

3. 10 菊川断層帯（南部区間）の調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 菊川断層帯（南部区間）の調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所	研究グループ長	宮下由香里

(c) 業務の目的

地震発生確率が不明（Xランク）な主要活断層帯のうち、山口県に分布する菊川断層帯（南部区間）について、地震発生確率を算出するための基礎データを取得することを目的とする。

菊川断層帯は、北部、中部、南部の3区間に分けられており、いずれも海域を含む（図1）。これらのうち、北部と南部区間がXランクに相当する（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2016a）。北部区間は全域が海域である。中部区間は、海域から南東側陸域に連続して断層が分布する。南部区間の南端は陸域の断層部末端とされているが、南東海域延長部には同じ走向の宇部南方沖断層が分布しており、両断層が一連の断層帯を構成する可能性が指摘されている（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2016b）。

本業務では、南部区間及び宇部南方沖断層との間の沿岸海域における断層の分布形状とその活動性について明らかにすることを目的とする。令和元年度は、沿岸海域についてグリーンレーザを用いた海底地形計測を実施した。令和2年度は、沿岸海域の音波探査と採泥、令和3年度は陸域での活動履歴調査を実施する。最終的には、菊川断層帯南部区間の分布（位置及び形状）と断層長、過去の履歴、平均的な変位速度等を取得し、断層帯全体の評価に資することを目的とする。

(d) 年度毎の実施業務の要約

1) 令和元年度：

陸域から海域に連続する活断層帯において、海陸接合部における断層の正確な位置や微細な変動地形等を検出することを目的として、菊川断層帯の沿岸海域部において、浅海底レーザ計測を実施した。取得した計測データの解析により沿岸海域での断層変位地形の把握を試みた。また、海底地形が詳細に把握されている箇所と新規取得データとの接合を試み、新手法の適用性について検討するとともに、海陸の断層トレースと周辺の地質・重力等の分布との関係について検討した。

2) 令和2年度：

菊川断層帯南部区間及び南東延長部の沿岸海域において、総探査長 172 km にわたる音波探査を実施し、断層の位置及び分布を検討した。また、9地点においてピストンコアを用いた採泥を実施した。さらに、採取したコアについて層相の記載及び年代測定試料の採取を行い、活動性について予備的な検討を行った。

3) 令和3年度：

1 箇所以上でボーリング調査、トレンチ調査及び年代測定を実施し、活動履歴及びずれ量を検討するとともに、結果のとりまとめを行う。



図1 菊川断層帯の位置図

断層の位置・区間分けは、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2013, 2016a, b, c）による。基図は国土地理院の地理院地図を使用した。赤枠は2020年度調査範囲を示す。

(2) 令和2年度の成果

(a) 業務の要約

Xランクの活断層帯評価のため、これまで、位置や分布はもとより、断層の存在に関するデータが得られていなかった菊川断層帯南部区間及び南東延長海域において、音波探査を実施した。音波探査の結果を踏まえ、断層構造が推定された地点の両側で海底堆積物を採取した。採取したコアについて記載及び年代測定試料の採取を行い、断層の活動性について予備的な検討を行った。

(b) 業務の実施方法

本業務は、音波探査、海底堆積物採取、採取コアの解析から構成される。以下に、各過程の詳細を記述する。

1) 音波探査

本業務では、断層の有無、分布、完新世の活動、累積的な変形構造等を明らかにすることを目的として音波探査を実施した。音波探査は、断層の極浅部（海底面から15 m程度）の変形構造と最新活動時期を明らかにするためのチャープソナーを音源とするシングルチャンネル音波探査と、断層の浅部（海底面から150 m程度）の地質構造と累積的な変形構造を確認するためのブーマーを音源とする高分解能マルチチャンネル音波探査をそれぞれ実施した。極浅部音波探査装置（チャープソナー）の規格・性能を表1、観測条件を表2に、浅部音波探査装置（ブーマー）の規格・性能を表3、観測条件を表4にそれぞれ示す。

シングルチャンネル音波探査は、EdgeTech社製のSB216S型のチャープソナーを調査船の舷側に固定して、マルチチャンネル音波探査は、Applied Acoustic Engineering社製のCPS-P型のブーマーと12チャンネルのストリーマーを調査船の船尾から曳航して、同時観測を行った（図2及び図3）。

調査船の誘導及び発振位置記録のための船位測量はディファレンシャル方式（DGNSS）を用い、水深測量はシングルビームの音響測深機を用いた。

表1 極浅部音波探査装置（チャープソナー）の規格・性能

名 称		形 式	規 格・性 能
送受振部	曳航体	3100-G SUB-BOTTOM PROFILING SYSTEM (EdgeTech)	曳航体：SB-216S 周波数帯域：2-16kHz 分解能：6cm/2-15kHz, 8cm/2-12kHz,10cm/2-10kHz 発振器：1 受振器：2 出力：2,000W
記録部	船上処理装置	Windows パソコン	

表2 極浅部音波探査（チャープソナー探査）の観測条件

調 査 方 式		チャープソナー方式
送 振 部	送受波器(音源)	SB-216
	発振周波数	2～10kHz
	スイープ長	20ms
	発振間隔	0.2sec
	送受波器の深度	1.5m
測点間隔		125m(約100ショット毎)
船の速度		3～4ノット

表3 浅部音波探査装置（ブーマー）の規格・性能

名称		型式	規格・性能
発振部	送振機	CSP-P (AAE社)	方式：電磁誘導方式 送振出力： 50,100,150,200,300,350ジュール 高圧直流電圧：3.55kV コンデンサー容量：48μF 高圧開閉回路：SCR 使用電源：AC 200-240V, 45-65Hz 消費電源：平均 2.0kVA
	送波器	AA300 (AAE社)	方式：圧電磁誘導モノパルス方式 送振出力：最大 300ジュール 音圧レベル：216dB (200ジュール時)
受振部	ストリーマケーブル	自社製	チャンネル数：最大 16ch (4ch 毎に変更可) チャンネル間隔：2.5m 素子数：5素子(GeoSpace MP-18-200) 感度：42 volt/bar
	増幅器 (プリアンプ)	自社製 (MARK RAND 社製を改造)	チャンネル数：24ch Gain：62dB Filter：40～4,700Hz
デジタル記録部	デジタル変換器	LX110 (ティアック電子計測機)	量子化：16bit, 24bit 入力チャンネル：32ch サンプリング周波数： 102.4kHz 系列(1.28kHz～102.4kHz) 100kHz 系列(1kHz～100kHz) 96kHz 系列(1.5kHz～96kHz) 65.536kHz 系列 (65.536kHz ～1.024kHz)
	収録パソコン	Windows パソコン	CPU：3GHz メモリ：4GB HDD：500GB 書き込みメディア：DVD-RAM
モニター記録	受振機	Model 5210A (GeoAcoustics社)	利得：100 dB フィルタ：20～15,000 Hz(バンドパス) TVG：可 AGC：可
	記録機	Model GSP-1086-2 (EPC社)	記録レンジ：1/32～8sec 記録幅：12.7cm または 25.4 cm 記録方式：感熱方式 記録密度：75,100,150,200 本/in
	発振波形 モニター用 オシロスコープ	TDS 2014B (テクトロニクス)	最高サンプル：1G サンプル/sec 現象数：4 現象 周波数：100MHz

表4 浅部音波探査（ブーマー音波探査）の観測条件

項 目		設 定 値
発振部	音源の種類	ブーマー
	発振エネルギー	200 ジュール
	音源深度	0.4m
	発振間隔	1.25m
受振部	チャンネル数	12
	チャンネル間隔	2.5m
	オフセット距離	5m
	受振器の深度	約 0.1m
	受振器の長さ	約 40m（曳航長は船尾から約 70m）
収録部	サンプル間隔	0.1msec
	収録時間	約 0.5sec
	収録媒体	HDD など
	収録フォーマット	SEG-Y
記録部 モニター	受振周波数	500～2,000Hz
	記録掃引時間	0.2sec
	記録深度範囲	150m
	記録方式	感熱
	記録密度	100Line/in
	有効記録幅	254 mm（10in）
調査船の速度		3～4 ノット

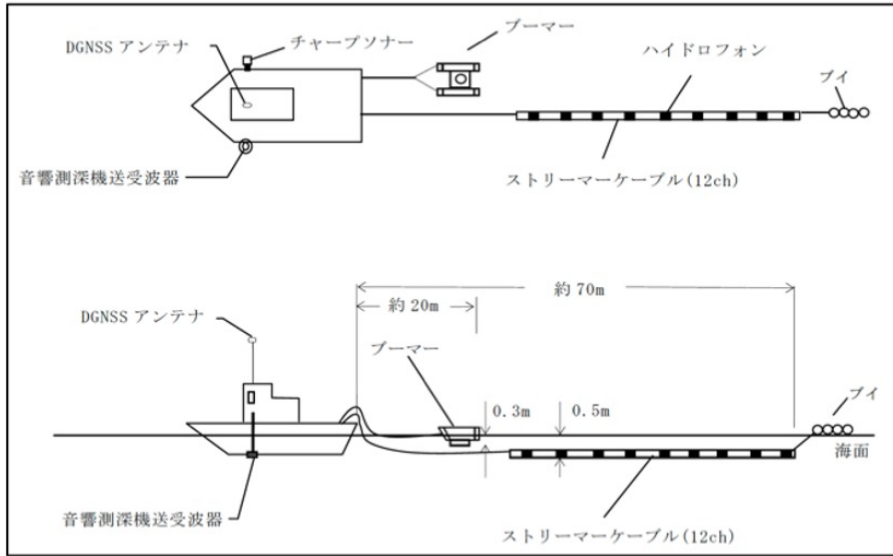


図2 音波探査全体概念図

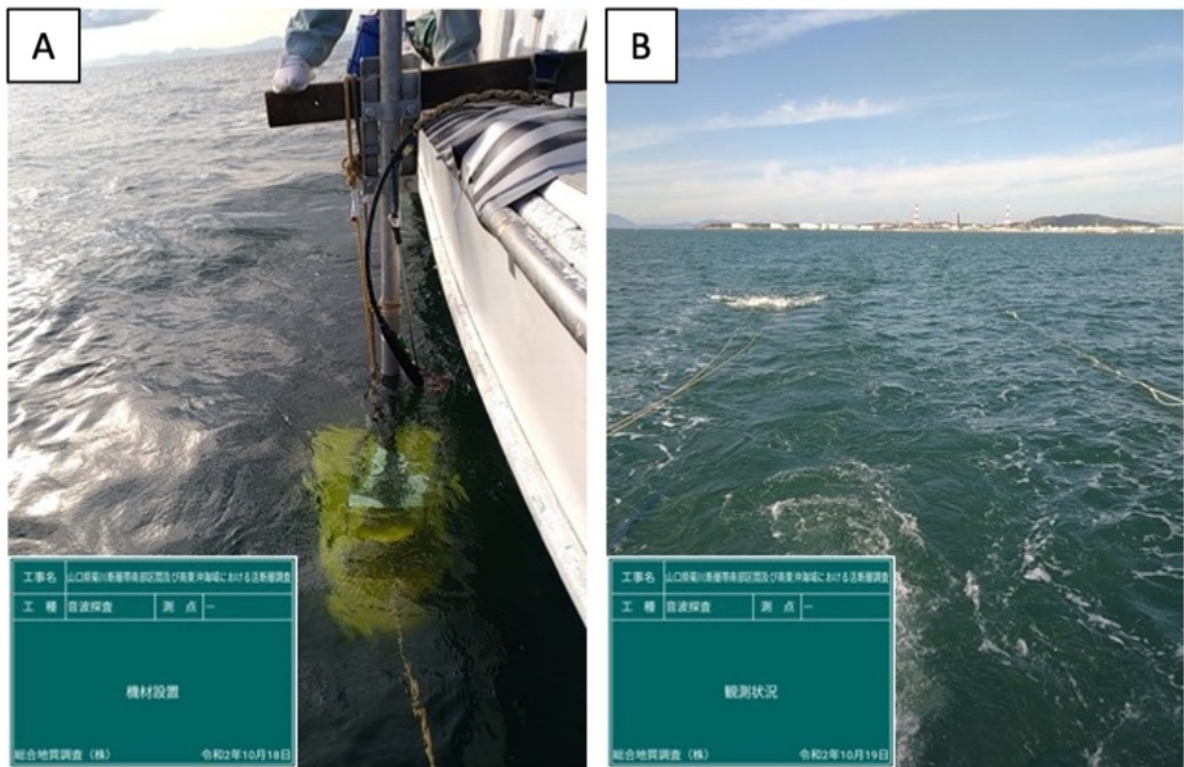


図3 チャープソナー送受波器の設置状況（A）とブーマー発振器及び受振器の曳航状況（B）

音波探査の測線は、菊川断層帯南部区間と宇部南方沖断層の間の区間では、はじめに、菊川断層帯の一般走向とほぼ直交するNE-SW方向を中心として15測線を配置した（図4）。これらのうち、小野田港や宇部港付近では、漁具の配置等を考慮した上で、可能な限り測線を長く取るように設定した。15測線のうち、間隔が広がった場所や、変形の可能性がある地質構造が認められた場所では、追加で測線を配置した（測線3.5, 3.7, 6.5, 8.5）。

また、各探査測線の反射断面に認められる反射面の対比が可能となるよう、全ての探査測線と直交する測線（測線101）を設定した。宇部空港から床波沖では、小郡断層が海域に延びる可能性があり、この場合、菊川断層帯延長部との関係が問題となることから、測線101と平行に測線102～106の5測線を配置した。陸側は、調査船が航行可能な限り陸に近づけるよう配慮した。

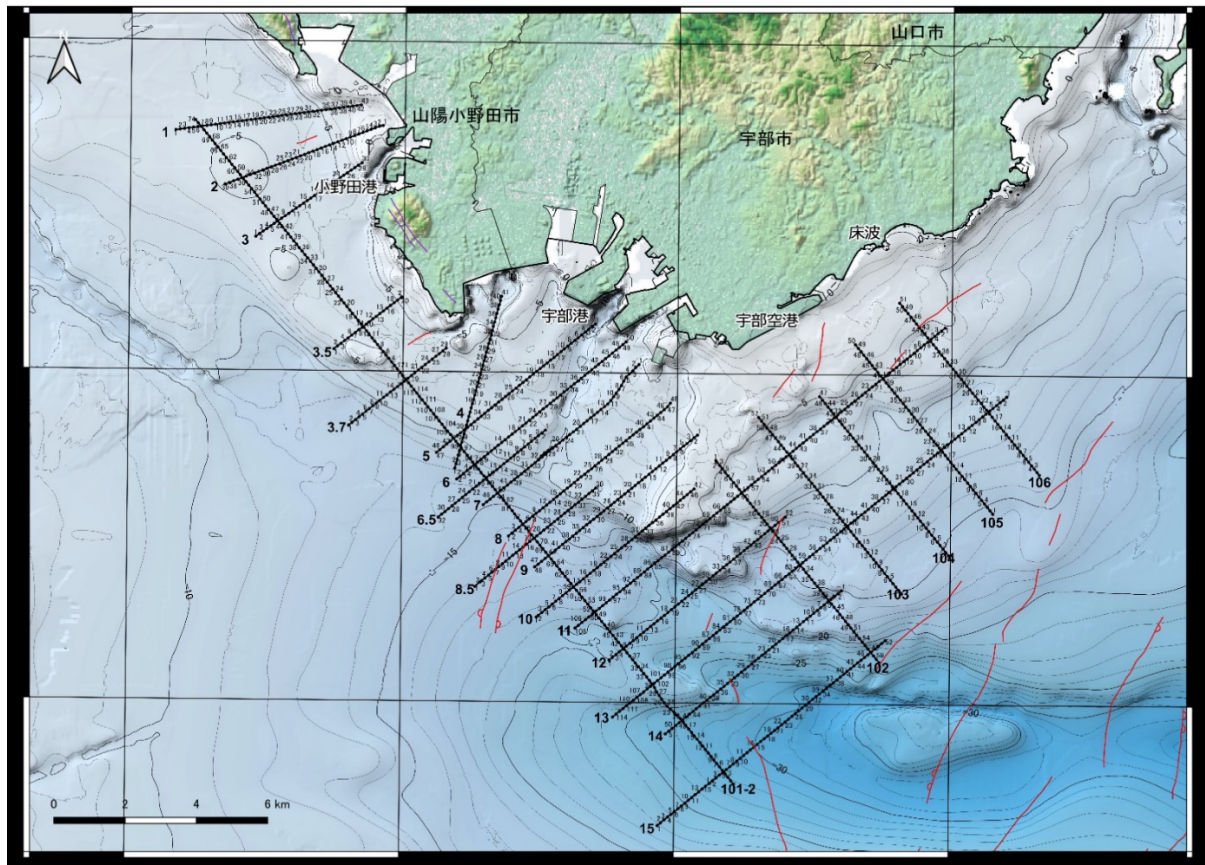


図4 音波探査測線配置図

海域における既知の活断層を赤線で、陸域の菊川断層帯南部区間を紫色の線で示した。

観測で得られた極浅部音波探査（チャープソナー）及び浅部音波探査（ブーマー音波探査）のデジタルデータについて、データ処理を行い、音波探査記録断面図を作成した。データ処理は、極浅部音波探査については振幅調整等を、浅部音波探査についてはフィルタ処理やCMP重合処理等を行った。なお、浅部音波探査（ブーマー音波探査）については通常処理（重合処理）及びマイグレーション処理記録断面図を作成した。

2) 海底堆積物採取

音波探査で得られたモニター記録（チャープソナー探査記録及びブーマー探査のニア・チャンネル記録）を基に、断層分布の検討を行い、海底堆積物採取候補地の選定を行った。

本調査海域の海底堆積物は、少なくとも表層ではシルト主体であること（井内，1982）と、また、本海域の東部にあたる周防灘断層帯の調査結果（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2016c）により、本海域においても完新統が分布することが予想されることから、

泥質堆積物採取に有効なピストンコアを用いることとした。

ピストン式柱状採泥器による採泥は、採泥器が海底から約2～5mの高さに達したとき自由落下して海底の地層に貫入する方法である。この際、ワイヤロープの先端に取り付けられたピストンが海底面と同じ位置に固定されたまま、採泥管のみが海底の地層に貫入する。ピストンは、採泥管に真空部を作り試料が入りやすくすると同時に、引き上げ時に試料の抜け落ちを防止する機構となっている。ピストン式柱状採泥器の規格を表5に、概要を図5に、調査の様子を図6にそれぞれ示す。

本調査では、4mまたは2mのポリカーボネート製インナーチューブを複数接続し、最大8m（4m×2本）のインナーチューブとして使用した。採取した試料は船上に引き上げた後、インナーチューブに入った状態で壁などに直立させて固縛し、試料長、外観などを採泥野帳に記載した。また、アウターチューブに付着した泥を確認し、採泥管先端からの長さを貫入長として記録した。採取した試料は、後述する試料観察に供するため、現地調査終了後1m毎に分割し、振動等による攪乱を防ぐために十分な対策（緩衝材を巻き、固縛する等）を行った上で実験室まで運搬した。

なお、海底堆積物採取候補地点の選定に先立ち、海上保安庁をはじめとする関係機関への届出と危険物の有無を確認するための磁気探査を行った。

表5 ピストン式柱状採泥器の規格

名 称		規 格
採 泥 器 本 体	ウエイト部	重 錘 外径φ260mm×長さ0.9m 重量600kg（鉛製）
	採泥管	アウターチューブ 外径φ89.1mm×内径φ81.1mm×長さ4.0m （ステンレス製） 2本連結使用
		インナーチューブ 外径φ80.0mm×内径φ75.0mm×長さ4.0m （ポリカーボネート製） 2本連結使用
	ピストン	外径φ74mm×長さ200mm オリング付重量8kg （強化プラスチック製）
	先端部	シュー 外径φ94mm×内径φ90mm×長さ200mm （ステンレス製）
		コアキャッチャー 外径φ80mm×内径φ75mm 星式 （真鍮製）
	総重量	約700kg
離脱装置	トリガーアーム	撥上げ式 重量7kg
	トリガー用重錘	重量20kg

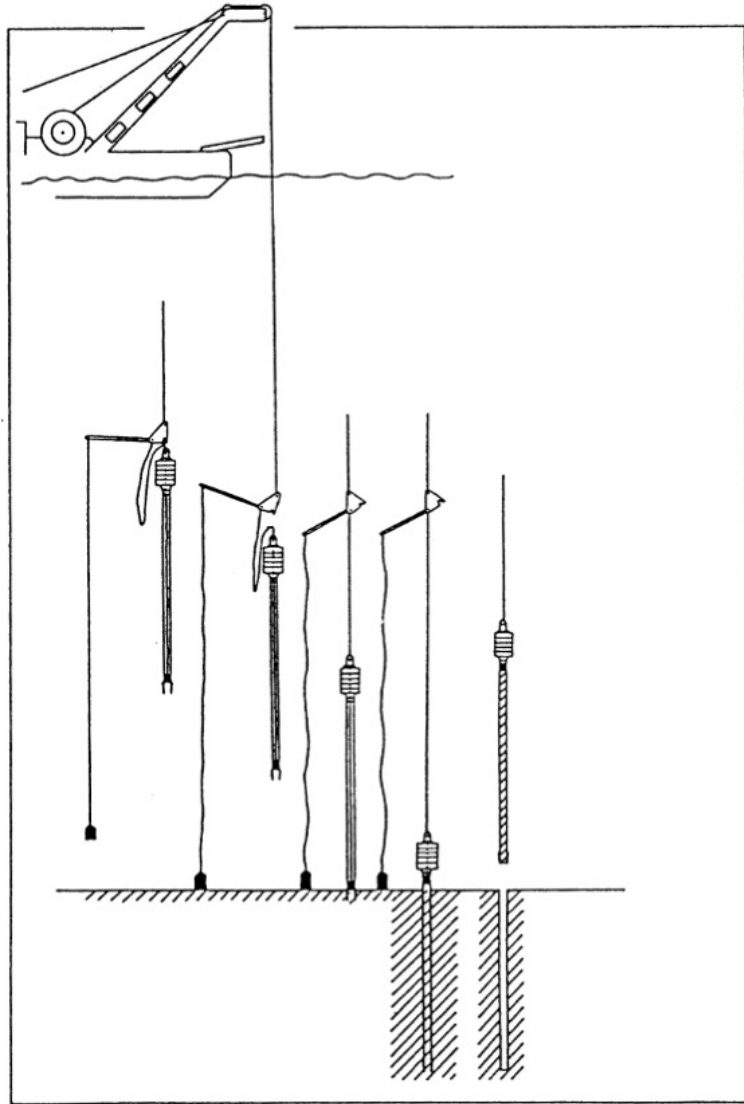


図5 ピストン式柱状採泥概要図



図6 ピストン式採泥調査の写真

A：採泥調査に使用したクレーン台船、B：採泥調査の様子、C：採泥調査の様子、D：採取したコアは立てかけて保存し、上澄みとして出てきた水は廃棄した。

3) 採取コアの解析

採取した試料について、X線CT撮影、コア半割、コア観察及び記載、写真撮影、柱状図作成を行った。また、放射性炭素年代測定及び化学分析用の試料を採取した。

(c) 業務の成果

1) 音波探査の結果

(2)(b)1)項で記述した手順に従って音波探査を実施した。本業務における音波探査測線は計25測線、総測線長は172kmである(いずれも重複分を含まない)。調査時にモニター記録を基に断層の分布状況を検討し、断層が延長すると考えられる場所や海底堆積物採取の適地と考えられる場所については、測線の追加・変更を行った。また、漁船等によるノイズの影響を受け、記録が不鮮明な測線に関しては再測定を行った。なお、極浅部音波探査(チャープソナー)では送受振機を調査船に固定したのに対して、浅部音波探査(ブーマー音波探査)では音源及びストリーマーケーブルを調査船から曳航したため、測点の位置は浅部音波探査の方が調査船の進行方向に対して約25 m後方に位置する。

音波探査により取得したデータに各種処理を行って作成した断面図のうち、調査海域の西側(菊川断層帯南部区間と宇部南方沖断層の間の区間)における代表的なものを、図7~10に示す。すべての図において、横軸は測点番号、縦軸は往復走時を示す。図7~9において、基盤岩(古第三系宇部層群?)を最も明瞭に変位させる箇所を太い赤矢印で示した。この範囲が、主要な断層帯である。測線5~7においては、横ずれ断層運動によって形成されたと考えられる、明瞭な向斜状の地質構造が認められる(図7)。この向斜状構造は、さらに南側に連続する(図8)。図9には、浅部及び極浅部音波探査記録を並べて示した。極浅部音波探査記録断面を見ると、測線8では、幅約400 mの間に、複数条の断層が認められ、これらは全体として上方に開いた花卉構造を呈している(図13の枠で囲んだ範囲)。測線8.5にも、この構造は連続する。次に、調査海域のうち、東側(宇部空港から床波沖)における代表的な記録断面を図10に示す。測線104、103、102において、基盤岩上面には、著しい南東側低下を示す明瞭な断層構造が認められる。北西側の基盤岩中には、複数の断層構造が認められる。低下側には、堆積物が連続的に分布している。

以上に示したように、記録断面から読み取った断層構造を探査測線図上にプロットした(図11)。調査海域のうち西側の海域で認められた断層構造は、陸域の菊川断層帯南部区間の延長部に位置する。

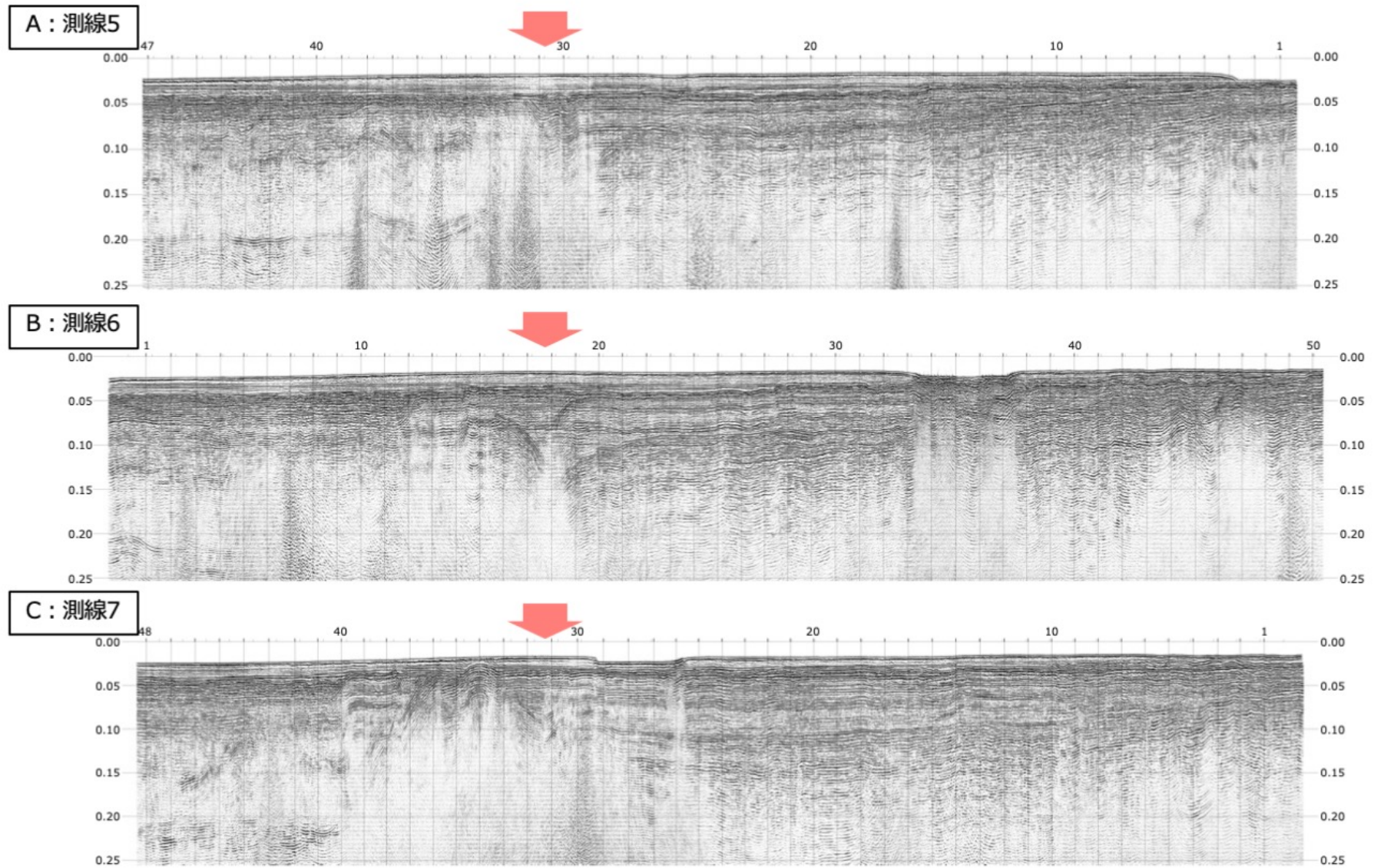


図7 浅部音波探査（ブーマー音波探査）記録

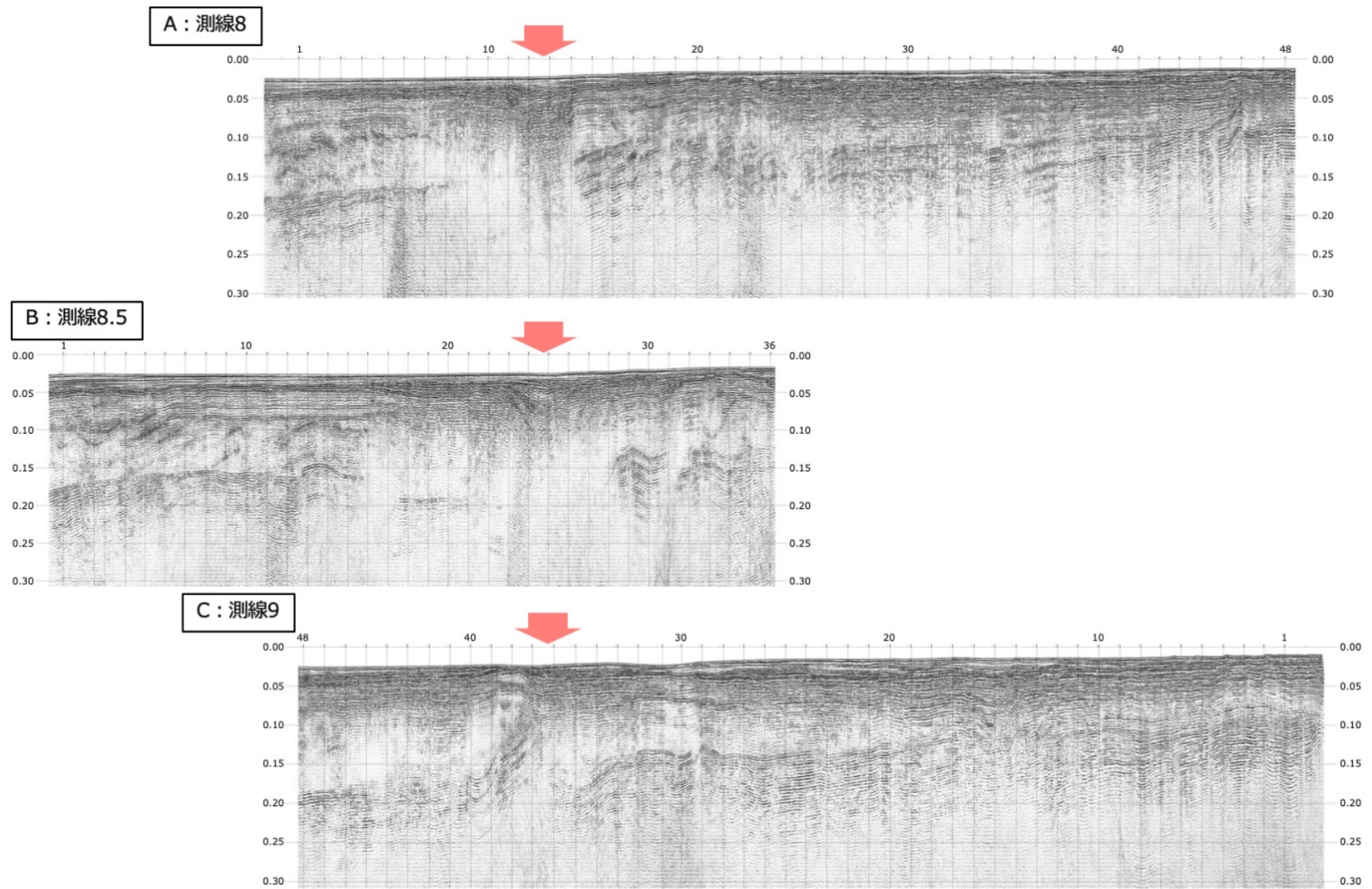


図8 浅部音波探査（ブーマー音波探査）記録

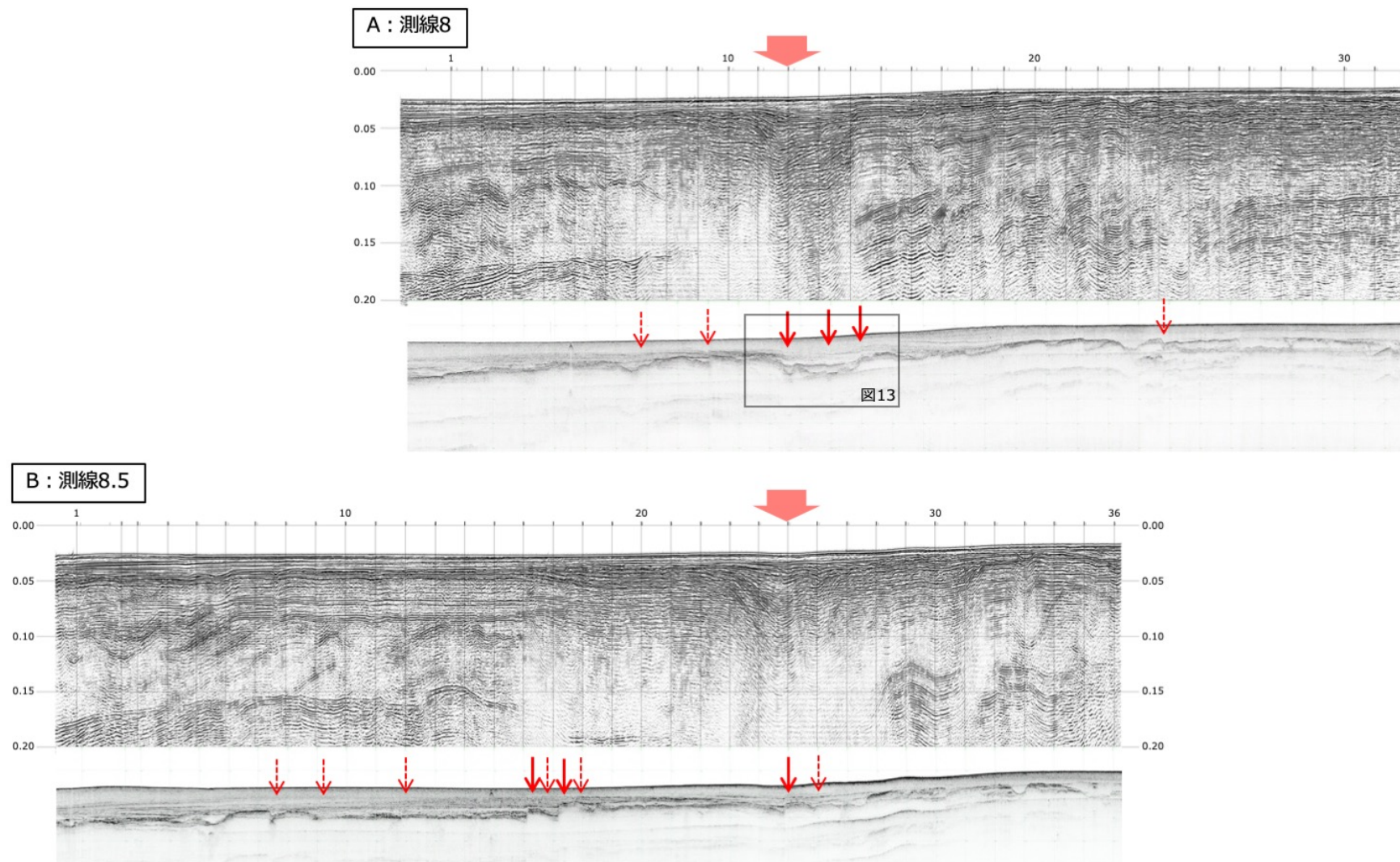


図9 測線8 (A) 及び測線8.5 (B)の浅部 (上) 及び極浅部 (下) 音波探査記録赤矢印は断層、赤破線矢印は推定断層を示す。

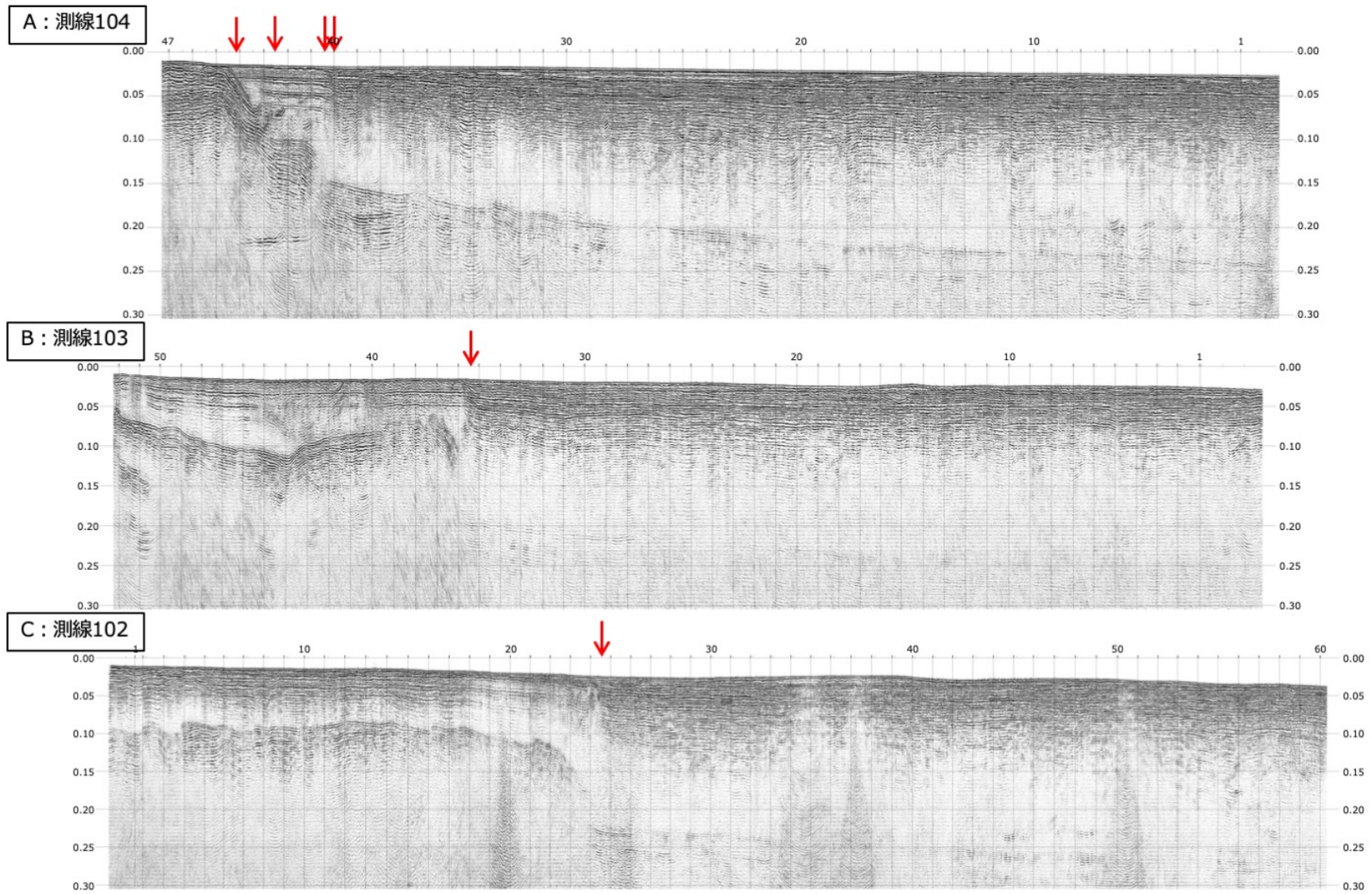


図10 浅部音波探査（ブーマー音波探査）記録 赤矢印は断層を示す。

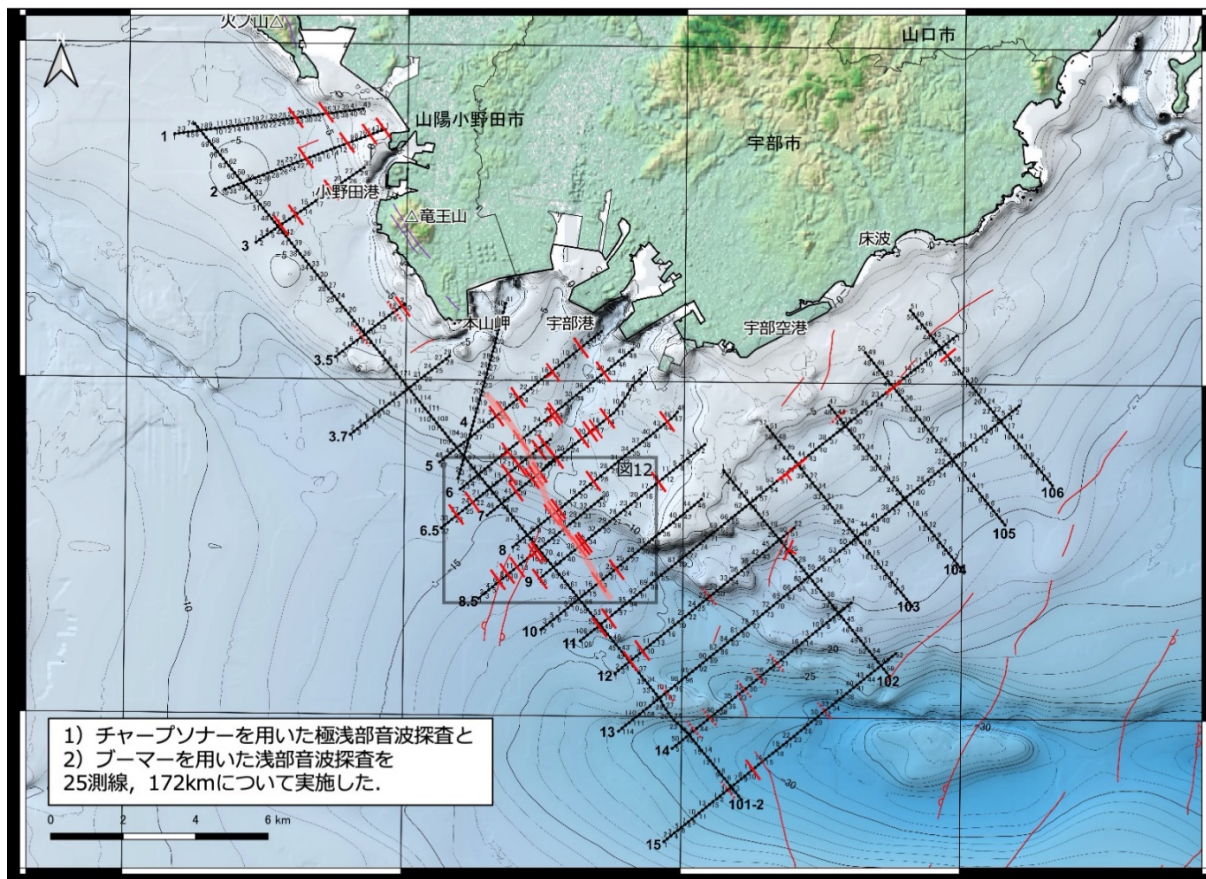


図11 音波探査測線上の断層分布

測線上の赤線は音波探査記録から断層を推定した箇所を示す。断層は複数条認められる。これらの中で主要な断層帯を太い赤線で示す。

2) 海底堆積物採取の結果

(2) (b) 2) 項で記述したとおり、音波探査で得られたモニター記録を基に、断層分布の検討を行い、海底堆積物採取候補地の選定を行った。図12に海底堆積物採取地点の位置図を示す。候補地点は12地点を選定したが、実際に採取したコアの層相、コアの採取深度、コア採取率等を踏まえ、実績としては、9地点15本のコアを採取した(図6)。これらのうち、とくにコア採取率の低かったSt. 9-2とSt. 10は廃棄した。観察対象とした13本のコアの合計長は、63.2 mである。

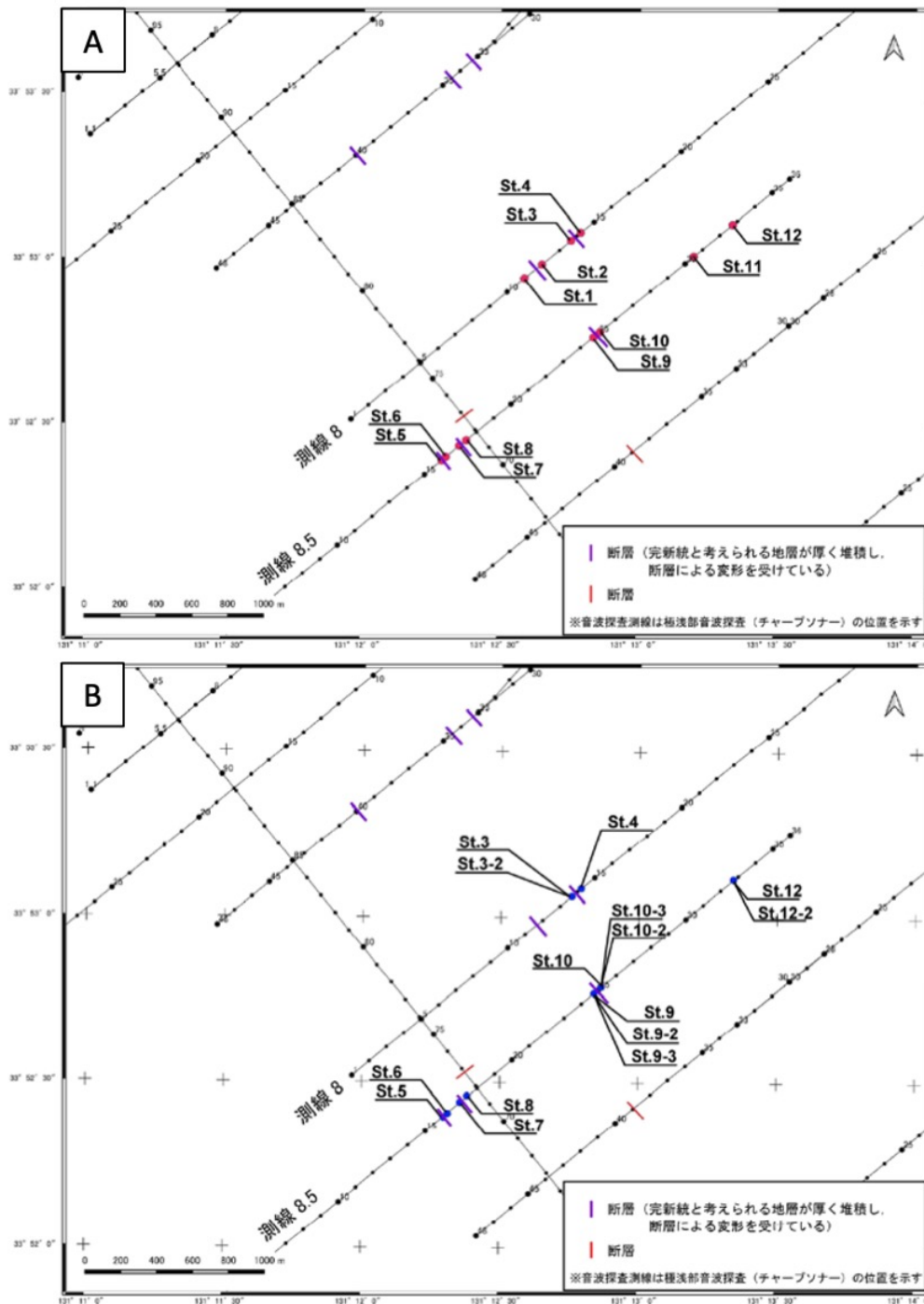


図12 海底堆積物採取地点位置図. A: 計画, B: 実績

St. 1～St. 4は、測線 8 上の主要な断層帯（図9A）をカバーするように配置した（図13）。前述したように、ここでは、幅約400 mの間に、完新統と推定される地層を変位・変形させる複数条の断層からなる断層帯が認められる（図13）。図14にこの断層帯の北東側の拡大図を示す。ここで、基盤岩の上位に分布する完新統中に認められる反射面を、上位よりA～Eに区分した。図14Bに図示した4条の断層のうち、最も北東側に分布する断層と、断層の両側での各反射面のずれ量に着目すると、上位の反射面Bのずれ量が最も小さく、反射面C≒反射面D、反射面Eの順で大きくなっていることが分かる。このことは、断層の両側の地層のずれ量の累積性を示していると判断した。また、図14B中に図示した真ん中の断層は反射面Eを変位させていないように見える。

以上をまとめると、測線 8 の反射断面の観察からは、1) 反射面Eを構成する地層の堆積以前、2) 反射面Eを構成する地層の堆積以降、反射面Dを構成する地層の堆積以前、3) 反射面Cを構成する地層の堆積以降、反射面Bを構成する地層の堆積以前、4) 反射面Bを構成する地層の堆積以降、反射面Aを構成する地層の堆積以前の4回の断層活動イベントが推定される。図14Bには、採取したコアの柱状図を併せて示した。今後は、各コアの対比と年代測定を実施することにより、複数回の断層活動イベントの時期が明らかになることが期待される。

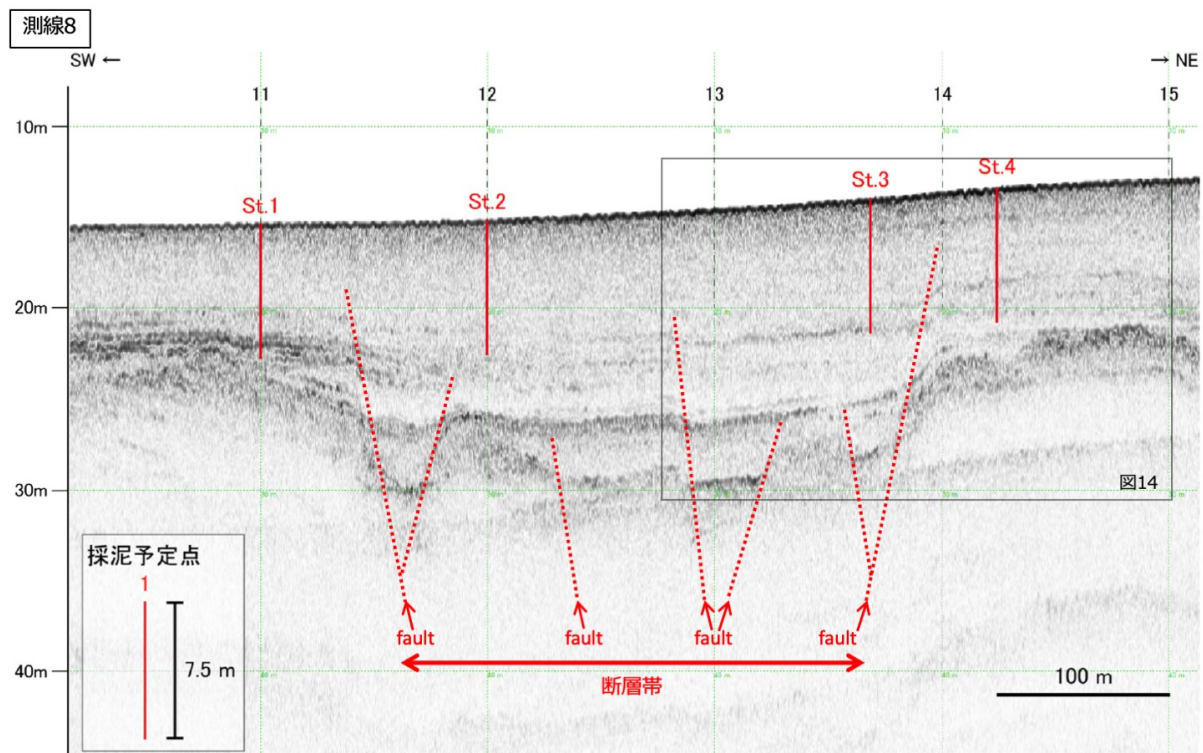


図13 測線 8 の極浅部音波探査記録

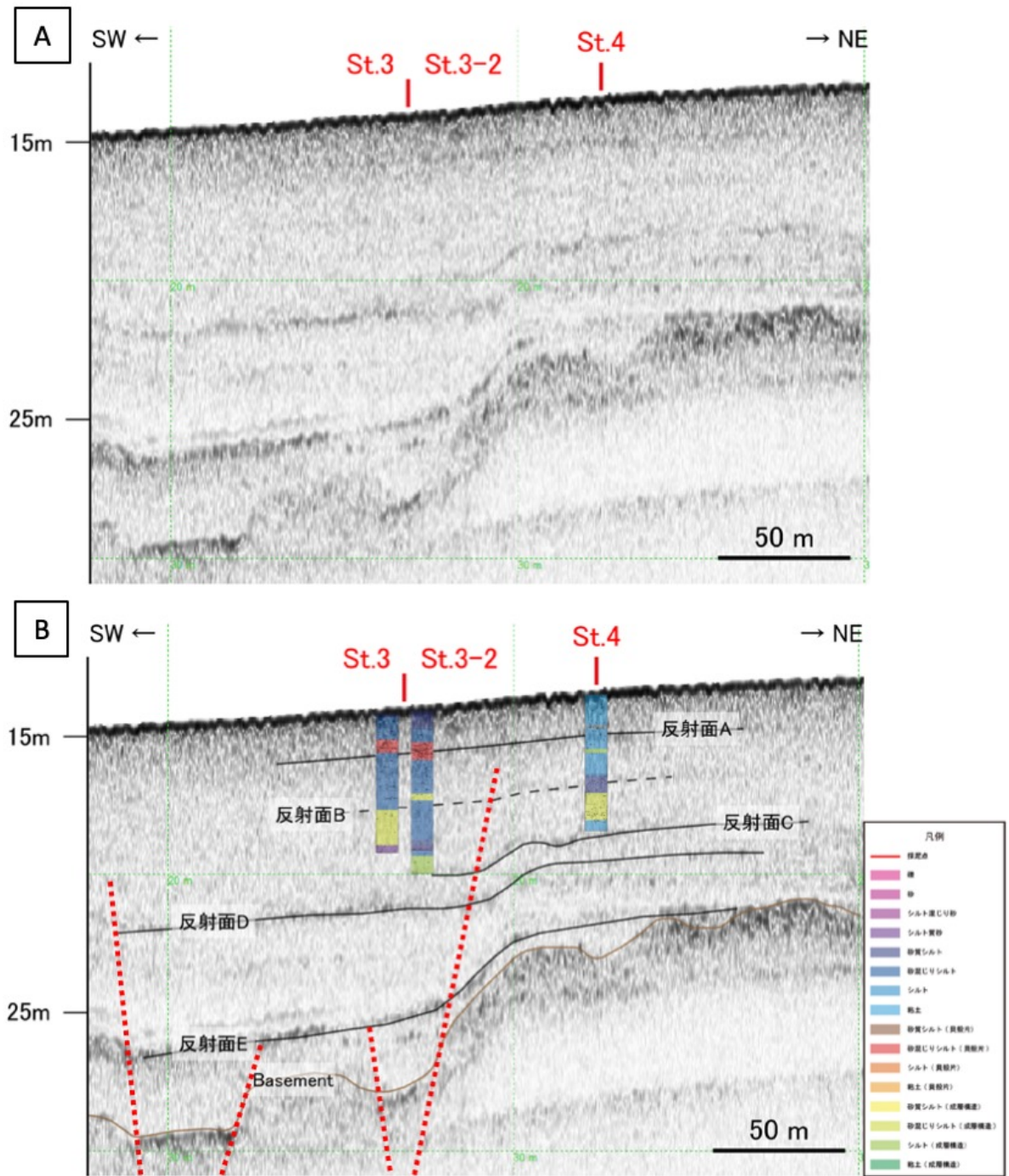


図14 測線8の極浅部音波探査記録(拡大)
 A: 記録断面, B: 解釈断面にコア柱状図を重ねた.

St. 5～St. 12は、測線8.5上の主要な断層帯（図9B）と同測線の記録断面に認められる主要な反射面をカバーするように配置した（図15）。ここで、基盤岩の上位に分布する完新統中に認められる反射面を、上位より a～g に区分した（図15B）。測線8.5上の主要な断層帯では、幅約150 mの間に、完新統と推定される地層を変位・変形させる複数条の断層からなる断層帯が認められる（図15）。図16にこの断層帯の拡大図を示す。図16に図示した4条の断層のうち、最も北東側に分布する断層と最も南西側に位置する断層、及びそれぞれの断層の両側での各反射面のずれ量に着目すると、上位の反射面 e のずれ量が最も小さく、反射面 f、反射面 g の順で大きくなっていることが分かる。このことは、下位の地層ほどずれ量が大きく、変位の累積性を示していると判断した。また、図17に同測線上で東に1 km離れた地点に分布する断層の拡大図を示す。この地点では、断層と断層の両側における各反射面のずれ量を見ると、反射面 c、d、e のずれ量が最も小さく、反射面 f、基盤上面の順で大きくなっており、変位の累積性が認められる。

以上をまとめると、測線8.5の反射断面の観察からは、1) 反射面 g を構成する地層の堆積以前、2) 反射面 g を構成する地層の堆積以降、反射面 f を構成する地層の堆積以前、3) 反射面 f を構成する地層の堆積以降、反射面 e を構成する地層の堆積以前、4) 反射面 c を構成する地層の堆積以降、反射面 b を構成する地層の堆積以前の4回の断層活動イベントが推定される。図16～18には、採取したコアの柱状図を併せて示した。今後は、各コアの対比と年代測定を実施することにより、複数回の断層活動イベントの時期が明らかになることが期待される。

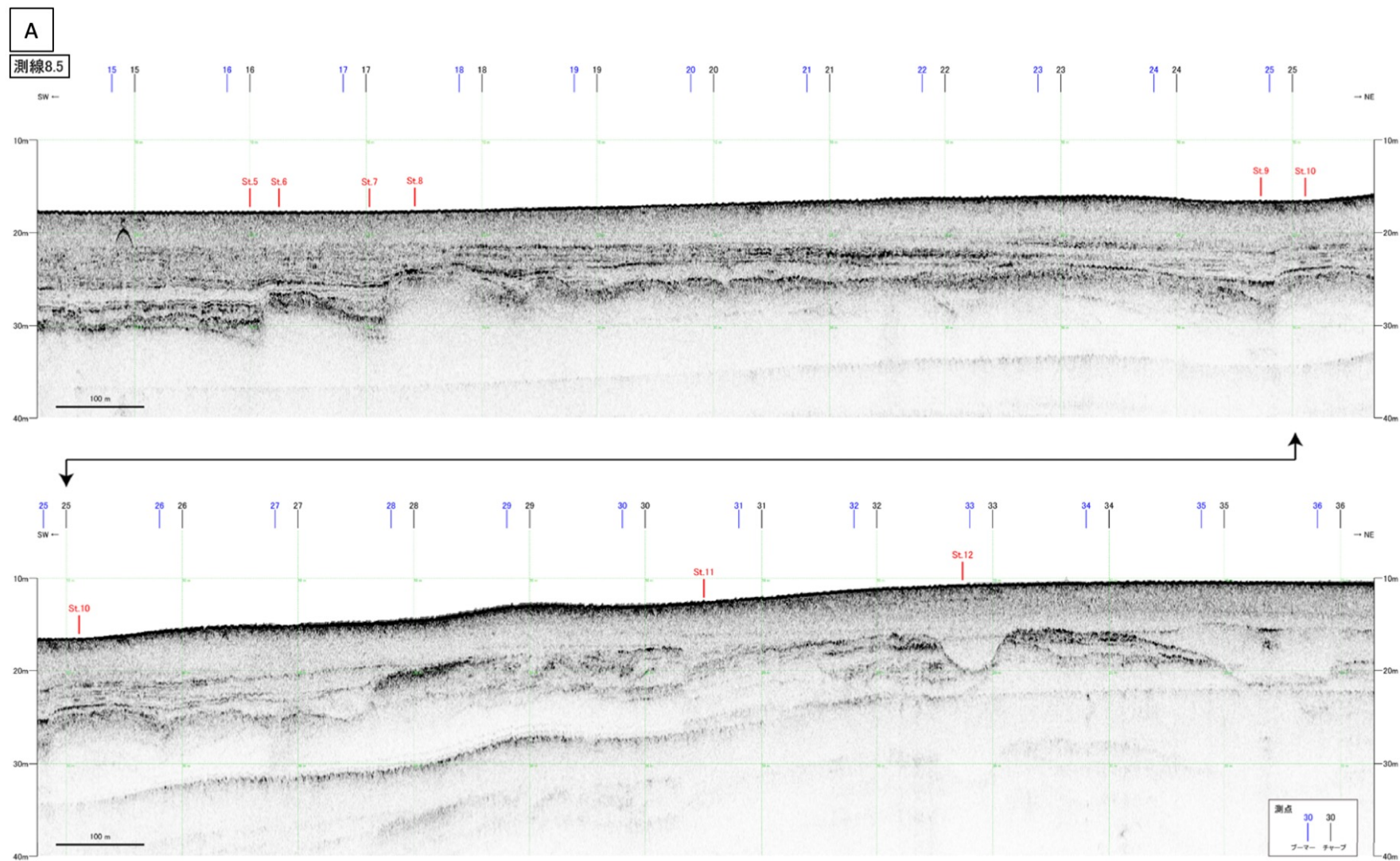


図 15 測線 8.5 の極浅部音波探査記録 (A) と音響層序区分 (B)
 図中に採泥調査地点 (計画) を示した.

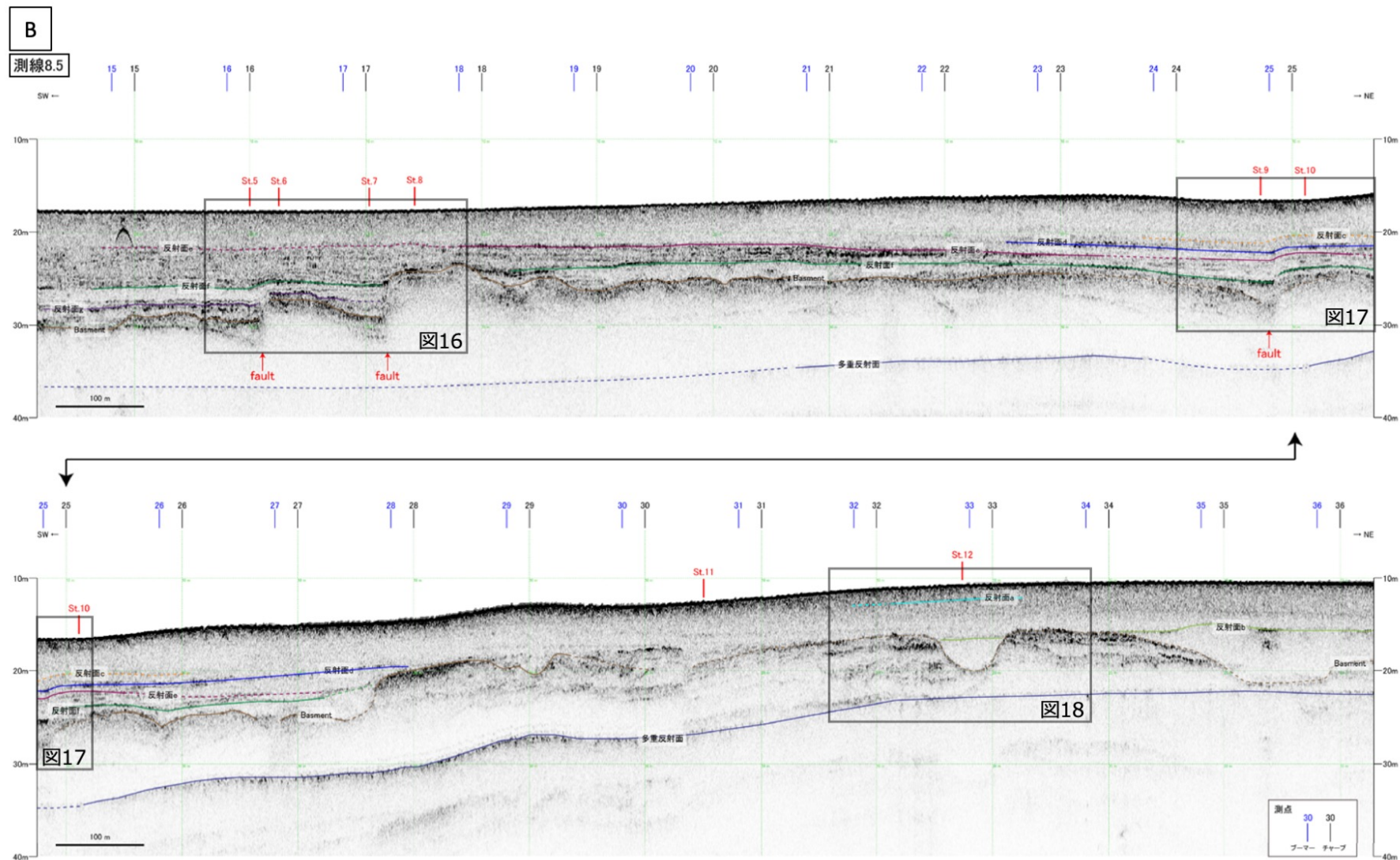


図 15 つづき

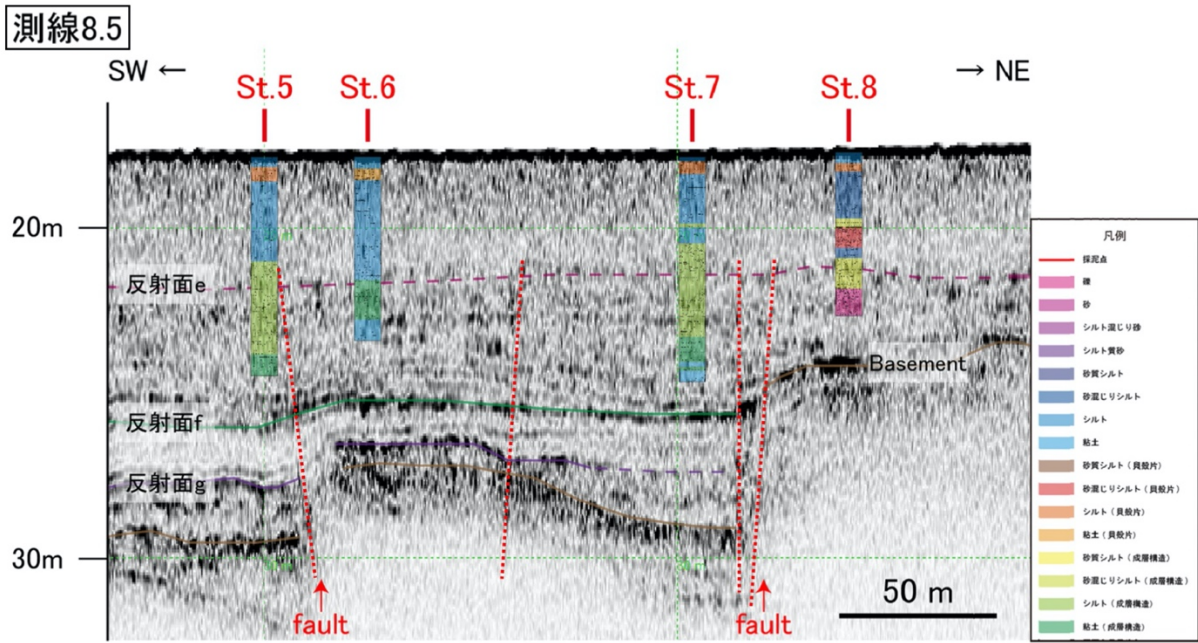


図 16 測線 8.5 の極浅部音波探査記録 (拡大) と採取コア柱状図 (St. 5~8)

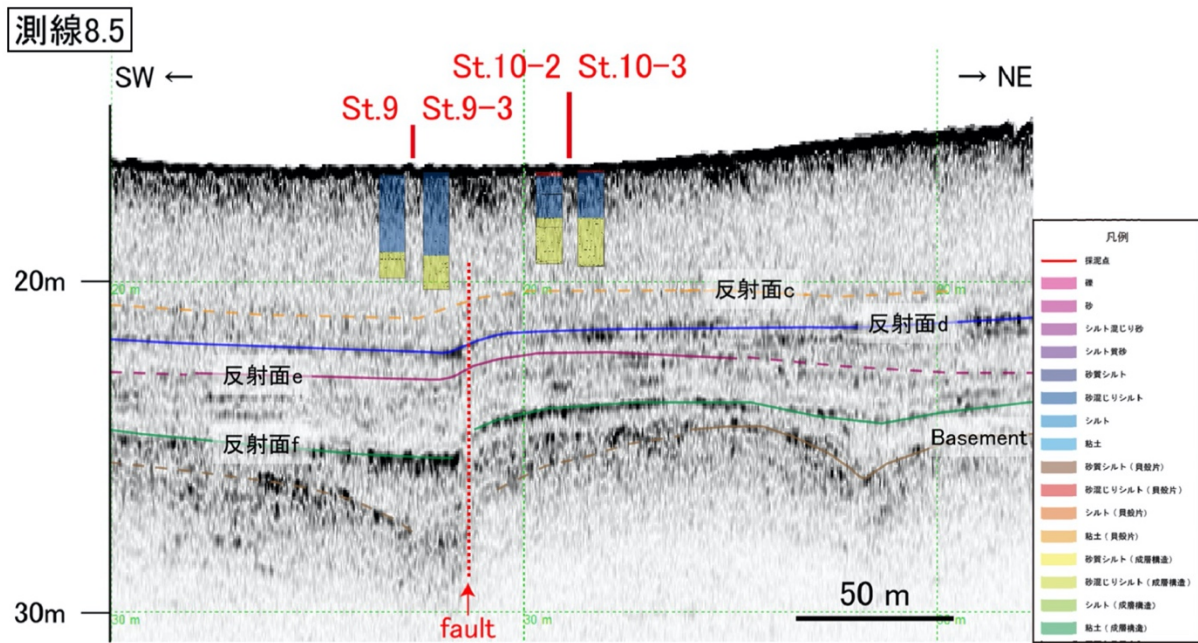


図 17 測線 8.5 の極浅部音波探査記録 (拡大) と採取コア柱状図 (St. 9, 9-3, 10-2, 10-3)

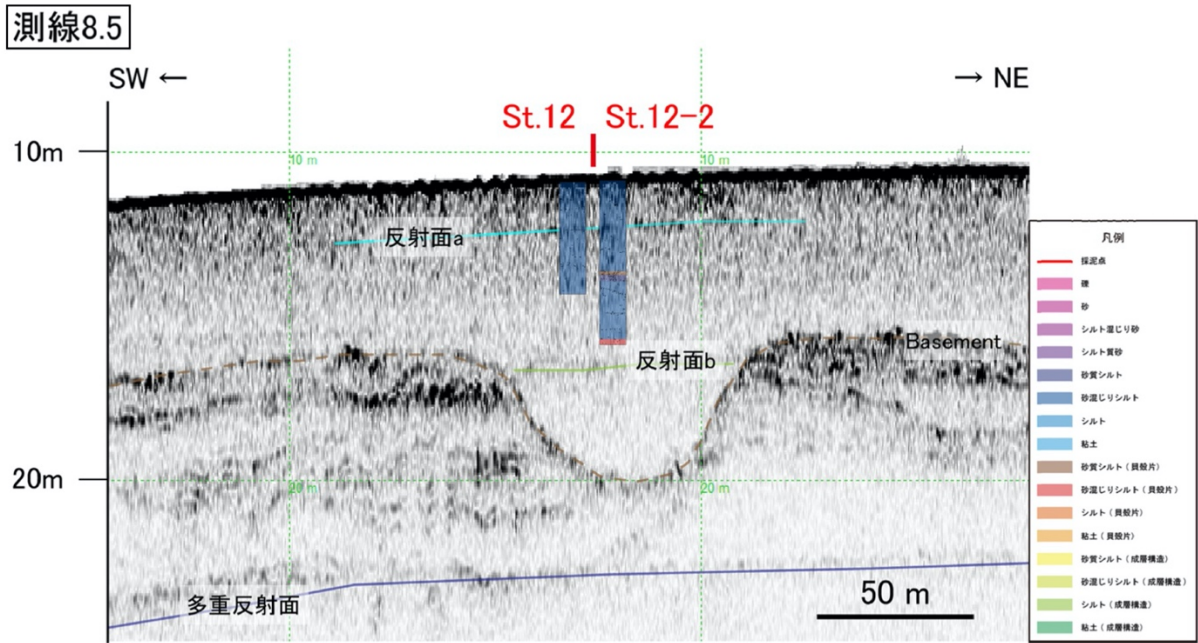


図 18 測線 8.5 の極浅部音波探査記録 (拡大) と採取コア柱状図 (St. 12, 12-2)

3) 採取コアの解析結果

採取したコアは、産総研第七事業所に搬入し、X線CT撮影、コア半割、コア観察及び記載、写真撮影、柱状図作成を行った（図19～21）。また、放射性炭素年代測定及び化学分析用の試料を採取した。

前項で述べたように、測線8及び8.5の反射断面の解析から、完新統と考えられる地層中に4回の断層活動イベントが推定された。採取した海底堆積物コアは、測線8では、反射面A～Cを、測線8.5では、反射面a～eを捉えている可能性がある。今後は、コアの対比と年代測定を進め、各コアと反射面との対比を行うことにより、複数回の断層活動イベントの時期が明らかになることが期待される。

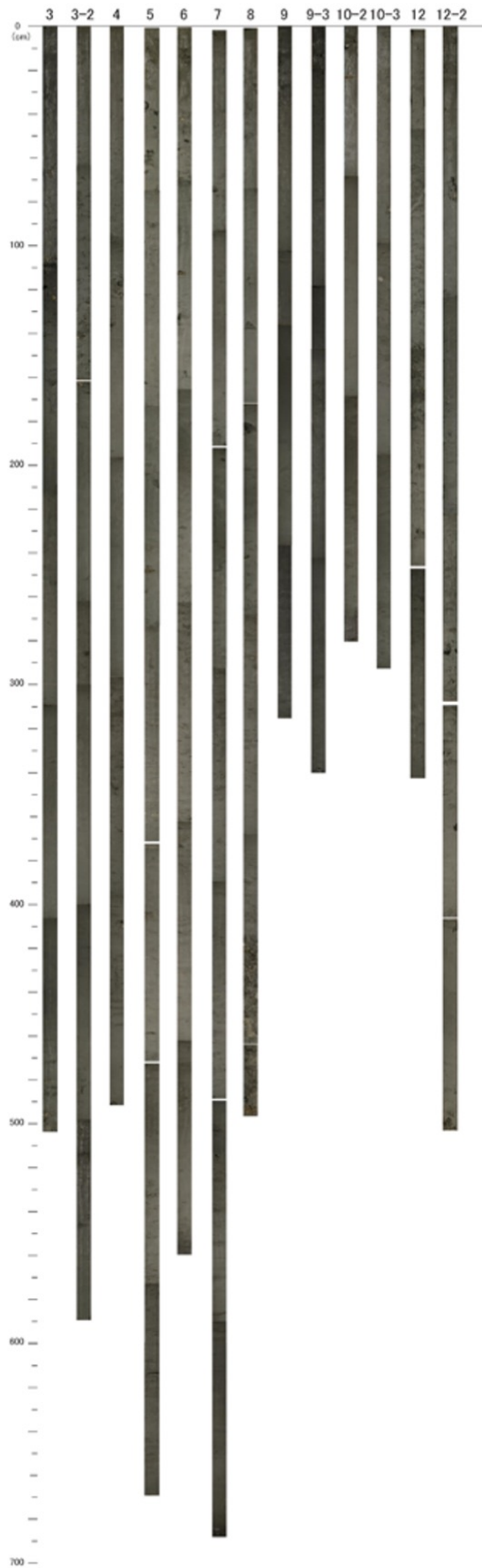


図 19 採取したコアの写真

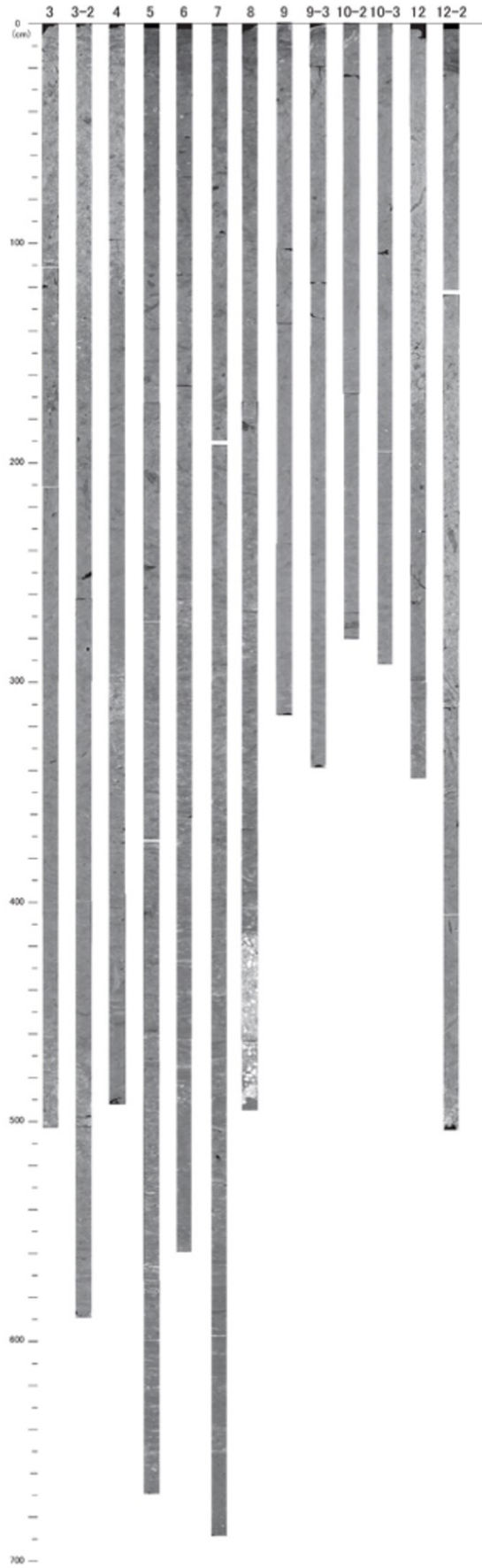


図 20 採取したコアの CT 画像

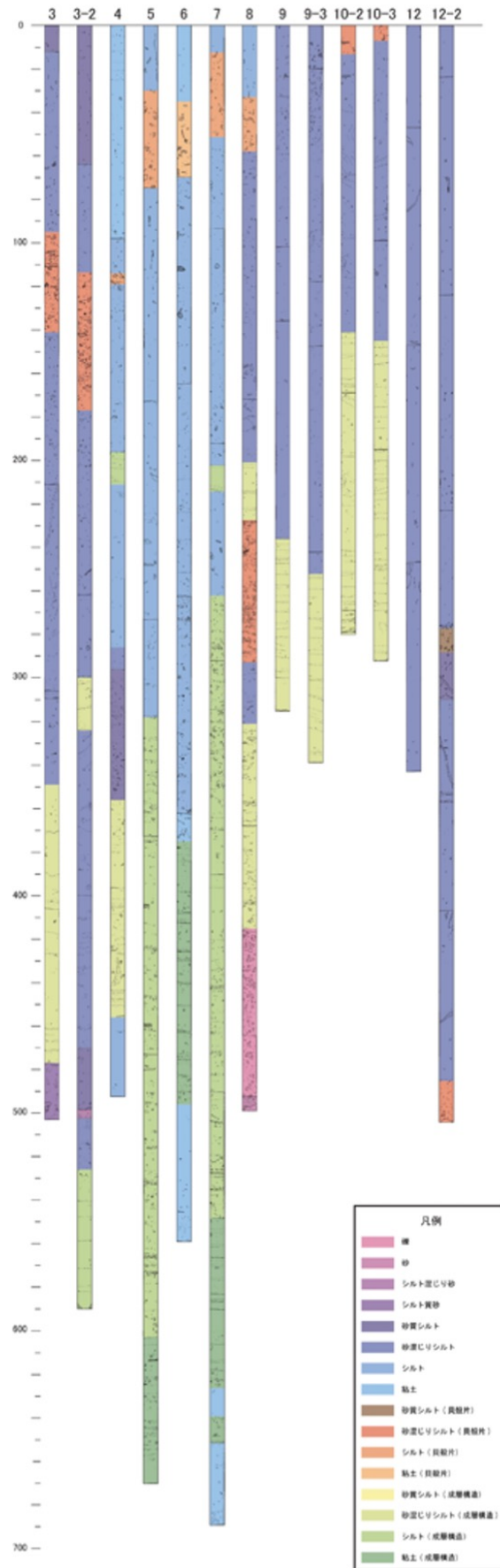


図 21 採取したコアの地質柱状図

4) まとめ

極浅部及び浅部音波探査を実施した。その結果、陸域の菊川断層帯南部区間の延長海域に、連続的に活断層の分布が認められた。反射断面の解析の結果、完新統と推定される地層中に4回の断層活動イベントが認定された。これらの断層の両側で、また、主要な反射面をカバーするように海底堆積物を採取した。その結果、複数回の断層活動イベントを捉えられる深度までのコアが得られた。採取したコアについて、X線CT撮影、コア半割、コア観察及び記載、写真撮影、柱状図作成を行った。今後は、コアの対比と年代測定を進める予定である。

(d) 結論ならびに今後の課題

菊川断層帯南部区間及び南東延長部の沿岸海域において、総探査長 172 km にわたる音波探査を実施し、断層の有無、分布について検討した。その結果、菊川断層帯南部区間内（小野田港）及び南東延長海域において、完新統を変位・変形させる断層が連続的に分布することが明らかとなった。反射断面の解析の結果、完新統中に4回の断層活動イベントを認定した。断層の両側及び主要な反射面をカバーするように、9地点においてピストンコアを用いた海底堆積物採取を実施した。採取したコアは、複数の反射面を捉えている。採取したコアについて層相の記載及び年代測定試料の採取を行い、活動性について予備的な検討を行った。今後は、コアの対比と年代測定を進め、各コアと反射面との対比を行うことにより、複数回の断層活動イベントの時期を明らかにすることが課題である。

(e) 引用文献

井内美郎, 瀬戸内海における表層堆積物分布, 地質学雑誌, 88, 665-681, 1982.
地震調査研究推進本部地震調査委員会, 九州地域の活断層の長期評価(第一版), 81p, 2013.
地震調査研究推進本部地震調査委員会, 菊川断層帯の長期評価(一部改訂), 28p. 2016a.
地震調査研究推進本部地震調査委員会, 宇部南方沖断層の長期評価, 5p. 2016b.
地震調査研究推進本部地震調査委員会, 周防灘断層帯(周防灘断層群・宇部沖断層群)の長期評価(一部改訂), 28p. 2016c.