

紀伊水道沿岸海域における反射法音波探査の概要

Preliminary results of the reflection seismic survey in the coastal sea area of Kiisuido Strait, Japan

有元 純^{1*}
ARIMOTO Jun^{1*}

Abstract: High-resolution reflection seismic survey was operated using a boomer source for geologic structural mapping of the coastal sea area of Kiisuido Strait. Three subsurface seismic units were recognized: they are correlated to the pre-Quaternary basement rocks, Middle to Upper Pleistocene- and Holocene sediments, in ascending order. Characteristic geological structures were observed, including shallow displacements related with the Median Tectonic Line active fault system and also a deformation structure within the pre-Holocene sedimentary strata off Tokushima.

Keywords: reflection seismic survey, Kiisuido Strait, Median Tectonic Line, active fault, coastal area

要 旨

紀伊水道沿岸海域の地質図作成を目的として、ブーマーを用いた反射法音波探査を実施した。海底下の地質体は大まかに3つのユニットに区分され、下位から先第四系基盤岩類、中-上部更新統堆積層、そして完新統堆積層に対比される。また中央構造線活断層帯における活構造や、完新世以前の後期第四紀に形成されたと考えられる徳島沖の変形構造が確認された。

1. はじめに

沿岸海域に分布する活断層の活動により発生する地震は、人口密集地である平野部における経済活動や生活に対し大きなリスクとなりうる。一方で、大型の調査船を用いた調査が困難であるなどの理由から、陸域や外洋に比べ沿岸海域は従来地質情報に乏しい空白域であった。こうした背景をふまえ、産業技術総合研究所地質調査総合センターでは2008年度に「沿岸域の地質・活断層調査」プロジェクトを開始し、近年は都市圏沿岸域の地質情報整備を行っている。

2020年度より大阪湾・紀伊水道沿岸域における調査が開始され、初年度には大阪湾断層近傍の浅部構造探査などが実施された(鈴木ほか, 2021)。本報告では、紀伊水道沿岸海域の海底地質図作成のため2021年度に実施された反射法音波探査の概要を記述し、音響層序と地質構造について予察的に報告する。

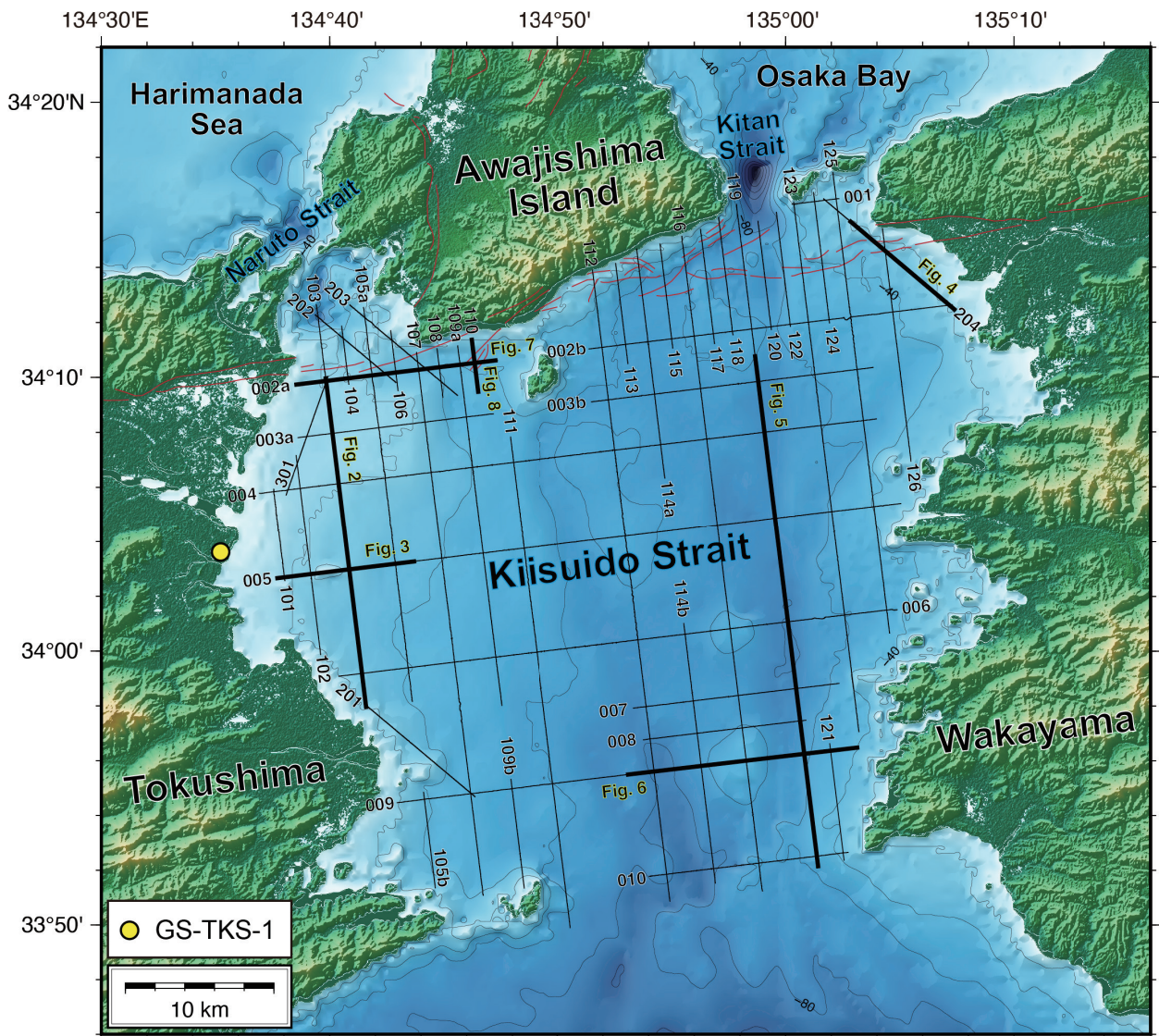
2. 地域概説

紀伊水道は四国と紀伊半島に挟まれ、東西と南北にそれぞれ約50 kmの広がりをもつ海域である(第1図)。東西及び北側はそれぞれ和歌山県、徳島県及び兵庫県淡路島の沿岸部に面し、南側はフィリピン海に開いている。徳島-淡路島間は鳴門海峡、淡路島-和歌山間は紀淡海峡(友ヶ島水道)によってそれぞれ播磨灘、大阪湾と接続しており、瀬戸内海と外洋を結ぶ海上交通の要衝となっている。紀伊水道の水深は概ね80 mより浅いが、海峡部付近には海釜と呼ばれる水深100 m以上に達する凹地が局所的に分布する(八島, 1992)。また、紀淡海峡から海域南部にかけて南北方向に伸びる凹地が水道中央部に発達し、大局的には徳島・和歌山沖から水道中央部に向かって東西方向に緩やかに傾斜する海底地形となっている。

紀伊水道の北部では1970年代から1990年代にかけて、紀淡海峡周辺(海上保安庁水路部, 1978; 地質調査所, 1995; 吉川ほか, 1996; 七山ほか, 1999)や、鳴門海峡周辺(水野ほか, 1996)において重点的に高分解能音波探査やボーリング調査等が実施され、中央構造線活断層系の分布や構造が明らかにされてきた。これらの調査結果をもとに、紀伊水道における中央構造線活断層群は紀淡海峡-鳴門海峡セグメントとして一括され、長期評価が行われている(地震調査研究推進本部, 2017)。一方、紀伊水道の中央部から南部にかけては、海上保安庁水路部(1993, 1997)や三橋ほか(2000)による網羅的調査があるものの、海域地質構造に関する研究例は多くない。

* Corresponding author: ARIMOTO, J., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: j-arimoto@aist.go.jp

1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)



第 1 図 本研究における反射法音波探査測線図 (黒線)。太線は第 2 図～第 8 図の断面図の位置を示す。赤線は産総研活断層データベース (<https://gbank.gsj.jp/activefault/>) にコンパイルされた活断層位置を示す。羽田ほか (2022) による GS-TKS-1 ボーリング試料採取地点も合わせて図中に示す (黄丸)。

Fig. 1 Survey line locations in this study (black lines). Bold black lines represent positions of profiles exhibited in figs. 2–8. Red lines represent the distribution of active faults based on the "Active fault database of Japan" (<https://gbank.gsj.jp/activefault/>) provided by the Geological Survey of Japan. The location of boring site GS-TKS-1 (Haneda *et al.*, 2022) is also indicated (yellow circle).

3. 調査方法

本研究の音波探査は、2021 年 8 月 12 日から 9 月 14 日にかけて、作業船「第八繁洋丸」(14 t) を用いて実施した。調査範囲が広域のため、調査日程の前半と後半で係留地をそれぞれ徳島県徳島市と和歌山県海南市に分けて調査を行った。発振装置はブーマー (Applied Acoustic Engineering 社製 CAT200) を用い、発振エネルギーは 200 J を基本としたが、一部の測線では機材トラブルのため 150 J とした。受波用のストリーマケーブル (Geometrics 社製 GeoEel) は、チャンネル数 24、チャンネル間隔 3.125 m のものを用いた。発振間隔は 1.56 m

となるよう、船速に応じてトリガー信号の時間間隔を調整した。調査船に GNSS アンテナを設置して発振ごとに位置情報を取得し、佐藤ほか (2020) と同様の手法を用いて補正を行い、トレースの位置情報とした。収録長を 0.4 sec、サンプリングレートを 0.125 msec とし、SEG-D 形式でデジタルデータを収録した。収録したデータを SEG-Y 形式に変換し、音波探査信号処理ソフトウェア SPW (Parallel Geoscience 社製) を用いてジオメトリ設定、バンドパスフィルタリング、ゲイン補償、デコンボリューション、速度解析、Normal moveout (NMO) 補正、共通反射点 (CMP) 重合の順に処理を行った。バンドパスフィルタの通過周波数は 300 – 2,000 Hz を基

本とし、ノイズレベルに応じて断面ごとに調整した。

本調査でデータを取得した総測線長は 780 km である（第 1 図）。測線名は以下のルールに従って設定した。まず測線の方向ごとにグループ分けして百の位を 0 から 3 まで割り振り、それぞれのグループ内で西あるいは北から連番で、一の位が 1 から始まる三桁の数字を与えた（例えば 201, 202, ...）。また同一の延長線上にあるが連続していない測線群については同一の数字を与え、西あるいは北から順に数字末尾に a あるいは b とアルファベットを割り振って区別した（例えば 002a, 002b）。さらに 2021 年度の沿岸域（EnGan）調査であることを示す eg21 を、ハイフンで区切って末尾に付記することで最終的な測線名とした（例えば 301-eg21）。

調査工程に応じて複数回に分けて観測を行った測線については、分割した区間ごとに重合断面を作成した後、位置情報をもとに繋ぎ合わせ、一連の断面とした。この場合、観測時の潮位や波浪状況の違いにより、断面の継ぎ目で深度方向のずれが生じることがある。得た断面は png 形式の画像として出力し、佐藤（2021）による断面の立体表示法を用いてデータベース化し、解釈を行った。

4. 紀伊水道沿岸海域の地下構造

取得した反射断面に基づいて、紀伊水道海底下浅部の音響層序と特徴的な地質構造の概要を以下に記載する。

4.1 音響層序

本報告では、反射強度及び音響的層相の違いにより、紀伊水道に分布する地質体を大まかに 3 つのユニットに区分した。本報告ではこれらを上位からユニット A, B, C と呼称する（第 2 図）。

最下位のユニット C は、音響散乱により内部構造が確認できない。上面は起伏に富み、海岸線付近の水深およそ 40 m 以浅の海底下において局所的に分布する。一般に上位のユニット B あるいはユニット A に覆われるが、徳島沖の一部や中央構造線活断層帯の北側では海底面への露出が認められる（第 3 図、第 4 図）。

ユニット B は下位のユニット C をオンラップ不整合で覆う。最上部で反射強度が強く、概ね成層するが連続性の悪い内部反射面により特徴付けられる。上面は部分的に起伏に富み、特に和歌山側の海域南半部では幅数百 m 規模のチャンネルや台地状の形状が認められる（第 5 図、第 6 図）。ユニット B は調査海域のほぼ全域に連続的に分布し、広く上位のユニット A に覆われるが、徳島沖の一部や海域中央部から和歌山側にかけての一部では海底面に露出する（第 2 図、第 5 図、第 6 図）。

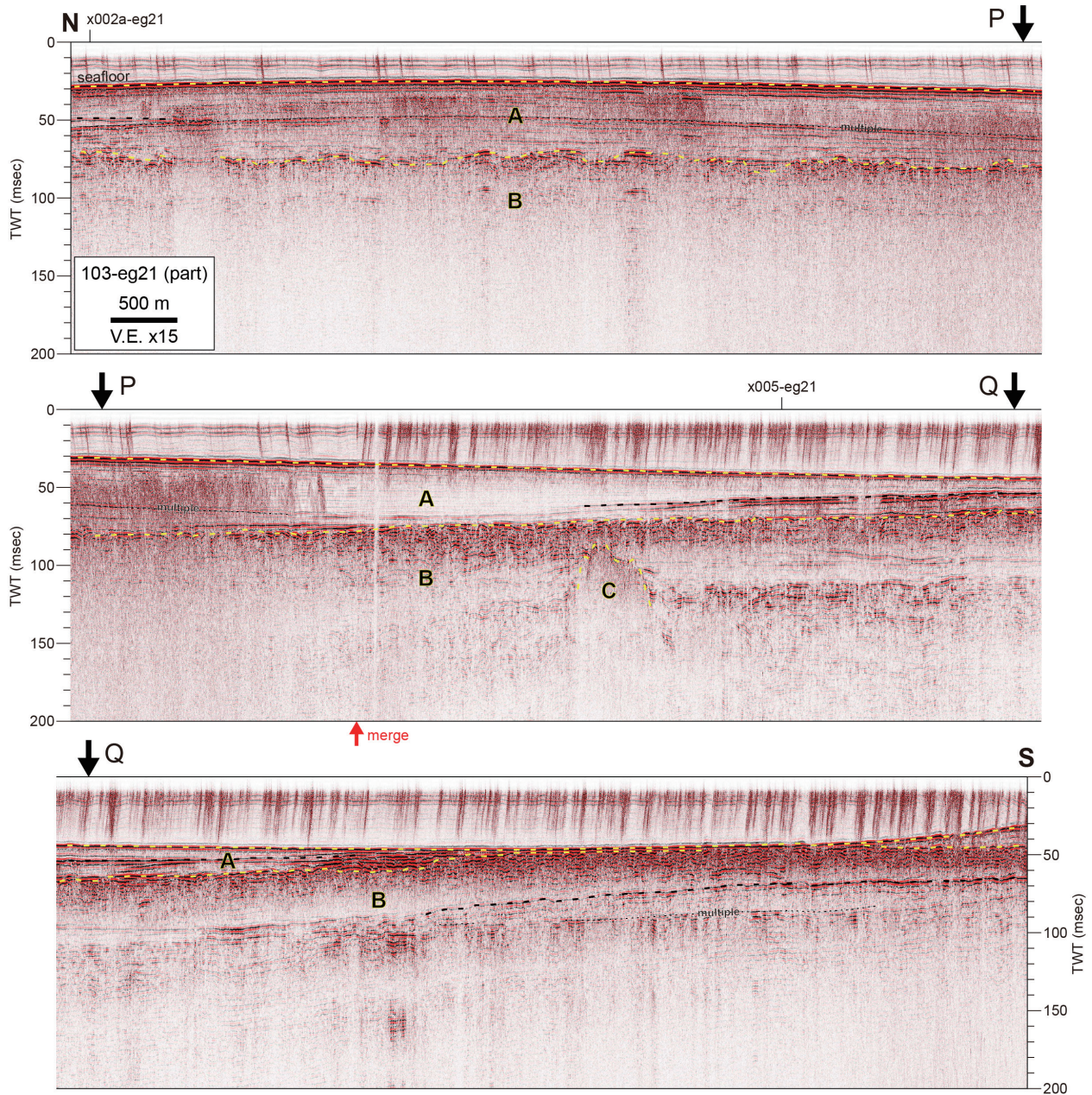
ユニット B の下限はユニット C との境界部以外で不明瞭だが、海域中部の和歌山沖など上位のユニット A が発達しない場所では、往復走時 90 msec（音速を 1,500 m/sec と仮定すると 68 m）以上の層厚が確認できる（第 5 図、第 6 図）。このような場所ではユニット B 最上部約 10 - 20 msec より下位に、よく成層し連続性の比較的良い反射面や、ユニット B 上面と同様に起伏に富み、チャンネル形状を示す顕著な反射面が部分的に認められる（第 5 図、第 6 図）。多重反射の影響が強い水深の浅い場所や音波の透過が悪い場所では追跡が難しいなどの問題はあるが、これらの反射面の測線間の連続性を今後検討することにより、本報告におけるユニット B はさらに複数のユニットに区分される可能性がある。

最上位のユニット A は、下位のユニット B 及びユニット C に対し、部分的にオンラップあるいはダウンラップする。内部反射面は、全体的に成層し連続性が良いことで特徴付けられるが、下部は部分的に連続性がやや悪くなる。海域北部 - 中部の徳島沖で厚く、最大往復走時 50 msec（音速を 1,500 m/sec と仮定すると 38 m）程度に達する（第 2 図）。本ユニットは一般に陸側から沖側へ厚さを減じ、海域中央部で部分的にせん滅する。

本調査で得られた音響層序断面と、沿岸部で区分される層序との比較を行う。本調査の測線 005-eg21 西端に近い徳島市沖洲埋立地（T.P.: 2.38 m）において、2021 年度に地質調査総合センターにより深度約 131 m のボーリング調査が実施された（GS-TKS-1；羽田ほか、2022）。GS-TKS-1 コア最下部からは泥質片岩が得られており（羽田ほか、2022）、第 2 図や第 3 図に示す徳島沖のユニット C はおそらく三波川変成岩類に対比される。しかし、第 4 図に示す測線 204-eg21 において海底面に露出するユニット C は、近接する陸域に露出し和泉山脈をなす上部白亜系和泉層群堆積岩（宮田ほか、1993）の海域延長部に相当する可能性が高い。このように本調査海域の音響基盤であるユニット C は、地域ごとに異なる地質体により構成される先第四系基盤岩類に対応すると考えられる。一方、GS-TKS-1 コアの深度およそ 130 m から 40 m には中 - 上部更新統堆積層、その上位には完新統（沖積層の一部）が認められており（羽田ほか、2022）、これらは本調査におけるユニット B 及びユニット A にそれぞれ対比されると考えられる。本調査海域は、最終氷期最盛期にほぼ全域が陸化していたと考えられており（西山ほか、2017）、ユニット B 上部に海水準低下に伴う侵食面が存在する可能性が高い。

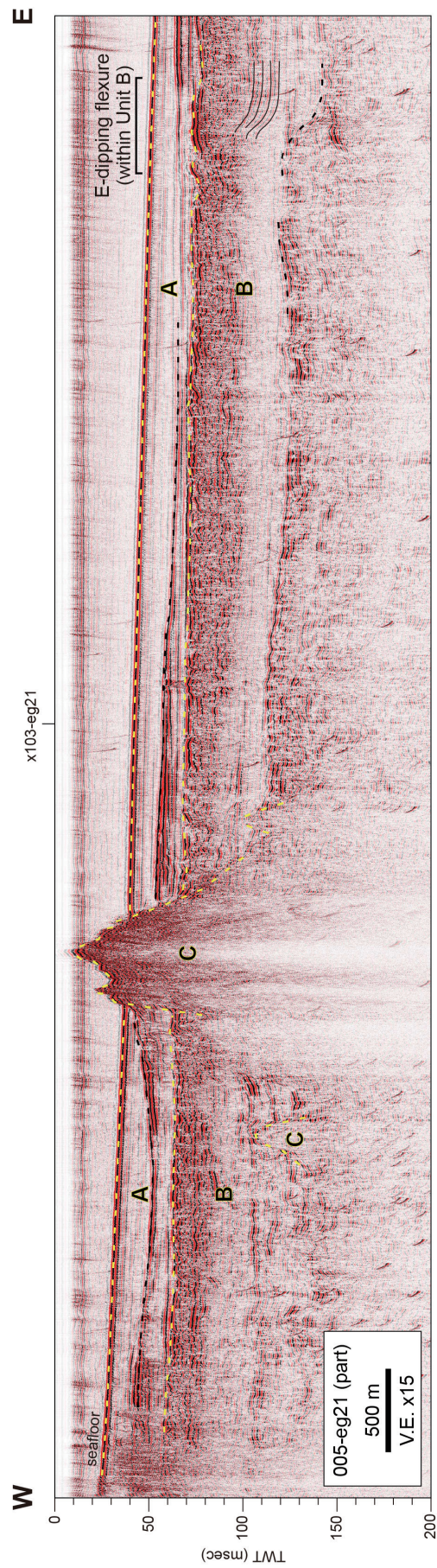
4.2 地質構造

本調査では、先行研究に基づく中央構造線活断層帯の分布域である海域北部において、測線間隔を密に設

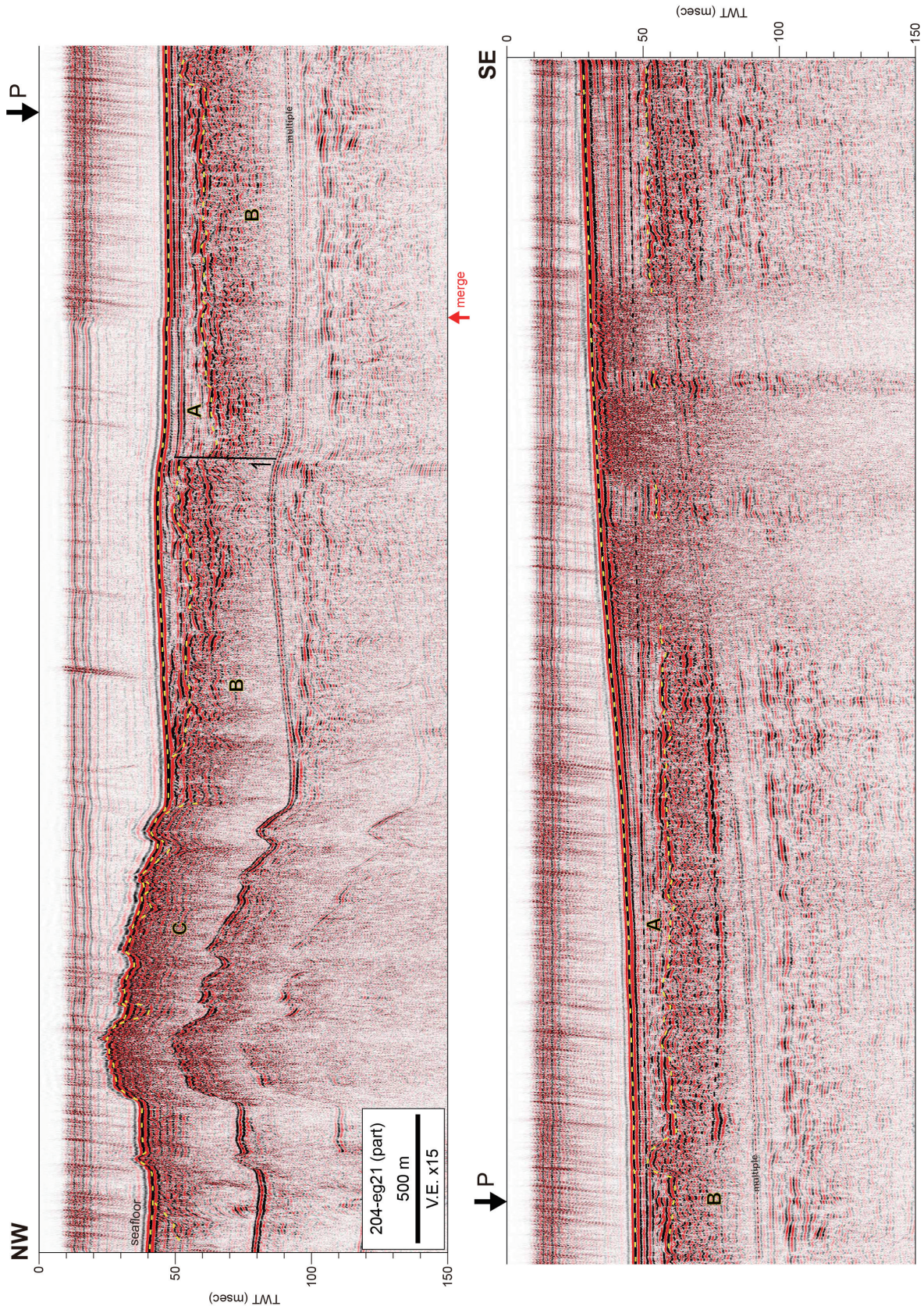


第 2 図 紀伊水道北部-中部徳島沖の南北測線 103-eg21 (一部) の反射断面図. 縦軸は往復走時 (two-way travelttime; TWT) を示す. 海底面とユニット境界, 各ユニット内部の比較的顕著で連続性の良い反射面, 及び海底面の多重反射 (multiple) をそれぞれ黄色の破線, 黒の破線, 及び黒の点線で示す. 複数列に分割された断面図は下向きの黒矢印で示した地点で連続する. 上向きの赤矢印は断面の継ぎ目を示す. 断面の位置は第 1 図の黒太線で示す. (第 3 図から第 8 図まで同様).

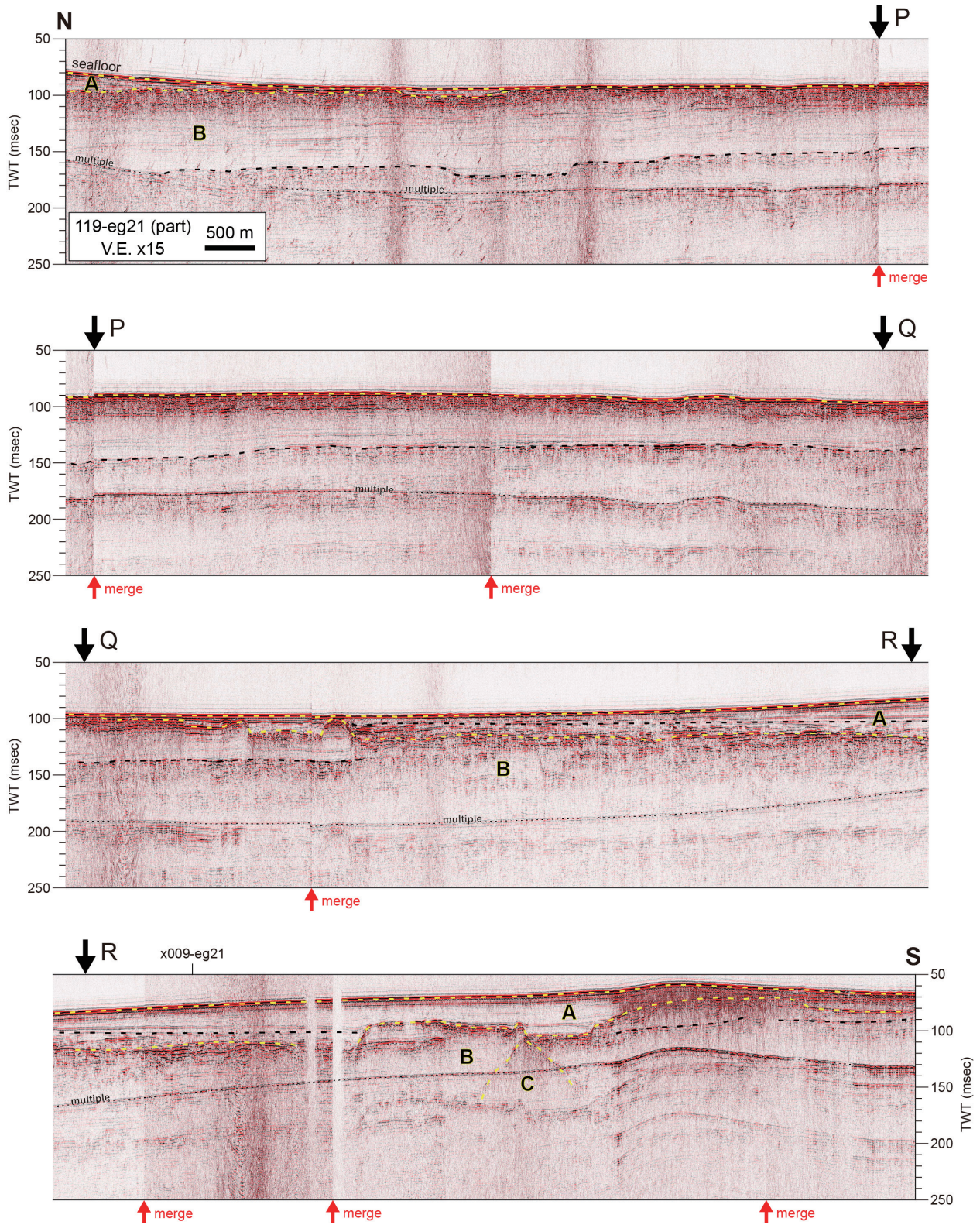
Fig. 2 Seismic section of the N-S survey line 103-eg21 (part) in the northern to middle part of the Kiiusuido Strait, off Tokushima. Vertical axis is indicated in two-way travelttime. Seafloor and unit boundaries, other characteristic reflection surfaces and multiples of seafloor are indicated with yellow dashed lines, black dashed lines and black dotted lines, respectively. Black arrows indicate anchor points of splitted parts of the section. Separately processed section profiles were merged at points indicated with red arrows. The position of the section is indicated with a thick line in fig. 1 (figs. 3-8 follow the same notes above).



第3図 紀伊水道中部徳島沖の東西測線 005-eg21 (一部) の反射断面図。
 Fig. 3 Seismic section of the W-E survey line 005-eg21 (part) in the middle part of the Kiisuido Strait, off Tokushima.

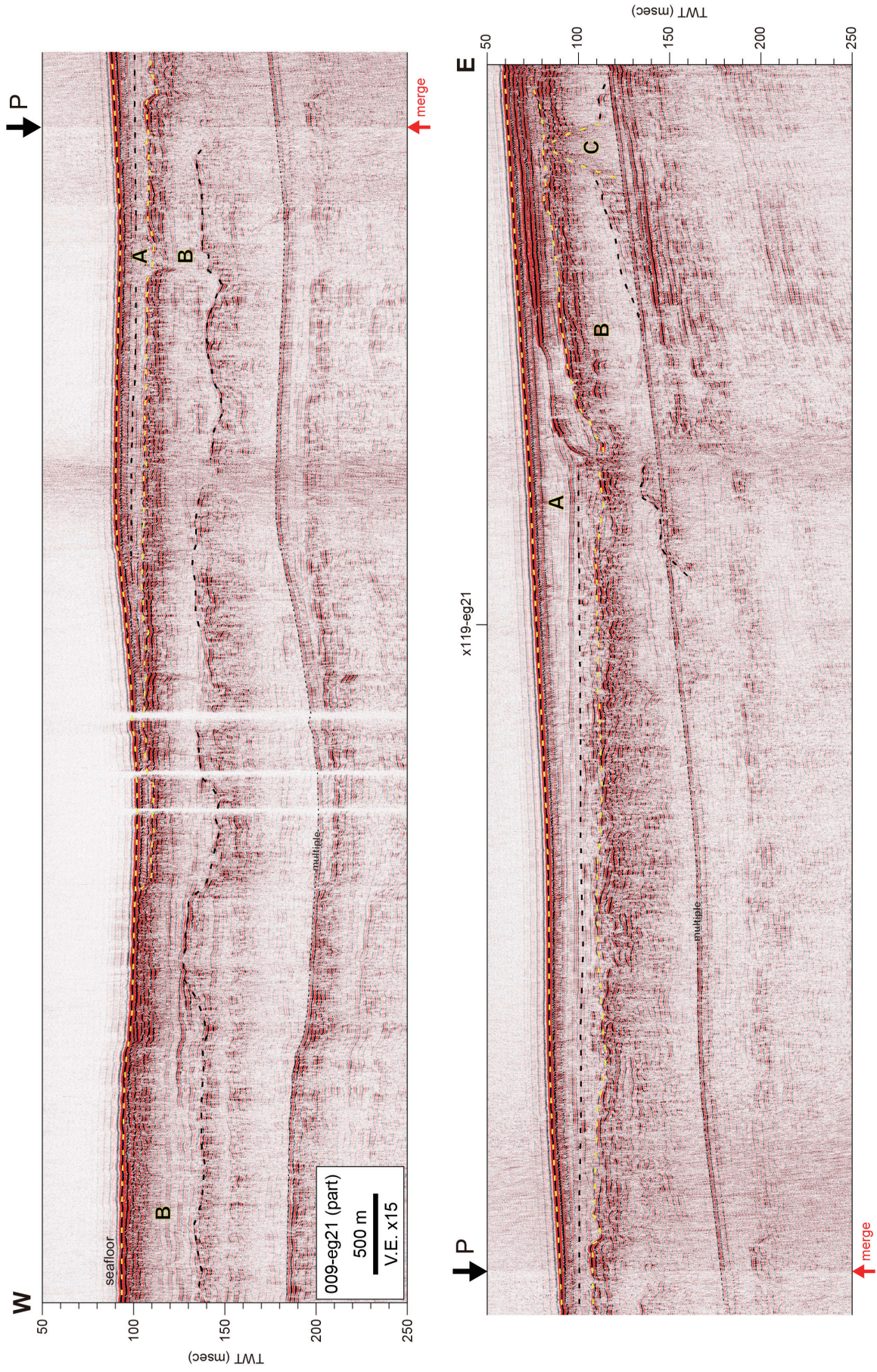


第 4 図 紀伊水道北部和歌山沖の北西-南東測線 204-eg21 (一部) の反射断面図。測線北部ユニット C 内部には残響が表れている。
Fig. 4 Seismic section of the NW-SE survey line 204-eg21 (part) in the northern part of the Kiisuido Strait, off Wakayama. Reverberation are expressed inside the Unit C.

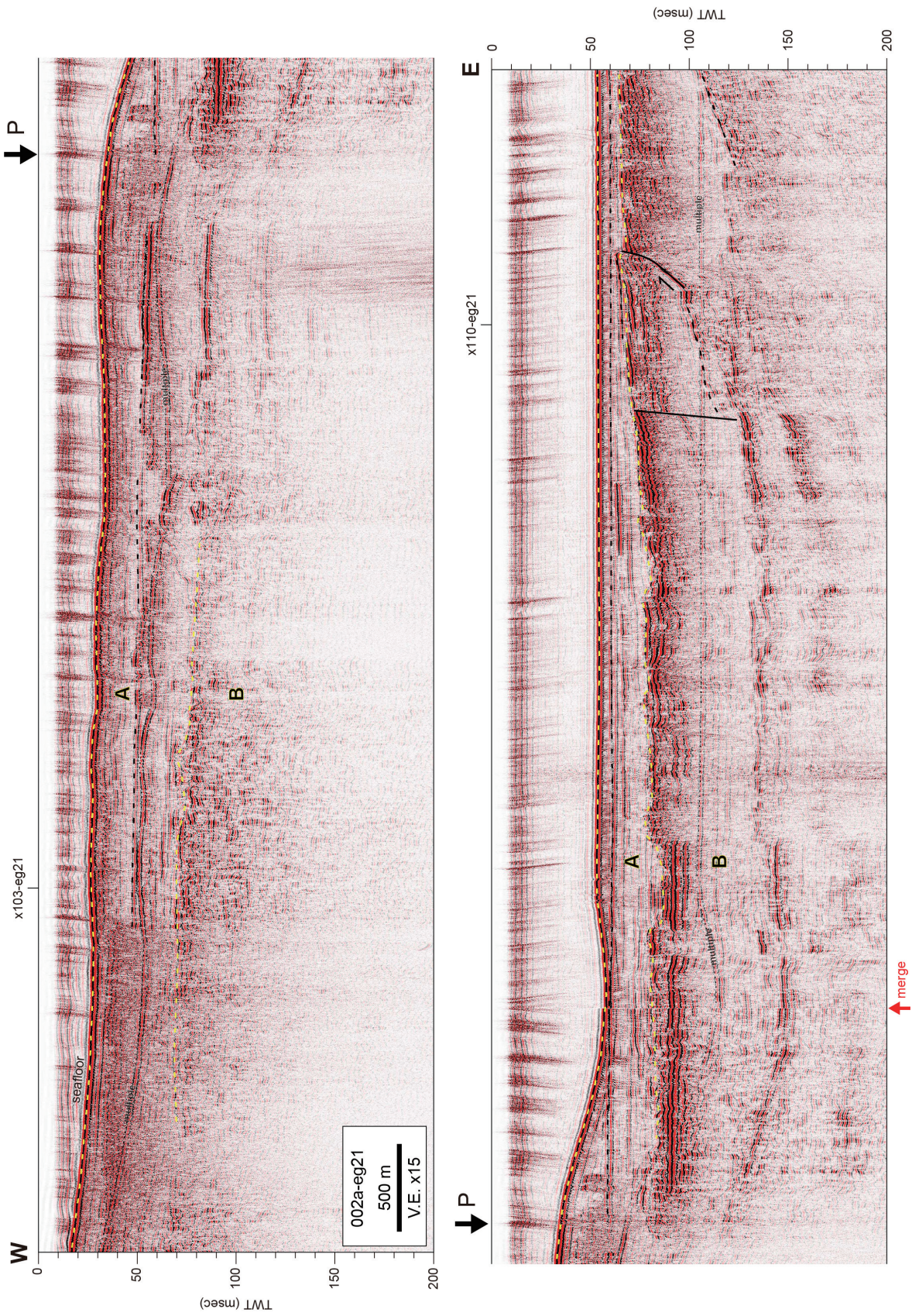


第5図 紀伊水道北部-南部和歌山沖の南北測線 119-eg21 (一部) の反射断面図。

Fig. 5 Seismic section of the N-S survey line 119-eg21 (part) in the northern to southern part of the Kiisuido Strait, off Wakayama.

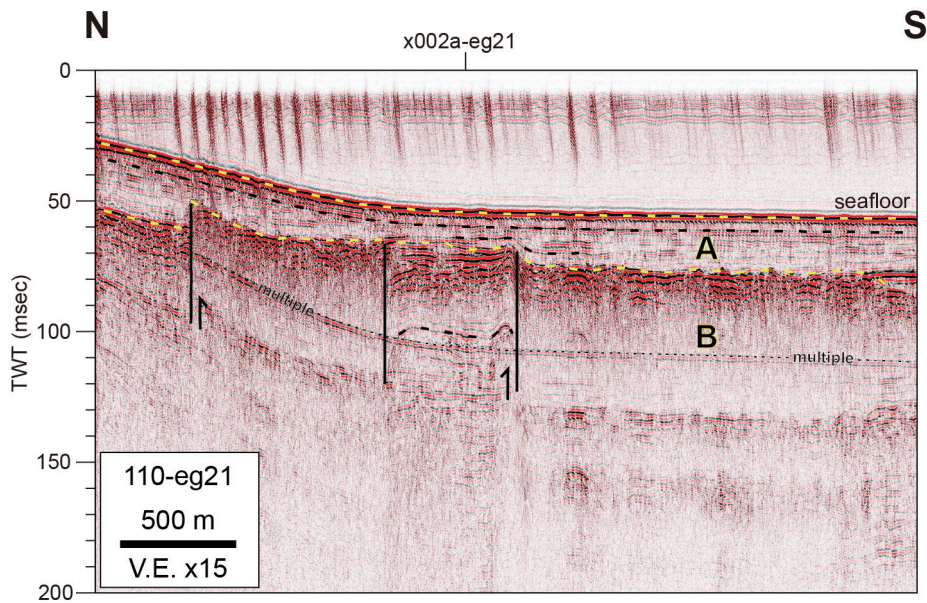


第 6 図 紀伊水道南部和歌山沖の東西測線 009-eg21 (一部) の反射断面図。
Fig. 6 Seismic section of the W-E survey line 009-eg21 (part) in the southern part of the Kiisuido Strait, off Wakayama.



第7図 紀伊水道北部徳島-淡路島沖の東西測線 002a-eg21 の反射断面図。

Fig. 7 Seismic section of the W-E survey line 002a-eg21 in the northern part of the Kiisuido Strait, off Tokushima-Awajishima Island.



第 8 図 紀伊水道北部淡路島沖の南北測線 110-eg21 の反射断面図。

Fig. 8 Seismic section of the N-S survey line 110-eg21 in the northern part of the Kiisuido Strait, off Awajishima Island.

定した (第 1 図)。調査の結果、音響断面においてユニット A の基底や内部反射面を変位させる、南落ちあるいは北落ちの構造が複数確認された (第 4 図、第 7 図、第 8 図)。これらは沖積層あるいは完新統を変位させていることから、活構造と判断される。既存の海域ボーリング資料 (水野ほか, 1996; 七山ほか, 1999 など) を利用し、これらの活断層の活動年代を制約することが可能になると期待される。中央構造線活断層帯以南では、ユニット A に達する変形・変位構造は認められていないものの、徳島沖のユニット B 内部反射面に東落ちの撓曲構造が認められる (第 3 図)。この撓曲はユニット A 基底には認められないことから、完新統以前に形成された地質構造であると考えられる。

5. まとめ

紀伊水道沿岸海域において、ブーマーを用いた反射法音波探査を実施し、総測線長約 780 km にわたる海底下浅部地質構造データを取得した。近接する陸域地質体やボーリング資料との比較の結果、海底下の地質体は下位から 3 つの音響ユニット C, B, A に区分され、それぞれ三波川変成岩類や和泉層群などの先第四系基盤岩類、中-上部更新統堆積層、そして完新統 (沖積層の一部) に対比される。特に海域南部において、ユニット A の基底にはチャンネル・台地状の起伏が発達している。これらの側方連続性を詳細に検討することにより、完新統に埋積された古地形・河川システムを復元

できる可能性がある。また、中央構造線活断層帯の分布域においてユニット A 基底及び内部反射面を変位させる活構造が認められたほか、完新統以前の後期第四紀に形成されたと考えられる徳島沖海底下の撓曲構造の存在が明らかとなった。

今後より詳細な断面解釈を進めるとともに、陸域・海域ボーリングによる既存の地下地質情報を活用することにより、堆積層の層序・分布を解明し、海域地質図を作成する。また活構造の連続性や変位の分布、活動年代を制約することにより、紀伊水道における後期第四紀の地質構造発達メカニズムを解明し、災害リスクの評価につなげていきたい。

謝辞: 反射法音波探査の実施にあたり、船長、大和探査技術株式会社の調査員及び株式会社西方建設の作業員の方々には非常にお世話になった。徳島県、兵庫県、和歌山県及び各県の漁業協同組合連合会、漁業協同組合の関係者の皆様には、調査の実施にあたり便宜を図っていただいた。産業技術総合研究所の井上卓彦研究グループ長、中谷是崇研究員には、調査の実施にご協力いただいた。産業技術総合研究所の佐藤智之主任研究員、鈴木克明研究員、東京海洋大学の古山精史朗助教には、調査計画の策定にあたり資料を提供いただいた。井上卓彦研究グループ長と佐藤智之主任研究員には草稿に目を通していただき、多数の有益なご指摘をいただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 地質調査所 (1995) 和歌山市西部地域における中央構造線の調査結果. 地震予知連絡会会報, **53**, 663–668.
- 羽田裕貴・中谷是崇・水野清秀・納谷友規・中島 礼 (2022) 徳島平野沿岸部・沖洲地区におけるボーリング調査. 令和3年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.83, 41–59.
- 地震調査研究推進本部 (2017) 中央構造線断層帯 (金剛山地東縁 – 由布院) の長期評価 (第二版).
- 海上保安庁水路部 (1978) 5万分の1沿岸の海の基本図「友ヶ島水道」(海底地質構造図).
- 海上保安庁水路部 (1993) 5万分の1沿岸の海の基本図「紀伊水道東部」(海底地質構造図).
- 海上保安庁水路部 (1997) 5万分の1沿岸の海の基本図「蒲生田岬」(海底地質構造図).
- 三橋 明・廉澤 宏・吉川宗治・岩崎好規・藤田和夫 (2000) 音波探査による紀伊水道及び紀伊半島南岸沖海域の活構造. 海洋調査技術, **12**, 11–29.
- 水野清秀・吉岡敏和・岡村 真・松岡裕美 (1996) 淡路島南部, 湊一本庄断層の活動性調査, 平成7年度活断層調査研究報告 no. 11. 地質調査所研究資料集, no. 235, 59p.
- 宮田隆夫・牧本 博・寒川 旭・市川浩一郎 (1993) 和歌山及び尾崎地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 68p.
- 七山 太・佃 栄吉・水野清秀・石井久夫・北田奈緒子・竹村恵二 (1999) 中央構造線活断層系, 友ヶ島水道断層の完新世における活動履歴調査. 平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書, 地質調査所速報, no. EQ/99/3, 235–252.
- 西山賢一・瀬部直之・石田啓祐・中尾賢一・辻野泰之・橋本寿夫 (2017) 地形・地質から見た鳴門海峡の成立. 阿波学会紀要, **61**, 1–10.
- 佐藤智之・鈴木克明・古山精史朗 (2020) 伊勢湾沿岸域における反射法音波探査の追加調査, データベース化の概要. 令和元年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, no. 81, 15–23.
- 佐藤智之 (2021) 断面・柱状資料の簡易三次元表示法. 堆積学研究, **79**, 85–94.
- 鈴木克明・有元 純・大塚宏徳・浜橋真理 (2021) 大阪湾西部海域におけるブーマー音源を用いた反射法音波探査. 令和2年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, no. 82, 1–6.
- 八島邦夫 (1992) 沿岸の海の基本図資料等からみた瀬戸内海の海釜地形. 水路部研究報告, **28**, 139–230.
- 吉川宗治・兼沢 宏・三橋 明・岩崎好規 (1996) 音波探査による中央構造線友ヶ島水道海域の地質調査. 海洋調査技術, **8**, 1–10.