

越後平野沿岸海域の堆積物と音波探査記録からみた 更新世—完新世間の堆積環境変遷

Sedimentary environmental changes during the Pleistocene to Holocene based on sediments and seismic profiles off the Echigo Plain

天野敦子¹・井上卓彦¹・池原 研¹

Atsuko Amano¹, Takahiko Inoue¹ and Ken Ikehara¹

¹ 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

Abstract: Sedimentary environmental changes off the Echigo Plain in Niigata Prefecture, central Japan, were reconstructed based on sedimentary characteristics and radiocarbon dating of drilling cores and high-resolution seismic profiles. Drilling core collected off the Yotsugoya (Ni09-YT) was identified eight units: shoreface to beach facies before 43500 BP (units of YT8 to YT6), estuary facies between 10500-9800 cal BP (YT5), offshore facies between 8200-5100 cal BP (YT4 and YT3) and shoreface facies after 5100 cal BP (YT2 and YT1). While, seismic profiles indicated 5 units in this area; Ryoutsu-oki Group, Unit d and Unit c of Yotsugouya-oki Formation in the transgression and Unit b and Unit a in the regression. These units of seismic profiles were corresponded with sedimentary units of Ni09-YT: Ryoutsu-oki Group deposited before the last maximum glacial with YT8 to YT6, Unit d with YT5 and YT4, Unit c with YT3, Unit b with YT2 and Unit a with YT1. These results indicate that the maximum surface flooding off Yotsugoya is about 5100 cal BP. Meanwhile, drilling core (Ni09-AG) collected off the mouth of Agano River was identified three units: offshore facies between 1900-800 cal BP (AG3) and lower shoreface facies after 800 cal BP (AG2 and AG1). Although seismic profiles in this area were mainly distributed transparent layers, the reflector near the bottom surface was identified around the drilling site of Ni09-AG. This reflector corresponded with the boundary between AG2 and AG1.

Keywords: sediment, radiocarbon age, seismic profile, Echigo Plain, sea level change

要 旨

越後平野沿岸海域で採取された2本のボーリング試料とその近傍の音波探査記録を用いて、堆積環境変遷について検討した。四ツ郷屋沖のボーリング試料(Ni09-YT)は、岩相と化石を基にYT8-1の8層に区分される。放射性炭素年代結果を加えると、この海域の堆積環境は更新世の外浜～海浜(YT8, 7, 6), 10500～9800 cal BPのエスチュアリー(YT5), 8200～5100 cal BPの沖浜(YT4, 3), 5100 cal BP以降の外浜(YT2, 1)と移行したことを示す。また高分解能音波探査記録は、両津沖層群、四ツ郷屋沖層の上部層内に分布する海進期堆積体のユニットdとユニットc、高海水準期堆積体のユニットb, aの5つに区分される。ボーリング試料と音波探査記録の対比結果は調和的で、両津沖層群はYT8, 7, 6と対応するため最終氷期以前の堆積層といえる。また、四ツ郷屋層のユニットdはYT5, 4, ユニットcはYT3, ユニットbはYT2, ユニットaはYT1に対応する。これら結果は、この海域の最大海氾濫面が5100 cal BP頃であることを示す。また阿賀野川河口

沖のボーリング試料(Ni09-AG)は、1900～800 cal BPの沖浜の泥層(AG3), 800 cal BP以降の下部外浜の砂層(AG2, 1)から構成される。この海域では音響散乱層が分布するため、音波探査記録の大部分に透明層が分布する。Ni09-AG付近の海底面表層に確認できる反射面はAG2, 1の境界に対応する。

1. はじめに

2007年に発生した能登半島沖地震と中越沖地震の震源は海域と陸域の地質図の中間地域におけるデータの空白地帯であった。そのため、陸域—海域にわたる断層の位置と活動度の把握が必要となった。そこで、2009年に産業技術総合研究所は沿岸海域用の高分解能音波探査を用いて、越後平野西縁の長岡平野西縁断層帯(地震調査研究推進本部, 2004)の延長部にあたる海域を中心に新潟沿岸海域の活断層の分布とその活動度を評価するための調査を行った(井上ほか, 2011, 第1図)。同時に、音響層序の岩相や形成年代を決定するために、四ツ郷屋沖と阿賀野川河口沖で堆積物試料を採取した。岡村ほか(1995)

の地層探査記録は、四ツ郷屋沖は長岡平野西縁断層帯の海域延長部の上盤に、一方、阿賀野川河口沖は下盤に当たることを示す。また、既存の地層探査記録から四ツ郷屋沖では海底下 40 m で最終氷期最盛期の浸食面に達すると推定された。そのため、同地域で掘削深度 40 m の堆積物を採取することによって、音波探査記録に完新世間の年代目盛りを入れることが可能と考えられ、掘削地点として選出された。また、阿賀野川河口沖のボーリング試料は下盤側の層序と沿岸環境に対する河川の影響評価を目的とした。

本説明書では、それぞれの海域で採取されたボーリング試料の岩相観察、放射性炭素年代分析結果、音波探査記録の記載を行う。そして、これらを基に検討された更新世-完新世の越後平野沿岸海域の堆積環境変遷を示す。

2. 調査・分析方法

本研究では越後平野沿岸海域の四ツ郷屋沖 (Ni09-YT) と阿賀野川河口沖 (Ni09-AG) において、2009 年 9、10 月に各海域で 1 本ずつ、ボーリング試料を採取した (第 1 図、第 1 表)。試料採取は、高さ約 32 m の櫓を設置し、ロータリー式ハイドロリックフィード型ボーリング機を使用しておこなわれた。採取された試料は直径約 65 mm、全長 40 m で、1 m ごとに分割された。試料の採取率は、Ni09-YT のコア深度 0~1 m 間では 70%、2~3 m 間では 95%、3~4 m 間では 95%、であったが、それ以外では 100% であった。また Ni09-AG では、0~1 m 間は 65%、1~2 m 間は 80% で、それ以外は 100% であった。そして、実験室において、ピアノ線を用いて試料を半裁し、岩相記載と写真撮影をおこなった。第 3、7 図や付図のボーリング試料断面写真は半裁して数日後に撮影されたために、酸化などによって変色して記載結果の岩相の色と異なる場合がある。軟 X 線写真は長さ 20 cm または 25 cm、幅 5 cm、厚さ 1 cm のスラブ試料を用いて、軟 X 線発生装置 SOFRON/STA-1005 (綜研ソフロン社製) とデジタル X 線センサー NAOMI/NX-04S (アールエフ社製) を使用して撮影された。放射性炭素年代 (^{14}C 年代) は、Beta Analytic 社によって加速器質量計測法で分析された。較正年代は Calib 6.0 (Stuiver and Reimer, 1993) を用いて計算し、木片、植物片の化石試料を計算する場合は Intcal 09 を、貝、ウニの化石と炭酸塩堆積物の試料を計算する場合は Marine09 ($\Delta R = 0$, 海洋炭素 = 100%) を使用した。本説明書内の ^{14}C 年代値は 2 標準偏差 (two sigma) の誤差を持つ較正年代の中央値で、cal BP を用いて示す。また、暦年代較正していない ^{14}C 年代値 (Conventional radiocarbon age) は BP で示す。

また、井上ほか (2011) で取得された音波探査記録の中で、堆積物試料採取地点近傍の海岸に直交す

る測線 (第 1 図、四ツ郷屋沖; E202, 阿賀野川沖; E28) の記録をボーリング試料との対比に用いた。

3. 四ツ郷屋沖

3.1 ボーリング試料の記載と放射性炭素年代

岩相、堆積構造、産出する化石を基に、Ni09-YT は下位より YT8 から YT1 の 8 ユニットに区分した (第 2 図)。以下に、各ユニットの記載と ^{14}C 年代 (第 4 図、第 2 表) についての詳細を記す。

YT8 (コア深度; 40.0~33.6 m)

記載: 緑灰色の極細粒砂層で、全層を通じて植物化石、貝化石、生痕化石を含む (第 3 図 a)。38.8 m よりも下部ではワスレガイ類 (*Callista* sp.) を含む貝化石の破片が多く産出される。一方、それより上部では植物化石の破片の増加や直径が数 mm から 2 cm 以下のマッドボールの混在が確認された。

^{14}C 年代: 3 試料の分析を行ったが、すべて ^{14}C 年代測定の測定限界を超えていた。この結果から、YT8 の堆積年代は 43500 BP 以前であると考えられる。

YT7 (コア深度; 33.6~31.4 m)

記載: 黄~青緑色の細粒砂層で、平行層理、斜交層理が確認される (第 3 図 b)。全層を通じて貝化石と生痕化石が、また局所的に直径約 1 cm のマッドボールが含まれる。ウニが堆積物中を這うことによって形成された *Bichordites monastiriensis* (Nara, 2004) を含む生痕化石が観察される。下位の YT8 との境界は明瞭で、急激な粒度と色の変化がみられる。

^{14}C 年代: 分析用の試料を得ることができず、年代値を得ることができなかった。

YT6 (コア深度; 31.4~30.8 m)

記載: 最大直径 5 cm のマッドボールを含む淘汰の悪い灰オリーブ色の中粒砂層である (第 3 図 c)。細かく破片化した貝化石を含む。下位の YT7 との境界は明瞭で、急激な粒度変化がみられる。

^{14}C 年代: 分析用の試料を得ることができず、年代値を得ることができなかった。

YT5 (コア深度; 30.8~24.3 m)

記載: 灰色の粘土~シルトで構成される。コア深度 28.3 m よりも下部では、頻りに層厚が数 mm から 10 cm の砂層が挟在する。これら砂層は細粒~極細粒砂によって構成され、平行層理または葉理、平板状またはトラフ状斜交層理、レンズ状層理、カレントリップル葉理が認められる (第 3 図 d, e)。また、コア深度 30.3 m の泥層には細粒砂で充填された直径約 3 cm の楕円形の生痕化石がみられる。この形態的特徴は大型甲殻類によって形成され、潮間帯の堆積層に産出される *Psilonichnus* (奈良・小竹, 1997) に似ているが、このコアの産状から断定することはできない。一方、コア深度 28.3 m よりも上位では挟在する砂層が減少し、植物と貝の化石破片の混入が

増加する。そして、コア深度 26.0 m より上位の基質部はシルトから砂質シルトへと粗粒化する。下位の YT6 との境界は明瞭で、急激な粒度変化がみられる。

^{14}C 年代：6 試料を分析し、10590~9880 cal BP の年代値が得られた。しかしながら、その多くの試料は 10500 cal BP 前後を示す。この結果は、10500 cal BP 頃の堆積物が、再堆積を繰り返している可能性が高い。そのため、最も古い値と新しい値であるコア深度 30.51, 25.03 m の結果を用いて、YT5 の堆積年代を 10500~9900 cal BP とした。

YT4 (コア深度 ; 24.3~18.4 m)

記載：灰〜灰オリーブ色のシルト層で、層厚数〜10 cm の極細粒砂層が挟在する。一部で、その砂層には平行層理、斜交層理が認められる (第 3 図 f)。全体に植物化石、貝化石、生痕化石を、一部にウニ化石や小礫を含む。また観察される生痕化石には *Bichordites monastriensis* が含まれる。コア深度 24.0~24.3 m 間は直径約 1 cm のマッドボールを含む中粒砂で構成され、その下部は YT4 の中粒砂が充填された生痕化石が下位の YT5 の泥層へ連続して形成されている。そのため、下位の YT5 との境界は不明瞭になっており、本説明書では YT5 の泥が分布する最上部の深度をユニットの境界とした。

^{14}C 年代：7 試料を分析し、8220~6440 cal BP の年代値が得られた。ほぼ同深度で得られた結果を比較した場合、古い年代値は再堆積の影響を受けていると考え、コア深度 24.16, 20.58, 18.76 m の年代値を除いた。よって、24.21, 23.10, 20.81, 20.31 m の結果を用いて、YT4 の堆積年代を 8200~6000 cal BP とした。

YT3 (コア深度 ; 18.4~14.8 m)

記載：暗オリーブ色の砂質シルト層で、比較的均質である (第 3 図 g, h)。全層に植物化石、貝化石、生痕化石を、また一部でウニ化石や中礫を含む。下位から連続的に粗粒化しているために、YT4 との境界は不明瞭である。そのため、本説明書では基質部がシルトから砂質シルトへと変化する深度を YT4 との境界とした。

^{14}C 年代：4 試料の分析を行い、5990~5250 cal BP の年代値が得られた。16.27 m の年代値は破片化した貝化石を用いて分析しており、下位の 18.38 m の年代値よりも古い。そのため、コア深度 16.27 m の貝化石は再堆積を繰り返したことによって年代値が古くなったと考えて、YT3 の堆積年代から除いた。よって、18.38, 15.51, 14.85 m の結果を用いて、YT3 の堆積年代を 6000~5100 cal BP とした。

YT2 (コア深度 ; 14.8~6.0 m)

記載：灰オリーブ色の極細粒砂層で、局所的に平行層理、斜交層理が認められる (第 3 図 i)。全層に植物化石、貝化石、生痕化石が混在するが、特に植物化石の破片が卓越する。フタバシラガイ類 (*Ungulinidae gen. et sp. indet.*) やハマグリ類 (*Pitar*

sp.) を含む貝化石が産出された。下位の YT3 との境界は、連続的に粗粒化しているために不明瞭であるが、基質部が砂質シルトから極細粒砂へと変化した深度とした。

^{14}C 年代：9 試料の分析を行い、5090~900 cal BP の年代値が得られた。コア深度 12.74 m の年代値は下部の 14.35, 13.14 m の年代値よりも古い。またコア深度 6.29 m の年代値はそれよりも下位の 6.66 m の年代値よりも古い。このように古くなるのは再堆積が原因していると考え、コア深度 12.74, 6.29 m の年代値を堆積年代から除いた。よって、コア深度 14.35, 13.14, 11.11, 10.64, 9.61, 9.32, 6.66 m の結果を用いて、YT2 の堆積年代を 5100~700 cal BP とした。

YT1 (コア深度 ; 0.0~6.0)

記載：灰オリーブ色の細粒砂層で、局所的に平行層理、斜交層理が認められる (第 3 図 j)。YT2 と同様に植物化石、貝化石、生痕化石が混在するが、YT1 では貝化石の混入が卓越する。キサゴ類 (*Umbonium sp.*) やハマグリ類を含む化石が産出された。また、全体的に直径 1~2 cm のマッドボールや円礫がみられる。下位の YT2 との境界は、分割したコアの境界にあたるため、その状態を判定することができない。

^{14}C 年代：2 試料の分析を行い、470~380 cal BP の年代値が得られた。コア深度 4.10 m の年代値は下部の 4.35 m の結果よりも古い。再堆積の影響を受けて古くなったと考え、4.10 m を YT1 の堆積年代から除いた。また、上記したように下位の YT2 と境界の状態を判定することはできないが、本説明書では連続的に堆積していると仮定して、YT1 の堆積年代を 700 cal BP 以降とした。

3.2 測線 E202 の音波探査記録の記載

井上ほか (2011) が示す音波探査記録の中で、Ni09-YT の採取地点近傍の音波探査測線 E202 (第 1 図) の記録について、以下に記載する。本説明文中で用いる音波探査記録の深度は 1500 m/sec の音波速度を使用して計算された。

E202 測線の音波探査記録は大きく 5 つの音響的ユニットに区分される (第 5 図)。深度 70 m 付近に比較的平坦な凹凸を持つ反射面が確認され、これを反射面 Rd とした。反射面 Rd に対して連続的にオンラップする層をユニット d とし、その最上位の反射面を Rc とした。その上位の音響累重様式はあまり明瞭ではないが、沖側ではダウンラップが、陸側ではオンラップが確認される。さらに、その上位には平行な累重様式が連続しており、その最上面の比較的強い反射面を Rb とし、Rc と Rb の間をユニット c とした。ユニット c よりも上位では、反射面 Rb にダウンラップする累重様式が確認され、この地層をユニット b とした。また、ユニット b の中で、陸側

の一部海域で海側に急傾斜するダウンラップが確認され、この最下面を Ra とし、Ra と海底面との間をユニット a とした。

3.3 ボーリング試料からみた堆積環境

最下位の YT8 は極細粒砂によって構成され、水深 2~80 m の砂底に生息するワスレガイ類（奥谷, 2000）の貝化石が産出されることから、80 m よりも浅い砂質な海底に堆積したと考えられる。現在の新潟沿岸海域の海底地形は水深約 30~40 m までとそれ以深で海底勾配が異なる。水深約 30~40 m 以浅の海域の傾斜の方が大きく、この海域が外浜にあたり、これ以深は沖浜となる。また、表層堆積物分布図は水深約 40 m 以浅は砂が、それ以深では泥が堆積することを示す（池原ほか, 1994）。つまり、新潟沿岸海域では、水深 40 m よりも浅く地勾配の大きい外浜では砂が、それより深い沖浜では泥が分布する。外浜は、一般的に地形勾配によって陸側から上部、中部、下部と分類されることが多く、その堆積物中に確認される堆積特性も異なる。しかしながら、YT8 では詳細な外浜を区分するための堆積物特性が確認されなかったため、本説明書では YT8 は外浜の砂質堆積物とする。さらに上部に向かって、植物破片やマッドボールが増加することは、水深の減少に伴う波浪などの水理営力の増加や河川からの供給作用が強くなったことを示唆していると考えられる。年代結果を考慮すると、YT8 は 43500 BP 以前の更新世に形成された外浜の堆積層と考えられる。

YT7 は、形成者がウニである *Bichordites monastiriensis* を含む生痕化石が観察されることから、海成層といえる。細粒砂が卓越するため、YT8 と同様に波浪の影響が卓越する外浜の堆積物と考えられる。しかし、下位よりも粗粒化しているため、YT7 は YT8 よりも水理営力が増加した浅い外浜で形成されたといえる。

YT6 は本試料の中で最も粗粒な中粒砂堆積物で構成されているため、強い水理営力が卓越する堆積環境で形成されたと考えられる。本研究結果の岩相や化石から詳細な堆積環境を推定することは難しいが、下位の YT8、7 は上位に向かって水深が減少する外浜で堆積したことを示すことから、YT6 はより浅い外浜や海浜の堆積物の可能性がある。

YT5 は主に粘土~シルトによって構成され、貝化石と生痕化石が産出されるため、海成の泥層といえる（Pemberton *et al.*, 1992）。泥が卓越するために弱い水理営力の環境であったと考えられるが、頻繁に平行、斜交、レンズ状の堆積構造が確認される砂層が挟在する。これら砂層はイベント的に発生した洪水やストームなどの強い水理営力によって形成されたと考えられる。また、コア深度 26.0 m よりも上位では上方粗粒化が確認されるため、YT5 の中で相対的に水理営力は増加した可能性が高い。コア深度

30.3 m では *Psilonichnus* に似た生痕化石が確認され、この結果は YT5 が潮間帯で形成された可能性を示唆している。また ^{14}C 年代結果は、YT5 の堆積速度が同様にシルト層である上位の YT4 よりも速いことを示す（第 4 図）。つまり、これら岩相、化石、年代の結果は YT5 が、通常は停滞的な水理状態であるが、河口が近いために洪水などでイベント的に砂が運搬され、さらに後背地からの供給作用を強く受けるために堆積速度が速い、エスチュアリー堆積層であることを示唆する。越後平野の金巻新田 (GS-KNM-1, 第 1 図)、信濃川河口 (GS-NIF) のボーリング試料結果は、これら地点における 10000 cal BP 頃の堆積環境が海進期の塩水湿地または潮汐の影響を受ける浅い海域といったエスチュアリーであったことを示す（宮地ほか, 2009, 2011）。この GS-KNM-1 と GS-NIF におけるエスチュアリーを示す地層の標高はそれぞれ -80 と -100 m である。これら試料採取地点は長岡平野西縁断層帯の下盤に位置するため、上盤に位置する Ni09-YT と標高を比較するためには、沈降速度 3 m/1000 年（井上ほか, 2011）を考慮する必要がある。沈降速度を考慮した結果、10000 年前の下盤の標高はそれぞれ -50 と -70 m となり、YT5 の最下位の標高約 -55 m とよく一致する。つまり、Ni09-YT が位置する上盤が変動していないと仮定すると、YT5 と平野部のエスチュアリー堆積相は同程度の古水深であったと考えられる。YT5 の堆積物特性はエスチュアリーで堆積したことを示唆しており、平野部のエスチュアリー堆積層と古水深が同程度であることは、両者の環境が同様であったことを支持する。また、コア深度 26.0 m よりも上位で確認される上方粗粒化は、海進によってエスチュアリーの中で停滞的な奥部から波浪や潮汐の影響が増加する沖合へと堆積環境が移行したことを示唆している。

YT4 は下位と同様に泥層であるが、YT5 は上位に向かって堆積環境が沖側へと移行したことを示すため、YT4 は YT5 よりも深い海域であったと考えられる。現在の越後平野沿岸域では水深 40 m よりも浅い外浜では砂が、深い沖浜では泥質堆積物が分布する（池原ほか, 1994）。そのため、YT4 は沖浜の泥質堆積物で、挟在する平行層理や斜交層理が認められる砂層は暴浪時に形成された（Walker and Plint, 1992）と考えられる。

YT3 は下位層から連続したシルトによって構成されるため、YT4 と同様に沖浜の堆積物と考えられる。しかし、YT3 の岩相は、YT4 と比較すると基質部がシルトから砂質シルトへと粗粒化し、所々に小礫を含む。この変化の原因として、粗粒碎屑物の供給量が増加した、または水理営力が増加した、という 2 つの可能性が考えられる。

YT2、1 はそれぞれ極細粒砂、細粒砂によって構成され、下位層から連続的に粗粒化している。この変化は、YT2 が YT3 よりも浅く、波浪の影響を受け

る環境へ移行したことを示す。上記したように、現在の越後平野沿岸海域における砂と泥の境界は水深40 mに分布し(池原ほか, 1994), YT2の最下部の標高(-40.15 m)とよく一致する。つまり, YT2, 1は水深40 m以浅の外浜で堆積したと考えられる。これらユニットで産出される貝化石は水深50 m以浅の砂底(奥谷, 2000)に生息する種で, この生息環境は岩相から推測された堆積環境と一致する。また, YT1はYT2から連続して粗粒化するため, 水理営力が増加するより浅い外浜の環境で形成されたといえる。

3.4 ボーリング試料と音波探査記録との対比

Ni09-YTの採取地点は音波探査記録測線上に位置しない。そのため, 採取水深(25.35 m)の音波探査記録にボーリング試料の結果を投影して, 両者を対比した(第5図)。深度を用いて対比すると, 反射面Rdより下位層はYT8, 7, 6, ユニットdはYT5, 4, ユニットcはYT3, ユニットbはYT2, ユニットaはYT1と一致する。以下に, 詳細な対比結果について述べる。

反射面Rdは凹凸を示すため, 浸食面と考えられる。またRdに対応する浸食面は越後平野沿岸海域に広く分布し, 井上ほか(2011)はこの浸食面よりも下位は後期鮮新世~完新世に堆積した両津沖層群(岡村ほか, 1995), 上位は両津沖層群の最上部に分布する四ツ郷屋沖層と区分した。また, 音響的累重様式の違いから, 四ツ郷屋沖層は下部層と上部層に区分されるが, E202の記録では上部層のみが確認される。本説明書においても, この区分を用いる。YT6の最上面深度は反射面Rdの深度と一致しており, 43500 BP以前の外浜から海浜の堆積層であるYT8, 7, 6と両津沖層群が対応する。反射面Rdは浸食面であるため, 最終氷期最盛期に形成されたと推測することができる。そうすると, 両津沖層群は最終氷期最盛期以前の更新世に形成されたと考えられ, YT8, 7, 6の堆積年代と矛盾しない。

四ツ郷屋沖層の上部層は音響的累重様式の違いから4つのユニットに区分することができる。その中で最下位であるユニットdは, 反射面Rdにオンラップするため, 海進期堆積体といえる。ユニットdと深度が一致するYT5, 4はエスチュアリーから沖浜へと移行した海進期に形成された堆積層で, 音響的累重様式の推定と一致する。反射面RbとRcに挟まれるユニットcは, 沖側ではダウンラップが, 陸側ではオンラップが確認される。そのため, ユニットcは海進期堆積体と考えられる。ユニットcと深度が一致するYT3の岩相は下位のYT4よりも粗粒化したシルト層で, その堆積環境は粗粒碎屑物の供給量, または水理営力, が増加した沖浜で堆積したと推測される。YT3は海進期堆積体と考えられるので, 水深の減少に起因する水理営力の増加は考えにくい。

そのため, YT3の粗粒化は海進期の浸食作用によって粗粒碎屑物の供給が増加した可能性を示唆している。さらに上位のユニットbとユニットaはダウンラップの累重様式を示し, 高海水準期堆積体であるといえる。ユニットbに対応するYT2は下位のYT3より, またユニットaに対応するYT1はYT2よりも粗粒化することを示す。この岩相変化は上位に向かって水深が減少する海退期の環境であったことを示し, 音響的累重様式の推定と一致する。

これらボーリング試料と音波探査記録との対比結果は, YT3とYT2の境界に対応する反射面Rbが最大海氾濫面であることを示す。ボーリング試料の¹⁴C年代結果は, YT3の堆積速度が約1.0 cm/yrであるのに対して, 上位のYT2の下部(コア深度; 15.51~13.14 m)では0.1 cm/yr以下へと急激に減少する(第4図, 第2表)。上記の音波探査記録との対比結果を考慮すると, この堆積速度の減少は, 海進期から海退期にかけて堆積場が移動することによって形成されるコンデンスセクション(Loutit *et al.*, 1988)が存在することを示す。そのため, この四ツ郷屋沖海域の最大海氾濫面は, YT3中の最も新しい年代である5100 cal BP頃であると推定される。これまでの研究では, 越後平野の最大海氾濫面は約7600 cal BPであることを示しており(吉田ほか, 2006), 本研究結果よりも約2000年古くなる。Ni09-YTは断層の上盤であるのに対し, これまでの越後平野の研究は下盤で採取された堆積物を用いているため, テクトニックな変動の違いが最大海氾濫面のずれを生じさせた可能性がある。

4. 阿賀野川河口沖

4.1 ボーリング試料の記載と放射性炭素年代

Ni09-AGは下位よりAG3からAG1の3ユニットに区分される(第6, 7, 8図, 第3表)。

AG3(コア深度; 40.0~25.8 m)

記載: 暗~黒オリーブ色のシルト層で, 所々に層厚数~10 cmの極細粒砂層を含む(第7図a, b)。一部, 砂層には斜交層理が認められる。全層に植物化石, 貝化石, 生痕化石を, また一部にウニ化石や小礫を含む。モミジボラ(*Inquisitor jeffreysi* (Smith))を含む貝化石が産出される。

¹⁴C年代: 9試料の分析をおこない, 800~1860 cal BPの年代値が得られた。コア深度26.58 mの年代は下部の28.7, 28.4 mの年代よりも古い。この結果から, コア深度26.58 mの試料は再堆積していると考え, AG3の堆積年代から除いた。よって, コア深度28.4, 28.7, 30.44, 33.75, 34.78, 35.15, 37.43, 39.43 mの結果を用いてAG3の堆積年代を1860~800 cal BPとした。

AG2(コア深度; 25.8~4.35 m)

記載: 灰~オリーブ黒色の極細粒砂層で, 平行層理,

平板状またはトラフ状斜交層理，レンズ状層理が確認される（第7図 c, d）．全体的に植物化石，貝化石，生痕化石を，局所的に直径数 cm のマッドボールや小礫を含む．また層厚数～10 cm のシルトまたは粘土層を頻繁に含む．AG3 との境界は，AG2 の中で最下位の斜交層理が確認される砂層の下位面とした．

¹⁴C年代：8 試料の分析をおこない，230～980 cal BP の年代値が得られた．下部の年代値よりも古い結果は再堆積の影響を大きく受けている可能性があると考え，堆積年代から除いた．よって，コア深度 25.10, 21.62, 12.65, 4.65 m の結果を用いて，AG2 の堆積年代を 800～150 cal BP とした．

AG1（コア深度：4.35～0.0 m）

記載：灰色の細粒砂層で，植物化石や生痕化石を含み，斜交層理が確認される（第7図 e, f）．基質部が粗粒化する以外，AG1 は AG2 と同様の特徴を示す．AG2 との境界は，基質部が極細粒砂から細粒砂に変化した深度とした．

¹⁴C年代：AG1 の貝化石や植物片は破片化しており，再堆積の影響を受けて，その年代結果が実際の堆積年代よりも古い値を示す可能性が高い．また，下位の AG2 の最も新しい堆積年代値が 150 cal BP であることから（第8図），AG1 はそれよりも新しいと推測されるが，再堆積などによる誤差を考慮すると，それよりも新しい年代値を得ることは難しいと考え，分析をおこなわなかった．よって，上位の AG2 の結果を考慮して，AG1 の堆積年代は 150 cal BP 以降とする．

4.2 測線 E28 の音波探査記録の記載

阿賀野川，信濃川河口沖では音響散乱層が存在するため，測線 E28 の記録の大部分は透明層が分布し，累重様式を確認することは困難である（第9図，井上ほか，2011）．一部，Ni09-AG の採取地点付近の海底表層付近に単独の反射面が確認され，第9図に赤破線で示した．

4.3 ボーリング試料からみた堆積環境

AG3 は貝化石，ウニ化石，生痕化石が産出されるため，海成の泥層と考えられる．所々に砂層が挟在するシルトであるため，AG3 は静穏時波浪限界水深以深の沖浜の堆積物で，砂層は暴浪時に形成されたと考えられる（Walker and Plint, 1992）．下位層から連続的に粗粒化する AG2 は，水深の減少に伴い波浪営力の影響が強くなった外浜の堆積物と考えられる．低角の平板状斜交層理に侵食面をもってトラフ状斜交層理が累重する堆積構造（第7図 c）は，暴浪時に形成されたハンモック状斜交層理の可能性が高く，下部外浜と考えられる．AG1 は，AG2 と類似した堆積構造を示すが，基質部が粗粒化することから，AG2 よりも浅くなり水理営力が増加した下部外浜の堆積物であるといえる．このように，Ni09-AG の層

相変化はこの約 2000 年間に於いて，沖浜から外浜へ堆積環境が移行したことを示している．

4.4 ボーリング試料と音波探査記録との対比

ボーリング試料を採取した水深の記録に投影し，音響層序深度と Ni09-AG の層相変化深度を比較した（第9図）．記録の大部分は透明層が分布するが，Ni09-AG 付近の海底面表層に反射面が確認できる．第9図中に赤破線で示した反射面の深度は，AG2 と AG1 の境界に対応する．そのため，これら堆積層を考慮すると，この反射面は 150 cal BP 以降に形成された下部外浜の極細粒砂と細粒砂の境界に一致するといえる．

5. まとめ

新潟沿岸海域の四ツ郷屋沖と阿賀野川河口沖で採取された堆積物試料と音波探査記録を用いて，更新世～完新世間の堆積層の形成過程について検討した．岩相，産出化石を基にすると，四ツ郷屋沖のボーリング試料 Ni09-YT は YT8 から YT1 の 8 ユニットに区分することができる．放射性炭素年代結果を加えると，これら結果は四ツ郷屋沖の堆積環境が，43500 BP 以前の沖浜～海浜（YT8, 7, 6），10500～9800 cal BP 間のエスチュアリー（YT5），9800～5100 cal BP 間の沖浜（YT4, 3），5100 cal BP 以降の沖浜（YT2, 1）と移行したことを示す．また，音波探査記録は両津沖層群，四ツ郷屋沖層の上部層に分布する海進期堆積体のユニット d, c, 高海水準期堆積体のユニット b, a と区分することができる．これらボーリング試料結果と音波探査記録の対比はよく一致し，両津沖層群は 43500 BP 以前の沖浜～海浜の YT8, 7, 6 に対応するため，最終氷期最盛期以前の堆積層といえる．また，四ツ郷屋沖層上部層のユニット d は YT5, 4, ユニット c は YT3, ユニット b は YT2, ユニット a は YT1 に対応する．これら結果から，この海域の最大海氾濫面が 5100 cal BP となることがわかった．

阿賀野川河口海域のボーリング試料は AG3 から AG1 の 3 ユニットに区分される．また，¹⁴C年代結果は，四ツ郷屋沖と比較すると非常に堆積速度が速いことを示す．これら結果は，この海域の堆積環境が 1860～800 cal BP では沖浜，800 cal BP 以降では下部外浜であったことを示す．また，音波探査記録の大部分は透明層が分布し，累重様式を確認することができない．Ni09-AG 付近の海底面表層近くで確認される反射面は，AG2 と AG1 の境界，つまり 150 cal BP 以降に形成された下部外浜の極細粒砂と細粒砂の境界に一致する．

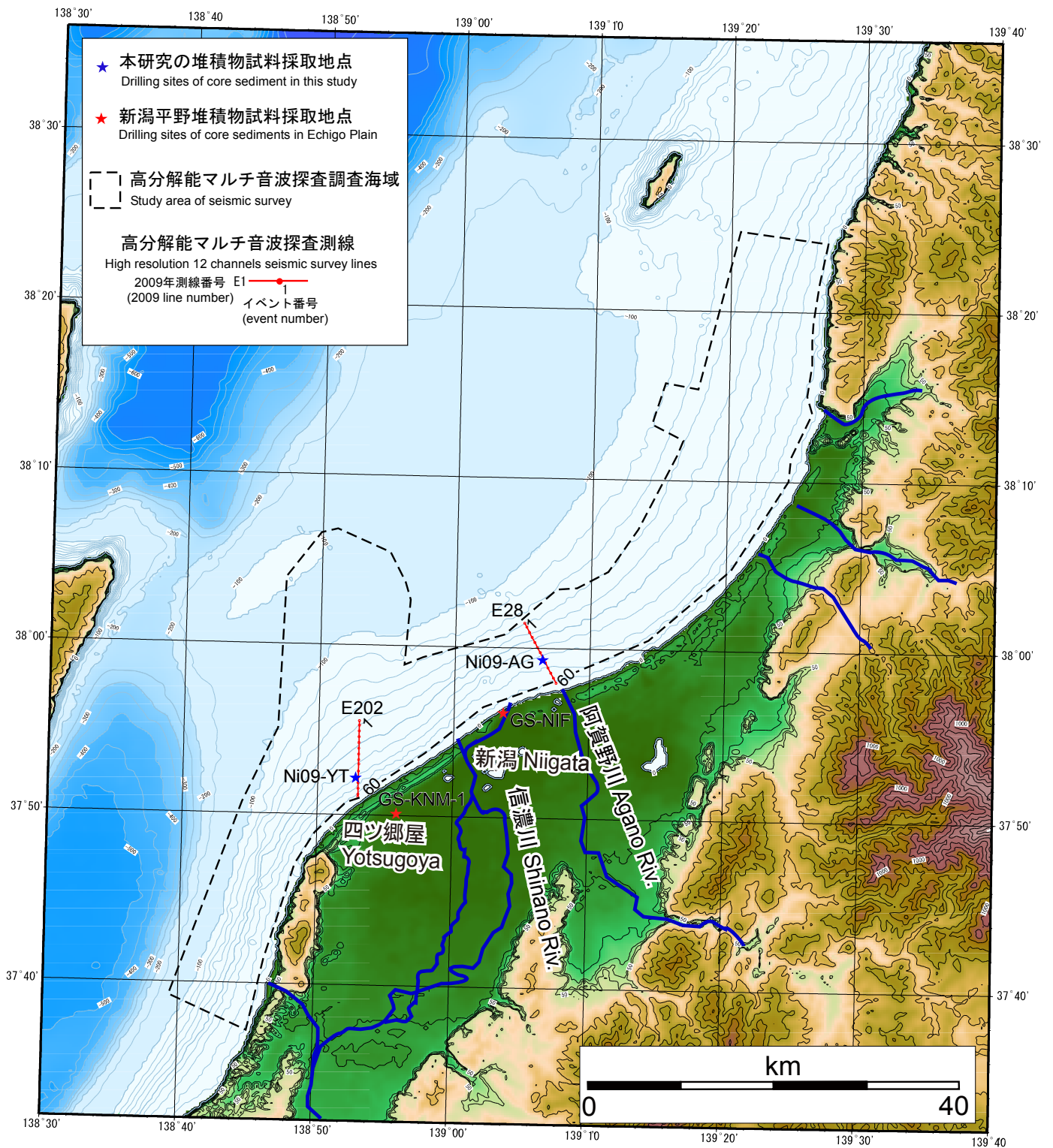
謝辞 ボーリング試料採取にあたって，川崎地質株式会社 山本高司氏，小川鉄平氏にお世話になった．

高知大学の奈良正和准教授には生痕化石の同定と堆積構造の解釈についてのご意見を頂いた。貝化石の同定は産総研・地質情報研究部門の中島礼研究員に行っていただいた。また同部門の田辺 晋研究員から岩相や堆積構造の解釈について、適切なご意見を頂いた。各位にお礼申し上げます。

文 献

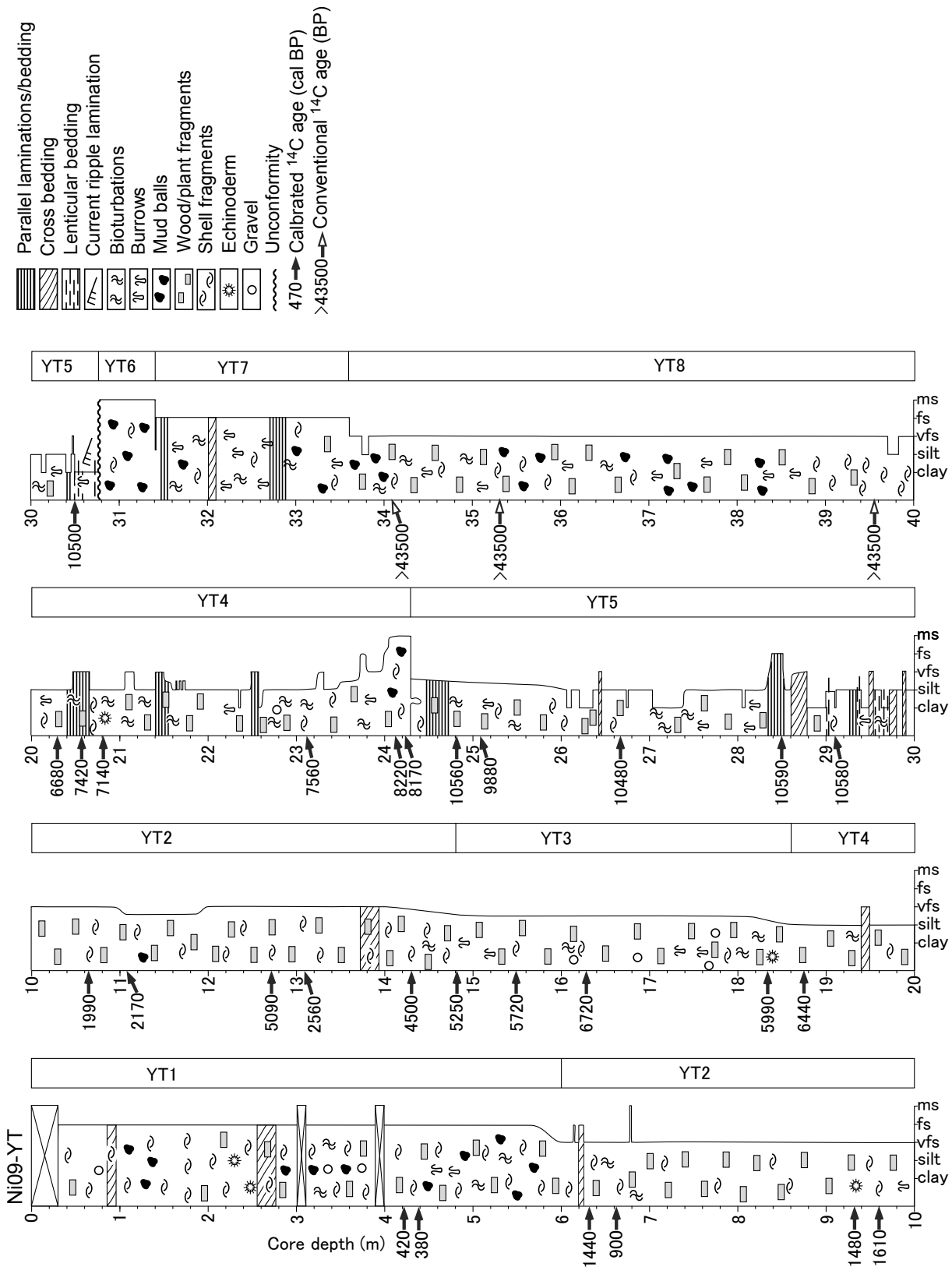
- 池原 研・片山 肇・中嶋 健 (1994) 粟島周辺表層堆積図及び説明書。海洋地質図, no.42, 56p, 地質調査所。
- 井上卓彦・木村治夫・岡村行信 (2011) 新潟県北部沿岸海底地質図及び説明書。海陸シームレス地質情報集, 「新潟沿岸域」, 数値地質図 S-2, 地質調査総合センター。
- 新潟県地盤図編集委員会編 (2002) 新潟地盤図。新潟県地質調査業協会, 66p。
- 地震調査研究推進本部 (2004) 長岡平野西縁断層帯の長期評価について。 http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_nagaoka/index.htm。
- Loutit, T. S., Hardenbol, J. and Vail, P. R. (1988) Condensed section: the key to age determination and correlation of continental margin sequences. In Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. C. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., eds., *Sea-level changes-an intergrated approach* (Spec. Publ. SEPM., no. 42), 183-213.
- 宮地良典・中西利典・ト部厚志・田辺 晋・稲崎富士・安井 賢・小松原琢・水野清秀 (2009) ボーリング解析による角田・弥彦断層の活動度評価。地質調査総合センター速報: 平成 20 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, no.49, 101-120。
- 宮地良典・ト部厚志・田辺 晋・安井 賢・稲崎富士・鴨井幸彦・中西利典 (2011) 越後平野海岸部の沖積層の地質構造。海陸シームレス地質情報集, 「新潟沿岸域」, 数値地質図 S-2, 地質調査総合センター。
- Nara, M. (2004) Trace fossil *Bichordites monastiriensis* in Pleistocen shallow marine deposits of the Boso Peninsula, central Japan, and its paleoenvironmental significance. 地質学雑誌, **110**, 19-20.
- 奈良正和・小竹信宏 (1997) 中—上部更新統下総層群に産出する“アナジャコ巢穴化石” *Psilonichnus*. 地質学雑誌, **103**, 971-981.
- 岡村行信・竹内圭史・上嶋正人・佐藤幹夫 (1995) 佐渡島北方海底地質図及び説明書。海洋地質図, no.46, 地質調査所。
- 奥谷喬司編 (2000) 日本近海産貝類図鑑。東海大学出版会, 1173p。
- 酒井哲弥・斎藤文紀・増田富士夫 (1995) シーケンス層序学入門。地質学論集, no.45, 1-14.
- Walker, R. G., Plint, A. G., 1992. Wave- and storm-dominated shallow marine systems. In Walker R. G., James, N.P. eds, *Facies Models: response to sea level change*. Geological Association of Canada, 219-238.
- Stuiver, M., and Reimer, P.J. (1993) Extended ¹⁴C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.
- Pemberton, S. G., MacEachern, J. A., Frey, R. W. (1992) Trace fossil facies models: environmental and allostratigraphic significance. In Walker R. G., James, N. P., eds., *Facies Models: response to sea level change*. Geological Association of Canada, 47-72.
- 吉田真見子・保柳康一・ト部厚志・山崎 梓・山岸美由紀・大村亜希子 (2006) 堆積層と全有機炭素・窒素・イオウ濃度を用いた堆積環境の復元—新潟平野上部更新統～完新統の例。地質学論集, no.59, 93-109。

(受付: 2010 年 9 月 7 日, 受理: 2010 年 12 月 15 日)

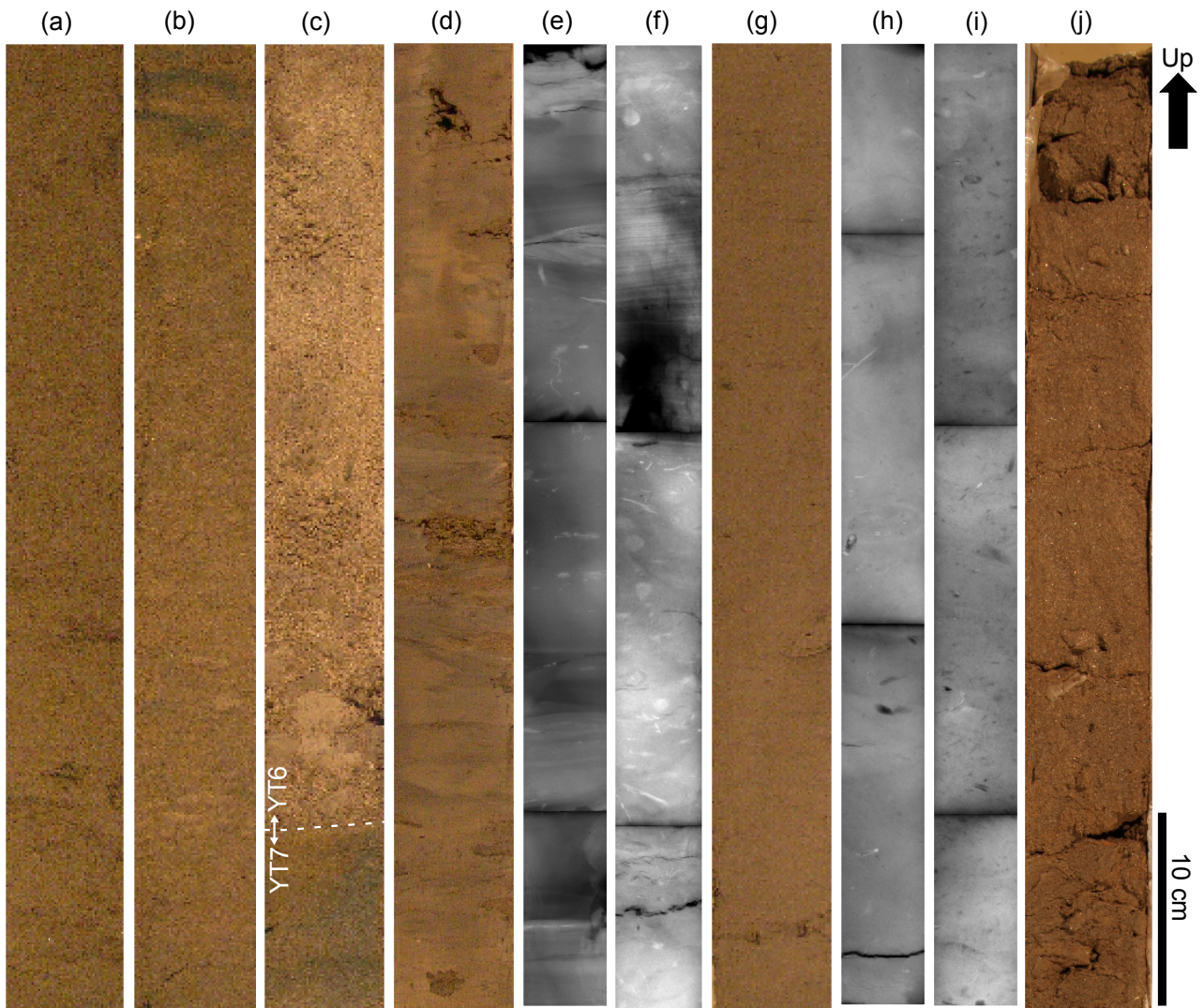


第1図 調査海域図.

Fig. 1 Study area and drilling sites of core sediment.

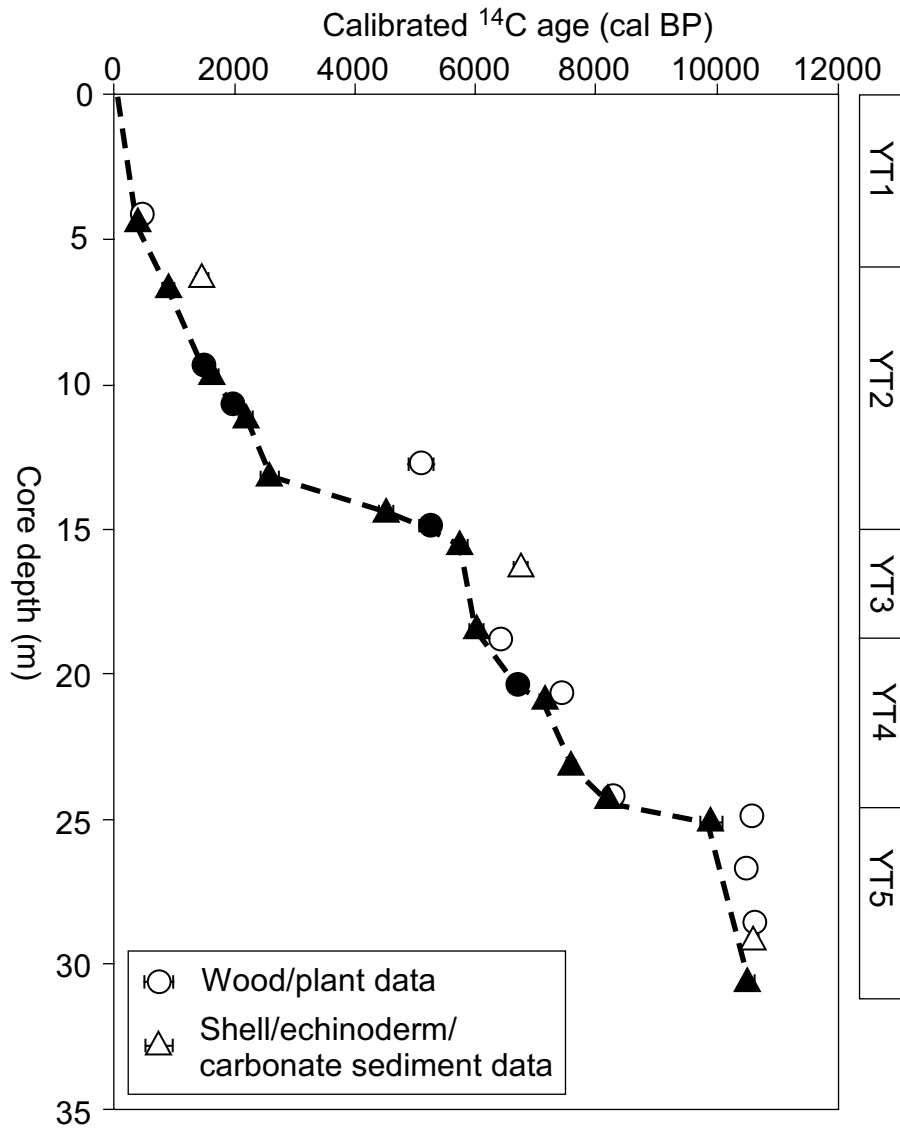


第2図 Ni09-YT柱状図。
Fig. 2 Sediment column of Ni09-YT.



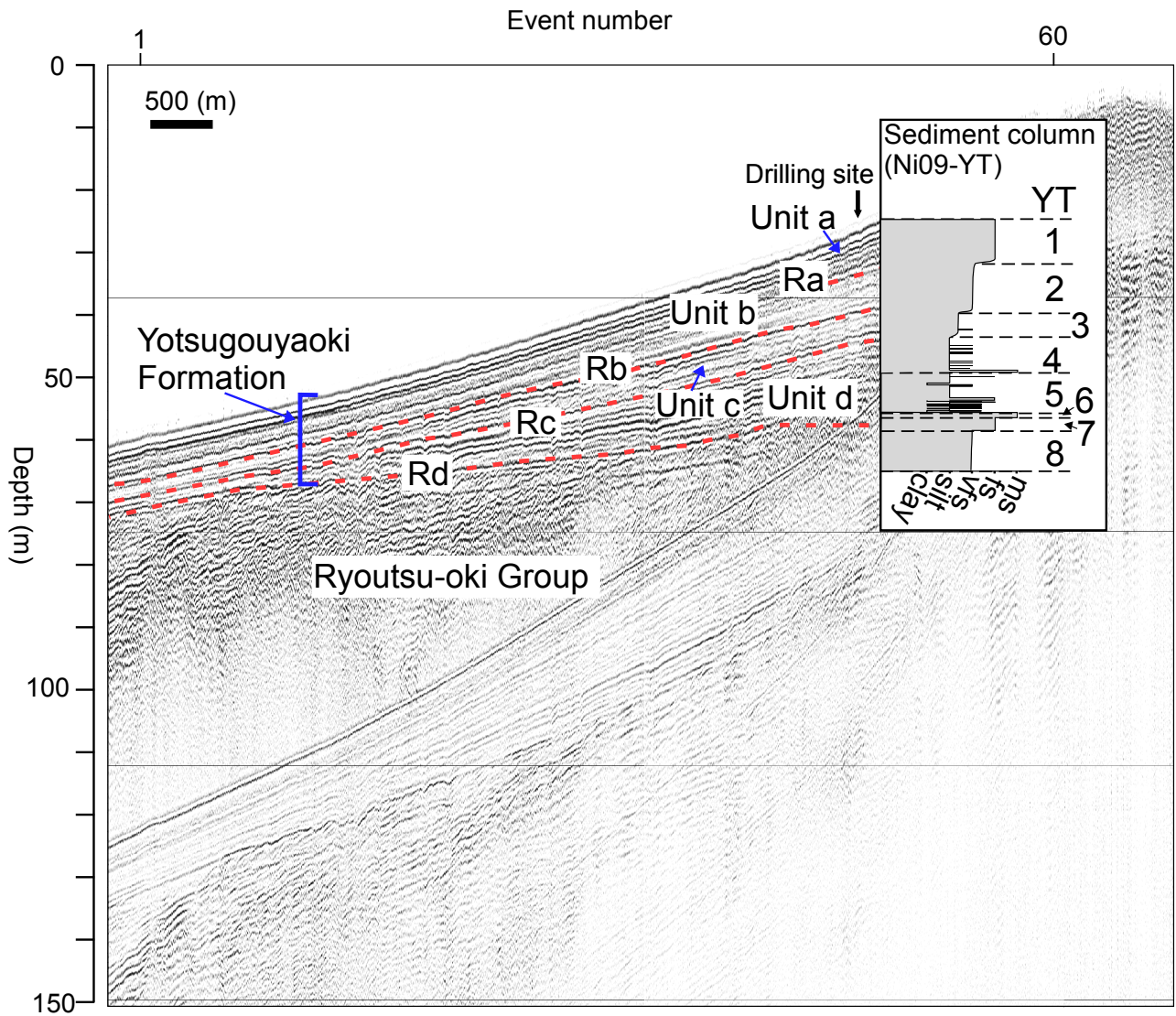
第3図 Ni09-YT ボーリング試料写真. (a) 36.5~37.0 m ; YT8 の極細粒砂 (b) 32.5~33.0 ; YT7 の生痕化石を含む細粒砂. (c) 31.0~31.5 m ; YT6 のマッドボールを含む中粒砂. 白破線は YT7 と 6 の境界を示す. (d) 30.28~30.78 m ; YT5 のカレントリップル, 生痕化石 (e) 29.0~29.5 m ; YT5 の平行層理, レンズ状層理. 軟 X 線写真 (陰影) (f) 22.9~22.4 m ; YT4 の平行層理がみられる砂層と生物擾乱を受けたシルト. 軟 X 線写真 (陰影) (g) 16.5~17.0 m ; YT3 の均質な砂質シルト. (h) 15.5~16.0 m ; YT3 の均質な砂質シルト. 軟 X 線写真 (陰影) (i) 11.2~11.8 ; YT2 の植物化石の破片を多く含む極細粒砂. 軟 X 線写真 (陰影) (j) 1.0~1.5 m ; YT1 の貝化石を多く含む細粒砂.

Fig. 3 Selected photographs in Ni09-YT. (a) 36.5-37.0 m ; Very fine sand in YT8 (b) 32.5-33.0 m ; fine sand with burrows in YT7. (c) 31.0-31.5 m ; Medium sand with mud ball in YT6. White broken line show the boundary YT7 and 6. (d) 30.28-30.78 m ; Current ripples, lenticular beddings and burrows in YT5. (e) 29.0-29.5 m ; Parallel beddings and lenticular beddings in YT5. Radiograph (negative) (f) 22.9-22.4 m ; Parallel laminations sand and bioturbated silt in YT4. Radiograph (negative) (g) 16.5-17.0 m ; Massive sandy silt in YT3. Radiograph (negative) (h) 15.5-16.0 m ; Massive sandy silt in YT3. (i) 11.2-11.8 ; Very fine sand with wood and plant fractions in YT2. Radiograph (negative) (j) 1.0-1.5 m ; Fine sand with shell fractions in YT1.



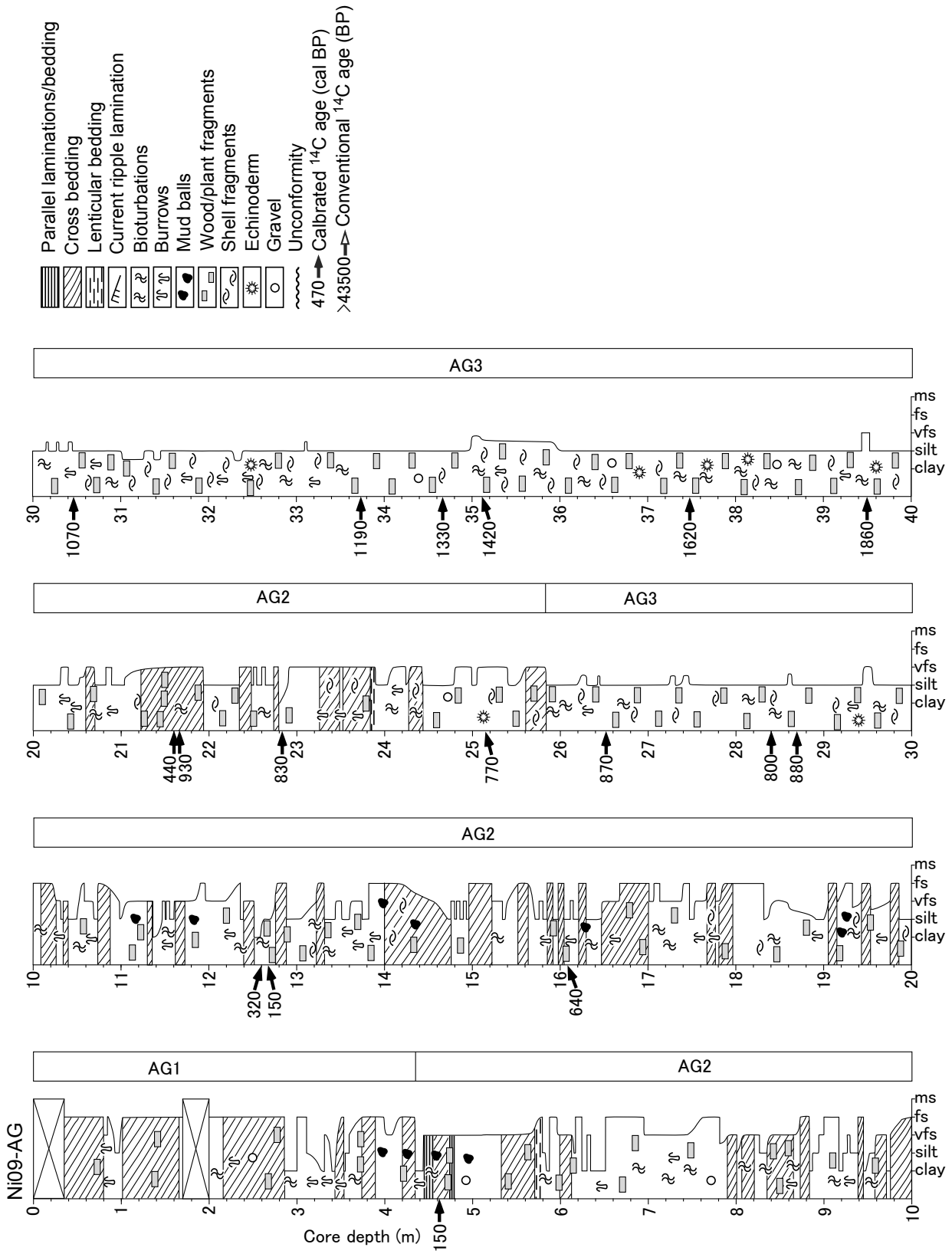
第4図 Ni09-YTの堆積年代曲線. 黒色のマーカーは堆積年代として使用した¹⁴C年代結果を示す.

Fig. 4 Sediment accumulation curve of Ni09-YT. Closed symbols show adopted radiocarbon data shown on the seismic record of E202.

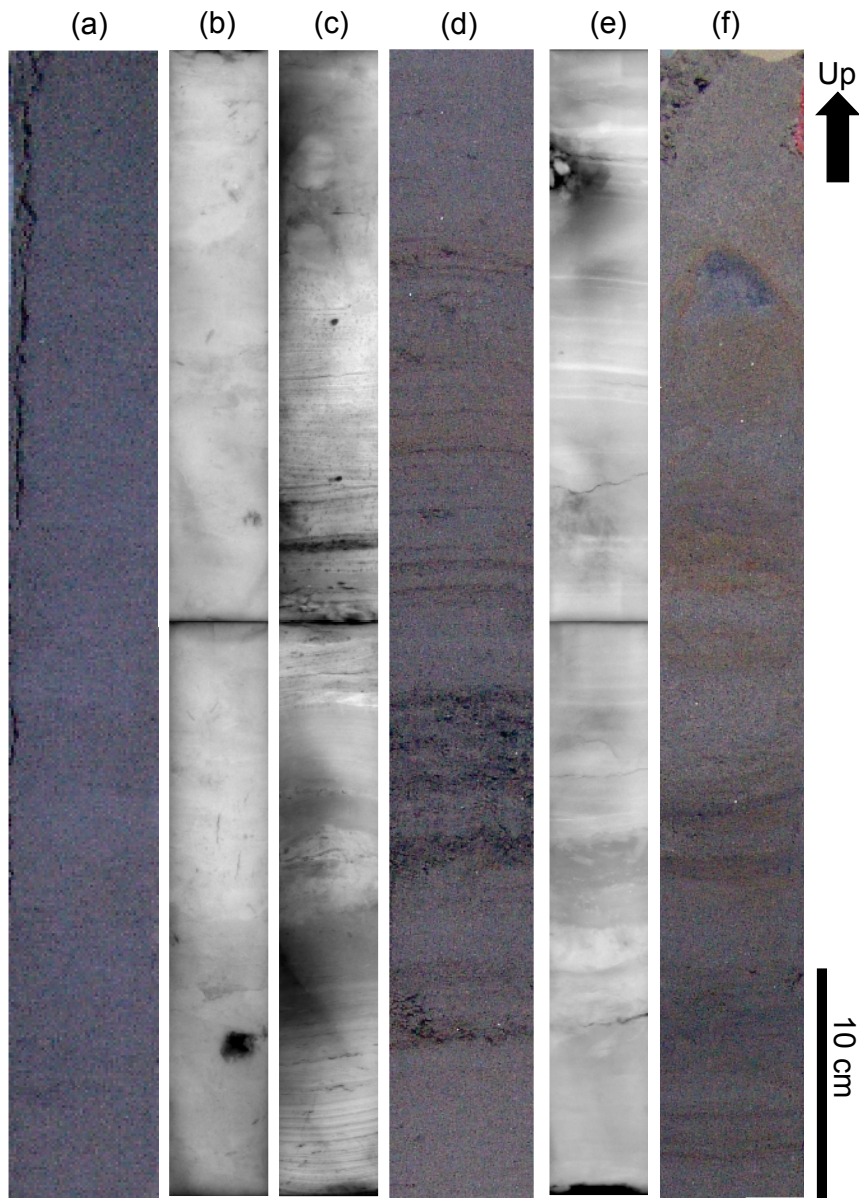


第5図 測線 E202 音波探査記録と Ni09-YT との対比図。

Fig. 5. Correlation between seismic stratigraphic units and sedimentary facies of Ni09-YT.

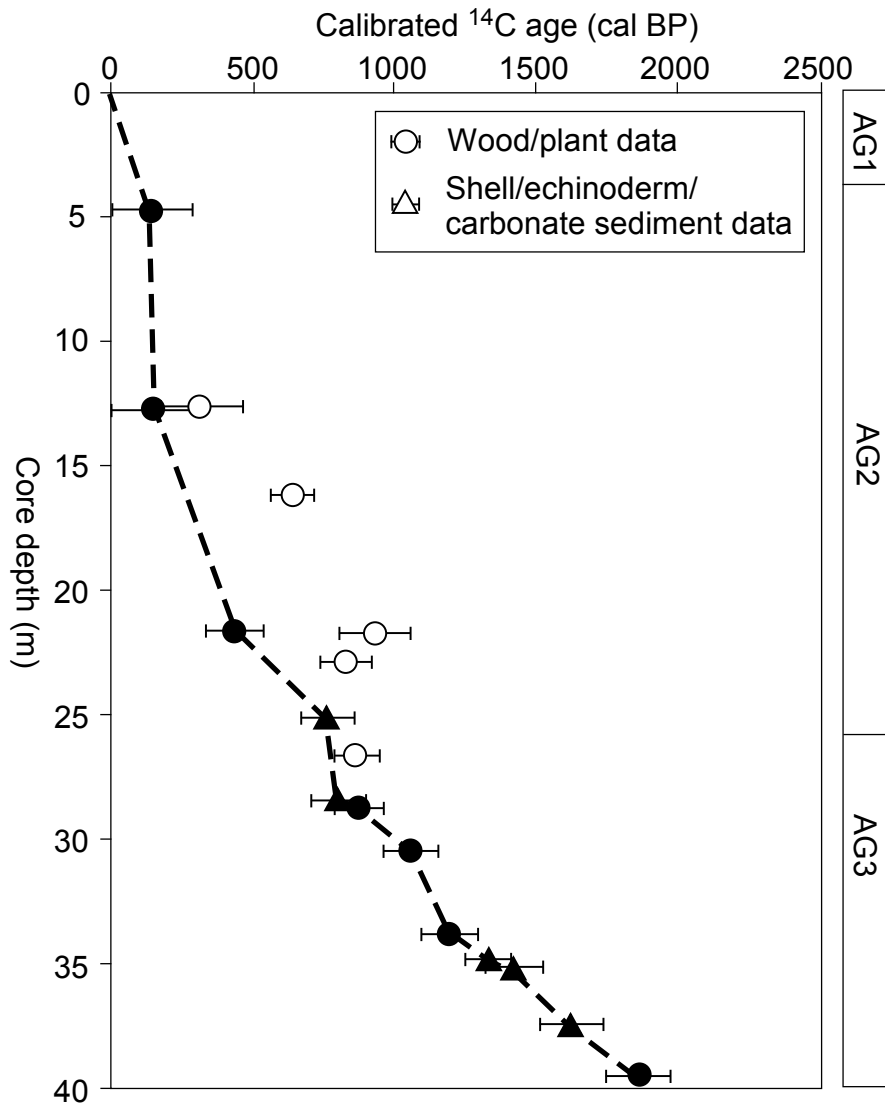


第6図 Ni09-AG 柱状図。
Fig. 6 Sediment column of Ni09-AG.



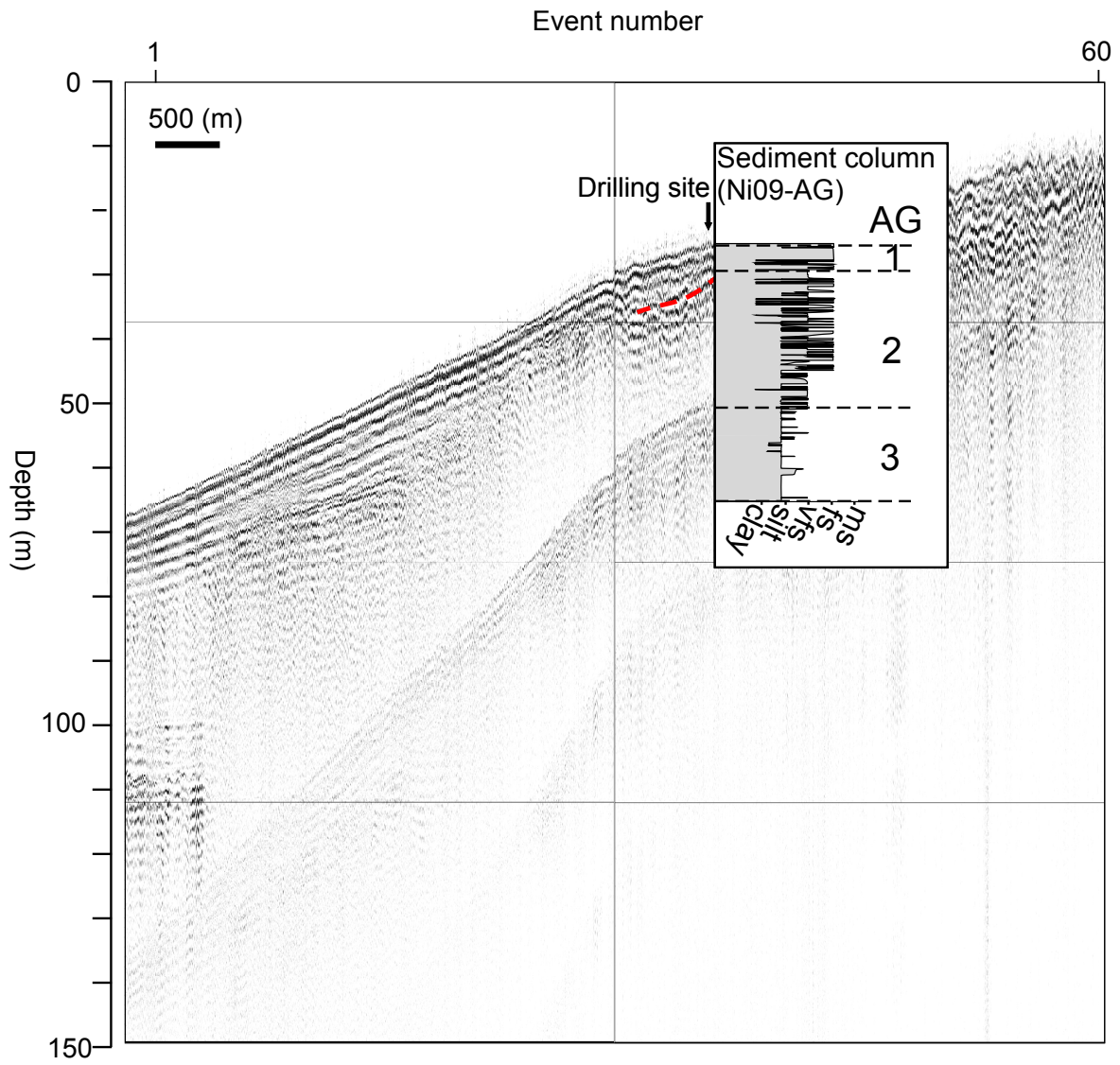
第7図 Ni09-AG ボーリング試料写真. (a) 31.0~31.5 m ; AG3 の均質なシルト (b) 28.25~28.75 m ; AG3 の均質なシルト層. 軟X線写真(陰影) (c) 22.25~22.75 m ; AG2 の斜交層理が確認される極細粒砂. 軟X線写真(陰影) (d) 21.7~21.2 m ; AG2 の斜交層理が確認される極細粒砂層 (g) 2.5~3.0 m ; AG1 の斜交層理が確認される細粒砂. 軟X線写真(陰影) (h) 1.0~1.5 m ; AG1 の斜交層理が確認される細粒砂.

Fig. 7 Selected photographs in Ni09-AG. a) 31.0-31.5 m ; Massive silt in AG3. (b) 28.25-28.75 m ; Massive silt in AG3. Radiograph (negative) (c) 22.25-22.75 m ; Very fine sand with cross beddings. AG2. Radiograph (negative) (d) 21.7-21.2 m ; Very fine sand with cross beddings in AG2. (g) 2.5-3.0 m ; Fine sand with cross beddings in AG1. Radiograph (negative) (h) 1.0-1.5 m ; Fine sand with cross beddings in AG1.



第 8 図 Ni09-AG の堆積年代曲線. 黒色のマーカーは堆積年代として使用した ¹⁴C 年代結果を示す.

Fig. 8 Sediment accumulation curve of Ni09-AG. Closed symbols show adopted radiocarbon data.



第9図 測線 E28 音波探査記録と Ni09-AG との対比図。
Fig. 9 Correlation between seismic stratigraphic units and sedimentary facies of Ni09-AG shown on the seismic record of E28.

第1表 ボーリング試料の採取地点.
Table 1 Locations of Ni09-YT and Ni09-AG.

Core No.	Location		Water depth (m)	Core length (m)
	lat.	long.		
Ni09-YT	37° 52' 09.40" N	138° 52' 49.02" E	25.35	40.0
Ni09-AG	37° 59' 19.75" N	139° 06' 27.95" E	24.98	40.0

第2表 Ni09-YT から得られた放射性炭素年代結果.
Table 2 Radiocarbon dates obtained from Ni09-YT.

Core depth in Ni09-YT (m)	Materials	Conventional ¹⁴ C age (BP)	Calibrated ¹⁴ C age (cal BP) (2 sigma)	Laboratory code
4.10	Wood	380±40	320-510	Beta-271150
4.35	Shell, Ungulinidae gen. et sp. indet.	730±40	290-460	Bata-272581
6.29	Shell, Pitar sp.	1900±40	1340-1540	Bata-272582
6.66	Shell, Ungulinidae gen. et sp. indet.	1360±40	790-1000	Bata-272583
9.32	Plant	1590±40	1390-1560	Beta-271151
9.61	Echinoderm	2030±40	1500-1710	Beta-271152
10.64	Wood	2000±40	1870-2100	Beta-271153
11.11	Shell, Pitar sp.	2500±40	2050-2290	Bata-272584
12.74	Wood	4450±40	4880-5290	Beta-271154
13.14	Shell, Pitar sp.	2810±40	2410-2700	Bata-272585
14.35	Shell	4350±40	4380-4620	Bata-280610
14.85	Wood	4560±40	5050-5440	Beta-271155
15.51	Shell	5340±40	5600-5830	Bata-280611
16.27	Shell	6260±40	6610-6830	Bata-280612
18.38	Echinoderm	5580±40	5880-6100	Beta-271156
18.76	Wood	5630±40	6300-6500	Beta-271157
20.31	Plant	5880±50	6560-6800	Beta-271158
20.58	Wood	6510±50	7320-7510	Beta-271159
20.81	Shell	6620±40	7020-7250	Bata-280613
23.10	Shell	7070±40	7470-7640	Bata-280614
24.16	Plant	7420±50	8070-8370	Beta-271160
24.21	Shell	7710±40	8050-8290	Bata-280615
24.85	Wood	9340±50	10410-10700	Beta-271161
25.03	Shell	9110±40	9690-10070	Bata-280616
26.68	Plant	9300±50	10300-10650	Beta-271164
28.50	Wood	9370±50	10440-10730	Beta-271162
29.10	Shell	9710±40	10500-10660	Bata-280617
30.51	Carbonate sediment	9640±40	10410-10580	Bata-280618
34.05	Wood	>43500	-	Beta-27239
35.35	Wood	>43500	-	Bata-272586
39.53	Shell, Callista sp.	>43500	-	Bata-272587

第3表 Ni09-AG から得られた放射性炭素年代結果.
Table 3 Radiocarbon dates obtained from Ni09-AG.

Core depth in Ni09-AG (m)	Material	Conventional ¹⁴ C age (BP)	Calibrated ¹⁴ C age (cal BP) (2 sigma)	Laboratory code
4.65	Wood	140±40	0-290	Beta-272532
12.60	Wood	290±40	160-470	Beta-272533
12.65	Plant	180±40	0-300	Beta-272534
16.10	Wood	700±40	560-720	Beta-272535
21.62	Wood	450±40	330-540	Beta-273237
21.65	Wood	1040±40	800-1060	Beta-272536
22.86	Wood	910±40	740-920	Beta-272537
25.10	Echinoderm	1210±40	670-860	Beta-272538
26.58	Wood	960±40	780-950	Beta-272539
28.40	Shell, <i>Inquisitor jeffreysi</i> (Smith)	1260±40	710-900	Beta-272540
28.70	Wood	970±40	790-960	Beta-272541
30.44	Wood	1130±40	960-1170	Beta-272542
33.75	Wood	1280±40	1090-1290	Beta-272543
34.78	Echinoderm	1780±40	1250-1410	Beta-272544
35.15	Shell	1870±40	1320-1520	Beta-272545
37.43	Shell	2050±40	1510-1730	Beta-273238
39.43	Wood	1900±40	1740-1970	Beta-272547