反射法地震探査解釈による伊豆・小笠原弧堆積盆の 地質構造と発達史

星 一 良^{**} 柳 本 裕⁺⁺⁺
秋 葉 文 雄⁺⁺⁺⁺ 神 田 慶 太^{**}

Architecture and Tectonic Evolution of Sedimentary Basins in the Izu-Ogasawara Arc Based on a Seismic Reflection Survey Interpretation

Kazuyoshi HOSHI^{**}, Yutaka YANAGIMOTO⁺⁺⁺,
Fumio AKIBA⁺⁺⁺⁺ and Keita KODA^{**}

[Received 16 January, 2015; Accepted 27 August, 2015]

Abstract

Interpretation of seismic reflection surveys shot by Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), Japan National Oil Corporation (JNOC) and Geological Survey of Japan in the Philippine Sea controlled by Ocean Drilling Program (ODP) as well as Deep Sea Drilling Project (DSDP) cores and ocean bottom samplings reveal the basin framework of the Izu-Ogasawara Arc. Seven seismic horizons from the acoustic basement to the seabed are interpreted, and isochron maps of six seismic units from Eocene to Quaternary are mapped to study the history of basin evolution. The Izu-Ogasawara Forearc Basin is located east of the volcanic front, is about 50 km in width and 2 to 3.5 sec. in Two Way Time (TWT) thickness. It extends more than 1000 km from east of the Ioto to off the Boso Peninsula, and subducts along the Sagami Trough. Paleogene sediments develop only in the forearc side. The Paleogene basin is bounded by NNE-SSW and NNW-SSE faults, has a zigzag pattern, elongates throughout the Izu-Ogasawara Forearc, and consists of echelon horsts and half grabens. Horsts are composed of volcanic rocks of Eocene to Oligocene age, and grabens are filled with turbidite sediments of the same age. Divergent seismic reflection patterns indicate that the turbidite sediments were deposited synchronously with the tilting and subsiding of the half grabens during the syn-rift period of the basin that was initiated by the rifting of the Proto-Izu-Ogasawara Arc. The latest Oligocene to Early Miocene sediments are mainly composed of calcareous nannofossil rich marls, which were deposited both on the Paleogene forearc basin as post-rift sediments, and in the backarc basin that was initiated when the Shikoku Basin was opened by the rifting of the Proto

* 株式会社地球科学総合研究所

** 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

+ 現所属：石油資源開発株式会社

++ 現所属：明治大学研究・知財戦略機構

+++ 現所属：珪藻ミニラボ

* JGI Inc., Tokyo, 112-0012, Japan

** Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, Tokyo, 105-0001, Japan

+ Present address: JAPEX, Tokyo, 100-0005, Japan

++ Present address: Meiji University Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Properties, Tokyo, 101-8301, Japan

+++ Present address: Keiso MiniLab, Hanno, 357-0023, Japan

Izu-Ogasawara Arc. Well-stratified and flat seismic reflection indicates that the marls were deposited in a calm environment when volcanic activity ceased. The Izu-Ogasawara Arc re-started volcanic activity in the Middle to Late Miocene at the Nishi-Shichito Ridge in the backarc side. Sediments of this period are thick around the Nishi-Shichito Ridge. Seismic reflection is strong, discontinuous, and wavy near volcanoes, and weak, continuous, and parallel away from the arc. The former facies is mainly composed of coarse volcanoclastics, and the latter of finer clastics. In the Pliocene and Quaternary, the depocenter shifted from west to east as the volcanic front shifted.

Key words : Izu-Ogasawara Arc, forearc basin, backarc basin, Ogasawara Trough, seismic reflection survey

キーワード：伊豆・小笠原弧，前弧堆積盆，背弧堆積盆，小笠原トラフ，反射法地震探査

I. はじめに

1) 経緯

伊豆・小笠原・マリアナ弧の島々に関する調査は古くからなされていたが，1970年代の広域にわたる海洋調査によって伊豆・小笠原海溝から前弧の隆起帯と堆積盆地，背弧域に至る地質構造と層序の概要がはじめて明らかになった（本座ほか，1982；湯浅ほか，1982；本座，1985；Honza and Tamaki, 1985 など）。1978年と1979年には石油公団が伊豆七島・小笠原海域で約7000 kmの反射法地震探査を実施した。深海掘削は1973年にDeep Sea Drilling Project (DSDP) Leg 31が四国海盆に，1977年から1979年にかけてDSDP Leg 58, 59, 60がそれぞれ四国海盆，九州・パラオ海嶺とマリアナ弧に掘削され，さらに1989年にはOcean Drilling Project (ODP) Leg 125とLeg 126が伊豆・小笠原前弧から背弧を横断する一連の深海掘削と反射法地震探査を実施して伊豆・小笠原弧の発達史を明らかにした（藤岡ほか，1989；Taylor *et al.*, 1990a；Taylor, 1992；藤岡，1992 など）。2014年にはIODP Expedition 350と352が前弧と背弧で掘削された（Expedition 350 Scientists, 2014）。

1998年から2003年にかけて石油公団（JNOC）と石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）は，資源エネルギー庁の委託を受け，本邦南方海域において一連の「大水深域における石油資源等

の探査技術等基礎調査」（以下大水深基礎調査と略す）を実施し，測線長26,865 kmの反射法地震探査記録（以下震探と略す）を取得し，また海底着座型掘削装置（BMS）とドレッジにより多くの岩石試料を採取した。Higuchi *et al.* (2007)はこれらの震探に基づき，四国海盆西方の大東海嶺群海域から九州・パラオ海嶺を経て小笠原海域にいたる堆積層層序と堆積史を検討報告した。2007年より大水深基礎調査は伊豆・小笠原海域の北部まで検討海域を広げ，同海域の震探を再処理し，DSDP・ODPの各掘削孔や海底試料と対比検討を行った（星ほか，2007 など）。本報告はその一環として，硫黄島から房総沖に至る伊豆・小笠原弧について，測線格子を用いて震探解釈を行い，また深海掘削など点の調査で得られた岩相層序を震探を用いて横方向に線として延長するとともに，海底地形や重磁力データを参考として面的な地質構造と各時代の層厚分布・岩相を推定し，堆積盆の変遷と構造発達史について考察したものである。調査範囲の海底地形図を図1に示す。

2) 地形の概要

伊豆・小笠原弧の地形については湯浅・村上（1985），藤岡・坂本（1999）などに記述されているので，ここではその概要を述べる。伊豆・小笠原弧はフィリピン海の東端に位置し，北西太平洋とは伊豆・小笠原海溝で境される。東から小笠原海嶺，七島・硫黄島海嶺，および西七島海嶺の

三列の海嶺列と、その間を隔てるトラフと海盆（リフト）に区分される。現在の火山フロントである七島・硫黄島海嶺は、伊豆大島、三宅島、八丈島をはじめとする伊豆諸島から鳥島、西之島、海形海山、海徳海山を経て北硫黄島、硫黄島、南硫黄島へと連なる火山列島、さらに南方の南日吉海山、日光海山に至る第四紀火山列を載せる海嶺である（図1）。

伊豆・小笠原弧の地形は北東-南西走向の蠕婦岩構造線により北と南とで二分される（湯浅・村上, 1985）。蠕婦岩構造線の南側では、東から前弧の隆起帯である小笠原海嶺、前弧堆積盆の小笠原トラフ、火山フロントの七島・硫黄島海嶺、背弧側に西之島トラフ、南北方向の西七島海嶺がある。蠕婦岩構造線の北部では、前弧隆起帯の新黒瀬があり、前弧堆積盆は明瞭な地形には現れず、火山フロントの七島・硫黄島海嶺のすぐ西側には八丈海盆、スミス海盆、鳥島海盆などの背弧リフトが南北方向に分布し、西七島海嶺は北東-南西方向に連なり雁行配列する海底火山群より構成される。

3) 構造発達史に関する既往研究の概要

火山の活動時期は小笠原海嶺から前弧堆積盆では始新世から漸新世にかけて安山岩類の活動があり、現在の火山フロントに隣接する背弧リフトのスミス海盆では3 Ma ころより活動した（Taylor, 1992）。西七島海嶺では17-3 Ma にかけて（Ishizuka *et al.*, 2003）、九州・パラオ海嶺の火山は48 Ma から25 Ma にかけて活動し、28-25 Ma にかけて活発だった（Ishizuka *et al.*, 2011）。

四国海盆・パレスベラ海盆の拡大は古伊豆・小笠原弧が九州・パラオ海嶺と分離リフティングしはじまったとされ、四国海盆の拡大は27 Ma ころにはじまり途中2回の拡大軸方向の変化を経て15 Ma には終了した（Okino *et al.*, 1999）。紀南海底崖は四国海盆の東方に位置する長大な西落ちの断層崖であり、四国海盆の東部（23-19 Ma）と中央部（19-15 Ma）の境界部に位置する（沖野・藤岡, 1994）。

Taylor (1992) による本海域の DSDP/ODP 孔での堆積速度曲線を図2に示す。伊豆・小笠原弧

の前弧で掘削された ODP Leg 126 Site 787, 792, 793 と、九州・パラオ海嶺で掘削された DSDP Site 296, Site 448 の堆積速度は、四国海盆で隔てられるにもかかわらず35 Ma から17 Ma にかけて同様に変動する。すなわち35 Ma から28 Ma にかけては約300 m/m.y. と大きい、以降減少し、25 Ma から17 Ma にかけては20 m/m.y. と最小となる。伊豆・小笠原弧では17 Ma 以降再度堆積速度が増加する。藤岡ほか（1991）は ODP コア中の火山灰層頻度から、これらの堆積速度が火山活動の多寡を反映することを示した。堆積速度が速い35 Ma から25 Ma にかけては火山岩片に富み浅海性の石灰岩や植物片を含むタービダイト砂岩泥岩が堆積したが、堆積速度が遅い23 Ma から17 Ma にかけては火山物質に乏しく石灰質ナノ化石に富む泥岩が卓越する。火山活動は17 Ma から再開し、前弧側の堆積速度が増し、Site 792 では3 Ma 以降は100 m/m.y. に達する。

II. 使用データと解析手法

1) 使用データ

1-1) 反射法地震探査記録

地質解釈に用いた反射法地震探査を表1に、測線位置を図1、主要プロファイルの測線名を表2に示す。以下のマルチチャンネル反射法地震探査（Multi-Channel Seismic Reflection Survey, MCS）記録計約16,000 km をおもな解釈に用いた。1978年と1979年に JNOC が取得した計7831 km、1998年から2003年にかけて JNOC と JOGMEC が大水深基礎調査で収録した地震探査記録のうちの伊豆・小笠原海域の計6270 km。青ヶ島-鳥島海域で ODP Leg 126 に先立ち1987年に Fred Moore cruise 3505, 3507 が取得した16測線計2000 km（Taylor *et al.*, 1990b）。JNOC/JOGMEC の南北約75 km 間隔の MCS 震探の解釈を補間するために、地質調査所が1979年伊豆・小笠原航海 GH79-2, 79-3, 79-4（Honza *et al.*, 1981）で取得した南北約27 km 間隔のシングルチャンネル反射法地震探査記録35,027 km のうちの約25,000 km を用いた。

このほかに伊豆・小笠原海域と、静岡・関東・

房総の本州前弧堆積盆の関係をみる目的で、JNOCによる基礎物理探査昭和46年関東，昭和52年下北・東海沖，昭和53年東海沖・熊野灘，昭和59年常磐・鹿島沖，平成6年常磐-鹿島浅海，平成8年南海トラフ，平成10年房総沖浅海の計7

つの基礎物理探査を参照した。

大水深基礎調査の地震探査では通常処理として重合断面図，時間マイグレーション断面図，深度変換断面図が作成され，主要測線について特殊解析として重合前深度マイグレーション処理

図2 伊豆・小笠原弧と九州・パラオ海嶺のDSDP/ODP孔での時代-深度プロット（堆積速度曲線）と本報告の震探Unit。Taylor (1992) に震探Unitを加筆。ODP Leg 126 Site 787, 792, 793 は伊豆・小笠原弧の前弧海盆に，DSDP Site 296 と Site 448 は九州・パラオ海嶺に位置する。

Fig. 2 Age-depth plots (sedimentation rate curve). After Taylor (1992). ODP Leg 126 Site 787, 792 and 793 are located on the Izu-Ogasawara forearc, whereas DSDP Sites 296 and 448 on the Kyushu-Palau Ridge Seismic units of this study are shown.

図1 検討海域の海底地形と解釈に用いた反射法地震探査測線，深海掘削孔，海底試料。

実線：JNOC/JOGMECの反射法地震探査測線，白破線で囲われる範囲にはFred Moore 3505, 3507 測線が含まれる。黒数字は本報告で主要測線に用いたProfile番号。本来の測線名との対応は表2を参照。黒破線で囲われる範囲：地質調査所1979年伊豆・小笠原クルーズGH79-2, 3, 4調査範囲，緑二重丸と赤字：DSDS/ODP孔とSite番号。黒丸：年代参照した海底試料採取位置。赤三角：第四紀火山，Miy：三宅島，Hac：八丈島，Aog：青ヶ島，Myo：明神海丘，Bey：ベヨネース列岩，Sum：須美寿島，Tor：伊豆島，Sof：婦婦岩，Sui：水曜海山，Nis：西之島，Kai：海形海山，Kat：海徳海山，KIo：北硫黄島，Iot：硫黄島，MIo：南硫黄島，Mhi：南日吉海山，Nik：日光海山。海底地形図はGEBCO2014グリッドによる。

Fig. 1 Bathymetry and location of reflection seismic surveys, DSDP/ODP holes, and ocean bottom bed samples used in this study.

Black line: JNOC/JOGMEC seismic lines. Black numbers are seismic profile names used in this study, and their original line names are listed in Table 2. The area surrounded by white dotted line includes Fred Moore 3505, 3507 seismic lines. Area surrounded by black dotted line: GSJ 1979 Izu-Ogasawara cruise GH79-2, 3, 4 survey areas. Green circle and red number: DSDP/ODP hole and site number. Black circle: Sea bottom samples whose age data are used in this study. Red Triangle: Quaternary Volcano, Miy: Miyake Jima, Hac: Hachijo Jima, Aog: Aogashima, Myo: Myojin Knoll, Bey: Beyonnaise Rocks, Sum: Sumisu Jima, Tor: Tori Shima, Sof: Sofugan, Sui: Suiyo Seamount, Nis: Nishinoshima, Kai: Kaikata Seamount, Kat: Kaitoku Seamount, KIo: Kita-Io To, Iot: Io To, MIo: Minami-Io To, Mhi: Minami Hiyoshi Seamount, Nik: Nikko Seamount. Bathymetry data are from GEBCO2014 grid.

表 1 検討に用いた伊豆・小笠原海域の反射法地震探査の概要.

Table 1 Reflection seismic surveys in the Izu-Ogasawara Arc used for this study.

Year	年度	Survey Name	Operator	Vessel	AirGun Size (cubic inch)	Streamer cable		Survey Length (km)
						Number of channels	Cable Length (m)	
1979	昭和 54 年度	伊豆・小笠原 GH 79-2, 3, 4	GSJ	白嶺丸	150×2	1		35027
1978	昭和 53 年度	東海沖-熊野灘, 宮崎沖, 七島海域 (一部)	JNOC	海洋丸	1570	48	2350	2669
1979	昭和 54 年度	伊豆七島海域-小笠原諸島	JNOC	海洋丸	1570	48	2350	5162
1987		Cruise FM 3505, FM3507		Fred Moore	2000	96	3337	2000
1998	平成 10 年度	四国海盆海域	JNOC	白嶺丸	4000	240	3000	5987
1999	平成 11 年度	沖大東島南東及び沖ノ島 海域及び四国海盆海域	JNOC	白嶺丸	4000	240	3000	6544
2000	平成 12 年度	小笠原諸島東方海域	JNOC	Geco Emerald	8204	240	6000	3978
2001	平成 13 年度	四国海盆海域南部	JNOC	Veritas Searcher	4340	564	7050	3600
2002	平成 14 年度	四国海盆海域及び沖大東 南方海域	JNOC	Polor Duke	3500	480	6000	3633
2003	平成 15 年度	沖ノ島島南方海域及び小笠 原諸島東方海域	JOGMEC	Polor Duke	3500	480	6000	3100

表 2 本報告に用いた主要震探測線プロフィール番号と本来の測線名の対応.

Table 2 Profile numbers of major seismic lines used in this study and their original seismic line names.

Profile No	Original Line Name	Survey Year
1	78-1	1978
2	78-2	1978
3	78-3	1978
4	78-4	1978
5	79-1	1979
6	79-2	1979
7	79-3	1979
8	79-4	1979
9	D01-6	2001
10	79-5	1979
11	79-6	1979
12	D00-1	2000
13	79-7	1979
14	79-8	1979
15	D00-2	2000
16	D00-3	2000
17	D03-2	2003
18	D03-3	2003
19	78-A, 79-B	1978, 1979
20	78-B, 79-C	1978, 1979

(PSDM) を実施している。1978 年と 1979 年の JNOC 測線については、当時のデータ処理により作成された紙の重合時間断面図をスキャンし震探トレースを SEG Y 形式のデジタルデータに変換した後に、断面図上に記載されている重合速度を用いて時間マイグレーション処理を実施した。また一部の測線についてはフィールドデータからの再処理を行った。地質調査所の伊豆・小笠原航海 79-2, 79-3, 79-4 測線と、Fred Moore cruise 3505, 3507 測線については、報告書等の地震探査断面を拡大/縮小・編集し、JNOC/JOGMEC の震探断面と同じスケールに印刷して解釈に用いた。

1-2) 深海掘削孔と海底試料

震探解釈のコントロールとして用いた本海域の深海掘削孔を表 3 に、海底採取試料を表 4 に、それらの位置を図 1 に示す。DSDP, ODP 孔のほかに、静岡県沿岸部のコントロールとして JNOC の基礎試錐相良, 基礎試錐南海トラフ, 基礎試錐御前崎沖 (加藤ほか, 1989) を用いた。海底採取試料としては大水深基礎調査で取得された

表 3 震探解釈に用いた掘削孔.

Table 3 Drilling holes used for seismic interpretation.

Area	Reference
伊豆・小笠原海域 ODP Leg 125 Site 782, 783, 784, 785, 786 ODP Leg 126 Site 787, 788, 790, 791, 792, 793	Fryer <i>et al.</i> , 1990 Taylor <i>et al.</i> , 1990a; Shipboard Scientific party, 1990a, b
四国海盆 DSDP Leg 58 Site 442, 443, 444; ODP Leg 131 Site 808; Leg 190 Site 1173, 1174	Shipboard Scientific party, 1980a, b, c, 2001, 2002a, b
九州・パラオ海嶺 DSDP Leg 31 Site 296; DSDP Leg 59 Site 446	Shipboard Scientific party, 1975, 1980d
静岡県沿岸部 基礎試錐 南海トラフ, 基礎試錐 御前崎沖, 基礎試錐 相良	加藤ほか, 1989

表 4 震探解釈に用いた海底および陸上試料.

Table 4 Ocean bottom and onshore samples used for seismic interpretation.

Sample	Reference
大水深基礎調査 BMS/ドレッジ試料	Ishizuka, <i>et al.</i> , 2009, 2011
しんかい潜航調査試料	Ishizuka, <i>et al.</i> , 1998, 2006a, 2006b, 2009; 岡村ほか, 2007; 坂本ほか, 2001; 湯浅・村上, 1985
地質調査所ほかによるドレッジ試料	碓・西村, 1991; 石井ほか, 2000; Ishizuka, <i>et al.</i> , 1998, 2003; 西村ほか, 1997; 湯浅ほか, 1999
海域地質図	本座ほか, 1982; 湯浅ほか, 1982
小笠原諸島の陸上地質	Ishizuka, <i>et al.</i> , 2006a; 氏家・松丸 1977; 海野ほか, 1988

試料のほかに, 「しんかい 2000」「しんかい 6500」の潜航調査試料と, 地質調査所ほかによるドレッジ試料の年代データを参照した。また海域地質図(本座ほか, 1982; 湯浅ほか, 1982), および島の陸上地質(氏家・松丸, 1977 など)を震探解釈に用いた。

2) 解析手法

2-1) 震探 Unit の設定

Higuchi *et al.* (2007) を踏襲し, Mitchum *et al.* (1977) の震探層序学的手法を用いて震探相の特徴から震探シーケンス境界を抽出し, 近接する深海掘削孔と海底試料の岩相・年代層序との対比により, 音響基盤と海底面を含めて広域に追跡

できる 7 つの震探ホライズンを設定し, 下位から上位へ Unit I から Unit VI までの 6 つの震探 Unit に区分した。音響基盤については上位の震探 Unit から, 古第三系の基盤と推定されるものと, 新第三系より新しい火山岩からなると推定されるものを区別し, それぞれ Dark Green と Red ホライズンとした(図 3)。

2-2) 震探 Unit と深海掘削孔の対比

ODP の報告書で深海掘削孔と震探との対比がなされている場合はそれに従った。音波検層や坑井速度測定を入手できた深海掘削孔ではそれに基づき時間-深度カーブ(T-D カーブ)を作成し, 速度データのない深海掘削孔については近傍の震

Seismic Unit name	Horizon name	Horizon name	Seismic Unit name	Seismic reflection pattern	Correlated Age	Representative Lithology	Higuchi et al. 2007
Backarc	Backarc Seabed	Forearc Seabed	Forearc				
VI	Orange	Orange	VI	parallel, continuous, downlap	Quaternary	volcanics, vitric clay	V
V	Pink	Pink	V	subparallel to parallel, continuous, onlap, volcanic mound	Pliocene	volcanics, vitric clay	
IV	Green	Green	IV	subparallel to wavy, volcanic mound discontinuous high amplitude	Middle to Late Miocene	volcanics, vitric clay	IV
III	Red	Brown	III	parallel, continuous, low amplitude	Latest Oligocene to Early Miocene	hemipelagic carbonate, clay	IV
Red Horizon		Magenta	II	parallel, discontinuous, high amplitude	Oligocene	turbidite	III
		Dark Green	I	onlap, divergent, sub parallel	Late Eocene to Early Oligocene	turbidite, debris flow	II
				chaotic	Paleogene Basement	andesite	

図 3 解釈した震探 Unit/ホライズンの震探相と対比される時代、岩相。

Fig. 3 Interpreted seismic unit/horizons and their seismic facies, correlated age, and lithofacies.

探測線の重合速度から T-D カーブを作成し深海掘削孔と震探の対比に用いた。図 4 に音波検層の積算および震探重合速度に基づく T-D カーブの例を示す。

震探 Unit と深海掘削孔対比の例として ODP Leg 126 Site793 とその直上を通る震探 Fred Moore Line 12 との対比を図 5 に示す。本報告では震探 Unit を Higuchi *et al.* (2007) にならない下位から番号を付けたのに対し、ODP では層序の上位から番号を付けている。これらを区別するために以下本報告での震探層序を“Unit”とアルファベットで、ODP コアの層序を“ユニット”とカタカナで記す。

ODP Leg 126 Site793 は鳥島北東約 85 km の小笠原トラフの北西縁の水深 2975 m の地点で海底面から深度 1682 m まで掘削された。層序は岩相に基づき上位からユニット I から VII に区分され、微化石と放射年代から年代層序が得られている (Taylor *et al.*, 1990a)。図 5 の震探の中央に Cooper *et al.* (1992) によるコアと震探との対比結果を、震探の両脇に本報告での震探 Unit との対比を示す。コアのユニット I (第四紀) は軽石に富む火山灰からなり、震探では現在の海底地形に対応したチャンネルやダウンラップする反射波が認められる震探 Unit VI に対比した。その下位のコアが採取されていない区間のうち、反射面がほ

ぼ水平で振幅が弱く部分的に下位を削り込む震探シークエンスを Unit V とした。中新世の安山岩シルで下限されるコアユニット II を、振幅が強く連続する震探 Unit IV に、初期から中期中新世の石灰質ナノ化石に富む泥岩よりなるコアユニット III と IV は、反射波が平行で弱い震探 Unit III に対比した。漸新世の凝灰質砂岩と泥岩よりなるコアユニット V の上半部を、反射波が波状で振幅が中程度の震探 Unit II に対比し、より粗粒で礫岩が増す前期漸新世のユニット V の下半部とユニット VI を、振幅が強くダウンディップに向かい厚くなる震探 Unit I に対比した。中期中新世の安山岩類と火砕岩からなるコアユニット VII は、その上限を音響基盤の Dark Green ホライズンとした。同様にして対比した震探 Unit と深海掘削孔の対応と図 6 に示す。

3) 震探 Unit と海底採取試料との対比

海底採取試料を用いた震探 Unit 設定の例を図 7 に示す。四国海盆東縁では西七島海嶺に属する承応海山と西承応海山の岩石からそれぞれ 8.1 Ma と 8.6 Ma の K-Ar 年代が得られている (Ishizuka *et al.*, 2003) ので、これらの海山頂部を中期から後期中新世相当の Unit IV 上限に対比した。火山体の中心部では火山体内部からの反射波がほとんどみえないが、火山の裾野に向かうにつれて火山体内部の成層構造が次第にみえて

図 4 時間-深度カーブ (T-D カーブ).
ODP Leg 126 Site 782, 793 孔の音波検層の積算から求めた T-D カーブと、小笠原トラフでの震探重合速度に基づく T-D カーブ。

Fig. 4 Time Depth curve.

T-D curves are generated from sonic log of ODP Leg 126 sites 782 and 793. T-D curves are also generated from stacking velocity of seismic lines crossing the Ogasawara Trough.

くる。西承応海山の火山岩体の四国海盆側への延長を Unit IV とし、これにオンラップする震探シーケンスを上下に二分し Unit V と Unit VI とした。また火山岩体の成層構造の下底およびその延長より下位で音響基盤との間の震探シーケンスを Unit III に対比した。これらの震探シーケンス区分は加藤 (1992) が同じく西承応海山から四国海盆にかけて海上保安庁が取得した MCS 震探を用いて解析した震探層序区分と同様の結果となった。

4) 震探解釈と等時間層厚図の作成

SEGY 形式データのある測線については震探解釈ワークステーションを、SEGY データのない測線については紙の震探断面図を用いて地質解釈を行った。その後各測線での各震探 Unit の時間層厚を読みとり、海底地形図と他 Unit の層厚図を参照して等時間層厚図を作成した。

III. 結 果

1) 層序

代表的な東西震探断面として、図 7 に背弧側の四国海盆から西七島海嶺を横切る Profile (Prof.) 4 の西部を、図 8 に七島・硫黄島海嶺から前弧堆積盆を横切る Prof. 4 の東部を、図 9 に前弧堆積盆の小笠原トラフから前弧隆起帯の小笠原海嶺を横切る Prof. 8 を、図 10 に背弧凹地のスミス海盆を東西に横切る Fred Moore Line 4 を示す。

伊豆・小笠原前弧の震探相は図 9 でみられるように、振幅弱く平行な反射波を特徴とする Unit III を境として、下位と上位の二つの震探シーケンスに大別される。古い時代のリフトにより形成された堆積盆が埋められた上位に、新しい堆積盆が重なった“二階建て”構造とみなせる。下位のシーケンスをさらに Unit I と II の二つに、上位を Unit III, IV, V, VI の 4 つの震探 Unit に細分した。主要な東西時間解釈断面を図 11 と 12 に、南北断面を図 13 に示す (断面位置は図 1 参照)。本章では図 3 で示した各震探 Unit の設定と特徴、ならびにコア等地質試料との対比による層序を記す。

1-1) 音響基盤

震探で堆積層と解釈される成層反射波の下限を音響基盤とした。前弧側では図 9 にみられる片側あるいは両側を正断層で境されるホルスト・グラベンの上限をなす音響基盤を Dark Green ホライズンとした。上位層にオンラップされる例が多い。音響基盤以深の反射波は細切れで連続性に乏しくカオティックで振幅は中程度である。

コア等地質試料との対比の結果は次の通りである。小笠原海嶺上の父島には中期始新世から漸新世のボニナイト、デイサイト、安山岩が分布する

図 5 ODP Leg 126 Site 793 の岩相層序と Fred Moore Line 12 時間マイグレーション断面, および震探 Unit/ホライズンの対比. Cooper ほか (1992) の対比図 (震探中央部) と, 本報告での震探 Unit とホライズンの対比を示した.

Fig. 5 Correlation of the ODP Leg 126 Site 793 lithostratigraphy with the Fred Moore Line 12 time migrated seismic section, and with seismic units and horizons in this study. The central part is after Cooper *et al.* (1992). The seismic units and horizons in this study are correlated to the Site 793 lithostratigraphy.

図 6 DSDP/ODP 孔の掘削層準と本報告の震探 Unit との対比. 斜め斜線は削剥された層準, X 印はコアが回収されなかった層準.

Fig. 6 Correlation between DSDP/ODP core stratigraphy and seismic units in this study. Diagonal line: eroded strata, cross line: core not recovered.

(海野ほか, 1988; Ishizuka *et al.*, 2006a)。母島では始新世の安山岩・玄武岩が中期始新世の大型有孔虫ヌムリテス石灰岩、砂岩に覆われる(氏家・松丸, 1977)。前弧海盆東方の海溝との間で掘削された ODP Leg 125 Site 786 では 45 Ma のボニナイトを中期始新世の砂岩礫岩が覆い、Site 782 では 46 Ma の玄武岩を後期始新世の石灰質ナノ化石からなる石灰岩が覆う (Fryer *et al.*, 1990)。前弧海盆で掘削された ODP Leg 126 Site 792 と 793 の安山岩からそれぞれ 40.4 Ma と 42.8 Ma の年代が報告されている (Ishizuka *et al.*, 2011)。小笠原トラフ西縁に位置する大町海山では 32–34 Ma の安山岩(湯浅ほか, 1999)と 39.7 Ma の石灰岩(西村ほか, 1997)が採取されている。これら中期始新世から前期漸新世の火山岩類上限を Dark Green ホライズンに対比した。音響基盤で深のカオティックな反射波は火山岩体の内部反射であろう。

七島・硫黄島海嶺とその西側では図 7 のように古第三系の存在が知られていないので音響基盤を区別して Red ホライズンとし、新第三系以降の火山の基底に対比した。

1-2) Unit I (後期始新世から前期漸新世)

図 8 や図 9 の震探の例で示されるように、前弧堆積盆深部には南北に伸びるホルストが数条あって、その間のグラーベンを往復走時 0.5 秒から最大 3 秒(層厚約 500–5000 m 超)の堆積物が埋める。グラーベンを埋め立てる堆積物を震探相から下部の Unit I と上部の Unit II に二分し、その境を Magenta ホライズンと設定した。

Unit I は音響基盤の Dark Green ホライズンにオンラップする振幅の強いほぼ平行だが断続的な反射面からなる。ハーフグラーベンを埋める例が多く、グラーベンの深い側ではホルストをなす音響基盤と正断層で接し、浅い側では音響基盤にオンラップし、グラーベンの底に向かい層厚を増す Divergent な反射波からなる。また平行な反射から音響基盤のカオティックな反射へと横方向に漸移する箇所もある。層厚変化が大きく、反射波の Divergent な形態からリフト形成初期のグラーベンが急速に沈降しつつある時期に堆積した

シンリフト (Syn-rift) 堆積物と判断した。

コアとの対比は次の通りである。ODP Leg 126 Site 793 コアの 1200 m から 1373 m のガラス質砂岩と 1373 m から 1404 m の火山角礫岩を震探 Unit I に対比した(図 5)。ホルスト上で掘削された Site 793 での年代は前期漸新世であるが、グラーベン下部では Unit I はより古い後期始新世からはじまると推定した。

震探相から推定される岩相は、火山岩体と指交する断続的な反射を示す箇所では比較的粗粒の火山碎屑物を主体するデブリフローが卓越し、グラーベン中央の連続性のよい反射を示す箇所ではタービダイト砂泥互層である。大町海山で採取された 39.7 Ma の大型有孔虫を含む石灰岩(西村ほか, 1997)については Unit I に対比した(図 9)。小笠原海嶺上では波状で振幅が弱く低周波でやや透明な震探相を陸上地質から類推して始新世の浅海性の石灰岩ないしは火山碎屑物と解釈し Unit I に対比した(図 9)。

1-3) Unit II (漸新世)

Unit II は Unit I に比べ連続性よく成層した振幅の強い反射を示し下位の凹凸を埋めてより広く分布し Brown ホライズンで上限される(図 9)。グラーベン内の層厚は縁辺部を除きほぼ一定で、グラーベンの堆積中心に向かいやや厚くなる反射パターンを示すことから、リフトに伴う堆積盆の急激な沈降が一段落した後の緩やかな沈降期に堆積したシンリフト末期からポストリフト (Post-rift) 期の堆積物と解釈した。

コアとの対比は次の通りである。Unit II は ODP Leg 126 Site 793 では 759 m から 1200 m の漸新世の凝灰質砂岩(図 5)に、Site 792 では 429 m から 804 m 間の漸新世の凝灰質砂岩とシルト岩/泥岩の互層で礫岩を挟むタービダイト相に対比される。このほかに前弧堆積盆内の Site 787、前弧隆起帯より東側の Site 782、786 で漸新世のタービダイトがあって、これを Unit II に対比した(図 6)。震探相から推定されるグラーベン部での Unit II の岩相は Unit I と同様であるが粗粒相が減りより細粒と解釈した。堆積速度は震探 Unit I から II にかけて約 300 m/m.y. と大

図 7 (Fig. 7)

図 8 (Fig. 8)

きいが後期漸新世の 28 Ma ころから次第に小さくなる (図 2)。

1-4) Unit III (漸新世末期から前期中新世)

伊豆・小笠原弧の前弧側の Unit III は Unit II を整合に覆って Unit II が埋め切れなかった凹地を埋めるように分布し Green ホライズンで上限される。Unit III の反射波は平行で Unit II よりさらに連続性よく成層するが、振幅が弱く波長の短い細かい反射波からなり、しばしば透明にみえ、層厚変化は小さい特徴をもつ (図 5, 図 8, 図 9)。

コアとの対比は次の通りである。Unit III は ODP Leg 126 Site 793 (図 5) と Site 792 で漸新世末期から前期中新世の石灰質ナノ化石に富む石灰質泥岩に対比される。火山物質に乏しく堆積速度は 4-14 m/m.y. と遅い (図 2, 藤岡ほか, 1991; Taylor, 1992)。震探相の特徴から、Unit III は火山活動と堆積盆の沈降が終息した比較的静穏な時期にゆっくりと堆積した、石灰質ナノ化石など生物起源の細粒堆積物を主体とすると解釈される。

伊豆・小笠原弧の背弧側の Unit III は、西七島海嶺をなす火山体とその延長をなす Unit IV より下位の、音響基盤との間の震探シーケンスである。図 7 に例を示す。反射波は波状で振幅大きく前弧側に比べ連続性にやや乏しく、層厚はホルストの間の凹地で厚い。

コアとの対比は次の通りである。パレスベラ

海盆の北緯 18 度東経 141 度付近で掘削された DSDP Site 53 (Shipboard Scientific Party, 1971) では漸新世から前期中新世の石灰岩と玄武岩の互層 (ユニット E) を厚さ 21 m のチョーク層 (ユニット D) が覆う。震探測線から離れているので対比できていないが、これらの石灰岩とチョーク層は四国海盆側の Unit III に対比される可能性がある。

1-5) Unit IV (中期中新世から後期中新世)

Unit III によりほぼ埋め立てられた古い堆積盆を覆って西七島海嶺と七島・硫黄島海嶺をおもな供給源とする若い堆積物がより広範囲に分布する。堆積層中には不整合を伴う何枚かの震探シーケンス境界が認められ、そのなかで広範囲に追跡可能な Pink ホライズンと Orange ホライズンにより堆積物を下位から Unit IV, V, VI の 3 つの震探 Unit に三分した。

Unit IV の反射波は、下位の Unit III と対照的に、連続性と平行性が劣り、傾斜変化が大きく波状 (wavy) から上に凸の小丘状 (hummocky) の強反射を示す (図 9)。上限の Pink ホライズンは深海掘削や海底試料による年代層序を参照し、鮮新統基底付近で広域にわたり追跡可能な不整合面とその延長の震探シーケンス境界に設定した (図 8)。

コアとの対比は次の通りである。前弧側の Unit IV は、ODP Leg 126 Site 792 では深度 184-357 m の細粒から粗粒のガラス質砂岩、泥質砂岩、およ

図 7 Profile 4 West (JNOC 78-4 西部) 時間マイグレーション地震探査断面の震探解釈。

矢印は海底試料の採取位置と年代 (Ishizuka *et al.*, 2003) を示す。Volcanic Center: 震探から火山の中心と推定したカオティックな反射を示すマウンド状の高まり。全体像については図 11 Prof. 4 を参照。SP: Shot point.

Fig. 7 Time-migrated seismic section of the western part of Profile 4 (JNOC 78-4 line) showing with interpretation.

Arrows show the locations of ocean bottom samples and their age data (Ishizuka *et al.*, 2003). Volcanic Center: Center of the volcano estimated from mound shaped and chaotic seismic reflection. The entire cross-section is shown in Fig. 11, Prof. 4. SP: Shot point.

図 8 Profile 4 East (JNOC 78-4 東部) 時間マイグレーション地震探査断面の震探解釈。全体像については図 11 Prof. 4 を参照。SP: Shot point.

Fig. 8 Time-migrated seismic section of the eastern part of Profile 4 (JNOC 78-4 line) showing with interpretation. The entire cross-section is shown in Fig. 11, Prof. 4. SP: Shot point.

図 9 (Fig. 9)

図 10 (Fig. 10)

びシルト質粘土岩よりなりなり、下位に比べ火山起源物質が増す中部から上部中新統（藤岡ほか, 1989）に対比される。新黒瀬のドレッジで採取された約 6 Ma の玄武岩（湯浅・村上, 1985）を Unit IV 上部に対比し Pink ホライズン直下とした。Pink ホライズンについては以下の不整合面に対比した。ODP Leg 126 site 787 は、青ヶ島東方 95 km の青ヶ島海底谷の水深 3255 m で海底下 320 m まで掘削された（Shipboard Scientific Party, 1990a）。下部鮮新統から上部中新統のガラスに富む石灰質軟泥（21-40 m）が、不整合で中部中新統を欠き、上部漸新統の石灰質泥岩、凝灰質砂岩、礫岩よりなる下位層（40-320 m）を覆う（図 6）。この鮮新統基底付近の不整合を Pink ホライズンに対比し、震探 Unit III の上位に Unit IV を欠いて Unit V が重なるとした。図 8 では明神海丘の東方で Pink ホライズンの削り込みが認められる。図 5 では震探右端往復走時 4.4 秒付近で不整合面が認められる（Cooper *et al.*, 1992）。

背弧側では図 7 の例のように、西七島海嶺の海山頂部で後期中新世の年代が得られている箇所をコントロールとし、成層火山体の上面とその延長を Pink ホライズンとした。

震探相から Unit IV は、四国海盆拡大後に活動を開始した伊豆・小笠原弧起源の火山碎屑物を主体とし、西七島海嶺（図 7）や明神海丘（図 8）付近での強反射部は比較的粗粒、離れた弱反射部は細粒で微化石起源の炭酸塩を多く含むと推定される。震探からその時代の火山の中心と推定したカオティックな反射を示すマウンド状の高まりを

Volcanic Center とした（図 7）。

1-6) Unit V（鮮新世）と Unit VI（第四紀）

海底地形と調和的で、現世の火山噴出物の下限とみなされる震探シーケンス境界を Orange ホライズンと設定して第四系下限に対比した。Unit V は Orange ホライズン以深で、Pink ホライズンより上位の震探シーケンスとして設定した。Unit VI は Orange ホライズン以浅の海底との間のシーケンスで第四系に対比できる。図 8 に例を示す。Unit VI は現世の火山の近くでは波長の短い高周波の火山成層の反射を示し、波の連続性はよいが、所により現在の海底地形に対応したダウンラップやチャンネル状の堆積構造を示す。火山フロントから離れた海域や四国海盆では海底地形と平行で低周波で透明な反射を示す。

コアとの対比は次の通りである。スミス海盆を横切る Fred Moore Line 4 を図 10 に示す。スミス海盆で掘削された ODP Leg 126 Site 791 では第四紀に対比される厚さ 428 m の軽石層と下位の厚さ 406 m の石灰質ナノ化石に富む泥岩が更新統の玄武岩類を覆う（Taylor *et al.*, 1990a）。玄武岩類を音響基盤 Red ホライズンに対比し、軽石層と泥岩層を Unit VI に対比した。Site 790, 788 でも同様の層序であり、これらを Unit VI に対比した。

火山フロントから前弧海盆を横切る震探の例を図 8 に示す。ここでは明神海丘に向かって傾く東西約 50 km、南北約 120 km のカルデラ状陥没構造が認められ、その堆積層を震探相から三分した。Unit IV は上位を不整合面で削られ、西傾斜

図 9 Profile 8 (JNOC 79-4) 時間マイグレーション地震探査断面の震探解釈。

矢印は海底試料の採取位置と年代 (39.7 Ma : 石灰岩, 西村ほか, 1997 ; 31.9 Ma : 安山岩, 湯浅ほか, 1999) を示す。全体像については図 11 Prof. 8 を参照。SP : Shot point.

Fig. 9 Time-migrated seismic section of Profile 8 (JNOC 79-4 line) showing with interpretation.

Arrow shows ocean bottom samples and their age data from Nishimura *et al.*, 1997 (39.7 Ma, limestone) and Yuasa *et al.*, 1999 (31.9 Ma, andesite). The entire cross-section is shown in Fig. 11, Prof. 8. SP: Shot point.

図 10 Fred Moore Line 4 時間マイグレーション地震探査断面の震探解釈。

震探は Taylor *et al.*, 1990b による。緑丸 : ODP Leg 126 孔。SP : Shot point.

Fig. 10 Time-migrated seismic section of Fred Moore line 4 showing with interpretation.

The seismic Section is adopted from Taylor *et al.*, 1990b. Green circle: ODP Leg 126 hole. SP: Shot point.

図 11 伊豆・小笠原弧の解釈時間断面図（東西その 1）。断面位置図は図 1 を参照。

Fig. 11 Interpretation of E-W time sections across the Izu-Ogasawara Arc, part 1. Locations of profiles are shown in Fig. 1.

図 12 伊豆・小笠原弧の解釈時間断面図（東西その 2）。断面位置図は図 1 を参照。

Fig. 12 Interpretation of time sections across the Izu-Ogasawara Arc, part 2. Locations of profiles are shown in Fig. 1.

図 13 伊豆・小笠原弧を南北に縦断する解釈時間断面図。断面位置図は図 1 を参照。
Fig. 13 Interpretation of time sections along the Izu-Ogasawara Arc. Locations of profiles are shown in Fig. 1.

の断続的な反射波を示す。Unit VはUnit IVの凹地を埋めてPink ホライズンにオンラップする連続性のよい反射波を示す。Unit VIは明神海丘周辺では海底地形と調和的なOrange ホライズンにダウンラップする連続性のよい第四紀火山噴出物を主体とし、発震点(Shot point, SP) 3600 付近の斜面では波状で連続性悪く、おそらく再移動堆積物からなると推定される。Unit IV内には小さな正断層が数多く発達するがUnit Vまでは切っておらず、これらの正断層はUnit IVの陥没時に形成され、その陥没地形をUnit Vが埋めたと解釈した。

礫岩南西方の背弧海丘帯には小規模な火山が約370個分布し、その活動年代は、南西側ほど古く(最大8.7 Ma)北東に向かい新しくなる(2.6 Ma)(岡村ほか, 2007)。本報告ではこれに従い最南西部を除く背弧海丘帯の主要部を鮮新世に対比して、Unit Vとした。

各震探Unitと深海掘削孔との対比結果を図6に示す。

2) 各Unitの分布と層厚変化

2-1) 全堆積量

堆積盆の層厚分布の変遷から発達史を検討する目的で、各震探Unitの等時間層厚図(アイソクロンマップ)を作成した。各時代の堆積物の分布はその時代の海底地形と供給源推定の根拠となる。

全堆積物のアイソクロンマップを図14に示す。伊豆・小笠原海域では七島・硫黄島海嶺で薄く前弧と背弧で厚い。往復走時2秒以上の堆積物が分布するのは、伊豆・小笠原前弧と駿河トラフから南海トラフにかけて、および関東平野南部である。以下各海域での全堆積物分布についての概略を記し、次節で各時代ごとの堆積物の分布について記す。

調査海域東縁の父島・母島を含む小笠原海嶺上には往復走時0.5から0.8秒の堆積物が分布する。前弧堆積盆は七島・硫黄島海嶺の東側に位置し、東西約50 kmの幅で硫黄島東方から小笠原トラフを経て房総沖まで1000 km以上連続し、古第三紀以降の堆積物が軸部では往復走時2-3.5秒(層厚約2500-6000 m超)あって、相模トラフ

に沈み込んでいる(図13, Prof. 19)。関東平野の堆積盆とは葉山-嶺岡隆起帯とその南側の付加体で隔てられる(高橋, 2006a)。七島・硫黄島海嶺は現在の火山フロントであり、火山起源の堆積物は火山を中心として東側に厚い箇所が多い。七島・硫黄島海嶺と西七島海嶺の間は堆積物が往復走時1秒より薄く、とくに背弧海丘帯にはほとんど堆積物が分布しない。例外として八丈島と西七島海嶺の間(Prof. 2と3の間)では堆積物が厚いが、これは三宅島、八丈島方面から供給された火山起源堆積物が西七島海嶺の高まりに堰き止められた結果と解釈される(図11, Prof. 2)。また礫岩構造線より南側の西之島トラフも往復走時1秒以上で厚い(図12, Prof. 11, 12, 13, 15)。西七島海嶺は中期から後期中新世の火山列であり、震探でそれぞれ成層した火山岩体が認められる。堆積層は火山中心部では火山本体の溶岩と指交ないしは側方変化して薄い、その周囲で厚い(図11, Prof. 3, 4, 5, 6, 8; 図12, Prof. 11)。

四国海盆では、西七島海嶺の西側の裾野が四国海盆に伸びる部分で堆積層の往復走時1-2秒と厚い。七島・硫黄島海嶺側より供給され一度西七島海嶺で堰き止められた堆積物は、西七島海嶺の切れ目を通り四国海盆側に供給されている。おもな供給路としては、寛永海山列の北側、万治海山列と延宝海山列の間などが推定される。四国海盆には数条の南北に伸びる東西約10 km幅の基盤の高まりがあって、そこでは堆積物が薄い。最も顕著な高まりは西斜面が紀南海底崖を形成するホルストで、西七島海嶺側から供給された堆積物はここで堰き止められ(図12, Prof. 16)、紀南海底崖より西側では堆積層の厚さが急減し0.5秒以下となり、北緯28度より南では西側でほとんどゼロとなる。堆積物の厚さが急減する境界は、紀南海底崖にそって北緯30度から礫岩構造線の南西延長の北緯25度40分までは直線的に追跡できるが、それより南では礫岩構造線と平行なNNE-SSW方向に伸びる数条の断層セグメントで折り返す。

2-2) Unit I & II (後期始新世から漸新世)

後期始新世から漸新世に対比されるUnit Iと

図 14 アイソクロンマップ：全堆積量。

赤三角：第四紀の火山，緑丸：DSDP/ODP 孔。Accretionary prism：中期中新世以降の付加体，境界は高橋（2006a）による。

Fig. 14 Isochron map: Total Thickness.

Red triangle: Quaternary volcanoes, Green circle: DSDP/ODP hole. Accretionary prism: Accretionary prism since the Middle Miocene, after Takahashi (2006a).

Unit II をあわせたアイソクロンマップを図 15 に示す。七島・硫黄島海嶺と小笠原海嶺に挟まれる小笠原トラフとその南北延長部で厚い。これは NNE-SSW と NNW-SSE の 2 方向の正断層により境された古第三紀のリフトが雁行して、ジグザグに配列することを示す (図 15 左図)。層厚のコントラストはリフト内のホルストとグラーベンの分布を示す。ホルストの広さは平均東西 10-20 km, 南北 20-50 km あって、NNE-SSW あるいは NNW-SSE に細長く伸びたひし形の形状を示す。

新黒瀬の地形的高まりは、本海域で小笠原海嶺に次ぐ高い正の重力異常を示すことから小笠原海嶺同様の古第三系の高まりと考えられている (本座, 1985; 湯浅・村上, 1985 など)。本報告でも新黒瀬周辺の音響基盤が小笠原トラフ深部で見られるものに似たホルスト・グラーベン構造を示すことから (図 11, Prof. 2), これを Dark Green ホライズンに対比し、新黒瀬を古第三系の火山岩からなるホルストの高まりと解釈した。同様に震探と海底地形から判断して大町海山 (海底地形は図 1, 震探は図 9), 母島・父島を含む小笠原海嶺, および母島海山は古第三紀のリフトにより形成されたホルストと解釈した。小笠原海嶺はいくつかのホルストの集合体とみなされる。これら数条のホルストに挟まれるグラーベンを往復走時 0.5 秒から最大 3 秒 (層厚約 500-5000 m 超) の古第三系, おそらくおもに漸新世の火山起源堆積物とタービダイト砂岩泥岩が埋める。図 13 Prof. 19 に前弧海盆を南北に縦断する JNOC 78-A&79-B 測線の解釈断面図を示す。音響基盤の凸部は Dark Green ホライズンの火山岩よりなるホルストであり, 凹部のグラーベンは Unit I と II に埋め立てられ, 相模トラフに沈み込む。ホルストの凸部はプレート境界のアスペリティーに影響するであろう。父島・母島を含む小笠原海嶺上には, 始新世後期の火山噴出物と浅海性の石灰岩と推定される堆積物が 0.5 秒から 0.8 秒の厚さで分布する (図 9, 図 12)。

小笠原海嶺の南端の北緯 26 度東経 142 度付近で, 層厚部の軸は北北東と北北西の二股に分か

れ, 東の軸は NNE-SSW 方向に伸び母島海山の南西に抜ける。藤岡ほか (2005) は, 母島海山は元来小笠原海嶺の延長としてその南端部に位置しており, パレスベラ海盆の拡大により生じた NE-SW 方向のトランスフォーム断層により現在位置に移動したと推定した。筆者らは小笠原海嶺南端部での全堆積量 (図 14) および Unit I, II のアイソクロンマップ (図 15) での二股状の層厚分布は, Unit II 堆積以降に母島海山を含むリフト堆積盆が右横ずれしたことに起因すると解釈し, 藤岡ほか (2005) の説を支持する。

房総半島から三浦半島に分布する葉山-嶺岡帯には古第三系のチャート質石灰岩, 頁岩, 砂岩頁岩互層などの堆積岩類や, 安山岩, 玄武岩, 蛇紋岩化作用を受けた超苦鉄質岩類などが分布している (高橋, 2006a)。嶺岡帯のオフィオライト的な岩石の起源については, 伊豆・小笠原・マリアナ弧の前弧域にみられるような蛇紋岩海山の北方延長とする説 (藤岡ほか, 1995) と, 失われた第三紀の海洋プレート (嶺岡プレート) を起源とする説 (Ogawa and Taniguchi, 1988 など) がある。嶺岡帯と類似の岩相が前弧海盆の ODP や大町海山などで認められ, これに対比した Dark Green ホライズンと Unit I と II の分布が, 震探により嶺岡帯の南約 50 km の相模トラフまで追跡できることから, 筆者らは藤岡ほか (1995) の説をとり, 嶺岡帯は現在のフィリピン海プレート上の古第三系が本州に付加したものと判断した。

2-3) Unit III (漸新世末期から前期中新世)

前弧側の Unit III は Unit II を覆い地層厚の変化は少ない (図 16)。岩相は石灰質ナノ化石に富む石灰質泥岩であり, 他層準と異なり火山起源物質に乏しい。背弧側では, Unit II が分布しない西七島海嶺と紀南海底崖の間に分布し, 音響基盤の凹部で厚く凸部で薄い。背弧側の Unit III は, 漸新世末期から前期中新世 (27-19 Ma) の四国海盆・パレスベラ海盆の拡大により新たに形成された海底の上に堆積したと解釈した。九州・パラオ海嶺の北部で掘削された DSDP Leg 31 Site 296 と南部で掘削された DSDP Leg 51 site 448 では Unit III に対比される地層があり, Hi-

guchi *et al.* (2007) が震探と対比している。図 16 の南西端に Site 448 から対比した Unit III の分布を示す。

2-4) Unit IV (中期から後期中新世)

伊豆・小笠原弧で再開した火山活動をおもな供給源とする Unit IV は下位層を覆うほかに、新たに西七島海嶺を中心に堆積する (図 17)。西七島海嶺には Volcanic Center とした火山岩体が震探で認められ、火山中心部ではおそらく溶岩が卓越しているために堆積層厚は薄い、火山をとり囲んだ部分で厚い。七島・硫黄島海嶺の青ヶ島から明神海丘の深部には、現在の明神海丘に向かい Unit IV と Unit V が厚化し沈降する巨大なカルデラ状の構造が認められる (図 8, 図 11, Prof. 3, 4, 図 13, Prof. 20)。中新世から鮮新世にかけて存在した火山が大量の噴出物を放出し陥没して、巨大なカルデラが形成されたと解釈した。背弧海丘帯の海域とスミス海盆には Unit IV は分布しない。新黒瀬では Unit IV は薄く、当時から高まりをなしていたためと考えられる。四国海盆の紀南海山列は 9 Ma (石井ほか, 2000), 10.4 Ma, 12.1 Ma (Ishizuka *et al.*, 2009) の年代により Unit IV 相当の火山と推定されるが、周囲への堆積物の供給は少ない。

現在の火山フロントから 150 km 以上東方の前弧で掘削された ODP Leg 125 site 782, 784, 786 や Leg 126 site 792 での岩相は、石灰質ナノ化石に富む凝灰質泥岩である。

房総半島沿岸と関東平野では、黒滝不整合より下位の三浦層群を Unit IV に対比しアイソクロンマップを作成した。東京湾から三浦半島のアイソクロンマップは鈴木 (2002) を参考にしている。南西に傾斜し深くなる本州前弧堆積盆に三浦層群が堆積したと考えられる。

2-5) Unit V (鮮新世)

Unit V は七島・硫黄島海嶺よりやや西側の火山を中心として、前弧から背弧にかけて分布する (図 18)。これより下位の Unit が七島・硫黄島海嶺付近で薄く前弧と背弧で厚かったのと対照的に、七島・硫黄島海嶺のやや西側にも分布する。震探からこの時代の火山の中心と推定した箇所を

Volcanic Center として記した。Unit IV のそれに比べ分布が東に移る。娯婦岩南西方の背弧海丘帯はこの時代の小規模な火山の集合であるが、堆積物がきわめて薄い。

2-6) Unit VI (第四紀)

Unit VI は七島・硫黄島海嶺を中心として厚く、前弧と背弧に向かい厚さを減じる (図 19)。古第三系の高まりである新黒瀬、中新統の高まりである西七島海嶺、および鮮新統の高まりである娯婦岩南西方の背弧海丘帯にはほとんど分布しない。現世の火山である七島・硫黄島海嶺から供給された堆積物の分布はより古い時代の高まりをよけて分布し、多くは東側の前弧側に分布するが、一部は西七島海嶺の隙間を通して西側の四国海盆に達する。娯婦岩構造線は南東傾斜の正断層で、その南東側上盤ブロックの西之島トラフで Unit VI が厚い。西之島トラフ深部では Unit IV と Unit V が北西に傾動沈降し、それを覆い Unit VI がほぼ水平に堆積する (図 12, Prof. 11, 12)。これより娯婦岩構造線の最新の活動は Unit V (鮮新世) 以降と判断される。南海トラフと相模トラフでは七島・硫黄島海嶺のほかに本州側からの堆積物供給があって厚い。

房総半島沿岸と関東平野については、Pink ホライズンに対比した黒滝不整合より上位の上総層群と下総層群をあわせたアイソクロンマップを作成した。Unit IV と比べて層厚の中心は北東に移る。Unit IV 堆積時には北で浅く南西に深かった堆積盆は、Unit VI 堆積時には北側に傾動しながら沈降したことにより、堆積中心が南から北へ移動したと推定する。高橋 (2006b) は房総半島の層序とフィリピン海プレートの動きをあわせて論じ、3 Ma ころの黒滝不整合の時期にフィリピン海プレートの移動方向が変化したとした。関東平野の Unit VI のアイソクロンマップは、この黒滝不整合の時期に隆起した嶺岡帯により南を境された堆積盆の形態を示すと筆者らは解釈する。

2-7) 厚い堆積物の起源

DSDP, ODP 深海掘削は前弧堆積盆の縁辺で掘削されたのみであることから、堆積盆中央部の厚い堆積物の岩相については震探相から推定する

ほかに方法がない。厚い堆積物の供給源としては、陸地、火山、生物の3つが想定される。

堆積物を供給した後背地の陸地としては、分裂前の九州・パラオ海嶺と父島・母島を含む古伊豆・小笠原弧が候補である。ODP Site 793 の漸新世のコアでは浅海成の石灰岩や植物片を含むタービダイトが採取され、陸地の存在を示す(藤岡ほか, 1989)。陸化した古伊豆・小笠原弧の火山岩や浅海成石灰岩が削剥されたと推定される。

東北日本の前弧堆積盆である常磐沖堆積盆では、白亜系から古第三系のデルタ相と陸棚相が震探で認められている(岩田ほか, 2002)。本検討でも同様のデルタ堆積相などの大きな陸地の存在を示唆する震探相を探した。しかし小笠原海嶺上に炭酸塩リーフ様の反射がある以外には認められず、ODP 等でもデルタ相には遭遇していないので、本海域に常磐沖堆積盆の後背地と同規模の陸地があった可能性は低い。

本海域では始新世から第四紀を通じて石灰質ナノ化石に富む泥岩が観察され、とくに漸新世末期から前期中新世の Unit III の過半は石灰質ナノ化石起源の炭酸カルシウムよりなる。ただし図2の堆積速度をみると火山活動の休止時には堆積速度が小さく、生物生産量だけでは厚い堆積層は期待し難い。

一方古第三紀から現在を通じて前期中新世の休止期を除けば火山活動があるので、火山起源の碎屑物が占める割合は大きいと推定される。前弧堆積盆の厚い堆積物の供給源としては火山噴出物と火山弧の陸地の削剥が大きく、次いで生物生産量であると考ええる。

IV. 伊豆・小笠原弧の構造発達史の考察

著者らは本海域の震探解釈より、Taylor (1992) が青ヶ島から鳥島周辺の前弧海盆と背弧リフトから解明した構造発達史が、房総沖から硫黄島までの広い海域におおむね適用できるとの結論に至った。

本海域の構造発達史は以下のようにまとめられる。図20に伊豆・小笠原海溝から九州・パラオ

海嶺までを東西に横切る Prof. 8 (JNOC 79-4 測線) とその西側の JNOC D98-6 測線に沿った各時代の復元地質断面図を示す。

1. 中期始新世：古伊豆・小笠原弧の誕生 (50–37 Ma)

始新世に古伊豆・小笠原弧の火山活動がはじまり、ボニナイトや安山岩などの溶岩と火山碎屑物の噴出により島弧が成長した。

2. 後期始新世から前期漸新世 (37–33 Ma) : 前弧のリフト

古伊豆・小笠原弧から小笠原海嶺およびその南北延長がリフトして、ホルストとグラーベンからなる前弧堆積盆の原型が形成された。小笠原海嶺や母島海山、大町海山などはこの時期に形成されたホルストである。古伊豆・小笠原弧の火山活動は継続し、一方沈降が続くグラーベン部には火山碎屑物に富むシンリフト堆積物の Unit I が、速い堆積速度で厚く堆積した。

3. 漸新世 (33–25 Ma) : シンリフトからポストリフト期

安山岩主体の火山活動は続くが、前弧堆積盆の沈降は次第に小さくなってシンリフト期からポストリフト期に移行する。下位の Unit I に比べ層厚変化の少ない Unit II の凝灰質砂岩・泥岩が古伊豆・小笠原弧から供給されて、グラーベンを埋めた。

4. 漸新世末期から前期中新世 (25–17 Ma) : 四国海盆の拡大

古伊豆・小笠原弧から九州・パラオ海嶺が分離し、四国海盆・パレスベラ海盆が拡大した。四国海盆の拡大に伴い、紀南海底崖などの南北に伸びる断層で境されるホルストとグラーベンが形成された。両海盆の拡大中はこの海域の火山活動は休止し、石灰質ナノ化石を主体とする遠洋性の泥岩からなる Unit III がそれ以前の海底の凹凸を埋めて遅い堆積速度(図2)で堆積した。

5. 中期から後期中新世 (17–5 Ma) : 新伊豆・小笠原弧の誕生

四国海盆拡大終了から西七島海嶺の火山活動がはじまり、活動は次第に東に移動した。

図 15 アイソクロンマップ：Unit I + Unit II
(後期始新世から漸新世)。
NNE-SSW と NNW-SSE 方向の断層に境された
リフトが雁行しジグザグに配列する (左図)。
Fig. 15 Isochron map: Unit I + Unit II (Late
Eocene to Oligocene).
Rift basins are bounded by NNE-SSW and NNW-
SSE direction faults, and exhibit *en echelon* and
zigzag geometry.

図 16 アイソクロンマップ：Unit III (漸新世
末期から前期中新世)。
Fig. 16 Isochron map: Unit III (Latest Oligocene
to Early Miocene).

図 17 アイソクロンマップ：Unit IV（中期から後期中新世）
Volcanic Center：震源から推定された同時代の火山の中心。

Fig. 17 Isochron map: Unit IV (Middle to Late Miocene).

Volcanic Center: Center of the volcano of this stage estimated from seismic sections.

図 18 アイソクロンマップ：Unit V（鮮新世）
Fig. 18 Isochron map: Unit V (Pliocene).

図 19 アイソクロンマップ：Unit VI（第四紀）
Fig. 19 Isochron map: Unit VI (Quaternary).

図 20 伊豆・小笠原弧の構造発達史。

Profile 8 (JNOC 79-4 測線) と JNOC D98-6 測線に沿った東西断面での各時代の復元地質断面図を示す。新第三系以浅の音響基盤を古い順に Neogene 1, 2, 3 に区分した。

Fig. 20 Tectonic evolutionary history of the Izu-Ogasawara Arc.

Restored cross-section along Profile 8 (JNOC 79-4) and JNOC D98-6 lines. Acoustic basements younger than Neogene are labelled Neogene 1, 2, and 3 from older to younger.

これらの火山起源の碎屑物を主体とする Unit IV が前弧海盆と四国海盆の凹地を埋めて堆積した。前のステージに比べて堆積速度が速い (図 2)。

6. 鮮新世から現世 (5 Ma-) : 現在の伊豆・小笠原弧

現世に至る七島・硫黄島海嶺の火山活動が開始し、堆積速度はさらに速くなる。スミス海盆

や孀婦岩構造線の南側の西之島トラフなどの島弧内リフトが形成された。火山活動の中心は時代とともに東に移動した。

V. まとめ

伊豆・小笠原海域で JOGMEC とその前身の JNOC が取得した反射法地震探査記録を軸とし、地質調査所が 1979 年に取得した震探と、DSDP/

ODP とそれに関連する震探や海底試料をコントロールとして、震探層序学的手法を用いた解釈により地質構造と堆積盆の発達史を検討した。各時代のアイソクロンマップを作成し、堆積盆形態の変遷を検討した。全堆積層厚は七島・硫黄島海嶺で薄く前弧で厚い (図 14)。東西幅約 50 km の前弧堆積盆が硫黄島東方から房総沖まで 1000 km 以上連続し、軸部では往復走時 2-3.5 秒 (約 2500-6000 m 超) の堆積物が認められる。前弧の古第三系はコアでは青ヶ島東南で掘削された ODP Leg 125 と 126、陸上では小笠原諸島、海底試料では大町海山で確認されているのみであったが、震探解釈によりこれら古第三系に対比される堆積層が前弧海盆の軸部ほぼ全域に分布することが判明した。前弧堆積盆の深部には安山岩類を主体とする古第三系火山岩からなる東西 5-10 km、南北数 10 km の南北に伸びるホルストが数条あって、その間のグラーベンを往復走時 0.5 秒から最大 3 秒 (約 500-5000 m 超) の古第三系の堆積物が埋める。後期始新世から前期漸新世に古伊豆・小笠原弧のリフトにより堆積盆が形成され、始新世から前期漸新世のシンリフト期には比較的粗粒な火山砕屑物を主体とする Unit I が、漸新世後期のポストリフト期にかけてはタービダイトなどの堆積物と主体とする Unit II がグラーベン部に厚く堆積した。四国海盆が拡大した漸新世末期から前期中新世にかけては火山活動は休止し、石灰質ナノ化石を主とする細粒堆積物からなる Unit III が広域に堆積した。

火山活動は中期中新世に再開し、その活動中心は時代とともに西から東へと移る (Ishizuka *et al.*, 2003, 2006a)。この時期の堆積層を震探シーケンス境界により Unit IV, V, VI に区分した。各 Unit の層厚部も時代とともに西から東へと移る。すなわち中部から上部中新統に対比される Unit IV は西七島海嶺より西側と前弧海盆に厚く堆積し、西七島海嶺と七島・硫黄島海嶺の間にはほとんど分布しない一方、鮮新統に対比される Unit V は西七島海嶺と七島・硫黄島海嶺の間に分布し、第四系の Unit VI は七島・硫黄島海嶺の東側で厚い。

伊豆・小笠原前弧堆積盆は古第三系からなる深部と、新第三系以降からなる浅部との“二階建て”の堆積盆であり、“中二階”には石灰質ナノ化石に富み火山起源物質に乏しい漸新世末期から前期中新世の Unit III が分布する。古第三系のアイソクロンマップは始新世から前期漸新世の古伊豆・小笠原弧のリフトにより、また新第三系以降のアイソクロンマップは中期中新世以降の伊豆・小笠原弧のリフトと火山活動に支配されている。

謝 辞

本論文は平成 10-18 年度に通商産業省/経済産業省資源エネルギー庁からの委託により石油公団と石油天然ガス・金属鉱物資源機構により実施された「大水深域における石油資源等の探査技術等基礎調査」(大水深基礎調査)の一環として行われた地質解釈作業に基づくものである。関連した基礎物理探査資料、とくに昭和 53 年、54 年の伊豆七島・小笠原海域調査を含めて、データの使用と、成果の公表を許可いただいた資源エネルギー庁鉱物資源課と石油・天然ガス課、石油天然ガス・金属鉱物資源機構に謝意を表します。大水深基礎調査の解釈作業を進めるにあたっては、当時の石油天然ガス・金属鉱物資源機構に置かれた同調査技術検討委員会専門部会の委員各位、とくに東京大学海洋研究所 徳山英一教授 (現高知大学)、海洋研究開発機構 藤岡換太郎博士 (現神奈川大学) からは、終始適切にご指導を賜った。また元熊本大学教授本座栄一博士からは伊豆・小笠原弧の構造発達史に関して指導と助言を賜った。産業技術総合研究所の湯浅真人博士と西村 昭博士には地質調査所の伊豆・小笠原航海の震探記録を使用させていただいた。筆者らが解釈作業を実施した (株) 地球科学総合研究所の関係者、とくに樋口 雄博士、宇納貞男氏、大川史郎氏には多くの共同解釈作業と議論いただき、また岡田欣也、新藤晃子、高山亮子の諸氏には図面作成等に大きな協力を賜った。査読いただいた海上保安庁海洋情報部加藤幸弘博士と匿名の査読者、特集号編集委員長小原泰彦博士には本稿の改善に多大の有益なご指摘をいただいた。以上の方々にあらためてここでお礼申し上げます。

文 献

Cooper, P.A., Dadey, K.A., Klaus, A., Lovell, M.A., Pezard, P.A. and Taylor, B. (1992): Correlation of core and seismic stratigraphy by means of vertical seis-

- mic profiling, and downhole and physical properties measurements for the Leg 126 forearc sites (787, 792, and 793). *Proceedings of ODP, Scientific Results*, **126**, 575–591.
- Expedition 350 Scientists (2014): Izu-Bonin-Mariana rear arc: The missing half of the subduction factory. in *IODP Preliminary Report*, **350**, 1–172.
- Fryer, P., Pearce, J. A., Stokking, L.B., et al. (1990): *Initial Reports ODP*, **125**, 1092p.
- 藤岡換太郎 (1992): 伊豆・小笠原弧と琉球弧. 月刊地球, **14**, 506–513. [Fujioka, K. (1992): The Izu-Ogasawara Arc and the Ryukyu Arc. *Chikyū Monthly*, **14**, 506–511. (in Japanese)]
- 藤岡換太郎・坂本 泉 (1999): 伊豆・小笠原弧の構造. 神奈川県立博物館調査研究報告, **9**, 5–20. [Fujioka, K. and Sakamoto, I. (1999): Structure of the Izu-Bonin Arc. *Research Report of the Kanagawa Prefecture*, **9**, 5–20. (in Japanese with English abstract)]
- 藤岡換太郎・Brian Taylor・西村 昭・小山真人・海保邦夫・田崎和江・Thomas Janecek・第126節乗船研究者一同 (1989): 伊豆・小笠原弧の横断掘削—ODP126節成果報告—. 地学雑誌, **98**, 886–910. [Fujioka, K., Taylor, B., Nishimura, A., Koyama, M., Kaiho, K., Tazaki, K., Janecek, T. and Scientific Party of Leg 126 (1989): Drilling across the Izu Bonin Arc results of ODP Leg 126 Cruise. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **98**, 886–910. (in Japanese with English abstract)]
- 藤岡換太郎・松岡裕美・松尾佳子 (1991): フィリピン海の堆積速度とマリンテフラ—海洋性島弧の成長史を探る—. 地学雑誌, **100**, 604–615. [Fujioka, K., Matsuoka, Y. and Matsuo, K. (1991): Sediment accumulation rate and marine tephra of the Philippine Sea—An introduction of volcanic history of intra-oceanic arc—. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **100**, 604–615. (in Japanese with English abstract)]
- 藤岡換太郎・田中武男・青池 寛 (1995): 伊豆・小笠原, マリアナ前弧の蛇紋岩海山—潜水調査船による観察と陸上蛇紋岩帯との関連. 地学雑誌, **104**, 473–494. [Fujioka, K., Tanaka, T. and Aoike, K. (1995): Serpentine seamount in Izu-Bonin and Mariana forearc; observation by a submersible and its relation to onland serpentinite belt. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **104**, 473–494. (in Japanese with English abstract)]
- 藤岡換太郎・徳長 航・横瀬久芳・笠原順三・佐藤利典・三浦 亮・石井輝秋 (2005): 伊豆・小笠原弧とマリアナ弧 会合部に位置する母島海山の成因に関する一試論. 月刊地球号外, **51**, 130–136. [Fujioka, K., Tokunaga, W., Yokose, H., Kasahara, J., Sato, T., Miura R. and Ishii, T. (2005): A possible model for the origin of the Hahajima Seamount at the Junction between Izu-Bonin and Mariana Arc. *Chikyū Monthly*, **51**, 130–136. (in Japanese)]
- Higuchi, Y., Yanagimoto, Y., Hoshi, K., Unou, S., Aki-
ba, F., Tonoike, K. and Koda, K. (2007): Cenozoic stratigraphy and sedimentation history of the northern Philippine Sea based on multi-channel seismic reflection data. *Island Arc*, **16**, 374–393.
- 本座栄一 (1985): 小笠原弧火山列周辺の地質. 月刊地球, **7**, 668–676. [Honza, E. (1985): Geology around the volcanic chain of the Ogasawara Arc. *Chikyū Monthly*, **7**, 668–676. (in Japanese)]
- Honza, E. and Tamaki, K. (1985): The Bonin Arc. in *The Ocean Basins and Margins*, vol. 7A edited by Nairn, A.E.M., Stehli, F. G. and Uyeda, S., Plenum Pub. Corp., 459–501.
- Honza, E., Inoue, E. and Ishihara, T. eds. (1981): Geological Investigation of the Ogasawara (Bonin) and Northern Mariana Arcs. *Geological Survey of Japan, Cruise Report*, **14**, 170p
- 本座栄一・玉木賢策・湯浅真人・棚橋 学・西村 昭 (1982): 小笠原島弧北部広域地質図 1/100 万. 地質調査所, no. 17. [Honza, E., Tamaki, K., Yuasa, M., Tanahashi, M. and Nishimura, A. (1982): *Geological Map of the Northern Ogasawara Arc, 1/1,000,000*. Geological Survey of Japan, Marine Geology Map Series, no.17. (in Japanese with English abstract)]
- 星 一良・柳本 裕・樋口 雄・秋葉文雄・神田慶太 (2007): 伊豆・小笠原・マリアナ島弧前弧堆積盆の反射法震探解釈結果. 地球惑星科学合同大会 2007 年要旨, J245–008. [Hoshi, K., Yanagimoto, Y., Higuchi, Y., Akiba, F. and Koda, K. (2007): Izu-Ogasawara-Mariana forearc basin, seismic reflection interpretation. *Japan Geoscience Union Meeting, Abstract*, J245–008. (in Japanese)]
- 碓 京子・西村 昭 (1991): 伊豆・小笠原弧, 西七島海嶺天保海山の地誌. 地質調査所月報, **42**, 19–41. [Ikari, K. and Nishimura, A. (1991): Geologic history of the Tenpo Seamount of the Nishi-Shichito Ridge, the Izu-Bonin Arc. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **42**, 19–41. (in Japanese with English abstract)]
- 石井輝秋・佐藤 暢・町田嗣樹・原口 悟・臼井 朗・石塚 治・谷口英嗣・八木和徳 (2000): 紀南海山列と伊豆-小笠原背弧雁行海山列の地質学的・岩石学的研究. 地質調査所月報, **51**, 615–630. [Ishii, T., Sato, H., Machida, S., Haraguchi, S., Usui, A., Ishizuka, O., Taniguchi, H. and Yagi, K. (2000): Kinan and Izu-Ogasawara-back arc-echelon Seamount Chains. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **51**, 615–630. (in Japanese with English abstract)]
- Ishizuka, O., Uto, K., Yuasa, M. and Hochstaedter, A.G. (1998): K-Ar ages from seamount chains in the back-arc region of the Izu-Ogasawara arc. *Island Arc*, **7**, 408–421.
- Ishizuka, O., Uto, K. and Yuasa, M. (2003): Volcanic history of the back-arc region of the Izu-Bonin (Ogasawara) arc. in *Intra-Oceanic Subduction Systems* edited by Larter, R.D. and Leat, P.T., *Geological Society, London, Special Publications*, **219**, 187–205.

- Ishizuka, O., Kimura, J., Li, Y.B., Stern, R.J., Reagan, M.K., Taylor, R.N., Ohara, Y., Bloomer, S.H., Ishii, T., Hargrove, U.S. and Haraguchi, S. (2006a): Early stages in the evolution of Izu-Bonin arc volcanism: New age, chemical, and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, **250**, 385–401.
- Ishizuka, O., Taylor, R.N., Milton, J.A., Nesbitt, R.W., Yuasa, M. and Sakamoto, I. (2006b): Variation in the mantle sources of the northern Izu arc with time and space—Constraints from high-precision Pb isotopes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **156**, 266–290.
- Ishizuka, O., Yuasa, M., Taylor, R.N. and Sakamoto, I. (2009): Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading. *Chemical Geology*, **266**, 274–296.
- Ishizuka, O., Taylor, R.N., Yuasa, M. and Ohara, Y. (2011): Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc, Philippine Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q05005, 1–40.
- 岩田尊夫・平井明夫・稲場土誌典・平野真史 (2002): 常磐沖堆積盆における石油システム. 石油技術協会誌, **67**, 62–71. [Iwata, T., Hirai, A., Inaba, T. and Hirano, M. (2002): Petroleum system in the Off-shore Joban Basin, northeast Japan. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **67**, 62–71. (in Japanese with English abstract)]
- 加藤 進・井上洋子・矢口良一 (1989): 基礎試錐「御前崎沖」の層序. 地質学雑誌, **95**, 851–864. [Kato, S., Inoue, Y. and Yaguchi, R. (1989): Stratigraphy of MITI Omaezaki well. *Journal of Geological Society of Japan*, **95**, 851–864. (in Japanese with English abstract)]
- 加藤幸弘 (1992): 西七島海嶺北部の地質構造とテクトニクス. 水路部研究報告, **28**, 251–268. [Kato, Y. (1992): Geological structure in the northern part of the Nishi-Shichito Ridge and the tectonics implication. *Report of Hydrographic Researches*, **28**, 251–268. (in Japanese with English abstract)]
- Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R. and Sangree, J.B. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. in *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration* edited by Payton, C.E., AAPG Memoir, **26**, 117–133.
- 西村 昭・野原昌人・臼井 朗 (1997): 九州・パラオ海嶺及び伊豆・小笠原弧の石灰岩試料のストロンチウム同位体層序年代. JAMSTEC 深海研究, **13**, 145–153. [Nishimura, A., Nohara, M. and Usui, A. (1997): Strontium Isotope stratigraphic ages of limestones taken during the submersible survey using “Shinkai 2000” in the Kyushu-Palau Ridge and the Izu-Bonin Arc. *JAMSTEC Journal of Deep Sea Research*, **13**, 145–153. (in Japanese with English abstract)]
- Ogawa, Y. and Taniguchi, H. (1988): Geology and tectonics of the Miura-Boso Peninsulas and the adjacent area. in *The Shimanto Belt, Southwest Japan—Studies on the Evolution of an Accretionary Prism* edited by Taira, A. and Ogawa, Y., *Modern Geology*, **12**, 147–168.
- 岡村 聡・坂本 泉・金 容・石塚 治・湯浅真人・富士原敏也・藤岡換太郎・倉本能行・前田仁一郎 (2007): 伊豆・小笠原弧, 嬬婦岩構造線周辺の海山・海丘群の火山岩岩石学. 日本鉱物科学会年会講演要旨集, 2007(0), 7. [Okamura, S., Sakamoto, I., Kim, Y., Ishizuka, O., Yuasa, M., Fujiwara, T., Fujioka, K., Kuramoto, Y. and Maeda, J. (2006): Petrology of volcanic rocks from seamounts and small knolls around the Sofugan Tectonic Line, Izu-Bonin arc. *Abstract of 2006 Annual Meeting of Japan Association of Mineralogical Sciences*, 2007(0), 7.]
- 沖野郷子・藤岡換太郎 (1994): 紀南海底崖の地形と地質—第176, 177 潜航の結果—. JAMSTEC 深海研究, **10**, 63–74. [Okino, K. and Fujioka, K. (1994): Geomorphology and geology of the Kinan Escarpment in the Shikoku Basin—Results of Dive #176 and #177—. *JAMSTEC Journal of Deep Sea Research*, **10**, 63–74. (in Japanese with English abstract)]
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S. and Kato, Y. (1999): The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins. *Geophysical Research Letters*, **26**, 2287–2290.
- 坂本 泉・富士原敏也・石塚 治 (2001): 伊豆・小笠原弧, 嬬婦岩構造線地域の地形・地質の特徴. JAMSTEC 深海研究, **18**, 55–69. [Sakamoto, I., Fujiwara, T. and Ishizuka, O. (2001): Topographical and geological characteristics of Sofugan Tectonic Line (STL) area, Izu-Ogasawara Arc. *JAMSTEC Journal of Deep Sea Research*, **18**, 55–69. (in Japanese with English abstract)]
- Shipboard Scientific Party (1971): Site 53. *Initial Reports DSDP*, **6**, 293–347.
- Shipboard Scientific Party (1975): Site 296. *Initial Reports DSDP*, **31**, 191–234.
- Shipboard Scientific Party (1980a): Site 442. *Initial Reports DSDP*, **58**, 21–108.
- Shipboard Scientific Party (1980b): Site 443. *Initial Reports DSDP*, **58**, 109–218.
- Shipboard Scientific Party (1980c): Site 444. *Initial Reports DSDP*, **58**, 219–282.
- Shipboard Scientific Party (1980d): Site 446. *Initial Reports DSDP*, **58**, 401–546.
- Shipboard Scientific Party (1990a): Site 787. *Initial Reports ODP*, **126**, 63–96.
- Shipboard Scientific Party (1990b): Correlation and Comparison of Forearc sites. *Initial Reports ODP*, **126**, 407–413.
- Shipboard Scientific Party (2001): Site 1174. *Initial Reports ODP*, **196**, 1–149.
- Shipboard Scientific Party (2002a): Site 1173. *Initial*

- Reports ODP*, **196**, 1-97.
- Shipboard Scientific Party (2002b): Site 808. *Initial Reports ODP*, **196**, 1-64.
- 鈴木宏芳 (2002): 関東平野の地下地質構造. 防災科学技術研究所研究報告, **63**, 1-19. [Suzuki, H. (2002): Underground Geological Structure beneath the Kanto Plain, Japan. *Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **63**, 1-19. (in Japanese with English abstract)]
- 高橋雅紀 (2006a): 日本海拡大時の東北日本弧と西南日本弧の境界. 地質学雑誌, **112**, 14-32. [Takahashi, M. (2006): Tectonic boundary between Northeast and Southwest Japan Arcs during Japan Sea opening. *Journal of Geological Society of Japan*, **112**, 14-32. (in Japanese with English abstract)]
- 高橋雅紀 (2006b): フィリピン海プレートが支配する日本列島のテクトニクス. 地学雑誌, **115**, 116-123. [Takahashi, M. (2006): Tectonic development of the Japanese islands controlled by Philippine Sea Plate. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **115**, 116-123. (in Japanese with English abstract)]
- Taylor, B. (1992): Rifting and the volcanic-tectonic evolution of the Izu-Bonin-Mariana Arc. *Proceedings of ODP, Scientific Results*, **126**, 627-651.
- Taylor, B., Fujioka, K., et al. (1990a): *Initial Reports ODP*, **126**, 1002p.
- Taylor, B., Moore, G., Klaus, A., Systrom, M., Cooper, P. and MacKay, M. (1990b): Multichannel seismic survey of the central Izu-Bonin Arc. *Initial Reports ODP*, **126**, 51-60.
- 氏家 宏・松丸国昭 (1977): 小笠原・母島の地質. 国立科学博物館専報, **10**, 5-18. [Ujiie, H. and Matsumaru, K. (1977): Stratigraphic outline of Haha-Jima (Hills-borough Island), Bonin Islands. *Memoirs of the National Science Museum*, **10**, 5-18. (in Japanese with English abstract)]
- 海野 進・白木敬一・黒田 直 (1988): 小笠原諸島—世界初のモホールに向けて. 荒牧重雄・新妻信明編: 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 陸上学術ボーリング 候補地集 II, 35-61. [Umino, S., Shiraki, K. and Kuroda, N. (1988): Ogasawara Island—Search for the first mantle drilling. in *Onshore Scientific Drilling Working Group, Drilling Site Candidates (Rikujō Gakujutsu Boringu Wakingu Gurupu, Rikujō Gakujutsu Boringu Kohochishu II)* edited by Aramaki, S. and Niituma, N. (in Japanese)*]
- 湯浅真人・村上文敏 (1985): 小笠原弧の地形・地質と娯婦岩構造線. 地学雑誌, **94**, 115-134. [Yuasa, M. and Murakami, F. (1985): Geology and geomorphology of the Ogasawara Arc and the Sofugan Tectonic Line. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **94**, 115-134. (in Japanese with English abstract)]
- 湯浅真人・本座栄一・玉木賢策・棚橋 学・西村 昭 (1982): 小笠原島弧南部および北部マリアナ島弧広域地質図 1/100 万. 地質調査所, no. 18. [Yuasa, M., Honza, E., Tamaki, K., Tanahashi, M. and Nishimura, A. (1982): *Geological Map of the Southern Ogasawara and Northern Mariana Arcs, 1:1,000,000*. Geological Survey of Japan, Marine Geology Map Series, no.18. (in Japanese with English abstract)]
- 湯浅真人・西村 昭・新井田清信・石塚 治 (1999): 伊豆・小笠原弧中央部, 火山フロント付近の第三系—大町海山の地質. 月刊地球号外, **23**, 107-115. [Yuasa, M., Nishimura, A., Niida, K. and Ishizuka, O. (1999): Tertiary rocks near the volcanic front in the central part of the Izu-Ogasawara Arc - Geology of the Ohmachi Seamount. *Chikyu Monthly*, **23**, 107-115. (in Japanese)]

* Title etc. translated by K.H.