

完新世における山陰海岸東部^{けい}気比^い低地 (兵庫県豊岡市) の古環境*

前田 保夫¹⁾、中井 信之²⁾、松本 英二³⁾、中村 俊夫⁴⁾、楠 聡⁵⁾
松島 義章⁶⁾、佐藤 裕司⁷⁾、松原 彰子⁸⁾、熊野 茂⁹⁾、黒見 充宏⁹⁾
額田 雅裕¹⁰⁾、青木 哲哉¹¹⁾、古田 昇¹²⁾、小橋 拓司¹³⁾
松井順太郎¹⁴⁾、河原 典史¹⁴⁾、山下 博樹¹⁴⁾

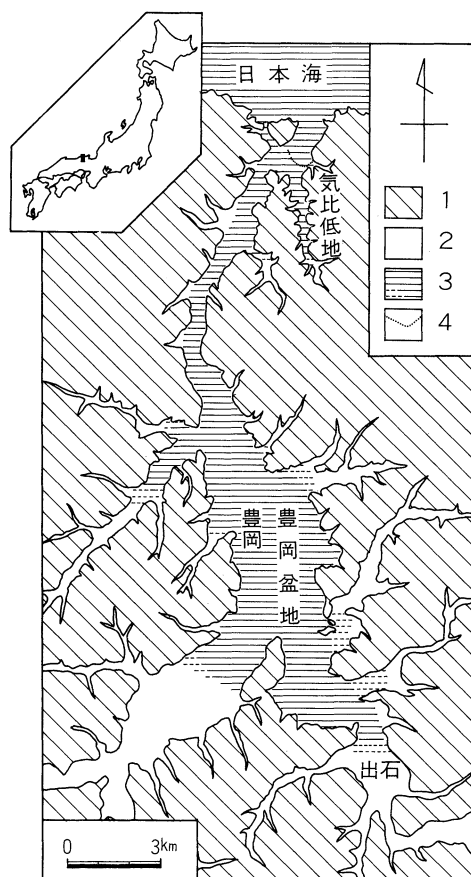
1. はじめに

山陰東部海岸に位置する兵庫県の但馬海岸は、山麓部が直接海に接する出入りの多い岩礁性海岸が発達している。但馬海岸に流入する円山川の河口には三角州平野が認められず、河口より 13 km さかのぼった豊岡市街地を中心に標高 2 m 前後の低平な沖積盆地在が広く発達する。この豊岡盆地の表層部数mは河成堆積物からなるが、それより下位の深度30数mに伏在する基盤までは完新世の海面上昇によって形成された内湾の堆積物によって構成されている。この内湾成堆積物はさらに南下し、出石町市街地下にまで細長く峡湾状に古豊岡湾を埋積する分布を示す(第1図)。

前述の円山川河口域における三角州平野の未発達の問題と関連させて豊岡盆地の生成を

* 1989年8月18日、1989年日本第四紀学会大会で発表

1) 山形大学教育学部、2) 名古屋大学理学部、3) 名古屋大学水圏科学研究所、4) 名古屋大学アイソトープ総合センター、5) 愛知県立一宮高等学校、6) 神奈川県立博物館、7) 兵庫県企業庁船津浄水場、8) 東京大学理学部、9) 神戸大学理学部、10) 和歌山県立博物館、11) 立命館大学文学部、12) 聖母女学院、13) 兵庫県立香住高等学校、14) 立命館大学大学院(勤務先については非常勤を含む)



第1図 豊岡盆地付近における完新世の最大海進域

1. 山地 2. 低地 3. 最大海進域(破線は推定) 4. 現海岸線

予測すると、この地域は完新世を通じ、ゆるやかな沈降域にあったのではないと思われる。筆者らはこの特異な豊岡盆地の形成過程を明らかにする目的で、本研究を計画し、1987年以来、掘削法による堆積物の採取とその解析を進めてきた。

本論文で報告する気比低地は、円山川下流とは高さ 300 m 級の低い山地を挟んで、その東側をほぼ円山川に並行して流下する長さ 10 km に満たない小河川の気比川に沿って分布する低地である。1988年5月、気比川河口より 2 km 上流にある標高 2.3 m の水田でピストンコアラー（ピートサンプラー）を用いて掘削を行い、基盤に近い深度 18.25 m までの連続コアの採取に成功した。これらのボーリングコアについて加速器質量分析による ^{14}C 年代、堆積物に含まれる生物遺骸中の有機物の C/N 比、炭素安定同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)、イオウ化合物含有量の測定および有孔虫、珪藻、珪質鞭毛藻、花粉、貝類などの化石群の解析と層相観察、火山ガラスの含有状況等に関して研究を行なった。

気比低地を調査地に選定したのは、流入河川水による陸源供給物の量が少なく、静穏な内湾域に形成され、古環境解析のために豊富な情報をもつ泥質堆積物が採取できる場所であると期待したからである。また気比低地に比べると動的な堆積環境下で形成された豊岡盆地の堆積物と比較対照する目的もあった。気比低地堆積物からは後述するように、約 8000年前から現在にいたる自然環境変遷過程を示す情報が得られたが、これらは気比周辺のみならず山陰海岸東部地域の古環境復元上、従来知られていなかった新発見も多く見出されたので、以下にその大要を報告する。

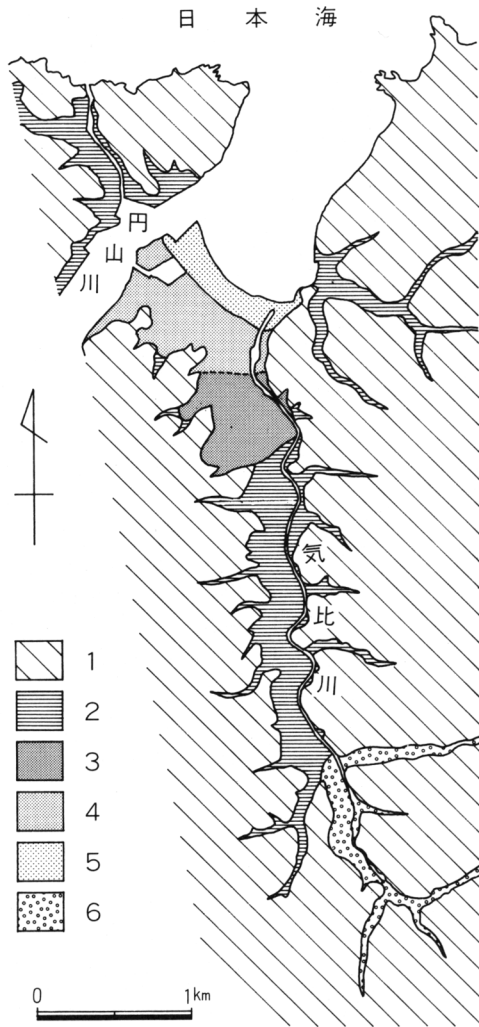
なおこの研究は立命館大学地理学教室大学院課程の自然地理学演習で行った野外調査と、関連する研究分野の研究者とが共同で進めている山陰海岸東部地域の古環境に関するプロジェクト研究の成果報告でもある。この研究を進めるにあたり、種々御指導いただいた立命館大学教授日下雅義博士、豊岡市立郷土資料館長瀬戸谷皓氏、豊岡市教育委員会潮崎誠氏、ボーリング地点の土地所有者大塚新一氏に深く感謝する。

2. 気比低地の地形と完新世層の層相

気比低地は、豊岡盆地の北北東に位置し、その幅が約 300 m、長さは約 4 km の狭長な低地である。この低地は、海岸までおよそ 4.25%で緩く傾斜しており、そこには浜堤とその背後につづく低地および小規模な扇状地が分布している（第2図）。

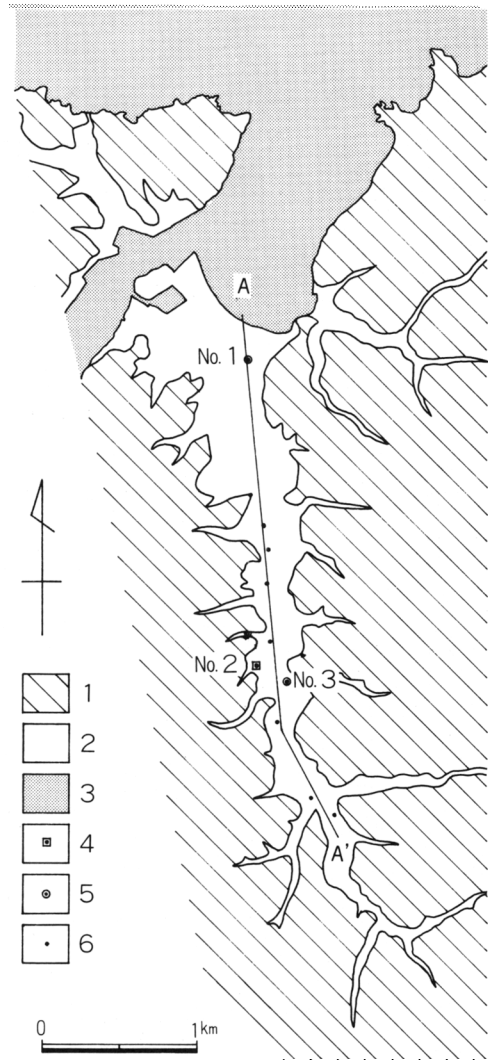
海岸部に位置する浜堤は3列認められ（ここでは、内陸側のものから浜堤Ⅰ、ⅡおよびⅢと呼ぶことにする）、浜堤Ⅰと低地との比高は約 1 m である。これらの浜堤は、それぞれ海拔高度 5 m 以上に達し、幅も 500 m を超えるものがあり、低地の面積に比べて比較的大規模に発達している。No. 1 ボーリング（第3、4図）によると、浜堤は主に貝殻を混じえる細砂からなっており、これは現海面下およそ 27.5 m まで堆積していることがわかる。この砂は、浜堤から約 300 m 内陸に入った低地の表層でも認められ、浜堤の上面が低地に埋没していることが知られる。

浜堤の背後につづく低地は、自然堤防などが分布しない非常に低平な面である。この低地における No. 3 ボーリングによると、現海



第2図 地形分類図

1. 山地 2. 低地 3. 浜堤Ⅰ 4. 浜堤Ⅱ
5. 浜堤Ⅲ 6. 小扇状地



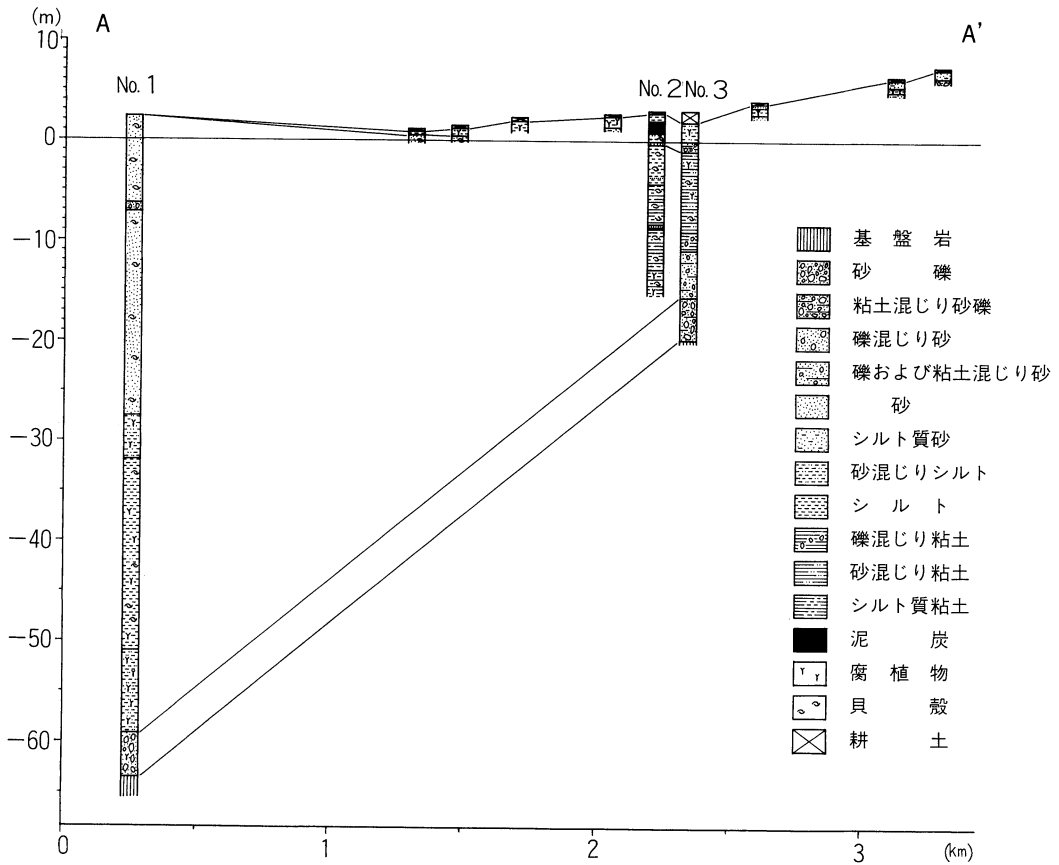
第3図 ポイントマップ

1. 山地 2. 沖積平野 3. 水域 4. ビートサンプラー試錐地点
5. 既存のボーリング地点 6. 表層ボーリング地点

面下 20 m 付近で基盤岩が認められ、その上位の -20~-15.5 m にはN値50を超える砂礫が堆積している。両者は、No. 1 ボーリングにおける現海面下約 59 m 以深でもみられることから、現海岸線付近まで連続しているものと推定される。一方、この砂礫で浅の堆積物は一般に10以下のN値を示し、いわゆる

沖積層である。なお、筆者らが実施したNo. 2 地点でのビートサンプラーによる掘削（第5図）は、隣接するNo. 3 ボーリングの砂礫上面の深度からみて、沖積層の基底にほぼ近い層準まで達しているものと解される。

No. 3 ボーリングにおいては、沖積層の最

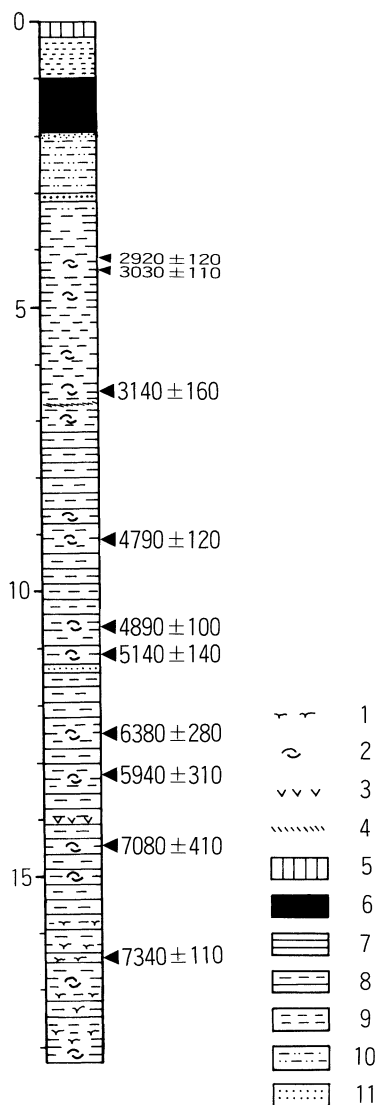


第4図 地質断面図

下部に古気比川の流れ込みによると考えられる礫混じり砂がみられる。しかし、これは一部でしか認められず、現海岸線から 2.3~2.4 km 内陸に入った No. 2 および No. 3 ボーリング地点では、ともに貝殻を含むシルト質粘土ないしは細砂混じり粘土が、現海面下 -1 ~ ±0 m まで厚く堆積している。No. 2 地点の掘削では、このシルト質粘土中の深度 11.3 m と 6.7 m 付近に砂の薄層がみられた。深度 3.0~3.1 m には、砂および粘土混じり砂礫があり、さらにその上位に細砂質シルトなどの細粒堆積物が認められる。この細砂質シル

ト中の -0.25 m 付近で貝化石のキャストがみられ、この上位で泥炭にかわる ±0 m 付近が層相からみた気比低地における海成層の上限と思われる。他方、No. 3 地点では泥炭が海拔高度 1~2 m に堆積している。耕土のすぐ下にみられるシルトは、低地の表層で広く認められる。ただし、低地の上流側ではこのシルトの上下位にシルト質砂や砂が堆積しており、上流ほど表層堆積物が粗くなっている。

気比低地の最上流部には、小規模な扇状地が分布している。これは、平均傾斜25%と急



第5図 No. 2 ボーリング地点の地質柱状図
 1. 腐植物 2. 貝化石 3. アカホヤ火山灰
 4. 腐植物ラミナ 5. 耕土 6. 泥炭 7.
 粘土 8. シルト質粘土 9. シルト 10.
 砂質シルト 11. 砂

傾斜であり、最上流部の谷を埋積するように発達している。この扇状地は、主に砂礫によって構成されており、その上位を約 1 m の厚さで砂が覆っている。

このように、気比低地では 3 列の浜堤とそ

の背後に広がる低地、および小扇状地が認められ、それぞれを構成している堆積物が異なる。また、この低地が狭長であるにもかかわらず、沖積層は最大およそ 60 m の層厚を有し、その多くは貝殻を混じえる細粒堆積物からなっている。しかも、この堆積物が内陸奥深くまで分布していることや、浜堤が比較的良好に発達していることからみて、気比低地はかつて縄文海進によって生じた溺れ谷を埋積する形で主に海の営力によって形成されたと考えられる。

なお、3 以下に述べる内容はすべて No. 2 ボーリングコアから得られたものであるので、特別な場合を除いて No. 2 ボーリングコアと表記しない。

3. 気比低地の完新世層の ^{14}C 年代と堆積速度

No. 2 ボーリングの深度 4.2 m から 16.70 m の間の 10 層準から採取された貝化石を試料に加速器による ^{14}C 年代を測定した (第 1 表)。これらの中で深度 12.5 m の ^{14}C 年代値 6380 ± 280 y.B.P. は、下位の 13.20~13.33 m の 5940 ± 310 y.B.P. とは逆転した値を示している。これに関して鬼界アカホヤ (K-Ah、以下アカホヤ火山灰と略称) 火山灰によるクロスチェックを試みた。広域火山灰アカホヤはその噴出年代が 6300 y.B.P. と確定しているが、この No. 2 では深度 13.9~14.0 m にバブルウォール型の火山ガラスの濃集帯が見出されている。ここでは計数した 200 粒の鉱物のうち、火山ガラス 160、角閃石 8、輝石 0、石英 2、不透明鉱物 28 が識別された。この火山ガラスの屈折率および化学組成はま

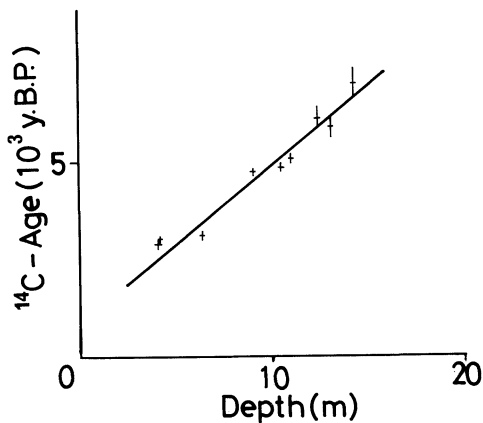
第1表 気比低地の完新世層の¹⁴C年代

深度 (m)	¹⁴ C年代 (y.B.P.)	貝化石名	コード番号
4.20	2920±120	コゲツノブエ	NUTA-691
4.31	3030±110	コゲツノブエ	NUTA-688
6.45~6.49	3140±160	イヨスダレガイ	NUTA-690
9.15~9.18	4790±120	イヨスダレガイ、ウラカガミガイ	NUTA-687
10.61	4890±100	イヨスダレガイ、ムシロガイ	NUTA-689
11.08	5140±140	トリガイ	NUTA-686
12.50	6380±280	ウラカガミガイ	NUTA-692
13.20~13.33	5940±310	ゴイサギガイ、トリガイ	NUTA-685
14.45	7080±410	イヨスダレガイ	NUTA-684
16.70	7340±110	イセシラガイ	NUTA-886

だ測定していないが、火山ガラスの形状と¹⁴C年代から判断してアカホヤ火山灰であることは確実である。したがって上記2層準の¹⁴C年代のうち、深度13.2~13.33 mの5940±310 y.B.P.の年代値のほうが、アカホヤ火山灰の産出層準と整合する年代値である。この報告では10の¹⁴C年代値とアカホヤ火山灰の噴出年代とあわせて11の年代資料を時間経

過の尺度に用いて古環境解析を進めた。なお深度1~2 mの泥炭の形成年代は海成層の上限（海退の開始期）の年代を知る上で興味あるところであるが、今回は測定していない。

これらの年代値に基いて time-depth ダイアグラム（第6図）を描き、気比低地の海成完新世層の堆積速度を求めたところ 0.24 cm/yearであった。これは豊岡市内八条小学校庭下の完新世層から得られた堆積速度 0.25~0.26 cm/year (Kusunoki 1989) に比べてやや小さい。



第6図 time-depth ダイアグラム

4. 貝類群集からみた海況変遷

掘削で得られた全試料について、現地での層相観察を行った後、室内で縦に切断し詳しい層相観察と記載を行い、地質柱状図を作成した。その際、肉眼で確認できる貝化石を抽出し、同定した。その結果、深度2.00~18.25 mの中で、2.25~2.50 mでは二枚貝片が、3.25~17.00 mと17.50~18.25 mでは保存

第2表 気比の海成完新世層から産出した貝類化石リスト

深度 (m)	巻貝		二枚貝	
	カゴメツボ	サナギモツボ	アカガイ	ホトトギスガイ
1: 2.00~ 2.25				1
2: 2.25~ 2.50				
3: 2.50~ 2.75				
4: 2.75~ 3.00				
5: 3.00~ 3.25				
6: 3.25~ 3.50		2		
7: 3.50~ 3.75				1
8: 3.75~ 4.00		4		
9: 4.00~ 4.25		3		
10: 4.25~ 4.50				
11: 4.50~ 4.75	1			1
12: 4.75~ 5.00				
13: 5.00~ 5.25	1		1	
14: 5.25~ 5.50				
15: 5.50~ 5.75	1			
16: 5.75~ 6.00				1
17: 6.00~ 6.25		1	1	1
18: 6.25~ 6.50				1
19: 6.50~ 6.75				1
20: 6.75~ 7.00	1	2		1
21: 7.00~ 7.25			1	
22: 7.25~ 7.50		1		
23: 7.50~ 7.75				
24: 7.75~ 8.00				
25: 8.00~ 8.25				
26: 8.25~ 8.50				
27: 8.50~ 8.75				
28: 8.75~ 9.00		1		
29: 9.00~ 9.25				
30: 9.25~ 9.50			1	
31: 9.50~ 9.75		1		
32: 9.75~ 10.00				
33: 10.00~ 10.25		1		
34: 10.25~ 10.50				
35: 10.50~ 10.75		1		
36: 10.75~ 11.00				
37: 11.00~ 11.25		1	1	
38: 11.25~ 11.50				
39: 11.50~ 11.75				
40: 11.75~ 12.00		1		
41: 12.00~ 12.25				
42: 12.25~ 12.50				
43: 12.50~ 12.75				
44: 12.75~ 13.00				
45: 13.00~ 13.25		1		
46: 13.25~ 13.50				
47: 13.50~ 13.75				
48: 13.75~ 14.00		1 2	2	
49: 14.00~ 14.25				
50: 14.25~ 14.50				
51: 14.50~ 14.75				
52: 14.75~ 15.00		1		
53: 15.00~ 15.25			1	
54: 15.25~ 15.50				
55: 15.50~ 15.75		1 1		
56: 15.75~ 16.00		1		
57: 16.00~ 16.25				
58: 16.25~ 16.50		2		
59: 16.50~ 16.75		1	1	
60: 16.75~ 17.00			1	
61: 17.00~ 17.25	1		1	
62: 17.25~ 17.50				
63: 17.50~ 18.00				
64: 18.00~ 18.25				

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| GASTROPODA | PELECYPODA |
| <i>Ciathrofenella reticulata</i> | <i>Scapharca broughtonii</i> |
| <i>Eufeneia pupoides</i> | <i>Musculus senhousia</i> |
| <i>Clypeomorus coralium</i> | <i>Leptaxinus oyamai</i> |
| <i>Reticumassa festiva</i> | <i>Anodontia steamsiana</i> |
| <i>Niotha livescens</i> | <i>Pillucina pisidium</i> |
| <i>Ringicula delialis</i> | <i>Fulvia mutica</i> |
| <i>Cyllichmatys angusta</i> | <i>Fulvia hungerfordi</i> |
| <i>Coleophysis minimus</i> | <i>Dosimella penicillata</i> |
| <i>Acteocina gordonis</i> | <i>Paphia nudulata</i> |
| | <i>Raetelopena pulchella</i> |
| | <i>Theora lubrica</i> |
| | <i>Pinguicellina pinguis</i> |
| | <i>Semelangus tokubei</i> |
| | <i>Merella rotula</i> |
| | <i>Nitidotelina nitidula</i> |
| | <i>Nitidotelina nitida</i> |
| | <i>Macoma incongrua</i> |
| | <i>Macoma tokyuensis</i> |
| | <i>Laternula limicola</i> |

の良い貝化石が得られた。なお 17.00~17.50 m では試料を採取することができなかった。その結果、これらの貝化石の産出状況と層相などから推定される海成層は、深度 2.00 m 以深であり、その上限高度もほぼ 2.00 m であろう。これまでに同定できた貝化石は、二枚貝19種、巻貝9種の合計28種である(第2表)。これらの貝類は全て内湾に生息する現生種からなり、外洋性種が含まれていない。

各層準に見られる主要種の生態的特徴とその産出状況から、干潟群集、内湾泥底群集、内湾停滞域群集の三つの貝類群集を識別することができた。

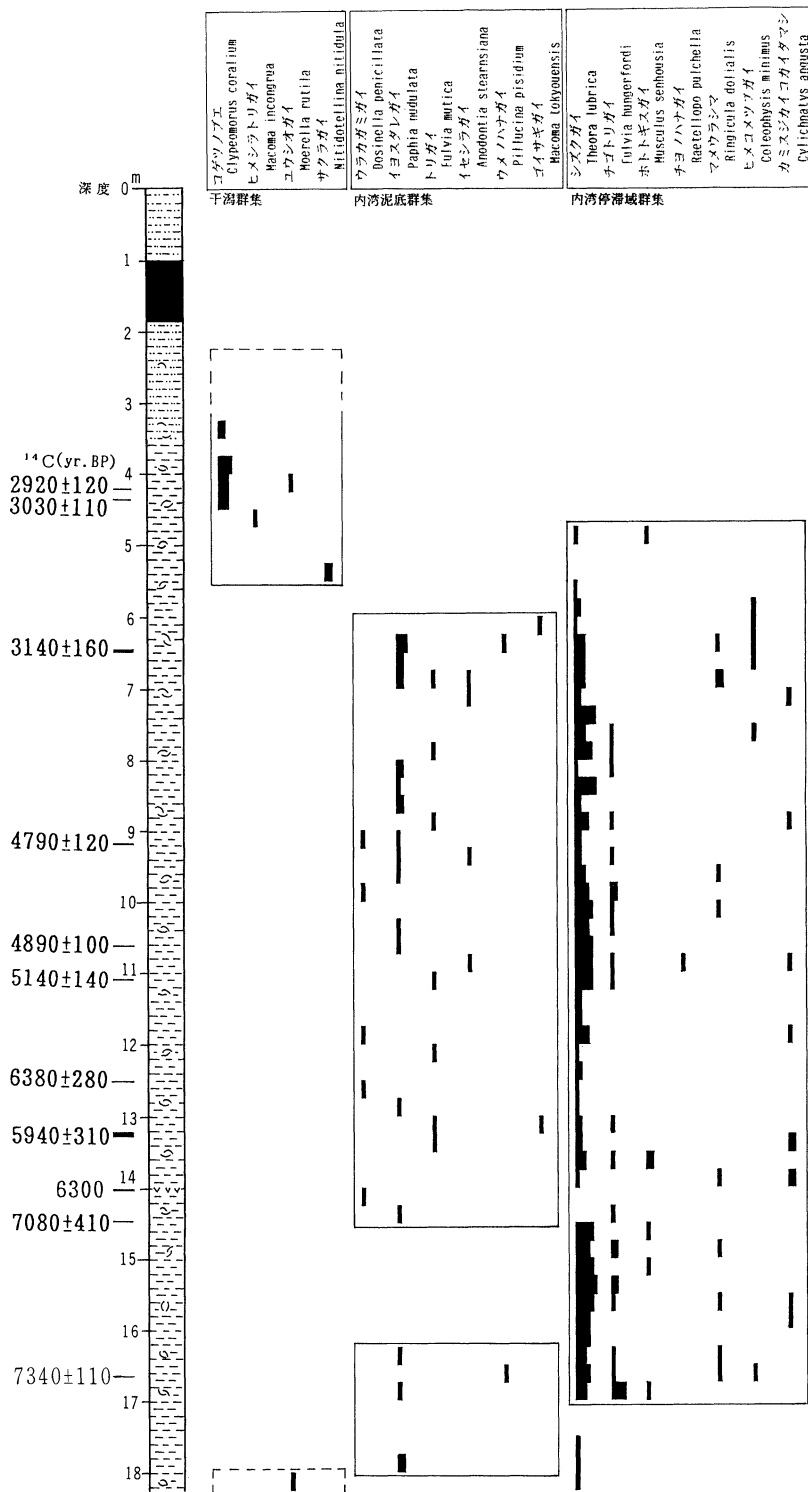
a. 干潟群集：本地点で明らかになった本群集は、湾奥の砂泥地に生息するコゲツノブエを主体にヒメシラトリ、ユウシオガイ、サクラガイなどの種を伴う。本来のこの群集は、隣接の円山川沖積低地の豊岡市中谷で明らかになったようにマガキを主体にウネナシトマヤガイ、イボウミニナ、カワアイなどの種で構成される²⁾。しかし、本地点ではこれらの主要構成種は全く見られず、いわゆる随伴種のコゲツノブエが主要構成種となっているのが特徴である。その産出層準は、深度 2.25~5.50 m、18.00~18.25 m の2層準である。この中で 3.25~5.50 m 層準は確実に本群集で占められるが、2.25~3.25 m と 18.00~18.25 m の層準はあまり明確でない。

b. 内湾泥底群集：この群集は、内湾の潮下帯から水深 10 m 前後までの泥底に生息するウラカガミガイ、イヨスダレガイ、トリガイ、イセンラガイなどの種で構成される。アカガイやゴイサギガイを伴うが、随伴種はそれほど多くない。この産出層準は、深度 6.00~14.50 m、16.25~18.00 m の2層準で

ある。その内下位の 16.25~18.00 m 層準は、イヨスダレガイが主体でウメノハナガイを伴うだけの少ない群集構成となっている。

c. 内湾停滞域群集：本群集は強内湾性種で知られるシズクガイ、チヨノハナガイ、ホトトギスガイ、チゴトリガイなどの種で構成され、マメウラシマガイ、カミスジカイコガイダマシ、ヒメコメツブガイ、ゴールドンコメツブガイなどの微小な巻貝を伴う。ここでは上述の2貝類群集に比べて随伴種がかなり多く、主要種のシズクガイも多産することからみて、本地点を特徴づける群集である。その産出層準は深度 4.75~17.00 m であり、とくに 5.50~17.00 m では本群集が優勢となる。

以上の3貝類群集が、層位的にどのように出現したのかまとめてみると第7図のようになる。すなわち深度 18.00~18.25 m 層準ではユウシオガイで代表する干潟群集にシズクガイが加わっているように見られる。18.00 m 以浅になるとイヨスダレガイが主体でウメノハナガイを伴う内湾泥底群集におきかわり、16.25 m まで見られる。さらにこの群集は深度 14.50~6.00 m 層準で発展する。一方、シズクガイ、ホトトギスガイ、チゴトリガイなどで構成される内湾停滞域群集は、前述の2群集に比べてやや遅れ 17.00 m 以浅になって出現する。そしてこの群集はそのまま 4.75 m まで連続分布して、本地点を特徴づける群集へと大発展する。このような貝類群集の垂直的な変遷は、海進に伴う内湾の環境変化³⁾(松島、1984)、すなわち水深の小さい湾奥的な環境から急速に水深の大きい内湾の湾央的な環境に変わって行ったことを示すものである。そしてこの内湾環境は、長期にわ



第7図 気比の海成完新世層にみられる貝類群集の変遷

たって存在したことを示す。深度 5.50 m になると再びコゲツノブエを主体とする干潟群集が分布するようになった。このことは、これまでの湾央的な環境から再び干潟の発達する湾奥環境に変化したことを物語っている。貝類群集が垂直的に干潟群集→内湾泥底群集→内湾停滞域群集→干潟群集へ変っていることは、完新世の海水面変動に伴い気比の内湾環境が干潟→湾央の泥底→湾奥の干潟へ変ってきたことを示すものである。

本地点で得られた貝化石による ^{14}C 年代測定は10層準で行われ、約7300～3000年前までの確かな内湾環境の変化を、貝類群集の変遷から探ることができる。またこれらの年代値から深度 18 m 付近の年代を概算すると約8000年前となる。ここに約8000～3000年前の海況変遷を考察してみる。

1) 約8000年前は海面が深度 18 m 付近にあった。本地点は泥底の発達する湾奥に位置し、そこには干潟群集が分布していた。この様な環境は一時的なもので、急速な海面上昇で水深の大きい湾央的な環境へ変っていった。そこにはこれまで見られた干潟群集に変わって内湾泥底群集と内湾停滞域群集が生息するようになった。

2) その後約7100年前までは、さらに海面上昇は大きかったためか内湾停滞域群集が主に生息する閉塞的な環境になっていった。

3) 約6300年前のアカホヤ火山灰が降灰したところから内湾泥底群集と内湾停滞域群集が分布する安定した湾央の環境になった。この内湾環境は約3100年前までの3000年以上も存在した。

4) 約3000年前になると、これまでの水深の大きかった内湾は急速に埋立てられ浅くな

り、そこにはコゲツノブエを主体とする干潟群集が分布するようになった。

5. 有孔虫化石解析からみた海況変遷

試料の処理と分析の方法

分析試料は、乾燥重量 5～10 g に熱湯を注いで、一昼夜放置することによって泥化させた後、250 mesh (0.063 mm 径) の篩で水洗した。篩上の残渣を再び乾燥させ、有孔虫 200 個体程度を含む試料に分割してから、双眼実体顕微鏡下で全有孔虫個体の抽出を行った。試料中に有孔虫個体が少ない場合には、四塩化炭素によって浮選させた。

有孔虫化石群集

本試料中の深度 1.5～18.2 m の層準のうちの18試料について、有孔虫化石の分析を行った。18試料中の10試料(深度 6.5～15.5 m) から有孔虫化石を産出した。第8図に、主要な底生有孔虫種の産出頻度を示した。定量有孔虫数(1 g 当たりの底生有孔虫個体数)は、深度 6.5～7.5 m で最大値(約 51 N/g)を呈する。

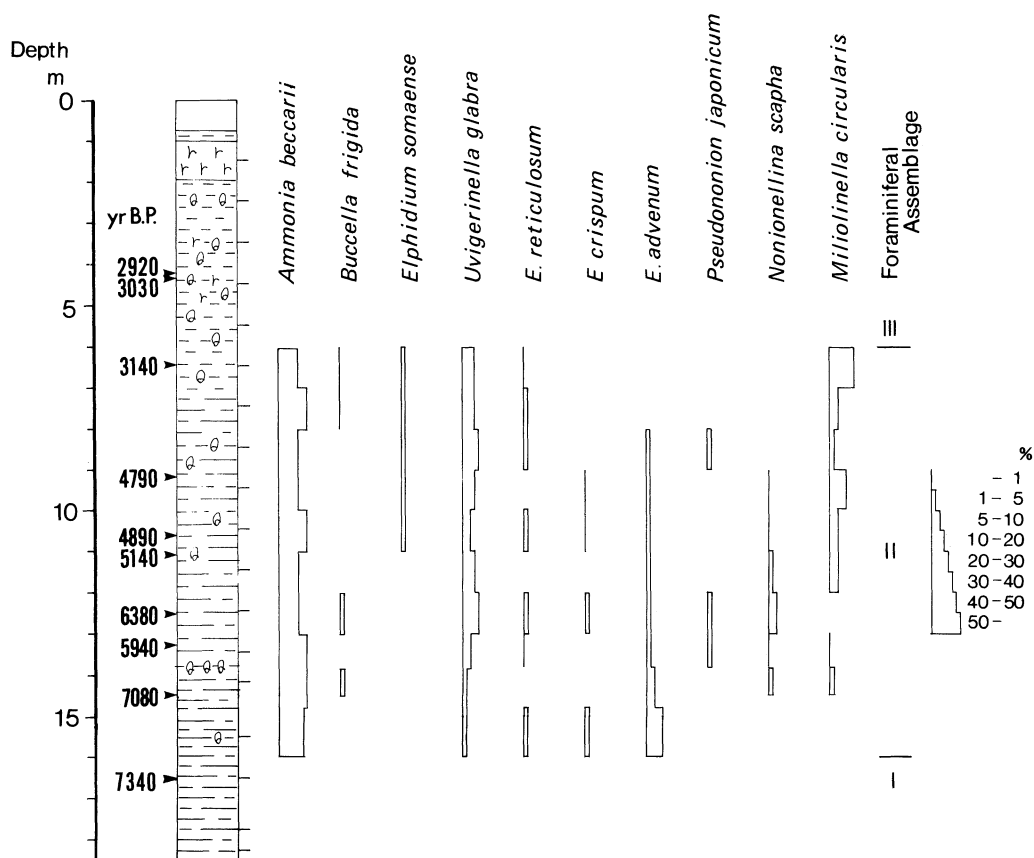
有孔虫化石の産出状況からみて、本層は、次の3帯に分けることができる。

I. 深度 16 m 以深(推定年代: 約7200年前以前)

本層からは、有孔虫化石を産出しなかった。層相が腐植質シルトであることから、本層の堆積期は塩分濃度が低く、有孔虫の生息には適さない環境であったと推定される。

II. 深度 6～16 m (推定年代: 2500～7200年前)

本層中の底生有孔虫化石群集は、全体に、内湾の湾奥から湾央部に生息する *Ammonia*



第 8 図 気比の海成完新世層の有孔虫化石群集の変遷

beccarii が優勢である。これに、内湾央部を中心に分布する *Uvigerinella glabra*、内湾口部に分布する *Miliolinella circularis* などが随伴する。また、岩礁地の海藻に付着する *Elphidium reticulosum*、*E. crispum* のような有孔虫も産出した。浮遊性有孔虫は、深度 6.5 m、11.5 m、12.5 m、15.5 m の 4 層準で産出し、出現頻度は、それぞれ、0.4%、0.5%、1.1%、0.8%である。

以上のことから本層の堆積期における環境は、全般に内湾の湾奥から湾央にかけての環境が卓越していたといえる。しかし、閉塞環

境の指標である *Ammonia beccarii* forma A がまったく産出しないこと、沿岸水流入の指標である *Pseudononion japonicum*、*Miliolinella circularis* が産出すること、さらに、外洋水の流入を示す浮遊性有孔虫（有孔虫の環境指標は、Matsubara 1988; 松原1989; に基づく^{4,5)}）が出現することから、内湾奥部にも沿岸水の流入があり、外洋水の影響を受ける時期があったものと推定される。岩礁地性の有孔虫は、本地域に形成された細長い内湾において、近くの岩礁地の海藻帯から運搬されて混入したものであろう。

一方、本層の下部および中部の4層準（深度 6.5 m、7.5 m、12.5 m、14.2 m）からは、北方浅海域に分布の中心をもつ *Buccella frigida* が産出した。このことは、寒流系の海水の流入を示唆する。

Ⅲ. 深度 6 m 以浅（推定年代：約2500年前以降）

本層からは、有孔虫化石を産出しなかった。ここでは、堆積物に腐植物が多く混入するようになることから判断して、塩分濃度が低下し、有孔虫の生息に適さない環境に変化したものと推定される。

6. 堆積物中の有機物の炭素安定同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) と炭素/窒素 (C/N) 比の測定

古環境の復元には生物化石に基づく解析方法が一般的であるが、最近では貝化石や木片の放射性炭素の測定による年代測定のほか、有機物の炭素安定同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ で表現) や C/N 比の測定に基いて海面変動や気候変動を追跡するいわば化学化石 (chemical fossils) による古環境復元が試みられるようになった。

堆積物中の有機物の供給源は、海水中の生物起源のものと陸上生物起源の2つがある。その2供給源の $\delta^{13}\text{C}$ 値はそれぞれ異なっており、海洋生物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-19\sim-23\%$ で、陸上生物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-25\sim-28\%$ である。海洋生物は重い炭素同位体 (^{13}C) が多く、陸上生物は少なく、かつ生物の C/N 比も海と陸とでは異なっている。海のプランクトンの C/N 比は 6~7 で、陸上植物の C/N 比は ≥ 30 である。

有機物の炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) の測定は堆積物試料に 1.2 N 塩酸を加え、 100°C で約 1 時間加温して炭酸塩を除去し、水洗し乾燥した後、粉碎する。粉末試料に酸化コバルトを混合して酸素気流中に最高温度 950°C で燃焼させ CO_2 を作る。生成した CO_2 は n-ペンタンと液体窒素で精製した後、Varian MAT CH-7 質量分析計により $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定した。

C/N 比の測定は試料を塩酸処理した後、CN コーダ (柳本 MT-500) により有機物炭素 (Org. C) と有機物窒素 (Org. N) を定量し、これらの値から C/N 比を算出した。

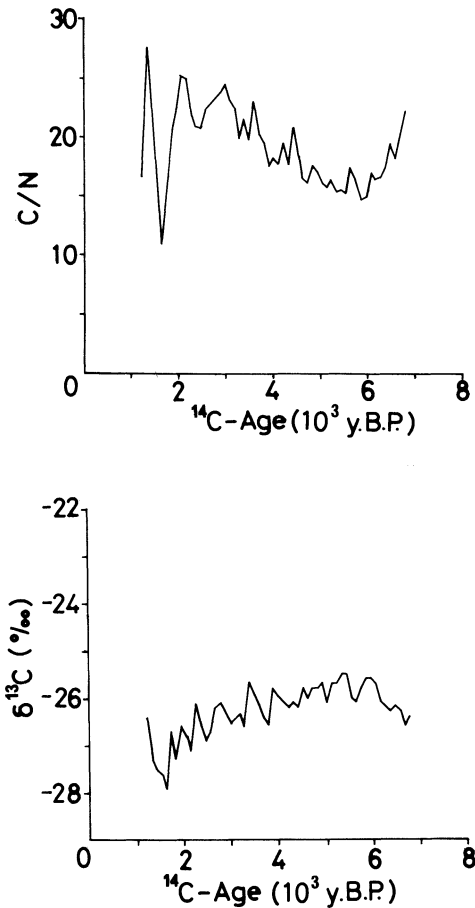
以上のように $\delta^{13}\text{C}$ 値と C/N 比の供給源による違いを利用すると、海面の低い寒冷期には相対的に陸からの有機物の供給が多くなり、海面の高い温暖期には海水中の生産有機物の寄与が大きくなる。この関係をまとめると次のように表現できるが、両者は見事に逆相関を示すのである^{6,7)}。

海面	気温	$\delta^{13}\text{C}$	C/N 比
高い	高い	大	小
低い	低い	小	大

測定結果の考察

気比低地の完新世層の場合、8000~10000年前の試料を欠くが、第9図にあげたように、縄文海進のピークは6000~5000年前に訪れたことが明確に示されており、その後海面低下の起こったことを示唆している。年代が下って約2000年前にも大きな変動期が認められる。

気比低地と同時期に調査を行なった豊岡盆地内の市街地にある八条小学校のボーリングコアの測定値からは8000~7500年前の海面が一次停滞した時期と、6000~5000年前の海面



第9図 堆積物中の ^{13}C 値及びC/N比の年代による変化

上昇のピークおよび4000年前以後の海面低下が明瞭に読みとれる（中井ほか1989）。

7. イオウ化合物—珪藻分析による古環境解析

1) 分析方法

今回はイオウ化合物含有量と珪藻遺骸群集の分析を同一の堆積物試料で行う方法を採用した。

a) イオウ化合物の分析：堆積物試料 1g（乾燥重量）を粉碎したあと、1NHCl を 10

ml を加えてウォーターバス（80–90°C）中で反応させた。反応後、蒸留水 30 ml を加えて遠心分離（3000 rpm、10分間）を行い、上澄液を回収した。沈殿物に再び蒸留水 30 ml を加えて、上記の操作を二度繰り返し、最終的に上澄液 100 ml を得た。これを 1NHCl 溶解画分とした。沈殿物は 80°C 下で乾燥させ、乾燥後 30% H_2O_2 10 ml を加えてホットプレート（80–90°C）上で2~5分間反応させた。さらに 3NHCl 2 ml を加えたのち、室温下でおよそ15時間静置した。反応終了後、前述の方法と同様にして遠心分離により上澄液 100 ml を回収し、これを 30% H_2O_2 溶解画分とした。そして残渣を珪藻分析に供した。

堆積物から 1NHCl 溶解画分および 30% H_2O_2 溶解画分中に溶出した SO_4^{2-} をそれぞれ比濁法により定量し、 SO_4^{2-} 中の S 量をもって堆積物中のイオウ化合物含有量 (S mg/g) とした。1NHCl 溶解画分の SO_4^{2-} は主に堆積物（および間隙水）中の硫酸塩と酸可溶性硫化物に、30% H_2O_2 溶解画分のそれは主としてパイライト (FeS_2) と有機イオウ化合物にそれぞれ由来するものと思われる。この点については別の機会に詳しく論議したい。

b) 珪藻分析：1NHCl と 30% H_2O_2 抽出残渣に 1% ピロリン酸ナトリウム 200 ml を加え、堆積物を十分に拡散させ、粘土成分と粗砂成分を除去して珪藻画分を得た。珪藻画分は蒸留水を加えて 100 ml とし、0.5 ml をカバーグラス上に塗布した。乾燥後、マウントメディア（和光純薬）で封入し、検鏡用スライドとした。珪藻殻の計数は Microtransect 法により、1 mg あたりの殻数を算定すると同時に出現した珪藻種の同定を行った。出現した珪藻は海生種、汽水生種、淡水生種の生態区

分に類別しその組成を百分率で表した。

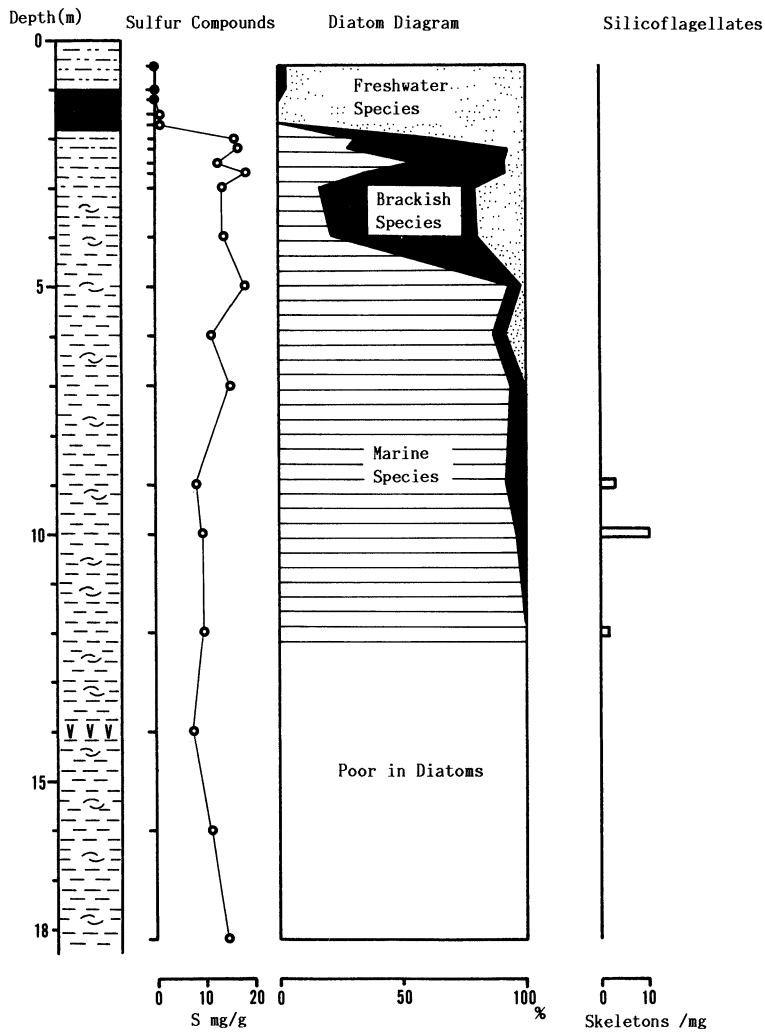
海生プランクトン種の珪質鞭毛藻 *Dictyocha fibula* の骨格についても計数を行った。*Dictyocha* の骨格の含有量は珪藻殻数との比率から算出した。

2) 分析結果

a) イオウ化合物含有量：イオウ化合物は深度 2.00 m より下位の層準で高含有量を示し、特に深度 2.00 m から 8.00 m の層準で

は 10 mg/g 以上含有されていた。深度 2.00 m からの試料で 16 mg/g の高含有量を示したイオウ化合物は深度 2.00 m から 1.75 m の間で急減し、深度 1.75 m より上位ではほとんど検出されなかった。

b) 珪藻遺骸群集と珪質鞭毛藻遺骸：堆積物中の珪藻殻は深度 12.00 m よりの下位の層準では非常に少なく、深度 14.00 m、16.00 m、18.25 m からの試料ではほとんど含有さ



第10図 気比の海成完新世層のイオウ化合物含有量と珪藻遺骸群集組成の垂直変化および珪質鞭毛藻遺骸の出現状況

れていなかった。珪藻遺骸群集は深度 5.00 m から 12.00 m の層準では海生種がおよそ 90%以上の出現率を示した。海生種としては *Palaria sulcata*、*Grammatophora spp.*、*Diploneis suborbicularis*、*Nitzschia lanceolata*、*Nitzschia punctata* などの内湾底生種が多く出現した。深度 2.00 m から 5.00 m の層準では海生種は減少し、代わって汽水生種が増加した。淡水生種も出現したが、海生種と汽水生種とで概ね80%以上を占めた。汽水生種として *Coscinodiscus lacustris*、*Diploneis pseudovalis*、*Rhopalodia gibberula* などが多く出現した。

深度 2.00 m から 1.75 m の間で珪藻遺骸群集の組成は大きく変化した。即ち、海生種と汽水生種が急減し、淡水生種が圧倒的に優占した。淡水生種としては *Melosira spp.*、*Amphora ovalis var. affinis*、*Gyrosigma sp.* など止水環境を好む種が出現した。深度 0.50 m と 1.00 m からの試料では、汽水生種の出現が若干ながら認められた。

珪質鞭毛藻 *Dictyocha fibula* の骨格が深度 9.00 m、10.00 m、12.00 m からの試料で出現した。

3) 分析結果の考察

a) 海成層の上限

堆積物中のイオウ化合物、とりわけパイライト (FeS_2) は海成堆積物において含有量が高く、淡水成堆積物と区別する有効な指標とされている。その有効性は海水中には淡水に比べて100倍以上の高濃度で SO_4^{2-} が含まれているという事実由来している⁸⁾。佐藤⁹⁾もまた30% H_2O_2 処理によって堆積物中より SO_4^{2-} として溶出するイオウ化合物の定量を試み、その含有量が珪藻遺骸群集から推定さ

れる堆積環境の変遷と合致することを報告している。

本調査地点において堆積物中のイオウ化合物含有量は深度 2.00 m から 1.75 m で急減した。このことは堆積物がこの層準で海成から淡水成に変化したことを示すものと解される。一方、珪藻遺骸群集も深度 2.00 m から 1.75 m で海生種と汽水生種の優占から淡水生種優占へと変化した。珪藻分析の結果もまたこの層準で堆積環境が海から淡水へと変化したことを示している。即ち、イオウ化合物含有量と珪藻遺骸群集からみた堆積環境の変遷は今回もよく一致し、イオウ化合物—珪藻分析から本調査地点における海成層の上限は深度 2.00 m から 1.75 m の間と推定される。これは標高にしておよそ +0.30 m から +0.55 m である。

b) 気比における古環境変遷

本調査地点では深度 12.00 m より下位の層準において堆積物中に珪藻殻がほとんど含有されておらず、珪藻分析から古環境解釈に必要な十分な情報を得ることが困難であった。しかしながら、同一堆積物試料中のイオウ化合物含有量は高く、堆積環境が海の影響下にあったことを示している。

深度 12.00 m から 5.00 m の層準では海生種が優占した。海生種として内湾底生種が多く出現し、堆積が内湾環境下で進行したことを示している。特に深度 9.00 m、10.00 m、12.00 m からの試料では海生プランクトン種の珪質鞭毛藻 *Dictyocha fibula* の骨格が出現し、深度 9.00 m から 12.00 m の層準では堆積環境が比較的水深をもった海域であったことを示唆する。

深度 2.00 m から 5.00 m の層準では上位

にいくにつれて海生種が減少し代わって汽水生種が増加する傾向を示した。このことは調査地点が海退に伴い淡水の影響を受けはじめ、徐々にその影響が強くなっていったことを反映するものと解される。

深度 2.00 m より上位では淡水生種が優占した。汽水生種もわずかに出現したがイオウ化合物がほとんど検出されないことから、海の影響を考慮する必要はないものと思われる。淡水生種として止水環境を好む種が多いことから、調査地点は海退後、沼沢環境へと変化したものと解される。

今回の調査ではイオウ化合物の分析から明らかに海成と考えられる下位の層準において堆積物中に珪藻殻がほとんど認められなかった。特に、深度 14.00 m 付近は ^{14}C 年代値と火山ガラスの分布から完新世海進の頂期と考えられる。それにもかかわらず堆積物中に珪藻殻が含有されていない原因については不明であるが、このようなケースは日本海側の沖積層においてこれまでにもしばしば認められている¹⁰⁾。この点についてはさらにデータを集積し検討していく必要がある。そのためにも今回示したような同一試料におけるイオウ化合物—珪藻分析は有効で、互いの結果をクロスチェックしながら相互補完的に古環境解釈を行っていくことが今後とも重要であろう。

8. 花粉分析による古植生の考察

花粉分析の方法

試料を水酸化カリウム5%溶液で処理した後、塩化亜鉛飽和溶液による濃集分離を行い検鏡した。花粉粒化石は木本花粉化石粒が300粒を超えるまで計数し、その時点におけ

る草本花粉化石粒、シダ植物孢子化石数も加えて総数として統計処理を行なった。この報告では、木本花粉化石粒のみによる産出頻度の変化と、針葉樹、広葉樹、草本類、シダ植物の区別からみた産出傾向の変動とを手がかりにして、古気比湾低地から古気比川源流地にかけての森林植生の変遷を追跡した。

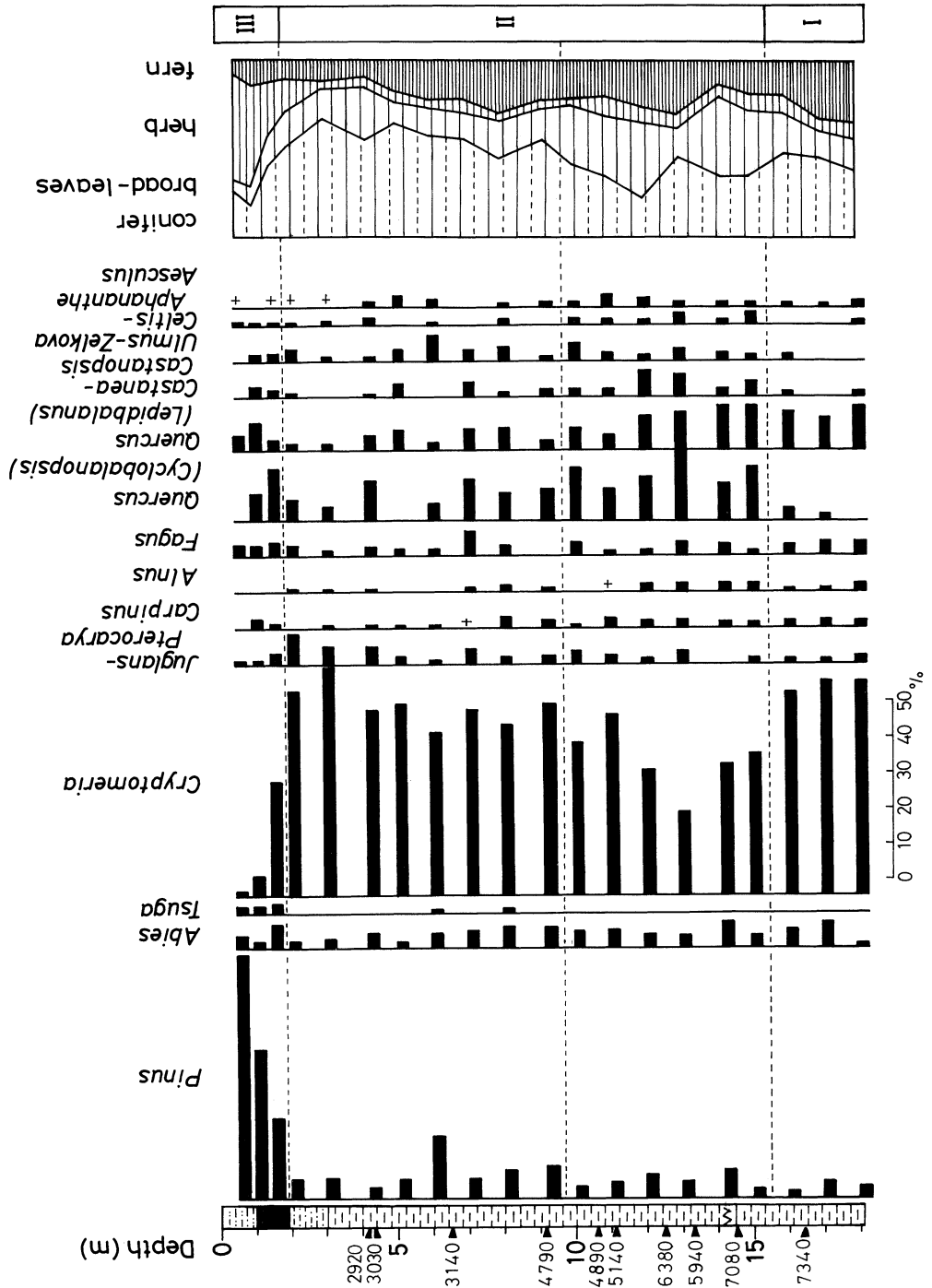
花粉分析の対象にした完新世の堆積物は、深度 18 m から深度 0.5 m までの範囲でその層相変化は地質柱状図に示したように深度 2.0 m までの泥炭層に深は細砂質シルト～シルト質粘土で構成される内湾性細粒堆積物からなり、貝殻片を多く含んでいたが、花粉孢子化石も豊富に含まれていた。加速器による堆積物の ^{14}C 年代では深度 16.7 m のイセシラガイが $7340 \pm 110 \text{ y.B.P.}$ と測定されており、最下部の ^{14}C 年代値は測定できなかったものの第6図の time-depth 図から推定して、ほぼ8000年前から現在にいたる間の堆積物の花粉分析を行なったといえる。

分析結果の考察

花粉分析の結果はパーセント表示でダイアグラム化した。産出樹種の消長にもとづいて下部から上部へⅠ、Ⅱ、Ⅲの花粉化石帯の分帯区分を行った。

Ⅰ帯はスギ (*Cryptomeria*) が圧倒的な高率で優占するが、コナラ亜属 (*Quercus: Lepidobalanus*)、ブナ属 (*Fagus*)、クルミ属 (*Juglans*)、クマシデ属 (*Carpinus*) などの落葉樹が産出する。針葉樹ではスギのほかマツ属の二葉松 (*Pines: Dyploxylon*) とモミ属 (*Abies*) が低率であるが産出する。年代は8,000～7,000年前と推定される。

Ⅱ帯はスギの優占状態が依然として続くが、アカガシ亜属 (*Quercus: Cyclobalanopsis*) とシ



第11図 気比の海成完新世層の花粉孢子化石出現傾向

イ属 (*Custanopsis*) の急増で特徴づけられる。4000年頃一時的に気候悪化の時期があったのかアカガン亜属やシイ属などが僅かに減少する。この深度 10 m を境に 2 つの subzone としてみることもできる。年代は 7000~2000 年前と推定される。Ⅲ帯はマツ属二葉松型の急増とイネ科の増加、スギの急減が目される(第11図)。

これらの花粉化石群の産出傾向に基いて古植生の復元及びこれに関連する問題点をあげる。スギはⅠ、Ⅱ帯を通じて高率の産出傾向を示すが、気比低地の完新世層の最下部から出現するので、出現期は明確ではないが、円山川の上流の城崎郡日高町の大沼(高度 610 m) ではほぼ 8000 年頃から急増し¹¹⁾、福井県三方五湖もほぼ同時期である¹²⁾。気比低地では 6000 年前ごろに一時的に 20% 程度に減少する時期があるが、他の時期は常に 40% を超す優占状態を示す。これは水通しのよい丘陵—低地においてスギが立地条件に恵まれ優占度の高い景観をなしていたとみることができる。しかし、完新世のほぼ全期間を通じて優占状態を示していたとみるのは早計である。たとえば宍道湖のような非常に広範囲の地から花粉化石粒が供給されてくる堆積盆の場合、スギは注目されるほどの高率を示さず 10% 以下の産出率である^{13,14)}。このようにみると、気比低地のスギは局地的な景観ではなかったかと推定できる。

またスギが急減するⅢ帯ではマツ属、イネ科植物が急増し、ソバが産出するなど人間の生産活動に伴って丘陵・低地林の焼失などの植生変化が生じたのではなからうか。

Ⅱ帯において照葉樹林の中核を占めるアカガン亜属、シイ属の急増が認められるが、落

葉性のコナラ亜属を上回る産出状態になるのは、アカホヤ火山灰の降灰後のほぼ 6000 年前である。この当時はスギを中心に照葉樹のアカガン亜属、シイ属、などにコナラ亜属などの落葉樹も混生する針広混生林が形成されていたものと思われる。前述したようにスギは地表水分の多い所に局地的に優占したものと推定される。さらに気比低地には、クルミ属 (*Juglans*)、トチノキ属 (*Aesculus*)、トネリコ属 (*Fraxinus*) など、渓谷林ともいべき樹種が完新世を通じて存在することも注目される。

9. まとめ

完新世における兵庫県豊岡市気比低地の古環境に関して研究を行なったが、気比海岸の浜堤下に 60 m に近い層厚をもつ完新世~更新世末期の海成層の存在することが判明したので、この研究の総括・討論は、その海成層の調査を終えた時点にしたいと考えている。ここでは今回の研究で判明した事実を要約するにとどめる。

1. 気比低地を構成する完新世層は、主に泥質の海成堆積物からなり、古環境復元のための情報を多く包含していることがわかった。
2. 縄文海進による海面上昇に関して、約 8000 年前には -16 m 前後に海面の位置が想定される。海進時期は 6000~5000 年前であるが、そのときの海面高度を示す地形的、地質的証拠は得られなかった。海成層の上限高度は +0.3~+0.55 m にある。その正確な年代は今回は測定できなかった。
3. 縄文海進期を通じて、ほぼ 2000 年前まで古気比湾は幅 300 m、長さ 4 km の狭長な

海域であるにもかかわらず比較的潮通しのよい環境下にあったことが、多くの内湾性生物群集の中に沿岸性群集が存在することによって判明した。

4. スギを中心とする針広混生林が形成されていたが落葉樹林から照葉樹林への交代はアカホヤ火山灰の降灰後の約6000年前である。完新世層の上部でマツ属、イネ科の急増、ソバ花粉の検出などから人間の生産活動に伴う植生変化が生じた。
5. 古環境解析のため加速器による ^{14}C 年代の測定をはじめ ^{13}C 比、C/N 比、イオウ化合物、珪藻、有孔虫、貝類、花粉化石などを研究方法にとり入れたが、何れも有効であった。

注

- 1) 町田 洋・新井房夫 (1978) 南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ—アカホヤ火山灰—第四紀研究 17 143-163.
- 2) 佐藤裕司 (1989) 過酸化水素水処理—比濁法による硫黄分析と堆積環境 第四紀研究 28 35-40.
- 3) 松島義章 (1984) 日本列島における後氷期の浅貝性貝類群集—特に環境変遷に伴うその時間・空間的変遷— 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学) 15 37-109.
- 4) Matsubara, A (1988): Geomorphic Development of Barriers in the Coastal Lowlands dur-

ing the Holocene-A Case Study of the Coastal Lowlands along the Suruga Bay, Central Japan-Bull. Dept. Geogr., Univ. Tokyo, 20, 57-77.

- 5) 松原彰子 (1989) : 完新世における砂州地形の発達課程—駿河湾沿岸低地を例として—地理評、62A-2、160-183.
- 6) Kusunoki Satoshi (1989) Geochemical studies on paleoenvironmental changes using the Holocene cored sediment from Toyooka, Hyogo Prefecture. 名古屋大学理学部地球科学科卒業論文 1-22.
- 7) 中井信之・太田友子・大石昭三・馬場直美・楠 聡・吉岡茂雄・中村俊夫・前田保夫 (1989) 堆積物コアの有機物炭素の ^{13}C ・C/N 比及び加速器 ^{14}C 年代からみた完新世の海水準変動 (II) 日本第四紀学会講演要旨集 19 126-127.
- 8) Berner, R. A. and Raiswell, R., (1984) C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geology*, 12, p. 365-368.
- 9) 前掲 2)
- 10) 新潟第四紀研究グループ (1972) 東京低地および新潟平野沖積層の生層序区分と堆積環境、地質学論集 第 7 号 p. 213-233.
- 11) Miyoshi, N. & N. Yano (1986) Late Pleistocene and Holocene vegetational history of the Ohnuma moor in the Chugoku mountains, western Japan. *Paleobotany and Palynology* 46 355-376.
- 12) 安田喜憲 (1982) 福井県三方湖の泥土の花粉分析学的研究 第四紀研究 21 255-271.
- 13) 大西郁夫 (1985) 中海宍道湖湖底およびその周辺地域の最上部完新統の花粉分析。島根大学地質学研究報告、4、115-126.
- 14) 渡辺正巳・中海・宍道湖自然史研究会 (1988) 中海・宍道湖より得られた柱状試料の花粉分析、島根大学地質学研究報告、7、25-32.

【英文タイトルおよび著者名】

Holocene Paleoenvironmental changes in the Kei lowland, eastern part of the San-in coast.

MAEDA Yasuo, N. NAKAI, E. MATSUMOTO, T. NAKAMURA, S. KUSUNOKI,
Y. MATSUSHIMA, H. SATO, A. MATSUBARA, S. KUMANO, M. KUROMI,
M. NUKADA, T. AOKI, N. FURUTA, T. KOBASHI, J. MATSUI,
N. KAWAHARA and H. YAMASHITA