

— 原著論文 —

相模湾西部・初島沖の浅部海底下構造

三澤 文慶^{1*}, 木下 正高², 山下 幹也², 佐柳 敬造³, 三澤 良文⁴

相模湾は、フィリピン海プレートの沈み込み境界であり、伊豆弧の衝突域に隣接するため、非常に複雑なテクトニクスを持つ地域である。特に相模湾西部・初島沖は、比高約1000 mの海底崖の東麓に化学合成生物群集が分布している。本論文では、2005年5月および2006年1月に海洋研究開発機構の海洋調査船「かいよう」によるKY05-06航海およびKY06-01航海で実施された初島沖相模トラフの反射法地震探査の結果から、相模トラフ、特に初島沖化学合成生物群集周辺の地質構造を明らかにした。今回の探査では、初島沖で最大往復走時1.5秒までの海底下構造を捉えることができた。その結果より、初島沖相模トラフは3層の堆積層とその下位の伊豆半島の白浜層群に対比される音響基盤層に区分した。音響基盤層の白浜層群が2 Maまでに形成された地層であることから、本地域のトラフ充填堆積層は2 Ma以降に堆積したことになる。このトラフ充填堆積層中で、流体・ガスの存在を示す2つの逆位相反射面の存在が認められた（Horizon AおよびB）。また、トラフ充填堆積層中で連続的な変形構造の存在が認められた。この変形は、基盤層深部に分布する断層の伏在、もしくはマグマの貫入などに起因すると考えられる。加えて、トラフ充填堆積層中で音響的に透明な柱状構造が認められた。この柱状構造は、堆積層中で認められた負の極性を示す反射面と総合的に考えると、流体やガスから構成されるダイアピルと結論づけた。また本研究で明らかになった本地域の地質構造および柱状構造は冷湧水域での高熱流値と関連性があることが示唆された。

キーワード：相模湾，化学合成生物群集，反射法地震探査，海底下地質構造，柱状（ダイアピル）構造

2011年3月30日受領；2011年6月9日受理

- 1 東京大学大気海洋研究所
- 2 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域
- 3 東海大学海洋研究所
- 4 東海大学海洋学部

*代表執筆者：

三澤 文慶
東京大学大気海洋研究所
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5
04-7136-6135
ayanorim@aori.u-tokyo.ac.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Original Paper —

Subbottom structures of Offshore Hatsushima in the western Sagami Bay

Ayanori Misawa^{1*}, Masataka Kinoshita², Mikiya Yamashita², Keizo Sayanagi³, and Yoshifumi Misawa⁴

Offshore of the Hatsushima area, western Sagami Bay, are distributed along the submarine escarpment of eastern rim. Many geological, geophysical, and biological studies have been conducted at this cold seep still present. In May 2005 and January 2006, seismic reflection surveys were carried out in the Sagami Bay by *R/V Kaiyo* of JAMSTEC. In this paper, we identified the submarine structure of offshore Hatsushima around the chemosynthetic biocommunity area obtained by seismic survey results. These surveys provided very clear seismic images down to 1.5 seconds beneath the seafloor in two-way travel time. We identified three sedimentary units compared with the Ashigara Group and acoustic basement as the Shirahama Group (~2 Ma) that is commonly absorbed in seismic images of the western Sagami Trough. We identified two reflectors of reverse polarity indicating fluid and/or gas existence of Horizons A and B in the trough-fill sediment layer. Deformed structures due to uplift of Izu Peninsula side are identified in trough-fill sediment layer zone near the submarine escarpment. These structures suggest the existence of concealed fault system or magma intrusion in the deep part of basement layer. In addition, wipe-out structures are recognized in the trough-fill sediment layer. These wipe-out structures are also related to the reflector of reverse polarity (Horizon A) in the trough-fill sediment layer, it was concluded that these structures were the fluid and/or gas based diapirs. The results of this study clarified the relationship between the geologic structures, the fluid and/or gas based diapirs and the high heat flow value area.

Keywords: Sagami Bay, Chemosynthetic biocommunity, Seismic reflection survey, Subbottom structure, Wipe-out (diapir-shaped) structure

Received 30 March 2011 ; Accepted 9 June 2011

- 1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
- 2 Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 3 Institute of Ocean Research Development, Tokai University
- 4 School of Marine Science and Technology, Tokai University

*Corresponding author:

Ayanori Misawa
Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8564, Japan
Tel. +81-4-7136-6135
ayanorim@aori.u-tokyo.ac.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

相模湾は、関東地方南部に位置する伊豆半島と三浦半島に囲まれた東西幅約38 kmの湾である (Fig. 1)。この湾は、杉村 (1972) によりフィリピン海プレートの収束境界と指摘され、それ以来多くの海洋地質学的研究が行われてきた (例えば、木村, 1973; Kong et al., 1984; 大河内, 1990; 岡村ほか, 1999; 森ほか, 2010)。相模湾周辺は、非常に複雑なテクトニック・セッティングであることが知られ、その複雑さは、フィリピン海プレートの斜め沈み込みや、15 Ma頃から始まった伊豆弧の本州への衝突 (例えばTaira et al., 1989) などに起因している。特に、相模湾西部地域では、以下に述べるように活発な変動を示す現象が報告されている。それらは、(1) 神奈川県西部地震の想定震源域の分布と伊豆弧の衝突に伴った西相模湾断裂の活動の可能性 (石橋, 1988)、(2) 1989年の手石海丘の活動などを含む東

伊豆単成火山群の分布 (葉室ほか, 1980)、(3) 熱川沖の海底溶岩流の分布 (仲ほか, 1988)、(4) 火山活動に起因した東伊豆群発地震の発生 (例えばOkada et al., 2000)、(5) 伊豆東方沖の群発地震に起因した海底地すべりの発生 (木下ほか, 2006)、(6) 初島沖の冷湧水噴出域と化学合成生物群集の分布 (橋本ほか, 1987) などであり、地質構造、地震、火山、海底地すべり、冷湧水と多岐に渡る。このように、初島沖をはじめとする相模湾西部地域は特に変動が活発であり、「しんかい2000」・「しんかい6500」や「ハイパードルフィン」などを使用した潜航調査、ピストンコア試料を用いた表層堆積物の採取 (例えば, Fujioka et al., 1989)、地殻熱流量観測 (例えば, 木下, 1991)、および冷湧水の地球化学的調査 (例えば, 角皆ほか, 1994) などの様々な研究が行われている。

このような変動現象は、海底地形からも明瞭に観察されている。初島沖は、大陸棚外縁から相模トラフにかけて

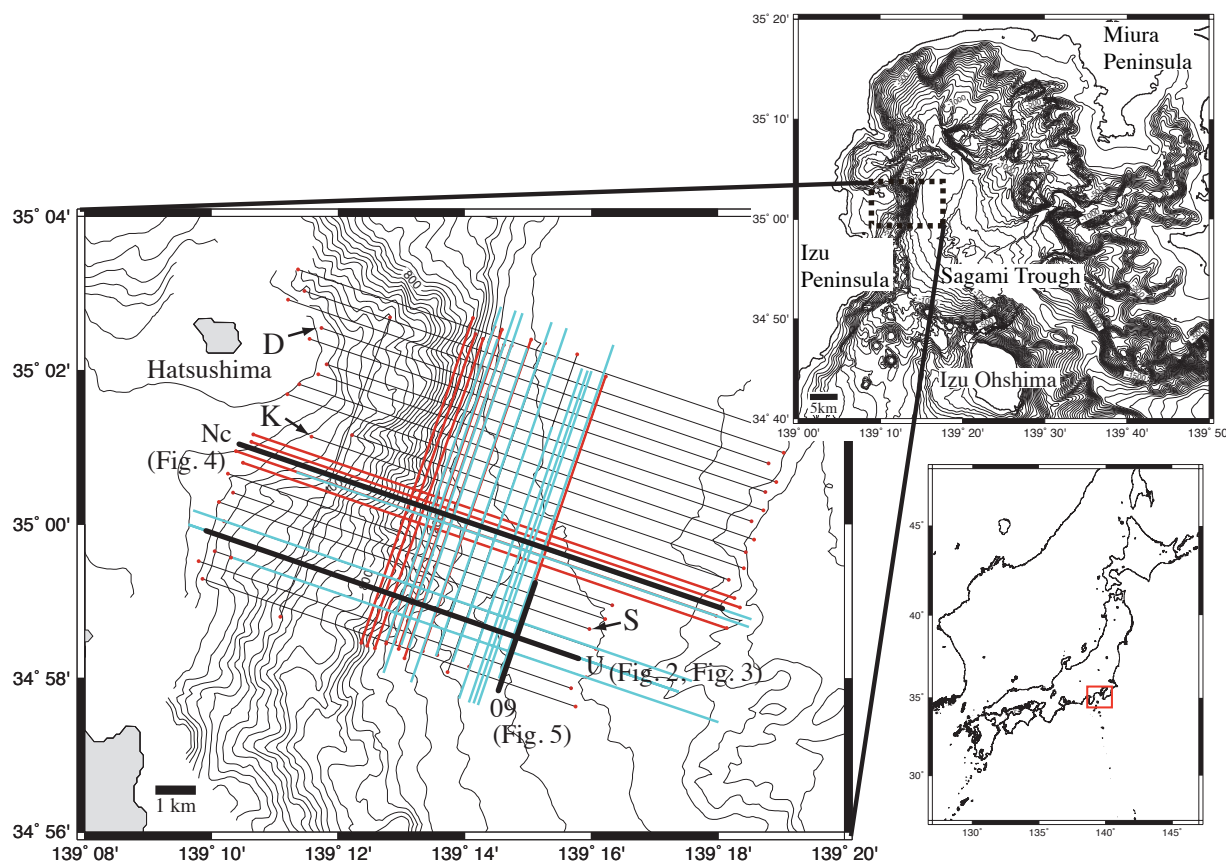


Fig. 1. A bathymetric map with SCS survey lines offshore Hatsushima in the western Sagami Bay (Black line: using GI gun, Red line: using GI and Cluster guns, blue line: SCS and MCS surveys line, Black bold line: profiles using in this paper).

図1. 相模湾西部・初島沖の海底地形図とSCS探査時の測線位置 (黒線: GIガンのみを使用した測線, 赤線: GIガンとクラスターガンを使用した測線, 青線: SCS・MCS探査を行った測線, 黒太線: 本論文中で使用した測線)。

急激に水深が増大し、急峻な斜面を示す特徴がある。その中でも、南北方向に延びる比高約1000 mの海底崖 (Fig. 1) には馬蹄形の微地形が認められる。それらは、門馬ほか (1997) により地震発生時に海底地すべりによって形成された地形と指摘されている。このような海底地すべりは、2004年の伊豆東方沖を震源とした地震発生時に観察され、木下ほか (2006) で詳細に報告されている。彼らは、地震発生直後に潜航調査を実施し、初島沖化学合成生物群集付近で海底地すべりに起因した泥流の痕跡を確認した。このように、この地域では複雑なテクトニクスを反映して頻繁に地すべり現象が発生し、その結果現在の急峻な斜面地形が形成された。

このように、今まで数多くの研究例があるが、本地域の海底下の地質構造に関する研究事例は少なく、岡村ほか (1999) で述べられているのみである。彼らは、相模トラフのトラフ充填堆積層は、相模湾層群 (ほぼ水平に覆う往復走時1秒の層厚を持ち、下位の音響基盤面と整合的な地層) として1層の堆積層分布として評価している。このような背景の中、2005年4月下旬から5月上旬にかけて、独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海洋調査船「かいよう」によるKY05-06航海で、相模湾全域ならびに初島沖地域で大規模なシングルチャンネル (Single-Channel Seismic: 以下SCS) 反射法地震探査が実施された (Kinoshita et al., 2005)。また、翌年のKY06-01航海では、冷湧水・化学合成生物群集付近の堆積層の構造や間隙流体の流路、さらに貯留層の兆候を捉えることを目的として、18チャンネルのストリーマーを用いたマルチチャンネル (Multi-Channel Seismic: 以下MCS) 反射法地震探査を実施した (Kinoshita et al., 2006)。

本研究では、GIガンを制御震源としたSCS探査およびMCS探査結果、そしてクラスターガンを制御震源に用いたSCS探査結果より、初島沖化学合成生物群集周辺部および初島沖相模トラフのトラフ充填堆積層の層序および地質構造の解明を行った。また今回の探査により、トラフ充填堆積層中にこれまで知られていなかった音響学的に透明な柱状構造の存在が明らかになり、この柱状構造の空間的分布および柱状構造の構成物質の検討もした。

2. 調査概要

SCS反射法地震探査の調査範囲及び測線 (Kinoshita et al., 2005) は、以下のように設定した。調査範囲は、初島沖化学合成生物群集分布域を中心とした東西幅約16 km、南北幅8 kmとした (Fig. 1)。測線は、最大比高1000 mの海底崖から相模トラフにかけて分布する等深線に平行方向と直

交方向とに、約180~360 m (0.1~0.2 mile) 間隔で設定した (Fig. 1)。その測線は、海底崖に平行な北北東-南南西方向に13測線、それに直交する西北西-東南東方向に24測線を設け、測線総延長は約300 kmであった。本探査では、制御震源として全測線で355キュービクインチ (cubic inch) のGIガンを使用し、受信部に50 mのストリーマーケーブルを曳航し、船速4ノット・発振間隔8 sec (約16.5 m間隔) で実施した。また、反射波データは1 msecサンプリング・記録長7 secで収録した (Kinoshita et al., 2005)。この際、潮流の影響等による発振距離間隔には若干の誤差があることが考えられるが、反射断面への表示上では無視できる範囲であった。加えて、化学合成生物群集の分布域では、より微細な構造を求めるために制御震源に20キュービクインチのクラスターガンおよび20 mのストリーマーケーブルによる探査 (船速3ノット・発振間隔3 sec) も行った (Fig. 1)。

2006年には、同地域でMCS反射法地震探査が行われた。本航海では、KY05-06航海の測線とほぼ同じ位置に測線を設定し、化学合成生物群集周辺の構造探査を実施した。測線は、北北東-南南西方向へ12測線、それに直交する西北西-東南東方向へ9測線を設け、測線総延長は約274 kmであった。本探査でも制御震源として全測線で355キュービクインチのGIガンを2基使用し、18チャンネル (450 m) のストリーマーケーブルを曳航し、船速5ノット・発振間隔25 mで実施した。しかし、ストリーマーケーブルの不調が原因で、3チャンネルのみのデータ収録となり、速度解析は不可能となった。データは、2 msecサンプリング・記録長7 secで収録した (Kinoshita et al., 2006)。

反射法地震探査により得られた波形記録は、Paradigm社製Focusソフトウェアを用いて処理した。SCS反射法データは、トレース編集、バンドパスフィルター、時間マイグレーション、AGC (Automatic gain control) の順番に処理を実施した。MCS反射法データは、バンドパスフィルター、デコンボリューション、NMO (Normal Moveout) 処理、CMP (Common Mid Point) 編集、マイグレーションの順で処理を行った。ただし、チャンネル数が少ないことやオフセットが短いために速度解析が実施出来なかったため、地震波速度は一般的な水中音速である $V_p = 1,500$ m/s を用いてデータ処理を行った。

3. 結果

初島沖で実施されたKY05-06航海とKY06-01航海で取得されたGIガンを制御震源に用いた反射法地震探査結果から反射断面を作成した (Fig. 2, Fig. 3)。その結果、本地域

の地下構造は1.5秒（往復走時: Two-way Travel Time）までを明瞭に把握することができ、初島沖相模トラフのトラフ充填堆積層の構造を把握することができた（Fig. 2 Shot number.1600-1400）。トラフ充填堆積層の最下部では、連続する反射面が明瞭に認められた。この反射面より下側では互層状の断続的な反射面が局部的に認められた。また、一部では反射波が検知されず断面が白く抜けて透明になっている。この連続して分布する反射面を音響基盤面（以下、基盤面）とし、これ以下を音響基盤層（以下、基盤層）とした。この基盤面は概ね平坦であるが、西縁の境界部分の一部で凹凸状もしくは、急激に深度を増す部分がある（Fig. 4）。Fig. 4に見られるように、トラフ充填堆積層は海底崖下部の急峻な基盤面と不整合面を形成して堆積している。その一方で、今回得られた反射断面からは南北性の海底崖付近に沿う断層の存在は確認出来なかった。さらに基盤面の凹凸が認められる測線D～S間では、トラフ充填堆積層に凸状に隆起した変形構造が認められたが、これらの変形直下でも断層は確認できなかった。加えて、大陸斜面下部の急傾斜地域の反射断面上では分類可能な堆積層はほとんど見られなかった（Fig. 2 shot number. 1880-1600部分）。

本研究では初島沖化学合成生物群集周辺の構造を高解像

度で取得するために、クラスターガン制御震源に用いて浅層部分の構造探査を実施した。クラスターガンは、GIガンと比べてエアガン容量が少ないため、深部までの構造を得ることは出来なかった。そのため、GIガンを用いて同定した基盤面を確認することは出来ず、トラフ充填堆積層もUnit 2の途中までの部分を把握できた（Fig. 4）。この生物群集直上を通る測線Nc（Fig. 4）の反射断面上では、生物群集の周辺部で堆積物の存在が認められなかった。しかしながら、過去の潜航調査結果（橋本ほか、1987）から海底面付近に堆積物の存在が認められるため、基盤層上にはある程度の薄い堆積層が分布していると考えられる。Fig. 4の生物群集分布域の拡大図は、生物群集周辺の構造を詳細に把握するため、高周波数帯に絞って作成した。その結果、基盤層と堆積層境界面は明瞭に把握でき、トラフ充填堆積層の堆積物が基盤面に沿って収束する形態が確認できた。加えて、生物群集直下の基盤層中では、変形構造および断層の存在は不明確であった。

初島沖のトラフ充填堆積層は成層構造を示し、伊豆半島側（西北西側）からトラフ中央部（東南東側）に向って層厚を増す（Fig. 2, Fig. 3）。この地層の層厚は、最大で1.3秒であった。また、この地層は、観測された全測線のGIガ

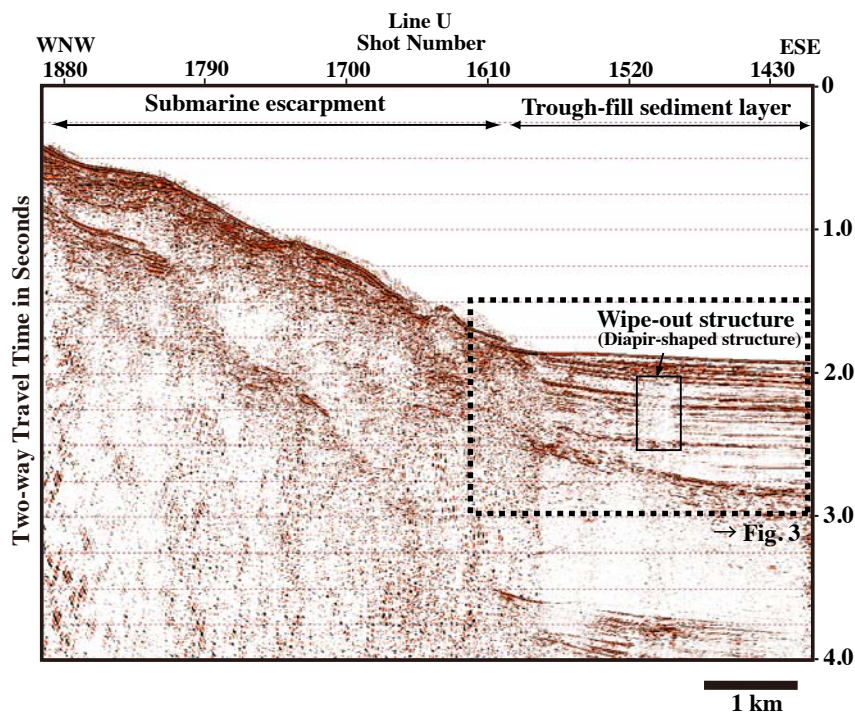


Fig. 2. A seismic profile of Line U in the WNW-ESE direction (time migrated section, using GI gun): This profile shows a typical example of the trough-fill sediment layers and an escarpment structure offshore Hatsushima in the Sagami Trough. Location of seismic profile is shown in Fig. 1.

図2. 初島沖のトラフ充填堆積層と海底崖を西北西-東南東方向に通る測線Uの反射断面（マイグレーション断面を使用、震源はGIガンを使用）。

ンを使用したSCS探査結果の断面で検討した。その結果、この堆積層は反射面の分布形態、反射面の反射強度、反射面の連続性、および堆積層の音響学的層相の特徴から3層に区分し、上位からUnit 1, Unit 2, Unit 3として (Fig. 3b), それらの下位に前述した通り音響基盤層の分布が認められた (Table 1)。Unit 1は、表層部分で強い振幅を持ち連続

的な反射面の繰り返される互層で特徴づけられ、最大0.4秒の層厚を示す。Unit 2は、反射強度が弱く、反射面の連続性が悪い層で特徴づけられ、最大0.6秒の層厚を示す。Unit 3は、Unit下部に連続性の悪い、強い反射面が部分的に存在する音響的に透明な層で特徴づけられ、最大0.3秒の層厚を示す。さらに、Unit 2と3の間には連続性に富ん

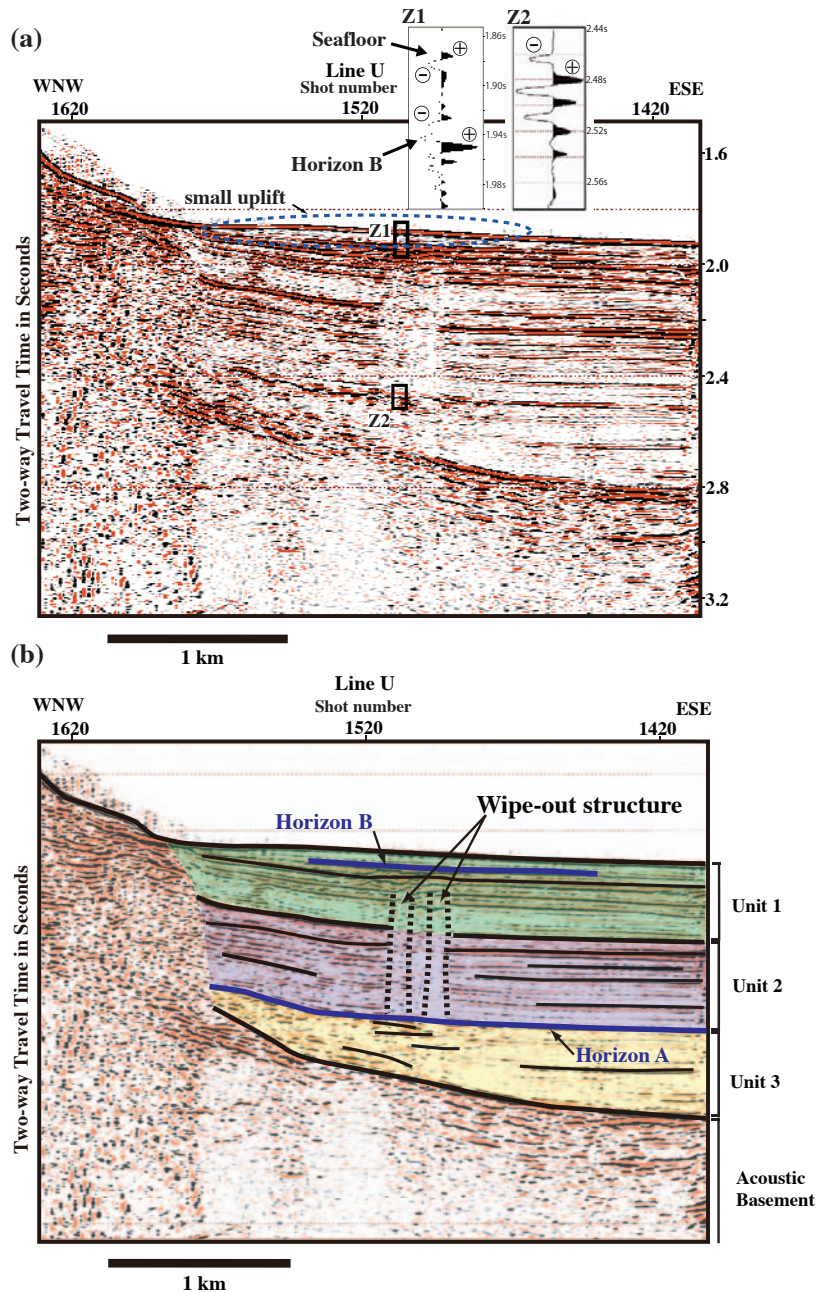


Fig. 3. (a) A close-up the seismic image of line U showing sedimentary layer and (b) its interpretation. (time migrated section, using GI gun source) Green area: Unit 1, Blue area: Unit 2, Yellow area: Unit 3, Blue line: reflector of reverse polarity. Boxes show reflected wave forms: (Z1) is a seafloor and reflector B, and (Z2) is reflector A. Both reflectors show the negative polarities.

図3. (a)測線Uの堆積層部分の拡大図と(b)解釈図 (マイグレーション断面を使用, 震源はGIガンを使用) 緑色部分: Unit 1, 青色部分: Unit 2, 黄色部分: Unit 3, 青線: 逆位相の反射面, (Z1): 海底面およびReflector B部分波形拡大図, (Z2): Reflector A部分波形拡大図.

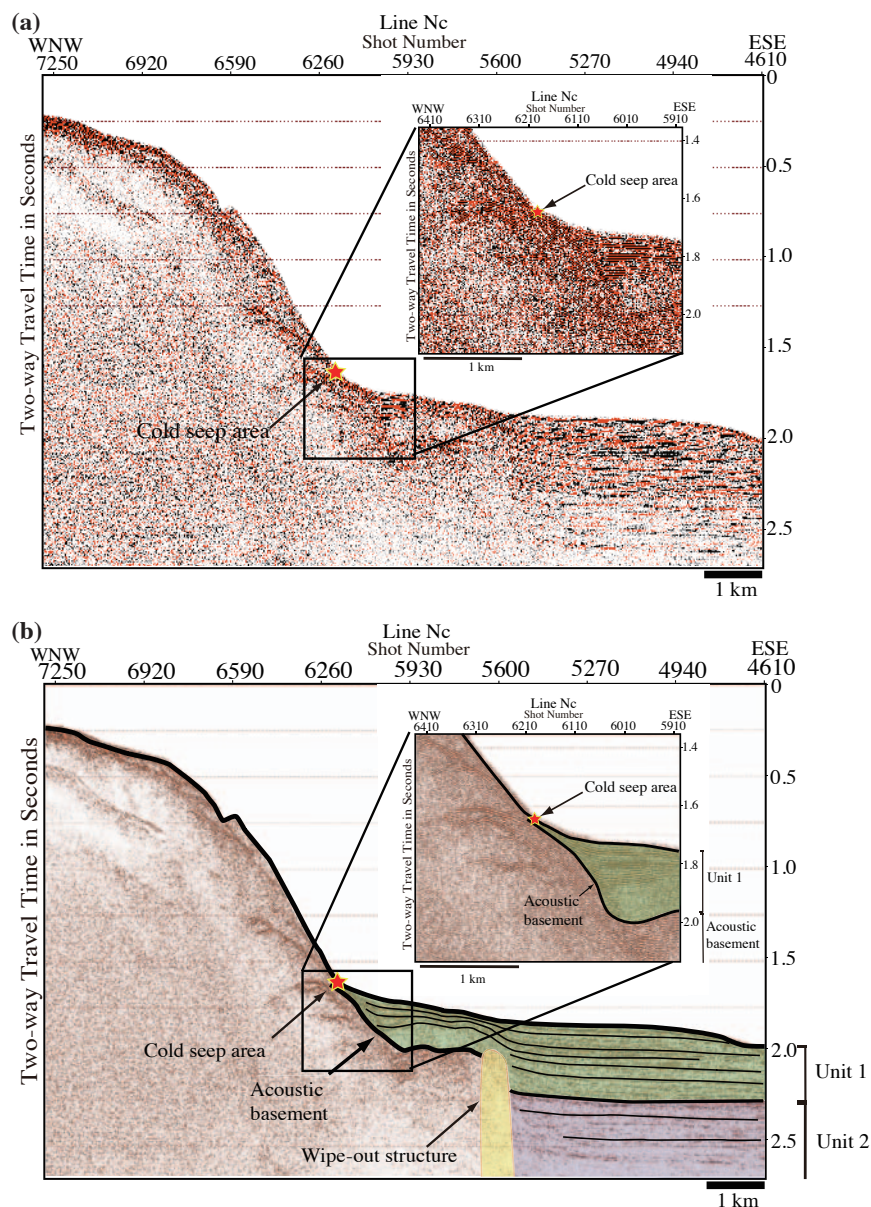


Fig. 4. (a) Seismic profile of Line Nc in the WNW-ESE direction on the chemosynthetic biocommunity (time migrated section, using Cluster gun), and (b) its interpretation: This profile shows a structure beneath the cold seep area offshore Hatsushima. Location of this profile is shown in Fig. 1.

図4. (a) 初島沖の化学合成生物群集直上を西北西-東南東方向に通る反射断面（測線Nc）と (b) 解釈図（マイグレーション断面を使用, 震源はクラスターガンを使用）.

Table 1. Characteristics of sedimentary unit in the trough-fill sediment layer offshore Hatsushima.

表1. トラフ充填堆積層の各ユニットの特徴.

Unit	Reflection pattern	Reflector continuity	Reflection intensity	Thickness (sec.)	Unit feature
Unit 1	parallel (Even)	good	strong	0.4	alternate layer
Unit 2	parallel (Even)	intermittent	weak	0.6	stratified structure
Unit 3	parallel (Even)	intermittent	strong (partially)	0.3	stratified structure

だ強い反射面が認められ、これを境に音響学的層相が明瞭に変化することから本反射面をUnit 2-3の境界：Horizon Aとした。

反射断面中の反射面は、多くが海底面と同じ極性（以後、これを「正の極性」とする）を示したが、Horizon Aは海底面と逆の極性（以後、これを「負の極性」とする）を示した（Fig. 3a (Z1)・(Z2)）。Horizon Aの特徴は、海底面や基盤面と同様に反射強度が強く、全測線で認められた。また、Unit 1中にも海底面と逆の極性を示す強い反射面が局部的に認められ、この反射面をHorizon Bとした（Fig. 3a (Z1)）。Horizon BはHorizon Aと異なり、測線Uと測線09（Fig. 5）のみで認められ、局所的な分布を示した（Fig. 6）。

基盤層以下の内部構造は、不明瞭であった。これは、基盤層が伊豆半島の火山性の碎屑物からなり、火山起源の物質は堆積層と比較して音響インピーダンス比が大きいことから、GIガンやクラスターガンの制御震源としてのエネルギーが十分でなかったことに起因していると考えられる。この基盤層の反射面は、KY05-06航海時の相模湾全域で行われた反射法地震探査結果（Kinoshita et al., 2005）より、初島沖から相模トラフ中央部まで連続的に追跡可能であった。

SCSとMCS探査の両方の結果から、トラフ充填堆積層中に音響的に透明な柱状構造（wipe-out構造；例えば、Bouriak et al., 2000）が認められた（Fig. 2 shot number.1520周辺, Fig. 3）。この柱状構造直下の基盤面は、明瞭かつ連続的に追跡される（Fig. 3）。測線U（Fig. 2, Fig. 3）で認められたこの構造の直上を通る測線09でも同様に柱状構造の存在が確認できた（Fig. 5）。これらの構造は、複数の測線にわたって同じ地域で分布するため、観測条件による影響ではないと考えられる。また、構造内部は完全に音響的に透明ではなく、微弱な反射面が認められる。この反射面はトラフ充填堆積層中の反射面と同じ深度で連続的に追跡される。加えて、この構造の直上に、Horizon Bが分布し、Horizon Bの直下の反射面および上位の海底面が緩く凸状に膨らんだ形態を示した（Fig. 3, Fig. 5）。同様な柱状構造が他の複数の測線でも認められた（Fig. 4）。確認された柱状構造の多くで構造の最下部にHorizon Aが分布し、かつトラフ充填堆積層中の基盤面上に認められる凹凸状および急激に深度を増すなどの地形に対応した部分に隣接して存在する。

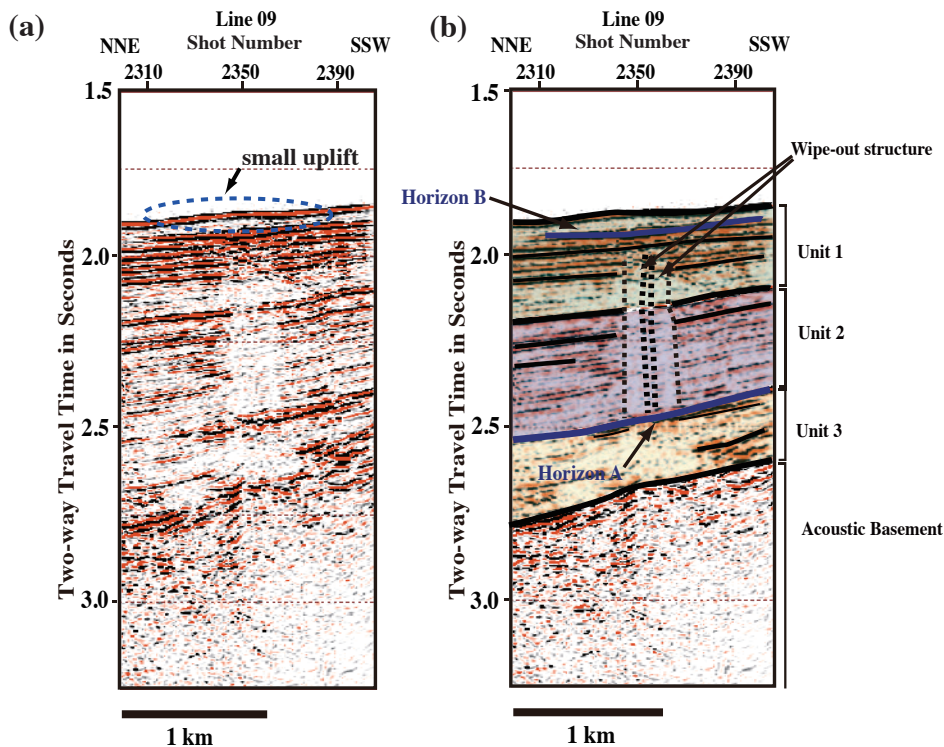


Fig. 5. (a) A close-up seismic image of Line 09 showing wipe-out structure and (b) its interpretation. (time migrated section, using GI gun) Green area: Unit 1, Blue area: Unit 2, Yellow area: Unit 3, Blue line: reflector of reverse polarity.

図5. (a) 柱状構造を横断する反射断面（測線09）と (b) 解釈図（マイグレーション断面を使用、震源はGIガンを使用）
緑色部分：Unit 1、青色部分：Unit 2、黄色部分：Unit 3、青線：逆位相の反射面。

4. 議論

本章では、初島沖相模トラフのトラフ充填堆積層の層序および地質構造 (4.1節)、トラフ充填堆積層中で発見した柱状構造 (4.2節) および柱状構造と流体との関係 (4.3節) に関して議論する。従来の研究では化学合成生物群集周辺に断層の存在が指摘されていたが、今回の観測では明瞭な断層の確認はできなかった。そのため、本研究で得られた地質構造と化学合成生物群集を説明するために堆積層中からの湧水の移動経路に関して議論を行う。

4.1. 堆積層序・地質構造

本研究では、反射断面から得られた結果をもとに、初島沖の相模トラフを3層の堆積層と基盤層に区分した。徳山・徐 (1988) の示した相模トラフの層序表と比較を行い、Table 2 に示した。本地域のトラフ充填堆積層は、堆積層中で反射面の少ない地層が卓越することから、主に細粒質な物質から構成されると考えられる。徳山・徐 (1988) は、相模トラフの堆積物は丹沢山地を源流とする酒匂川を通して供給された丹沢山地・足柄層群起源としていること等から、本地域の堆積物も同様に足柄層群系起源の堆積物と考

Table 2. Stratigraphical chart offshore Hatsushima (modified from Tokuyama and Soh, 1988).

表2. 初島沖での堆積層層序表 (徳山・徐, 1988 を改変)。

Geological age	Izu Region	Ashigara Area	Sagami Trough	Hatsushima
	Tokuyama & Soh (1988)		This study	
0.5Ma	Higashi-Izu Monogebetic Volcano Group	Fuji Volcano	Unit A	Unit 1
		Hakone Volcano	(Unit B)	
1.0Ma	Yugashima Volcano	Shiozawa F.	Unit C	Unit 2
1.5Ma	Usami Volcano	Hata F.		Unit 3
2.0Ma	Azuro Volcano	Seto F.	Unit D	Unit 3
2.0Ma	Shirahama Group	Neishi F.		Basement
		?	Unit E	

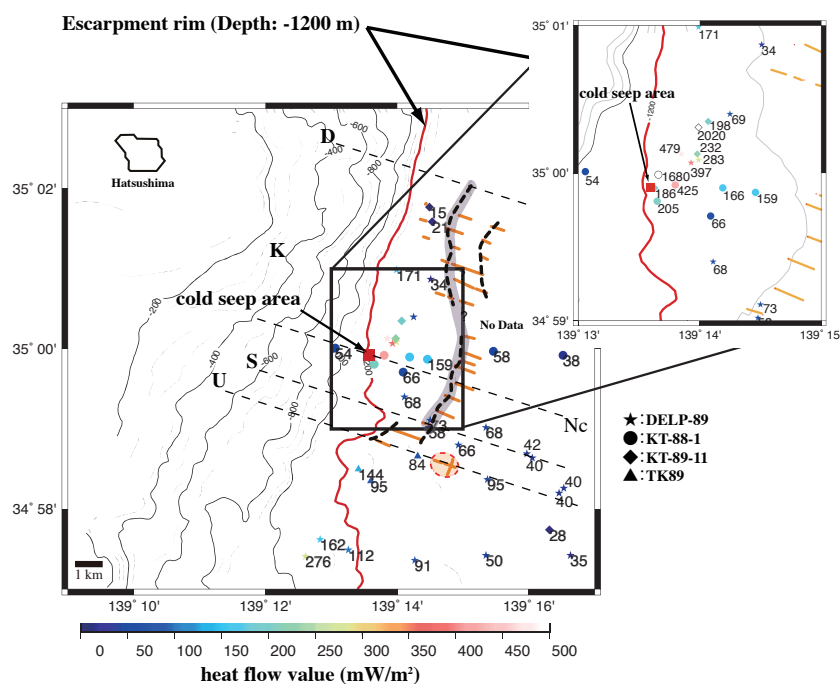


Fig. 6. A bathymetric map with distributions of the wipe-out structure (orange lines), concave and convex position of acoustic basement (black broken line), distribution of the deformation area in the sediment layer (red broken line and orange patch zone) and distribution of Horizon B (blue patch zone) (modified after Kinoshita et al., 1991). Heat flow values are shown by symbols (star, circle, square and triangle) with numbers. Unit of heat flow is mW/m^2 .

図6. 初島沖で認められた柱状構造の位置、音響基盤面の凹凸位置、Horizon Bの分布域および地殻熱流量の測定位置と熱流量値間の関係図 (熱流量値は、Kinoshita et al., 1991 より引用) (オレンジ線: 柱状構造, 黒点線: 音響基盤面の凹凸位置, 赤点線: Horizon Bの分布域, 青色で塗りつぶした部分: 変形構造の分布域)。地殻熱流量の結果は、測定値を伴った記号 (星, 丸, ひし形, 三角) で表した。地殻熱流量の単位は mW/m^2 。

えられる。本地域の最上位の堆積層 Unit 1 は、振幅の強い反射面が連続して存在し、音響インピーダンスが大きく異なる2つの物質からなる互層と推定され、Unit 1 は砂泥互層の地層と推定される。また、Unit 1 の一部には、伊豆半島側斜面の海底崖で発生した海底地すべりなどでもたらされた地すべり堆積物を含むと考えられる。Unit 2 は、反射面の連続性が悪く、かつ反射強度が弱いことから、局部的に砂層の様な粗粒な物質を含む泥質の地層と推定される。Unit 3 は、Unit 2 に比べ連続的な強い反射面が少ないことから Unit 2 より泥質分に富む地層と推定される。

次に、音響基盤層について議論する。不連続で低周波な反射面から構成される形態から、基盤層は伊豆半島の火山性の物質から構成される地層と考えられる。本地域より北側の真鶴海丘周辺で行われたSCS探査結果（岡村ほか、1999）でも同様な解釈が示されている。徳山・徐（1988）と、Kong et al. (1984) などによると、この基盤層は伊豆半島の白浜層群（ ~ 2 Ma）に対応すると指摘されている。また、Nishizawa et al. (1995) は、相模湾で実施した屈折法地震探査結果から、相模湾の地殻は4層構造から成り、上位から2層目に当る Layer 2 の速度構造を $V_p = 2.2 \sim 3.2$ km/s とした。Yoshii et al. (1985) は、伊豆半島で実施した屈折法地震探査の結果から、この地域に分布する白浜層群の速度を 3.0 km/s とした。したがって、相模湾の Layer 2 は伊豆半島の白浜層群に対比されると考えられる。加えて、相模湾で実施したサイドスキャンソナーの調査結果や生物群集周辺で取得された岩石サンプルなどから、群集周辺の地質は白浜層群に対応する可能性が指摘されている（徳山ほか、1991）。そのため本研究ではSCS探査で得られた基盤層を2 Maまでに形成された白浜層群に対比した。以上より、基盤層の上位層であるトラフ充填堆積層は2 Ma以降に形成されたと考えられる。KY05-06航海 Leg. 2で行われた相模湾全域で実施されたSCS探査の反射断面（Kinoshita et al., 2005）とあわせて総合的に検討した結果、初島沖の3層区分の堆積層および音響基盤層は相模トラフ中央部まで連続して分布している。

西相模湾断裂と呼ばれる神奈川県西部地震の震源断層が本研究の地域で提案（石橋、1988）されているため、その有無の評価を行った。佐藤ほか（2010）は、本地域で深部構造イメージングを目的とした2船式反射法地震探査を実施し、海底崖の近傍に断層が存在すると解釈している。しかし沖野ほか（1994）やNishizawa et al. (1995) は、否定的な見解を述べている。今回の調査結果でも同様に本地域のトラフ充填堆積層及び基盤層内に断層の痕跡は確認できなかった。

測線Nc（Fig. 4）を例とする測線D～Sの区間のトラフ充填堆積層中で認められた変形構造は、堆積物の堆積後の

構造運動により形成されたと考えられる（Fig. 6 青色着色部分）。この変形は、南北約5 kmの区間で認められる（Fig. 1, Fig. 6）。このことは、（1）基盤層中に最大約5 km規模の断層の伏在によるもの、（2）東伊豆単成火山群に関連した深部でのマグマの貫入に伴う変形によるものの2つの原因が考えられる。前述したように、浅部に位置するトラフ充填堆積層中や基盤面の凹凸および急激に深度を増す部分の直下では断層の存在を直接的に確認できなかったが、基盤層深部に断層もしくはマグマの貫入に伴う可能性が考えられる。その上、この変形構造と基盤面の凹凸部もしくは急激に基盤面の深度が増すなどが認められる位置は一致する（Fig. 6）。したがって、深部での断層の伏在、もしくはマグマの貫入により、基盤面の凹凸や基盤深度の増大などの基盤層の変形が引き起こされたと推測できる。しかし本研究では、基盤層内部の構造を把握することが出来なかったため、変形の要因を解明するには今後より深部の地質構造を把握することが必要である。

4.2. 柱状構造

初島沖の複数の反射断面で、音響学的に透明な柱状構造が数多く認められた。本研究では、これらの構造を柱状構造と呼ぶこととした。稠密な調査から得られた柱状構造を空間的にマッピングしたものをFig. 6に示す。

本構造の分布域は、測線Kより北側と南側の2つの地域に分類できる。測線Kより北側の地域では、海底崖から最短で約200 m、最大で約900 m離れた箇所約0.7～2.0 kmの幅を持つ地域に分布している。また測線Kより南側では、海底崖から約1 km離れた地域に約300 mの幅で分布している。

一方、前述の通り反射断面中の基盤面に凹凸状もしくは急激に深度を増す箇所が確認された。この基盤面上の凹凸の位置をマッピングした結果、柱状構造の分布位置と重なるため、柱状構造の形成に基盤面の形状が関係していると推定される（Fig. 6）。しかし、測線Uおよび、測線09などの中で認められた柱状構造域で、基盤面の凹凸や急激に深度を増すなどは認められなかった。

ここで、初島沖の地域で想定される柱状構造の形成要因を考察すると、①火山活動による深部からトラフ充填堆積層への直接的なマグマの貫入上昇の影響によるもの、②上昇する流体・ガス起源のダイアピルによるものの2要因が考えられる。以下に、これら2つの要因について関連する研究例とともに比較・検証を行う。

4.2.1. 火山活動による深部からのマグマ貫入の影響

本地域は、東伊豆単成火山群（葉室ほか、1980）の発達する地域であり、伊東沖では手石海丘（仲、1994）など現

在も定期的に活発な火成活動の存在が知られている。特に1989年の火山活動に伴い伊東市郊外で発生したM5.5の地震の震源域で実施された反射法地震探査結果から、震源域下部からの貫入岩体の存在が報告されている (Kasahara et al., 1991)。本研究で見られた柱状構造がマグマの貫入に起因する場合、マグマが基盤を超えてトラフ充填堆積層へ貫入したと仮定すると、基盤面の不連続が予想される。しかし、初島沖の場合、柱状構造直下の音響基盤面は不連続にならず連続的に分布している。したがって、深部からトラフ充填堆積層への直接的なマグマの貫入と言う考え方は否定的である。

4.2.2. 流体・ガス起源のダイアピル

柱状構造最下部のHorizon Aは、「負の極性」を示す (Fig. 3a (Z2))。トラフ充填堆積層中で負の極性を示す反射面は、一般に周囲の堆積物と密度や速度の異なる物質層が存在する際に急激に音響インピーダンスが変化することで海底面などの反射面と逆の位相を示し、強反射面として反射断面中で認識される。逆位相反射面は、堆積層中の疑似海底反射面 (BSR) 部分、ガス層部分、付加体などのデコルマ部分および断層面上での流体の存在などの報告例がある (例えば、Bouriak et al., 2000; Mazumdar et al., 2009; Shipley et al., 1994; Park et al., 2002など)。これらの部分では堆積層中に流体やガスの存在が示唆されている (例えば、Bouriak et al., 2000; Shipley et al., 1994など)。堆積層中での流体やガスの存在部分は、速度や密度の急激な変化に起因して、流体・ガスに関係なく高振幅の逆位相反射面として現れる。そのため、速度解析などの解析なしに、物質の同定は難しいと考えられる。今回の仕様では速度解析などは実施できなかったが、反射断面中で明瞭に強振幅の逆位相反射面が認められることから、Horizon Aは流体やガスなどを含んでいると考えられる。本地域のトラフ充填堆積層の地震波速度は、Nishizawa et al. (1995) の結果から堆積層表層部は約 $V_p = 1500$ m/s、堆積層深部では $V_p = 1800$ m/s の速度と予測される。堆積層中で位相の逆転が発生するためには、Horizon A部分の速度が周辺堆積層の速度よりも低速であることが考えられ、流体のみであるならば $V_p = 1500$ m/s に近い値か、より低速度であることが考えられる。このHorizon Aは流体やガスなどを主に、それに加えて少量の泥などを含む不均質な物質から構成されることが推定される。また、Horizon Aより下位のUnit 3中に流体やガスが含まれている可能性も示唆される。

音響的に透明な構造の報告例は、複数存在する。例えばプレートの沈み込み帯に分布する泥火山は、地球内部へと沈み込んだ堆積物から脱水された水が地層中で高間隙水となり、地層中の弱線に沿って周囲の地層を巻き込みながら

上昇し、最終的に海底面で噴出する泥ダイアピルとして形成される (例えば、狩野・村田, 1998)。形成された泥ダイアピルは、周囲の堆積層の物質を巻き込むため、不均質な構造となる。そのため、反射断面上では音響的に散乱が起こり、構造が不明瞭になる (Baba and Yamada, 2004)。また、メタンハイドレートの分布するノルウェーのVoring海台地域やアメリカ・サウスカロライナ沖のBlake ridge周辺では、反射法地震探査の結果から音響的に透明な部分が存在している (例えば、Bouriak et al., 2000; Hornbach et al., 2007)。これらの地域ではBSRの明瞭な発達認められ、BSR周辺から流体やガスがダイアピルを形成して上昇するために反射断面上で音響的に透明になる。初島沖で見られた柱状構造やその最下部には逆位相反射面 (Horizon A) が存在し、上記の事例と非常に類似している。その一方で初島沖の構造では、構造内部に微弱な反射面の連続が確認できることから、泥ダイアピルの特徴とは異なる。したがって、Voring海台地域やBlake ridgeの事例のように流体やガスが柱状構造の形成に関わっていると考えられる。

以上より、トラフ充填堆積層中に含まれる流体やガスは、主に基盤面の凹凸部および基盤面の深度が急激に増大する部分で柱状構造を形成し、流体やガスをUnit 1へ移動させていることが考えられる。しかし、Fig. 2およびFig. 3で認められる柱状構造の直下には例外的に基盤面の凹凸などは認められない。ここでは、堆積層中の間隙水圧が局所的に高いことに起因し、堆積層中のクラックなどの弱面・弱線を通じて柱状構造が形成されている可能性が示唆される。

4.3. 柱状構造と流体との関係

初島沖の化学合成生物群集の周辺では、詳細な地殻熱流量 (Heat flow) 観測が実施されている (例えば、Fujioka et al., 1989; 木下, 1991; Kinoshita et al., 1991) (Fig. 6)。地殻熱流量観測の結果から、この生物群集や断層の分布が推定される地域の海底崖に沿って局所的な高熱流量値が得られており、最高で $2,000$ mW/m² 以上の値を示し、その平均値は 400 mW/m² を超えるため、活発な湧水活動の存在が指摘されている (木下, 1991)。Kinoshita et al. (1991) では高熱流量域の存在から冷湧水の経路となる断層の存在を指摘したが、本研究の反射断面からは群集直下および高熱流量域直下での断層分布を確認出来なかった (Fig. 4, Fig. 6)。Fig. 6の地殻熱流量分布では、 100 mW/m² 以上の高熱流量値を示す地域は基盤面の凹凸域より海底崖側に集中している。柱状構造はそれらよりもトラフ側に位置する。柱状構造付近の熱流量値は $60 \sim 80$ mW/m² の値を示すため海底崖付近ほど高くないが、トラフ中央部の平均 55 mW/m² に比べるとやや高い値を示すため、柱状構造分布域は海底崖周辺の高熱流量帯への遷移域であることが考えられる。このこと

は、柱状構造を用いて表層付近まで移動した流体やガスが表層付近まで達しているために、周辺よりやや高い60～80 mW/m²の熱流量値を示すことが示唆される。また、この領域は堆積層中で認められた深部での断層の伏在もしくはマグマ貫入に起因した変形の位置に隣接している。笠谷ほか(2007)では、JAMSTECの自律型水中ロボット(AUV)「うらしま」を用いて、生物群集周辺でサイドスキュンナー調査および、サブボトムプロファイラー(SBP)探査を行った結果、トラフ充填堆積層表層部に断層のような堆積構造の不連続が見られると述べている。このように表層で見られている構造が、深部の柱状構造や基盤の凹凸といった変形構造と対応して流体の移動経路となることが示唆され、海底面上では流体の噴出現象が発生していると考えられる。

Unit 1中に局所的に存在する負の極性を持つHorizon Bの形態から、流体・ガスがUnit 1中にレンズ状に拡がっていると推定される。また、音響基盤の凹凸位置で認められる柱状構造も同様にUnit 1中まで存在を確認できる。流体やガスの上昇後の挙動は、海底面での直接噴出もしくはトラフ充填堆積層中に拡散することの2つの可能性が考えられる。Bouriak et al. (2000)やHornbach et al. (2007)は、海底面でのダイアピル噴出に伴うpockmark地形の存在を指摘している。しかし、初島沖では柱状構造のスケールではpockmark地形は確認できない。加えて、海底面で測定された高熱流量域と柱状構造の分布域の比較を行った結果、高熱流量域と柱状構造の分布域は一致しなかった(Fig. 6)。以上2点より、ダイアピルとして上昇した流体やガスが海底面で大規模に噴出している可能性は低く、かつトラフ充填堆積層中や基盤面上で流体やガスの移動経路となりうる構造および痕跡が検出されていないため、大部分がトラフ充填堆積層中に拡散していることが考えられる。

最後に、Unit 1中で拡散した後の流体やガスの移動経路の可能性に関して検討を行う。トラフ充填堆積層のUnit 1中で拡散した流体は、前述の通り(1)トラフ充填堆積層の変形に伴って形成された小規模な断層やクラックを経路として移動する場合、(2)音響基盤面を経路とする場合の2つの経路を取ることが予測される。海底崖東麓での高熱流量域では、(1)で指摘した小規模な断層やクラックがトラフ充填堆積層Unit 1中に無数に発達し、これらを経路として流体やガスが噴出することが考えられる。次に、化学合成生物群集の周辺では海底表層部に断層の分布が認められないため(Fig. 4)、(2)の海底崖下付近の基盤面を経路とする可能性がある。そのため柱状構造を通じてHorizon Aから上方へ移動し、Unit 1中で拡散した流体やガスは、基盤面側を移動経路としている可能性がある。この生物群集直下の詳細な地質構造を把握するためには、先に述べた

AUV・うらしまなどに搭載したSBP探査機を使用した海底近傍での表層地質探査の実施が極めて有効である。今後、それらの結果と併せ流体やガスの流路に関しては、詳細な検討を行う予定である。

5. まとめ

相模湾西部・初島沖地域は、伊豆弧の本州への衝突、フィリピン海プレートの本州への斜め沈み込み、および東伊豆単成火山群に隣接していることなどのため、非常に複雑なテクトニクスを示している。本地域で取得された反射断面の解釈から、以下の結論が得られた。また、得られた結果を基にまとめた概念図をFig. 7に示す。

1. 相模湾西部・初島沖のトラフ充填堆積層は、音響的特徴を基に3つのUnitと、その下位の音響基盤層に区分した。堆積層は、主に酒匂川から流入する丹沢山地系由来の堆積物からなり、堆積層表層部の一部に伊豆半島側の海底崖起源の地すべり堆積物なども含まれると考えられる。本地域の音響基盤層は伊豆半島の白浜層群に対比され、2 Maまでに形成された地層である。したがって、その上位に分布する堆積層は、2 Ma以降の時代を示す。
2. 本地域では、西相模湾断裂(石橋, 1988)の存在が指摘されている。今回の探査結果から、トラフ充填堆積層内でのこの断裂を示す痕跡は確認できなかった。しかし、生物群集南東側のトラフ充填堆積層中で、凸状に隆起した形態を示す変形が認められた。この変形の原因は、①基盤層深部に断層の伏在、もしくは②基盤層深部でのマグマ貫入などに起因すると考えられる。
3. 本地域のトラフ充填堆積層中に音響的に透明な柱状構造が複数確認された。これらの柱状構造の最下部には、堆積層中で認められた逆位相の反射面(Horizon A)が分布している。この反射面は流体やガスの存在を示すと考えられることから、柱状構造は流体やガスで構成されるダイアピルと結論付けた。これらの流体やガスは、最終的に海底面に直接噴出することなくトラフ充填堆積層Unit 1中で拡散すると考えられる。しかし、本研究ではトラフ充填堆積層内における流体やガスの移動経路の同定は困難であったが、トラフ充填堆積層中の小規模な断層やクラック、もしくは基盤面が地層中の流体の移動経路となっている可能性を指摘した。
4. 本研究では得られた地質構造と熱流量との関連は示唆されたものの、両者を説明できるモデル作成までは至らなかった。そのため極表層における高分解能な浅部地質調査を行い、本研究で得られた変形構造との対比

を行うとともに、深部については重力データなどを用いて地下のマグマの分布との関連性を明らかにしていく。

謝辞

本研究では、査読者である海洋研究開発機構の高橋成実博士、深田地質研究所の川村喜一郎博士には、本原稿に対し有益な御指摘・御意見を多岐に渡りいただいた。本研究を行うにあたり、海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域の富士原敏也博士、金松敏也博士および斎藤実篤博士には、有益な御議論を頂いた。産業技術総合研究所の池原研博士には、本原稿をまとめるにあたり有益な御指摘を多岐に渡りいただいた。海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域の宮川歩夢博士には、本原稿に対して御意見を頂いた。KY05-06航海およびKY06-01航海で取得されたデータを使用した。海洋調査船「かいよう」の船長はじめ乗組員の皆様、観測技術員の皆様には、調査航海の実施にあたり、多大なる御尽力をいただいた。以上の方々に、心より御礼申し上げます。本論文中の地形図等作成には、ハワイ大学提供のGMT (The Generic Mapping tools: Wessel and Smith, 1991) を使用した。

参考文献

- Baba, K. and Y. Yamada (2004), BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan, *Resource Geology*, 54, 11-24.
- Bouriak, S., M. Vanneste, and A. Saoutkine (2000), Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway, *Marine Geology*, 163, 125-148.
- Fujioka, K., M. Kinoshita, W. Soh, S. Tsukawaki, J. Ashi, K. Akimoto, and M. Watanabe (1989), Geology of Sagami Bay and its environs -Reports on the results of KT88-1 cruise-, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 64, 391-431.
- 葉室和親, 荒巻重雄, 加賀美英雄, 藤岡換太郎 (1980), 東伊豆沖海底火山群 - その1 -, *東京大学地震研究所彙報*, 5, 259-297.
- 橋本惇, 田中武男, 松澤誠二, 堀田宏 (1987), 相模湾初島沖におけるシロウリガイ群集の調査, 『しんかい 2000』シンポジウム, 3, 37-50.
- Hornbach, J. M., C. Ruppel, and L. C. Van Dover (2007), Three-dimensional structure of fluid conduits sustaining an active

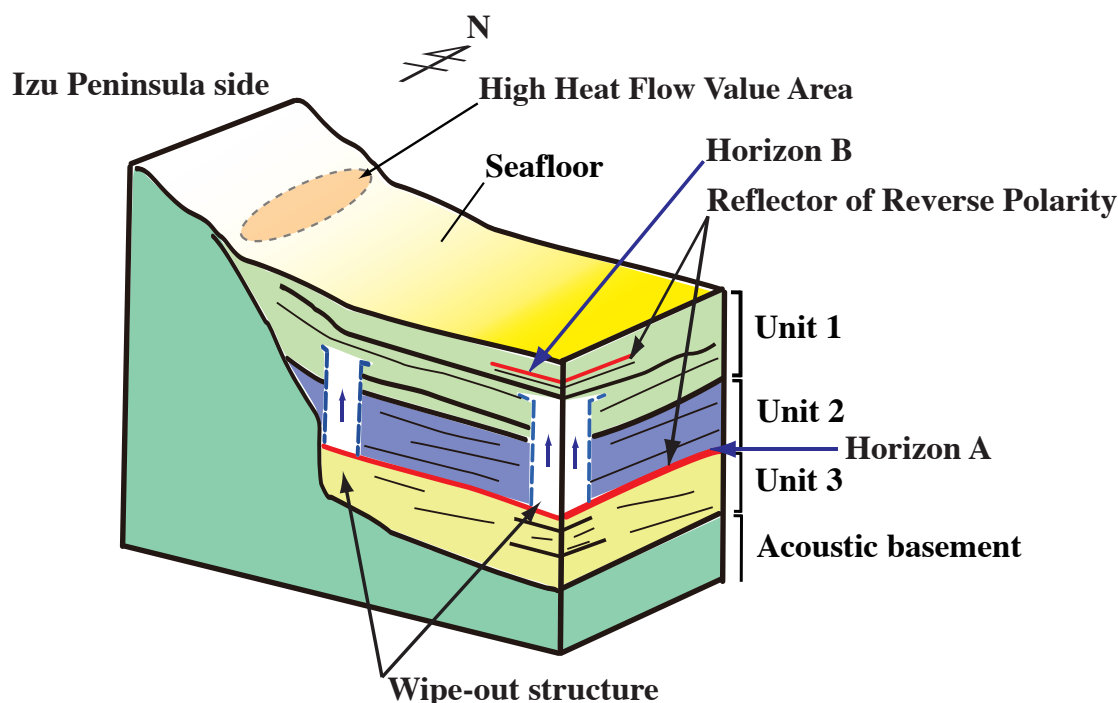


Fig. 7. Schematic model of geologic structures offshore Hatsushima area. Three sedimentary units (Units 1-3) are identified above the acoustic basement. The wipe-out structures indicate presumably fluid or gas transportation from Horizon A to Unit 1. The fluid and/or gas might stop and diffuse in Unit 1.

図7. 初島沖地域の模式図; 初島沖のトラフ充填堆積層の層序とトラフ充填堆積層中で認められた柱状構造の形態。

- deep marine cold seep, *Geophysical Research Letters*, 34, L05601-05605.
- 石橋克彦 (1988), “神奈川県西部地震” と地震予知1, *科学*, 58, 537-547.
- 狩野謙一, 村田明広 (1998), 構造地質学, 朝倉書店.
- Kasahara, K., F. Yamamizu, A. Takahashi, and T. Ikawa (1991), Reflection profiles of the active seismic and volcanic region off the east-coast of Izu Peninsula, *Journal of Physics of the Earth*, 39, 361-370.
- 笠谷貴史, 月岡哲, 山本富士夫, 百留忠洋, 澤隆雄, 吉田弘, 石橋正二郎, 田原淳一郎, 木下正高, 青木太郎 (2007), 深海巡航AUV「うらしま」によって在られた相模湾初島沖の海底地すべり音響イメージ, *海洋調査技術*, 19, 11-17.
- 木村正昭 (1973), 陸上地質を相模湾底に追う, *科学*, 43, 420-426.
- 木下正高 (1991), フィリピン海周辺の地殻熱流量分布, *地学雑誌*, 100, 565-582.
- Kinoshita, M., M. Yamano, and S. Mikata (1991), High Heat Flow Anomaly around Hatsushima Biological Community in the Western Sagami Bay, Japan, *Journal of Physics of the Earth*, 39(4), 553-571.
- Kinoshita, M., M. Yamashita, T. Okano, S. Shimizu, Y. Hashimoto, T. Kasaya, and KY05-06 Leg2 Shipboard Science Party (2005), High density single-channel seismic profiles obtained during KY05-06 cruise in the Sagami Bay, Japan, *JAMSTEC Report of Research and Development*, 2, 41-56.
- Kinoshita, M., M. Yamashita, T. Okano, T. Nakasone, F. Yamamoto, and S. Shimizu (2006), High quality Multi-frequency seismic profiles obtained during KY06-01 cruise in the Sagami Bay, Japan, *JAMSTEC Report of Research and Development*, 4, 41-54.
- 木下正高, 笠谷貴史, 後藤忠徳, 浅川賢一, 岩瀬良一, 溝澤巨彦 (2006), 伊豆東方沖地震に誘発された相模湾初島沖の海底地すべり, *日本地すべり学会誌*, 43(2), 41-43.
- Kong, Y. S., H. Kagami, H. Tokuyama, C. Igarashi, and N. Nasu (1984), Sub-bottom geological structure of Sagami Bay, *Bell. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo*, 16, 1-91.
- Mazumdar, A., A. Peketi, P. Dewangan, F. Badesab, T. Ramprasad, M. V. Ramana, D. J. Patil, and A. Dattal (2009), Shallow gas charged sediments off the Indian west coast: Genesis and distribution, *Marine Geology*, 267, 71-85.
- 門馬大和, 川口勝義, 岩瀬良一, 溝澤巨彦, 青木美澄 (1997), 相模湾初島沖の変動地形調査 (KY97-05 SGM), *JAMSTEC 深海研究*, 13, 375-393.
- 森慎一, 藤岡換太郎, 有馬真 (2010), 相模トラフ北部の海底地形と断層系の形成 - 5系統の断層発達史 -, *地学雑誌*, 119, 585-614.
- 仲二郎, 田中武男, 脇田宏 (1988), 相模湾西部, 伊豆熱川沖の海底溶岩流について (II), 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 4, 157-175.
- 仲二郎 (1994), 伊豆半島伊東市東方手石海丘海底火山の噴火後の変化, *JAMSTEC 深海研究*, 10, 49-53.
- Nishizawa, A., T. Kanazawa, T. Iwasaki, and H. Shimamura (1995), Crustal structure related to the Philippine Sea plate subduction in the northern part of the Sagami Trough, Japan, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93, 21-36.
- Okada, Y., E. Yamamoto, and T. Ohkubo (2000), Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan, *Journal of Geophysical Research*, 105, 681-692.
- 岡村行信, 湯浅真人, 倉本真一 (1999), 駿河湾海底地質図説明書 海洋地質図52, 地質調査所.
- 大河内直彦 (1990), 相模湾の活構造とテクトニクス, *地学雑誌*, 99, 38-50.
- 沖野郷子, 西沢あずさ, 浅田昭 (1994), 相模湾北西部の地殻構造調査, *水路部研究報告*, 30, 383-393.
- Park, J. O., T. Tsuru, S. Kodaira, P. R. Cummins, and Y. Kaneda (2002), Splay fault branching along the Nankai Subduction zone, *Science*, 297, 1157-1160.
- 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石川達也 (2010), プレート境界から分岐した活断層の長期評価 - 相模トラフ横断地殻構造探査, *科学*, 80(8), 825-831.
- Shiple, H. T., G. F. Moore, N. L. Bangs, J. C. Moore, and P. L. Stoffa (1994), Seismically inferred dilatancy distribution, northern Barbados Ridge decollement: Implications for fluid migration and fault strength, *Geology*, 22, 411-414.
- 杉村新 (1972), 日本付近におけるプレートの境界, *科学*, 41, 231-240.
- Taira, A., H. Tokuyama, and W. Soh (1989), Accretion tectonics and evolution of Japan, Ben-Avraham, Z., ed, *The Evolution of a Pacific Ocean Margins*, 100-123.
- 徳山英一, 徐垣 (1988), 相模トラフはいつ形成されたか, *月刊地球*, 10, 630-637.
- 徳山英一, 山本富士夫, 芦寿一郎, 八木下晃司, 徐垣, 植木俊明, 平朝彦 (1991), IZANAGIによる相模湾・駿河湾の音響画像, *月刊地球号外*, 3, 161 - 165.
- 角皆潤, 石橋純一郎, 脇田宏, 蒲生俊敬, 増澤敏行, 中塚武

(1994), 相模湾初島南東沖「冷湧水」の起源: 「しんかい2000」第721潜航の結果, *JAMSTEC 深海研究*, 10, 395-403.

Wessel, P. and W. H. F. Smith. (1991), Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 72, 441.

Yoshii, T., S. Asano, S. Kubota, Y. Sasaki, H. Okada, T. Masuda, T. Morita, and H. Murakami (1985), Crustal structure in the Izu Peninsula, Central Japan, as derived from explosion seismic observations 2. Ito-Matsuzaki Profile, *Journal of Physics of the Earth*, 33, 435-451.