

研究ノート マルチビーム音響測深機 SeaBeam 2000でみる海底地形†
(1) 沈み込み帯の海底地形の統計パラメタを推定する試み

西澤あずさ*, 中川正則**, 沖野郷子**, 泉 紀明***

Swath Bathymetry using SeaBeam 2000 around Japan †
(1) Statistical Estimation of Subduction Seafloor Morphology

Azusa NISHIZAWA*, Masanori NAKAGAWA**,
Kyoko OKINO** and Noriaki IZUMI***

Abstract

Precise SeaBeam 2000 swath bathymetric data around Japan obtained by Hydrographic Department were compiled and displayed in common format. Shaded relief maps and three dimensional whale-eye's views are produced from these data, which help us to understand the sea bottom topography intuitively. Statistical estimation was attempted for objective evaluation of the topography by means of the power spectrum slopes of the water depth profiles. The result suggests that the horst and graben structure characterizing the trench seaward slope is the origin of the values of the power spectrum slopes greater than 3.

1. はじめに

海上保安庁水路部における SeaBeam2000を使用した海洋測量は、主に地震予知計画の基礎資料を作成する目的で行われてきた。Fig. 1 (a)はETOPO5の地形データ上に気象庁による1926から1995年10月までのマグニチュード3以上の地震の震央をプロットしたものであり、Fig. 1 (b)は1995年までに SeaBeam2000で得られたデータの存在する範囲を示している。これらの領域において、ノイズを含む精度の悪いデータを厳密に除去することにより (浅田及び中西, 1986, Asada, 1993), 多くの高精度なデジタル水深データが蓄積されてきた。一方、コンピュータの格段の進歩やグラフィックスソフトウェアの開発 (例えば, Asada, 1988, 1992)により、精密な等深線図や直感的に理解しやすい3次元地形図の出力が可能と

なり、海底地形の解釈に貢献できるようになってきている。しかしながら、これまでにすべてのデータをコンパイルして同じ基準で海底地形図を見る機会はなかった。ここではこれまでに日本周辺で得られた主に SeaBeam2000のデータを用いて、同じスケールのグリッドデータを作製し、同様な表現により各地域の海底地形図をプロットし、今後の多様な研究の基礎資料としたい。

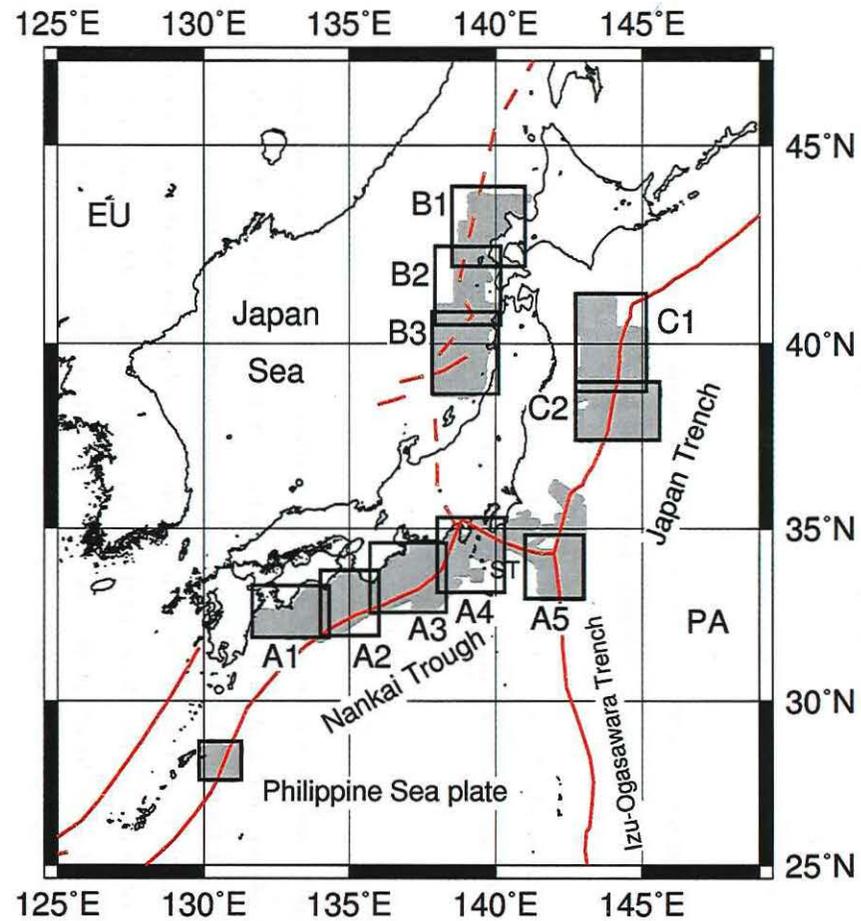
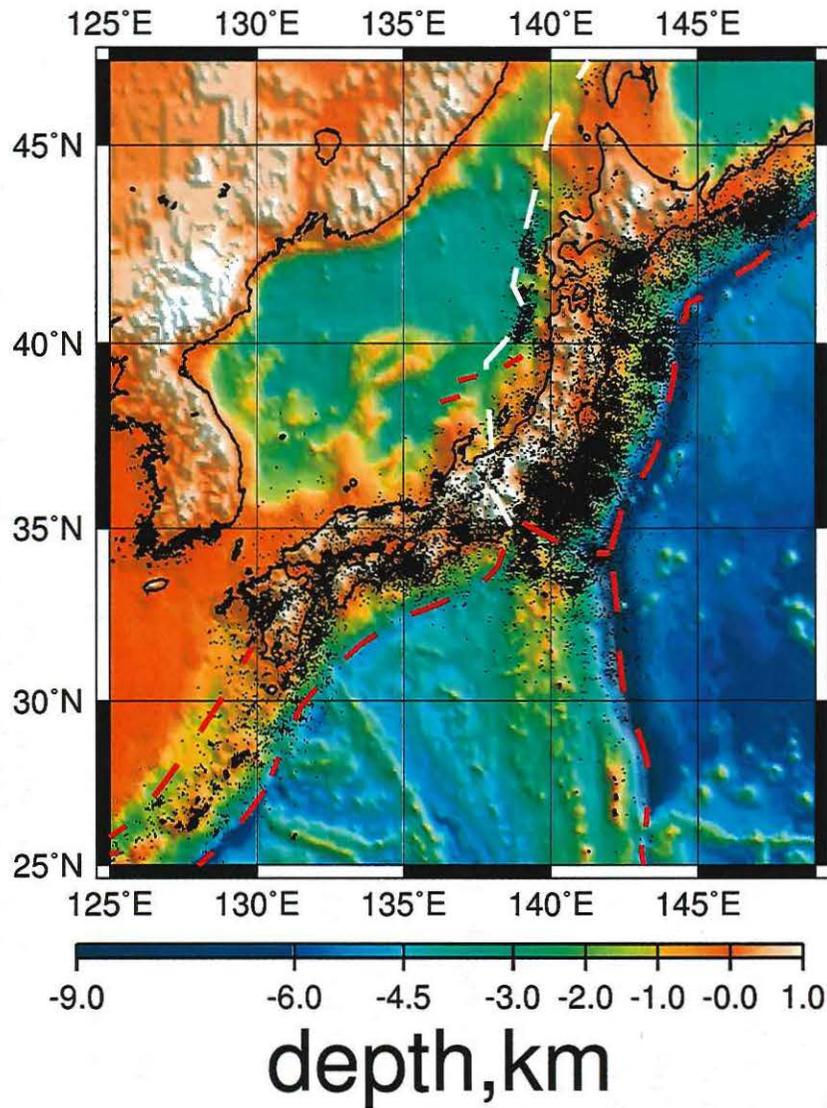
上述のような最近のマルチビーム音響測深機等による測深技術の進歩に伴い、特に短波長領域の海底地形の凹凸の統計的評価が可能となってきており、海底地形を数個のみのパラメタで表現する試みが多くなされている (例えば, Fox and Hayes, 1985, Goff and Jordan, 1988; Malinverno and Gilbert, 1989; Neumann and Forsyth, 1995)。統計学的手法を用いて海底地形の定量的解析を行うことにより、異なる領域間の客間的な比

† Received 1996 December 11th; accepted 1997 February 19th.

* 企画課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Hydrographic Department.

** 海洋調査課 Ocean Research Division, Hydrographic Department.

*** 五管区高知航路標識事務所 Kochi Aids to Navigation Office, 5th Regional Maritime Safety Headquarter.



*Hydrographic Department
SeaBeam2000 data coverage*

Fig. 1 left : Epicenter distribution with $M \geq 4$ by Japan Meteorological Agency during 1926-1995 Sep. on the ETOPO5 bathymetry. Red and white dashed lines are positions of plate boundaries. right : Map showing the data coverage of the SeaBeam 2000 obtained by Hydrographic Department, Japan (HDJ). Shading indicates where the bathymetry was collected. EU : Eurasia, PA : Pacific Ocean, ST : Sagami Trough.

較が可能となる。いくつかの解析手法のうち、パワースペクトルは深さの変化を空間周波数(波数)の関数として評価する手法であり、多くの場合地形の凹凸のパワースペクトルは以下に示すような冪乗則にあてはまる。

$$P(k) = \alpha k^{-\beta} \quad (1)$$

ここで、 P はパワースペクトル、 k は波数、 α 、 β はそれぞれ対数座標上における切片と負の傾斜に対応する。地球においては、陸上の地形や水深データを用いた1次元のフーリエ変換から β を求める研究が数多く行われており(例えば、Bell, 1975; Fox and Hayes, 1985, Gilbert and Malinverno, 1988), 波長 $10^3 \sim 0.1\text{km}$ の範囲で $\beta \approx 2$ が得られている。さらに、Fox and Hayes (1985)は、 α 、 β の値の地域差がその地域のテクトニクスを反映していると示唆している。

沈み込みテクトニクス下の海溝域では、共通して海側海溝斜面に horst & graben 構造を形成している多数の正断層が見られる。これらの海底地形については、例えば日本近海においては、日本海溝では Cadet *et al.* (1987), Kobayashi (1991), 小林等 (1991, 1993), 笠原及び小林 (1991), 堀田等 (1992), 小川及び小林 (1994), 橋本等 (1995) により、伊豆・小笠原海溝域では加藤等 (1990), 瀬田等 (1991), 沖野等 (1994) により詳細な解析が行われている。正断層の走向は一般に海溝軸にほぼ平行であり、沈み込む海洋プレートの折れ曲がりによる張力のために形成されたと考えられている。この論文では、日本近海の SeaBeam2000 のデータを用いて統計解析を行う第一段階として、特徴的な海底地形を示す海側海溝斜面の horst & graben 構造が、(1)式の β の値にどのような影響を与えるかを調べたので報告する。

2. 海底地形図の表示

Fig. 1 で示したように SeaBeam2000 により得られたデータは、大別すると南海トラフ、相模トラフ—伊豆・小笠原海溝—日本海溝の三重会合部、日本海溝三陸沖、喜界島沖、日本海東縁部の地震活動の活発な領域に存在する。

この章においては、これまでに得られた主に SeaBeam2000 のデータを、グリッド間隔、図のスケール、等深線間隔を等しくして表示する。南海トラフと東北日本周辺海域(日本海溝・日本海東縁部)についてはデータが600~800kmにわたり連続的に得られているので小縮尺の図として800万分の1のものを掲載し、これら2領域を含む他の領域については300万分の1の図を出力した。ここで使用した地形データのグリッド間隔は大縮尺の図では10分、小縮尺の図では30分である。彩色については、大縮尺のもののみは等しくしたが、小縮尺のものは領域によって多少異なる。それぞれの図に対して、等深度線図と直感的に地形を把握できるように陰影図を示した(Fig. 2~Fig.14)。水路部 SeaBeam2000 以外のデータを含む図は、小縮尺の Fig. 2 と Fig. 8, 及び日本海東縁北部の Fig. 9 である。Fig. 2 の南部は測量船「拓洋」の SeaBeam による大陸棚調査のデータが含まれており、また Fig. 8 および 9 の北緯43度15分、東経138度45分付近の山体は海洋科学技術センターの潜水母船「よこすか」のマルチビームシステム HS10 によって取得されたデータによる。

3. 海側海溝斜面域のスペクトル解析

海側海溝斜面域では、海洋プレートの沈み込みに伴う特徴的な地形が観察される。例えば、Fig. 7 (b) に示した伊豆・小笠原海溝北端部の海底地形の陰影図では、海溝の海側斜面に軸方向にほぼ平行およびそれと斜交する2つの走向のリニアメントが顕著である。同様に、日本海溝では Fig.12(b), 13 (b)において、いくつかの方向をもつリニアメントが明瞭に観測される。これらのリニアメントは(1)式のパワースペクトルにどのような影響を与えるかを、以下の手順により調べた。

(1)式の β の領域における違いを評価するために、海側斜面域をいくつかの領域にわけた。また、 β の方位異方性の存在の有無を確認するため、各領域について15度毎に地形断面をもとめ、それぞれの断面についてスペクトルの計算を行った。計算に使用したデータは、海底地形図をプロットし

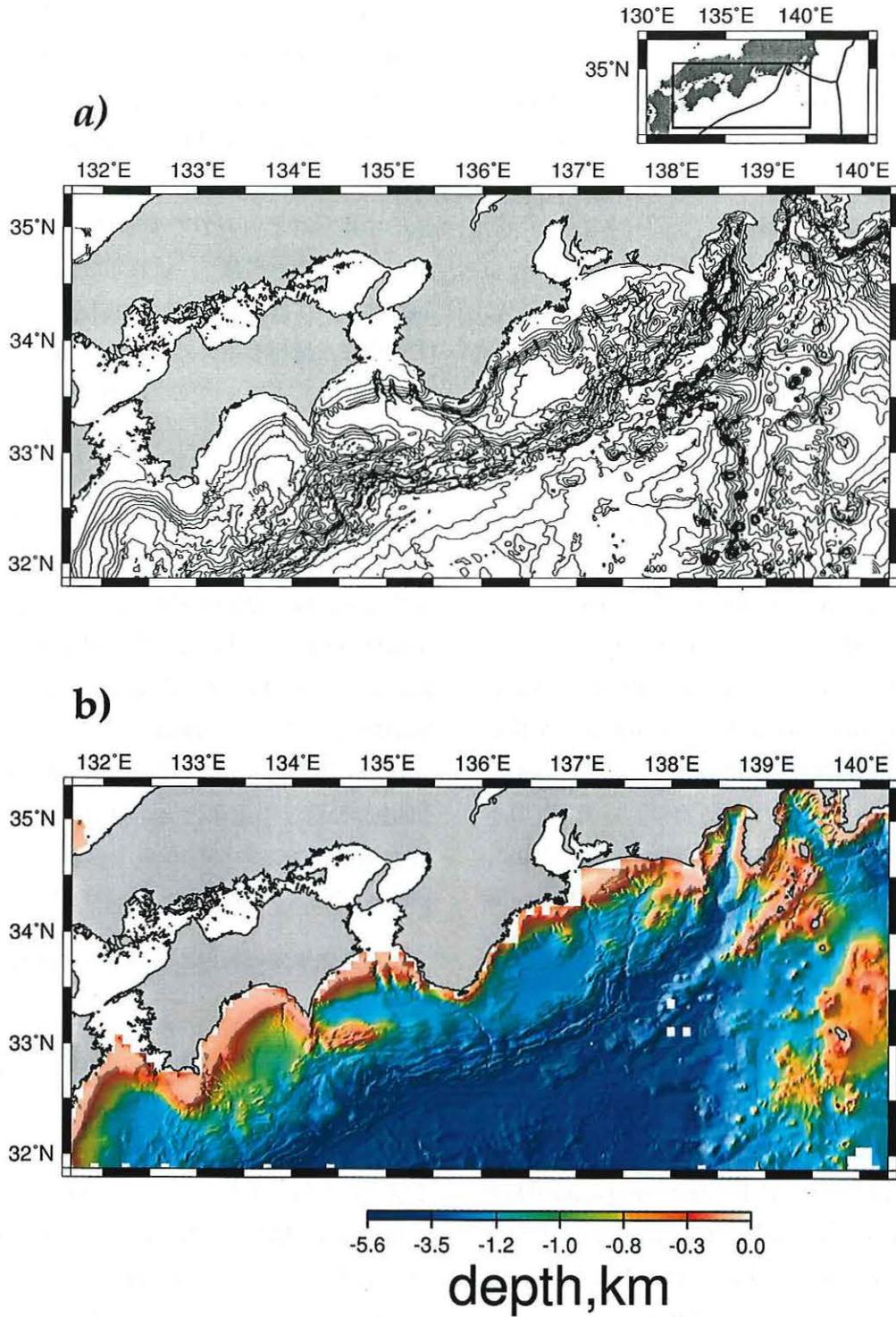


Fig. 2 (a) Bathymetric map of the Nankai Trough region. Contour interval is 200m. The data include not only the SeaBeam 2000 data but other multibeam data, for example, obtained by *S/V Takuyo*. (b) Shaded relief plot of the same region of (a). Illumination angle is from the west-northwest.

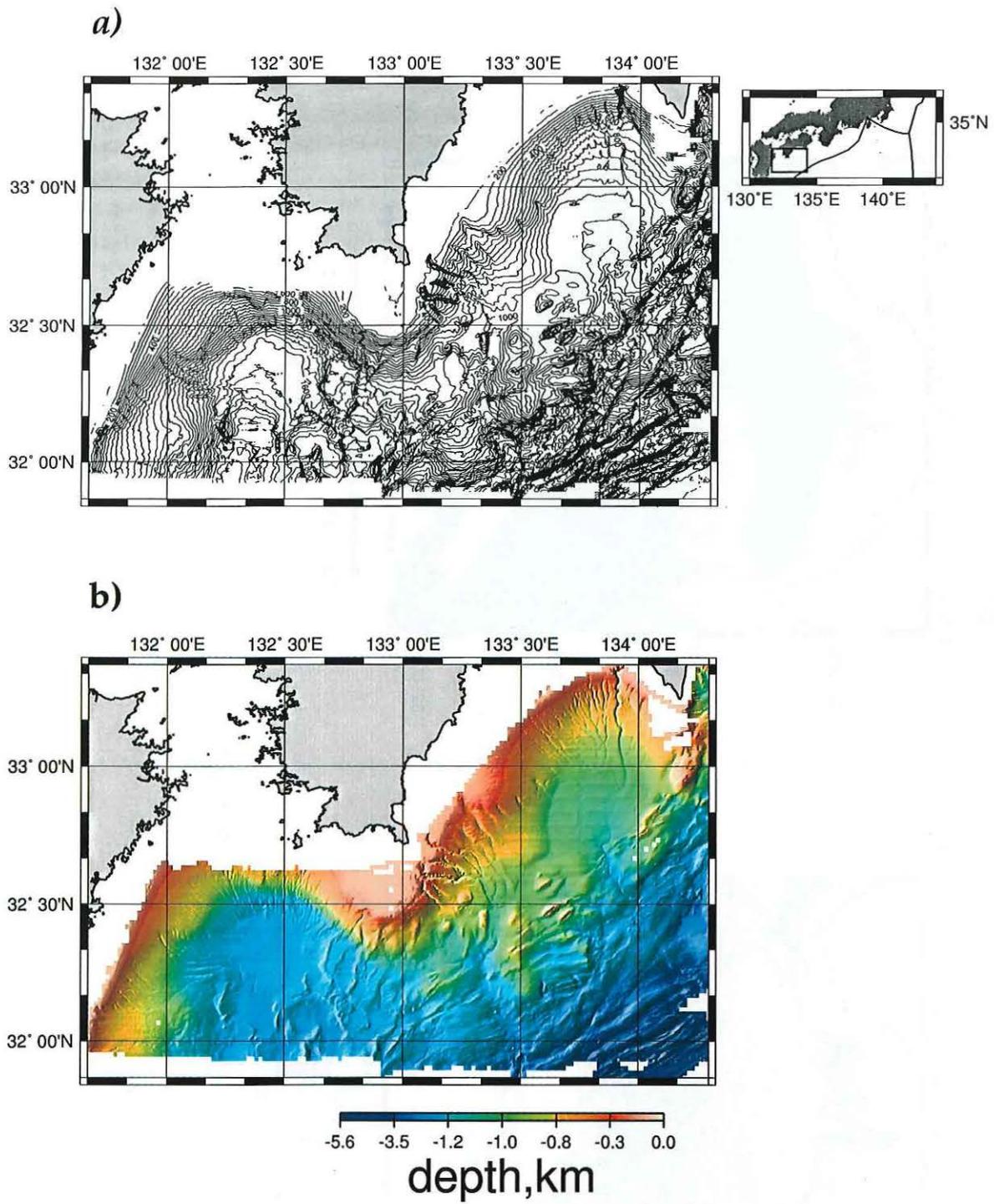


Fig. 3 (a) SeaBeam 2000 bathymetry of the region A1 in Fig. 1 . Contour interval is 50m. (b) Shaded relief plot. Illumination angle is from the west-northwest.

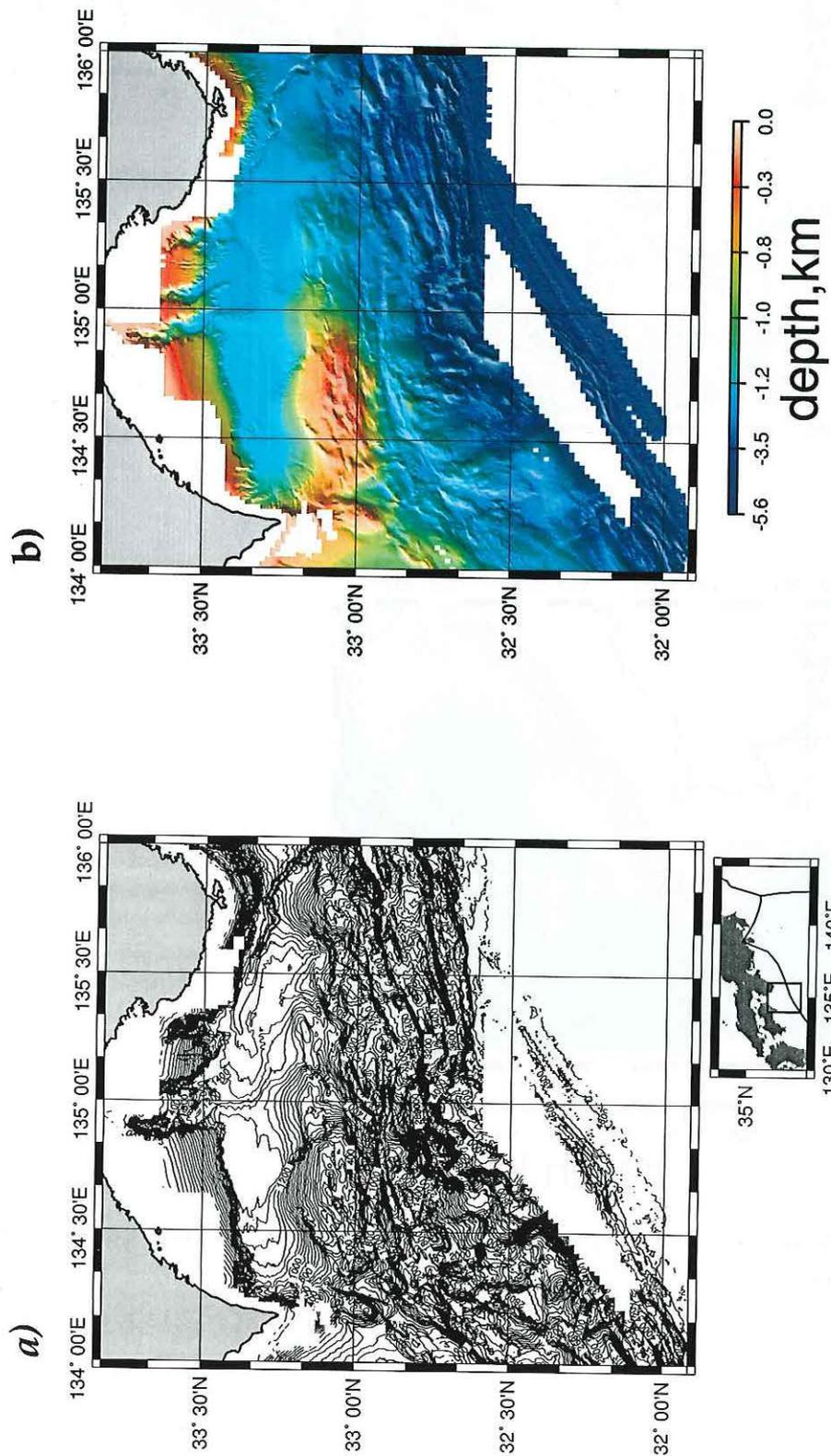


Fig. 4 Same as Fig.3 but for region A2.

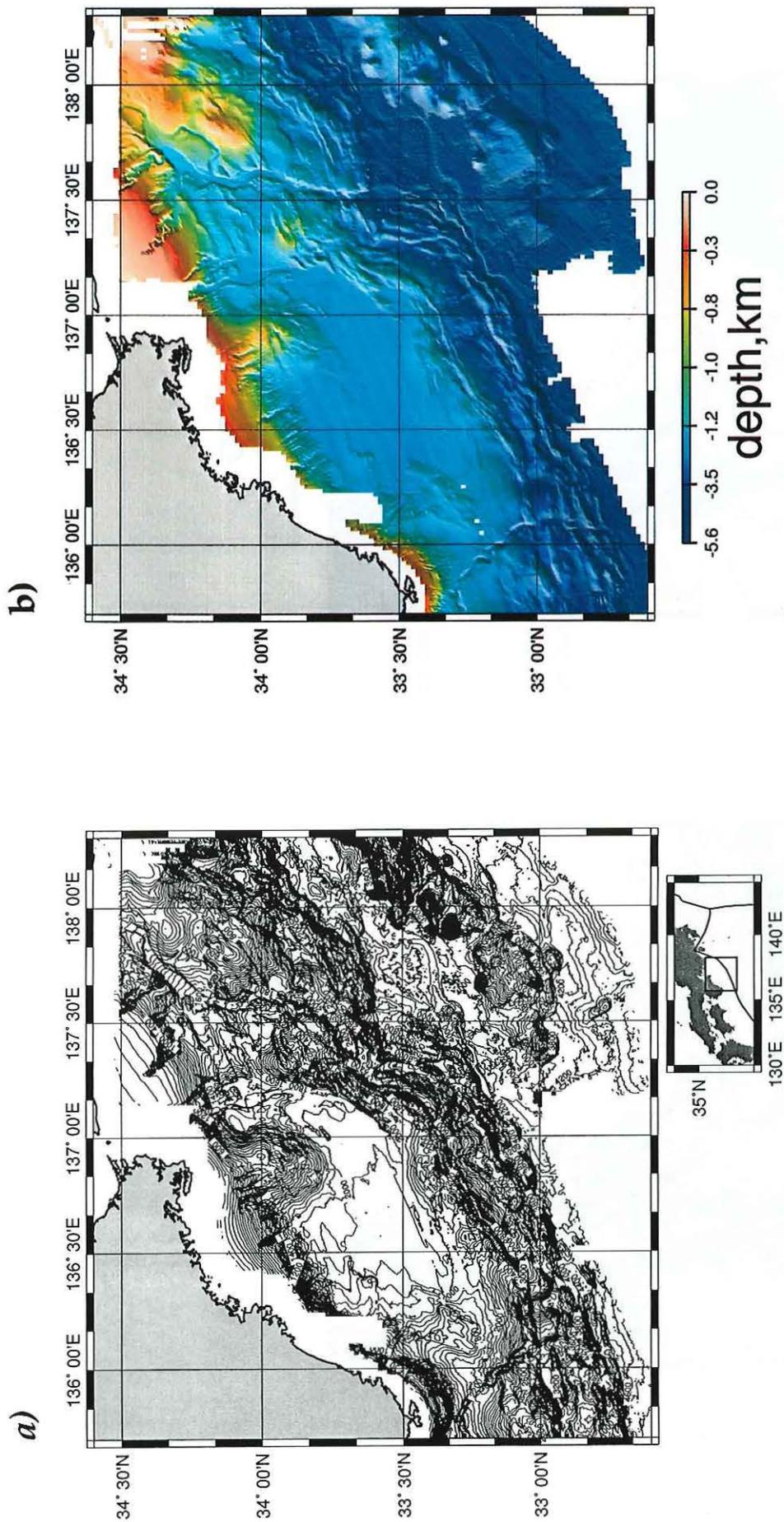


Fig. 5 Same as Fig.3 but for region A3.

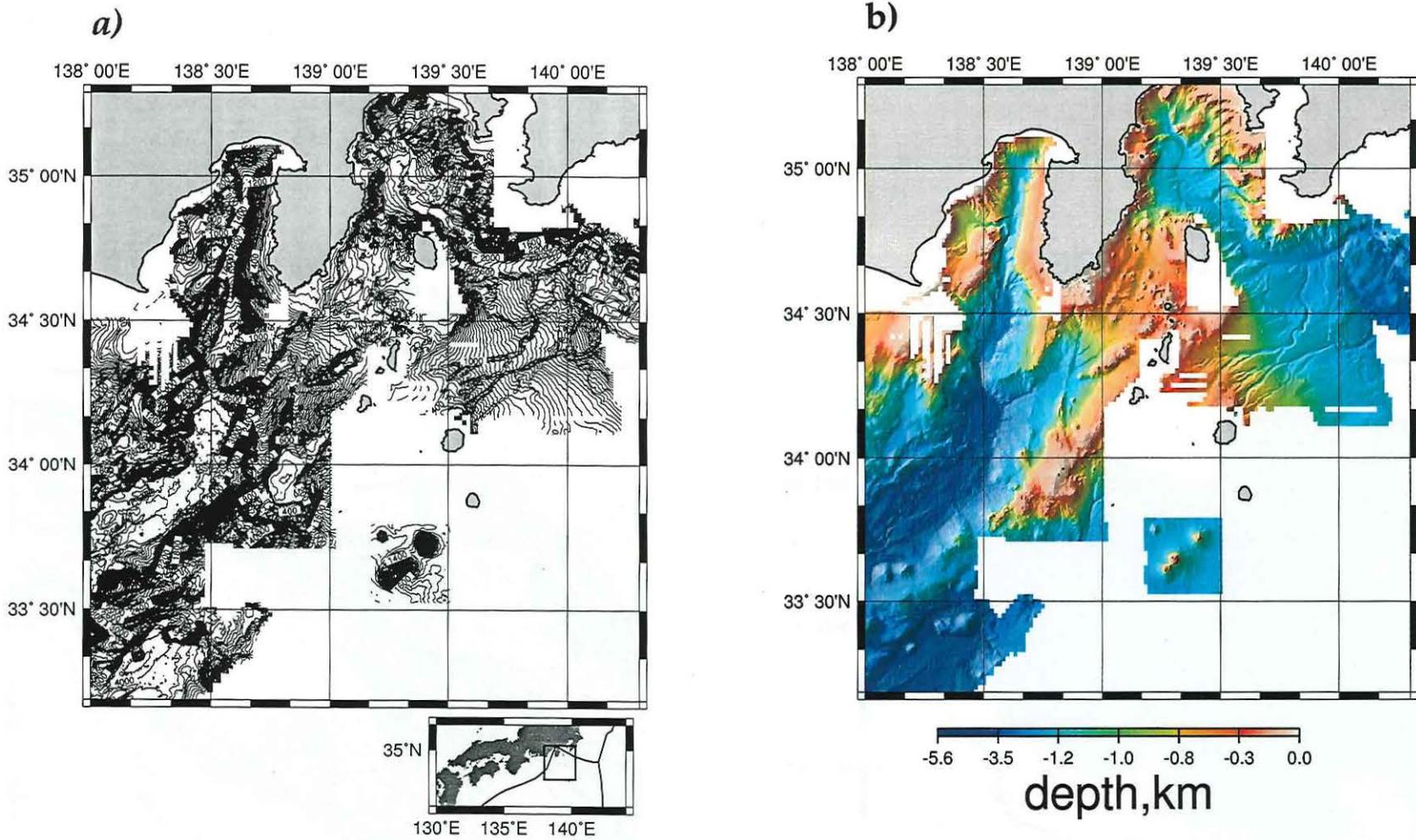


Fig. 6 Same as Fig.3 but for region A4.

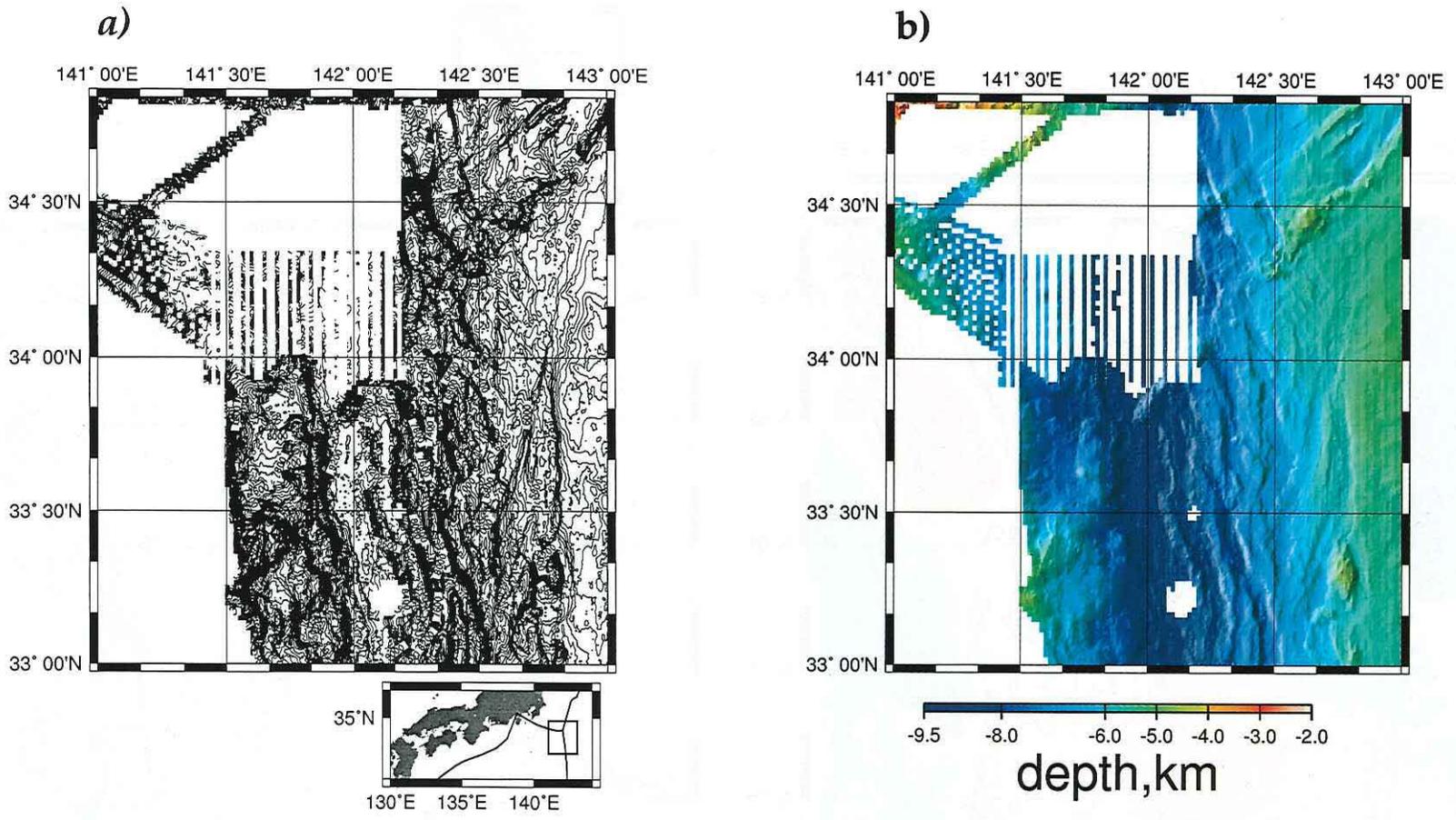


Fig. 7 Same as Fig.3 but for region A5.

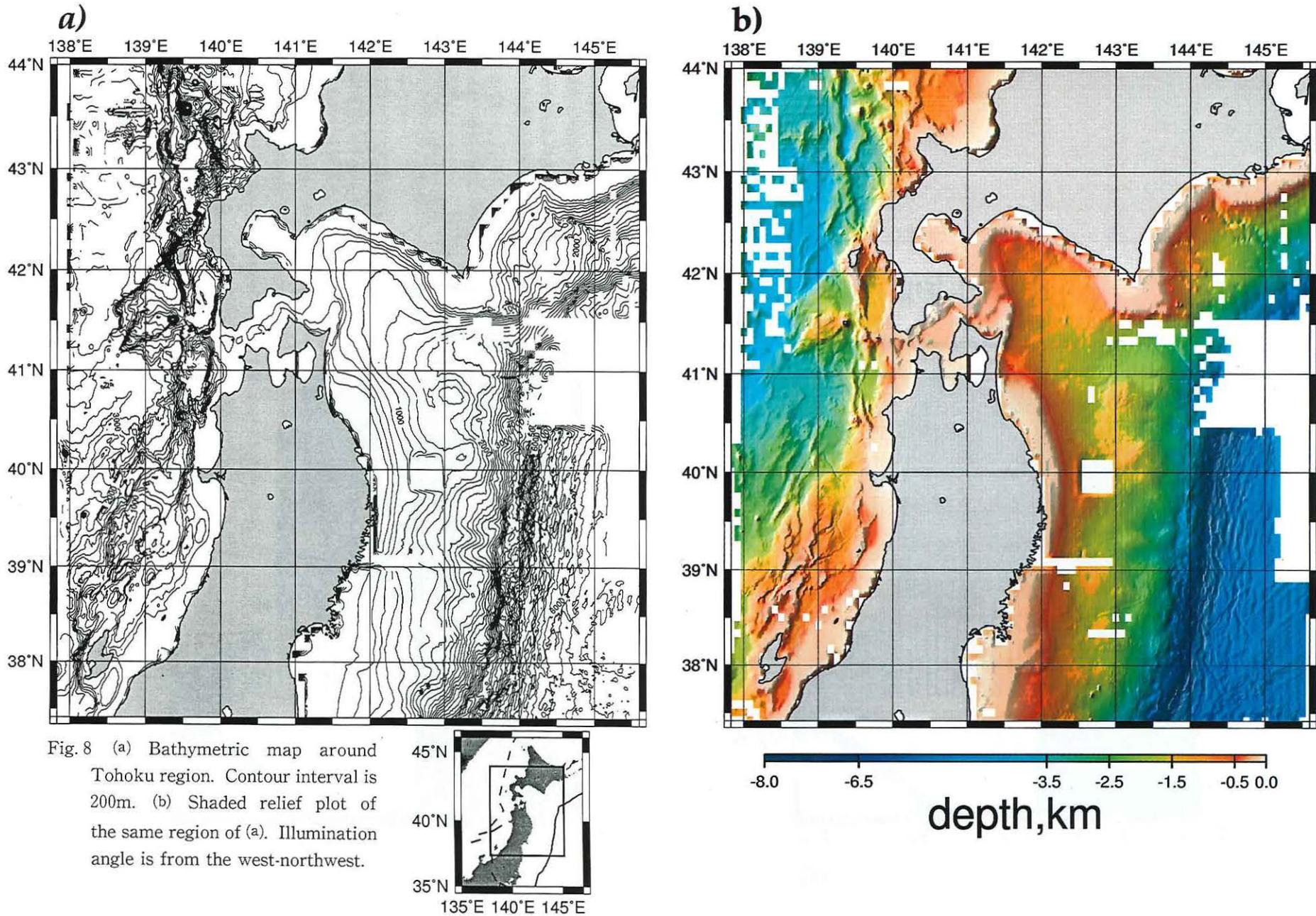


Fig.8 (a) Bathymetric map around Tohoku region. Contour interval is 200m. (b) Shaded relief plot of the same region of (a). Illumination angle is from the west-northwest.

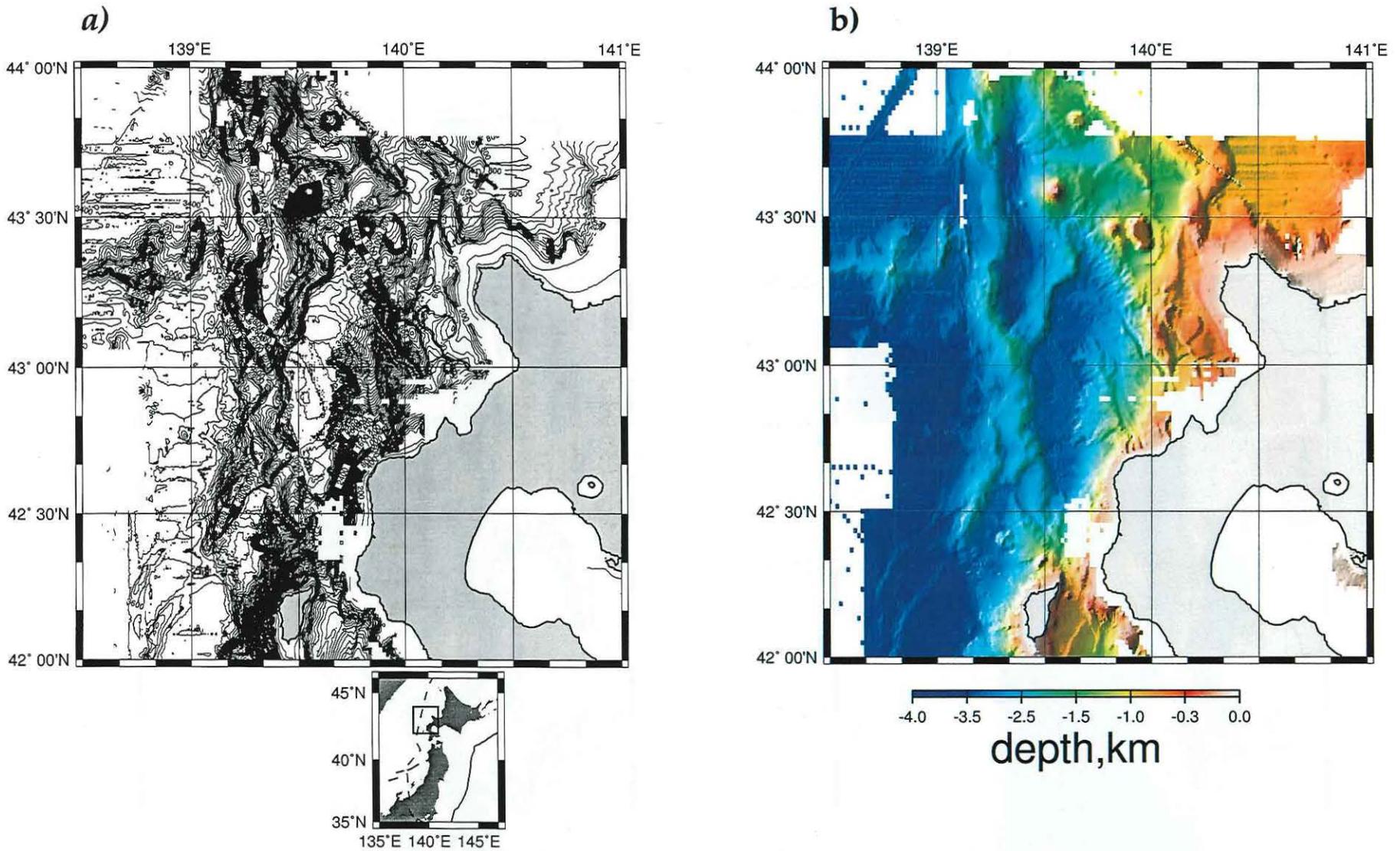


Fig. 9 (a) Bathymetry of the region B1 in Fig.1, the eastern margin of the Japan Sea. Contour interval is 50m. (b) Shaded relief plot. Illumination angle is from the west-northwest.

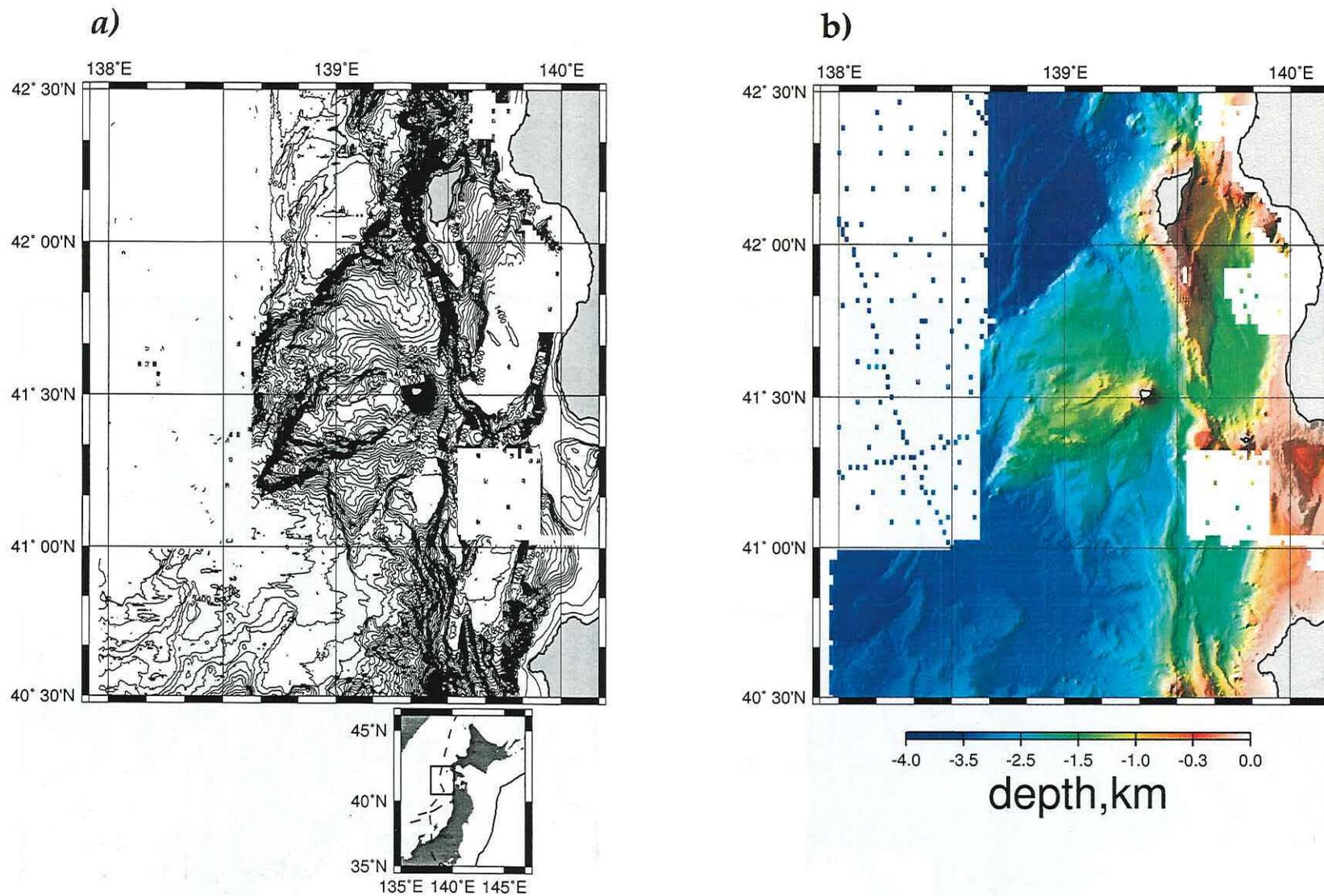


Fig.10 Same as Fig.9 but for region B2.

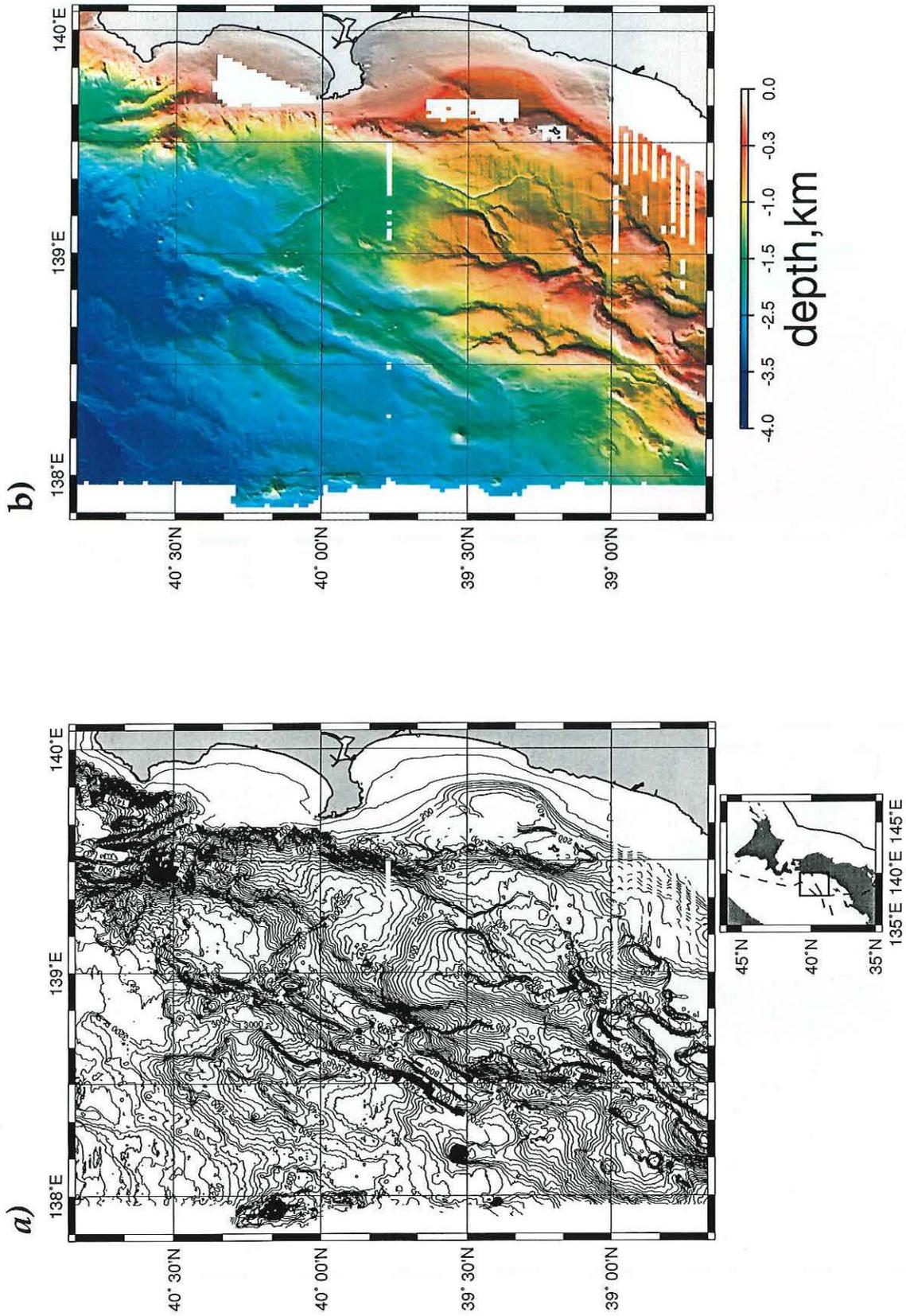


Fig.11 Same as Fig.9 but for region B3.

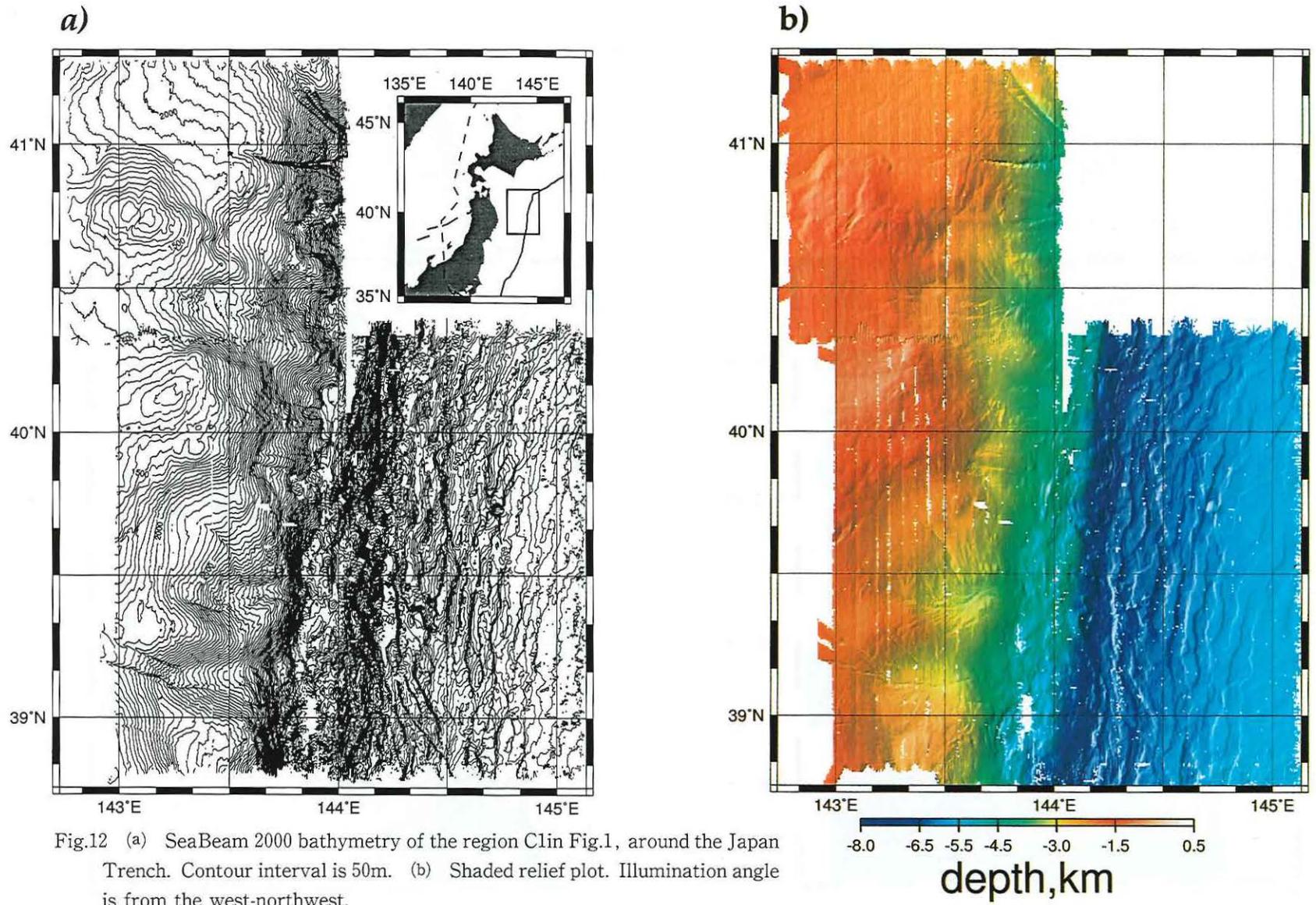
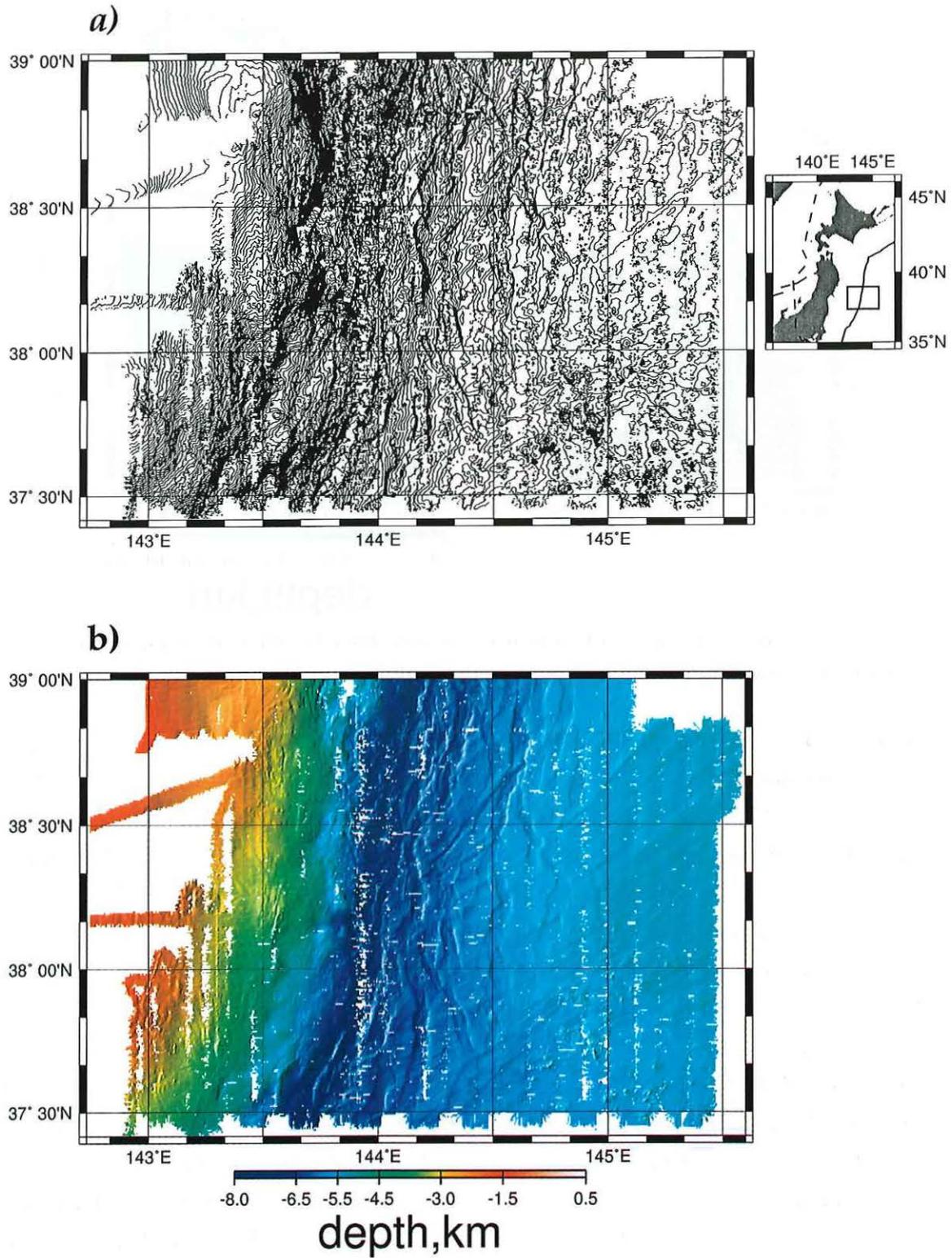


Fig.12 (a) SeaBeam 2000 bathymetry of the region Clin Fig.1, around the Japan Trench. Contour interval is 50m. (b) Shaded relief plot. Illumination angle is from the west-northwest.



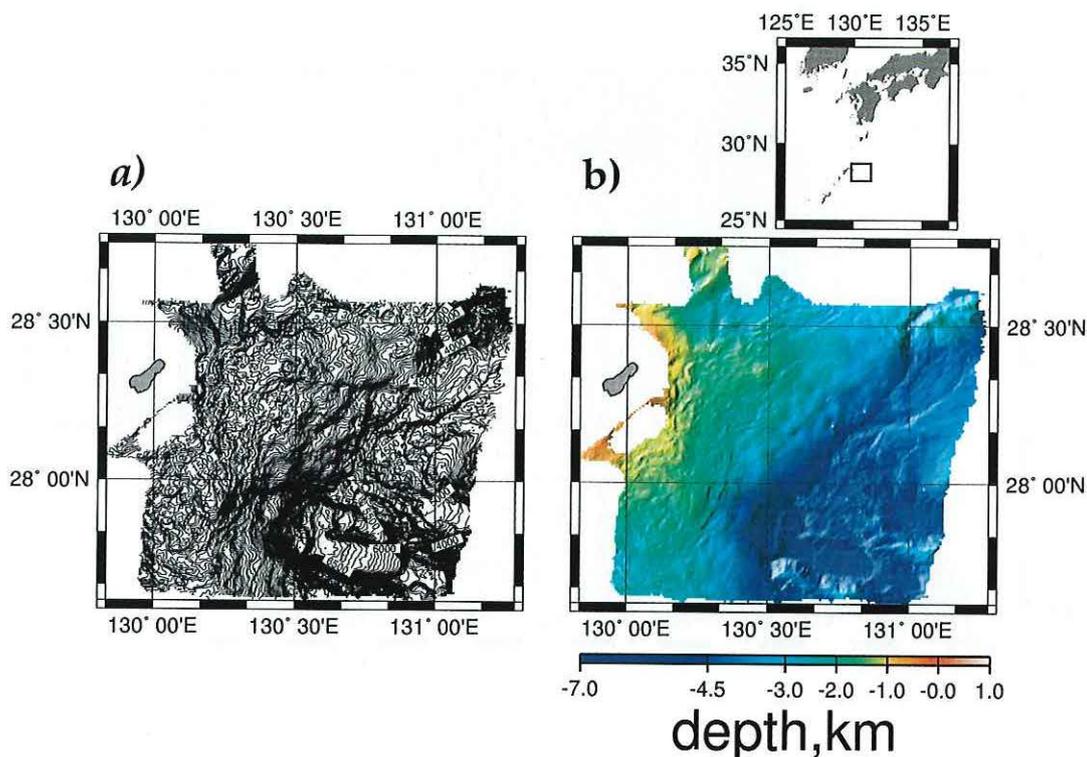


Fig.14 (a) Bathymetry off the Kikai island near the Nansei-Shoto Trench. Contour interval is 50m. (b) Shaded relief plot. Illumination angle is from the northwest.

たものと同じグリッドデータから、ある方向への断面について300m間隔でサンプリングすることによって作製した。FFTのプログラムはGMT graphic package (Wessel and Smith, 1991) によって提供されているもので、本解析においては、128サンプル、すなわち38.4km毎にスペクトルを評価した後にそれらの平均をとり平滑化させたものを使用した。また、スペクトルを計算する前にトレンドの除去を行った。

(1) 日本海溝北緯37度30分～40度20分

Fig.15には、日本海溝の海側斜面に存在する地形の起伏を強調するために、鯨観図を示した。この領域では、Fig.15右下のインデックスマップに示すように5つの領域に分割してパワースペクトルを求めた。Fig.16は三陸沖の最も北にあたる領域1 (Fig.15のR1)、一辺の長さが約80kmのほぼ正方形領域、に対して得られた結果である。左図は海底地形の断面図を北から時計回りに5度毎にプロットしたものを示している。ただし海溝軸にほぼ平行な断面を除いては、最深部から海側斜面側のみ表示してある。上部の36本のトレースは海溝

地形のトレンドを差し引いたものであり、下部には生データを示した。右図はトレンドを差し引いた深度データについて南北方向から時計回りに15度毎の断面についてパワースペクトルの計算を行った結果である。パワースペクトルはいずれの方向においても波長に対して線形関係にあり、海溝海側斜面域においても海底地形はself-affineの性質を保っていることを示している。図中スペクトルの傾斜の大ききの比較が容易なように-3の傾きをもつ直線を何本かプロットしてある。傾斜の大ききは方向によって変化し方位異方性があることを示唆するが、海底地形が特に大きな段差を示す方位60～135度の範囲では、波長1～10kmの領域で β はおおよそ3の値をとる。Fig.17は領域1の約70km南にあたる領域2 (R2) に対して得られた結果であり、領域1と同様の傾向を示すが、 β の方位によるばらつきは領域1に比べて小さい。

領域3 (R3) はさらに南部の宮城県沖で、146×136kmの広がりを持ち、これまでよりさらに太平洋側にデータをもつ。地形断面およびスペクトルの計算結果を Fig.18に示す。スペクトルの傾斜は北

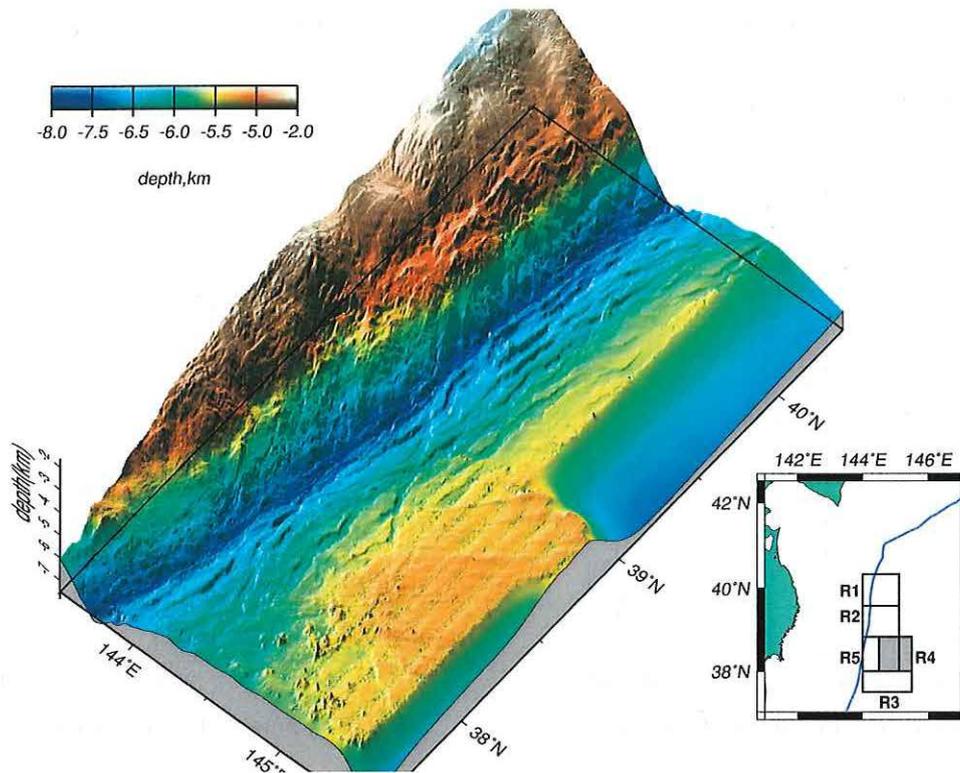


Fig.15 Three-dimensional view (whale-eye's view) of the seaward slope of the Japan Trench. Index map for Figs.16-20 is shown at the right.

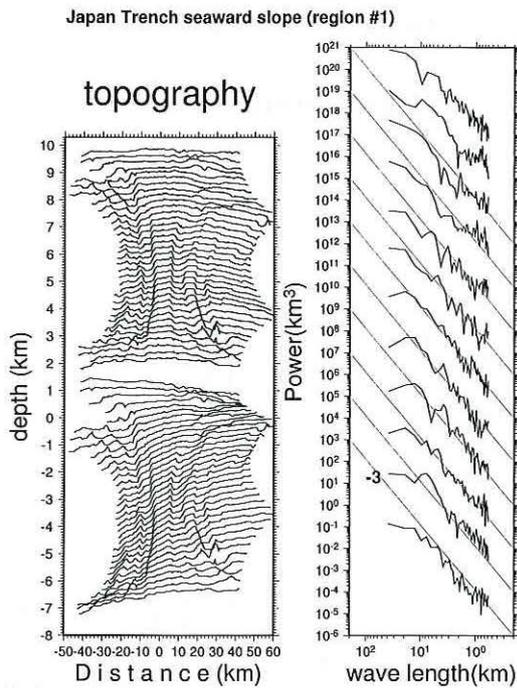


Fig.16 (Left) Water depth profiles used to generate one-dimensional power spectrum from various azimuths for Region 1 in the Japan Trench. The top is NS direction transect and the following ones are sampled along the line clockwise at an interval of 5°. These profiles are offset for clarity of presentation. (Right) Power spectrum densities estimated for profiles at every 15° clockwise from the north. For ease of comparison, each spectrum has been offset by two orders of magnitude. The absolute values of the vertical axis in this figure are meaningless. Also shown are lines of slope of $\beta=3$.

部のR 1, R 2に比較してやや小さくなる傾向がある。この性質をより詳しく調べるために、R 3の北緯38度以南の小さな山体が多く見られる領域を除き、さらに海側の領域4 (R 4, Fig.19)と陸

側の領域5 (R 5, Fig.20)の領域に分けてスペクトルを求めた。地形断面図では、領域5の方が領域4と比べて凹凸の落差が大きく、スペクトルの傾斜で見ると β 値も大きくなっている。

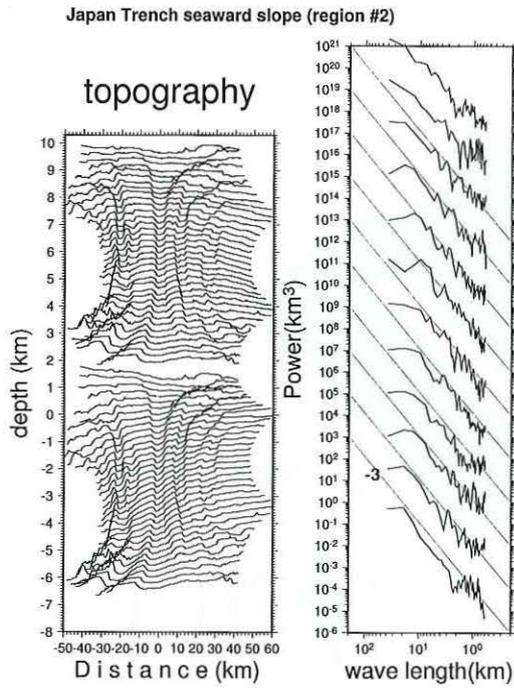


Fig.17 Same as Fig.16 but for the Region 2.

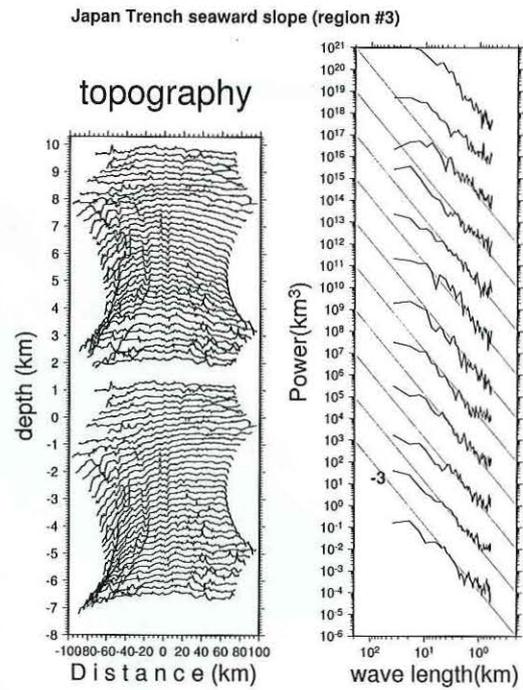


Fig.18 Same as Fig.16 but for the Region 3.

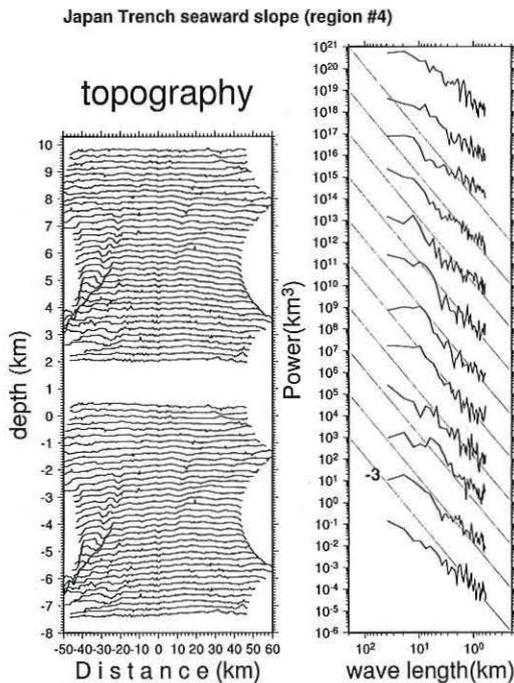


Fig.19 Same as Fig.16 but for the Region 4.

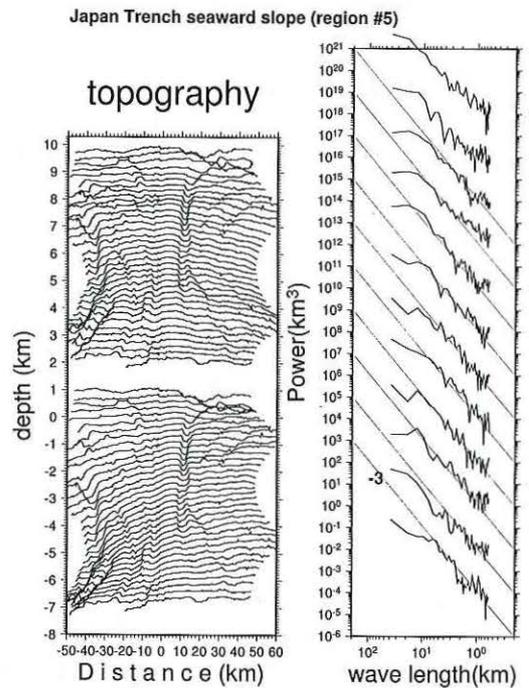


Fig.20 Same as Fig.16 but for the Region 5.

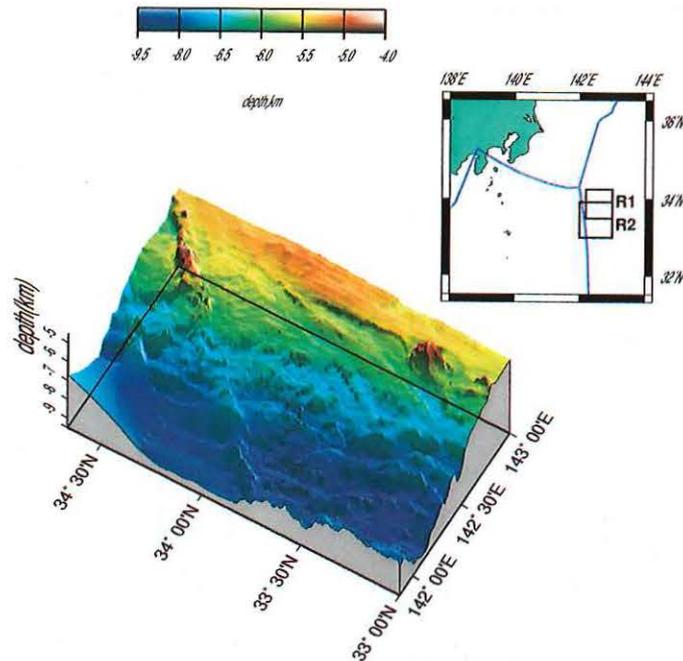


Fig.21 Three-dimensional view (whale-eye's view) of the seaward slope of the Izu-Ogasawara Trench. Index map for Figs. 22-23 is shown at the right.

(2) 伊豆・小笠原海溝北緯34度付近

伊豆・小笠原海溝の海側斜面の鯨観図を Fig.21 に示す。Fig.21は西側から眺めたものであるが、スケールは日本海溝域の Fig.15と同等である。Fig.15と比較してみると、海底面の凹凸の変化が伊豆・小笠原海溝北部の方が大きいように見える。ここでは、Fig.21右上のインデックスマップに示すように、北端部において水深5500mの平坦面から連続する走向N30°Eのridge状の地形の高まりの列が存在するところを除いた、2つの領域に対してパワースペクトルを求めた。北部の領域(R1)は75×71km、南部(R2)は97×86kmの広がりを持ち、それぞれの約50%が重複している。それぞれの領域で得られた結果を Figs.22, 23に示した。これらの図における地形断面では起伏の段差が500mを越えており、日本海溝で得られたものより、有意に大きい。対応するスペクトルの傾斜 β は、海溝軸にほぼ平行な方向を除くと方位異方向性が小さく、3よりも大きな値をとる。

5. 議論

日本海溝では北緯37度50分～39度50分の範囲で、東京大学海洋研究所白鳳丸のSeaBeamによ

る調査がある(小林等1991, 1993, Kobayashi, 1991, Kobayashi *et al.*, 1995)。小林他(1993)によれば、海溝海側斜面の正断層群のリニアメントは、最北部の数本を除いてはN70°Eの磁気異常縞模様と平行なものではなく、最大多数が海溝軸に平行で、その他にN20～40°EとN20～30°Wの走向をもつ崖が北緯38度～39度付近に多い。Fig.12に示した北緯38度50分～40度20分の範囲における水路部SeaBeam2000のデータからも同様な地形解析の結果が得られている(橋本等, 1995)。橋本等(1995)は、特に北緯39度55分以上においてN60°Eのリニアメントの存在を指摘し、これはこの領域の地磁気異常(M10)の方向かまたは千島海溝軸の走向方向に関連していると報告している。

これらの地形解析の結果を今回スペクトル解析を行った領域に対応させると、日本海溝海側斜面の領域1では磁気異常縞模様と平行な地形が存在するが、領域2および5ではほとんどの地形が海溝軸に平行な凹凸をもつことを示す。このことから領域2および5の方が領域1よりもスペクトルの傾斜 β の方位による変化が大きくなることが予想されるが、実際には、領域1で得られた β の

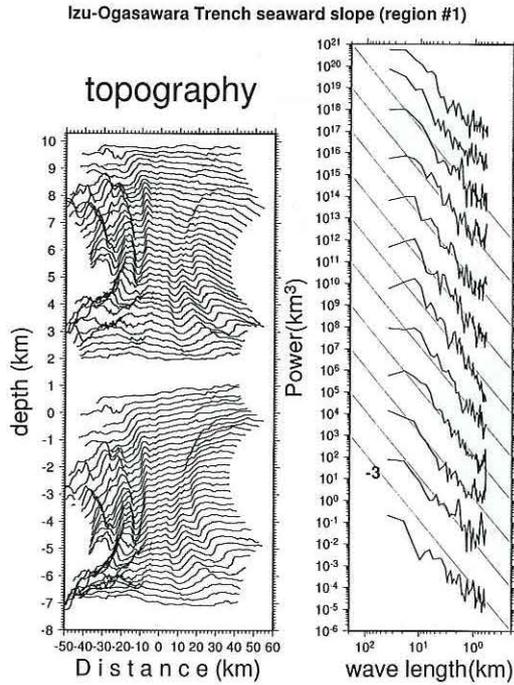


Fig.22 (Left) Water depth profiles used to generate one-dimensional power spectrum from various azimuths for Region 1 in the Izu-Ogasawara Trench. The top is NS direction transect and the following ones are sampled along the line clockwise at an interval of 5°. These profiles are offset for clarity of presentation. (Right) Power spectrum densities estimated for profiles at every 15° clockwise from the north. For ease of comparison, each spectrum has been offset by two orders of magnitude. The absolute values of the vertical axis in this figure are meaningless. Also shown are lines of slope of $\beta=3$.

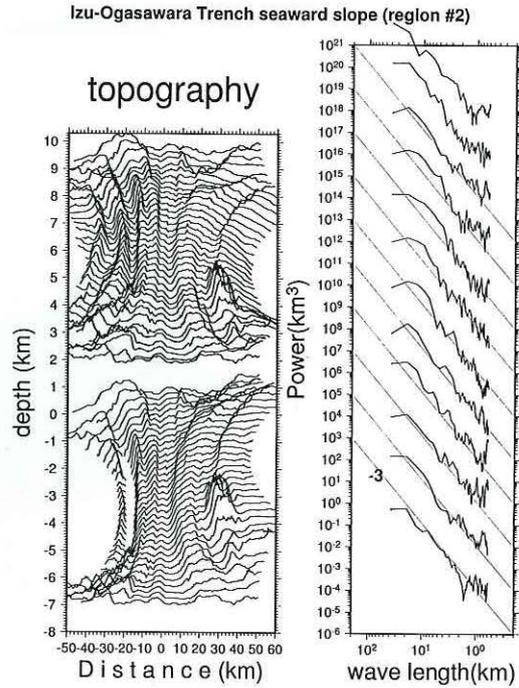


Fig.23 Same as Fig.22 but the Region 2.

方位異方性 (Fig.16) の方が、領域 2 および 5 (Figs.17, 20) と比較してより大きい。これは磁気異常縞模様と平行なリニアメントを形成する地形の変位量が小さいために、その影響がスペクトルに影響を及ぼさないためと考えられる。

領域 1, 2 および 5 の海溝軸にほぼ平行な N90°E 方向の β はすべて 3 程度であり、同じテクトニック要因、すなわちここではプレート沈み込みに伴う水平横向き張力によって形成されたことを示唆している。一方、領域 4 および 5 のパワースペクトルを並べて比較する (Fig.24) と、いずれの方向で見てもより海側の領域 4 の β は 3 を越えることはなく、領域 5 よりも明らかに小さい値

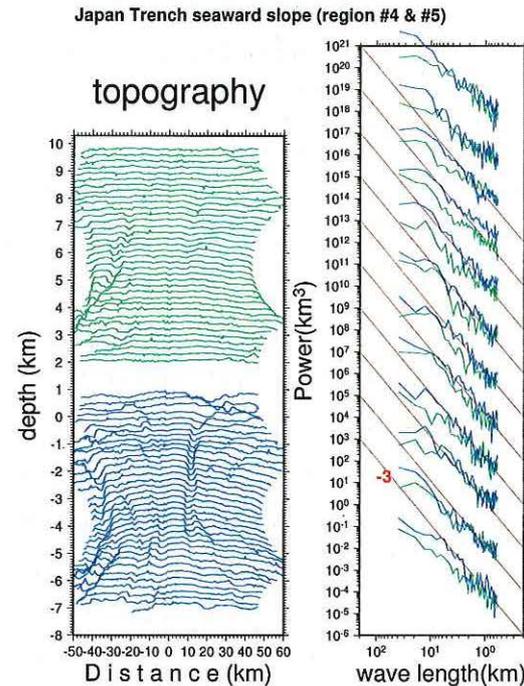


Fig.24 Comparison of the water depth profiles and power spectrum densities between Region 4 (green) and Region 5 (blue) in the seaward slope of the Japan Trench.

をとる。これは、領域5では波長が1 kmよりも大きい領域で、スペクトルが大きなエネルギーをもつために β の値を大きくしていることによる。すなわち、海洋プレートが海溝に近づくと沈み込みによって1 km以上の間隔で分布する正断層群の変位量が大きくなることを反映していると考えられる。

Fig. 7に示した伊豆・小笠原海溝北緯34度付近での沖野等(1994)による地形解析の結果は、水深によるリニアメントの特徴を次のように示している：水深9000 m台の海溝軸から水深7000 mまでの斜面最下部では、海溝軸と平行なN15~20°Wの断層崖が発達し、崖の比高は500~1000 mで長さは約30 km, grabenの幅は平均6 km, 水深7000~5000 mでは海溝軸に平行な崖と地磁気縞異常(M 5~7)に平行なN20~30°Eの崖が発達し、この2方向の崖により、斜面が5~15 kmの平行四辺形状にブロック化している。

今回行ったスペクトル解析においては、上述のような水深による領域の分割は、データ数が少なくなるため困難である。領域の一部を重ねることにより、2領域に分けて海溝軸に沿う β の変化があるかどうか調べたが、どちらの領域についても β は3以上となり、有意な差は得られなかった。

これまでに深海平坦面で得られている β は、例えば北西太平洋 Gorda Rise 近傍の Tufts 深海平坦面では2.80 (Fox and Hayes, 1985) や南大西洋の海嶺に直交方向にとられた abyssal hill 地形断面での2.66 (Gilbert and Malinverno, 1988) と、3よりも小さな値をとる。一方、フィリピン海南東端におけるヤップ海溝中央部海側斜面で得られた海溝軸に垂直方向のマルチビームの中心ビームから求めたパワースペクトルの傾斜は波長300 mから2 kmの範囲でおよそ3.3となった(西澤等, 1994)。これらのことから、海側海溝斜面における沈み込みのために生じた horst & graben 構造は、その地形をスペクトルで表現したときに、その傾斜 β を大きくする影響を与えることが示唆される。

6. まとめ

これまでに蓄積された SeaBeam2000により得られた精密地形データをコンパイルした結果、以下が示された。

- ・データの存在する領域が一目でわかるようになった。

- ・同じ縮尺で地形図の表示をすることにより、各地域間の地形の比較が容易になった。

- ・コンター図と同時に陰影図を提示することにより、地形の特徴を直感的にイメージすることが容易となった。

また、得られたグリッドデータを用いて、地形の統計的解析を試みた。プレートの沈み込みに関連した特徴的な海底地形を示す海側海溝斜面において、地形断面に関する1次元のスペクトル解析を行った。推定されたパワースペクトルの傾斜 β は、沈み込みの影響のないところでは3よりも小さいが、海洋プレート上部の張力による正断層活動が活発な海溝軸近傍では3を越えることがわかった。

この研究では、地形を表現する統計パラメータとして唯一スペクトルの傾斜の値のみを扱ったが、今後はこの他のパラメータやパラメータの推定法についてさらに検討していく必要がある。

謝 辞

海底地形データは水路部海洋調査課の方々および測量船の乗組員の方々による調査結果の蓄積により得られたものです。海洋科学技術センターの小林和男先生には原稿を読んでいただきました。ここに記して謝意を表します。なお地形図の作成には GMT graphic package (Wessel and Smith, 1991) を使用しました。

参 考 文 献

浅田昭・中西昭：シービームデータによる海底地形図の作成，水路部研究報告，21，89-108 (1986)。

Asada, A. : Contour processing and 3-D image

- processing of Sea Beam bathymetric data, *International Hydrographic Review*, Monaco, LXV (1), 65-80 (1988).
- Asada, A. : New bathymetric surveying and processing system based on SEA BEAM 2000, *Rep. Hydrogr. Res.*, **29**, 1-32 (1993).
- Asada, A. : Sea Beam 2000 : Bathymetric surveying with interferometry, *Sea Technology*, **6**, 10-15 (1992).
- Bell, T. H. : Statistical features of sea-floor topography, *Deep Sea Res.*, **22**, 883-892 (1975).
- Cadet, J.-P., Kobayashi, K., Aubouin, J., Boulegue, J., Duplus, C., Dubois, J., Von Huene, R., Jolivet, J., Kanazawa, T., Koizumi, K., Lallemand, S., Nakamura, Y., Pautot, G., Suyehiro, K., Tani, S., Tokuyama H. and Yamazaki, T. : The Japan Trench and its junction with the Kuril Trench, cruise results of the KAIKO project, leg 3, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **83**, 262-284 (1987).
- Fox, C. G. and Hayes, D. E. : Quantitative method for analyzing the roughness of the seafloor, *Rev. Geophys.*, **23**(1), 1-48 (1985).
- Gilbert, L. E. and Malinverno, A. : A characterization of the spectral density of residual ocean floor topography, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1401-1404 (1988).
- Goff, J. A. and Jordan, T. H. : Stochastic modeling of seafloor morphology : Inversion Sea Beam data for second-order statistics, *J. Geophys. Res.*, **93**, 13589-13603 (1988).
- 橋本直樹・沖野郷子・中川正則・小川勇二郎 : 日本海溝北部の海底地形, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, 119(1995).
- 堀田宏・小林和男・小川勇二郎 : 日本海溝北部海側斜面の地殻構造 「しんかい6500」第65, 66, 67潜航報告, しんかいシンポジウム報告書, **8**, 1-15(1992).
- 笠原順三・小林和男 : 海溝周辺の特徴的構造の考察, 月刊地球, 号外**3**, 45-50(1991).
- 加藤茂・瀬田英憲・春日茂・林田政和・伊豆・小笠原海溝の変動地形—特に海溝海側斜面の断層地形について—変動地形とテクトニクス, 古今書院, 130-143(1990).
- 小林和男他研究船白鳳丸KH90-1次航海乗船研究者一同 : 白鳳丸による日本海溝中部の地形精密調査, 地球惑星科学関連学会1991年合同大会共通セッション予稿集, 196(1991).
- 小林和男・玉木賢策・中西正男他研究船白鳳丸KH92-3次航海乗船研究者一同 : 海溝海側斜面の正断層群—千島海溝・日本海溝の比較, 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, 196(1993).
- Kobayashi, K. (editor) : Preliminary Report for the Hakuho Maru cruise KH 90-1. Ocean Research Institute, University of Tokyo, 174p (1991).
- Kobayashi, K., Tamaki, K., Nakanishi, M., Koresawa, J. and Ogawa, Y. : Rejuvenation of 130m. y.-old fabrics on the outer wall of the western Kuril Trench, *Proc. Japan Academy*, **71**, ser. B, 5-9 (1995).
- Malinverno, A. and Gilbert, L. E. : A stochastic model for the creation of abyssal hill topography at a slow spreading center, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1665-1675 (1989)
- Neumann, G. A. and Forsyth, D. W. : High resolution statistical estimation of seafloor morphology : oblique and orthogonal fabric on the flanks of the Mid-Atlantic Ridge, 34°-35.5°S, *Mar. Geophys. Res.*, **17**, 221-250 (1995).
- 西澤あずさ・沖野郷子・藤岡換太郎 : ヤップ海溝中央部海側斜面域の海底地形, JAMSTEC

- 深海研究, **10**, 251-259(1994).
- 小川勇二郎, 小林和男: 日本海溝と千島海溝の地形および地質的特徴, 月刊地球, 号外**9**, 61-69(1994).
- 沖野郷子・泉紀明・測量船「明洋」乗船者一同: 伊豆・小笠原海溝北端部の海底地形, 地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集, 207(1994).
- 瀬田英憲・長岡信治・加藤茂: マルチナロービーム測深機による伊豆・小笠原海溝の海底地形, 水路部研究報告, **27**, 173-180(1990).
- Wessel, P. and W. Smith: Free software helps map and display data, *EOS*, **441**, 445-446(1991)