

論文

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

石賀 裕明*・坂矢 愛美**・坂本 京***^a・畑中 祐香***^b・岩永あかり***^b

Geochemical evaluation of material circulation in the biomass of *Zostera marina* (submerged plant) at the tidal flat in Ise and Matsusaka areas, Mie Prefecture, Japan

Hiroaki Ishiga*, Megumi Sakaya**, Miyako Sakamoto***^a, Yuka Hatanaka***^b and Akari Iwanaga***^b

Abstract

Multi-element analysis of *Zostera marina* (submerged plant) was examined on the three plant tissues (leaf, stem and root) and also in relation to their seasonal growth in 2012 and 2013, at the tidal flat of Ise and Matsusaka areas, central Japan. Also *Z. japonica* was used for this study from Ise area. CaO concentrations of leaf were higher than those of stem and root and show systematic increase from March to July, 2013 which is related to absorption and increased amount of attached organisms of the leaf. Contents of MnO also show similar behavior with CaO which might be caused by higher Mn concentrations in reductive sea water in summer season. Contents of MnO of leaf of *Z. japonica* are significantly higher than those of *Z. marina* indicating characteristic absorption of Mn in plant tissue. P₂O₅ concentrations did not show regular change in season, and was concentrated in stem relative to those of leaf and root. Fe₂O₃ and As concentrations show higher level in root of most specimen of *Z. marina*, suggesting absorption of dissolved these elements in pore water of sediments under reducing conditions. Zinc concentrations show higher in leaf of most specimen of both *Z. marina* and *Z. japonica*, but did not show seasonal change. Cu behaves similarly to that of Zn, but its variation in plant tissue and seasonal change were not regular than those of Zn. TS (total sulfur), Br and Cl were high in all plant tissue and show relatively steady concentrations, which did not show seasonal change. Comparing multi-elements concentrations of two areas, most elements had similar values, excluding Fe₂O₃, P₂O₅ and Zn. These three elements of *Z. marina* in Matsusaka area show higher level than those of Ise area, suggesting relatively much inflow of domestic water from the town. The lower concentrations in CaO and MnO of *Z. marina* from Matsusaka area in 2012 might be related to less growth of the plant tissue compared to those of 2013. This feature was caused by higher rain precipitation in 2012 than that of 2013. The absence of biomass of *Z. marina* from Ise area in 2012 might be caused by flooding in the Miyagawa river estuary in this area.

Key words: *Zostera marina*, *Zostera japonica*, tidal flat, geochemistry, Ise, Matsusaka

はじめに

アマモ (*Zostera marina*) は海産種子植物で、かつて瀬戸内海沿岸や太平洋岸、日本海の沿岸に広く分布していた。アマモを主とする沈水植物のつくる場所はアマモ場と呼ばれ、生態系の重要な一部をなしていた。これは、アマモ場が高い基礎生産をなす生物生産の場であり、アマモ草体は葉上付着生物の生育基盤をなし、魚介類の摂餌場、産卵場としての重要な場を形成することによる。また、アマモが栄養塩の吸収を行い、水質浄化の機能を持つなど、その働きは多面的である。しかし、アマモ場は高度経済成長期以降、沿岸の地形改変や海洋の汚濁などにより、その分布域は著しく減少した(相生、

2000; 川崎, 2003)。伊勢湾では海岸の構造変化に伴う濁りに関連することが指摘されている(阿知波, 2009)。近年、アマモ場の生態系での意義が見直され、その再生の取り組みが進められ、成果が報告されている(福田, 1987; 川崎, 1988; 川崎ほか, 1988, 1990; 森田・深瀬, 1994)。アマモの生体への栄養塩の吸収については、古くはいくつかの報告があるが、重金属を含む多元素分析の報告は少ない。また、実験室での生育実験においても、草体への付着生物の影響は大きいとされている(高間, 1975)。現実にはアマモとその草体への付着生物をバイオマスとしてとらえるのが自然である。そこで、本論では三重県伊勢湾西部の伊勢地域と松坂地域において2012年と2013年にアマモを採取して草体の多元素分析を行ったのでここに報告する。

調査地域

三重県伊勢湾西部の伊勢市から松阪市にかけては北西—南東方向に海岸がのびる(第1図)。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

* 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
** 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
***690-8504 島根大学総合理工学研究科地球資源環境学科 (° 2013 年 3 月卒業,^b 2014 年 3 月卒業) Department of Geoscience, Shimane University,
Matsue 690-8504, Japan

には広大な干潟があらわれ、アマモもこの時期には水面上に現れる。松阪地域は榊田川が流入して河口干潟の発達が顕著である。この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)。伊勢地域は宮川が流入して河口干潟の発達が顕著であるが、調査を行った大湊は三角デルタを形成する(第1図)。

2012年には伊勢地域ではアマモは干潟地域においては確認できなかったが、コアマモ(*Zostera japonica*)が確認できた。しかし、伊勢地域ではアマモは2013年には広範囲に生息していた。松坂地域では、2012年、2013年ともにアマモが確認できた。また、干潟には干潮時にバー(bar)とトラフ(trough)が現れ、このトラフにアマモが生息している(第2図, a)。また、松阪と伊勢の間の明和地域にもアマモの分布がみられた(2012年)。

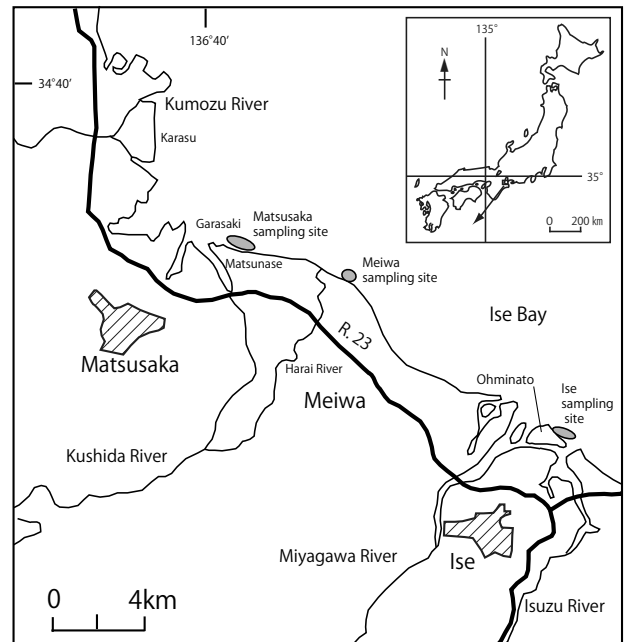
海岸地形とアマモの分布

松阪地域

松阪地域においては2012年および2013年にアマモを観察した。2012年はバーとトラフの発達があまり明瞭ではなかったが、2013年にはバーとトラフの発達は明瞭で(第2図, a)、やや沖合のトラフを埋めるようにアマモの群集が認められた(第2図, b, c)。バーは前浜干潟に4列あり、6月の調査時には、汀線から55m沖合のバーは、最も長い部分の幅が14.5m、長さは560mある。この日は潮干狩りが盛んであった(第2図, c)。アサリを含む二枚貝はアマモの群集の中に多く産するようで、干潟に生息するツメタガイによる掘削捕食や、エイによる捕食から逃れる戦略であるかもしれない。このさらに沖合35m付近のバーは最も長い部分の幅が14.2m、長さが685mある。2013年の3月~8月には前浜汀線から100m~300mの間のトラフにアマモが認められた。アマモは密集して群集しており、干潮時にはトラフ内部での潮干狩りが盛んであった。松阪地域のアマモは伊勢地域よりも生体は大きく、3月には長さは30~50cmであるが、7月では60~100cmとなる。伊勢地域と同様、7月では葉身の成長は停止していると考えられ、また、色調も暗緑灰色と変化し、付着生物も増加していることが観察される。

伊勢地域

伊勢地域において2012年は干潟においてはアマモを確認していない(第1表)。これは2012年が全般に雨量が多く、宮川からの河川水の流入により、アマモに汽水耐性がないことに関係すると考えられる。一方、2013年は3月~8月に大潮干潮時の前浜干潟において、前浜汀線の最下部から185m~250m沖合の範囲でアマモ群集を観察した(第2図, d)。ここではバーとトラフが発達して、トラフ内のくぼみにパッチ状に群集が分布する(第2図, d)。コアマモは同じく汀線から100~185mの間の前浜干潟に分布する。一部はアマモと共生している。アマモは季節とともに生育しその長さや葉身の幅や厚さは増加する。3月には生体の長さは20~40cmであるが、7月では50~80cmとなる。また、7月以降は葉身の成



第1図 アマモおよびコアマモを採取した松阪、伊勢および明和の位置を示す図。

長は停止していると考えられ、また、色調も暗緑灰色と変化し、付着生物も増加していることが観察される。コアマモは季節を通してやや成長するが、生体の長さは10~20cmである。

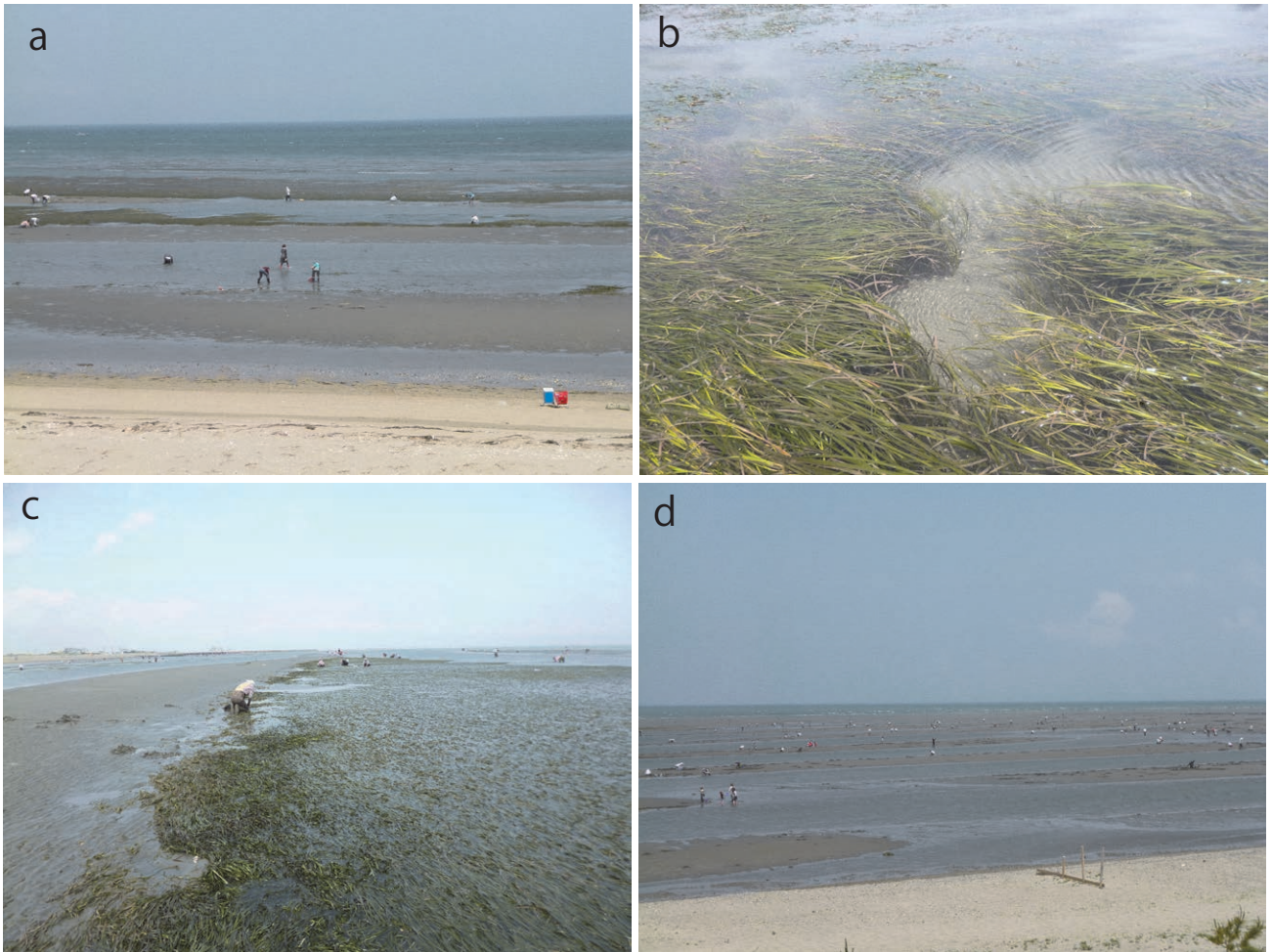
試料採取

アマモ試料については大潮の干潮時に干潟において採取した。松阪地域については、2012年に松名瀬海岸吹井ノ浜の前浜低潮位線から沖合250m付近(地点31; N34°36'15.46", E136°35'12.91")でアマモ試料を20~30束程度(500g以上)採取した(第1図)。試料採取の地点番号は第4図a, bに示し、第2表中においても番号を示した。2012年5月にはこの地点から500m西方の地点32にて同様に採取している。また、同じ5月には明和(N34°34'39.52", E136°39'11.43")でもアマモを採取している(第1図)。伊勢地域においては大湊海岸にて前浜低潮位線から沖合250m付近(N34°31'54.39", E136°44'32.60")でコアマモ試料を300g程度採取した。

2013年には松阪地域において、地点31の陸側に近い、汀線から沖合100m付近でアマモを採取した。2013年は伊勢地域においてアマモ試料は、この地点周辺で前浜汀線からおおよそ200m沖合の干潟において、500g以上(湿重量、以下同じ)の複数束を採取した。コアマモについては沖合80mで300g程度採取した。

元素組成の検討

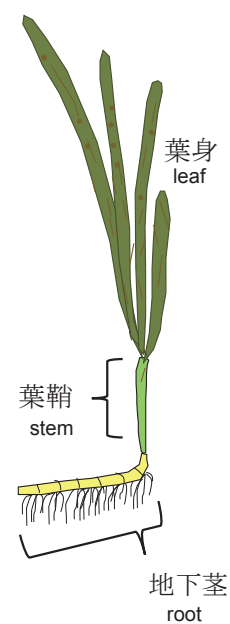
アマモは20束前後を混合し、1試料として葉身、葉鞘、地下茎(根茎)に分離して試料とした(第3図)。ただし、地下茎はアマモの地下部分のうち根茎と根束(ひげ根部分)を含む部分をさす。伊勢地域で得られたコアマモは葉鞘部分が



第2図 松坂および伊勢地域における前浜干潟とアマモの生息状況を示す。a：松坂地域の松名瀬海岸にみられるバーとトラフの発達の様子を示す（2014年5月25日11:20）。b：トラフ内に見られるアマモの様子（同日，11:40）。c：干潮時のバーとトラフの様子。アマモが海面上に露出している（同日，11:05）。潮干狩りが盛んで、アマモの群生の中の方がアサリが多産するようである。d：伊勢地域の大湊海岸のバーとトラフの発達の様子（2014年5月25日12:14）。

第1表 松坂および伊勢地域のアマモとコアマモの大潮干潮時の前浜干潟における出現状況をまとめた表。2012年は宮川流域での降雨量が多く、伊勢地域ではアマモは確認されていない。○；生息の確認。×；確認されず。-；検討せず。

	松坂		伊勢	
	アマモ	コアマモ	アマモ	コアマモ
2012年3月	-	-	-	-
4月	○	-	-	-
5月	○	-	-	-
6月	-	-	-	-
7月	○	-	-	○
8月	○	-	-	○
2013年3月	○	×	-	×
4月	○	×	○	×
5月	○	×	○	×
6月	○	×	○	○
7月	○	×	○	○
8月	○	×	○	○



第3図 アマモ生体の各部位の区分を示す図（阿部ほか，2004を参考に記述）。

第2表 松阪および伊勢地域の2012年および2013年のアマモおよびコアマモの生体試料の多元素組成分析の結果。
Clのoverは100000ppm以上を示す。

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
<i>Z. marina</i>																							
Matusaka																							
2012 4 22																							
leaf	4	7	131.9	16	16	9	6	290	5	2	54	1	10	12167	157	140	28	49752	0.01	0.62	0.17	5.05	0.75
stem	4	7	74.4	13	1	4		157	5	2	54		2	9069	28	216	13	96365	0.02	0.51	0.05	1.76	0.60
root	11	12	79.3	18	18	35	59	299	11	4	95	3	14	8876	143	186	45	51464	0.28	3.43	0.12	5.04	0.41
2012 5 7																							
31																							
leaf	9	8	114.4	15	17	1	20	310	7	2	36	1	6	14709	100	220	74	76864	0.06	0.90	0.28	2.59	1.20
stem	5	9	79.6	19	7	14	39	179	11	4	86	2	5	10771	4207	222	18	over	0.20	1.81	0.11	1.71	1.43
32																							
leaf	7	9	116.2	17	17	3	14	259	7	2	39	1	4	14043	990	189	43	81931	0.06	0.88	0.35	2.27	1.41
stem	6	13	90.1	24	13	34	63	206	15	6	109	4	10	9352		184	16	81600	0.33	3.07	0.16	1.97	1.24
2012 5 8																							
Meiwa																							
leaf	6	6	145.7	13	7		1	312	5	1	35		10	15300	18	220	48	over		0.28	0.27	4.98	0.85
stem	6	11	78.9	15	11	25	59	195	13	5	129	3	9	10112	206	268	48	87088	0.29	2.80	0.12	2.21	0.71
2012 7 5																							
31																							
leaf	3	10	86.2	20	5	33	7	179	6	2	39	1	1	10008	54	211		over	0.05	0.73	0.20	1.96	1.80
stem	4	10	94.5	20	5	8	12	178	6	2	38		2	9897	223	206		over	0.04	0.70	0.20	1.95	1.78
root	9	11	90.7	16	8	14	21	213	6	2	38		2	10625		179	13	92872	0.07	1.57	0.25	2.38	1.64
2012 7 5																							
32																							
leaf	6	10	123.9	18	22		17	275	4	1	28	1	7	9560	152	99	14	20414	0.04	0.93	1.09	5.05	0.72
stem	3	7	78.6	18	5			170	4	2	23			11009	228	239	3	over		0.05	0.29	2.02	1.28
root	8	12	98.8	19	12	4	26	227	7	3	42	1	4	9245		172	7	75652	0.14	1.91	0.45	2.70	1.00
2012 8 2																							
leaf	9	15	91.9	21	16	26	64	293	12	4	76	4	8	10650	152	157	30	44872	0.32	3.16	0.56	3.16	0.81
stem	5	8	71.3	18	4	5	17	185	8	3	53	1	4	8888	183	14	79523	0.13	1.45	0.23	2.45	1.47	
root	8	10	74.5	17	7	14	57	175	9	3	59	2	3	8777	76	123	11	50416	0.24	2.78	0.23	2.38	1.05
2012年 Av.	6.2	9.8	95.6	17.7	10.5	12.8	26.7	227.9	7.7	2.7	57.5	1.4	5.6	10725	374.1	189.7	23.6		0.13	1.53	0.28	2.87	1.12

小さく、分離して分析することが困難であり、葉身と地下茎に区分した。2012年8月の試料ではコアマモの伸長が明瞭で葉鞘を区分している。2012年5月の松阪では約200m離れた2地点でアマモ試料を採取した(第2表, 試料31, 32)。この2試料および2012年5月明和のアマモ試料について、地下茎部分は欠損している。

アマモおよびコアマモ試料はアルミニウム製バットに分離した、それぞれの試料を広げ、110°C、2日間乾燥の後、160°C半日程度の乾燥を行った。160°C乾燥は、生体内の揮発性炭素化合物を除去するためである。コアマモは30東前後を混合1試料として、葉身と地下茎に区分し、同様に乾燥して試料とした。乾燥試料は自動メノウ乳鉢を用いて粉体とした。

アマモおよびコアマモの粉体試料は塩ビリング(内径30φ)の内部に装填し、加圧器にてプレス成型(200kN, 1分間)を行い、分析用プレスディスクを作成した。プレスディスクは、蛍光X線分析装置(リガクRIX2000)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2表)。TSは全イオン、Fe₂O₃*は全鉄を示す。

分析結果

アマモについて

2012年と2013年の松阪地域の分析値および2013年の伊勢地域の分析値について、特徴的な濃縮率の変化を示す元素(CaO, MnO, Fe₂O₃, P₂O₅, Zn, Cu, As, TS)を選択して棒グラフとして示した(第4図a, b)。

CaOは松阪地域において、2012年は各部位ともに低く

(5wt%以下)、季節的な変化も明瞭ではない。5月の明和の試料と7月の試料では、葉身の含有量がその他の部位に比較してやや高い。一方、2013年は3月から7月まで系統的な変化を示す。すなわち、葉身で葉鞘や地下茎に比較して著しく高く(7月の葉身のCaO=28.95wt%, 葉鞘は5.68wt%, 地下茎は4.17wt%)、季節的にも漸次増加する。8月の試料では7月の値よりも葉身のCaOは低下する(19.23wt%)。伊勢地域でもCaOの値は葉身が他の部位よりも高く、季節的に増加する。松阪地域の2013年の変化葉身の値に比べ低い(6月の葉身でCaO=10.84wt%)。しかし、7月の葉身は23.31wt%で急速に高くなる。

MnOについては、松阪地域において、2012年の試料で、葉身において葉鞘や地下茎よりも高く、4月(0.14wt%)よりも5月の葉身(0.21wt%, 0.39wt%, 0.52wt%)で高い。また、7月の41地点の試料を除いて、42地点の試料(1.09wt%)と8月の試料(0.56wt%)とともに、葉身で著しく高い値を持つ。2013年の松阪地域において、葉身におけるMnOの含有量は葉鞘と地下茎よりも高く、3月から6月(0.52wt%)まで漸次増加する。その後、7月と8月の葉身では6月の値よりも低くなる(それぞれ、0.40, 0.45wt%)。伊勢地域のアマモでもMnOは葉身が他の部位に比較して高く、季節的にも4月の試料(MnO=0.28wt%)から5月および6月の試料へ増加する(それぞれ、0.57, 0.58wt%)。

Fe₂O₃は2012年の松阪地域の地下茎が他の部位に比較して高い値(2.50wt%以上)を持つものがある。また、2013年の松阪の試料(7月)や伊勢の試料(3月, 6月, 7月)でも地下茎で高くなる。

P₂O₅は松阪地域において各部位の含有量や季節変化などを比べると、不規則な変化を示す。2012年5月の葉身は1.20お

第2表 続き

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	
Matsusaka																								
2013 3 29																								
leaf	6	9	74.1	15	5	6	23	394	8	2	55	2	14	12150	45	138	75	46079	0.10	1.41	0.14	8.07	1.30	
stem	4	9	59.3	11	4	10	15	198	8	3	65	2	5	10855	65	187	35	over	0.11	1.36	0.05	2.47	1.62	
root	6	8	46.8	11		4	19	252	7	2	52		3	11232	54	224	35	over	0.07	1.17	0.05	3.47	1.05	
2013 4 27																								
leaf	5	10	78	15	5	10	32	405	9	2	66	2	20	9904	178	113	31	45622	0.19	1.84	0.21	10.39	0.76	
stem	4	8	61	14	3	4	17	163	7	3	59		3	9944	153	224	4	over	0.09	1.06	0.06	2.11	0.85	
root	4	7	40	12			4	144	5	2	40		1	9984		263	5	over	0.03	0.54	0.03	1.72	0.56	
2013 5 27																								
leaf	4	8	119	19	13			381	3	1	24	1	18	8719	30	97		25883			0.39	12.18	0.84	
stem	2	5	53	11				139	3	1	16			9471				over			0.04	1.93	1.37	
root	7	7	49	11			6	189	4	2	29		2	7910	183	229		94781		0.91	0.05	2.56	0.67	
2013 6 24																								
leaf	5	7	60	11			8	1003	4				28	9178	360	119	18	32808	0.01	0.50	0.52	17.38	0.78	
stem	3	8	72	13	1	3	15	305	6	2	37		6	9986	52	237	5	over	0.04	0.72	0.18	3.66	1.23	
root	6	11	74	14	4	17	43	408	10	3	54	1	11	8767	27	188	31	85538	0.17	2.19	0.20	5.01	0.95	
2013 7 21																								
leaf	3	8	44	12				1290	3				43	10545	4	130	36	21864			0.40	28.95	0.79	
stem	2	6	63	16				375	4	1	31		10	10895	160	214	5	96505		0.04	0.15	5.68	1.30	
root	4	7	67	16			3	414	5	1	32		5	14884	101	217	9	over		0.70	0.11	4.17	1.30	
2013 8 22																								
leaf	7	9	55	15	3	7	26	879	6				31	10307	134	157	38	15961	0.12	1.34	0.45	19.23	0.60	
stem	6	8	58	22	7	11	18	268	6	2	47	1	6	8218	89	181	4	64853	0.12	1.40	0.17	3.74	0.97	
root	7	10	70	15	8	12	40	334	8	3	55	1	9	9478		149	35	50759		0.20	2.47	1.4	5.32	0.91
2013年 Av.	4.6	8.0	63.6	14.1	2.9	4.7	14.9	418.9	5.8	1.6	36.7	0.5	11.9	10135	90.8	185.5	20.3		0.07	0.98	0.19	7.67	0.99	
2012,13年 Av.	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	242.9	192.9	22.6		0.10	1.30	0.24	5.35	1.09	

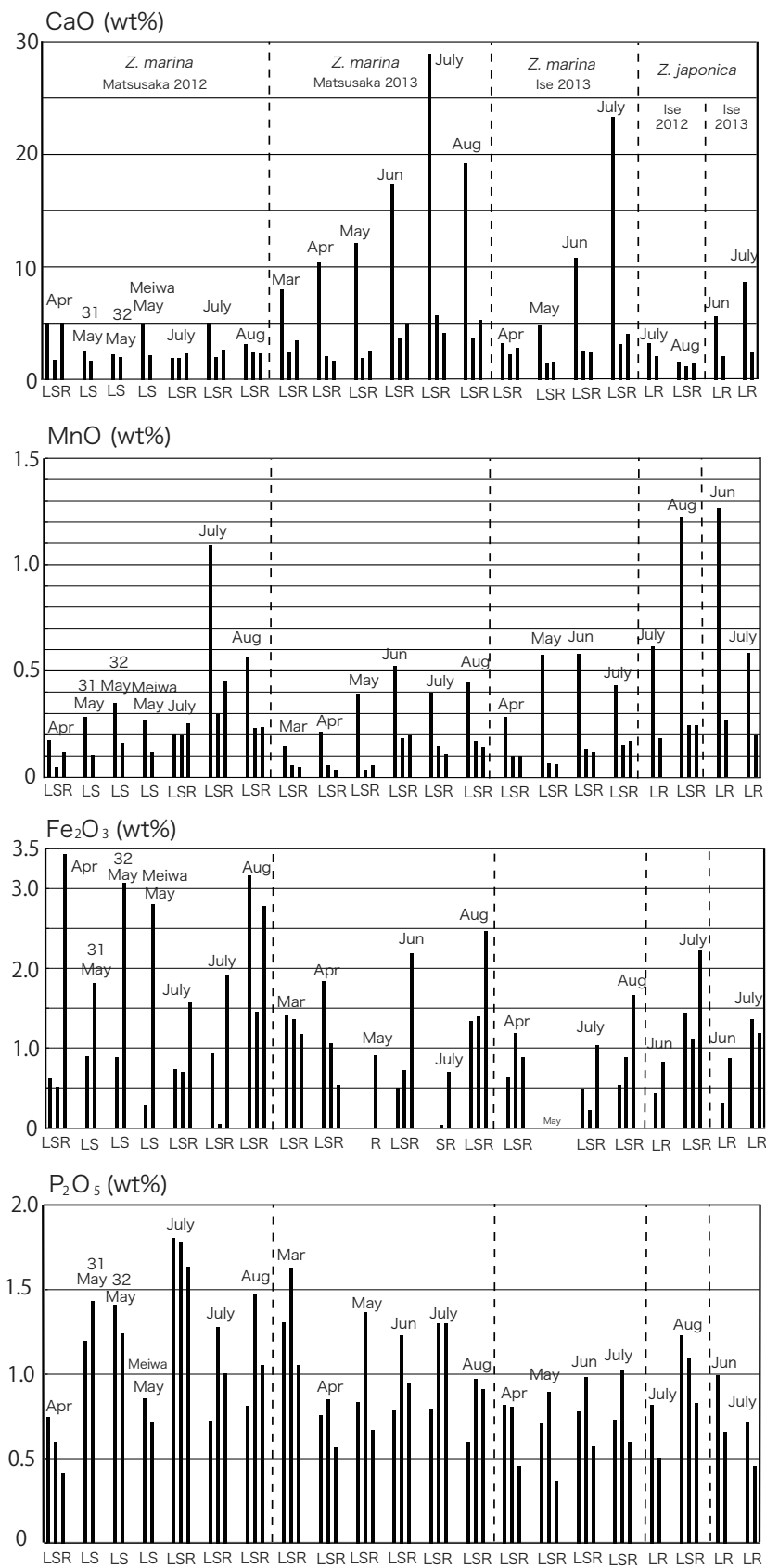
第2表 続き

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	
<i>Z. marina</i>																								
Ise																								
2013 4 28																								
leaf	6	9	123	18	24	5	14	269	5	2	40	1	2	12347		129	27	52771	0.01	0.63	0.28	3.29	0.82	
stem	4	10	66	18	16	26	20	202	7	3	58	1	2	9454	30	160	1	82154	0.11	1.18	0.10	2.23	0.80	
root	5	10	54	17	9	14	12	218	6	2	50	1	3	9342		214	19	98061	0.05	0.88	0.10	2.81	0.45	
2013 5 26																								
leaf	4	8	115	17	15			310	3	1	25	1	4	9959	26	88		33925			0.57	4.92	0.71	
stem	2	5	60	18	6			119	4	2	20	1		8932	134	211	11	over			0.07	1.45	0.89	
root	4	7	41	14	3			94	3	2	18			7207	63	196	0	93413			0.06	1.63	0.37	
2013 6 25																								
leaf	7	10	73	18	25	8	14	493	5	1	29	1	18	11051	21	133	51	29685	0.02	0.49	0.58	10.84	0.78	
stem	3	7	62	21	11	16		199	5	2	30	3		9561	41	243	4	over		0.22	0.13	2.50	0.98	
root	6	9	62	19	11	12	16	186	5	2	38	1	2	9249	192	211		over		0.05	1.04	0.12	2.39	0.57
2013 7 22																								
leaf	6	9	74	13	7		9	731	6		16		37	12425	241	237	50	13661	0.04	0.53	0.43	23.31	0.73	
stem	4	10	69	25	13	13	6	210	6	2	40		6	10381	52	242		over		0.05	0.88	0.15	3.18	1.02
root	11	11	61	15	15	18	27	230	7	3	45	1	7	8659	89	205	27	78979	0.08	1.66	0.17	4.08	0.60	
Av.	5.1	8.7	71.6	17.8	13.0	9.3	9.8	271.8	5.1	1.8	34.1	0.5	7.0	9881	74.1	189.1	15.9		0.03	0.63	0.23	5.22	0.73	
<i>Z. japonica</i>																								
Ise																								
2012 7 6																								
leaf	4	9	124.4	30	33	7	2	251	4	1	29		2	10986	340	125	10	42178	0.01	0.43	0.61	3.22	0.82	
root	5	9	65.0	21	20	9	12	240	5	2	34	1		7682		169	27	58862	0.05	0.82	0.18	2.13	0.50	
2012 8 3																								
leaf	8	13	53	24	31	19	32	188	8	3	46	3	2	12990	136	166	6	77645	0.13	1.43	1.22	1.62	1.23	
stem	6	9	42	20	13	16	18	153	8	3	43	1	1.10	9828	89	215	5	over		0.10	1.10	0.24	1.23	1.09
root	34	11	39	15	11	16	28	174	6	2	40	1		10091	157	177	28	84628	0.08	2.23	0.24	1.52	0.83	
2013 6 25																								
leaf	5	9	112	17	27	2	9	299	4	1	29		10	11860	9	128	8	48279		0.30	1.27	5.61	0.99	
root	8	9	63	11	13	6	17	195	6	2	37	1	2	9767	202	216	15	over		0.06	0.87	0.27	2.10	0.66
2013 7 22																								
leaf	7	10	83	17	22	19	27	410	7	2	43	1	19	10422	76	209	24	52399	0.13	1.36	0.58	8.66	0.71	
root	5	11	50	11	13	16	25	176	6.3.03	3	43		3	7533	27	220		over		0.09	1.18	0.20	2.41	0.46
Av.	9.1	9.9	70.1	18.5	20.3	12.2	18.8	231.8	5.3	2.2	38.1	0.8	4.3	10129	115.1	180.4	13.6		0.07	1.08	0.53	3.17	0.81	

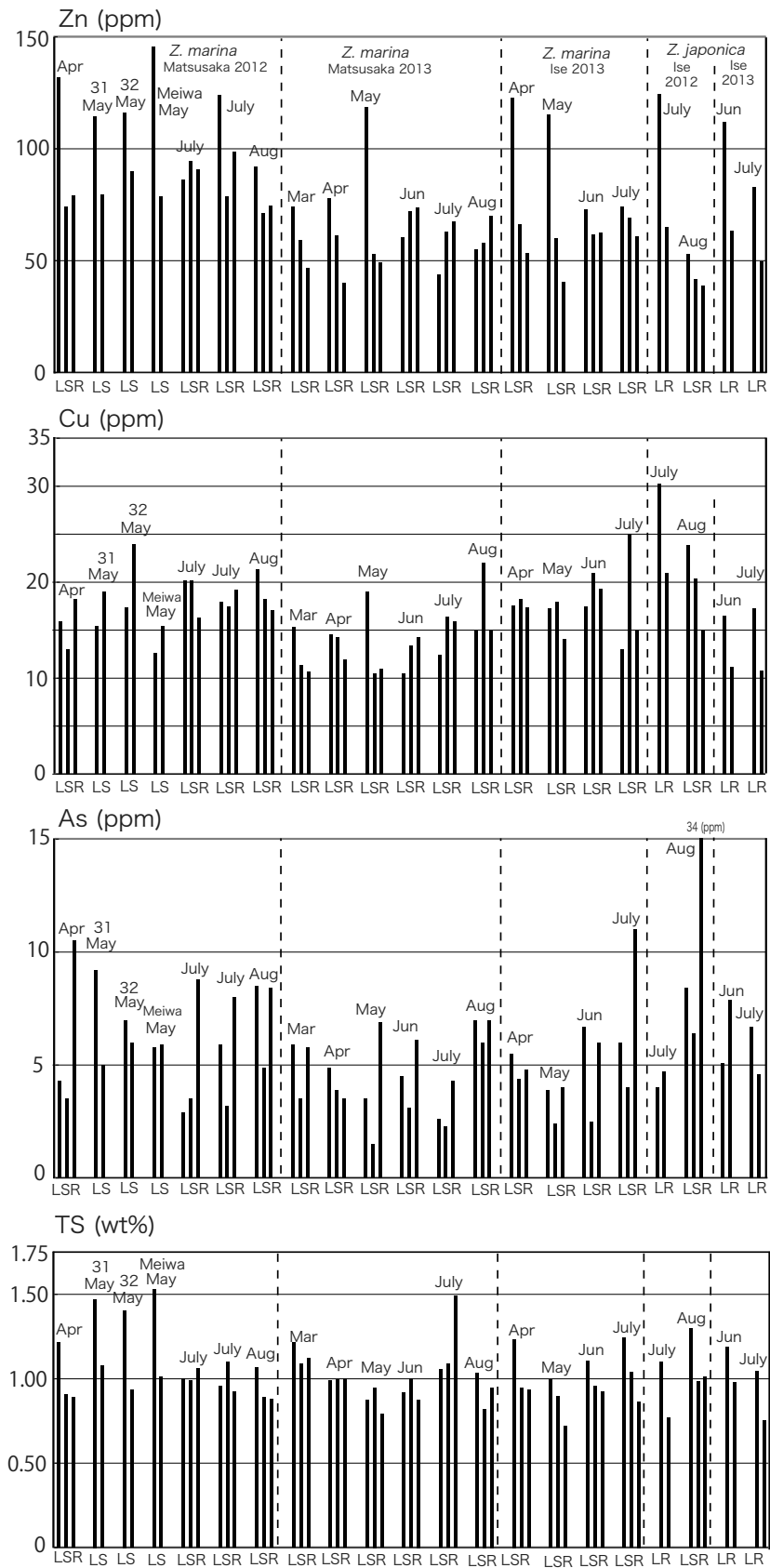
よび 1.41 wt% であり、7月では地点 41 の葉身で 1.80 wt% に増加する。2013 年では 3月の試料で葉鞘の含有量は 1.62 wt% であり、4月では 0.85 wt% であるが、5月、6月、7月の試料の葉鞘の含有量はそれぞれ 1.37, 1.23, 1.30 wt% である。この 7月と 8月の試料での葉鞘と地下茎の含有量はほぼ同じである。P₂O₅ の含有量は葉鞘が他の部位よりも高くなるものがある。伊勢地域では 2013 年の松坂地域の試料に比較して葉鞘の含有量は低い。5月、6月、7月はそれぞれ 0.89, 0.98, 1.02 wt% であり、他の部位よりも高い。

Zn については松坂地域における、2012 年 4月と 5月の

試料では、葉身の 4月と 5月の平均値は 127 ppm で葉鞘は 80 ppm、地下茎は 4月の試料で 79 ppm であり、葉身は葉鞘や地下茎に比較して高い。7月の試料では 41 地点の試料では 3つの部分であまり相違はなく、42 地点の試料で葉身が 124 ppm で葉鞘はこれよりも低く、79 ppm である。8月の試料では葉身 (92 ppm) が葉鞘 (71 ppm) および地下茎 (75 ppm) に比較してやや高い。2013 年の試料では、3月から 5月までの試料で葉身の Zn 含有量は葉鞘および地下茎に比較して高く、その値も 3月 (74 ppm) から 5月 (119 ppm) まで増加する。6月から 8月にかけては、葉身の Zn 含有量は葉鞘



第4図 a 松阪および伊勢地域の2012年および2013年のアマモおよびコアモの生体試料の多元素組成分析の結果を示したグラフ。各部位、地域、試料採取時期を区分して示す。L(葉身), S(葉鞘), R(地下茎)を示す。松阪地域2012年5月試料(31, 32, Meiwa)は地下茎が欠損している。



第4図b 松坂および伊勢地域の2012年および2013年のアマモおよびコアマモの生体試料の多元素組成分析の結果を示したグラフ。各部位、地域、試料採取時期を区分して示す。L(葉身), S(葉鞘), R(地下茎)を示す。松坂地域2012年5月試料(31, 32, Meiwa)は地下茎が欠損している。

と地下茎に比較して、低くなる。この傾向は伊勢地域のアマモ試料についても同じであるが、4月(123 ppm)の葉身ではすでに高く、5月の葉身(115 ppm)よりやや高い。6月と7月のZn含有量は、葉身で葉鞘や地下茎の値よりもやや高い。

Cuは2012年の松阪地域では各部位による規則的な、また、季節的な含有量の変化は見られない。2013年の松阪地域(6月、7月、8月)および伊勢地域(4月、5月、6月)でおおむね3部位ともに季節的に増加する傾向がある。

AsはCuと同様に各部位による規則的な、また、季節的な含有量の変化は見られない。しかし、 Fe_2O_3 と同様に地下茎で高い値(5 ppm以上)を示すものがある(松阪地域の2012年4月、7月、2013年5月、6月、7月、伊勢地域の2013年6月など)。

TSは多くの試料で10000 ppm前後で、葉身で他の部位よりもやや高い試料がある。

コアマモについて

コアマモは伊勢地域のみである。CaOは2012年では含有量が低く5 wt%以下であるが、2013年は葉身が地下茎よりも高く、6月(葉身5.61 wt%)よりも7月(葉身8.66 wt%)の方が高くなる。しかし、同時期のアマモに比較すると低濃度である。

MnOは2012年において葉身が地下茎よりも高く、また、7月(0.61 wt%)よりも8月(1.22 wt%)で高い。また、2013年は6月の葉身の含有量(1.27 wt%)は7月の値(0.58 wt%)よりも高い。 Fe_2O_3 は2012年、2013年ともに各部位で値が異なるが、季節的には増加する。 P_2O_5 は2012年、2013年ともに葉身が地下茎よりも高い。2012年では7月よりも8月の方が各部位ともに値は高くなる。しかし、2013年では6月の含有量(葉身0.99 wt%)が7月の値(葉身0.71 wt%)よりも高い。

Znは2012年、2013年ともに葉身(2012年7月;124 ppm, 2013年6月;112 ppm)が地下茎よりも高く、季節的には両部位の含有量はともに低下する。Cuは葉身の含有量が地下茎の値よりも高い。また、2012年の試料では7月よりも8月の試料で含有量は低下している。Asは2012年8月の地下茎で34 ppmと高い値を持つが、これ以外では各部位とも4~8 ppmの範囲にある。TSは各部位や季節による変化は小さく、10000 ppm前後である。

考 察

アマモ各部位の元素分配の特徴

アマモの各部位の元素濃度の変化については生体の成長と関連することが報告されている。アマモは3月から成長し、4月、5月(水温は25℃前後)において成長は早いとされている(阿部ほか, 2004; 細川ほか, 2006)。7月ごろさらに水温が上昇すると成長を停止する。そして、葉身の長さや幅を増す成長から、葉身の枚数を増やす成長に変わるとされている(阿部ほか, 2004; 細川ほか, 2006)。海外でもアマモの成長についての報告は多く、同様の傾向が示されている。特にNの吸収について各部位でほぼ同様の含有量が認められることが

知られている(Pedersen and Borum, 1992; Evrard *et al.*, 2005)。本邦ではアマモの成長と元素濃縮の関係についての報告は少ないが、海外では報告がある(Ebrahimipour and Mushrifah, 2008; Lyngby and Brix, 1989; Riosmena-Rodríguez, 2010)。しかし、これらの研究は毒性を示すCu, Cd, Pbなどの特定の元素の報告に限られ、その変化もあまり特徴的ではない。今回、検討した松阪地域のアマモについては2012年の試料ではZn, MnOとCaOについての季節変化はあまり明瞭ではないが、2013年の試料ではZnは葉身では3月から5月にかけて含有量は増加する。葉身の生長点は葉鞘下部の葉頂にあり、葉鞘の内部で新しい葉身が内側から伸長する。MnOとCaOについては3月から7月にかけて、葉身について特徴的に含有量が増加する。これはアマモの成長(伸長)に伴って、栄養塩が摂取されること(細川ほか, 2006)に関連すると考えられる。Znについて2013年の5月の葉身で著しく高くなるが、それ以外については、3月~5月では葉身が他の部位よりも高く、逆に6月~8月では葉身の含有量が他の部位に比較して低くなる。これは伊勢地域のアマモについても同様である。これらのことを合わせ推定すると、アマモの葉身の成長に伴いZn, MnO, CaOの葉身での含有量の増加は、葉身の面積の増加に合わせて、吸収されると考えられる。アマモが成長を停止するとZnの含有量が葉身で減少するのは、成長との相関を示唆する。これは2013年の伊勢地域の試料でも同様である。CaOについては葉身で3月から7月まで最も高く、しかも増加を続ける。伊勢地域のアマモも同様である。このことは、CaOは葉身への吸収に限らず、7月以降はアマモの葉身の表面への付着生物の影響が大きくなったことを示す。松阪では8月の試料でも葉身のCaOが他の部位よりも非常に高いので、成長の停止後であっても、付着生物によるCaOの寄与が大きいといえる。2013年の松阪の葉鞘と地下茎については4月から7月までCaOの含有量は増加する。伊勢地域では5月から7月について葉鞘と地下茎のCaOの含有量は増加する。

P_2O_5 については伊勢、松阪の両地域で、季節ごとの明瞭な変化は認められず、季節を通して吸収と蓄積が行われているといえる。葉鞘での P_2O_5 含有量が高くなるのは P_2O_5 の蓄積が葉鞘にあり、葉身の生成を行うこの部位の特性かもしれない(松阪地域の2013年の3月、5月、6月の試料および、伊勢地域2013年の5月、6月、7月の試料など)。 Fe_2O_3 は地下茎が他の部位に比較して高くなる傾向がある。松阪の2012年4月、5月では3.0 wt%以上である。2013年では7月の試料でも地下茎で高い(2.0 wt%以上)。伊勢では全般に Fe_2O_3 含有量は低い。Asについても地下茎の含有量が他の部位よりも高くなるものがある。FeやAsは還元的な堆積物中では間隙水に溶解して、 Fe^{2+} や AsO_4^{3-} として存在して(Tribouillard *et al.*, 2006ほか)、根から吸収され地下茎に蓄積(Lillebo *et al.*, 2006)していると考えられる。

アマモとコアマモにおける元素濃縮の差異

アマモとコアマモでは生体における元素濃縮が著しく異なる。葉身に濃縮する元素では、比表面積の差異により元素濃

縮の状況が異なる。このことはCaOの含有量を見ると明らかである。アマモは2013年の松坂および伊勢の試料において、葉身のCaO含有量は規則的に増加する。松坂においては4月の試料で10 wt%を超え、伊勢の試料では6月の試料で10 wt%を超える。コアマモは10 wt%を超える試料はない。これは葉身の面積の増加に伴う、表面の付着生物の寄与を示す。一方、ZnおよびCuではアマモとコアマモのすべての試料を比較しても、CaOのような相違はない。むしろ、アマモが5月で成長を停止することにより、ZnやCuの増加が停止するのに対して、コアマモは6月から繁茂するので、2012年7月および2013年6月の試料の葉身でZnは100 ppmよりも高くなる。MnOについては2012年8月と2013年7月の試料の葉身で1.2 wt%を超え、アマモの各部位のMnO含有量に比較して優位に高い。このことから、MnOは生体に吸収されており、コアマモの方がその摂取率が著しく高いことを示す。P₂O₅はアマモとコアマモで明瞭な差異はないといえる。しかし、P₂O₅含有量は葉身の方が地下茎よりも高く、コアマモでは葉鞘がアマモほど明瞭ではないことにより、海水中から摂取されたP₂O₅が葉身に蓄積されていることによるかもしれない。2012年8月の試料では、葉鞘部分を区分して分析しているが、地下茎、葉鞘、葉身の順にP₂O₅含有量は高くなる。分析を行った元素についてはアマモとコアマモで明瞭な含有量の変化を示すのはMnOであり、海水からの摂取率が異なるといえる。

アマモの季節的な成長と元素濃縮の関係

CaO含有量はアマモ伸長と明瞭な関係が認められる。第4図のグラフに示されるように、松坂では葉身についてCaO含有量は8.07 wt%から28.95 wt%へ増加する。これは葉身の伸長と付着生物量の増加による。伊勢の試料ではやや含有量は低いが、同様の傾向を示す。MnOについても2013年松坂において葉身で3月から6月にかけて、伊勢地域の試料においても、4月よりも5月、6月で高くなる。しかし、Zn, Cu, Fe₂O₃, P₂O₅などはアマモの成長と元素濃縮率には明瞭な関係が認められない。したがって、CaOは葉身の伸長に関連する増加と考えられる。MnOについては海水中のMn濃度の増加に起因する可能性がある。伊勢湾において水温の上昇による沿岸域での成層構造の形成や底層の還元的環境の発生により(黒田・藤田, 2006)、干潟の海水中のMn濃度も季節変動を生じていると推測される。愛知県水産試験所の観測では、2013年6月から7月にかけて酸素飽和度が10%を下回る、恒常的で広範囲な貧酸素水塊が伊勢湾東部沿岸地域で発生したことが報告されている(愛知県水産試験所, 2014)。試料採取時の水質データでは、7月、8月ではDOとORPの値の低下が認められ、上げ潮により底層の還元的な海水が干潟に流入していると推定される。MnはFeやZnのように硫化物として沈殿することがないため、海水中では滞留時間は長い。Mnの海水中への溶解はこのような貧酸素水塊の発生と密接な関係を持ち、これがアマモやコアマモの葉身に蓄積すると考えられる。

伊勢地域と松坂地域のアマモの成長

伊勢地域においては、2012年は降雨量が多く、アマモの干潟における生育は認めていない。2013年は比較的降雨量が少なく、伊勢地域においてもアマモの生育が認められた。しかし、松坂地域の干潟ではアマモの生育が3月から認められたのに対して、伊勢地域においては4月から確認した。アマモは汽水への耐性がないために、伊勢地域では2012年に宮川から流入する河川水の影響を受けたといえる。また、6月の大型台風の影響で洪水が発生し、この影響も大きいといえる(石賀ほか, 2010)。分析試料のすべての部位の平均値ではCaO(松坂5.27 wt%; 伊勢5.22 wt%)、MnO(松坂0.24 wt%; 伊勢0.23 wt%)およびCu(松坂15.91 ppm; 伊勢17.78 ppm)であり両地域で大差はないといえる。他の元素についてみると、Fe₂O₃(松坂1.26 wt%; 伊勢0.63 wt%) P₂O₅(松坂1.06 wt%; 伊勢0.73 wt%)およびZn(松坂79.95 ppm; 伊勢71.64 ppm)である。これらの元素は都市の排水中から供給されるその影響が生態系に現れる。松坂地域の方が伊勢地域に比較して人口が多く、河川を通しての影響が表れていると考えられる。

2012年と2013年におけるアマモとコアマモの生育の特徴

2012年の伊勢地域の干潟ではアマモは観察されなかった。これは2011年、2012年の降雨量が多かったことによる。特に宮川上流の宮川観測点では2011年9月に2452 mm、2012年4月(444.5 mm)、5月(513.0 mm)6月(760.0 mm)の雨量が例年に比較して著しく多かったことによる。2013年は4月(194.5 mm)、5月(156.5 mm)6月(325.5 mm)で平年並みの雨量であるといえる。そのため、伊勢、松坂両地域で2013年はアマモの生育が観察された。また、元素組成から見ると松坂地域でCaOのアマモの各部位すべての年平均値は、2012年(2.87 wt%)と2013年(7.67 wt%)を示し、2012年はCaの吸収や付着生物量が低下していたことが示唆される。逆にZn(2012年、95.61 ppm; 2013年63.56 ppm)、Fe₂O₃(2012年、1.53 wt%; 2013年0.93 wt%)、MnO(2012年、0.28 wt%; 2013年0.19 wt%)、P₂O₅(2012年、1.12 wt%; 2013年0.99 wt%)などは2012年で高く、河川からの栄養塩類の供給が多く、アマモ生体により多く吸収されたことが示唆される。

ま と め

松坂地域、伊勢地域での干潟の観察から、アマモやコアマモの群生について、詳しい検討ができた。特に伊勢地域は2012年の降雨量との関係で、干潟にはアマモが認められなかったが、2013年には多数繁殖していた。また、2013年には両海岸ともにパーとトラフの発達が顕著であり、波浪と潮汐のバランスから特徴的な海岸地形が形成されたと考えられる。アマモの成長戦略として、大潮の干潮時に干上がらないよう、このトラフの部分に繁殖している。

アマモ生体を葉身、葉鞘、地下茎に分離し、多元素組成分析を行うことにより、各部位への元素の分配が明らかとなった。Zn, MnOとCaOは明瞭に他の部分に比較して葉身に濃縮する。葉鞘ではP₂O₅含有量が、地下茎にはFe₂O₃含有量が高

い。成長に伴い増加する元素 (MnO, CaO) や成長とはほとんど関連のない濃度をもつ Zn, Cu, Fe₂O₃, P₂O₅ 元素もある。両地域のアマモの元素組成を比較すると, Fe₂O₃, P₂O₅, Znなどは松阪地域で伊勢地域の含有量よりも高く, これは地域による人工的な負荷量の相違によると判断される。アマモの存在から海洋環境の現状を評価するとともに, 元素組成から汚濁や都市からの負荷の状況を推定できると期待される。

文 献

- 愛知県水産試験所, 2014, 伊勢・三河湾貧酸素情報, <http://www.pref.aichi.jp/0000009720.html>.
- 相生啓子, 2000, アマモ場研究の夜明け. 海洋と生物, 131, 516-523.
- 阿知波英明, 2009, 伊勢・三河湾のアマモ場面積の変動. 愛知水試研報, ノート, 29-33.
- 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.
- Ebrahimpour, M. and Mushrifah, A. I., 2008, Heavy metal concentrations (Cd, Cu and Pb) in five aquatic plant species in Tasik Chini, Malaysia. *Environ. Geol.*, 54, 689-698.
- Evrard, V., Kiswara, W., Bouma, T. J., Middelburg, J. J., 2005, Nutrient dynamics of seagrass ecosystems:¹⁵N evidence for the importance of particulate organic matter and root systems. *Marine Ecology Progress Ser.*, 295, 49-55.
- 福田富男, 1987, アマモ場造成に関する研究－Ⅷ播種によるアマモ場造成手法. 岡山水試報, 2, 35-37.
- 細川真也・三好英一・内村真之・中村由行, 2006, メソコスム水槽におけるアマモ地上部の現存量と成長・脱落速度の季節変動. 港湾空港技術研究報告, 45, 25-45.
- 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報告, 29, 33-39.
- 川崎保夫, 1988, 藻場造成の現状と課題②アマモ場. 水産の研究, 7, 44-48.
- 川端豊喜・長谷川恒孝・富田伸明, 1990, 柳井湾におけるアマモの生長様式とアマモ場造成試験. 沿岸海洋研究, ノート, 27, 146-155.
- 川崎保夫・飯塚貞二・後藤弘・寺脇利信・渡辺康意・菊池弘太郎, 1988, アマモ場造成法に関する研究. 電力中央研究所報告 u14, 231p.
- 川崎保夫, 2003, 海草群落 (アマモ場) の機能と修復・創生. 海洋と生物, 145, 85-91.
- 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.
- 黒田伸郎・藤田弘一, 2006, 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較. 愛知水試研報, 12, 5-12.
- Lillebo, A. I., Flindt, M. R., M.A. Pardal, M.A. and Marques, J. C., 2006, The effect of *Zostera noltii*, *Spartina maritima* and *Scirpus maritimus* on sediment pore-water profiles in a temperate intertidal estuary. *Hydrobiologia*, 555, 175-183.
- Lyngby' J. E. and Brix, H., 1989, Heavy metals in eelgrass (*Zostera marina* L.) during growth and decomposition. *Hydrobiologia*, 176/177, 189-196.
- 森田健二・深瀬一之, 1994, 広島市海域におけるアマモ場造成について. 日本沿岸域会議論文集, 6, 97-102.
- Pedersen, M. F. and Borum, J., 1992, Nitrogen dynamics of eelgrass *Zostera marina* during a late summer period of high growth and low nutrient availability. *Marine Ecology Progress Ser.*, 80, 65-73.
- Riosmena-Rodríguez, B., Talavera-Sáenz, A., B. Acosta-Vargas, B. and Gardner, S. C., 2010, Heavy metals dynamics in seaweeds and seagrasses in Bahía Magdalena, B.C.S., México. *J. Appl. Phycol.*, 22, 283-291.
- 高間 浩, 1975, アマモ場での葉上付着生物の組成と季節変化. 神水試業績, No. 79-09, 73-79.
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., Riboulleau, A., 2006, Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232, 12-32.

(受付: 2015年1月15日, 受理: 2015年1月23日)