

8. 気仙沼市九九鳴浜における現地調査

8.1 調査の概要

東北地方太平洋沖地震では巨大津波が発生するとともに、地殻変動によって三陸海岸南部は最大1.4m沈降した。こうした巨大地震の波源を特定するには、同様のイベントの履歴解明が必要である。このためには、地殻変動と津波の両方が地層中に保存されている場所を特定することがまず必要である。

こうした中、三陸海岸に位置する気仙沼市唐桑町九九鳴浜（図8-1）は、津波による浸水範囲となるとともに0.7m程度沈降した。その結果、海岸線が陸側に移動してかつて樹木が繁茂していた部分にまで砂浜が後退した。九九鳴浜を含む三陸海岸は沈水海岸であり、過去に繰り返し津波被害を受けてきた地域であることから、同様の地殻変動と古津波の痕跡が堆積物中に保存されていることが期待される。



図8-1 九九鳴浜の位置

このような背景から、本調査は九九鳴浜の汀線付近の過去数千年間の環境指標をプロキシとして、過去の巨大地震による沈降過程と津波履歴解明を目的とした。

調査は、九九鳴浜背後の湿地で基盤まで達するボーリングを行い、コアを採取し、肉眼観察、帯磁率測定、貝化石分析、硫黄分析、珪藻分析、放射性炭素年代測定などの各種分析を行った。

8.2 調査内容と方法

(1) ボーリング

2015年8月3日～11日にボーリングを実施した。詳細位置を図8-2に示す。

地点名	緯度	経度	標高 (TP.m)	掘削長 (m)
KKN1501	38° 53′ 35.66348″	141° 37′ 29.99711″	0.867	14.0
KKN1502	38° 53′ 35.76589″	141° 37′ 29.99219″	1.024	13.0



図 8-2 KKN1501, KKN1502 コアの採取位置図

(2) コア処理

採取したコアを対象に、以下の処理 (図 8-3)を行った。

- (1) コアの周囲のビニール製ケーシングを剥ぎ取り、半割した塩ビパイプに挟みワイヤー等を用いて、縦半分に分割する。一方を剥ぎ取り試料作製等の保存用、もう一方を観察及び試料採取用とする。
- (2) 採取試料・観察用の半割試料について、必要に応じて断面をスパチュラ等で整形し、巻き尺とともに写真撮影を行う。
- (3) 地層中の磁性鉱物含有率による物性の違いを捉えるため、帯磁率測定を行う。
- (4) 観察結果は、最終的にはコア写真とともにコアの堆積構造等が把握できるように観察野帳を整理した柱状図を作成する。
- (5) 柱状図として整理するにあたっては、コア全体の堆積状況が的確に把握できるよう、帯磁率、コア写真等の情報と併記し作図する。

KKN1501 コアは年代測定、硫黄分析、貝化石分析用に試料採取を行った。



図 8-3 コア処理作業フロー

(3) 帯磁率測定

帯磁率の測定は、携帯型帯磁率計（SM-30：ZHinstruments 社製）（写真 8-1）を用いて、2cm 間隔で測定した。



図 8-3 SM-30 型携帯帯磁率計

(3) 礫分・貝化石分析

KKN1501 コアを対象に礫分重量を秤量し、貝化石の有無を調べ、含有していた場合貝化石の種を同定してその棲息環境を調べ、これらから堆積環境の特定、イベント堆積物の有無の確認、海棲層上限高度（マリントップ）の特定を行うことを目的とする。

堆積物コアを 20cm 毎に切断して調査用試料とした。コア観察で何らかのイベントが想定されるコア部分は 10cm 単位で切断し調査用試料とした。

作業の手順は以下の通りである。

- (1) 前処理として、1mm 目の篩上で試料を水洗し、残った 1mm 以上の堆積物を乾燥させた。
- (2) 2mm 目の篩で試料を乾式篩別した。残った 2mm 以上の礫サイズ以上の堆積物をコアの 20cm 区間毎の礫分の重量を電子天秤で秤量(図 8-4)した。
- (3) 秤量後、礫分の写真撮影をおこなった。さらにプランクトンピンセットを使って堆積物から貝化石を拾い上げた(図 8-5)。
- (4) 貝化石は貝類図鑑等を用いて種を同定した。
- (5) 主要な貝化石を接写撮影し、主要な貝化石の図版を作成した。



図 8-4 電子天秤による礫分の秤量



図 8-5 拾い上げられた貝化石試料

(4) 硫黄同位体分析

KKN1501 コアを対象に硫黄同位体分析を実施した。以下に硫黄同位体分析の手順を示す。分析に使用した試験機器を図 8-6 示す。

- (1) 堆積物を遠沈管 (10ml) に移し、1 規定塩酸を 5ml ほど入れる。
- (2) 試料が炭酸塩を含む場合はここで激しく発泡するので一晩静置。
- (3) 一晩静置後、6 規定塩酸を数滴遠沈管に加え更なる発泡が無いことを確認。
- (4) 遠沈管に蓋をしたのち、遠心分離 (3000rpm, 5 min.)。
- (5) 上澄み液を捨て、純水を 5ml ほど加え同様に遠心分離、上澄みを捨てる。
- (6) 再び純水を加え遠心分離後上澄みを捨てる操作を 3 回繰り返す (遠心洗浄)。
- (7) 上澄みの純水を捨てた試料を凍結し、凍結乾燥。
- (8) 凍結乾燥後の試料から粗粒分 (小礫や植物片) を 150 メッシュで篩い分け後、スズ製のカプセルに 5~10mg 秤量。
- (9) スズカプセルに包んだ試料を元素分析ー連続フロー同位体質量分析計にて炭素と硫黄の定量と硫黄の同位体比測定を行う。



図 8-6 直接同位体分析用質量分析計 (左) と Elemental Analyzer (右)

(4) 珪藻分析

作業の手順は以下のとおりである。

- (1) コアより採取した各サンプリング試料を 2g 計量の後、ビーカーに入れ、過酸化水素水で煮沸する。
- (2) 4 回洗浄した後、カバーガラス上に滴下 (0.5ml) し乾燥させ、マウントメディアを用いて永久プレパラートに封入する。
- (3) 検鏡は、光学顕微鏡 (Olympus 社製 CX41) を用いて、油浸レンズ (倍率 1000 倍) で試料ごとに珪藻殻のカウントを行う。

(5) 放射性炭素年代測定

測定は（株）加速器分析研究所に依頼した。分析方法は以下の通り。

化学処理工程

- 1) メス・ピンセットを使い、付着物を取り除く。
- 2) 酸-アルカリ-酸 (AAA: Acid Alkali Acid) 処理により不純物を化学的に取り除く。
その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。AAA 処理における酸処理では、通常 1mol/l (1M) の塩酸 (HCl) を用いる。アルカリ処理では水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液を用い、0.001M から 1M まで徐々に濃度を上げながら処理を行う。アルカリ濃度が 1M に達した時には「AAA」、1M 未満の場合は「AaA」と表 1 に記載する。
- 3) 試料を燃焼させ、二酸化炭素 (CO₂) を発生させる。
- 4) 真空ラインで二酸化炭素を精製する。
- 5) 精製した二酸化炭素を、鉄を触媒として水素で還元し、グラファイト (C) を生成させる。
- 6) グラファイトを内径 1mm のカソードにハンドプレス機で詰め、それをホイールにはめ込み、測定装置に装着する。

測定方法

加速器をベースとした ¹⁴C-AMS 専用装置 (NEC 社製) を使用し、¹⁴C の計数、¹³C 濃度 (¹³C/¹²C)、¹⁴C 濃度 (¹⁴C/¹²C) の測定を行う。測定では、米国国立標準局 (NIST) から提供されたシュウ酸 (HOx II) を標準試料とする。この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施する。

算出方法

- 1) δ¹³C は、試料炭素の ¹³C 濃度 (¹³C/¹²C) を測定し、基準試料からのずれを千分偏差 (‰) で表した値である (表 1)。AMS 装置による測定値を用い、表中に「AMS」と注記する。
- 2) ¹⁴C 年代 (Libby Age : yrBP) は、過去の大気中 ¹⁴C 濃度が一定であったと仮定して測定され、1950 年を基準年 (0yrBP) として遡る年代である。年代値の算出には、Libby の半減期 (5568 年) を使用する (Stuiver and Polach 1977)。¹⁴C 年代は δ¹³C によって同位体効果を補正する必要がある。補正した値を表 1 に、補正していない値を参考値として表 2 に示した。¹⁴C 年代と誤差は、下 1桁を丸めて 10 年単位で表示される。また、¹⁴C 年代の誤差 (±1σ) は、試料の ¹⁴C 年代がその誤差範囲に入る確率が 68.2%であることを意味する。
- 3) pMC (percent Modern Carbon) は、標準現代炭素に対する試料炭素の ¹⁴C 濃度の割合

である。pMC が小さい (^{14}C が少ない) ほど古い年代を示し、pMC が 100 以上 (^{14}C の量が標準現代炭素と同等以上) の場合 Modern とする。この値も $\delta^{13}\text{C}$ によって補正する必要があるため、補正した値を表 1 に、補正していない値を参考値として表 2 に示した。

- 4) 暦年較正年代とは、年代が既知の試料の ^{14}C 濃度をもとに描かれた較正曲線と照らし合わせ、過去の ^{14}C 濃度変化などを補正し、実年代に近づけた値である。暦年較正年代は、 ^{14}C 年代に対応する較正曲線上の暦年代範囲であり、1 標準偏差 ($1\sigma = 68.2\%$) あるいは 2 標準偏差 ($2\sigma = 95.4\%$) で表示される。グラフの縦軸が ^{14}C 年代、横軸が暦年較正年代を表す。暦年較正プログラムに入力される値は、 $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行い、下 1 桁を丸めない ^{14}C 年代値である。なお、較正曲線および較正プログラムは、データの蓄積によって更新される。また、プログラムの種類によっても結果が異なるため、年代の活用にあたってはその種類とバージョンを確認する必要がある。ここでは、暦年較正年代の計算に、IntCal13 データベース (Reimer et al. 2013) を用い、OxCalv4.2 較正プログラム (Bronk Ramsey 2009) を使用した。暦年較正年代については、特定のデータベース、プログラムに依存する点を考慮し、プログラムに入力する値とともに参考値として表 2 に示した。暦年較正年代は、 ^{14}C 年代に基づいて較正 (calibrate) された年代値であることを明示するために「cal BC/AD」または「cal BP」という単位で表される。

8.3 調査結果

(1) コア試料の層相および帯磁率

採取した2本の堆積物コア試料の肉眼によるコア断面の観察・記載を行った。その結果を帯磁率測定結果とともに柱状図（図8-7、図8-8）に示す。

KKN1501（採取長：14.00m）

- 0～0.2m : 植物片を多く含む表土、
 - 0.2～3.1m : 暗褐色の有機質シルト～砂
 - 3.1～8.0m : 青灰色を呈する砂質シルト～細砂。全体を通じて礫の密集部が散在する。
 - 8.0～11.9m : 暗灰色の砂質シルト～細砂
 - 11.9～12.6m : 黄褐色の貝殻混じり砂礫
 - 12.6～14.0m : 砂岩
- 7.60～7.80m, 9.00～9.10m, 9.70～0.75mに礫層を挟む。

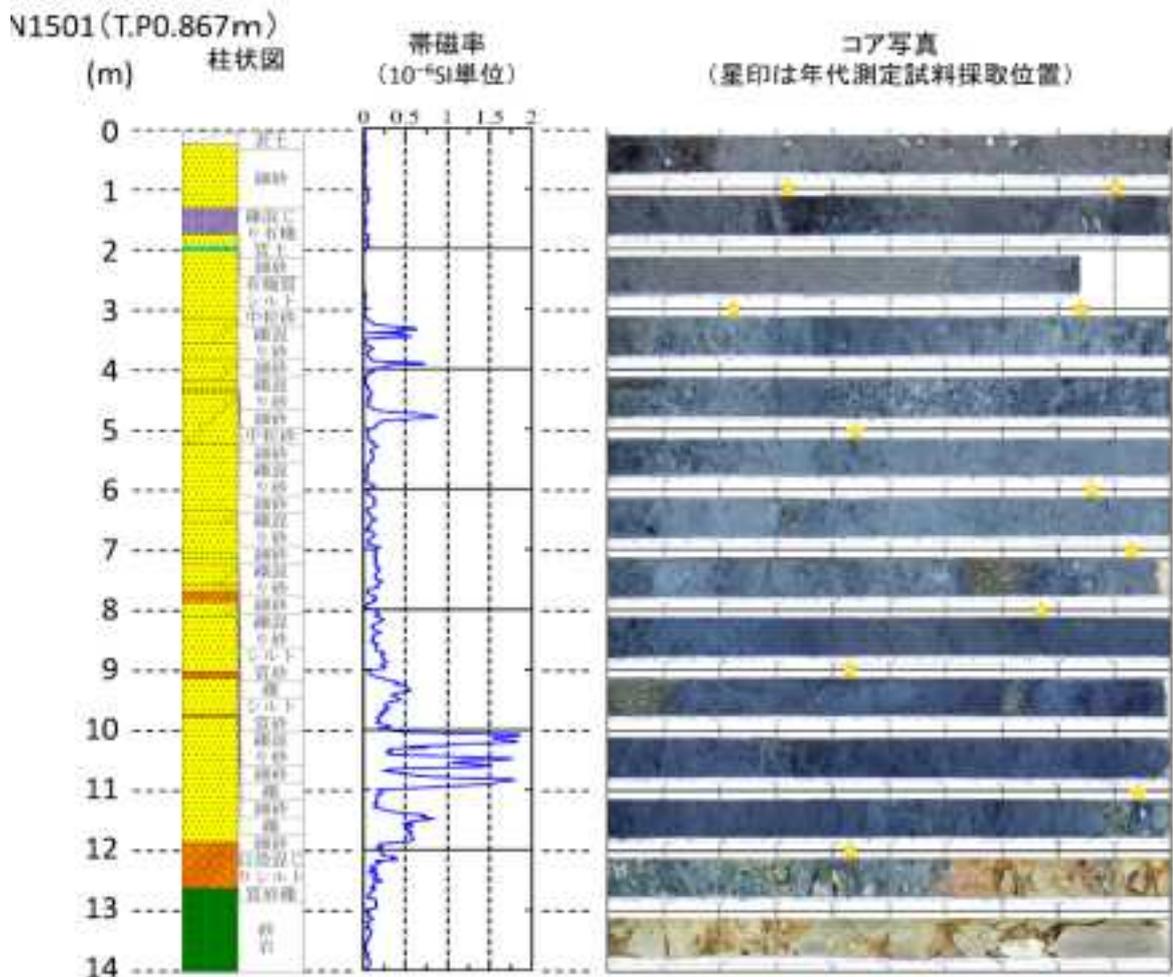


図8-7 KKN1501 コア

KKN1502 (採取長 : 13.00m)

- 0.5~0.55m : 植物片を多く含む表土,
- 0.55~2.5m : 暗褐色の有機質シルト~砂
- 2.5~7.8m : 青灰色を呈する砂質シルト~細砂. 全体を通じて礫の密集部が散在する.
- 7.8~11.3m : 暗灰色の砂質シルト~細砂
- 11.3~11.9m : 黄褐色の貝殻混じり砂礫
- 11.9~13.5m : 砂岩

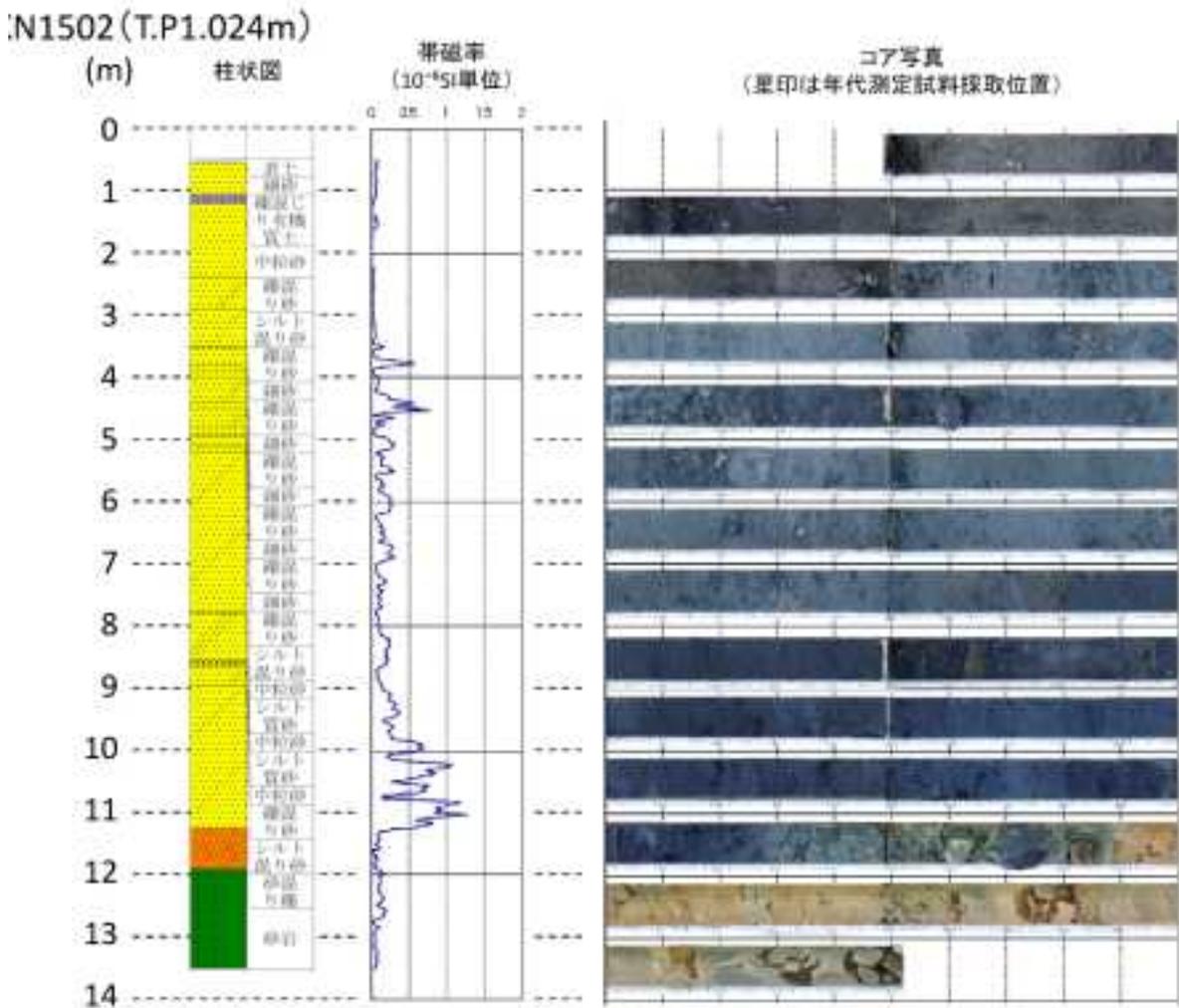


図 8-8 KKN1502 コア

(2) 礫分・貝化石分析

分析した貝化石の写真を図 8-9～図 8-11 に示す。



図 8-9 KKN-1501 主要二枚貝 2 の写真



図 8-10 KKN-1501 主要二枚貝 2 の写真



図 8-11 KKN-1501 主要巻貝ほかの写真

各深度区間の礫分（2mm 以上）の写真を図 8-12～図 8-29 に示す。



図 8-12 コア 0.2-1.0m 間の礫分（2mm 以上）の写真 スケールは 3cm

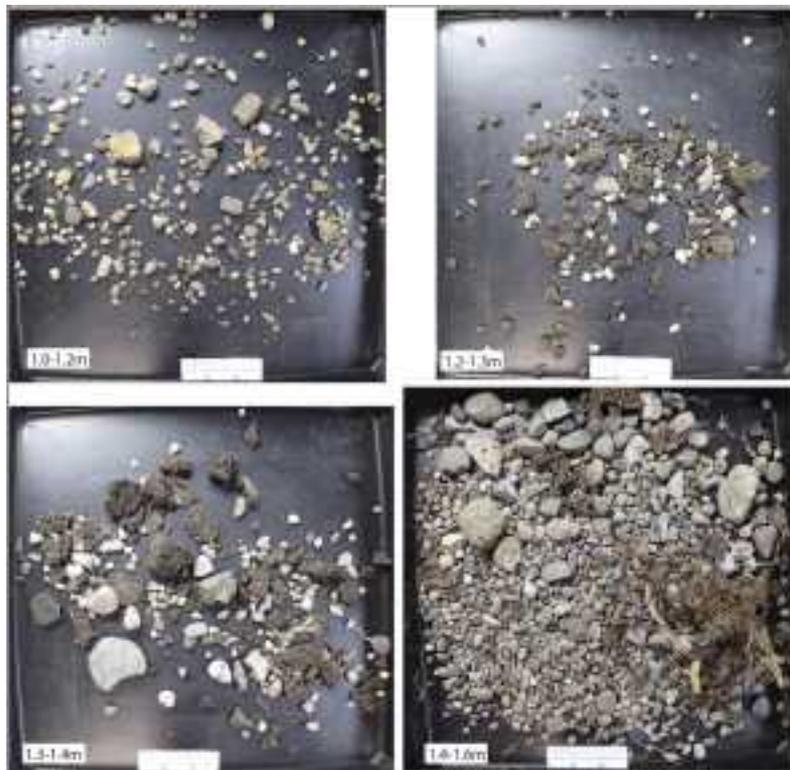


図 8-13 コア 1.0-1.6m 間の礫分（2mm 以上）の写真 スケールは 3cm



図 8-14 コア 1.6-2.2m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-15 コア 2.2-2.85m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-16 コア 3.0-3.8m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-17 コア 3.8-4.6m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-18 コア 4.6-5.4m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-19 コア 5.4-6.2m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

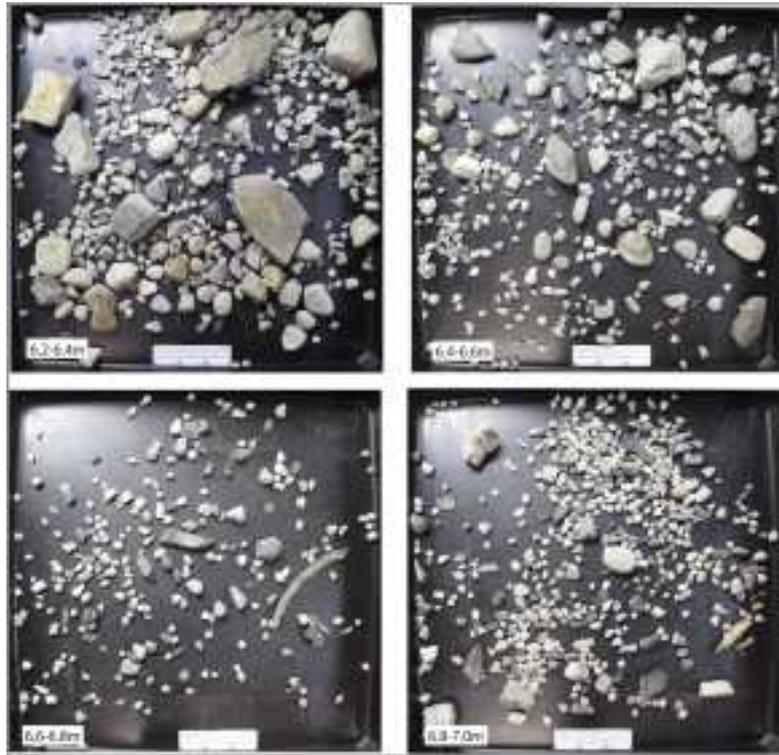


図 8-20 コア 6.2-7.0m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-21 コア 7.0-7.7m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

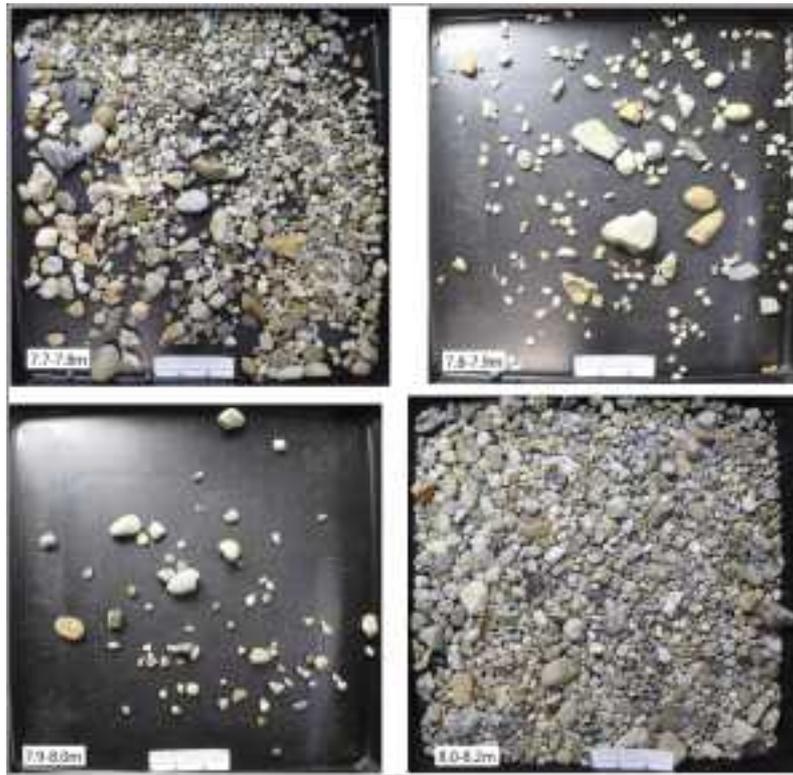


図 8-22 コア 7.7-8.2m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

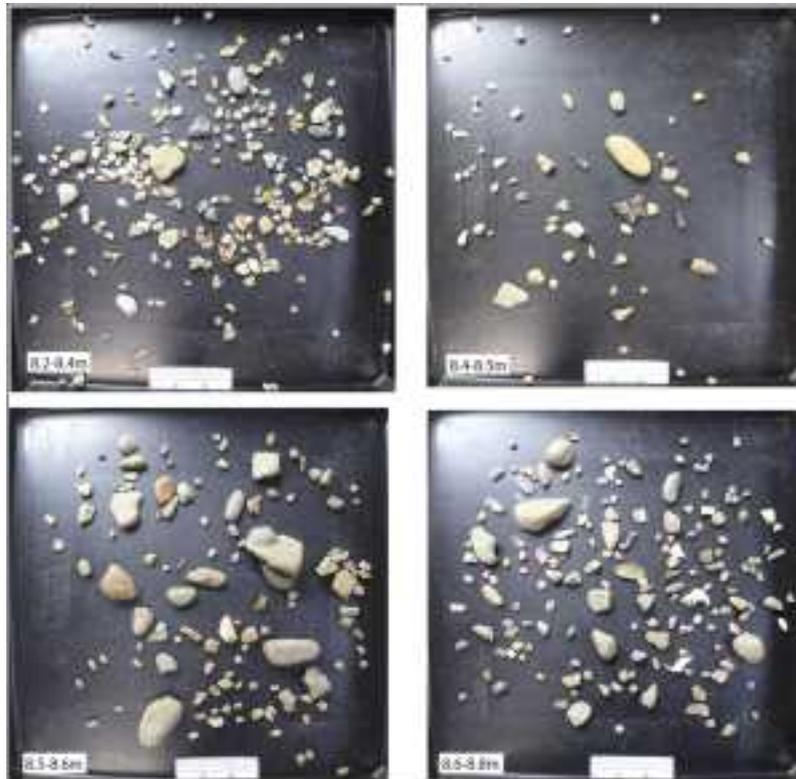


図 8-23 コア 8.2-8.8m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

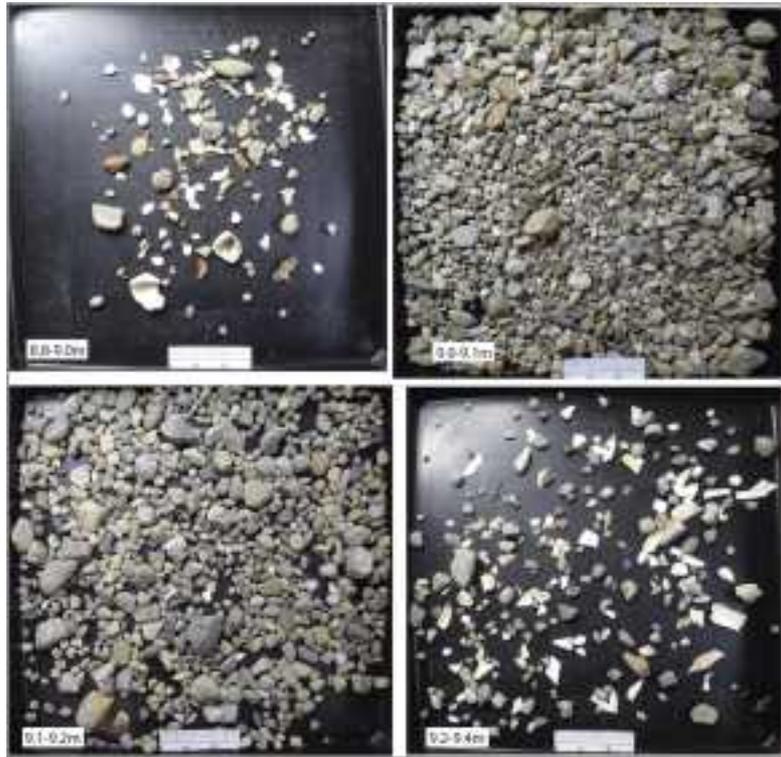


図 8-24 コア 8.8-9.4m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

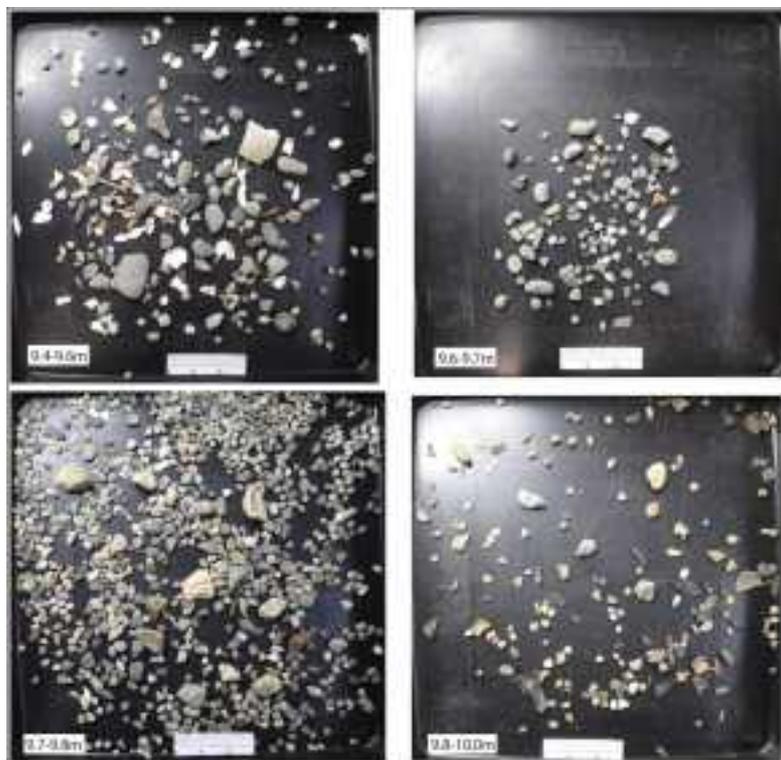


図 8-25 コア 9.4-10.0m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

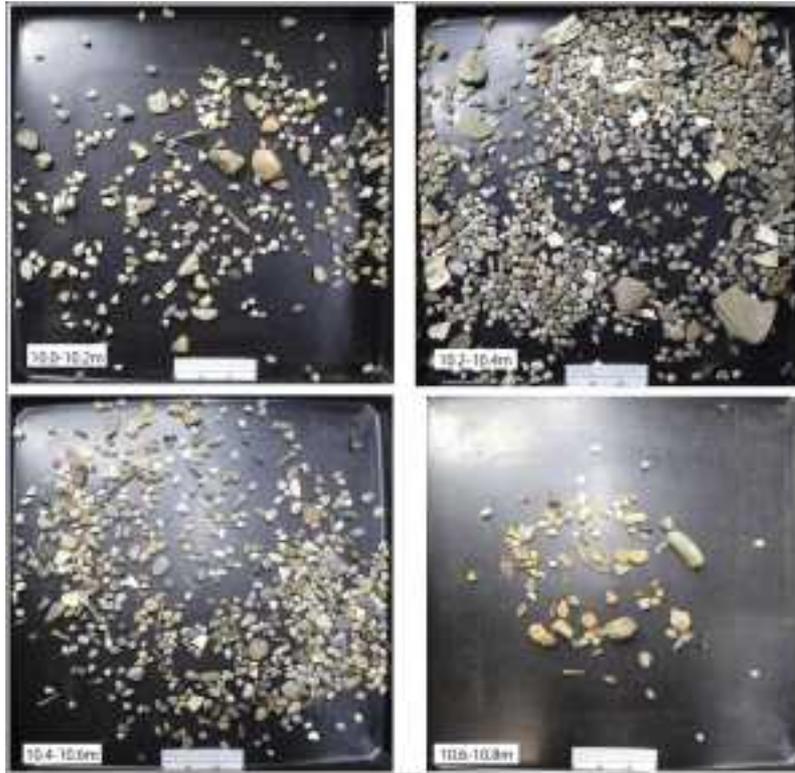


図 8-26 コア 10.0-10.8m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケール 3cm

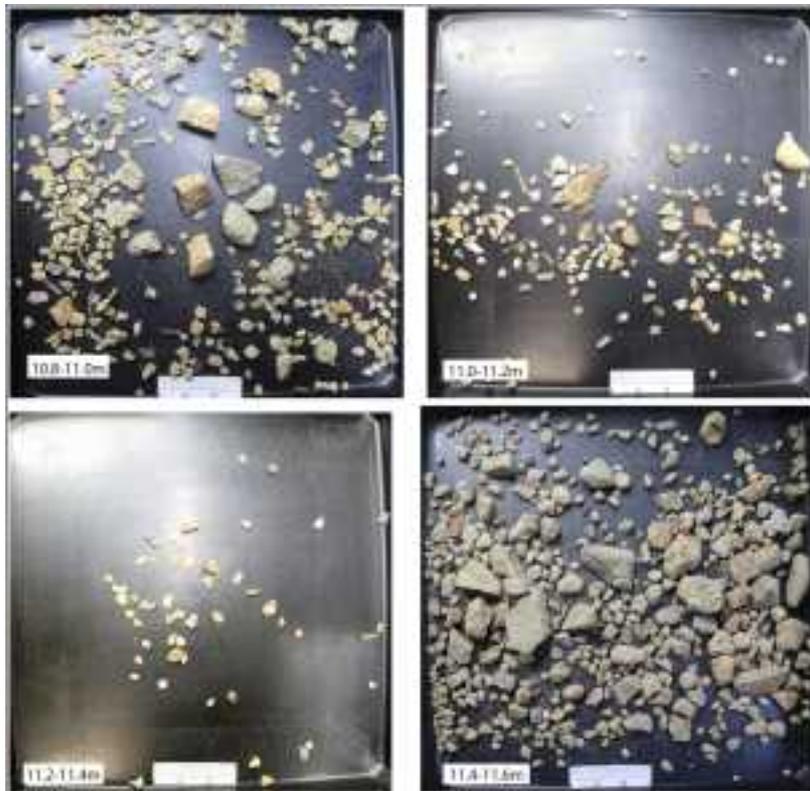


図 8-27 コア 10.8-11.6m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm



図 8-28 コア 11.6-12.2m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

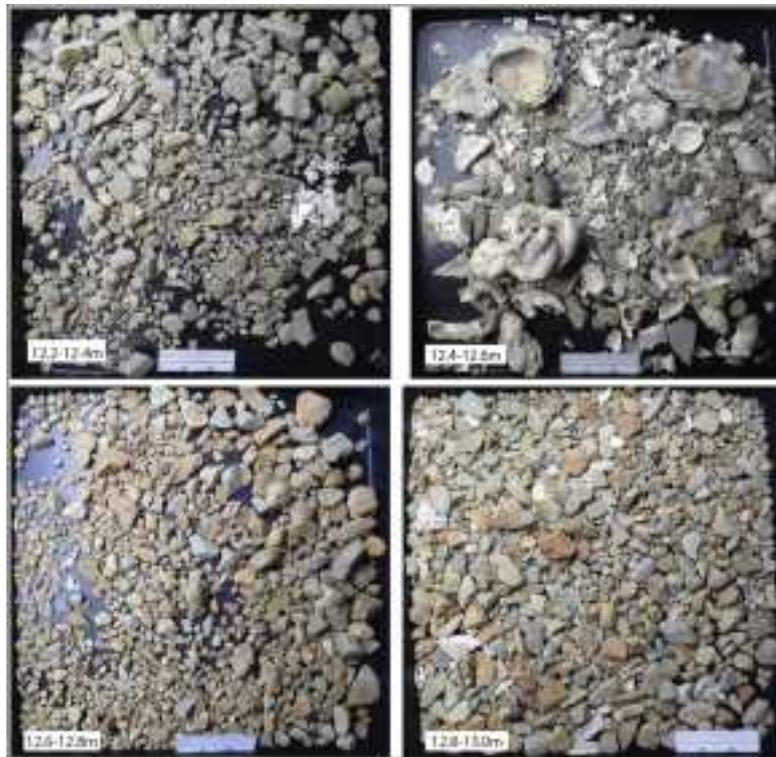


図 8-29 コア 12.2-13.0m 間の礫分 (2mm 以上) の写真 スケールは 3cm

(3) 硫黄分析

KKN1501 コア試料の硫黄（全硫黄；TS）濃度計測結果を図 8-30 に示す。一部試料について測定された全有機炭素（TOC）濃度および TOC を TS で割った C/S 比も示した。TS 濃度（重量%）は検出限界下（0 と表記）から最大 0.77 %の範囲で変動した。TOC 濃度は 0.1 %から 6 %を越えるものまで幅広く見られた。それを反映し、C/S 比は 1 を切るものから 100 を越えるものまで幅広く見られた。

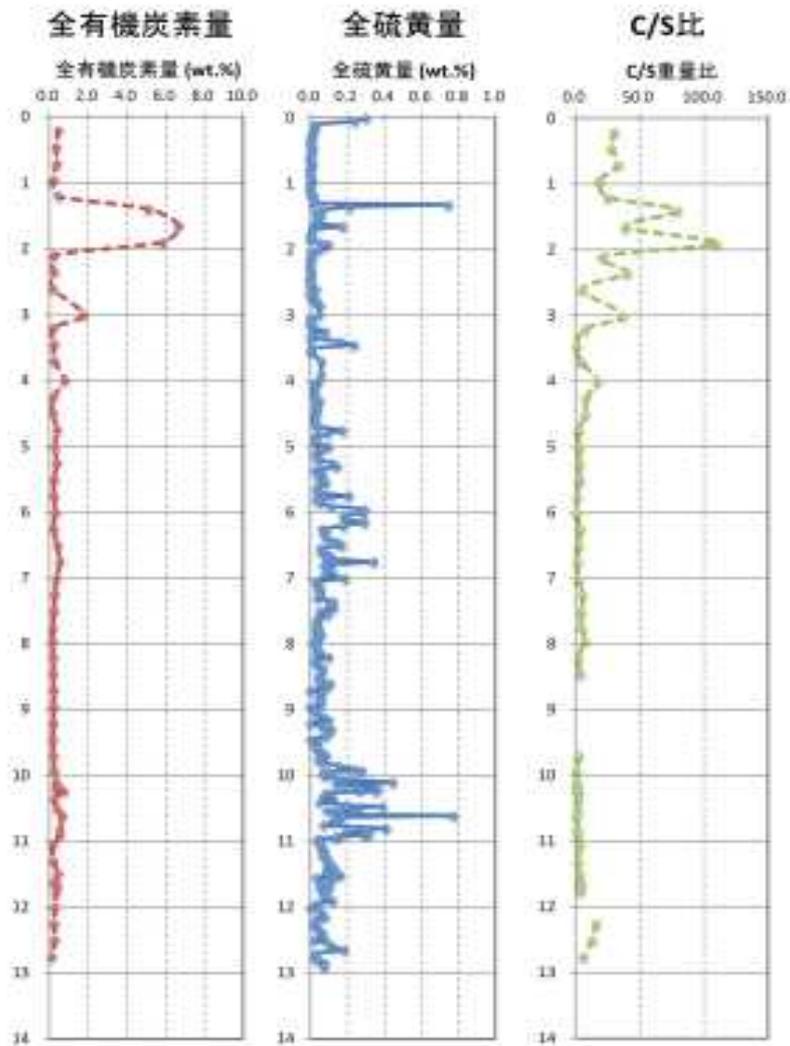


図 8-30 KKN1501 コアの全有機炭素量 (TOC), 全硫黄量 (TS), C/S 重量比グラフ

TS 濃度は一部ピークが高い場所が見られるが、約 3 m 以浅でベースラインは 0.05 % を切る低さで、それ以深では多くの深度で 0.05% を超える値を示した。特に 5.8 m から 7.8 m の区間、9.6 m 以深の区間では、おおよそ 0.1 % を超える値を示した。

(5) 放射性炭素年代分析

KN1501 コアの放射性炭素年代分析結果を表 8-5 に示す。

表 8-5 KKN1501 コアの放射性炭素年代分析結果一覧表

試料名	試料形態	δ13C補正あり		1σ 暦年代範囲			2σ 暦年代範囲			モデル	備考
		Libby Age(yrBP)		(68.2% calBP)			(95.4% calBP)				
KKN1501-25	枝・小枝	Modern		52	-	48	54	-	46	IntCal13	追加試料
KKN1501-35	枝・小枝	Modern		52	-	48	54	-	46	IntCal13	追加試料
KKN1501-125	枝・小枝	3,890	± 30	4,406	-	4,294	4,417	-	4,240	IntCal13	追加試料
KKN1501-132	木片	3,660	± 30	4,077	-	3,926	4,085	-	3,899	IntCal13	
KKN1501-190	木炭	1,730	± 20	1,695	-	1,606	1,700	-	1,569	IntCal13	
KKN1501-225	枝・小枝	2,780	± 30	2,929	-	2,845	2,953	-	2,793	IntCal13	追加試料
KKN1501-235	枝・小枝	3,150	± 30	3,441	-	3,350	3,449	-	3,260	IntCal13	
KKN1501-322	炭質物	4,580	± 30	5,436	-	5,093	5,447	-	5,066	IntCal13	
KKN1501-384	材	4,740	± 30	5,581	-	5,335	5,584	-	5,328	IntCal13	
KKN1501-485	枝・小枝	5,020	± 30	5,882	-	5,715	5,892	-	5,659	IntCal13	追加試料
KKN1501-544	材	5,340	± 30	6,192	-	6,020	6,263	-	6,001	IntCal13	
KKN1501-615	枝・小枝	5,610	± 30	6,413	-	6,320	6,447	-	6,310	IntCal13	追加試料
KKN1501-686	炭質物	5,740	± 30	6,602	-	6,487	6,635	-	6,453	IntCal13	
KKN1501-793	炭質物	4,630	± 30	5,447	-	5,312	5,464	-	5,301	IntCal13	
KKN1501-877	貝	6,570	± 30	7,149	-	7,042	7,183	-	6,982	Marine13	
KKN1501-943	貝	6,720	± 30	7,292	-	7,212	7,320	-	7,164	Marine13	
KKN1501-1025	枝・小枝	6,190	± 30	7,161	-	7,024	7,176	-	6,990	IntCal13	追加試料
KKN1501-1105	枝・小枝	6,510	± 30	7,465	-	7,417	7,483	-	7,329	IntCal13	追加試料
KKN1501-1194	貝	6,670	± 30	7,238	-	7,167	7,274	-	7,138	Marine13	
KKN1501-1243	貝	6,940	± 30	7,474	-	7,415	7,520	-	7,385	Marine13	

8.4 分析結果のまとめと考察

(1) 堆積相と貝化石から推定される堆積環境

KN1501 コア堆積物の堆積相と貝化石から推定される海成層上限(マリントップ)は、コア深度 8.6m である。8.6m~9.0m の堆積環境は海浜(ビーチ)とみられ、9.2~13.0m 間の堆積物は海成層である。コアに含まれた完全殻の二枚貝化石から、さらに詳しい堆積環境を読み取ると、内湾の潮間帯下部から潮下帯の範囲にある。マリントップから上部の 2.6m までの深度区間の細粒部分からは海棲貝化石が産出しないので、非海成層と

考えられる。有機物の堆積が継続しており、植物遺体の保存がよいことから塩性湿地の堆積環境の可能性が高い。2.6m から表層までの深度区間の細粒部分に土壌塊や風成砂を含むことから、離水・陸化していたと考えられる。

(2) 硫黄濃度変化から考えられる堆積環境の変化

堆積物中の硫黄は基本的には堆積時の海水の寄与の程度を反映する。自然界に分布する液体の水には硫黄は主に硫酸イオンの形で溶存するが、河川水などの淡水中の硫酸イオン濃度は非常に低く、一方、海水中には多量に含まれている。堆積物中の硫黄は、多くの場合、硫化物態であり、これは嫌気的な環境（堆積物中）で有機物を使って硫酸イオンを還元する微生物（硫酸還元細菌）の働きによる。よって、海底環境であっても堆積物中に固定される硫黄の量は微生物が利用できる有機物の量に依存する。

今回の分析結果から、単純に硫黄量から堆積環境を検討する(図 8-31)と、約 3 m 以浅では硫黄を含まない層が多く、一部スパイク的に硫黄量が増加する層を除けば、淡水環境で堆積したものと考えられる。

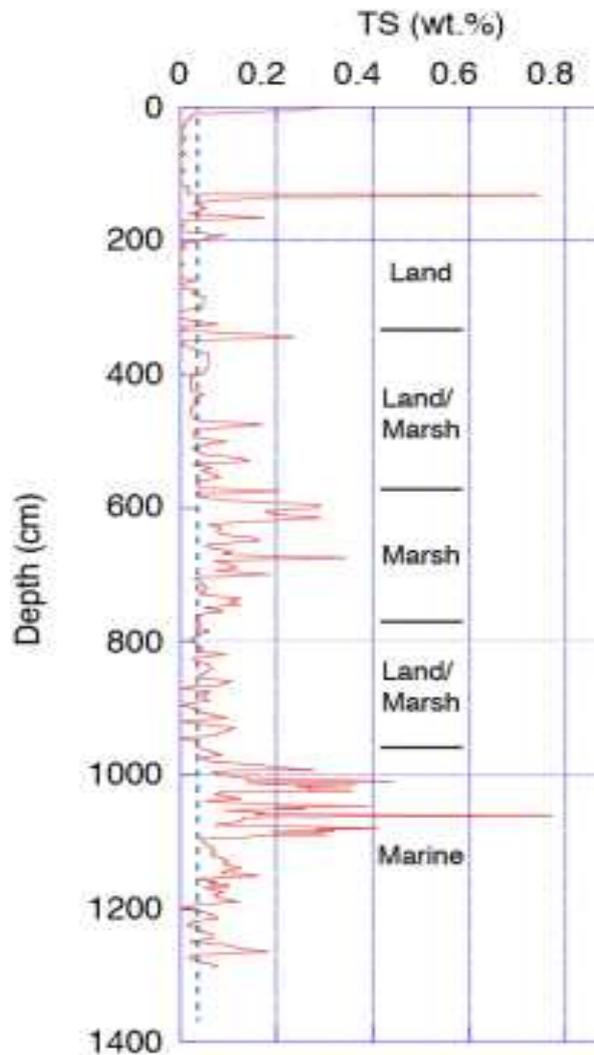


図 8-31 硫黄量から推定される堆積環境

極表層部と 1.3 m 付近のスパイク的に高い硫黄濃度は、表層については地盤沈下による海進で海水の供給増加によるものと考えられ、1.3 m 付近は礫分の増加するイベント堆積物の直上であるが、一次的な海水の寄与、もしくは現在の海水面直下であることから、地盤沈下および海進により、間隙水として染みこんできている海水から現在生成中の硫化物が固定されている可能性も考えられる。この深度直近の有機炭素量も高いことから、硫化物の生成が盛んとなっていると考えられる。

3 m 以深では、全体的に硫黄濃度が上がることから海水と淡水がせめぎ合う環境へと移行し、特に 5.8 m から 7.8 m の区間では硫黄濃度の増加から海水の寄与が増加したことが伺える。その後、9.6 m 以深ではさらに硫黄濃度が増加することから、完全な海環境へ移行したものと考えられる。

以上の解釈について、C/S 比を見ると、3 m 以浅までは高い C/S 比が見られ、これは

基本的に高い TOC 濃度によるものと思われるが、淡水環境であることを支持する。それ
以深では基本的に 3 以下の値を示すことから、海水の寄与があることを裏付けていると
言える。中でも、6 m 付近および 10 m 付近で 3 を下回る数字が見られ、これは宍道湖
のような沿岸湖的な環境、すなわち海水の寄与とともに半閉鎖的な環境であったことを
示していると考えられる。

(3) 津波イベントの検出

図 8-32 は KKN1501 ボーリングコア堆積物の礫分重量 (g) を 20cm 区間にそろえて比
較した垂直変化図である。垂直方向での礫分の重量変化が著しい。津波イベントの検出
のために、重い方のゆらぎを見ると、礫分重量の顕著なピークが 14 層準 (1~14 の番
号) ある。礫分ピークはその上下の層準に比べて礫分の堆積が異常に大きかったことを
示すので、イベント堆積物の可能性が濃厚である。つぎに環境の違いを区分するため、
有機質土壌や植物片が多い層準を薄茶色で、貝殻(貝化石)含有部分を水色に着色した。

海成層上限 (マリントップ) はコア深度 8.6m で、マリントップを境に堆積環境が異
なる。マリントップより上位では、礫分ピーク 1 を含む最上部の砂礫層が 2011 年の津
波イベントの堆積物であること、1 から 4 までの間に土壌層 (旧表土) を挟み、6 から
8 までの間に湿地堆積物を挟んでいるため、これらの礫分ピークも津波イベント堆積物
の可能性が高い。

一方、マリントップより下位では礫分に貝殻を含むため複雑で、貝殻が重量にどのよ
うに反映されているか吟味する必要がある。

11 と 12 の礫分ピーク付近は貝殻が全くあるいはほとんど含まれないため、急速な礫
分堆積イベント、恐らく津波イベントの可能性が高い。

深度 12.0m 以下の 13 と 14 のピークは、礫分重量が 60g よりも大きく外海種の貝殻を
含み津波イベントの可能性を暗示するが、貝の種類・量ともに多く、内湾の潮間帯下部
から潮下帯に棲息する二枚貝の完全な (未破壊の) 貝殻 (現地性の目安) を多く含んで
いるので、その場で生産された貝殻による礫分の増量と解釈できる。

深度 12.2-12.4m と 12.6-12.8m には貝殻の集中はなく外海種の貝殻のみを含有する
ため、この層準に近い 13 と 14 にも津波イベント堆積物の可能性が濃厚である。

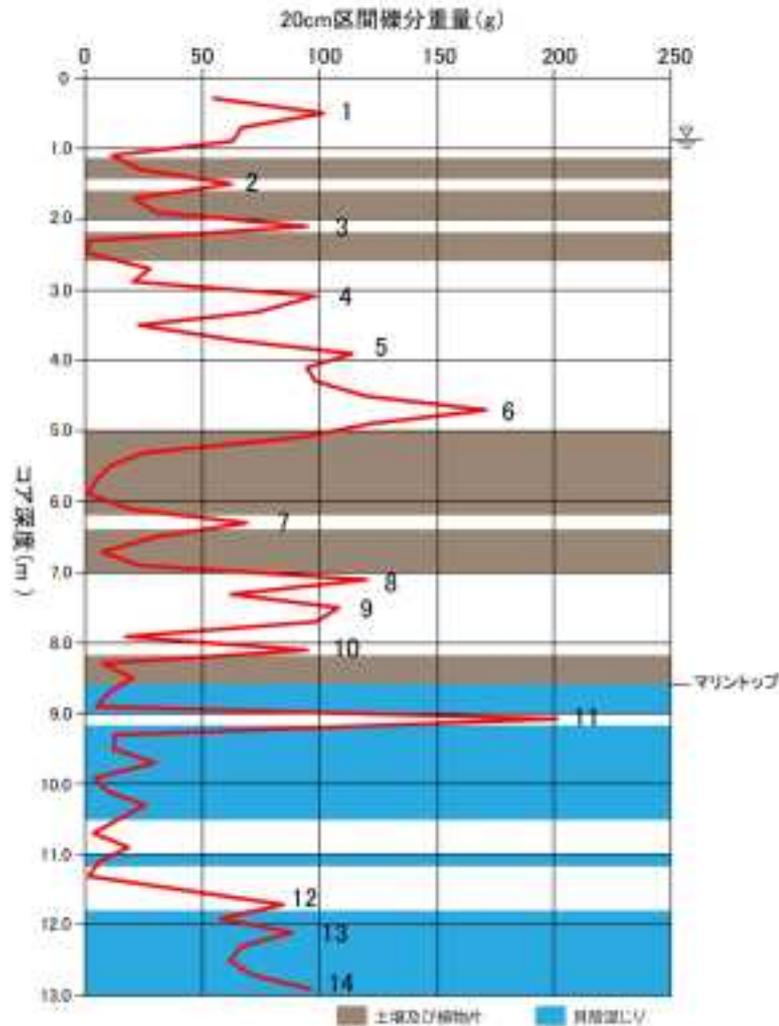


図 8-32 KKN1501 コア堆積物の 20cm 区間礫分重量 (g) の垂直変化

(4) イベント層を含む放射性炭素年代値の取り扱い

津波が浅い海底や干潟に押し寄せた場合、強い水流の剪断力で海底土の表層を引きはがして泥分とともに高密度の水塊となって炭質物や炭酸塩を巻き上げて輸送し、流速の低下とともに堆積するため、津波堆積物やその直上には、古い（異地性の）再堆積炭素が相当量含まれることになる。

放射性炭素年代測定は堆積年代を知るために実施されたが、KKN1501 コアは津波イベントを明らかにするため掘削されたボーリングで、複数の津波堆積物を含んでいるため、全ての放射性炭素年代較正值をそのまま用いて年代モデルを構築することはできない。単純に同じコア深度で比較した場合、現地性の炭素の年代値は若く、異地性の炭素は古くなる。さらに、KKN1501 のコア堆積物の堆積環境が下から上に向かって、海→塩性湿地→陸と大きく変化するため、現地性炭素と異地性炭素の時間差（年代差のゆらぎ）は

拡大するにちがいない。図 8-33 はこの考え方で放射炭素年代値と採取コア深度の散布図を作成したものである。

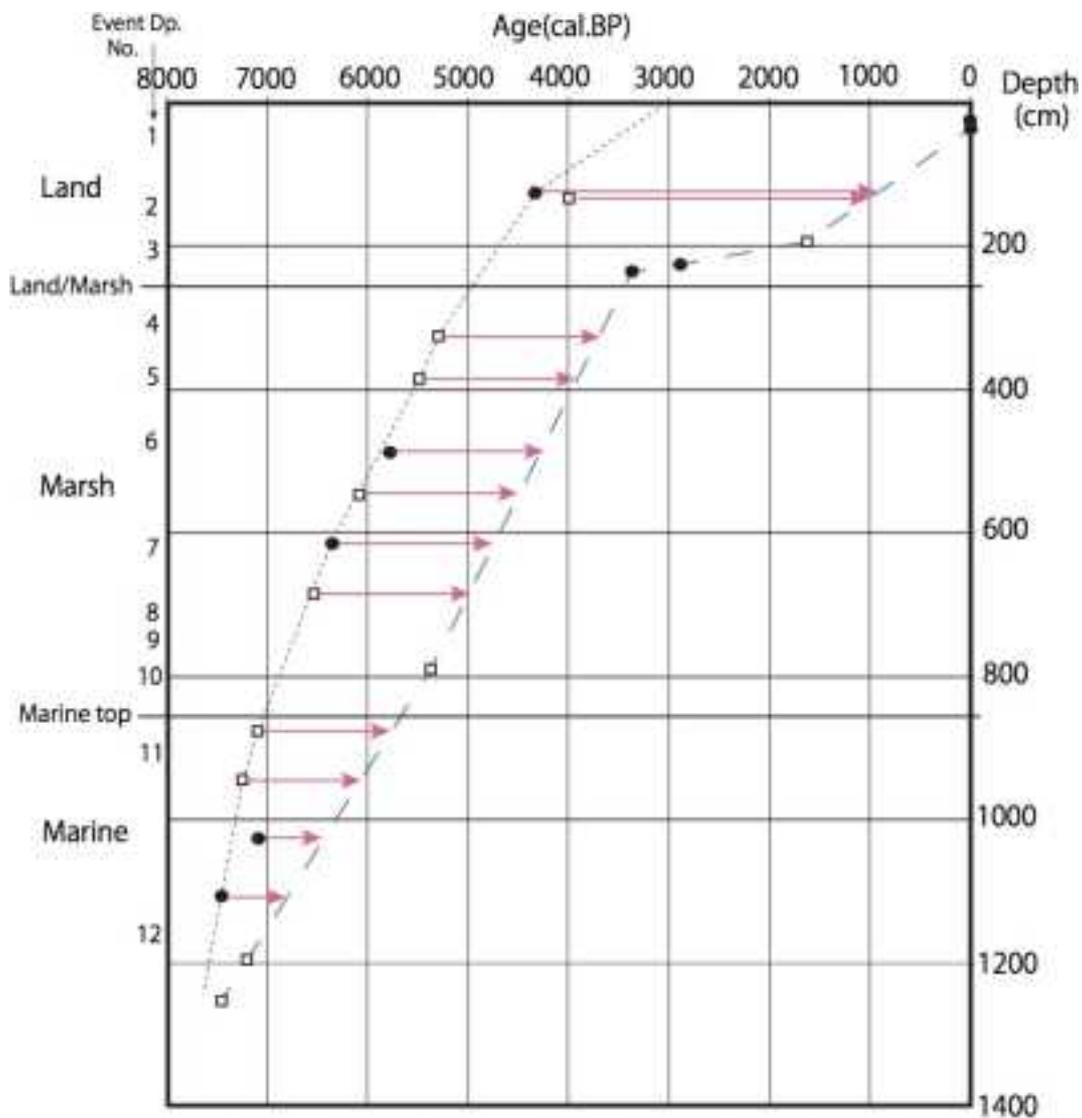


図 8-33 放射性炭素年代値-コア深度の関係

黒丸シンボルは今回の追加年代データの中央値，四角はこれまでの年代データの中央値．水色破線が若い年代値のライン，紫色点線が古い年代値のライン．赤の線分の長さがライン間のずれの大きさ，矢印は新しくなる方向．

さらに，貝化石と植物化石それに土壌塊に基づき，コア堆積物の堆積環境を海，塩性湿地，陸に分け，相対的に若い値を結んだラインと古い値を結んだラインを書き込んだ。

今回の年代値追加データの中央値を黒丸で，これまでの年代値データの中央値を四角でプロットした．同じコア深度で比較した場合，現地性の炭素の年代値は若く，異地性

の炭素は古くなる，という考えでデータを整理すると，水色破線が現地性に近い堆積年代，紫色点線が異地性の古い堆積年代と解釈できる．赤の線分の長さがライン間の年代のずれの大きさ，矢印はこれよりは新しいという方向を示す．年代のずれは環境によって類似の幅となっており，同じ性質のイベントが繰り返されたことを暗示している．

例えば，869年貞観津波（1950年を起点として1081年前）をイベント2と仮定すると水色破線上にのるため，年代モデルとしては水色破線を用いるのが良さそうである．

(4) マリントップ標高から推定される地殻変動

マリントップが標高 (TP) 0m付近ではなく-7.733mであることが明らかとなった．このずれの大きさは TP と現地標高との差や最寄りの気象庁大船渡検潮所 (OFUNATO) : 岩手県大船渡市赤崎町 (39° 01' N, 141° 45' E) での 2013 年から 2015 年までの 2 年間の観測潮位差 $343-161=182$ (cm) と比べてきわめて大きい．放射性炭素年代値 (暦年較正值) によればその深度付近の年代は約 7000 年前なので，世界的に見た場合，当時の海水準は現在とほぼ一緒のはずである．

2011 年の大地震にともなう地殻変動ではこの地域で 0.7m 程度の沈降が認められたので，単純に考えるなら，これを含む同規模の 11 回の地殻変動イベント (0.7m 程度の沈降/回) で生じた垂直地殻変動の累積量と考えることもできる．一地点に地殻変動を伴う津波イベント堆積物が全て保存されるとは限らないが，図 8-32 をみるとマリントップ以降の礫分スパークが 10 回あることとかなり調和的である．

貝類化石からわかるマリントップを挟む環境変化は，コア深度 9.2 から 13.0m の区間の堆積環境が内湾の潮間帯下部から潮下帯の範囲にあること．マリントップ直下のコア深度 8.6 から 9.0m の区間は，海棲貝類化石が産出するが，二枚貝の完全な (未破壊の) 貝殻がなく，内湾と外海の貝殻が混合し，貝殻の摩耗が著しいことから，海浜 (ビーチ) の堆積環境と考えられること．津波イベントを挟んで，堆積環境がそれまでの潮間帯下部-潮下帯から海浜 (ビーチ) に変わったこと，さらにこの上位に海成層はなく，植物遺体が良好な保存で堆積している．

これらの状況は，水中での堆積作用はマリントップ前後で続いているが，マリントップからコア深度 2.6m までの区間には旧表土はなく，離水はしていないので海岸背後の塩性湿地であった可能性が高い．コア深度 2.6m から地表までの区間には旧表土を挟むため，離水し陸化していた可能性が高い．

この地点の海域を急速に埋め立てた要因として，津波イベントが考えられる．コア深度 9.0 から 9.2m の区間が 11 のピークにあたるので，11 の津波イベントがこの地点の海域を急速に埋め立て，海浜を経て，海から塩性湿地に変化させた営力かもしれない．

0.7m程度の沈降を伴ったと考え、その後の地殻変動イベントでの沈降でもマリン
トップより上位の堆積環境が海とならなかった理由は、津波の度に砂礫が供給されて海
岸微高地を維持、海岸背後の塩性湿地の堆積基準面が 0.7m程度上昇して堆積を継続、
イベント毎の沈降＝海面上昇をキャッチアップすることができたためと考えられる。

現在の平均海面以下の深度区間に海成層がなく非海成層のみが存在するという事実
は、2011年の大地震を含む同規模の地殻変動の累積量を示している可能性がある。今
後、他のデータとの整合性を調べる必要がある。

参考文献

- 吉良哲明 (1954) 原色日本貝類図鑑. 保育社, 240 頁
- 波部忠重 (1961) 続原色日本貝類図鑑. 保育社, 182 頁
- 波部忠重・小菅貞男 (1967) 標準原色図鑑全集 3「貝」. 保育社, 223 頁
- 岡田 要 (1965) 新日本動物図鑑 (中). 北隆館, 803 頁
- 波部忠重 (1977) 日本産軟体動物分類学二枚貝綱/掘足綱. 北隆館, 372 頁
- 奥谷喬司 編・監修 (1986) 決定版生物大図鑑「貝類」, 世界文化社, 399 頁.
- Shun'ichi Higo, Paul Callomon, Yoshihiro Goto (1999) Catalogue and
Bibliography of the Marine Shell-bearing Mollusca of Japan. Elle Scientific
Publications, 749pp.
- 奥谷喬司 (2000) 日本近海産貝類図鑑. 東海大学出版会, 1173 頁

9. 大分県大分市における現地調査

9.1 研究の背景

大分県沿岸地域は西暦 1707 年の宝永地震津波や 1854 年の安政南海地震津波で高さ 1.5-3.0 m, 1946 年の昭和南海地震津波で高さ 1.0-1.7 m の津波が到達し, 被害が発生している (羽鳥, 1985b; 羽鳥, 2011). しかしながら調査に適した地点が少ないこともあり, 大分県を含む九州東部における調査事例は少ない. そのため過去の津波, 特に先史時代の津波の年代は不明な点が多い. 本研究では先史時代に大分県沿岸を浸水させた津波の発生年代を復元するため, 沿岸湿地において古津波堆積物調査を行った.

9.2 研究手法

掘削調査を行ったのは, 別府湾南岸に面する大分市東部の大圓寺湿地である (図 9-1a). 砂州で閉ざされた標高約 2 m, 幅 80 m 程度の低地は海岸線から約 600 m まで広がっており, 現在はアシ類の自生する湿地と小規模の池に分かれている (図 9-1b). 海岸線に直交する測線を設定し, 機械式ボーリングにより全長 6.1-8.8 m のコアを 3 地点で掘削した (図 9-1b, 2). 得られた堆積物コアに対しては, 堆積相の観察や珪藻分析や化学分析, 帯磁率測定から津波堆積物層を認定したのち, 各イベント層の堆積年代を決定するため, 有機質泥層中に含まれる種子や葉片などの放射性炭素年代測定と火山灰の同定を行った. 本年度は主にコア 0EJa-02 の放射性炭素年代測定を行った.

9.3 結果ならびに考察

コア 0EJa-01 (海岸線から約 150 m, 図 9-2) は, 表層から耕作土層 (深度 0-80 cm), 黒灰色から褐色の含礫砂泥層 (深度 80-212 cm), 赤褐色から黒褐色の有機質泥層 (深度 212-567 cm), 貝殻片を含む砂層 (深度 567-612 cm) で構成されていた (図 9-3). コア 0EJa-02 (海岸線から約 180 m, 図 9-2) は, 表層から耕作土層 (深度 0-90 cm), 黒灰色から褐色の含礫砂泥層 (深度 90-205 cm), 赤褐色から黒褐色の有機質泥層 (深度 205-795 cm), 貝殻片を含む砂層 (深度 795-880 cm) で構成されていた (図 9-4). それぞれのコア長や各層の層厚は異なるが, 地点間の堆積相は 2 枚の火山灰層をもとに対比することができた (図 9-3, 4). コア 0EJa-02 において, 深度 430-433 cm に認められたスコリア層は, 火山ガラスの屈折率から九重山を起源とする段原スコリア層 (DS) と同定され, その上下の泥層からはそれぞれ 5740-5900 cal. yr BP と 5590-5660 cal. yr BP という年代値が得られた (図 9-4, 表 9-1). 約 7170-7300 年前の鬼界アカホヤ火山灰層 (K-Ah) は, 深度約 530-650 cm に認められた (図 9-4).

砂層は、上下の有機質泥層と明瞭な地層境界で区切られている場合が多く、帯磁率も急増していた。このことから、砂層は突発的に堆積したイベント層である可能性が極めて高いと言える。また、砂層において、淡水－汽水環境で形成された有機質泥層中では観察されない海生底生種 *Rhaphoneis* sp. などの珪藻が特徴的に認められた。海生底生種が砂層においてのみ出現することは、砂層が海水の流入に伴って形成されたことを強く示唆している。

コア OEJa-02 における放射性炭素年代値から判断すると、海水流入イベントの発生年代は、約 3300-3400 年前、約 4200-4500 年前、約 6500 年前、約 7000-7200 年前 (K-Ah 堆積前) であったと考えられる (図 9-4, 表 9-1)。南海トラフにおいて発生する津波に加えて、別府湾では西暦 1596 年の慶長豊後地震 ($M=6.9$) のように別府湾海底断層で発生する津波も知られている (羽鳥, 1985a)。別府湾内における音波探査やピストンコアリング調査によると、1596 年慶長豊後地震の他に 1700-2200 年前、3600-4600 年前、5300-6000 年前、5800-7300 年前に断層運動があったと推測されている (例えば、島崎ほか, 2000; 大分県, 2002; 地震調査研究推進本部, 2005)。本研究の堆積物コアにおける古津波堆積物は、地震調査研究推進本部 (2005) で示されている別府湾海底断層が活動した年代と必ずしも一致していない。したがって、今後慎重に検討する必要があるものの、調査地である大圓寺湿地の堆積物には南海トラフなど別府湾海底断層以外が波源となった津波が記録されている可能性がある。

参考文献

- 羽鳥徳太郎, 1985a, 別府湾沿岸における慶長元年 (1596 年) 豊後地震の津波調査. 地震研究所彙報, 60, 429-438.
- 羽鳥徳太郎, 1985b, 九州東部沿岸における歴史津波の現地調査－1662 年寛文・1769 年明和日向灘および 1707 年宝永・1854 年安政南海道津波－. 地震研究所彙報, 60, 439-459.
- 羽鳥徳太郎, 2011, 四国西部・九州東部沿岸における宝永 (1707), 安政 (1854), 昭和 (1946) 南海津波の波高増幅度. 歴史地震, 26, 25-31.
- 地震調査研究推進本部, 2005, 別府－万年山断層帯の長期評価について. 73p.
- 大分県, 2002, 平成 13 年度地震関係基礎調査交付金 別府－万年山断層帯に関する調査 成果報告書. 257p.
- 島崎邦彦, 松岡裕美, 岡村 眞, 千田 昇, 中田 高, 2000, 別府湾の海底活断層分布. 月刊地球号外, 28, 79-84.



図 9-1 (a)別府湾沿岸地域の数値標高モデル図. 調査地域の位置. (b)大圓寺湿地の空中写真 (Google Earth) と機械式ボーリングによる掘削地点, 標高を測量した測線.

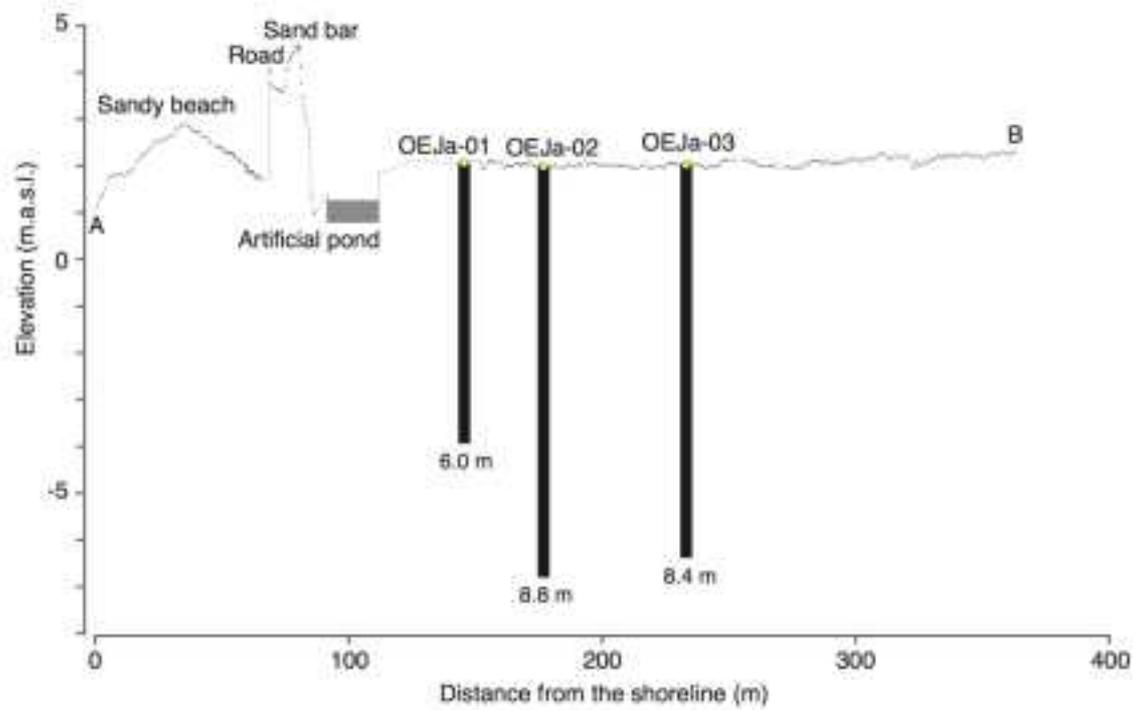


図 9-2 A-B (図 9-1b) の地形断面図と機械式ボーリングコア掘削地点と掘削深度.

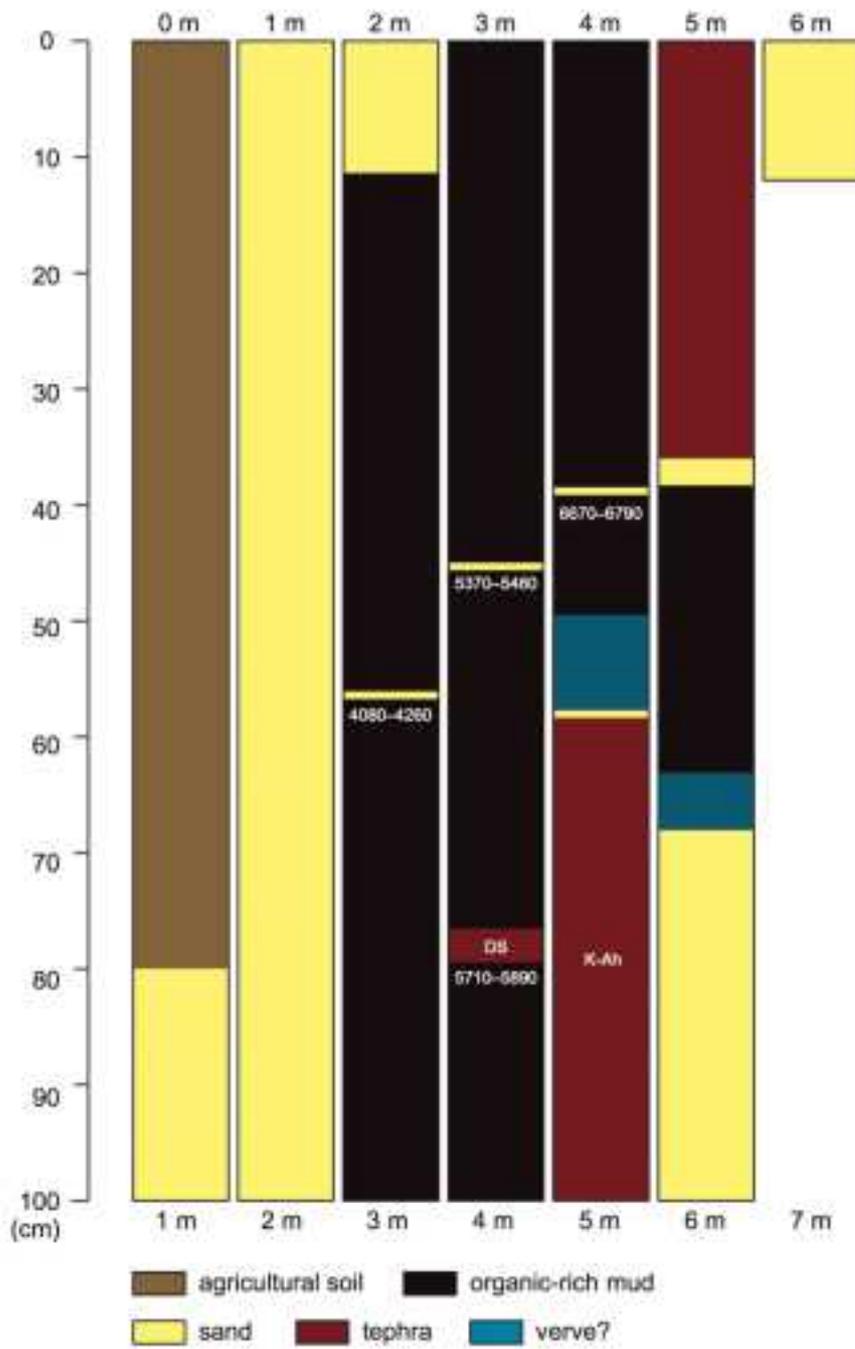


図 9-3 コア OEJa-01 の地質柱状図と放射性炭素年代値.

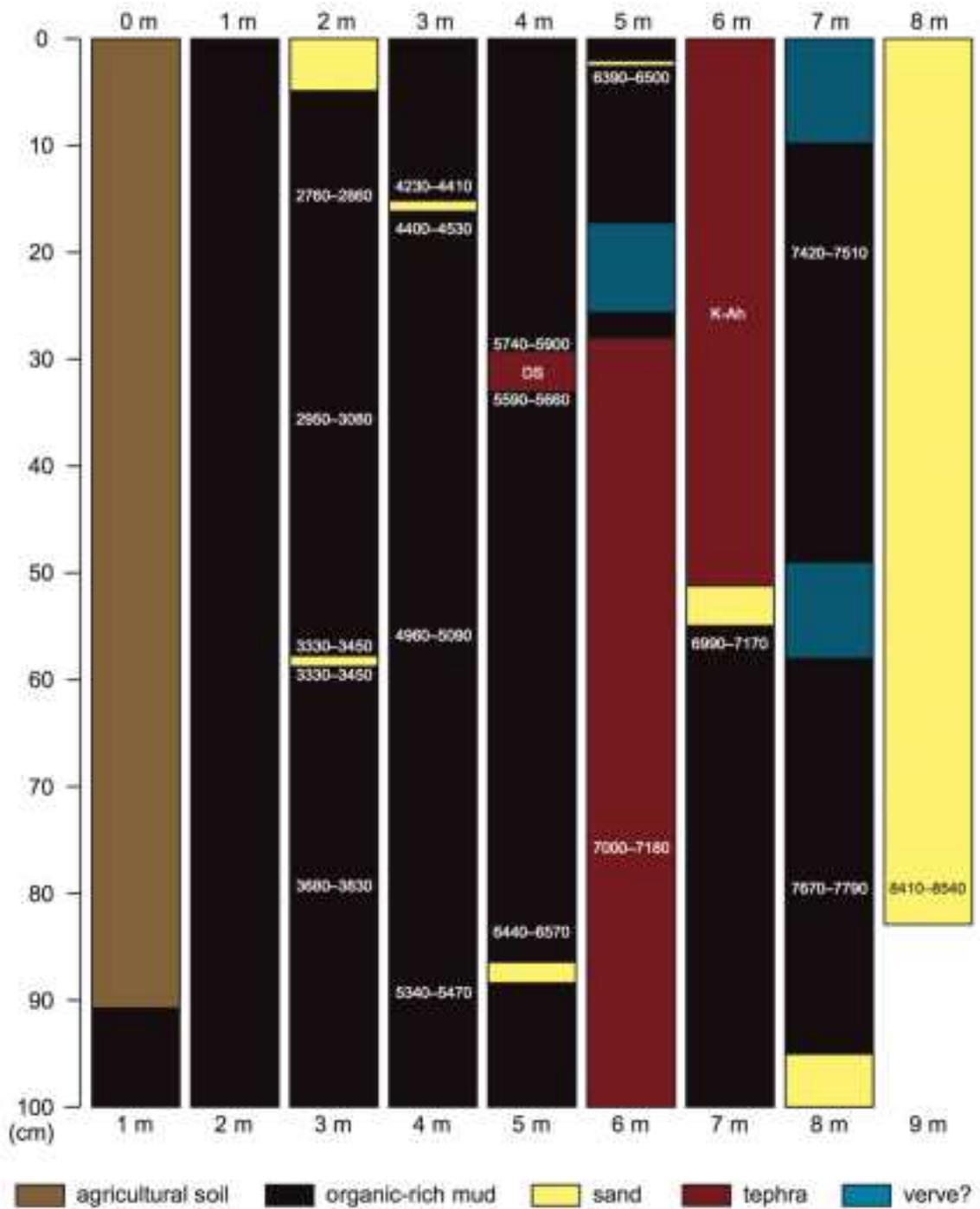


図 9-4 コア OJJa-02 の地質柱状図と放射性炭素年代値.

表 9-1 OEJa-01 と OEJa-02 における測定試料の深度，測定物，放射性炭素年代値。

Cure name	Depth (cm)	Material	Conventional age (^{14}C yr BP)	Range of 2 sigma (cal. yr BP)	Lab no. (Beta-)
OEJa-01	257-258	plant material	3790±30	4080-4260	427529
OEJa-01	270-272	plant material	3920±30	4280-4430	428317
OEJa-01	346-347	plant material	4640±30	5370-5460	427531
OEJa-01	380-381	plant material	5030±30	5710-5890	427532
OEJa-01	440-441	plant material	5910±30	6670-6790	427533
OEJa-02	215-217	plant material	2710±30	2760-2860	428318
OEJa-02	235-236	plant material	2900±30	2950-3080	427535
OEJa-02	256-257	plant material	3150±30	3330-3450	427536
OEJa-02	259-260	plant material	3150±30	3330-3450	427537
OEJa-02	279-280	plant material	3460±30	3680-3830	427538
OEJa-02	313-314	plant material	3870±30	4230-4410	427539
OEJa-02	317-318	plant material	3980±30	4400-4530	427540
OEJa-02	355-356	plant material	4450±30	4960-5090	427541
OEJa-02	389-390	plant material	4650±30	5340-5470	427542
OEJa-02	428-429	plant material	5060±30	5740-5900	427543
OEJa-02	433-434	plant material	4900±30	5590-5660	427544
OEJa-02	483-484	plant material	5720±30	6440-6570	427545
OEJa-02	503-504	plant material	5650±30	6390-6500	427546
OEJa-02	575-576	plant material	6200±30	7000-7180	427547
OEJa-02	656-660	plant material	6180±30	6990-7170	427548
OEJa-02	729-731	plant material	6530±30	7420-7510	427549
OEJa-02	779-780	plant material	6900±30	7670-7790	427550
OEJa-02	879-880	shell fragments	7680±30	8410-8540	427551

10. 結論

原子力発電所を対象とした確率論的津波ハザード評価に必要となる過去の津波発生に係るデータ（津波規模，繰り返し周期）を拡充するために，津波堆積物の情報に基づいて津波波源を推定する手法の開発が必要である．そこで，今年度は，津波による土砂移動と土砂堆積に係る水理実験，数値計算および現地調査試料の分析を実施して，以下の結果を得た．

（１）陸上土砂移動・堆積に係る水理実験を実施し，昨年度までに整備した津波による遡上域での土砂移動解析コードの精度検証を行うとともに，土砂移動及び土砂堆積における津波の流速，津波波形（周期や波高），土砂粒径，地形（斜面勾配や湾の形状）などの条件の影響を考慮して，これらの定量的な関係を明らかにした．

（２）津波堆積物の情報量の多寡による津波波源の推定精度を明らかにした．

（３）海域での津波堆積物などに関する試料を取得した．

（４）昨年度まで及び今年度の現地調査にて収集した試料の分析を行い，年代の絞り込みや，土砂粒径，起因等の津波堆積物に関する情報を取得した．

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。