干時に水面から現れた部分。丁部からは北東に緩やかに傾斜する。A, Bはramp丁部(干潟の平坦面から1.4mの高さ)の試料地点(top A, top B)。0m, 50m, 100m, 150mは試料採取地点。ramp丁部および西部には中レキ(長径1~2cm)と貝殻が多い。



第5図 第3図bの潮汐デルタの東側における柱状試料の写真と層区分。下位よりC層(10~14cm)は河川の氾濫前の堆積物、B層(6~10cm)は黒色の有機層を含み氾濫時にもたらされた有機物を含む層、A層(0~6cm)は氾濫後のデルタからもたらされた砂層と考えられる。C層の上位には干潟堆積物形成時の貝殻が含まれる。

形成された。洪水によってもたらされた10月のSSが他の月のものとは組成が異なる。次に堆積物について検討する。Zn-Fe₂O₃図(第6図)では前浜、河口および潮汐デルタの試料はほぼ直線に近似される。河口の試料がこれらの中では最も高い範囲にプロットされている。より詳細に見ると潮汐デルタの試料はZnがやや低い範囲に示されている。この傾向は、Pb-Fe₂O₃図、Cu-Fe₂O₃図およびP₂O₅-Fe₂O₃プロットにおいてより顕著である。従って元素組成からは洪水時の堆積物は重金属やリン等の沿岸域の汚濁物質となりやすい元素の含有量が平常時の組成に比較してやや低下する。これはSSの場合でも明らかな様に後背地である三波川変成帯の苦鉄質岩石の影響をより受けやすくなるためと判断される。Zn, Pb, Cu, P₂O₅がFe₂O₃に対して減少したように表示されるのは、平常時の堆積物組成に対してよりFeが富んで希釈された可能性がある。Cr-Fe₂O₃図ではCrは高い値を示す。Crは河口堆積物と同じ範囲の含有量を持ち、トレンドとしてはFe₂O₃に対してCrの方が高くなる。これは苦鉄質岩からのCrやNiなどの寄与がFeよりも大きく成った事によると判断される。

Zrの含有量は後背地の地質に関連する。宮川は規模の大きな後背地を持ち堆積物は運搬の過程で混合して比較的均一な組成を形成すると期待される。また、Zr含有量は堆積物の粒度組成に関連する(McLennan, 1993; Roser, 2000ほか多数)。Zr-Th図(第6図)では3種類の試料は少し分散する部分があるが、ほぼ直線上にプロットされる。これは粒度組成と両元素を含む鉱物の存在量が反比例しており、洪水による泥質堆積物において両元素の含有量が高くなることと一致する。CrはCrを含む鉄鉱物に含まれこれらはシルトサイズの粒子

第3表 三重県伊勢市大湊における前浜 (Foreshore)、河口 (Estuary) および洪水後に形成された潮汐デルタ堆積物 (Mound sample) を区分した元素組成および柱状試料と潮汐デルタ堆積物の元素組成。

sample	Trace elements (ppm)														Major oxides (wt%)										
	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	Sr	Y	Nb	Zr	Th	Sc	TS	F	Br	I	Cl	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	P ₂ O ₅		
Foreshore	1a	5	9	29	11	27	58	62	84	11	6	75	4	5	808	49	6	30	935	0.34	3.42	0.10	0.93	0.06	
	1	5	8	26	10	17	40	43	93	10	5	70	4	3	793	61	7	26	1156	0.24	2.79	0.07	1.16	0.05	
	2	6	12	35	7	28	66	51	123	13	3	87	5	6	484	151	5	17	814	0.32	3.41	0.06	1.72	0.08	
	3	5	9	31	12	29	69	76	84	13	7	82	5	4	722	74	6	29	900	0.38	3.72	0.08	0.92	0.06	
	4	4	8	21	6	8	36	29	215	7	3	47	3	14	645	75	4	25		0.14	1.91	0.04	5.73	0.04	
Estuary	5	5	11	28	9	19	34	55	118	11	5	71	4	6	649	198	5	19	592	0.28	3.11	0.07	1.75	0.05	
	Min	4	8	21	6	8	34	29	84	7	3	47	3	3	484	49	4	17	592	0.14	1.91	0.04	0.92	0.04	
	Max	6	12	35	12	29	69	76	215	13	7	87	5	14	808	198	7	30	1156	0.38	3.72	0.10	5.73	0.08	
	Average	3.9	7.9	22.8	7.5	15.4	40.2	44.2	119.2	8.5	4.0	55.7	3.3	6.7	551.3	99.0	4.2	19.9	540.0	0.22	2.40	0.06	2.51	0.04	
Core sample	22	10	31	68	66	112	169	113	113	28	14	198	12	12	1556	1114	23	20	6539	0.84	6.74	0.27	1.03	0.16	
	23	10	21	60	42	59	109	178	109	29	14	203	12	11	1250	959	19	24	4996	0.91	6.93	0.20	0.96	0.16	
	24	7	17	58	20	29	95	135	121	20	9	184	6	9	1534		13	25	5873	0.63	5.45	0.12	1.29	0.12	
	25	8	16	52	21	31	99	127	117	19	8	158	8	12	1149	204	13	25	6463	0.61	5.46	0.12	1.14	0.13	
	26	7	18	55	31	31	83	119	121	20	10	209	8	9	2755		20	16	6867	0.67	5.19	0.08	1.14	0.15	
	27	10	28	81	58	42	102	159	155	28	13	198	12	14	3944	1411	40	18	11107	0.86	7.03	0.13	1.82	0.20	
	28	6	14	47	17	24	86	116	166	20	9	165	7	11	2130	1635	21	22	11511	0.60	5.14	0.13	2.26	0.11	
	29	8	21	59	51	78	159	182	102	28	13	196	11	12	1198	249	13	18	2355	0.89	7.24	0.12	1.04	0.16	
	30	9	22	60	47	60	122	173	115	29	14	224	13	10	1875	34	18	7	4090	0.93	6.73	0.13	1.01	0.16	
	31	11	23	62	60	61	112	192	112	33	16	242	14	12	1011	156	14	6	4088	0.97	7.54	0.24	0.88	0.16	
		Min	6	14	47	17	24	83	116	102	19	8	158	6	9	1011	34	13	6	2355	0.60	5.14	0.08	0.88	0.11
	Max	11	31	81	66	78	159	192	166	33	16	242	14	14	3944	40	25	11511	0.97	7.54	0.27	2.26	0.20		
	Average	7.9	18.7	54.4	36.6	42.9	100.5	137.7	115.6	22.9	10.8	179.3	9.3	10.4	1901.7	372.3	19.0	14.3	6034.7	0.71	5.70	0.13	1.24	0.14	
Mound sample	0-2cm	7	14	46	25	49	110	144	112	22	10	165	8	10	1085		15	15	4472	0.76	5.69	0.16	1.24	0.08	
	2-4cm	7	14	45	22	46	123	134	109	21	10	182	9	10	1058	33	10	16	4310	0.76	5.68	0.15	1.22	0.08	
	4-6cm	7	13	46	22	43	115	142	113	22	11	194	8	8	1174	277	10	20	5043	0.74	5.63	0.13	1.33	0.09	
	6-8cm	8	18	52	35	51	115	151	128	26	12	211	10	8	4469	116	25	19	10468	0.78	6.09	0.15	1.37	0.12	
	8-10cm	7	14	44	23	44	109	121	110	20	10	162	8	7	940	49	8	20	2344	0.67	5.28	0.12	1.18	0.08	
	10-12cm	7	13	45	22	49	127	134	107	20	10	156	9	9	1048		9	14	4640	0.72	5.56	0.14	1.14	0.08	
	12-14cm	7	13	46	22	46	118	133	107	21	10	163	9	7	1087	187	9	17	4165	0.73	5.61	0.14	1.10	0.09	
	2012/8/3																								
	top A	4	9	25	9	19	34	50	79	79	10	5	65	4	1	790	102	5	30	843	0.27	2.90	0.07	0.83	0.05
	top B	5	10	33	13	34	85	97	85	85	13	7	88	5	4	837		4	29	456	0.55	4.42	0.11	0.99	0.07
	0m	6	10	34	14	34	87	89	88	88	13	7	86	5	4	914	9	5	31	1300	0.49	4.49	0.13	1.04	0.07
50m	5	10	34	14	37	92	88	87	87	12	6	81	4	6	963	22	5	31	1196	0.50	4.47	0.11	1.05	0.07	
100m	6	10	35	15	37	104	102	90	90	14	7	89	5	7	1035	103	6	30	2136	0.55	4.93	0.12	1.14	0.07	
150m	6	9	34	14	33	84	91	85	85	12	6	79	5	5	1331	34	10	31	7083	0.49	4.36	0.12	0.97	0.07	

である。特に Ni や Cr は前浜堆積物 (Ni=8~29 ppm, Cr=34~69 ppm) に対して、河口堆積物 (Ni=24~78 ppm, Cr=83~159 ppm) が高い。後背地の組成の評価に有効な Th-Sc については前浜堆積物の前浜堆積物 (Th=3~5 ppm, Sc=3~14 ppm) に対して、河口堆積物 (Th=6~14 ppm, Sc=9~14 ppm) である。前浜堆積物の地点 4 の試料が Sc=14 ppm で高い値を示すが、この試料以外では Sc=3~6 ppm である。従ってこの試料を除けば、前浜堆積物 (平均値 Th/Sc=0.99) と河口堆積物 (平均値 Th/Sc=0.91) ではほぼ同じ値をもつと言える。

CaO と Sr のみが前浜堆積物で高い。CaO と Sr は貝殻等生物起源の炭酸塩に関連するため、前浜堆積物で高くなっていると言える。

洪水後の試料 (第 3 表; 砂礁 Mound sample) についてみると、As, Pb, Zn の含有量は前浜の試料 (第 3 表; Foreshore) の含有量とほぼ同じであるが、Ni, Cr, V は有意に高くなっている。また、Zr も前浜の試料の含有量に比較してやや高い。TS も 1000 ppm を越えるものがある。

柱状試料について

コア試料では 6-8 cm の試料を除いて A 層, B 層, C 層の砂質堆積物試料には大きな変化はない。6-8 cm の試料は重金属について Zn (52 ppm), Ni (51 ppm), V (151 ppm) 等が最も高い。また同様に TS (4469 ppm), Br (25 ppm), Cl (10468 ppm) も高い。主元素では Fe₂O₃ (6.09 wt%) および P₂O₅ (0.12 wt%) が高い。

後に示す元素間のクロスプロット (第 6 図) では洪水堆積物で Pb, Zn 等の重金属が鉄に対してやや低くなり、Cr は逆に高くなる傾向がある。

マウンド上部の試料 (第 4 図) では top A を除いて、その他の試料では多くの微量元素についてほとんど均一である (第 3 表)。TS についてはマウンドの縁辺となる 100 m, 150 m 試料でやや高くなる (1035, 1331 ppm)。

考 察

洪水による干潟環境への影響

7月6日の伊勢市大湊海岸の観察では木片や木質チップ等が多量に流入して沿岸域に分布していた。また、干潟表層の堆積物が泥質堆積物に変化していたことも4月からの連続した観察で明らかである。また、有機質堆積物については干潟の中を循環しているとともに柱状試料の観察でも明らかな様に堆積物中に埋没したものもある。柱状試料の有機質堆積物 (6~8 cm, 第5図) は黒色を呈しており、還元的で腐食臭をもつ。これは出水した時に運搬された河川流域の森林土壌や河口の泥質堆積物と森林の木材やダム湖に蓄積 (堆積) した木質物質に由来する有機物が混合したものと考えられる。この柱状試料の TS は上下の砂質堆積物で 1000 ppm 程度であるのに対して有機質堆積物 (6~8 cm) では 4469 ppm と高く、また、P₂O₅ についても上下の堆積物は 0.1 wt% 以下であるのに対してこの層は 0.12 wt% と高い。また、Fe₂O₃ もこの層で

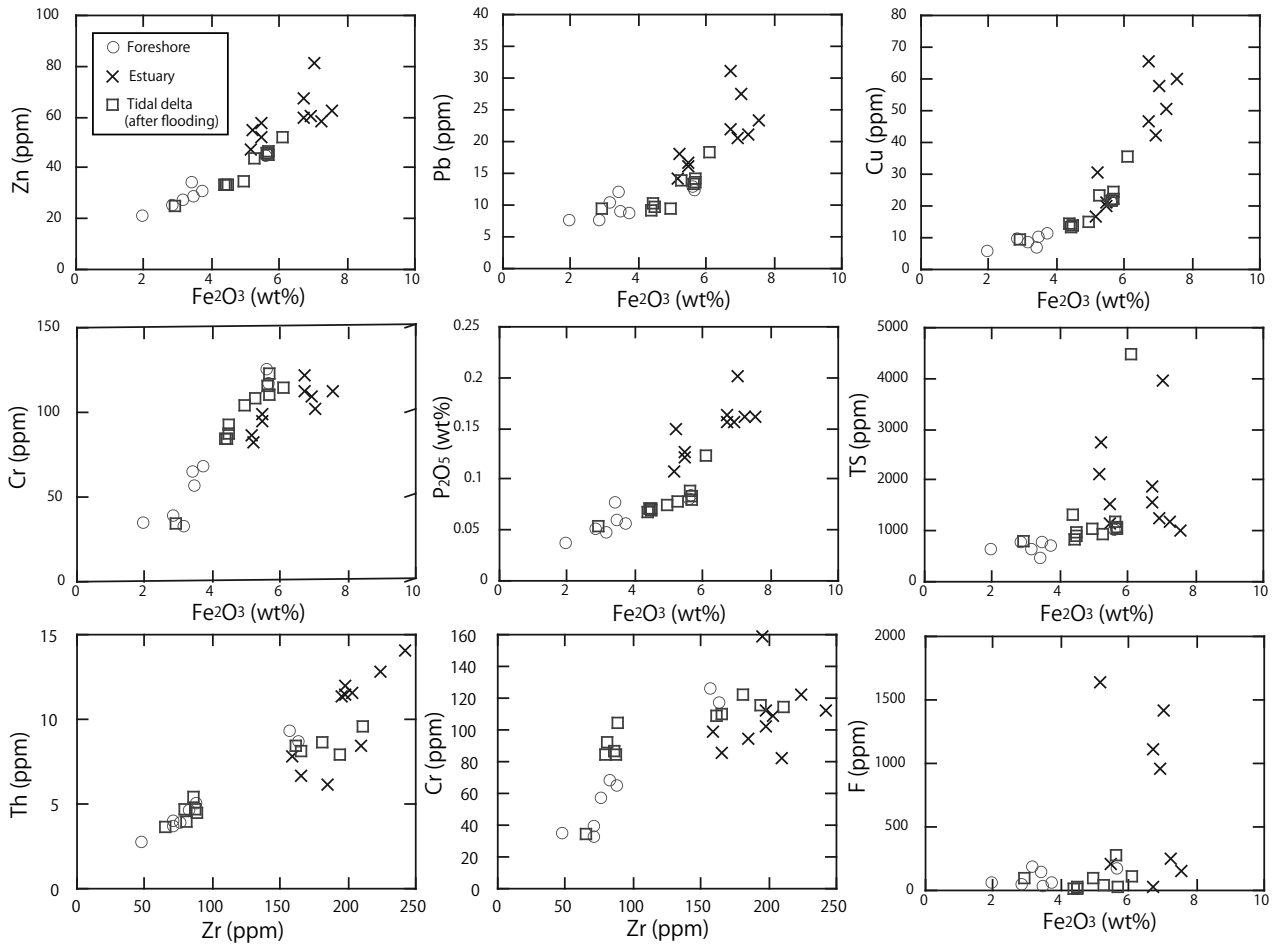
6.09 wt% と高くなり、硫化鉄が形成されていると予想される。このような洪水による泥質堆積物の形成は同じ伊勢湾の北西の松阪地域の櫛田川河口の松名瀬干潟で詳しい報告がある (山下ほか, 2011)。松名瀬干潟での泥質堆積物は洪水起源の密度の高い fluid mud が干潟の地形的なくぼみに堆積し、その後埋没することにより形成されたとしている。また、松名瀬干潟の広い範囲での検討では過去の洪水に伴うレンズ状の泥質堆積物が確認されている (山下ほか, 2011)。波浪の影響の強い伊勢湾西部での泥質堆積物の埋没により干潟堆積物中に部分的に還元層を形成している可能性がある。大湊海岸の北西部における洪水後の砂礁は波浪の影響を受けて変形して、移動した砂質堆積物が有機質泥質堆積物を短時間で埋積すると考えられる。

洪水による干潟への影響として河川水の流入があげられる。大湊海岸は平穏時でも宮川の河川水の影響を受けており、塩分濃度は 20~25 psu (4月, 7月, 8月) であるが、今回検討した大湊海岸の 10月2日の塩分濃度は 3.5~6.9 psu (11:20~14:08) であり極めて低くなっている。SS について Cl は 4月, 7月, 8月の試料は 6~8 wt% であるのに対して、10月の試料は 0.3~0.16 wt% (1試料は 1 wt%) と低くなっている (第1表)。SS の分析値についてより詳しくみると、Zn-Fe₂O₃ 図 (第7図) では 10月の試料は Fe₂O₃ が高くその他の試料とは異なる範囲にプロットされる。この 10月の試料とはほぼ同じ範囲にあるのが 4月の 10:00 の試料である (SS=36.0 mg/L)。Cr-Fe₂O₃ 図において両者の相関は高い。そのためクロム鉄鉱のような鉱物に Cr が含まれている可能性がある。宮川の中流~下流域は三波川帯にあたり苦鉄質岩が分布する。そのため、地球化学図では宮川流域の堆積物では Cr が高くなることが報告されている (Ohta et al., 2007)。洪水時の河川の堆積物や懸濁物がこのような苦鉄質岩石の影響を受けていると言える。TS-Fe₂O₃ 図では 10月の試料がその他の試料とは異なる領域にプロットされ、TS は低い。イオウと鉄の相関は硫化鉄の存在が示唆されるが、これよりイオウが低く河川水が卓越していることを示す。また、P₂O₅-Fe₂O₃ 図でも 10月の試料はその他の試料とは異なる範囲にプロットされる。P₂O₅ はプランクトンへの濃縮率が高く、このプロットでは 4月と 10月では 7月と 8月に比較してプランクトンの寄与が少ないと言える。

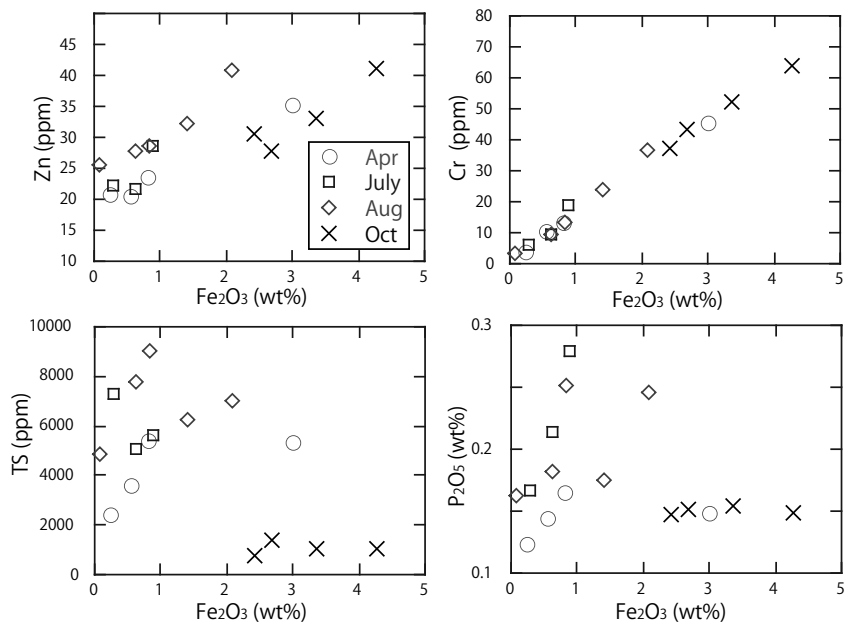
10月2日の SS についての変化は、台風 17 号の通過 (9月30日) の 2日目の測定であるため河川水による影響を受けていることを示す。また、大湊海岸南東部ではコアマモ (*Zostera japonica*) が生息している。大湊海岸東部は五十鈴川の河口にあたり河川水が流入するが、宇治山田港の河口処理施設として沖合に向けて 1 km の突堤が設置されている。そのため大湊海岸南東部の干潟は宮川からの影響の方が大きいと考えられる。今後も洪水による淡水の流入と干潟環境の変化は継続して調査していく必要が有る。

元素組成からみた堆積物の変化

6月の台風 4 号の通過にともなう出水により宮川河口では規模の大きな洪水が発生した。この洪水により大湊海岸の干潟が泥質干潟に変化するとともに、粗粒堆積物により砂礁が



第6図 三重県伊勢市大湊における前浜、河口、潮汐デルタ堆積物を区分した元素組成のプロット図。



第7図 三重県伊勢市大湊における海水のSSの元素組成のプロット図。

に多く含まれる。そのため Zr との挙動が類似する。Zr-Cr 図では大きく 2 グループに分れ、河口堆積物はすべて高い Zr 値をもつ (158~242 ppm)。TS-Fe₂O₃ 図では河口堆積物で TS が高くなる傾向を持つ。河口堆積物と洪水後の堆積物の一部が両元素の高い含有量を示す同じ範囲にプロットされる。F については河口堆積物で 1000 ppm を越えるものがあり、停滞した環境での堆積物の間隙水中に F が存在するものと思われる。

洪水による堆積物は Zn, Cu や Pb および P などのやや低い含有量となる特徴が有るが、堆積物と同時に運搬される泥質堆積物や木片や木質チップは還元的な堆積環境を生み出す。柱状試料の 6-8 cm は有機物の含有量が高く、0.4 wt% 以上の TS の含有量を持つ。このことは有機物の分解に伴い還元になりやすいことを反映していると言える。干潟堆積物の中に埋没した泥質堆積物に含まれる有機物が分解し、広く還元的な環境が形成される可能性がある。干潟にとってこのような還元層の形成は負の影響を生態系に与えることとなる。しかし、具体的な環境影響の評価は長期にわたる調査が必要である。また、河川の環境変化のための取組として全国のダムのフラッシュ放流が行われている (河川環境総合研究所, 2005; 大野ほか, 2004 など)。伊勢、松阪地域では櫛田川^{はちす}の運ダムで行われている (300~1000 m³/回)。ダム放流による河床低下および河床堆積物の変化を目的とするものであるが、その影響については継続したモニタリングが必要である。宮川のような規模の大きい流域を持ち、しかも毎年台風が通過する可能性の高い地域では運搬された洪水堆積物が河川環境や河口域さらに沿岸域に大きな影響を与えてきたと言える。河口に到達した洪水堆積物は潮位変化と潮流の様々な要素が関連して干潟堆積物を形成する。その環境変化や影響については引き続き調査研究を行う必要がある。

ま と め

三重県伊勢市宮川の河口域には広大な干潟が発達する。2012 年 6 月 19 日に台風 4 号が伊勢地域を通過して、宮川は出水した。そのため河口域には洪水堆積物が流入した。特に、流木、木材、木質チップと泥質堆積物が干潟や沿岸域に流入し、海浜や干潟の環境を変化させた。このような木質チップと泥質堆積物は混合して砂質干潟を被覆した。その後、砂質堆積物により急速に埋没して有機質で TS の高い還元層へと変化したことがコア試料から明らかとなった。また、洪水堆積物の粗粒な堆積物は砂質潮汐低地の砂州の上に堆積してマウンド状の砂礁を形成した。伊勢地域は波浪の影響が強く、砂礁は 8 月には変形して潮汐デルタと変化している。

このような洪水による水質の変化や堆積物の変化を評価するには SS や堆積物の元素組成分析が有効である。洪水に関連する SS や堆積物の元素組成については、洪水前に比較して Zn, Cu や Pb および P などの含有量がやや低下する特徴が有る。

伊勢地域は毎年大型の台風が通過する可能性が高く、河川の出水による洪水堆積物が運搬する有機質堆積物と泥質堆積物の干潟環境への影響は大きいと考えられる。また、河川水

による干潟や沿岸の塩分濃度の低下も顕著である。これらの環境変化について継続して調査研究を行う必要がある。

文 献

- 阿部真比古・橋本奈央子・倉島 彰・前川行幸, 2004, 三重県松名瀬沿岸におけるアマモ群衆の構造と季節変化. 日本水産学会誌, **70**, 523-529.
- 林 拙郎・土屋 智・近藤観慈・芝野博文・沼本晋也・小杉賢一朗・山越隆雄・池田暁彦, 2004, 2004 年 9 月 29 日, 台風 21 号に伴って発生した三重県宮川村の土砂災害 (速報) 砂防学会誌, **57**, 48-55.
- 石賀裕明・塩原秀治・佐野絵里香, 2010, 岡山県笠岡湾およびその周辺の干潟堆積物の元素組成. 島根大地球資源環境学研究报告, **29**, 33-39.
- 河川環境総合研究所, 2005, 流量変動と流総土砂量の変化が沖積河川生態系に及ぼす影響とその緩和技術. 河川環境総合研究所資料, **16**, 182pp. 編集・発行財団法人河川環境管理財団.
- 柏木健司, 2006a, 三重県宮川村の春日谷における 2004 年台風 21 号時に発生した斜面崩壊の被災状況 (その 1) - 地すべりダムの下流. 地質ニュース, **624**, 30-35.
- 柏木健司, 2006b, 三重県宮川村の春日谷における 2004 年台風 21 号時に発生した斜面崩壊の被災状況 (その 2) - 地すべりダムの上流. 地質ニュース, **625**, 49-56.
- 国分秀樹, 2009, 英虞湾干潟域の生物生息機能・物質循環機能の定量的評価と生態系再生手法に関する研究. 三重水研報, **18**, 1-93.
- 国分秀樹・奥村宏征・高山百合子・湯浅城之, 2007, 英虞湾の浸漬ヘドロを用いた人工干潟とアマモ場における底質と底性生物の変遷. 海洋工学論文集, **54**, 1251-1255.
- 小松輝久・佐川龍之・三上温子, 2006, 干潟生態系における藻場の分布とその役割. 地球環境, **11**, 207-213 (2006)
- 松阪建設事務所災害復旧室, 2004, 平成 16 年台風 21 号による三重県大台町 (旧宮川) における土砂災害と天ヶ瀬地区地すべり対策について. 29-32. <http://www.pref.mie.lg.jp/MKENSET/HP/>
- McLennan, S., Hemming, S., MacDaniel, D. K. and Hanson, G. N., 1993, Geochemical approach to sedimentation, provenance and tectonics *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* **284**, 21-40.
- 三重県, 1970, 三重県地質図, 第 2 版. 地質調査所監修.
- 内閣府, 2012, 平成 24 年台風第 4 号による被害状況等について (第 2 報), 1-13. 内閣府.
- 大野博之・斎藤大・伊藤尚敬・後藤恵之輔, 2004, ダム放流効果の検討のための超低空リモートセンシングによる付着藻類調査. 土木学会論文集, No. 769/VII-32, 65-74.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K., Okai, T., Ujii-Mikoshiba, M., Kubota, R., 2007, Elemental distribution of coastal sea and stream sediments in the island-arc region of Japan and mass transfer processes from terrestrial to marine environments *Applied Geoch.*, **22**, 2872-2891.
- Roser, B. P., 2000, Whole-rock geochemical studies of clastic sedimentary suites. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, **57**, 73-90.
- シームレス地質図データベース Web GIS 版, 2012, 産業総合研究所地質調査総合センター (2012 年 10 月 19 日更新). <http://www.gsj.jp/HomePageJP.html>
- 津地方気象台, 2012, 平成 24 年 台風第 17 号に関する三重県気象速報. 1-19p. 津地方気象台.
- 山下翔大・中条武司・西田尚央・成瀬元, 2011, 河口沿岸域における洪水起源堆積物の特徴と堆積様式—2009 年 10 月伊勢湾櫛田川河口干潟の例—. 堆積学研究, **70**, 81-92.

(受付: 2012 年 10 月 19 日, 受理: 2012 年 11 月 30 日)