

京都府久見浜湾における最近 60 年間の有孔虫群集の 変化が示す海面水位変動の意義

野村 律夫* 蜷川 清隆** 西戸 裕嗣***

Significance of Sea-level Variations over the Last 60 Years, Indicated by Foraminiferal Assemblage Changes in Kumihama Bay, Kyoto Prefecture, Southwest Japan

Ritsuo NOMURA*, Kiyotaka NINAGAWA** and Hirotsugu NISHIDO***

Abstract

Brackish foraminifera were investigated from surface sediments and cores collected in Kumihama Bay, northern Kyoto Prefecture, to clarify the impact on brackish organisms of sea-level changes and recent global warming. Foraminifera increased in the 1950s and the early 1970s, corresponding to periods of higher sea levels around the Japanese Islands. Despite continuous sea-level rises from the 1980s, however, they began to decrease and became eutrophic fauna as represented by *Trochammina hadai*, preferring highly fertilized water. This change may be related to annual changes in sea level and lake water circulation, which become more intense during periods with wider annual ranges of sea-surface atmospheric pressure. Sea-level changes observed in Maizuru Bay during the 1950s and 1970s are intimately related to long-term changes in the Aleutian Low Pressure system called the Pacific Decadal Oscillation (PDO), but this has not been the case since the late 1980s. Thus, the mechanism of modern sea-level rises since the 1980s is probably not the same as that of the pre-1980s, and is caused by modern lake water conditions with less circulation and an abundance of *T. hadai*. In addition, the widening and deepening of the channel opening to the Sea of Japan between 1972 and 1975 are also found to contribute to the modification of brackish foraminiferal fauna in the lake.

Key words : brackish environment, sea-level rise, decadal changes, foraminifera, 20th century

キーワード : 汽水環境, 海面水位上昇, 10 年変動, 有孔虫, 20 世紀

I. はじめに

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第四次報告書によると, 人間の営みが自然の巧みな摂理を凌駕し, 多岐にわたって複

雑な影響を地球環境に与えていることが指摘されている (IPCC, 2007)。なかでも地球温暖化による海面水位の上昇が沿岸生態系に与える影響があげられる。しかし, 水位変動は人間活動ばかりでなく自然変動とも関連しているため, その区別が

* 島根大学教育学部地学研究室・汽水域研究センター

** 岡山理科大学理学部応用物理学教室

*** 岡山理科大学自然科学研究所

* Faculty of Education and Research Center for Coastal Lagoon Environment, Shimane University

** Applied Physics, Faculty of Science, Okayama Science University

*** Research Institute of Natural Sciences, Okayama Science University

必ずしも明瞭とはいえない。したがって、現在の海面水位変動がいかに沿岸生態系に影響を及ぼしているか、また及ぼしてきたのか、といった問題については、長期にわたる生態学的情報が必要となるため十分に理解されているとはいえない状況にある。

このような現状のなかで、海跡湖のような閉鎖性海域の堆積物は近年の海面水位変動が沿岸生態系に及ぼしてきた影響について重要な情報を提供してくれる。過去 100 年間における海面水位変動の記録は世界各地の験潮施設で観測されているため、堆積物中の生物の遺骸や堆積物の化学的特徴を検討することで、年単位での解析と比較が可能となる。つまり長期的な生態系の変動を現在の視点に基づいて時系列のなかで評価することができる。

海面水位の変動には、長期的・短期的な周期性のある変動や地域性がみられるが、日本沿岸で共通した上昇期や降下期のあることが確認されている (Senjyu *et al.*, 1999; 小西ほか, 2004; 櫻井・小西, 2005)。とくに 1940–1950 年代やレジームシフトが起こったとされる 1970 年代中期には顕著な海況の変動がみられ、現在の海面上昇と比較するうえで重要な視点を提供してくれる。筆者のうち野村は、このような年代における環境変動に注目し、具体的な変化過程について原生動物の有孔虫を使って復元作業を行っている。汽水域から海洋にかけて広範囲に生息する有孔虫は、海面の水位変動を理解するうえで有効であることが指摘されている (Scott and Medioli, 1980; Patterson, 1990; Williams, 1994; Hayward *et al.*, 1999, 2004; Culver and Horton, 2005; Horton and Edwards, 2006; Southall *et al.*, 2006)。しかし、これらの多くは長期的な変動を扱ったものであり、数年・数十年単位の水位変動の解析への応用は、まだ端緒についたばかりである (Nomura, 2003; Nomura *et al.*, 2006; Majewski and Zajaczkowski, 2007)。

ここでは、日本海に面した京都府北部の久美浜湾で約 60 年間の海面水位変動が生態系へ与えた影響を有孔虫群集から検証し、1980 年代後半以

降の海面上昇が過去の海面上昇と異なったメカニズムのなかで駆動していることを指摘する。

II. 水質環境

久美浜湾は日本海と砂州によって隔てられた海跡湖である。日本海とは幅 50 m ほどの水路によってつながっており、閉鎖性汽水湖である。湾内へは佐濃谷川、川上谷川、久美谷川、桁谷川が流入している。面積は 6.93 km²、周囲が 24 km であり、湾奥部から砂州側へ水深を増し、最も深い水深 (21 m) が北東部に存在する (図 1)。

コア採取時 (2003 年 8 月) に実施した水質調査において、顕著な塩分躍層が水深約 2 m に発達していることが神崎沖 (Loc.1) で確認され、溶存酸素濃度が同地点の水深 5–6 m で急激に低下している様子が確認された。京都府 (2005) が実施した 2004 年 5 月から 2005 年 1 月までの水温、塩分、溶存酸素濃度の鉛直分布は図 2 に示した。

水温：緩やかな水温低下が春季と夏季にみられ、秋季から冬季にかけては、水深 2–4 m 付近で水温が逆転し、上層 (1–3.5 m) で低く、下層 (3.5 m 以深) で高くなる。冬季の下層水温は 15℃で安定しており、秋季でも約 20℃となっている。最も深い K2 地点 (佐濃谷川流入点) の水深 20 m 付近では 15℃前後で安定している。

塩分：春季を除き、水深 2–3 m に塩分躍層の発達が顕著である。下層水は 30–33 (PSU) で安定している。春季は塩分が下層でも 27–29 (PSU) と低く、とくに湾奥中央部の K3 地点 (神崎地点) で顕著である。

溶存酸素濃度：年間を通して、溶存酸素の鉛直分布には変化がみられる。春季には深度とともに緩やかに低下しているが、夏季になると湾奥部 (K4) で水深 4 m、その他の地点では水深 6–8 m において急激に酸素濃度が低下する。無脊椎動物の行動による溶存酸素濃度の区分が Tyson and Pearson (1991) によってまとめられている。ここでは区分の名称を一般的な慣例に従うと、水深 10 m 以深は無酸素状態 (0.0 mg/l) となる。秋季には水深 3 m までの上層水と 3–8 m の上部下

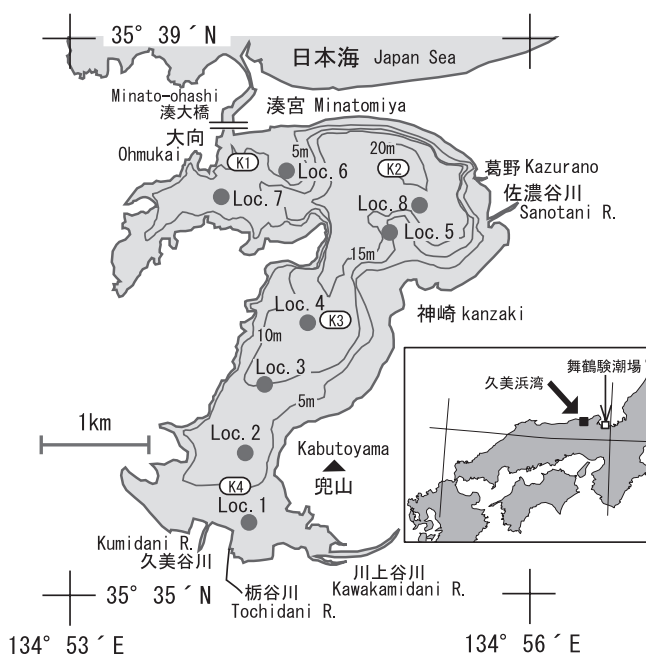


図 1 久見浜湾と試料の採取地点. 地点 2 と地点 4 では柱状採泥を実施. K1-K4 は京都府が実施している水質調査地点.

Fig. 1 Locations of samples (Locs. 1-8) and hydrographic observation stations (K1-K4) in Kumihama Bay. Sediment core samples from Locs. 2 and 4.

層水, さらに 12 m 以深の下層水の 3 段階で酸素濃度が不連続に低下している。下層水は無酸素ないし貧酸素状態 ($< 4.3 \text{ mg/l}$) が続いている。とくに湾奥部 (K4) では, 水深 1 m でも酸素濃度が急減し, 下層水は貧酸素状態となる。冬季の下層水は 5 mg/l 前後で安定した状態になっている。しかし, 冬季でも湾奥部の下層水は低いのが特徴的である。

III. 最近 60 年間の海面水位変動

久見浜湾における海面水位の変動は, 舞鶴湾の験潮所で記録された 1950 年以降の変動史を参考にすることができる (国土地理院海岸昇降検知センター; <http://cais.gsi.go.jp/cmdc/centerindex.html> [Cited 2007/12/5])。日本では長期にわたって水位変動が観測されている験潮所は限られているが, 似た変動パターンを抽出することができる

(Senjyu *et al.*, 1999; 気象庁, 2005)。その特徴は, ① 1940 年代後半から 1950 年代前半にかけて水位が高くなる。② 1950 年代最後期から 1960 年に海面水位が低下する。③ 1970 年前半に数年間, 水位が高くなる。④ 1970 年代後半に水位が低下している。⑤ 1980 年代後半以降現在まで海面水位が変動を伴いながら一定して上昇している。この 5 つのパターンは, 国内のどの験潮所でも顕著に表れるものではないが, 舞鶴湾の記録では変動スケールが数 cm 単位から 10 数 cm 単位でこの特徴を捉えている。

IV. 研究方法

1) 採泥と分析試料

湾奥部から最大水深方向へ 6 地点, また湾口部付近の 2 地点で湖底の採泥を行った (図 1; 表 1)。実施日は 2003 年 8 月 4 日であった。表層採

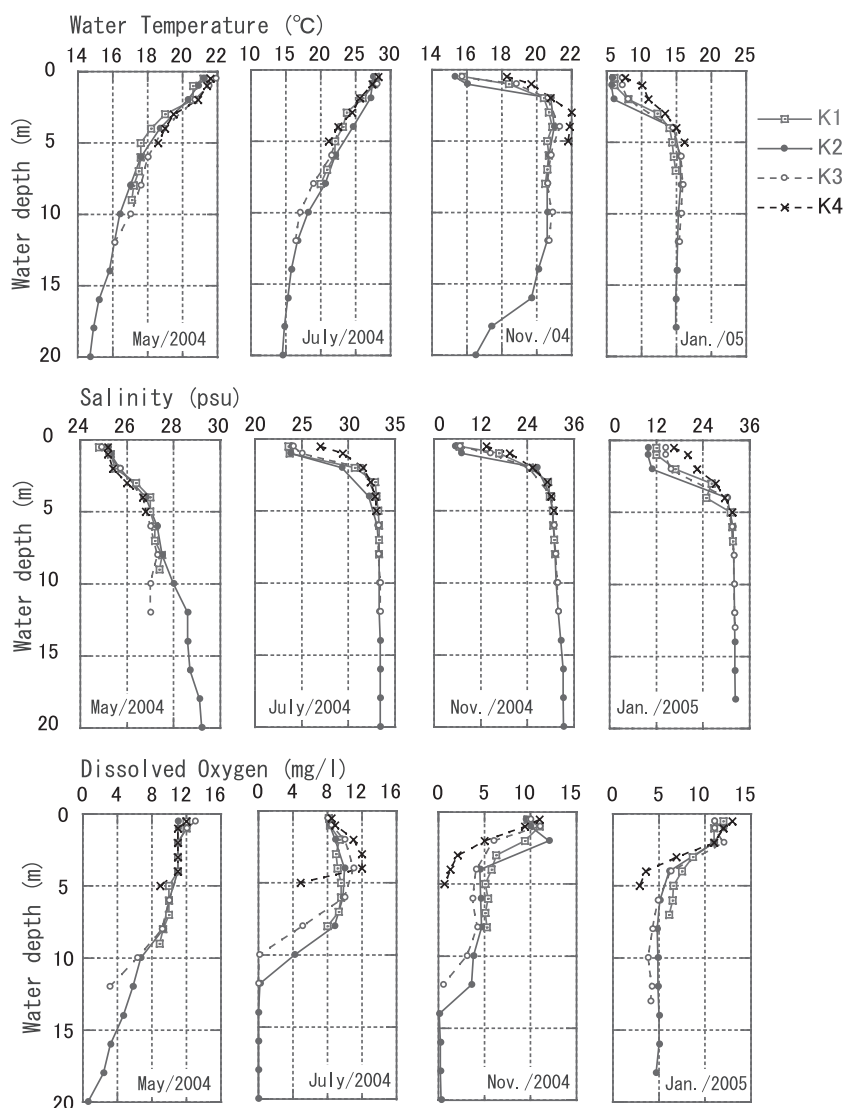


図 2 K1 (湾口部), K2 (佐濃谷川流入点), K3 (神崎地先), K4 (湾奥部) における水温, 塩分, 溶存酸素量の鉛直分布の季節変化 (京都府, 2005 による).

Fig. 2 Temperature, salinity, and dissolved oxygen content profiles at four stations (Data reported by the government of Kyoto Prefecture in 2005.)

泥は Ekman-Birge 型採泥器を使い, 表層 1.0 cm を約 5 g 剥ぎ取り, 有孔虫群集の分析に供した。また, 地点 2 (水深 6 m) と地点 4 (水深 13 m) では, 径 4.0 cm のアクリルパイプを装着した簡易重力式コアラーを使って柱状採泥を行った。柱状試料は現地で表層から 0.5 cm 間隔で約 10 cm

の深度まで連続切断し, 試料の 1/2 を放射性年代測定と有機物分析, 1/2 を有孔虫群集の分析に利用した。

2) ^{210}Pb と ^{137}Cs の測定

試料は, 岡山理科大学の低エネルギー γ 線用半導体検出器 (Ge-LEPS) を用いて γ 線スペクト

表 1 試料の採取地点と水深.

Table 1 List of sample locations, water depths, and core length.

地点	東経	北緯	水深(m)	柱状採泥	コア長
1	134°54'06.4"	35°36'29.3"	4.0		
2	134°54'06.7"	35°36'49.4"	6.0	○	14 cm
3	134°54'12.8"	35°37'10.5"	10.0		
4	134°54'31.6"	35°37'33.0"	13.0	○	13 cm
5	134°54'51.5"	35°37'57.6"	12.0		
6	134°54'21.3"	35°38'14.4"	3.0		
7	134°53'47.9"	35°38'08.0"	6.4		
8	134°55'09.6"	35°38'06.8"	16.3		

ルを測定した。測定は、粉末にした堆積物 1.3 g を円盤状にプレスし、ポリエチレンフィルムで密封したのち ^{226}Ra とその娘核種が放射平行に達する約 1 ヶ月後に 1 週間連続して測定を行った。 ^{210}Pb と ^{137}Cs は、それぞれ 46.5 keV と 662 keV のエネルギーを測定した。過剰鉛の算出にあたっては、 ^{210}Pb の実測値から ^{226}Ra の放射エネルギーを差し引いた値を用いた。 ^{226}Ra の放射エネルギーは ^{214}Pb の 352 keV の測定値から求めた。

3) 有機物分析

試料中には貝殻片が含まれていることが多いため、すべての試料中の炭酸塩を 1 規定の塩酸で十分に除去した後にヤナコ MT-5 型 CHN コードで分析した。

4) 有孔虫

堆積物を 250 メッシュ（開口径 63 μm ）で水洗し、ローズベンガル液で生体染色を施した。表層堆積物中の有孔虫は染色した生体個体のみを摘出し、群集の解析を行った。柱状試料中の有孔虫は生体個体と遺骸個体を別々に摘出した。しかし、採泥を実施した時期が貧酸素化する夏季であったため（前述）、生体個体の確認ができたのは試料当たり数個体程度であった。したがって、ここでは生体個体を除いて遺骸個体のみを分析した。

汽水域の有孔虫種は大陸棚に生息する群集に比べて多様性が低く、主要種は限られている。また、幼体と成体が一緒になった群集には種の構成割合に偏りが生じることもある。ここでは有孔虫

群集を成体をもとに検討するため、摘出した有孔虫のサイズは 150 メッシュ（開口径 100 μm ）以上にした。

V. 結 果

1) 底質

今回採泥した地点は、泥質堆積物よりなり、湾の中央付近のくぼ地では硫化水素臭を伴った暗黒色泥よりなっている。湾口部に近い水深 5–7 m までは砂質堆積物よりなる。湾口部に近い西側水域では藻類が湖底表面を覆っている。地点 2 のコア試料は、約 15 cm まではほぼ様な泥質堆積物よりなり、含水率が表層から深部にかけて 70% から 60% になる。しかし、深さ 3.0–4.0 cm では 50% 台に低下している。地点 4 のコア試料は、約 12 cm まで様な泥質堆積物で、含水率が表層の 80% 台から深部の 60% 後半へと連続的に低下する。

2) 堆積速度

堆積速度の計算には、過剰鉛の量を通常の指数関数で内挿した結果を用いた。図 3 と図 4 に地点 2 と 4 の過剰鉛濃度（対数値）とコア深度との関係を示す。 ^{210}Pb 年代計算からは地点 2 が 0.91 mm/year、地点 4 では 1.1 mm/year の堆積速度が求められる。また ^{137}Cs の分布からは、地点 2 で 3.0–3.5 cm にピークが確認されることから、このピークを放射性物質が大気中に大量に放出された 1963 年と仮定した場合、0.8–0.9 mm/year の堆積速度を見積もることができる。これらの堆

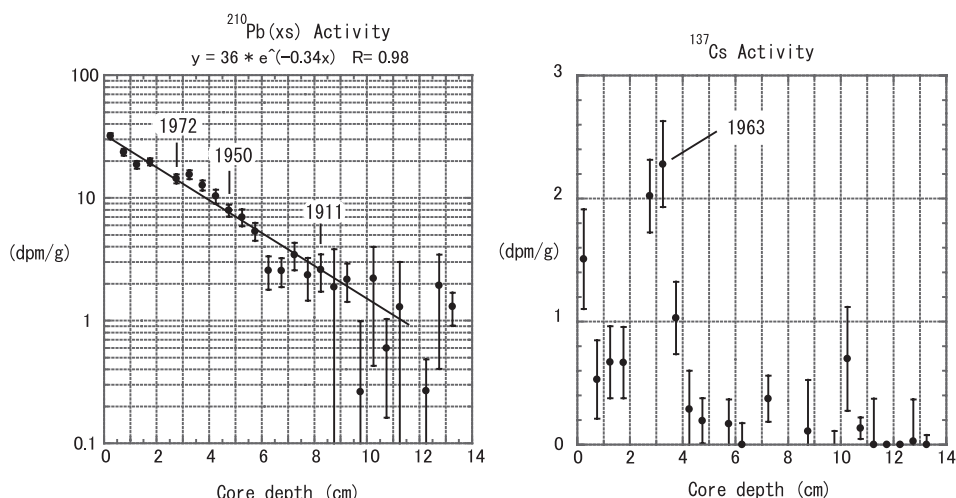


図 3 地点 2 におけるコア深度に対する ^{210}Pb (excess) と ^{137}Cs の濃度分布.

Fig. 3 Downcore distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs concentrations at Loc. 2.

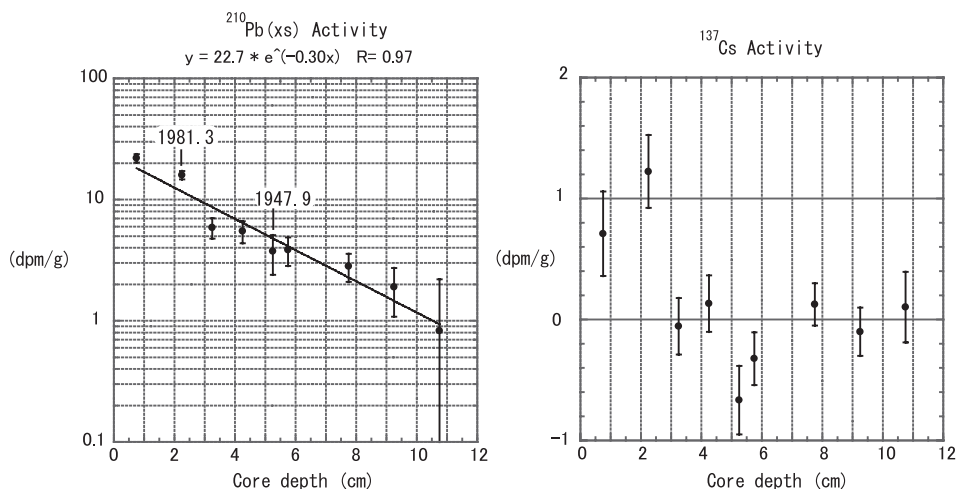


図 4 地点 4 におけるコア深度に対する ^{210}Pb (excess) と ^{137}Cs の濃度分布.

Fig. 4 Downcore distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs concentrations at Loc. 4.

積速度は、 ^{210}Pb から求めた堆積速度とほぼ一致した結果となり、 ^{210}Pb 法で求めた堆積速度は、妥当であると考えられる。なお、地点 4 における ^{137}Cs のピーク (2.0-2.5 cm) は放射能濃度が地点 2 の 1/2 程度しかなく、堆積年代を特定できる層準にならないと判断した。しかし、地点 2 の分布と比較すると、年代を特定するピークは

3.0 cm 前後の層準にあることが予想される。なお、この層準の試料は分析に必要な重量が得られなかったため測定ができなかった。

3) 有孔虫群集

3-1) 湾内における生体群集分布

久見浜湾の有孔虫群集は、沿岸帯から閉鎖性内湾域の群集まで幅広い生態系が確認された。主要

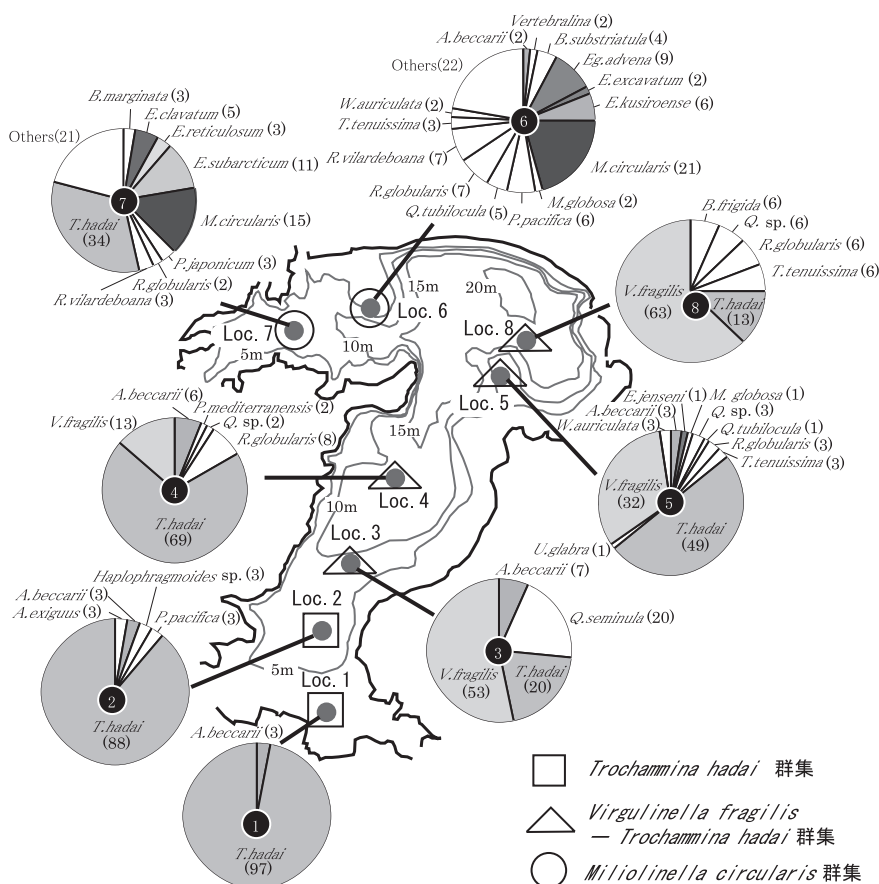


図 5 表層堆積物中の有孔虫(生体)の産出割合。各種の括弧内の数値は割合を示す。

Fig. 5 Live foraminiferal occurrences and the distribution of the assemblage. Numerals in parentheses indicating the relative abundance of the foraminiferal taxa.

A. beccarii = *Ammonia* "beccarii", *A. exiguus* = *Ammobaculites exiguus*, *B. frigida* = *Buccella frigida*, *B. substriatula* = *Brizalina substriatula*, *B. marginata* = *Bulimina marginata*, *Eg. advena* = *Elgerella advena*, *E. clavatum* = *Elphidium clavatum*, *E. excavatum* = *Elphidium excavatum*, *E. jensenii* = *Elphidium jensenii*, *E. kusiroense* = *Elphidium kusiroense*, *E. reticulosum* = *Elphidium reticulosum*, *E. subarcticum* = *Elphidium subarcticum*, *M. circularis* = *Miliolinella circularis*, *M. globosa* = *Murrayinella globosa*, *P. japonicum* = *Pseudononion japonicum*, *P. mediterraneensis* = *Planorbulina mediterraneensis*, *P. pacifica* = *ParaTrochammina pacifica*, *Q. seminula* = *Quinqueloculina seminula*, *Q. tubilocula* = *Quinqueloculina tubilocula*, *Q. sp.* = *Quinqueloculina* sp., *R. globularis* = *Rosalina globularis*, *R. vilardeboana* = *Rosalina vilardeboana*, *T. hadai* = *Trochammina hadai*, *T. tenuissima* = *Triloculina tenuissima*, *U. glabra* = *Uvigerinella glabra*, *V. fragilis* = *Virgulinella fragilis*, *W. auriculata* = *Wiesnerella auriculata*.

種の群集を占める割合と種の多様性をもとに、以下の3つの群集に区分することができる(図5; 表2)。

***Trochammina hadai* 群集**: 湾奥部, 地点1

と2によって示される, 水深6mまでの群集である。*Trochammina hadai* が88%以上を占める群集で, *Ammonia* "beccarii", *Ammobaculites exiguus* や *Haplophragmoides canariensis* が付

表 2 表層堆積物中（湿重量約 10 g）の生体個体の産出表。地点 6 と 7 はどちらかが二項分布で有意な産出（95% レベル）を示す種類を表示（ただし、他の地点での産出の場合は表示）。

Table 2 Occurrence of live foraminifera from the surface sediments (ca. 10 g of wet sediments) at each location. Foraminifera from Locs. 6 and 7 are indicated by statistically significant occurrence.

	Loc. 1	Loc. 2	Loc. 3	Loc. 4	Loc. 5	Loc. 6	Loc. 7	Loc. 8
<i>Ammobaculites exiguus</i>		1						
<i>Ammonia "beccarii"</i>	1	1	1	4	2	4		
<i>Brizalina substriatula</i>						10		
<i>Buccella frigida</i>							1	1
<i>Bulimina marginata</i>							4	
<i>Cibicides refulgens</i>						3	2	
<i>Cribriculina ? sp.</i>						3		
<i>Eggerella advena</i>						22	2	
<i>Elphidium clavatum</i>						1	8	
<i>Elphidium excavatum</i>						4	2	
<i>Elphidium jenseni</i>					1	26		
<i>Elphidium kusiroense</i>						14		
<i>Elphidium reticulosum</i>							5	
<i>Elphidium subarcticum</i>							16	
<i>Haplophragmoides sp.</i>		1						
<i>Miliolinella circularis</i>						48	23	
<i>Murrayinella globosa</i>					1	4		
<i>Paratrochammina pacifica</i>		1				15	2	
<i>Planorbulina mediterraneensis</i>				1		3		
<i>Pseudonion japonicum</i>							5	
<i>Quinqueloculina seminulum</i>			3				2	
<i>Quinqueloculina tubilocula</i>					1	11	1	
<i>Quinqueloculina sp.</i>				1	2	2	2	1
<i>Rosalina globularis</i>				5	2	17	3	1
<i>Rosalina vilardeboana</i>						17	5	
<i>Textularia tenuissima</i>					2	7		1
<i>Trochammina hadai</i>	33	32	3	46	39	1	49	2
<i>Uvigerinella glabra</i>					1			
<i>Vertebralina sp.</i>						4	2	
<i>Virgulinella fragilis</i>			8	9	25			10
<i>Wiesnerella auriculata</i>					2	4		
others						13	15	
TOTAL	34	36	15	66	78	233	149	16
有意な産出個体数 (95%レベル)	2.9	2.9	2.7	3.0	3.0	3.0	3.0	2.7

随する。多様性が低く閉鎖性内湾域の泥質の堆積物に一般的にみられる群集組成よりなる。

Virgulinella fragilis*-*Trochammina hadai

群集：地形的に湾の中央部の泥質堆積物よりなる

くぼ地に発達する群集で、*Virgulinella fragilis* と *T. hadai* が優占する。水深では 10-16.3 m までの地点で確認された（地点 3, 4, 5, 8）。その他、*Rosalina*, *Quinqueloculina*, *A. "beccarii"*

表 3 地点 2 の柱状試料における有孔虫の産出表.

Table 3 Foraminiferal occurrence from the core at Loc. 2.

Depth interval (cm)	Mid-depth (cm)	<i>Ammonia</i> "beccarii"	<i>Ammonia</i> cf. <i>tepida</i>	<i>Ammonia</i> <i>tepida</i>	<i>Elphidium</i> <i>crispum</i>	<i>Elphidium</i> <i>excavatum</i>	<i>Elphidium</i> <i>jensei</i>	<i>Elphidium</i> <i>kusiroense</i>	<i>Elphidium</i> <i>matsukawauraense</i>	<i>Elphidium</i> <i>somaense</i>	<i>Glabratella</i> <i>globosa</i>	<i>Haplophragmoides</i> sp. miliolids	<i>Miliolinella</i> <i>circularis</i>	<i>Miliolinella</i> sp. (with striation)	<i>Murrayinella</i> <i>globosa</i>	<i>Quinqueloculina</i> <i>seminulum</i>	<i>Quinqueloculina</i> <i>tubilocula</i>	<i>Rotaliammina</i> sp.	<i>Trochammina</i> <i>hadai</i>	<i>Uvigerinella</i> <i>glabra</i>	<i>Valvulineria</i> <i>hamanakoensis</i>	<i>Virgulinerella</i> <i>fragilis</i>	TOTAL	有意な産出個体数 (95%レベル)	堆積物乾燥重量 (g)	有孔虫数 (堆積物 1 グラム当り)
0-0.5	0.25	2							1				2					8	1				14	2.7	1.7	8.14
0.5-1.0	0.75	5			1	1	3					5		2	1			17	1				36	2.9	2.4	15.1
1.0-1.5	1.25	1						1				4						14		1			21	2.8	2.4	8.82
1.5-2.0	1.75	3		2			4	3	1			2				1		9			2		27	2.8	2.0	13.3
2.0-2.5	2.25	2						2		1			8	15	2			23		1	2		56	2.9	2.6	21.8
2.5-3.0	2.75	10		3				2					55	12		1		32		2	8		125	3.1	2.8	45.3
3.0-3.5	3.25	4	13	7									27					12					63	3.2	3.1	20.7
3.5-4.0	3.75		1	1													1					3	1.9	2.8	1.06	
4.0-4.5	4.25	1				1							4	5							6	17	2.8	1.9	8.76	
4.5-5.0	4.75					1				1			14					5			1	22	2.8	1.8	12.2	
5.0-5.5	5.25	1	1										34	4				13			5	58	2.9	2.7	21.7	
5.5-6.0	5.75	1					1		2				11				4	14				33	2.9	2.6	12.5	
6.0-6.5	6.25	2											3					1		11		17	2.8	2.4	7.23	
6.5-7.0	6.75	2											20	1				2		3		28	2.8	2.3	12.2	
7.0-7.5	7.25	4		4		1		2		1			19		1		1	15			8	56	2.9	2.6	21.5	
7.5-8.0	7.75	3		1									23					11				38	2.9	3.0	12.5	
8.0-8.5	8.25		1	2								1	22					17		3		46	2.9	3.6	12.8	
8.5-9.0	8.75	1											8					3				12	2.7	3.2	3.72	
9.0-9.5	9.25	6	1	1							1		8	1				2	4		5	29	2.8	3.2	9.18	
9.5-10	9.75	3	1	1								2	3					2				12	2.7	2.9	4.14	

などが付随するが、地点によって異なっている。*V. fragilis* はニュージーランドのかつて汚染が進んだウエリントン湾で記載された種であり、富栄養化し、しかも溶存酸素濃度が通常の 50% 程度以下になった貧酸素の環境を好むとされている (Grindell and Collen, 1976)。

***Miliolinella circularis* 群集：**湾口部に近い水深 3-7 m の砂質の底質を特徴づける群集である (地点 6 と地点 7)。地点によって群集の組成が大きく変わるが、共通して *Miliolinella*, *Rosalina*, elphidids が特徴的に多い。その他優占率

は低い *T. hadai*, *ParaTrochammina pacifica*, *Quinqueloculina*, *Eggerella advena* など多くの沿岸性の有孔虫が産出している。多様性のある群集で特徴づけられる。

3-2) コア試料における群集分布

地点 2 および地点 4 と連続して産出する有孔虫種は限られている (表 3, 4)。地点 2 では、沿岸群集を構成する種類が不連続に産出するが、コア全体では、*M. circularis*, *T. hadai*, *V. fragilis*, *A. "beccarii"* で特徴づけられる。*M. circularis* と *T. hadai* は、コア深度の 3.0 cm と 5.0 cm で乾燥堆

表 4 地点 4 の柱状試料における有孔虫の産出表.

Table 4 Foraminiferal occurrence from the core at Loc. 4.

Depth interval (cm)	Mid-depth (cm)	<i>Ammonia "beccarii"</i>	<i>Ammonia</i> sp.	<i>Brizalina substriatula</i>	<i>Elphidium excavatum</i>	<i>Elphidium jensei</i>	<i>Elphidium kusiense</i>	<i>Glabratella globosa</i>	<i>Hauerina</i> sp.	<i>Murrayinella globosa</i>	<i>Paratrochammina pacifica</i>	<i>Quinqueloculina seminulum</i>	<i>Quinqueloculina</i> sp.	<i>Rosalina globularis</i>	<i>Rosalina vilardeboana</i>	<i>Rotaliammina</i> sp.	<i>Textularia tenuissima</i>	<i>Tretomphalus bulloides</i>	<i>Triloculinella</i> sp.	<i>Trochammina hadai</i>	<i>Valvulineria hamanakoensis</i>	<i>Virgulinerella fragilis</i>	TOTAL	有意な産出個体数 (95%レベル)	堆積物乾燥重量 (g)	有孔虫数 (堆積物 1 グラム当り)
0-0.5	0.25	1																		1	27	29	2.8	1.2	25.22	
0.5-1.0	0.75							1						1						1	6	9	2.5	1.5	5.844	
1.0-1.5	1.25										1									2	10	13	2.7	1.7	7.471	
1.5-2.0	1.75																			1	15	16	2.7	1.8	8.840	
2.0-2.5	2.25				1							1								1	11	14	2.7	1.0	13.73	
2.5-3.0	2.75					1					1					1				3	10	16	2.7	1.0	16.49	
3.0-3.5	3.25																1	1		2	128	132	3.1	1.6	84.62	
3.5-4.0	3.75										3									5	140	148	3.0	1.8	83.15	
4.0-4.5	4.25			1									1							2	117	121	2.9	1.3	93.80	
4.5-5.0	4.75														1					2	185	188	3.0	2.3	81.74	
5.0-5.5	5.25	1			1				1		2										270	275	3.0	2.0	138.9	
5.5-6.0	5.75		1								2										144	147	2.9	1.7	85.96	
6.0-6.5	6.25											1									1	160	162	3.1	2.0	80.60
6.5-7.0	6.75																				52	52	2.9	1.7	30.40	
7.0-7.5	7.25									2											132	134	3.1	1.8	75.00	
7.5-8.0	7.75	1										1							1		229	232	3.1	2.2	107.4	
8.0-8.5	8.25																				1	128	129	3.1	2.1	61.03
8.5-9.0	8.75																				70	70	2.9	2.3	31.11	
9.0-9.5	9.25											1	1							1	1	94	98	2.9	2.2	43.75
9.5-10	9.75				1		1				2											72	76	3.0	2.5	30.77

積物 1 g 当り 5-20 個体が産出している。コア深度の 7.0-8.0 cm でもやや多く産出している。しかし、両者は 2.5 cm 以浅では異なっており、*T. hadai* が多くなるのに対して、*M. circularis* は産出しなくなる (図 6)。地点 4 では、*V. fragilis* の優占した群集よりなる。二項分布における 95% での有意性はないが、*T. hadai* と *Quinqueloculina tubilocula* がコア上部でわずかに産出している。*V. fragilis* はコア深度の 3.0-8.0 cm の範囲で乾燥堆積物当り平均 80 個体が産出するが、深度 3.0 cm より上部で急減する (図 7)。

VI. 議 論

1) 有孔虫群集の分布の特徴

有孔虫群集の湾内での分布は、今回の限定された環境要素からみると、底質と溶存酸素が深く関係している。砂質堆積物よりなる地点 6 と 7 は、*M. circularis* 群集からなり、水路に近い場所でもあることから日本海沿岸水の流入が比較的容易な場所である。泥質堆積物よりなるその他の地点では、*Trochammina* と *Virgulinitella* によって特徴づけられている。水温と塩分は、ほぼ水深に

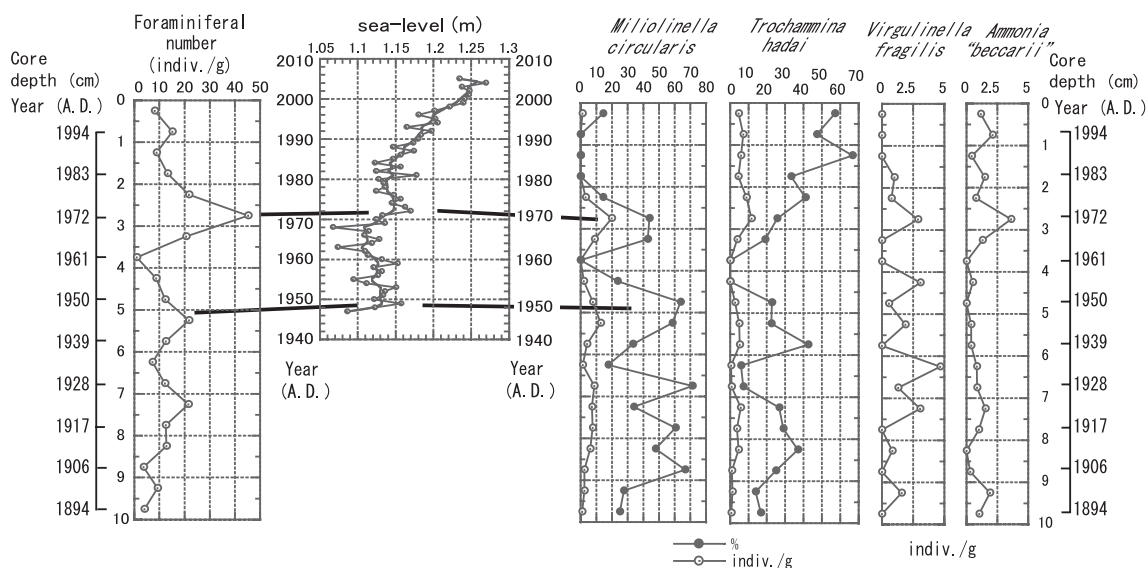


図 6 舞鶴湾の海面水位変動と地点 2 における主要な有孔虫のコア試料中での深度分布. 乾燥堆積物 1g 当りの有孔虫個体数で表示.

Fig. 6 Downcore distribution of foraminifera at Loc. 2, with reference to sea-level changes at Maizuru Tidal Observatory. Foraminiferal occurrences indicated by individual number per one gram of dried sediment. Sediment ^{210}Pb ages are also shown.

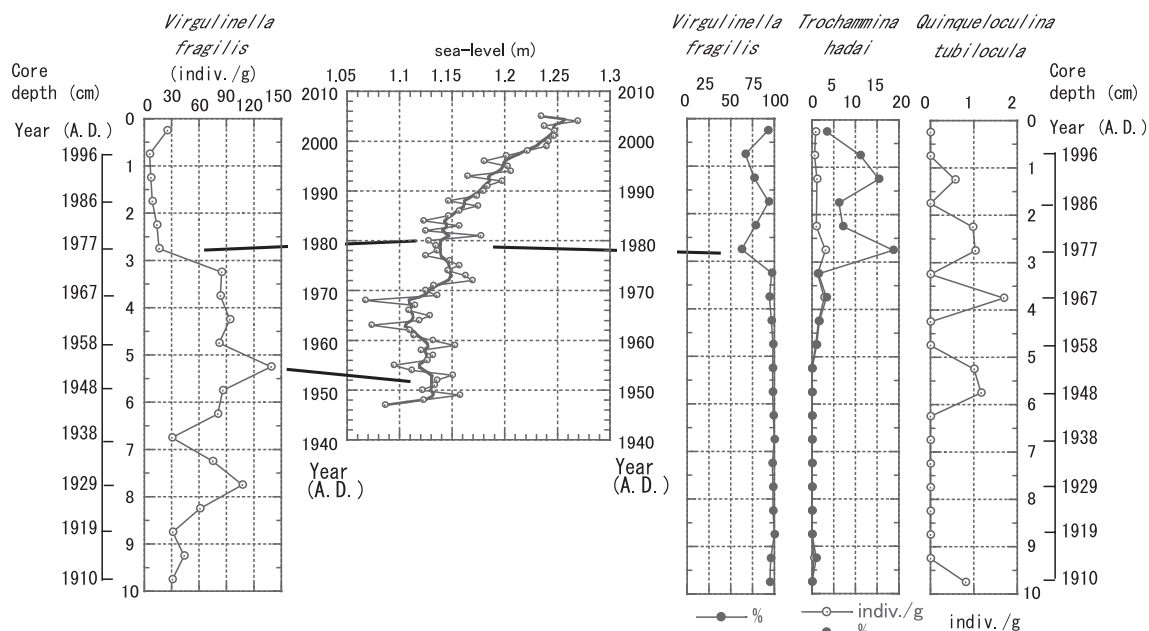


図 7 舞鶴湾の海面水位変動と地点 4 における主要な有孔虫のコア試料中での深度分布. 乾燥堆積物 1g 当りの有孔虫個体数で表示.

Fig. 7 Downcore distribution of foraminifera at Loc. 4, with reference to sea-level changes at Maizuru Tidal Observatory. Foraminiferal occurrences indicated by individual number per one gram of dried sediment. Sediment ^{210}Pb ages are also shown.

じた変化を示しており、地点ごとの変化は少ない。しかし、溶存酸素は場所によって水深別濃度が異なっており、有孔虫の分布を支配する要因になっているようにもみえる（図2）。1年のうち5月を除いて貧酸素状態になりやすい湾奥部では *Trochammina* が支配する。冬季にのみ酸素が供給され、他の季節は無酸素状態または貧酸素状態になっている湾の中央のくぼ地では *Virgulinea* が多い。舞鶴湾奥部にある阿蘇海でも同様の群集が確認されている（Takata *et al.*, 2005）。阿蘇海では、*T. hadai* は酸素がしばしば供給される貧酸素状態の場所に多く、*Virgulinea* は年間を通して酸素の供給が乏しい場所に多い。貧酸素ないし無酸素環境に対する生存能力は *Trochammina* より高いという。今回これら両種については決定的な分布の支配要因を求めることはできないが、溶存酸素濃度ばかりでなく、藻類やバクテリアとの関係など食物としての有機物組成に対する嗜好性も異なっていることも考慮する必要がある。例えば、Topping *et al.* (2006) によると、摂食する脂肪酸の種類から *Ammonia* と *Haynesina* はともにバクテリアを利用するが、さらに *Ammonia* は微小藻類（緑藻類、シアノバクテリア、鞭毛藻類）を利用していることを実験的に検証している。このように、食物連鎖における位置づけや摂食様式といった総合的比較が必要である。ともに耐貧酸素型の生態を有しているにもかかわらず、*Virgulinea* が水深の深い部分（> 10 m）に限られていることは、湾内の水の循環過程とも関連してバクテリアや微小藻類との共生も影響しているかもしれない。近年の沿岸性有孔虫群集のなかで主要種の交代が起こったときには生態系にも大きな変化を伴っていることが多く、例えば大阪湾ではプランクトン群集も珪藻群集から赤潮型の珪藻群集や渦鞭毛藻類群集への交代と同期していることは、これら食物連鎖の変化が群集変化に影響を与えているものとみられる（Tsujimoto *et al.*, 2006）。

2) 水路拡幅に伴う湖水環境

久見浜湾の内外で起こった自然災害や人為的工事のなかで、湾内の水環境へ関連する主要な出来

表 5 久見浜湾と周辺での特徴的な自然災害の記録と主な人為的活動の記録。

Table 5 Major disasters and human activities in and around Kumihama Bay.

工事年	主な工事の内容
1905-1913	新水路（現水路の原形）の開削
1922-1925	新水路（現水路の原形）の拡幅
1932-1935	新水路の2分岐（東側水路の開削）
1941-1949	山腹崩壊（1941）；崩壊物の撤去
1972-1975	水路の掘り下げと拡幅工事

事を表5に示した。

1905-1913年に現在の水路の原型が形成されるまでは、直線的な自然水道が現在の湊宮の一部を横切って日本海へ延長していた（西田, 1976）。この水路は季節的に変化しやすかったため、現在とは異なった湖水環境であったことが予想されるが、有孔虫群集は大きく変化していなかったことが今回明らかとなった。しかし、1972-1975年にかけて行われた水路の拡幅と掘り下げは、群集変化を伴っていたことが確認できる。前述のように、水深の浅い地点2では、*T. hadai* が多く産出するようになり、1970年代まで産出していた *Miliolinella* が70年代の前半に急増して以降、現在まで減少している（図6）。水深の深い地点4においては、*V. fragilis* の産出が極端に低下し、反対に *T. hadai* が産出個体数は少ないが60年代後半から70年代にかけて増加している（図7）。偶然にも、この時期、後述するように海面水位が一時的に高くなっていることも群集変化の要因になっている。このような70年代以降の *T. hadai* と *V. fragilis* の産出は特徴的である。したがって、これらの有孔虫群集の産出の変化は、海面水位の変動と人為的な水路の工事によって湾内の水循環が変化を受けたことが要因になったものと考えられる。本論文で確認した表層堆積物中の生体群集で *T. hadai* が主要種であることから久見浜湾の現在の群集は1972-1975年に再改変を受け、現在まで継続的に発展してきたといえる。

3) 海面水位の変動に伴う湖水環境

上述した人為的影響とは別に、1970年前半お

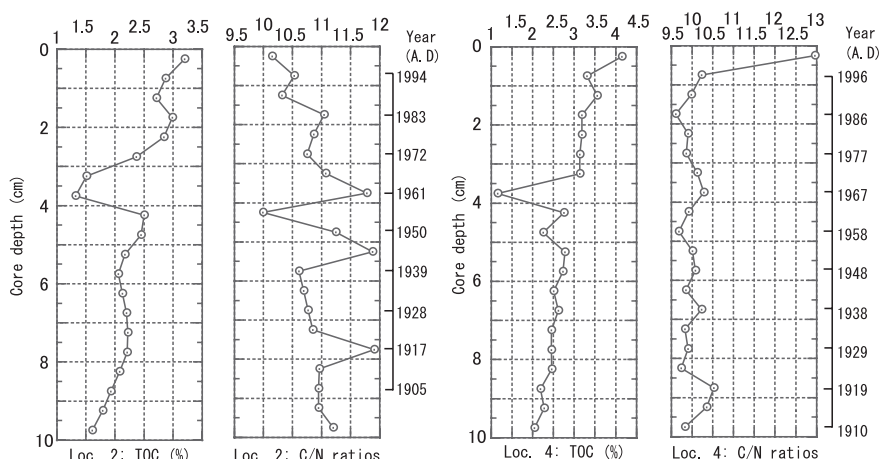


図 8 地点 2 と地点 4 におけるコア試料中での有機炭素量 (TOC) と有機炭素と窒素の比 (C/N 比) の深度分布。

Fig. 8 Downcore distribution of TOC and C/N ratios at Locs. 2 and 4. Sediment ^{210}Pb ages are also shown.

よびそれ以降の群集は海面水位の変動と密接な関係がみられる。1970 年代前半の海面水位の上昇期間は 3-4 年間のことであり、70 年代後半にはふたたび低下する。この一時的な上昇に符合して湾奥部では上述した有孔虫種 (*Trochammina*, *Miliolinella*) が産出個体数を増加させている。これは、1972-1975 年の水路の掘削と拡張の時期と符合した海面水位の上昇に伴って沿海岸水の湾内への流入が促進され易くなった結果と考えられる。島根県と鳥取県の県境に位置する汽水湖の中海では低気圧の通過に伴って水深を異にするセジメントトラップの中へ沿岸に生息する *Quinqueloculina* が混入することが確認されている (野村, 2003)。浮遊物に付着して底生有孔虫が運搬されたものと考えられ、海水の流入の証拠となっている。このような例を参考にすると、湾の中央部 (地点 4, 5) で貧酸素環境が形成されやすい場所での *Quinqueloculina* や *Planorbulina mediterraneensis*, *Wiesnerella auriculata*, *Rosalina globularis* のような沿岸性有孔虫の産出の特徴が理解できるといえよう。

1970 年代前半のこのような有孔虫と海面水位との関係は、1950 年代にも同様な現象として確

認される。1950 年代の海面水位の上昇は、舞鶴ではそれ以前の水位との関連がわかっていないため明確ではないが、全国の水位変化と一致して、高めに変動している。*Trochammina* や *miliolids* の個体数が一時的に上昇していることから、浮遊物を含む海水の流入が増加していたと考えられる。湖水内での生産性が一時的に高まったことも予想される。地点 2 では、コア深度 4.0 cm 付近で C/N 比が変動している (図 8)。なお、コア深度 3.0-4.0 cm (1960 年代) にみられる TOC の減少は、地点 2 では有孔虫の産出が極めて低下することと一致しており、何らかの影響を受けたものとみられるが、ここでは不明である。C/N 比は供給元の有機物の組成を反映することもあり (Tyson, 1995; Sampei and Matsumoto, 2001)、プランクトン起源の有機物の付加が多い場合には低下する。ただし、地点 4 では 1900 年代を通じて C/N 比が 10 前後で一定しているため、久見浜湾全体としては、基礎生産の増加は著しいものではなかったと考えられる。

4) 1980 年代後半以降の海面水位変動

沿岸有孔虫群集は、1950 年代や 1970 年代の海面水位変動に対して極めて敏感に反応していた

ことが明らかになった。我が国の代表的汽水湖である中海や青森県尾駁沼で確認した海面水位変動 (Nomura, 2003; Nomura *et al.*, 2006) と共通した現象を確認することができたといえる。ただし、近年の生態系の変化は人為的影響と自然変動を切り離して考えることができないため、人為的要因についても考慮する必要がある。久見浜湾の水質 (化学的酸素供給量 (COD), 全リン・全窒素など) に関しては、京都府が実施している。それによると、COD のような富栄養指標は 1996 年以降大きく変化しているとはいえず、海面水位変動のような長期的な変動傾向をみるができない (京都府, 2005)。したがって、ここで得た有孔虫の産状について人為的な影響のみが直接反映されているとはいいきれない状況である。

ここで問題とするのは、1980 年後半以降の海面水位の上昇が 1970 年代前半と 1950 年代の群集変化の呼応形態と異なっている点である。前述したように、1950 年代および 1970 年代の海面水位上昇は有孔虫群集の産出個体数の増加をもたらしてきたにもかかわらず、1980 年以降のそれは有孔虫数の減少と沿岸性有孔虫の産出個体数の低下によって特徴づけられる。すなわち、1980 年代以降の一定した海面水位の上昇と *Trochammina* の優占する産出は関連した分布形態を示しているといえる (とくに地点 2; 図 6)。これは両者 (1980 年代以降と以前) の海面水位の変動が異なった性質のもとに駆動していることを示唆する。底生有孔虫群集からみると、1950 年代や 1970 年代の短期的な海面上昇の時には、前述した *Trochammina* と miliolids の産出から湖水の循環が活発化したことが推測されるが、1980 年代から現在に至る海面上昇は、以下の理由から必ずしも湖水循環を活発化させていない。1970 年代後半以降に多くなる *Trochammina* は閉鎖性汽水域における富栄養化環境に適応した指標種であるが、代表的汽水湖である中海の *Trochammina* (Nomura, 2003) の産出を参考にすると閉鎖性がより強くなった環境での群集を示唆する。したがって、1980 年以降の海面水位の上昇は、久見浜湾において湾内の水と沿岸水との交換を促進さ

せるような循環のメカニズムを活発化させていないものと考えられる。

海面水位の長期的変動に対して、湖内の生態系の呼応を有孔虫群集によって検証してきたが、次に海面水位変動の性格について言及する。Yasunaka and Hanawa (2002) および安中・花輪 (2007) によると、20 世紀に 5 回の海洋気候のレジームシフト (1925/26, 1942/43, 1957/58, 1970/71, 1976/77) が確認されている。なかでも 1976/77 年のレジームシフトは北太平洋における遠洋漁業 (いわし) の漁獲高の変化と一致して起こっていることが注目され、海面気圧と海水温といった海洋気象が生態系へ及ぼした証拠として議論されている (川崎, 2007)。このレジームシフトは、北太平洋と低緯度中央太平洋における海面気圧の差の変化としても近年注目されている (太平洋 10 年周期変動 (PDO: Pacific Decadal Oscillation); Mantua *et al.*, 1997; Mantua and Hare, 2002; 気象庁, 2005; 見延, 2007)。北太平洋のアリューシャン低気圧は周期的に変動しており、その発達程度は、冬季の日本列島の気候に影響を与えていることが明らかになってきた。ここで議論してきた 1950 年代と 1970 年代の群集変化は、舞鶴湾での海面水位が上昇した時期であり、アリューシャン低気圧が弱まった変動期 (PDO 指数はマイナス変位) と一致している。海面水位が低下した 1950 年代後半から 1960 年代は、反対にアリューシャン低気圧が強まっている (図 9)。このようなアリューシャン低気圧の発達の程度が日本周辺の海面水位ともよく一致した変動を示し、その水位変化の要因として北太平洋亜熱帯循環との関連が指摘されている (Latif and Barnett, 1994; Trenberth and Hurrell, 1994; Deser *et al.*, 1999)。図 10a には舞鶴湾における海面水位を海面気圧との関係で示した。1950–1960 年代は、両者の関係は並行的変化を示しているが、1970 年代になると明瞭に相補的な変化を示すようになる。安田 (2005) によると、このような 1950–1970 年代の海面水位の変動は、偏西風波動の軸流の緯度 40 度付近における周期的な南北移動や偏西風の風速の強弱の変化によっ

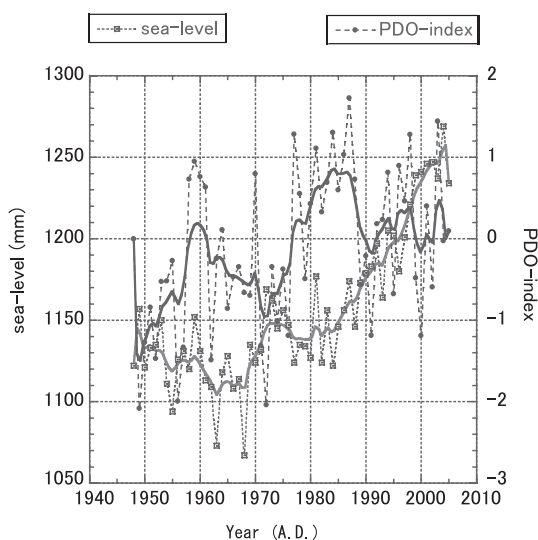


図9 舞鶴湾における1950年以降の海面水位変動と北太平洋数十年変動(PDO指数)との比較。PDO指数のプラスはアリューシャン低気圧の強化、マイナスは低気圧の低下を示す。PDO指数は異常気象2005(気象庁)による。分布の平滑化にはStineman関数を適用した。

Fig. 9 Sea-level changes in Maizuru Bay over the last 60 years and the North Pacific Decadal Oscillation (PDO index). Positive PDO values indicating the strengthened Aleutian Low and negative PDO values indicating the weakened Aleutian Low. Stineman function is applied for curve fitting.

でも説明ができ、とくに日本海のような太平洋からのロスビー波が直接作用しにくい海域では説明しやすいという指摘もある。このような海面水位の変動が湖内の生態系に影響する理由として考えられることは、冬季の風速・風向といった気圧や水位変化の増加が閉鎖性内湾域の湖水循環へ影響を与え、春季のプランクトン増加とそれを餌として有孔虫の生産性がともに高まったことである。海洋生態学では、海水の鉛直的そして水平的な季節循環は栄養塩類の表層への還元を活発化させ、春季植物プランクトンの増殖につながる事が議論されている(友定・小達, 1995; Nakata and Koyama, 2003; Yamada *et al.*, 2004)。

しかし、1980年以降になると、PDO指標(気

象庁, 2005)で示したアリューシャン低気圧の変動と日本列島周辺の水位との間に明瞭な関係がみられなくなる(図9)。1980年代と1990年代後半にアリューシャン低気圧が一時期強化し(とくに1980年代は強化)、1990年前後や2000年前後数年に低下しているが、海面水位には連動した変化をみる事ができない(海面水位はほぼ一定して増加している)。ただし、海面気圧の変動は年ごとの水位の微妙な変動となって表れている。そのような微妙な変動のあることを理解した上で検討すると、明らかに1980年代以降の海面上昇は、以前の変動とは性格を異にしているといえる。

一方で、大洋域での気圧変化に伴った水位変動とは別に、とくに近年の水位変動は地球温暖化による海水温の上昇に伴った熱膨張にその要因を求める意見もある(Levitus, *et al.*, 2000; 金子ほか, 2003; 櫻井・小西, 2005)。とくに日本海における水位については、1980年代後半以降の亜熱帯モードの水の水平熱輸送が主要因となっている(安田, 2005)。このような熱膨張に伴った海面水位の上昇は、閉鎖性水域内へも連動しているものとみられ、水位の上昇を発生させると考えられる。この場合は沿岸水と水の交換はあまり活発化したものにはならない。図10bには海面気圧の変動の年較差を示した。海面水位は海面気圧に呼応した運動をしているため、水位の変動状態を示している。これをみると、1980年以前と以後では海面気圧の年ごとの変動(偏差)が大きく異なっており、1980年以降になると変動の年較差が小さくなる傾向を示している。このような状況のもとで、*Trochammina*が増加する特徴をもった1980年代以降の有孔虫群集の変化と比較すると、よく一致しており、1980年以前と以後で湖内の水循環の変化が説明しやすい。すなわち、1980年以前では舞鶴湾では湾内の海水が水位の年間変動によって動きやすかったと考えられ、1980年以降は循環が弱まっていく。同様な湖水の動態が久見浜湾でもあったものと考えられる。今後海面水位が上昇しても1950年代や1970年代とは異なり、閉鎖性の沿岸域では停滞性環境が維持されることになり、沿岸生態系の多様性の増加にはつ

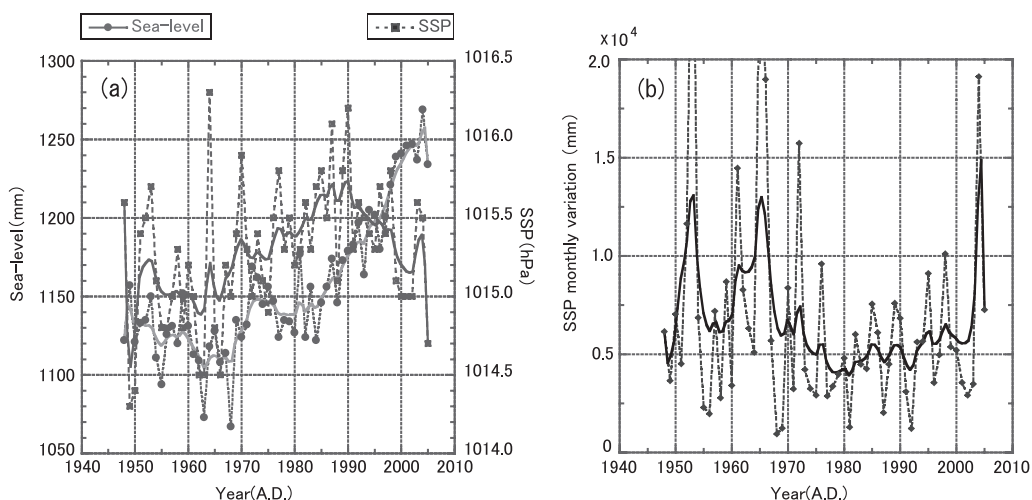


図 10 (a) 舞鶴湾における 1950 年以降の海面水位の上昇と海面気圧との時系列比較. (b) 各年の海面気圧の分散値の経年変化. 分布の平滑化には Stineman 関数を適用した.

Fig. 10 (a) Sea-level changes in Maizuru Bay and the sea-surface atmospheric pressure (SSP) over the last 60 years. (b) Annual variations of sea-surface atmospheric pressure. Stineman function is applied for curve fitting.

ならないものと予測される。

VII. 結 論

近年の地球温暖化によって引き起こされる海面水位上昇が沿岸生態系に与える影響を考察するために京都府の北部にある久美浜湾の有孔虫群集を調査した。過去約 60 年間の遺骸群集の変化は、日本海域で確認されている一般的な海面上昇期と一致し、1950 年代、1970 年代前期に個体数が増えていた。しかし、1980 年代以降に特徴的に高くなる海面水位とは逆に、産出個体数が減り、また富栄養化の特徴を示す *Trochammina hadai* が多くなっている。1950–1970 年では舞鶴湾の海面水位はアリューシャン低気圧の発達程度 (PDO) とよい関連がみられるが、1980 年代後半以降は明瞭ではない。海面水位と産出有孔虫のこのような特徴は、湖水の循環とも関連していることが考えられ、海面気圧の変動の年較差が大きかった 1950 年代や 1970 年代前半は、湖内の循環が活発であったものとみられる。しかし、1980 年代以降の海面水位の上昇は、以前の水位

上昇とは異なった原因によるものとみられ、湖水循環を活発化させているとはいえない状況である。久見浜湾の現在の群集は、水路の拡幅と掘り下げが行われた 1972–1975 年に改変され、現在へ続く群集へと発展したことが明らかになった。

謝 辞

本研究は、平成 15–17 年に実施された科研費研究「20 世紀の異常海水準変動と沿岸生態系の動態解明のための層位・古生物学的手法の確立」(課題番号: 15204046) の成果の一部である。研究に協力いただいた渡部伊久実、小川裕美子、小森光夏、松林洋子、安井 稔の元学生には試料の採取や処理でお世話になった。佐藤慎一氏 (東北大学) および河湯俊吾氏 (横浜国大) には適切な査読をいただいた。記してお礼申し上げる。

文 献

- Culver, S.J. and Horton, B.P. (2005): Infaunal marsh foraminifera from the Outer Banks, North Carolina. *Journal of Foraminiferal Research*, **35**, 148–170.
 Deser, C., Alexander, M.A. and Timlin, M.S. (1999): Evidence for a wind-driven intensification of the Kuroshio Current extension from the 1970s to the

- 1980s. *Journal of Climate*, **12**, 1697–1706.
- Grindell, D.S. and Collen, J.D. (1976): *Virgulinella fragilis* n. sp. (Foraminifera) from Wellington Harbour, New Zealand. *Revista Espanola de Micropaleontologia*, **8**, 273–278.
- Hayward, B.W., Grenfell, H.R. and Scott, D.B. (1999): Tidal range of marsh foraminifera for determining former sea-level heights in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **42**, 395–413.
- Hayward, B.W., Scott, G.H., Grenfell, H.R., Carter, R. and Lipps, J.H. (2004): Estimation of tidal elevation and salinity histories of sheltered harbours and estuaries using benthic foraminifera. *Holocene*, **14**, 218–232.
- Horton, B.P. and Edwards, R.J. (2006): Quantifying Holocene sea-level change using intertidal foraminifera: Lessons from the British Isles. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication*, **40**.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1–18.
<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf> [Cited 2007/12/5].
- 金子邦雄・岡田良平・今井陽一 (2003): 沖縄, 九州沿岸の潮位長期変動と近年の高潮位について. 海と空, **79**, 9–19.
- 川崎 健 (2007): 総論 レジーム・シフト—地球システム管理の新しい視点—. 川崎 健・花輪公雄・谷口 旭・二平 章編: レジーム・シフト—気候変動と生物資源管理—. 成山堂書店, 1–9.
- 気象庁 (2005): 異常気象レポート 2005: 近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—(Ⅶ). http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/pdf/2005_2-4.pdf [Cited 2007/12/5].
- 小西達男・櫻井敬三・内藤俊太 (2004): 日本沿岸の長期海面水位変化について—関連研究の現状と日本沿岸の海面水位変化の特徴—. 測候時報, **71**, S173–S195.
- 京都府 (2005): 平成 16 年度公共用水域及び地下水の水質測定結果.
<http://www.pref.kyoto.jp/suishitu/h16kekka.html> [Cited 2007/12/5].
- Latif, M. and Barnett, T.P. (1994): Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, **266**, 634–637.
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P. and Stephens, C. (2000): Warming of the world ocean. *Science*, **287**, 2225–2229.
- Majewski, W. and Zajaczkowski, M. (2007): Benthic foraminifera in Adventfjorden, Svalbard: Last 50 years of local hydrographic changes. *Journal of Foraminiferal Research*, **37**, 107–124.
- Mantua, N.J. and Hare, S.R. (2002): The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, **58**, 35–44.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M. and Francis, R.C. (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of American Meteorological Society*, **78**, 1069–1079.
- 見延庄士郎 (2007): 物理的環境におけるレジーム・シフトと十年スケール変動のメカニズム. 川崎 健・花輪公雄・谷口 旭・二平 章編: レジーム・シフト—気候変動と生物資源管理—, 成山堂書店, 45–61.
- Nakata, K. and Koyama, S. (2003): Interannual changes of the winter to early spring biomass and composition of Mesozooplankton in the Kuroshio region in relation to climate factors. *Journal of Oceanography*, **59**, 225–234.
- 西田 武 (1976): 湊生活百年史. 湊小学校創立百周年記念実行委員会.
- Nomura, R. (2003): Assessing the roles of artificial vs. natural impacts on brackish lake environments: Foraminiferal evidence from Lake Nakaumi, southwest Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, **109**, 197–214.
- 野村律夫 (2003): 平成 14 年度河川管理財団報告書.
- Nomura, R., Nemoto, N. and Komura, K. (2006): Environmental changes in brackish Lake Obuchi-numa, Aomori Prefecture, northeast Honshu, Japan, with special reference to sea-level variation in the 20th Century. *The Quaternary Research*, **45**, 347–360.
- Patterson, R.T. (1990): Intertidal benthic foraminiferal biofacies on the Fraser River Delta, British Columbia: Modern distribution and paleoecological importance. *Micropaleontology*, **36**, 229–244.
- 櫻井敬三・小西達男 (2005): 日本沿岸の海面水位の長期変動特性. 測候時報, **72**, S7–S16.
- Sampei, Y. and Matsumoto, E. (2001): C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan: Usefulness as an organic source indicator. *Geochemical Journal*, **35**, 189–205.
- Scott, D.B. and Medioli, F.S. (1980): Quantitative studies of marsh foraminifera distribution in Nova Scotia: Implications for sea-level studies. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication*, **17**.
- Senjyu, T., Matsuyama, M. and Matsubara, N. (1999): Interannual and decadal sea-level variations along the Japanese coast. *Journal of Oceanography*, **55**, 619–633.
- Southall, K.E., Gehrels, W.R. and Hayward, B.W. (2006): Foraminifera in a New Zealand salt marsh and their suitability as sea-level indicators. *Marine Micropaleontology*, **60**, 167–179.
- Takata, H., Seto, K., Sakai, S., Tanaka, S. and Takayasu, K. (2005): Correlation of *Virgulinella fragilis* Grindell & Collen (benthic foraminiferid)

- with near-anoxia in Aso-kai Lagoon, central Japan. *Journal of Micropalaeontology*, **24**, 159-167.
- 友定 彰・小達和子 (1995): 動物プランクトンバイオマスと環境の長期変動. 海と空, **71**, 1-7.
- Topping, N.J., Murray, J.W. and Pond, D.W. (2006): Sewage effects on the food sources and diet of benthic foraminifera living in oxic sediment: A microcosm experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **329**, 239-250.
- Trenberth, K.E. and Hurrell, J.W. (1994): Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, **9**, 303-319.
- Tsujimoto, A., Nomura, R., Yasuhara, M., Yamazaki, H. and Yoshikawa, S. (2006): Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifers over the last 150 years in Osaka Bay, Japan. *Marine Micropalaeontology*, **60**, 258-268.
- Tyson, R.V. (1995): *Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies*. Chapman and Hall.
- Tyson, R.V. and Pearson, T.H. (1991): Modern and ancient continental shelf anoxia: An overview. in *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia* edited by Tyson, R.V. and Pearson, T.H., *Geological Society Special Publication*, **58**, 1-26.
- Williams, H.F.L. (1994): Intertidal benthic foraminiferal biofacies on the central Gulf Coast of Texas: Modern distribution and application to sea level reconstruction. *Micropalaeontology*, **40**, 169-183.
- Yamada, K., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, H. and Chiba, S. (2004): Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES). *Progress in Oceanography*, **61**, 193-211.
- 安田珠幾 (2005): 日本近海海面高度の数十年規模変動—北太平洋の風応力と海面熱フラックスの変動との関係—. 測候時報, **72**, S73-S89.
- Yasunaka, S. and Hanawa, K. (2002): Regime shifts found in the northern hemisphere SST field. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **80**, 119-135.
- 安中さやか・花輪公雄 (2007): 過去 100 年間の全球海面水温場に出現したレジーム・シフト. 川崎 健・花輪公雄・谷口 旭・二平 章編: レジーム・シフト—気候変動と生物資源管理—. 成山堂書店, 21-28.
- (2008 年 6 月 26 日受付, 2008 年 11 月 10 日受理)