

論文

潮汐変動と浮遊物質量の関係およびアマモの地球化学的検討からみた
瀬戸内海笠岡湾干潟の環境評価

石賀 裕明*・佐野絵里香**

Examination of tidal flat environment from geochemical analysis of suspended solid
in relation to tidal change and of *Zostera marina* in Kasaoka Bay, Seto Inland Sea,
Southwest Japan

Hiroaki Ishiga*・Erika Sano**

Abstract

Examination of tidal flat environment of the Kasaoka Bay in Seto Inland Sea was carried out from geochemical analysis of suspended solid (SS) in relation to tidal variation. Geochemical compositions of *Zostera marina* (submerged plan) was also examined for evaluation of water environment. Material filtered on quartz filter was observed using SEM and further analyzed by XRF to evaluated geochemical compositions. This method is a new examination for the SS in view point of both constituent observation and geochemical compositions. SS value varies with tidal change, namely, it increases toward the ebb tide. This is suggestive of increasing of detritus of tidal flat environment. SEM observation demonstrates that the material of the spring tide was composed of diatom mainly of *Skeletonema* sp. and some *Chaetoceros* sp. and *Asterionella* sp. were observed. The SS of ebb tide was fine grained detritus including fragment of biogenic material. Geochemical compositions of the SS of spring is characterized by higher contents of P_2O_5 , while that of ebb tide is enriched in heavy metals such as Zn, Cu, Cr, Fe and Mn. Although Br, F and Cl were measured for SS, iodine was not detected for all SS samples. This is suggestive of lacking of intake of iodine for diatom of these samples. Geochemical composition of *Z. marina* showed higher concentration of Zn, Cu, TS (total sulfur), iodine, MnO and P_2O_5 . Comparative examination of *Z. marina* from other localities of Seto Inland Sea shows that the Kasaoka Bay samples show higher values in Zn, Cr, MnO and P_2O_5 , suggesting enriched water environment of anthropogenic inputs. The Kasaoka Bay samples, however, show similar values to those of the Ise-Matsusaka area of Pacific Sea, excluding Zn concentration. I- P_2O_5 diagram is useful for evaluation of nutrient competition between *Z. marina* and marine plankton and eutrophication of marine condition.

Key words: tidal flat, sediments, multi-element geochemistry, suspended solid, *Zostera marina*, Kasaoka Bay, Seto Inland Sea

はじめに

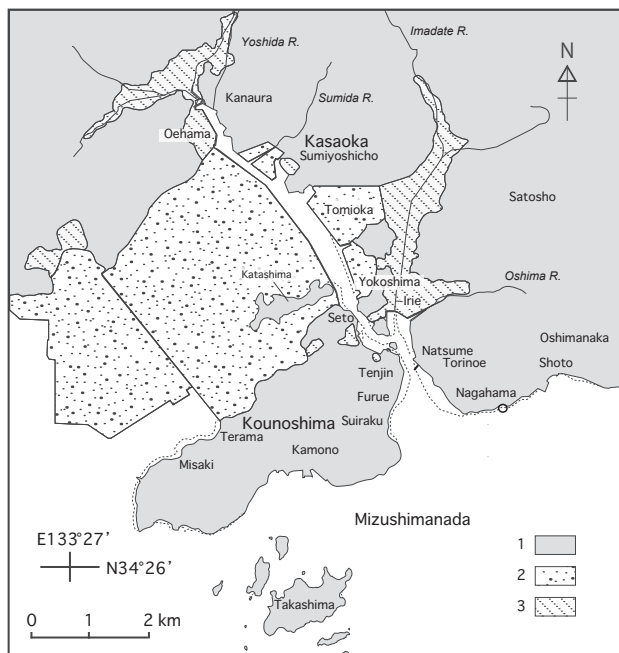
干潟堆積物は河川が運搬する砕屑粒子と人間活動による負荷物質および海洋での生物生産による有機物が混合して形成されるものである。したがって、干潟堆積物の重金属濃度、とりわけ Zn および Pb と Fe の相関からその環境の状況を評価できる (石賀ほか, 2003)。筆者らは岡山県笠岡湾の干潟堆積物の地球化学的検討結果を報告した (石賀ほか, 2010)。この検討では笠岡湾の干潟堆積物はその多くが都市型の組成線上にあり、瀬戸内海の山陽側の干潟堆積物のこれまで多くの調査分析結果と比較しても、Zn-Fe の判別図ではほぼ均一な組成を持つことが明らかにされた (Rahman and Ishiga, 2012a, b)。瀬戸内海山陽側の干潟堆積物の組成についてはデータが蓄積

されてきたといえるが、堆積物のもととなる懸濁物についての研究は少ない。また、懸濁物 (浮遊物質) の構成物や元素組成を検討した例は少ない。今回フィールドとしている笠岡湾においては、神島 (こうのしま) の西部の湾内にて (第 1 図)、アマモ場の再生によりアマモの群生が確認されている (神島寺間・見崎里浜づくり, 2014)。そのため水環境は改善されてきたとされている。そこで、今回は泥質堆積物の起源となる浮遊物質 (SS) についての地球化学的検討を行うとともに、アマモに濃縮する元素の特徴についても検討した。それらの結果を踏まえ栄養塩の海生生物への分配や富栄養化の評価を行いたいと考える。

調査地域

笠岡湾は瀬戸内海の山陽側の備後瀬戸と呼ばれる海域にある。昭和 41 年からの干拓事業により広大な地域が干拓され、神島の北部の一部と笠岡湾の出口の水路に干潟が存在する (第 1 図)。これらの地域においては、潮の干満により干潮時

* 690-8504 島根大学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
** ジオテクノス株式会社 131-0045 東京都墨田区押上一丁目 1 番 2 号
東京スカイツリータワー14 階 Geotechnos Co. Ltd., TOKYO SKYTREE
EAST TOWER 14F, 1-1-2 Oshiage, Sumida-ku, Tokyo, 131-0045, Japan



第1図 瀬戸内海笠岡湾の位置図および採水位置、アマモ生息位置を示す図。石賀ほか(2010)から再録。夏目の干潟調査位置(第1図, 第3図写真a, b, c)を実線で示す。長浜のアマモ写真位置(第1図, 第3図写真d)を○で示す。1. 陸地, 2. 干拓地, 3. 昭和40年代以前の干拓地。

に海面上に干潟が現れる。干潮時には河川からの堆積物の供給と懸濁物の海域への移動により、泥干潟の発達が進められている。一方、満潮時は海域からの海水の侵入により、濁度は著しく減少する。現在でも天神の北東周辺海域はカブトガニ繁殖地として知られている(第1図)。水島灘に出る長浜では密集したアマモの繁茂が認められ(第1図, ○印周辺)、湾東部の夏目の海岸においてもアマモが泥質干潟に散在する。2011年6月17日の調査ではこの海岸において干潮時にホトトギス貝の密集によるマウンドが認められた(第2図, 第3図写真b)。また、アサリ、マテガイ、ツメガイ(および卵囊)、多毛類、マメコブシガニ、オサガニ、ケフサイソガニ、マヒトデなど多数の生物が確認された。

調査方法と結果

調査は2011年6月17日に行った。この日は大潮(月齢15齢)で、満潮時は11時43分で326cm、干潮時は18時20分で13cmであった(気象庁データ)。13時25分から21時50分まで約1時間間隔で水温(WT)、水質(pH、電気伝導度EC、溶存酸素DO)、浮遊物質量SS(mg/L)を測定した(第1表)。海水試料は2Lを採取し10分程度静止して、粗粒粒子の沈殿を待ち、ポリビンに捕集し冷蔵にて持ち帰った。アマモは現地採取後、冷凍保存して持ち帰った。

干潟の地形

夏目の干潟は海岸にそって延長2km以上に発達する。北側

第1表 瀬戸内海笠岡湾の干潟、夏目における潮位変化とpH、EC、DO、WT、SSの変化の測定値。2011年6月17日に測定。18:20が最干時にあたる。

採水時間	潮位	pH	EC	DO	WT	SS
	cm		mS/cm	mg/L	°C	mg/L
13:25	270	7.7	39.5	5.7	23.6	28.2
14:20	205	7.8	40.2	5.6	22.4	40.9
15:20	135	7.8	40.2	5.1	23.4	103.0
16:15	70	7.7	41.0	4.5	24.2	127.3
17:20	40	7.7	40.6	5.0	22.8	253.1
18:20	13	7.7	39.9	5.4	21.3	263.1
19:20	56	7.6	39.9	5.1	20.8	203.1
20:20	125	7.6	39.5	4.4	20.1	87.7
21:20	220	7.8	41.1	4.6	20.3	31.1
21:50	262	7.8	42.5	4.9	19.8	28.1

の湾奥の入江(第1図)に向けてより泥質な干潟が発達する。水質測定を行った夏目の側線では、10°前後の傾斜を持つ砂質な前浜干潟と3.5°から傾斜が1°前後まで緩やかとなる泥質干潟からなる(第2図)。6月17日潮位の測定を行ったところ、満潮から約3時間40分(15:20)で10°前後の傾斜の急な前浜から3.5°の緩やかな泥質干潟へ潮位が低下した。この緩傾斜の干潟部分に長さ20~30m程度のホトトギス貝の作る幅3m以上のマウンドがみられた(第3図, 写真b)。これよりさらに海側で水平に近い泥質干潟となり、水平距離が40m周辺(第2図)にアマモ(長さ30cm~80cm)が分布する。

長浜では水島灘に面する浜の長さ2km以上にわたり干潟が発達する。前浜は10°以上の傾斜を持ち、中粒~粗粒砂からなる。水平距離では護岸からは15~20mの砂質干潟が発達する。これより沖側はこぶし大から人頭大のレキが分布する平坦な干潟となる(幅20m以上)。このさらに外浜方向にアマモの密集する部分がある(第3図, 写真d)。

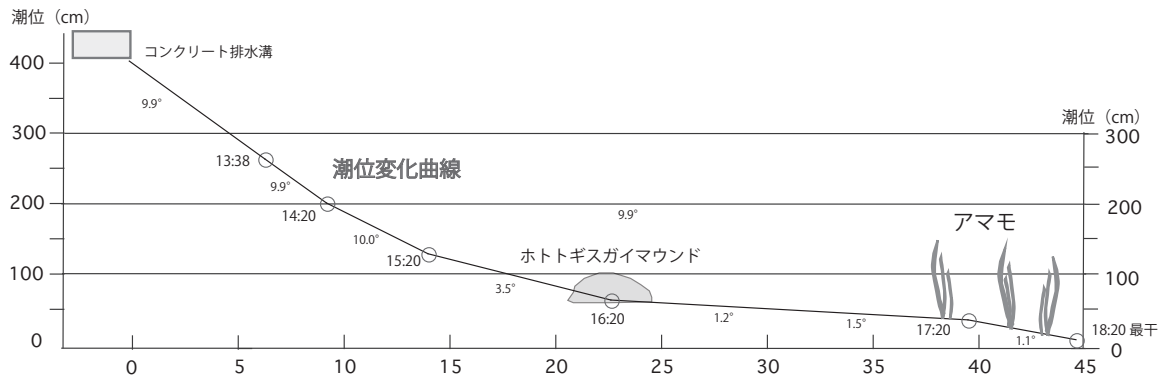
長浜のアマモは長さ1m以上で、葉身も夏目の試料に比較して幅が広い。

浮遊物質量(SS)の測定と多元素組成分析

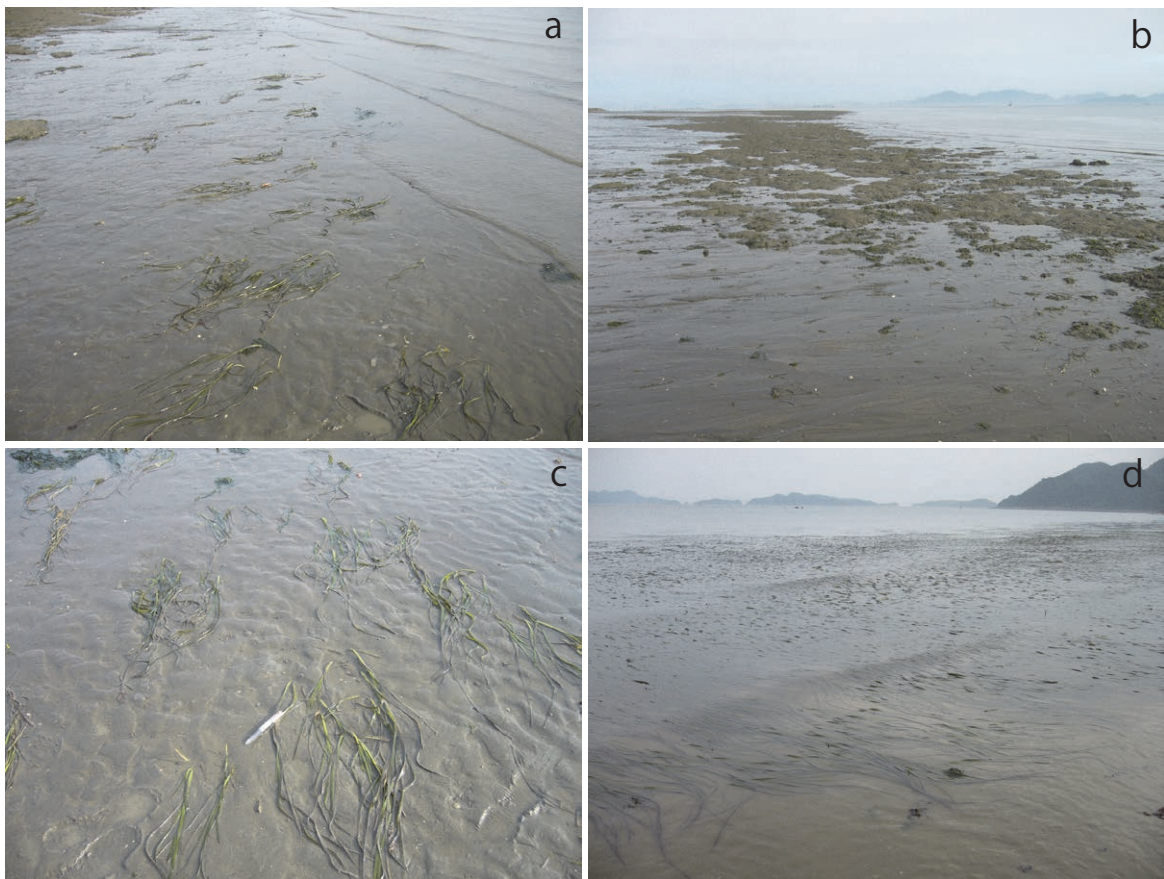
冷蔵保存した2Lの試料水を110°C、2時間乾燥させた石英フィルター(ワットマン)でろ過(減圧ろ過)した後、同様に乾燥させSSを測定した。この石英フィルターについて蛍光X線分析装置により多元素組成の分析を行った(第2表)。多元素組成分析の方法は以下に述べるアマモの場合と同じである。

アマモの多元素組成分析

アマモは20東前後を採取し、複合試料とした。試料は葉身、葉鞘、地下茎(根茎)の区分を行わず生体全体を用いた。採取したアマモ生体の葉上には多様な付着生物(端脚目のワレカラやヨコエビ、小型甲殻類、貝形虫、付着藻類、コケムシ、魚介類の卵)がみられ、これらをすべて除去することは難しい。長浜のアマモ試料は解凍後付着生物を検討したが、ワレカラがアマモ1束に90個体付着していた。したがって、ここではアマモ試料はこれらの付着生物を含むバイオマスとして取り扱う。アマモ試料は適切なサイズに切断して、アルミ



第2図 2011年6月17日の潮位変化を示す図。潮位変化と前浜干潟の傾斜は実測値から図示した。ホトトギスの作るマウンドとアマモの生息深度を示す。



第3図 瀬戸内海笠岡湾の干潟のアマモの生息状況とホトトギス貝のマウンドを示す写真(2011年6月17日撮影)。
 a: 夏目(第1図)における干潮時の干潟とアマモの生息状況を示す。b: 同じ干潟でのホトトギス貝の作るマウンドの状況(第2図の断面参照)。c: 夏目におけるアマモの産状。単体のアマモが分散してみられる。d: 長浜(第1図)におけるアマモの群生の様子を示す。長さ数10cmから1mのアマモが密集して生息する。干潮時で海水の濁度は高い。

ニューム製のバットに広げ、110℃、48時間乾燥の後、160℃、24時間乾燥させた。160℃乾燥により生体に含まれる揮発性物質を除去した。乾燥試料は自動メノウ乳鉢を用いて粉碎し粉体とした。粉末試料は塩ピリング(内径30φ)の内部に装填し、加圧器にてプレス成型(200kN, 1分間)を行った。分

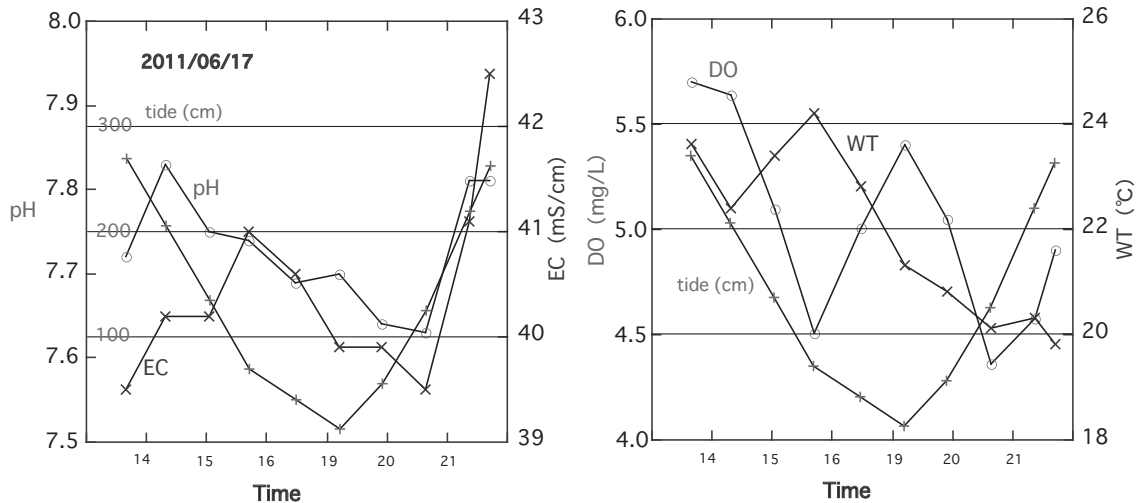
析用プレスディスクは蛍光X線分析装置(リガク RIX 2000)を用いて、粉末プレス法により微量元素組成(As, Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, V, Sr, Y, Zr, Nb, Th, Sc, TS, Br, I, Cl [ppm])および主元素組成(TiO₂, Fe₂O₃^{*}, MnO, CaO, P₂O₅ [wt%])を求めた(第3表)。TSは全イオウをFe₂O₃^{*}は全鉄を示す。

第2表 瀬戸内海笠岡湾の干潟, 夏目における海水のSSの蛍光X線分析による多元素組成分析結果. SSは2011年6月17日に採取した海水で測定. 18:20が最干時にあたる. 空欄は検出限界以下.

SS time	微量元素 (ppm)																主元素 (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
13:25	2	11	37	16	29	9	4	2		14		1	5553		19			66964	0.07	0.23	0.06	1.09	0.27
14:20	2	13	53	20	23	15	7	4	2	16		6	6539	187	24			68845	0.22	0.97	0.11	1.33	0.25
15:20	3	14	66	22	27	27	33	4	3	17	1	10	5177	220	23			63153	0.37	2.01	0.20	1.47	0.18
16:15	4	14	92	26	35	36	56	6	4	1	18	2	12	4077	43	24		52311	0.50	3.17	0.27	1.26	0.14
17:20	4	15	97	26	31	45	68	6	5	1	20	1	13	2908		18		24924	0.57	3.88	0.30	1.32	0.15
18:20	4	15	102	29	32	45	71	8	5	1	18	2	14	3920	183	26		49247	0.56	4.07	0.30	1.35	0.15
19:20	3	13	84	31	33	38	59	4	4	1	16	2	12	3461	16			35394	0.52	3.27		1.37	0.16
20:20	3	14	60	24	28	25	30	3	3	1	17	1	9	5727	4	27		83328	0.37	1.89	0.19	1.24	0.13
21:20	1	11	39	21	27	13				2	11	1	1	5094	104	14		64417	0.17	0.62	0.10	1.08	0.19
21:50	1	10	27	23	27	12				2				5061	180	12		62651	0.09	0.30	0.07	1.00	0.20

第3表 瀬戸内海笠岡湾の干潟, 夏目や長浜におけるアマモ試料の蛍光X線分析による多元素組成分析結果. アマモ試料は2011年6月17日に採取した. 生体濃縮する元素の比較のために笠岡湾干潟堆積物分析値(石賀ほか, 2010)の平均値を示した. また, アマモの生体への元素濃縮を評価するため, Ex Zm/sed (Zm: アマモ試料の元素組成の平均値, sed: 堆積物の元素組成の平均値)を示した.

sample	微量元素 (ppm)																主元素 (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
夏目																							
2011.5.3	7	17	104	22	12	21	27	236	15	4	103	2	8	12734	160	224	31	87811	0.25	2.69	0.16	3.54	1.03
2011.6.17	7	17	131	23	18	21	21	209	11	2	72	2	3	9881	77	213	46	71179	0.15	2.10	0.23	2.64	0.87
2011.7.15	6	16	97	15	15	16		172	9	1	64			12117	71	422	50	83402	0.07	1.24	0.29	2.63	0.85
長浜																							
2011.6.17	7	22	130	25	20	21	17	236	12	2	69	4	5	9983	156	247	64	72675	0.17	2.30	0.28	2.98	0.88
平均値	6.7	18.1	115.3	21.2	16.2	19.8	16.3	213.1	11.6	2.3	76.9	2.0	3.9	11179	116	277	47.8	78767	0.160	2.083	0.243	2.948	0.909
Ex Zm/sed	0.95	0.76	1.53	1.51	1.19	0.52	0.48	1.39	0.50	0.44	0.67	0.36	0.45	8.48	1.34	17.80	2.09	21.46	0.49	0.64	2.12	1.12	10.41
堆積物 n=32	7.1	23.6	75.5	14.0	13.5	37.9	34.3	152.9	23.1	5.3	114.9	5.5	8.6	1319	86.4	15.5	22.8	3670	0.324	3.247	0.115	2.620	0.087



第4図 瀬戸内海笠岡湾の干潟, 夏目における潮位変化(気象庁潮位表基準面上の値による)とpH, EC, DO, WTの変化を示したグラフ(2011年6月17日に測定).

結 果

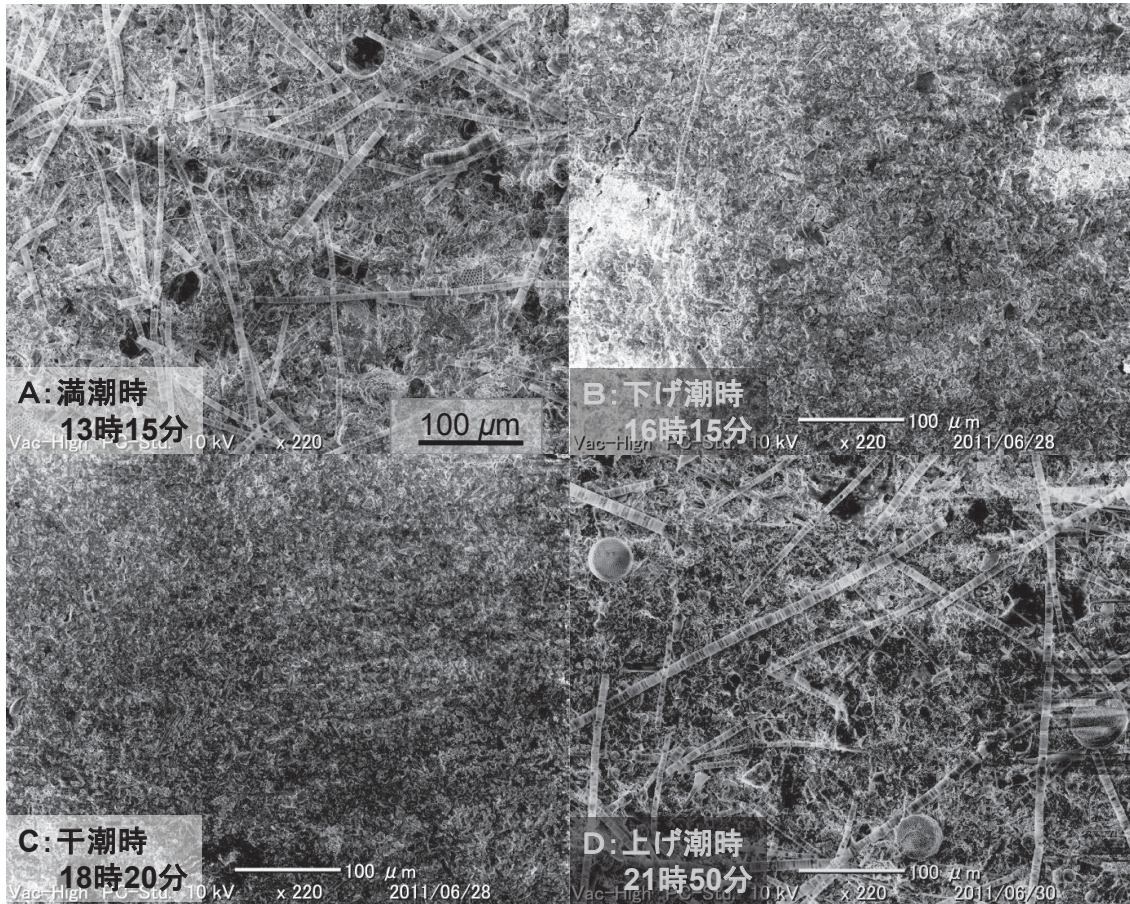
潮位変化と水質の変化

潮位変化と水質の変化を第1表および第4図に示す. pHと潮位変化は相関があり, 潮位の高い時にはpHは7.8以上あるが, 干潮時を過ぎた19:20には7.6まで低下する. その後, 潮位の上昇とともに7.8まで増加する. ECは不規則に変化するが, 16:15から減少して, 20:20には最も低下する. ECの減少から判断して, 河川水の影響が現れるのに, 干潮時か

らほぼ2時間経過していることを示す. DOは5.7 mg/Lから4.4 mg/Lの間で上下の変動がある.

SSの電子顕微鏡観察

SSの電子顕微鏡観察(JEOL Neo Scope JCM-5000; 撮影条件10 kV)では, 満潮時と干潮時で構成物が大きく異なる. 第5図には満潮時(13:15)から干潮時(18:20), そして上げ潮時(21:50)の写真を示した. 満潮時(A)にはフィルター表面に多数の細長く連なる珪藻(*Skeletonema* sp.)がみられる. また, *Chaetoceros*



第5図 瀬戸内海笠岡湾の干潟、夏目において採水した海水の、石英フィルターにより捕集されたSSのSEM写真。A：満潮時における細長く連なる珪藻 *Skeletonema* sp. が多数みられる。B：下げ潮時で珪藻は少なく、細粒の碎屑粒子からなる。C：干潮時の写真。Bと同じく細粒の碎屑粒子からなる。D：上げ潮時の写真で、Aと同じく細長く連なる珪藻 *Skeletonema* sp. が多数みられる。

sp. や *Asterionella* sp. など含まれる。これに対して下げ潮時 (B; 16:15) や干潮時 (C) では珪藻はほとんど認められず、微細な不定形粒子がみられる。そして上げ潮時 (D) には満潮時と同様に珪藻が多数含まれる。倍率を上げて同じフィルター上の物質を観察すると、このような構成物がより詳しく観察される。第6図には第5図と同じ試料を示した。満潮時 (A) には *Skeletonema* sp. の周囲により細かな (5~10 μm) 碎屑粒子や生物片がみられる。下げ潮時 (B) や干潮時 (C) では粒子の角がやや丸みを持つことがわかる。また、細粒な生物片が含まれることがわかる。上げ潮時 (D) ではAと同様に *Skeletonema* sp. がみられるが、その周辺には5 μm以下のより細粒な粒子がみられる。

SSの多元素組成

SSの多元素組成を第2表に示す。また、いくつかの元素と潮位変化の関係を第7図にグラフで示した。SSは28.2 mg/Lから263.1 mg/Lと変化し、潮位変化と負の相関を持つ (第1表)。そのためZn, Cu, Ni, Cr, TiO₂, Fe₂O₃等とSSは正の良好な相関を持つ (第7図)。P₂O₅は0.13 wt%から0.27 wt%で変化し、SSとは負の相関を持つ。また、TS (全イオウ) もP₂O₅とほぼ同様の時間変化を示す (第2表)。

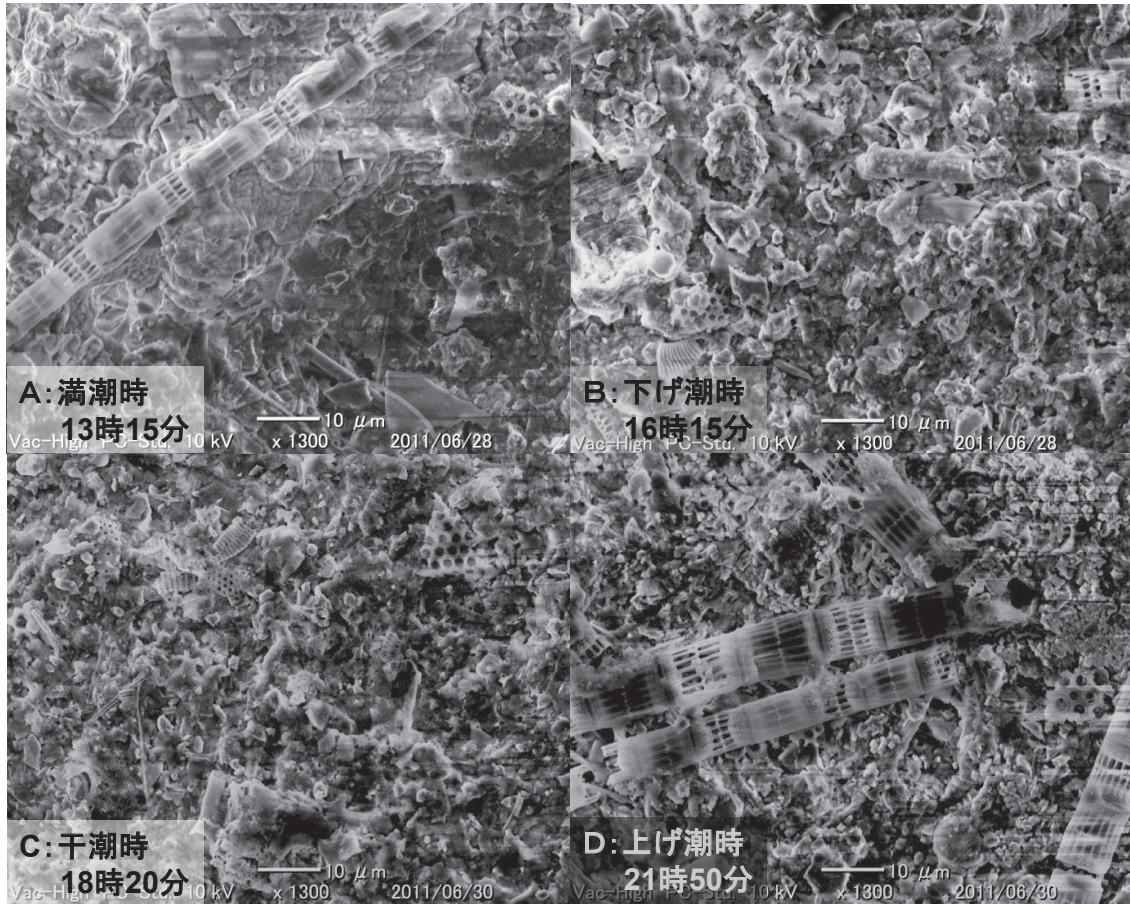
アマモの多元素組成

アマモ試料の分析値 (第3表) について微量元素で存在量が多いのは、Znであり97~131 ppm含有される。また、Cu, Cr, VおよびPbも20 ppm前後含まれる。TSは1 wt%近く含まれ、F (71~160 ppm), Br (200 ppm以上), I (31~64 ppm), Cl (0.7 wt%以上) など高い含有量をもつ。また、主元素についてもFe₂O₃ (1.24~2.69 wt%), MnO (0.16~0.29 wt%), CaO (2.63~3.54 wt%), P₂O₅ (0.85~1.03 wt%) などの値を示す。

考 察

潮位変化とSS構成物の変化

SSのSEM観察から明瞭のように、満潮時では珪藻が多数含まれ、元素組成からも干潮時に比較してP₂O₅が高くなる。このことはプランクトンに吸収されるリン濃度の影響が満潮時に大きくなることが示唆される。逆にこの時は重金属など粘土鉱物に吸着される元素濃度が減少することに対応する。干潮時に珪藻がほとんど認められず、細かな生物片が含まれるものの、細粒の無機碎屑物が主な構成物となり、元素組成も重金属含有量とSS濃度が正の相関をもつ。干潟では干潮時



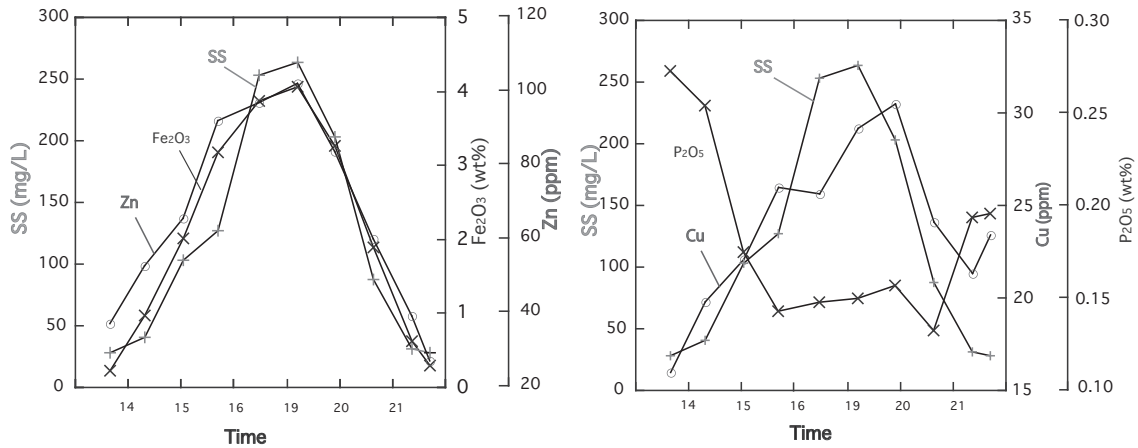
第6図 第5図のSSを拡大して示した写真。A：珪藻 *Skeletonema* sp. の周囲には細粒の碎屑物が見られる。B：不定形粒子の角が丸みを持つ細粒の碎屑物から構成される。生物片も含まれる。C：Bと同様であるが、さらに細粒（ $5 \mu\text{m}$ 以下）の粒子と生物片が含まれる。D：Aと同様に *Skeletonema* sp. が見られるが、その周囲は細粒な粒子や生物片が含まれる。

に底質の巻き上げにより粘土粒子が増加することが予想されるが、ECの変化は、干潮時の2時間後に低下することは河川水の流入による懸濁物の増加を示す。SSの元素組成の特徴として、陸源碎屑物を代表する微量元素のNb, Zr, Th, Scなどは極めて低い濃度にある。しかし、SSにはNi, Crが検出され、Niは23~35 ppmの範囲にある。満潮時（Ni=29 ppm; 13:25）および上げ潮時（27 ppm; 21:50）であるので、プランクトンにNiが吸収されていることが推定される。また、海水中に含まれるハロゲン元素（F, Br, Cl）は検出されているが、IについてはすべてのSSで検出限界以下である。海水中のIの存在量は低い、 I^- や IO_3^- として存在することが示されている（Muramatsu *et al.*, 2004）。海生生物には一般にIは含まれるとされている。しかし、今回の結果ではプランクトンにはIは吸収されていないことを示す。

アマモの元素組成からみた干潟環境の評価

アマモの多元素組成からは多くの元素が定量され、4試料間での変異は小さい元素が多い。存在量（平均値）では重金属のうちZn（115.3 ppm）、Cu（21.2 ppm）、Ni（16.2 ppm）、Cr（19.8 ppm）、 Fe_2O_3 （2.083 wt%）、MnO（0.243 wt%）などが高い

値をもつ。また P_2O_5 （0.909 wt%）は有意に高い値を示す。SS（第2表）とこれらの元素の含有量とを比較すると、Znは干潮時のSS（102 ppm）とほぼ同じ含有量であり、Cu（29 ppm）の値よりもやや低い。CrについてはSS（45 ppm）よりも有意に低く、堆積物（37.9 ppm）に比較しても低い値をもつ。Niは満潮時のSSの含有量（29 ppm; 13:25）と比較するとアマモ試料の含有量（16.2 ppm）は低い。このことはプランクトンへのNiの選択的な吸収を示唆する。アマモの元素組成と堆積物の組成を比較して、生体への元素濃縮（Ex Zm/sed）を求めた。ここで、Zmはアマモ試料の平均値であり、sedは笠岡湾堆積物の平均値である。Ex Zm/sedが1以上の値をもつのは、Zn, Cu, Ni, Sr, TS、およびハロゲン元素、MnO, CaO, P_2O_5 である（第3表）。特に P_2O_5 は10倍以上の濃縮率をもち、アマモには高濃度でリンが吸収されることがわかる。満潮時のSSの P_2O_5 （0.27 wt%; 13:25）と比較するとアマモは3.4倍の濃縮率を持つ。アマモとプランクトンの栄養塩の吸収については議論が多く、藻場再生によるプランクトンの大量発生を抑止がこのようなリンの循環に関連する（吉田ほか, 2011）。そこで、これまで瀬戸内海や太平洋側の伊勢-松阪で検討したアマモの元素組成と比較して、笠岡湾の現状を評価する。



第7図 瀬戸内海笠岡湾の干潟，夏目における潮位変化とSSの元素組成の変化を示したグラフ．SSとFe₂O₃，Zn，Cuの増減は正の相関をもち変化する．しかし，P₂O₅はSSの増減とは逆の変化を示す．

第4表 瀬戸内海笠岡湾のアマモ（本論）および瀬戸内海の他地域のアマモ試料（龍岩，ハチ岩，上蒲刈島；石賀未公表，尾道；岡本ほか，2014）および松阪，伊勢地域のアマモ試料（石賀ほか，2014）の蛍光X線分析による多元素組成分析結果の平均値を比較したデータ．CI：空欄は10wt%以上．

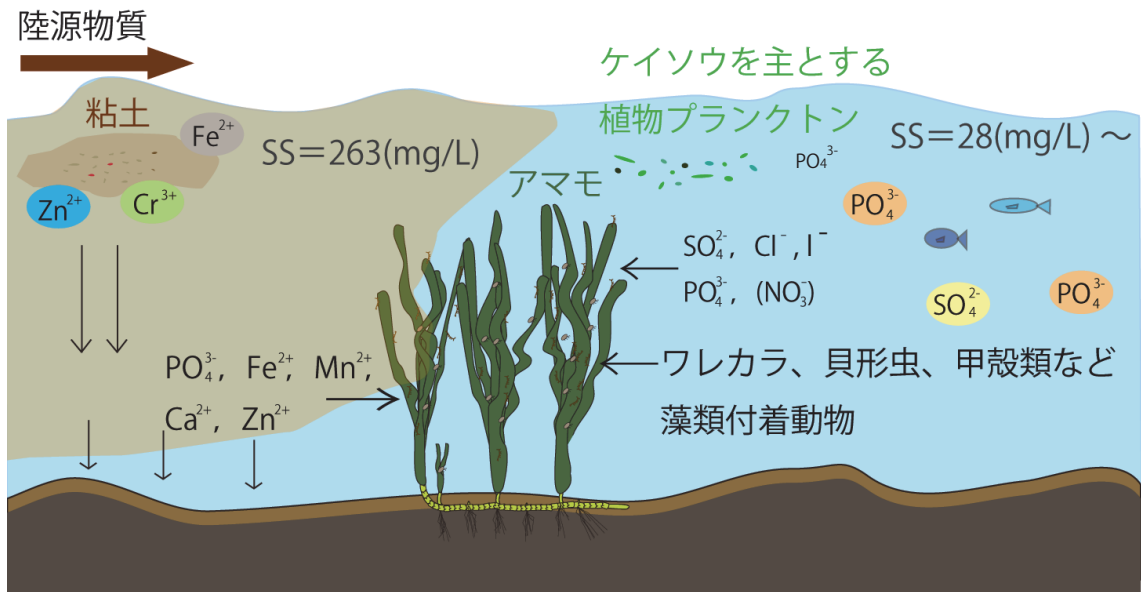
sample	微量元素 (ppm)																主元素 (wt%)						
	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	Sr	Y	Nb	Zr	Th	Sc	TS	F	Br	I	Cl	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	P ₂ O ₅
笠岡 2011 (n=4)	6.7	18.1	115.3	21.2	16.2	19.8	16.3	213.1	11.6	2.3	76.9	2.0	3.9	11178.8	116.0	276.5	47.8	78766.8	0.16	2.08	0.24	2.95	0.91
龍岩 2011, 2012 (n=3)	6.0	13.0	50.9	10.8	1.9	4.9	9.2	470.2	8.2	1.4	61.6	1.1	2.7	18150.7	90.0	310.9	29.8		0.05	0.64	0.06	5.60	0.74
尾道 2014 (n=11)	3.4	10.4	63.6	25.4	7.4	7.6	12.3	246.1	5.9	2.3	37.9	1.6	7.4	10334.8	127.3	232.0	15.6	50170.2	0.11	0.88	0.08	4.39	0.67
ハチ岩 2012 (n=3)	5.3	17.5	44.8	12.4	0.8	7.5	11.9	427.6	13.4	2.9	59.3	2.5	2.5	14011.3	93.7	244.3	30.5		0.11	1.06	0.04	4.74	0.51
上蒲刈島 2011 (n=1)	6.3	19.4	93.6	33.9	6.8	14.9	0.5	382.1	11.9	2.3	79.4	2.5	7.1	15106.0	166.6	240.1	23.5	96747.0	0.13	1.22	0.08	4.43	0.54
松阪 2012, 2013 (n=13)	5.5	9.2	82.2	16.4	7.0	9.1	21.5	329.8	7.0	2.2	48.7	1.0	8.9	10728.1	242.9	192.9	22.6	42190.1	0.10	1.30	0.24	5.35	1.09
伊勢 2013 (n=4)	5.1	8.7	71.6	17.8	13.0	9.3	9.8	271.8	5.1	1.8	34.1	0.6	7.0	9880.6	74.1	189.1	15.9	40220.8	0.03	0.63	0.23	5.22	0.73

第4表には広島県の尾道（岡本ほか，2014），竹原地域の龍岩（石賀未公表），上蒲刈島，伊勢－松阪（石賀ほか，2014）などの分析値の平均値を示した．重金属では笠岡湾のアマモのZn (115.3 ppm)，Ni (16.3 ppm)，Cr (19.8 ppm) が他の分析値よりも高い．また，I (47.8 ppm)，P₂O₅ (0.91 wt%) も高い値を示す．しかし，松阪の試料ではP₂O₅ (1.09 wt%) と類似する値を持つ．これらの特徴的な元素を除くと，アマモ試料は比較的類似する元素濃度をもち，アマモが吸収もしくは，吸着する物質は同程度の含有量をもつと推定される．そのため，プランクトン（満潮時のSSで代表）では検出されないIとプランクトンとアマモに有意に含まれるP₂O₅は富栄養化を評価する上で有意な元素と考えられる．

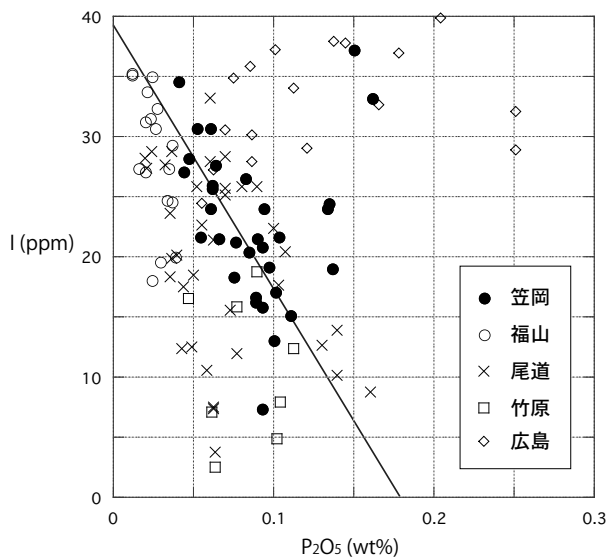
アマモ場における物質循環と環境評価

今回の検討でSSとアマモに濃縮する元素の特性が明らかとなった．SSは満潮時ではプランクトンに含まれるリン濃度が有意であり，干潮時は粘土鉱物に含まれる重金属（Zn，Cu，Ni，Cr，TiO₂，Fe₂O₃等）が高くなる．アマモではZn，Cu，Ni，MnO，Fe₂O₃，P₂O₅などが含まれる．このような物質の循環を模式的に示した（第8図）．アマモには葉上の付着生物の影響が大

きいものの重金属と栄養塩の濃縮が明らかである．アマモのヨウ素とリンの高い含有量から判断すると，海水からのこれらの元素の吸収による存在量の低減について有意な作用をもつと考えられる．プランクトンではIが含まれないことに対して，アマモでは高い含有量が認められることを考慮すると，アマモが干潟環境での物質収支に果たす役割は大きいと期待される．干潟堆積物ではI含有量が22.8 ppm含まれ（石賀ほか，2010の平均値），これらはアマモやその他の海藻に起源する有機物の寄与があると言える．そこで，I-P₂O₅グラフを作成した（第9図）．プロットに用いた試料は笠岡（石賀ほか，2010），福山・尾道（岡本ほか，2014），竹原（石賀未公表），広島（石賀ほか，2003）である．笠岡の試料はI-P₂O₅の間で負の相関があることを示す．また，このトレンド上にIがP₂O₅に対して高い福山の試料がプロットされる．尾道の試料は笠岡の試料の分布範囲と同じく広い範囲にプロットされる．これらの試料の範囲は福山の試料の範囲よりもIに対してP₂O₅の高い範囲にあるものがある．竹原の試料はIおよびP₂O₅ともにやや低い．広島の試料は両元素ともに高い範囲にあり，他の試料よりも富栄養化の影響を受けていることを示す．福山の試料は岡本ほか（2014）で内海とされている試



第8図 瀬戸内海笠岡湾の干潟、夏目や長浜におけるアマモ場における物質の循環を示した模式図。アマモおよびその葉身表面の付着生物（ワレカラ、貝形虫、甲殻類）により Zn, Fe, Ca, Mn, TS, P, I, Clなどを吸収したり、吸着する。植物プランクトンはPの吸収が明瞭である。



第9図 堆積物のI- P_2O_5 グラフ。試料は笠岡湾（石賀ほか，2010），福山・尾道（岡本ほか，2014），竹原（石賀未公表），広島（石賀ほか，2003）を用いた。I- P_2O_5 において負の正の相関があり，アマモとプランクトンでの栄養塩競合や富栄養化を評価する。

料で、尾道の試料の一部の地域と合わせて、この地域の干潟にはアマモが分布する地域が多い。この様に堆積物組成においてI- P_2O_5 は負の相関を示すことから、Iはアマモへ濃縮され、 P_2O_5 も同様にアマモへ濃縮される。 P_2O_5 はプランクトンに濃縮され、この両者の間で両元素の吸収が生じていることが予想される。このことは海草とプランクトンの間でのリンの吸収に対する栄養塩競合（Neckles, 1994；吉田ほか，2011）を示唆する。また、I- P_2O_5 の負の相関直線についてより P_2O_5

の高い位置にプロットされるものはより富栄養化の進んだ海洋環境を示すと考察される。これによりI- P_2O_5 相関図はアマモとプランクトンの栄養塩競合と富栄養化の程度を評価できると期待される。今後のより多くのデータの蓄積が望まれる。

まとめ

干潟環境を堆積物の多元素組成から評価する試みは、これまで瀬戸内海の山陽側で進められてきた。それにより、重金属濃度からは堆積物の組成が比較的均一で、Zn- Fe_2O_3 判別図では都市型組成線に一致するものが多いことが判明していた。しかし、堆積物を構成する懸濁物（浮遊性物質；SS）の構成物やその多元素組成を報告した例はなかった。今回、石英フィルターで捕集したSSを蛍光X線分析装置（XRF）により多元素組成分析を行った。また、満潮時から干潮時までの構成物の変化を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察することにより、満潮時には珪藻が多数含まれること、干潮時には細粒の碎屑物粒子からなることが明らかとなった。また、アマモの生体のXRFによる分析から、重金属やハロゲン元素、リンの含有量をもとめた。これらの結果からI- P_2O_5 相関図を考察し、アマモとプランクトンの栄養塩競合と海域の富栄養化の程度を評価する試みを行った。フィルターに捕集されたSSのSEMとXRFを組み合わせた検討は、環境評価において重要な情報を提供するといえる。

文献

- 神島寺間・見崎里浜づくり，2014，アマモ場づくり活動。
<http://okayama.coop/kankyounet/sinnpo/10.2.27.amamo/c.morinaka.pdf>
 石賀裕明・道前香緒里・アーメッドファルキ・ハワビビ・梅田学，2003，Zn- Fe_2O_3 判別図から堆積環境を評価する，島根大地球資源環

- 境学科研究報告, 22, 15-20.
- 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. 鳥根大地球資源環境学環境学報告, 29, 33-39.
- 石賀裕明・坂矢愛美・坂本 京・畑中祐香・岩永あかり, 2014, 三重県伊勢・松坂地域における干潟のアマモ場のバイオマスとしての物質循環の地球化学的検討. 鳥根大地球資源環境学環境学報告, 33, 00.
- Muramatsu, Y., Yoshida, S., Fehn, U., Amachi, S. and Ohmomo, Y., 2004, Studies with natural and anthropogenic iodine isotopes: iodine distribution and cycling in the global environment. *Jour. Env. Radioactivity*, **74**, 221-232.
- Neckles, H., Koepfler, E. T., Haas, L. W., Wetzei, R. L. and Orth, R. J., 1994, Dynamics of epiphytic photoautotrophs and heterotrophs in *Zostera marina* (Eelgrass) microcosms: responses to nutrient enrichment and grazing. *Estuaries*, **17**, 597-605.
- 岡本理華子・山下みづ希・坂矢愛美・石賀裕明, 2014, 瀬戸内海備後灘の松永湾およびその周辺地域における干潟環境の水質, 浮遊物質量, 堆積物, アマモの多元素組成分析による評価. 鳥根大地球資源環境学環境学報告, 33, 00.
- Rahman, M. A. and Ishiga, H., 2012a, Geochemical investigation of selected elements in coastal and riverine sediments from Ube, Kasado, and Suo-Oshima Bays in the western Seto Inland Sea, Southwest Japan. *J. Oceanogr.*, **68**, 651-669.
- Rahman, M. A. and Ishiga, H., 2012b, Trace metal concentrations in tidal flat coastal sediments, Yamaguchi Prefecture, southwest Japan. *Environ. Monit. Assess.*, **184**, 5755-5771.
- 吉田吾郎・新村陽子・樽谷賢治・浜口昌巳, 2011, 海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビュー, -および瀬戸内海藻場の栄養塩環境の相対評価-. 水研センター研報, 34, 1-31.

(受付: 2015年1月15日, 受理: 2015年1月23日)