

## パレスベラ海盆の特異な地形†

小原泰彦\*, 吉田 剛\*\*, 加藤幸弘\*\*\*, 春日 茂\*\*\*\*

## Anomalous Topography in the Parece Vela Basin†

Yasuhiko OHARA\*, Tsuyoshi YOSHIDA\*\*, Yukihiro KATO\*\*\* and Shigeru KASUGA\*\*\*\*

### Abstract

We present results of high-resolution bathymetric studies of the extinct Parece Vela Basin backarc spreading center in the northwestern Pacific, where we have identified an anomalous, extremely large mullion structure, here termed giant megamullion. We find that the giant megamullion is nearly ten times larger than the similar structures in the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge (megamullions). An off-axis rugged "chaotic terrain" was also identified in the Parece Vela Basin. We propose that amagmatic tectonics producing the giant megamullion and the chaotic terrain occupied a significant part in crustal construction in the Parece Vela Basin evolution.

### 1. はじめに

最近の水路部の大陸棚調査プロジェクトによって、フィリピン海の背弧拡大テクトニクスの詳細が以前にも増して明らかになってきた (Kasuga and Ohara, 1997; Ohara et al., 1997; Okino et al., 1998; 1999). パレスベラ海盆 (沖ノ鳥島海盆; Fig. 1) は約15Maに活動を停止した背弧海盆である (Okino et al., 1998). その拡大中心はパレスベラリフトと呼ばれており、水深が所により6500mにも達する深い凹地が雁行状に配列していることが古くから注目されていた (Mrozowski and Hayes, 1982). ドレッジによって、その凹地から上部マントルカンラン岩が採取され (Ohara et al., 1996), パレスベラリフトは非マグマ的な拡大によって生じたことが議論されている (Okino et al., 1998).

今回、我々は大陸棚調査によって得られた地形

データを再解析したところ、パレスベラリフトは低速拡大海嶺の典型的な構造を有し、ジャイアントメガムリオン (giant megamullion) と命名した特異な構造を持つことが明らかとなった (Ohara et al., 2001) (Fig. 2A・B, Fig. 3A). 本論では、ジャイアントメガムリオンの記載を行い、その成因についての若干の考察を行う。

### 2. パレスベラ海盆の発達史

パレスベラ海盆は東経138度を境にして、海盆の東西で顕著に地形のリニエーションが変化しており、地磁気異常6A (約19Ma) の時代に海盆の拡大方向が変化したことを示している (Okino et al., 1998) (Fig. 2A・B). パレスベラ海盆の発達史は大きく2つに分けることが出来る。すなわち、東西拡大のステージと、拡大軸が反時計周りに回転し、北東-南西拡大した後期のステージである (Okino et al., 1998; 1999). 前期ステージにおける拡大速

† Received 2000 November 11st.; Accepted 2000 December 14th.

\* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

\*\* 大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office.

\*\*\* 企画課 Planning Division.

\*\*\*\* 監理課 Administrative Division.

度は地磁気異常の解析から8.8cm/y(両側拡大速度)であると推定されている(Okino et al., 1998). パレスベラ海盆は、磁気赤道の近傍において海盆が拡大したため、全磁力異常値が極めて微弱である。特に北東-南西拡大の後期のステージにおいては地形も地磁気異常のリニエーションも共に細かく分断された形状を示すために、拡大速度の推

定が極めて困難であった(Okino et al., 1998). 2000年1月~2月にかけて海洋科学技術センター所属の調査船「よこすか」によりパレスベラリフトにおいて深海曳航式磁力計の調査が行われた結果、後期ステージの拡大速度は7.0cm/y(両側拡大速度)であることが推定された(沖野郷子, 私信; Fujioka et al., 2000).

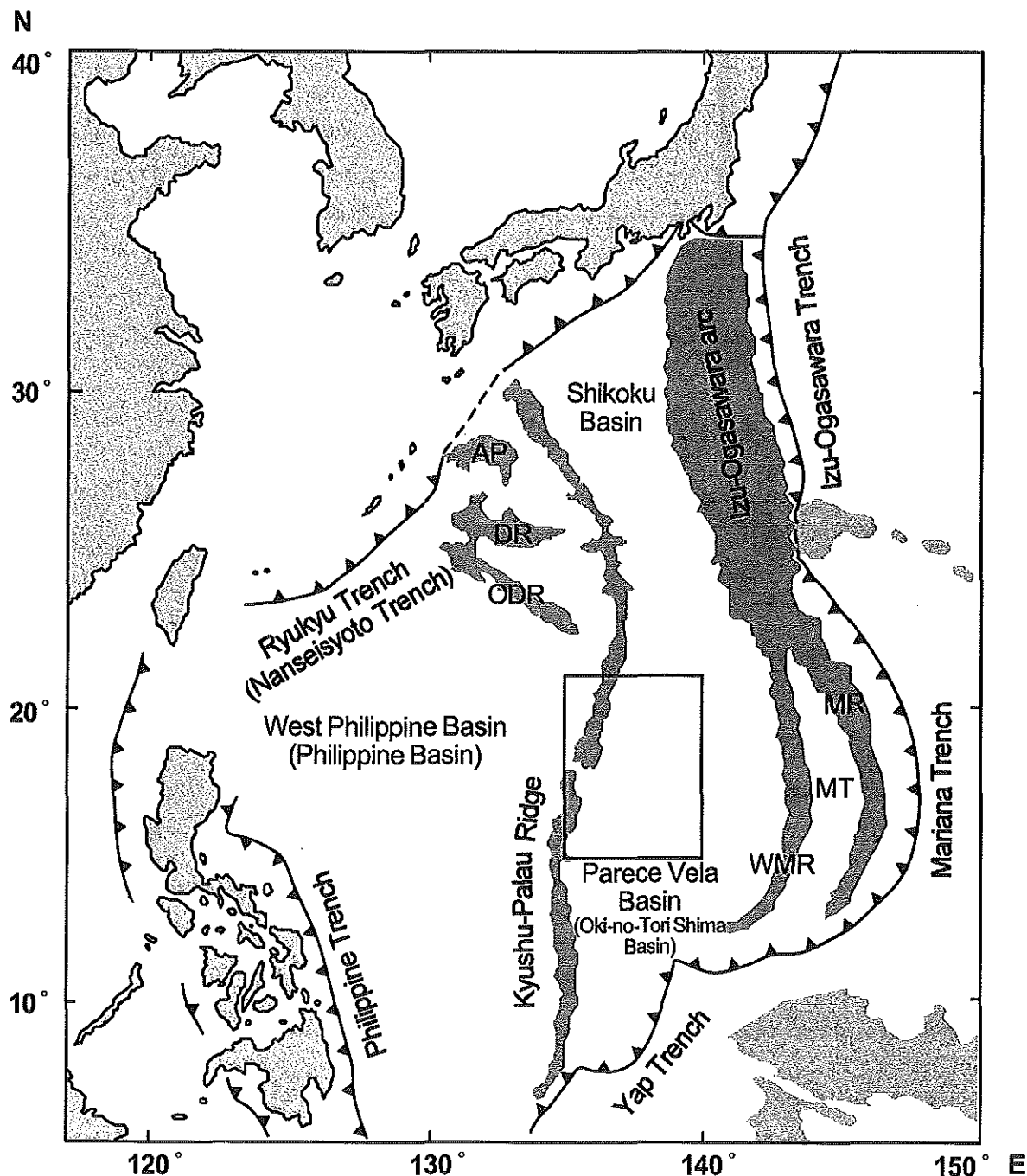


Fig. 1 Major bathymetric elements in the northwestern Pacific. The inset box shows the mapped area shown in Fig. 2A·B. AP=Amami Plateau, DR=Daito Ridge, ODR=Oki-Daito Ridge, WMR=West Mariana Ridge, MR=Mariana Ridge, MT=Mariana Trough.

*Anomalous Topography in the Parece Vela Basin*

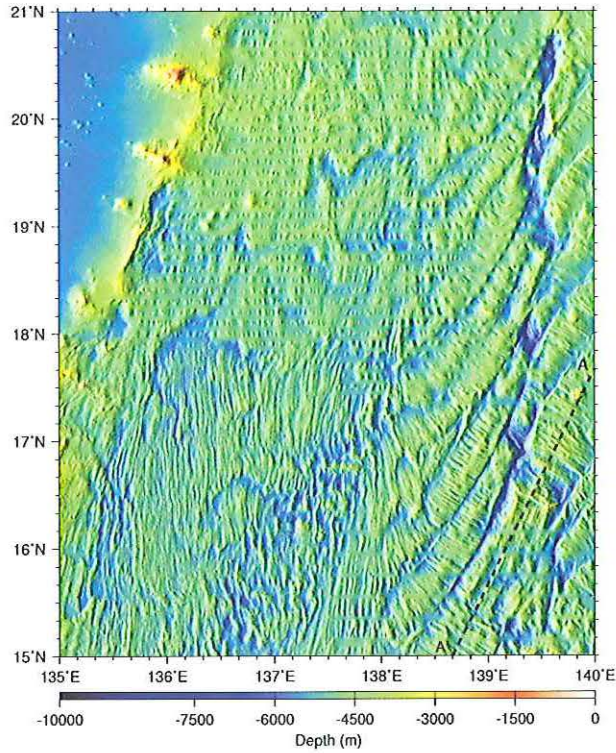


Fig. 2A Detailed shaded structural images of the northern half of the Parece Vela Basin illuminated from 270°. The bathymetric data were gridded at 3" spacing (~ 90 m spacing). Smooth areas represent data gaps with interpolated bathymetry. The location of the profiles (Fig. 4) across the segments S1 (A-A') is shown.

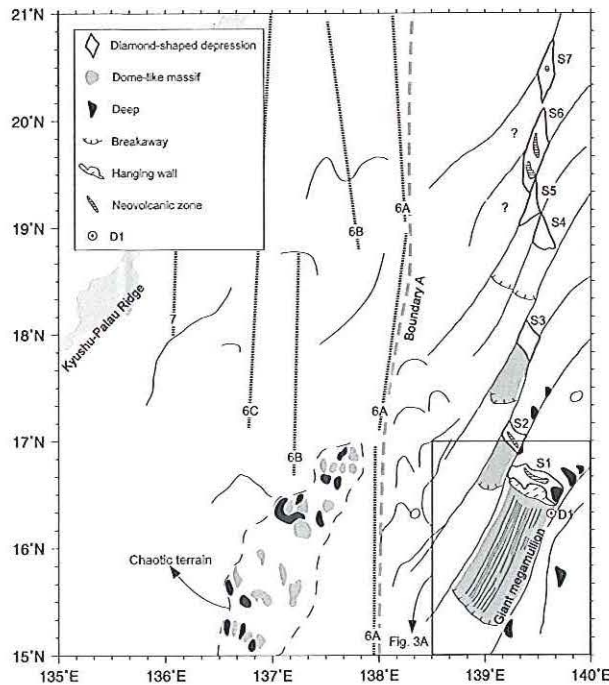


Fig. 2B Interpretation of the bathymetry shown in Fig. 2A. Heavy gray dashed line refers to the boundary A, near 138°E. Thin lines indicate fracture zones and propagators. Dashed lines are the magnetic anomaly isochrons with anomaly number taken from Okino et al. (1998). The dredge site D1 recovered serpentinized peridotites and gabbros (Ohara et al., 1996). The inset box shows the enlarged area shown in Fig. 3A.

後期ステージにおいて北東-南西拡大が生じた理由としては、マリアナ海溝に沈み込む太平洋プレートの斜め沈み込みが大きな原因であると考えられている。すなわち、沈み込むプレートとパレスベラ海盆側の前弧スリバーのカップリングが次第に強まり、前弧スリバーが北方へ引きずられることにより拡大軸の反時計回りの回転と、それに伴った北東-南西拡大が生じたと推定されている(Kasuga and Ohara, 1997)。

### 3. 低速拡大海嶺における非マグマ的テクトニクス

一般にその縁辺部に沈み込み帯を持たない大西洋中央海嶺が低速拡大を、沈み込み帯を持つ東太平洋海膨が高速拡大を行っていることは良く知られている事実である。Macdonald et al. (1991)によれば、年間の両側拡大速度が4cm以下のものを低速拡大海嶺、9cm以上のものを高速拡大海嶺と定義している。中央海嶺系は拡大軸のずれの大小によって様々なスケールの地形的なセグメントに分断されていることが1980年代後半からマルチビームの調査の進展により明らかとなってきた。これらのセグメンテーションはその大きさや性質に応じて1次から4次までに分類されている(Macdonald et al., 1991)。例えば、プレート境界であるトランスフォーム断層は第1次のセグメント境界である。2つのトランスフォーム断層の間にある数個から10個程度のnon-transform discontinuity (低速拡大海嶺の場合)、あるいは重複拡大軸(高速拡大軸の場合)は第2次のセグメント境界である。これらの地形的セグメンテーションは、重力(Lin et al., 1990)、地震波速度構造(Sinton and Detrick, 1992)、マグマの化学組成と密接な相関関係があることが知られている。

古くから大西洋中央海嶺や南西インド洋海嶺を始めとする低速拡大海嶺の多くの断層帯から上部マントル物質である蛇紋岩化したカンラン岩の産出が知られており、abyssal peridotiteと呼ばれて来た(例えばDick and Bullen, 1984)。高速拡大海嶺では東太平洋海膨のHess DeepやGarret断層帯の2ヶ所からの報告があるのみである。Cannatは

abyssal peridotiteの岩石学・岩石変形学やそれまでに知られていた重力異常等との知見を組み合わせ、低速拡大海嶺では玄武岩はセグメントの中央部分に多く分布しており、セグメント境界ではカンラン岩が多く分布している、というモデルを提唱した(Cannat, 1993; Cannat et al., 1995)。これは、低速拡大海嶺のセグメント境界は非マグマ的テクトニクス(amagmatic tectonics)によって海底が形成されている、というモデルである。

低速拡大海嶺の断層帯に産出するabyssal peridotiteは厳密には2つのセッティングから産する。すなわち、(1)トランスフォーム断層と拡大軸との会合点(Ridge-Transform Intersection; RTI)と(2)断層帯の側壁、という2つのセッティングである。このうち、RTIでは一般にnodal deepと呼ばれる水深が6000mを超える凹地と、inside corner high(ICH)と呼ばれる顕著な地形の高まりがペアとなって存在しており、ICHは蛇紋岩化したカンラン岩やガプロで一般に構成されていることが知られている(Tucholke and Lin, 1994)。

低速拡大海嶺の断層帯の中で、最も詳細な調査が成されているのがケーントランスフォーム断層を中心とするケーン断層帯であり、一般にMARK(Mid-Atlantic Ridge Kane)と呼ばれている。最近のケーン断層帯やアトランティス断層帯を中心とする詳細な地形・重力マッピングによって、これらの低速拡大海嶺の断層帯のRTIには以下のような特徴を持つ特異な地形が存在することが明らかとなってきた(Cann et al., 1997; Blackman et al., 1998; Mitchell et al., 1998; Tucholke et al., 1998)。すなわち、(1)一般にドーム状の地形で、その表面にプレートの拡大方向に平行な(拡大軸に直交方向)顕著な畝状のリニエーション(corrugation)が存在し、(2)マントルブーゲー異常値(MBA)が大きく、(3)カンラン岩やガプロを産する。Tucholke et al. (1998)はこの地形をメガムリオン(megamullion)と命名し、北米大陸のBasin and Range地域に見られるmetamorphic core complexと同様のものであると解釈している。すなわち、メガムリオンとは上部マントルま



### Anomalous Topography in the Parece Vela Basin

で達する低角デタッチメント断層が非マグマ的拡大によって発達し、RTIにおいて断層下盤ブロックとして出現したものである。拡大セグメントにおいてマグマ活動が再開すると、メガムリオンの発達は停止すると考えられている。拡大セグメントにおける再開したマグマ活動はneovolcanic

zoneとして認めることが出来る。

今日までに知られていた最大のメガムリオンはMARKのケーンメガムリオンで、32km(拡大軸に平行方向)×20km(拡大軸に直交方向)である(Mitchell et al., 1998)(Fig. 3B・C).

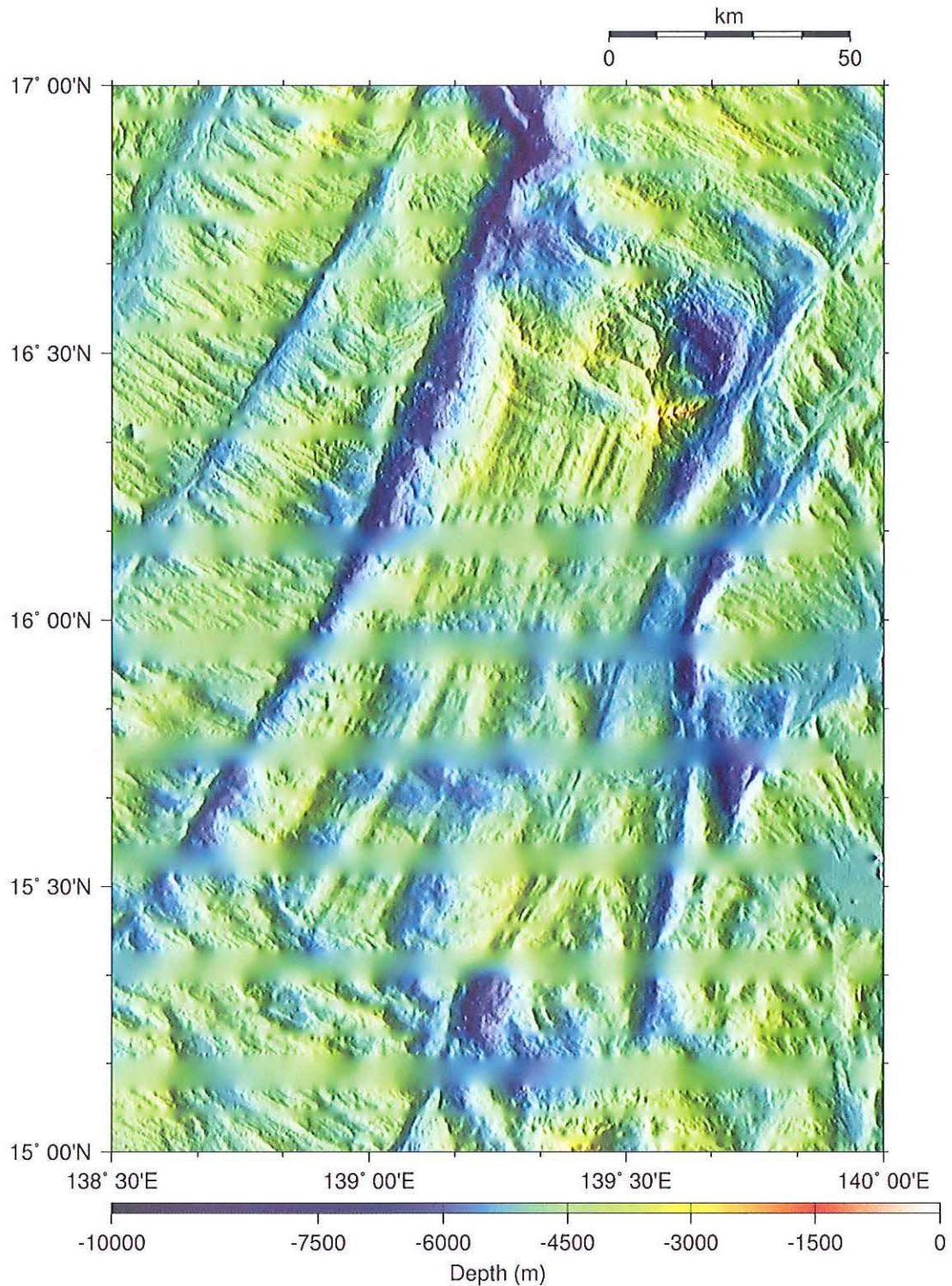


Fig. 3A Close-up view of the giant megamullion illuminated from 270°. The scale bar is 50 km.



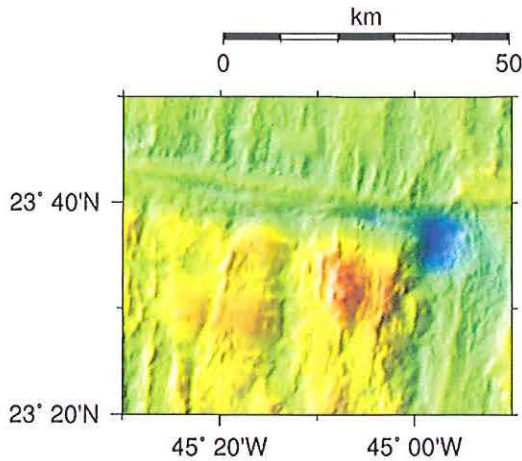


Fig. 3B Close-up view of the Kane megamullion illuminated from 295°. The 200 m-grid-size bathymetric data downloaded from the RIDGE Multibeam Synthesis Web site (<http://imager.ldeo.columbia.edu>) were utilized. The scale is as same as the Fig. 3A. The scale bar is 50 km.

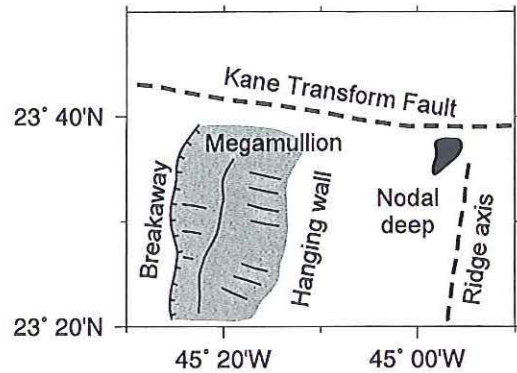


Fig. 3C Schematic interpretation of Fig. 3B (after Mitchell et al., 1998).

#### 4. ジャイアントメガムリオン

本研究に用いたデータは、大陸棚調査として測量船「拓洋」によって1995～1997年の間に取得されたマルチビーム(SeaBeam, SeaBeam 210)による地形データ及びKSS-30重力計による重力データである。測位はGPSによった。データ取得についてはOkino et al. (1998)に詳述がある。地形については、生データを3秒角でグリッド化し解析した。

今回の調査範囲内で、PVRは少なくとも7個のセグメント(S1～S7)から成ることが明らかとなった(Fig. 2A・B)。それぞれのセグメントには顕著な凹地(nodal deepと解釈される)と地形的な高まり(ICHに相当すると解釈される)がペアになって存在しており、低速拡大海嶺の断裂帯に見られる構造に極めて類似している。このうち、最南端のセグメントS1には極めて特異な地形が存在することが明瞭である。この地形は次の様な特徴を持つ。すなわち、(1)プレートの拡大方向に平行(拡大軸に直交方向)な顕著な畝状の地形(corrugation)を有し、(2)地形の南端はプレートの拡大方向に直交

(拡大軸に平行方向)なabyssal hillによってシャープに切られている。我々はこの特異な地形を大西洋中央海嶺のメガムリオンと同様のものと解釈し、ジャイアントメガムリオンと命名した(Ohara et al., 2001)。ジャイアントメガムリオンは中央海嶺系以外では初めての報告となると共に、そのディメンジョンが特に注目される。すなわち、そのディメンジョンは55km(拡大軸に平行方向)×125km(拡大軸に直交方向)であって、ケーンメガムリオンに比べ約10倍大きく、明らかに世界で最大のものである。その他の顕著な特徴は、ジャイアントメガムリオンはセグメントの全長に渡って発達していることである。大西洋中央海嶺の場合、一般にICHに発達しているのみである。PVRの残りの全てのセグメントにも地形的な高まりが存在している(Fig. 2A・B)。これらにはcorrugationが顕著には発達していないが、それぞれの地形の南方では拡大軸に平行なabyssal hillによって切られており、これらの地形的高まりもメガムリオンであると推測出来る。

ジャイアントメガムリオンはその周囲の断裂帯およびnodal deepからの比高差はおよそ2000～

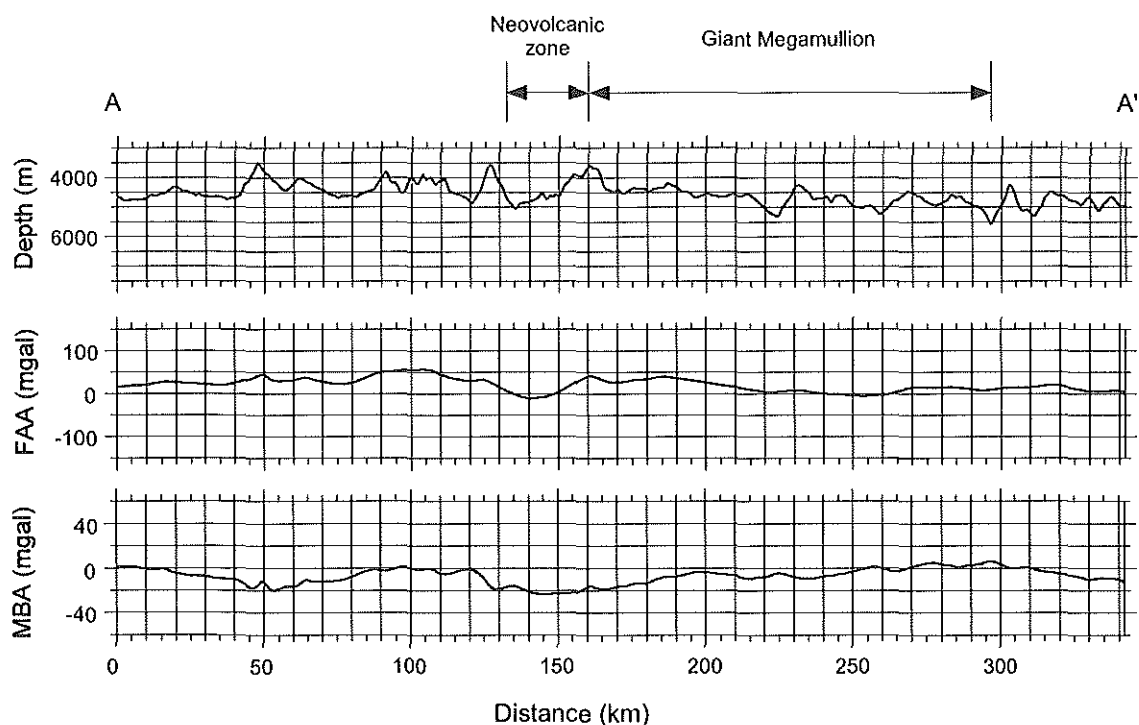


Fig. 4 Profiles of bathymetry, free-air (FAA) and mantle Bouguer anomaly (MBA) across the segment S1 and giant megamullion (A-A). We subtracted from the free-air anomalies the attraction of seafloor topography (water-crust interface), and the attraction of relief on the crust-mantle interface to obtain MBA (Parker, 1972). The crustal thickness is assumed to be 6 km. Densities of 1.03, 2.7 and 3.3 g/cm<sup>3</sup> are assumed for seawater, crust and mantle, respectively. Location of the profiles is indicated in Fig. 2A. See text for interpretation.

3000mで、corrugationの波長は約2000~12000m、その比高差は200~400mで、所により1000mに達する。ジャイアントメガマリオンがその南端で abyssal hillによってシャープに切られている箇所は、デタッチメント断層が活動を開始した地点、すなわちbreakawayであると解釈出来る(Tucholke et al, 1998)。また、ジャイアントメガマリオンの北端の拡大軸に接する箇所は、やはり拡大軸に平行な地形の高まりが形成されている。これは、拡大軸における再開したマグマ活動の痕跡、すなわちhanging wallであると解釈出来る(Tucholke et al, 1998)。拡大セグメントS1には水深が6500mにも達するnodal deepが存在する。さらに拡大軸には小円錐形の地形が多数存在し、これらはneovolcanic zoneであろう。これらの火山体は直径500~2000m程度であり、単体あるいは複合した火山体を形成している(Fig. 3A)。

ジャイアントメガマリオンのcorrugationに平行方向にマントルブーゲー異常(MBA)を計算して

みると、北端のセグメント境界で低いMBA値(約-20mgal)を持ち、南端に向かうにつれて高い値(約0mgal)を持つようになる(Fig. 4)。この結果はTucholke et al. (1998)のモデルと良く一致する。すなわち、hanging wallやneovolcanic zoneは玄武岩の地殻が厚いため低いMBA値を示す。すなわち、モホ面が上昇していない。一方、breakawayで上昇したMBA値を示すことは、デタッチメント断層が始まった地点において地殻が薄化(モホ面が上昇)していることを示す。

ジャイアントメガマリオンにおいて、ドレッジによって(Fig. 2B; D1)、上部マントル物質である蛇紋岩化したカンラン岩と下部地殻のガブロが採取された(Fig. 2B; Ohara et al, 1996)。これはケーンメガマリオン等と同様にジャイアントメガマリオンがデタッチメント断層に伴い形成され、上部マントル物質が出現したことを示唆するものである(Tucholke et al, 1998)。

## 5. Chaotic terrain

今回の研究で明らかとなったパレスベラ海盆のその他の特異な地形は海盆西部の一部に見られる非常に起伏の変化の激しいラフな地形であり、これをカオステレーン(chaotic terrain)と名付けた(Fig. 2A・B). カオステレーンは複数の独立した地形ブロックと凹地から構成されており、最大の比高差が1500mにも達し、地形ブロックの頂部には東西方向(プレートの拡大方向に平行)のcorrugationも存在する。南北方向のリニエーションが発達したその周囲の海底に比べ、極めて高いMBA値(30mgal)を有し地殻の薄化を示すことから、このカオステレーンも低速拡大海嶺のメガムリオンと同様にマグマが欠乏する拡大ステージによって形成されたものであろう(Ohara et al., 2001).

カオステレーンは拡大速度が8.8cm/yの海盆拡大前期のステージに形成されている。一般にメガムリオンは低速拡大海嶺に形成されているが、このような比較的高速な海嶺で、同様なラフな地形がAustralian-Antarctic Discordance (両側拡大速度: 7.4cm/y)から発見されている(Christie et al., 1998). 両者の共通の特徴は、(1)比較的高速な拡大速度で形成され、(2)拡大軸から独立して存在していること、である(Ohara et al., 2001).

## 6. 考察

メガムリオンの形成には拡大セグメントにおけるマグマ供給レートが密接に関係しているらしい。すなわち、上部マントル物質を伴うこと及び重力異常データの解析を根拠に、海嶺のマグマが欠乏する拡大ステージにおいて、上部マントルに達する低角デタッチメント断層が発達して形成されたと議論されている(Tucholke et al., 1998). 東太平洋海膨など高速拡大海嶺においては、基本的に非マグマ的テクトニクスに支配されることがないためにメガムリオンが形成されない、と考えることが出来る。

パレスベラ海盆においてはカオステレーンおよびジャイアントメガムリオンの形成はそれぞれ、

8.8cm/yおよび7.0cm/yという比較的高速な拡大速度の下で行われている。このような比較的高速な条件下で、非マグマ的テクトニクスが支配するステージが存在したことになり、東太平洋海膨における観測からは予測されなかったことである。このことは、拡大セグメントにおけるマグマ供給レートに大きな変動があったことを示唆しており、背弧ウェッジマントル中のマントル流が定常的でないことを示していると考えることが出来る(Ohara et al., 2001). 最近の西フィリピン海盆の調査によって、その拡大軸であるCentral Basin Faultが低速拡大海嶺のRTIの構造を持つことが明らかとなった(Fujioka et al., 1999). また、北部マリアナトラフからはドレッジによって上部マントルカンラン岩が採取されている(Stern et al., 1996). これらの事実は、背弧海盆はそのある拡大ステージにおいて、一般に非マグマ的テクトニクスが支配していることを示すものであり、背弧ウェッジマントル中のマントル流が定常的でないことを示唆している(Ohara et al., 2001).

背弧海盆の発達は比較的一様なマグマの活動によって支配されてきたと考えられてきた。しかし、今回の発見によって、パレスベラ海盆の発達史の相当部分がマグマの欠乏する海嶺の拡大ステージに支配されていることが明らかとなり、フィリピン海プレートの発達モデルを再考する必要があると言えらる。

## 7. まとめ

パレスベラ海盆において、上部マントル物質を伴う特異な地形が発見された。この地形は最近大西洋中央海嶺で記載されているメガムリオンと呼ばれている地形と極めて類似しており、ジャイアントメガムリオンと命名した。ジャイアントメガムリオンの発見は次の3点において重要な成果である。すなわち、

- (1) ジャイアントメガムリオンは大西洋のメガムリオンに比べ約10倍大きく、世界最大のものである。
- (2) 背弧海盆で初めての発見であると共に、比較



的高速な拡大速度の海嶺から初めての発見である。

(3) パレスベラ海盆の発達相当部分が非マグマ的な拡大ステージに支配されていることが明らかとなった。

#### 謝 辞

測量船「拓洋」の船長・乗組員の皆様、大陸棚調査室の室長・室員の皆様の努力によってデータの取得が可能となった。玉木賢策教授・沖野郷子博士(東京大学海洋研究所)、藤岡換太郎博士(海洋科学技術センター)との議論は大変有益であった。また沖野郷子博士には未公表の深海曳航式磁力計による結果の使用を許可して頂いた。データの図化にはGMTソフトウェア3.0(Wessel and Smith, 1995)を用いた。

#### 要 約

活動を停止した背弧海盆であるパレスベラ海盆において、特異な、極めて巨大なムリオン構造を詳細な地形調査によって発見し、ジャイアントメガムリオンと命名した。ジャイアントメガムリオンは低速拡大の大西洋中央海嶺で発見されている同様の構造(メガムリオン)に比べ、約10倍も大きい。海盆の拡大中心から離れた箇所にある、カオステレーンもまた新たに発見した。ジャイアントメガムリオンおよびカオステレーンの形成と関連する非マグマ的テクトニクスは、パレスベラ海盆の発達において重要な役割を占めていたと思われる。

#### 引 用 文 献

- Blackman, D., Cann, J. R., Janssen, B., and Smith, D. : Origin of extensional core complexes: evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone, *J. Geophys. Res.*, **103**, 21315-21333, (1998).
- Cann, J. R., Blackman, D. K., Smith, D.K., McAllister, E., Janssen, B., Mello, S., Avgerinos, E., Pascoe, A. R., and Escartin,

J. : Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, **385**, 329-332, (1997).

Cannat, M. : Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges, *J. Geophys. Res.*, **98**, 4163-4172, (1993).

Cannat, M., Mevel, C., Maia, M., Deplus, C., Durand, C., Gente, P., Agrinier, P., Belarouchi, A., Dubuisson, G., Humler, E., and Reynolds, J. : Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°-24° N), *Geology*, **23**, 49-52, (1995).

Christie, D. M., West, B. P., Pyle, D. G., and Hanan, B. B. : Chaotic topography, mantle flow and mantle migration in the Australian-Antarctic discordance, *Nature*, **394**, 637-644, (1998).

Dick, H. J. B. and Bullen, T., Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**(1), 54-76, (1984)

Fujioka, K., Okino, K., Kanamatsu, T., Ohara, Y., Ishizuka, O., Haraguchi, S., and Ishii, T. : An enigmatic extinct spreading center in the West Philippine backarc basin unveiled, *Geology*, **27**, 1135-1138, (1999).

Fujioka, K., Kanamatsu, T., Ohara, Y., Fujimoto, H., Okino, K., Tamura, C., Lallemand, S.E., Deschamps-Boldrini, A., Barretto, J.A., Togashi, N., Yamanobe, H., and So, A. : Parece Vela Rift and Central Basin Fault revisited: STEPS-IV (structure, tectonics, and evolution of the Philippine Sea) cruise summary report, *InterRidge News*, **9** (1), 18-22, (2000).

Kasuga, S. and Ohara, Y. : A new model of back-arc spreading in the Parece Vela Basin, northwest Pacific margin, *The Island Arc*, **6**,

- 316-326, (1997).
- Lin, J., Purdy, G. M., Schouten, H., Sempere, J.-C., and Zervas, C. : Evidence from gravity data for focused magmatic accretion along the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, **344**, 627-632, (1990).
- Macdonald, K. C., Scheirer, D. S., Carbotte, S. M. : Mid-ocean ridges: discontinuities, segments and giant cracks, *Science*, **253**, 986-994, (1991).
- Mitchell, N., Escartin, J., and Allerton, S. : Detachment faults at mid-ocean ridges garner interest, *EOS Trans. AGU*, **79**, 127, (1998).
- Mrozowski, C. L., and Hayes, D. : The evolution of the Parece Vela Basin, eastern Philippine Sea, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **46**, 49-67, (1979).
- Ohara, Y., Kasuga, S., and Ishii, T. : Peridotites from the Parece Vela Rift in the Philippine Sea: upper mantle material exposed in an extinct back-arc basin, *Proc. Japan Acad. Ser.*, **B72**, 118-123, (1996).
- Ohara, Y., Kasuga, S., Okino, K., and Kato, Y. : Survey maps Philippine Sea structure, *EOS Trans. AGU*, **78**, 555, (1997).
- Ohara, Y., Yoshida, T., Kato, Y., and Kasuga S. : Giant megamullion in the Parece Vela backarc basin, *Mar. Geophys. Res.*, **22**, 47-61, (2001).
- Okino, K., Kasuga, S., and Ohara, Y. : A new scenario of the Parece Vela Basin Genesis, *Mar. Geophys. Res.*, **20**, 21-40, (1998).
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S., and Kato, Y. : The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2287-2290, (1999).
- Parker, R. : The rapid calculation of potential anomalies, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **31**, 447-455, (1972).
- Sinton, J. M. and Detrick, R.S. : Mid-ocean ridge magma chambers, *J. Geophys. Res.*, **97**, 197-216, (1992).
- Stern, R.J., Bloomer, S.H., Martinez, F., Yamazaki, T., and Harrison T.M. : The composition of back-arc basin lower crust and upper mantle in the Mariana Trough: a first report, *The Island Arc*, **5**, 354-372, (1996).
- Tucholke, B. and Lin, J. : A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust, *J. Geophys. Res.*, **99**, 11937-11958, (1994).
- Tucholke, B., Lin, J., and Kleinrock, M. : Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge, *J. Geophys. Res.*, 9857-9866, (1998).
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. : New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **76**, 329, (1995).