

シービームデータによる三次元表現法

(相模トラフから伊豆・小笠原海溝にかけての海底地形への適用)

浅田 昭*

3-D IMAGE PROCESSING OF SEA BEAM BATHYMETRIC DATA—AS APPLIED FROM THE SAGAMI TROUGH TO THE IZU-OGASAWARA TRENCH

Akira Asada*

Abstract

A digital sounding system of good performance, called the Sea Beam, has been introduced and a sounding data processing system which can draw contour maps by computer processing has been prepared by the Hydrographic Department of Japan. The Sea Beam is a swath survey system with 16 narrow beams, which can survey the topography of the seafloor in detail, and give accurate data on depth and relative position between depth points. Up to this time, contour mapping has been used as a representative expression method of seafloor topography. However, it is difficult to catch the delicate topographical features from such contour maps. In recent years three-dimensional expression of the topography has been used by means of computer processing.

The technique adopted projects three-dimensional topography from various directions onto flat sheets. View maps are generally drawn by stream lines or meshes. However, the view maps have limits in expressive resolution, so they are not always suitable for fine topography. The author developed a method which expresses topography of the seafloor delicately, by using precise Sea Beam bathymetric data. The 3-D Image processing program expresses the topography of the seafloor with shade and color-coded depth contours, with the aid of an ink-jet scanning color plotter.

The efficiency of 3-D image processing is confirmed by the application of the practical Sea Beam data in the area from the Sagami Trough to the Izu-Ogasawara Trench, which was surveyed by the Hydrographic Department in 1984 and 1985.

1. はじめに

シービームという高性能のデジタル測深システムが導入され、シービームデータの作図法の研究、つまり、シービームで収録されたデジタル水深データを使って等深線図を作図する研究が行なわれた（浅田ほか、

* 海洋調査課 Ocean Surveys Division

1986)。この結果、シービームのデータから詳細な等深線図、水深図を計算機処理により作成することが出来るようになった。シービームの特徴は16本のナローマルチビーム測深により、海底面を面的に、綿密に測深する所にあり、その水深値と相対位置精度は非常に良く、海底地形を実にきめ細かく正確に測量出来る。

従来、海底地形図と言えば等深線図があり、海底地形を表わす代表的な表現法として使用されてきた。100万分の1、50万分の1程度の縮尺図では、この等深線図、または等深線図を水深に応じて色分け（段彩）することにより十分海底の地形を読み取ることが出来た。しかし、5万分の1、20万分の1程度の精密な等深線図から複雑な海底地形、微妙な地形変化を読み取るとは至難の技であった。そこで、コンピュータ処理により、海底を三次元的に表現する手法が取られるようになった。プロッターがその出力媒体として主に使われており、三次元の地形を様々の角度から二次元平面に投影する鳥瞰図手法等が取られている。地形を流線やメッシュで表わす手法が一般的である。しかし、これらの手法は分解能の点で限界があり、シービームのデータを使って詳細な地形を表現するのに適しているとはいえない。そこで、シービームの非常に密なデータを旨く生かした海底地形表現図を作成する手法の研究を行った。その結果として、海底を水深に応じて段彩し、細かい地形を表現出来るように陰影で海底地形を表わす新三次元表現プログラムを作成した。出力媒体にはインクジェットのカラープロッターを使った。また、この手法を、昭和59年～60年に水路部が調査した相模トラフから伊豆・小笠原海溝にかけてのシービームデータに対して試み、その有効性を確認した。

2. 新三次元表現手法の特徴

海底の地形測量の成果として主なものに水深図、等深線図がある。水深図は図上に水深値をそのままプロットしたものであり、等深線図は図上に展開した水深データから等深レベルの位置を計算し、その間を線で結んだものである。

等深線図は海底地形を表す代表的なものであるが、これから地形を的確に判断するのは非常に難しい。例えば、等深線の間隔で海底の傾斜の度合や傾斜の方向は判断出来るものの、地形の凹凸の適正な判断には、相当の思考を要する。等深線図には、深度方向マークを加えたり、水深に応じた段彩表現を加えることもあるが、思考判断の補助的なものにすぎない。

こういった海底の凹凸を一目で判断出来るようにしたものが鳥瞰図である。これは、海底の地形を遠くの上空から眺めたような図を作る手法である。鳥瞰図の主な表現手法は、真上方向からメッシュ状の影を落とし、海底地形表面に出来たメッシュ模様を位置、水深の三次元値として、眺める方向に垂直な平面上に投影するものである。さらに、出力媒体としてカラープロッターを用いて、メッシュ内を水深に応じて段彩したものがあ

る。この鳥瞰図表現法で海底地形の凹凸がだいぶ分かりやすくなったが、矛盾点、問題点もある。それは、均一メッシュを用いているので、傾斜表現が感覚的に逆になることである。つまり、図に表されたメッシュは平たい地形の方が密となり、傾斜が急な地形ほど粗くなる。我々の視覚的陰影観と相反することになる。また、きめの細かさについてもメッシュ表現のため細かい地形表現には不十分である。メッシュの密度を細かくすると傾斜の緩やかな部分が、線で真っ黒になり阻害される。細かい地形の表現には適していない。その他に、海山等は非常に良く判るが、窪みの形状が判りにくいという欠点もある。

また、図上に展開した水深データから、図の各部分の傾斜を計算し、光をいろいろな角度から当てて、光の陰影で地形の傾斜方向・度合を視覚的に表現する陰影表現法がある。陸上の地図データを使って処理したものに木下ほか（1984）がある。また、海底地形の陰影表現例として、シービームデータを使い、地形の高

低観を向上させるため水深に応じて段彩表現したものもある (Edwards et al., 1984).

この陰影表現法は地形を黒の濃淡で表現するもので、高さ方向のデータがあまり生かされていない。このため、細かい地形の変化は良く判るが、地形の凹凸が判りにくい。また、この陰影表現法はデータが密にあることが肝要で、データ量の少ない海底地形の表現法としては、まだまだあまり使われていない。

今回の処理手法は上述の鳥瞰図表現法と陰影表現法の長所を合せ、微地形を旨く表現出来る陰影手法で海底地形を表わし、次に、眺める方向に垂直な平面上に投影し、地形面を水深に応じてカラーで段彩表現することとした。質が良く、データ量の多いシービームデータであればこそ可能な手法といえる。

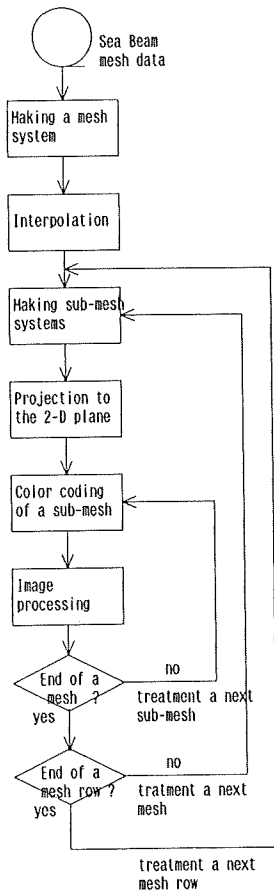


Figure 1 Flow of 3-D image processing.

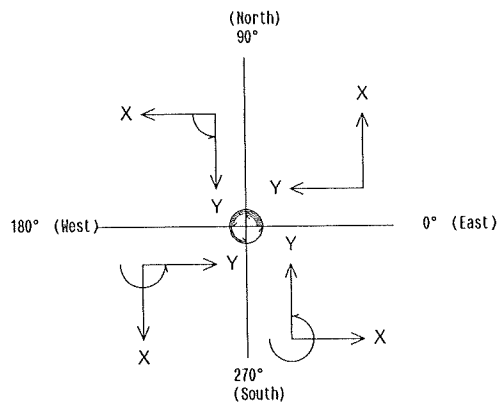


Figure 2 X-Y coordinate determined by direction of projection.

3. 処理方法の概要

(1) メッシュシステムの作成

まず、全方位から眺めることが出来るようにするため、眺める方向に応じたXY座標系のメッシュシステムを作成する。第2図で示すように、このXY座標系は真東の方向から眺める場合を0度の方向とし、反時計回りに90度幅で、四つに場合分けする。眺める方向が

- ① 0～90度の場合は東西方向をY軸方向，南北方向をX軸方向
- ② 90～180度の場合は北南方向をY軸方向，東西方向をX軸方向（①のXY軸を90度左に回転する）
- ③ 180～270度の場合は西東方向をY軸方向，北南方向をX軸方向（①のXY軸を180度左に回転する）
- ④ 270～360度の場合は南北方向をY軸方向，西東方向をX軸方向（①のXY軸を270度左に回転する）

としたXY座標系に入力データを変換する。入力データはシーブームデータから等深線図を作成する過程で作られるメッシュデータを用いた。シーブームのメッシュデータと同じメッシュ幅でメッシュシステムを作成し、このメッシュシステムに対応したメモリ配列にデータを記録する。データの再配置は任意の方向から投影するために最低限必要なもので、この四つのXY座標系で全方位の投影が非常に簡単に行える。一つのXY座標系で90度幅の投影処理が行える。この座標変換ではX、Y値の符号を変えたり、入れ替えたりするだけなので、微地形情報を損うことがない。データを再補間などするとどうしても地形がまるめられるので好ましくない。

入力データがメッシュ化されていなければ、このメッシュシステムに対応したメッシュデータを新たに作成する。

(2) メッシュデータの補間

データのある部分のみ処理を行うので、データの無い部分は白ぬけとなる。図の内部に白い空白部があると醜い図となる（第7図(a)参照）。小さい空白部であればデータを補間して作図した方が見易くなり、また、地形を把握し易くなるので補間を行う。補間は海底地形の谷や尾根等の連続性を損うことの無いよう三次曲面近似式を用いて行った。

(3) データのサブメッシュ化・投影

ここから、実際の作図処理に入ることになる。作図処理は第3図に示すように、メッシュシステムの左側から右へ、上端から下方向に1つずつメッシュを処理する。まず、図の分解能・精度を向上させるために1つのメッシュを分割して、サブメッシュシステムを作る。サブメッシュシステムは第4図に示すように、1つのメッシュを3～4分割し、周囲の8個のメッシュデータと中心のデータの計9個のデータから近似二次曲面式を求め、この曲面式からメッシュを分割したサブメッシュの格子点の水深値を計算する。

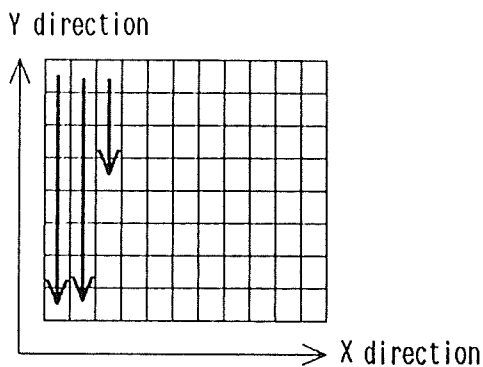


Figure 3 Processing sequence of mesh system.

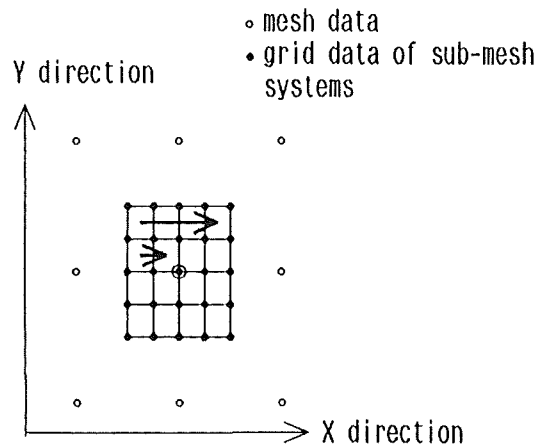
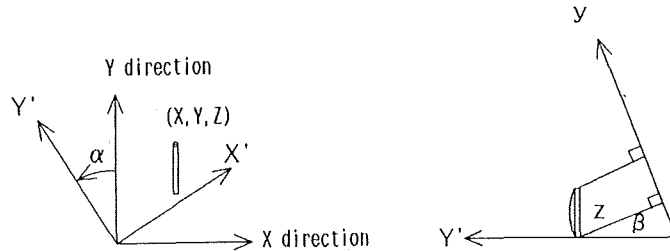


Figure 4 Sub-mesh system and its processing sequence.

次に第5図に示すように、各格子点のX, Y, Z値を、眺める方向に直角な平面上に投影する。この際、地形の凹凸を判り易くするため、Z値は水深値を誇張した値とした。この投影により、海底の地形を遠くから眺めたように表現することが出来る。投影は2段階で考えると判り易い。まず、サブメッシュの地形データ (X, Y, Z) を眺める方向にY軸がくるようにXY面をZ軸を回転軸として座標回転し、つづいて、この (X', Y', Z') をY' 値とZ' 値のみを考慮して目的の平面に投影すればよい。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (2)$$



(X, Y, Z) : 3-D topographic data
 (X', Y', Z') : α rotation of the X-Y Plane
 (x, y) : after projection (the x-y plane is vertical to the view direction)
 α : difference between the view direction and the X direction on the X-Y plane
 β : angle of elevation
 a : exaggeration rate of depth [$Z = (\text{the basis depth} - \text{depth}) \cdot a$]

Figure 5 Projective processing of 3-D topographic data.

(4) サブメッシュの色付け

投影平面上で格子4点に囲まれたサブメッシュを左上端から右方向へ、上から下方向へと1つずつ水深に対応した色付け、陰影付けを行う(第4図参照)。サブメッシュの水深は格子4点の平均値とする。(1)の眺める方向によるXY座標系の4つの場合分け、(3)のメッシュの処理順序、そして、このサブメッシュの処理順序により、色付けを行なうことにより、常に手前の高い地形によって見えない後ろの低い地形を隠すことが出来る。色付けは水深に対応して段階的に変化させた。第6図に示すように、1つのXY座標系で地形情報Zは、90度幅の投影処理によりその後部90度幅を隠す。もし、90度より幅の広い投影処理を行なおうとすると、色付けの順番が前後逆になる部分が生じ、本来手前の地形データで隠されている筈の地形が表面に現われるという矛盾が生じる。

サブメッシュを補間して求める際、メッシュの輪郭部の水深値が隣を処理した時とずれることがある。このずれのため、投影処理をしたときにメッシュ間に隙間ができて図上に白い線がはいる。これを防ぐため、輪郭部の水深値は前回に求めた値を使うこととした。

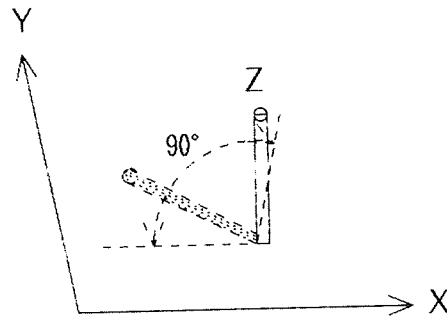


Figure 6 Shade area of a 3-D topographic datum by scanning projective direction from 0 to 90 degree.

(5) サブメッシュの陰影表現

投影平面上で格子4点に囲まれたサブメッシュの傾斜角を求め、色付けしたサブメッシュに傾斜角に対応した陰影付けを行う。サブメッシュの傾斜角は4点からX軸方向の傾きを2つ求めて平均し、Y軸方向の傾きを2つ求めて平均して求める。次に、地形の実際の傾きに応じて17段の陰影表現を行う。0~45度を対象として傾きを0~16の数値に置き替える。45度以上の傾きは、全て16とする。サブメッシュの中にこの数値回だけ黒のドットをランダムにプロットする。データのXY系の縮尺を1/Sとすれば地形の傾き θ は次のようにして求まる。

$$H_x = \{(D_1 - D_2) + (D_4 - D_3)\} / 2$$

$$H_y = \{(D_1 - D_4) + (D_2 - D_3)\} / 2$$

$$H_{xy} = \sqrt{(H_x^2 + H_y^2)}$$

$$\theta = \tan^{-1}\{H_{xy} / (W_{sm} / 1000 \cdot S)\}$$

ここで、 $D_1 \sim D_4$ はサブメッシュの格子四点の水深値、 W_{sm} はサブメッシュの幅(mm単位)である。番号の1~4は各々、サブメッシュの左下、右下、右上、左上に対応している。

使用するインクジェットのカラープロッターはアプリコン社製である。この段階で、プロッターの機構が原因して、下に塗った色と陰影のドットとが重なり具合によって色むらを起すことがある。インクジェットプロッターの分解能は0.2mmであり、赤、青、黄の3色で17000種以上の色を表現するために、色によっては2色のドットを互い違いに配列したりしている。また、ドット間に隙間を開けたりして濃淡表現が出来るようになっている。このため、色の分解能は0.2mmよりずっと落ちる。1mm位になる色もある。出来るだけ色の分解能の高い色を選択することも肝要である。色付けをした上にさらに黒いドットをプロットするため、この黒いドットが下地の色バランスを壊し、異なった色に替えてしまうことがある。例えば、青と黄色のドットが交互に並んで緑の色を作っていたとする。この場合、青のドットの上に黒のドットを乗せれば暗い黄色になる。また、黄のドットの上に黒のドットを乗せれば暗い青色になる。この様な色バランスの崩れがある幅を持った縦縞となって現れる。この縞の境界には黒のドットが重なった黒い線、または、黒のドットが全く無い線が出来て図を見にくくすることがある。また、黒の陰影のパターンと水深に対応した下地の色のパターンが重なって、レースのきれを2枚重ねた時に出来るような縞模様が現われることもある。第7

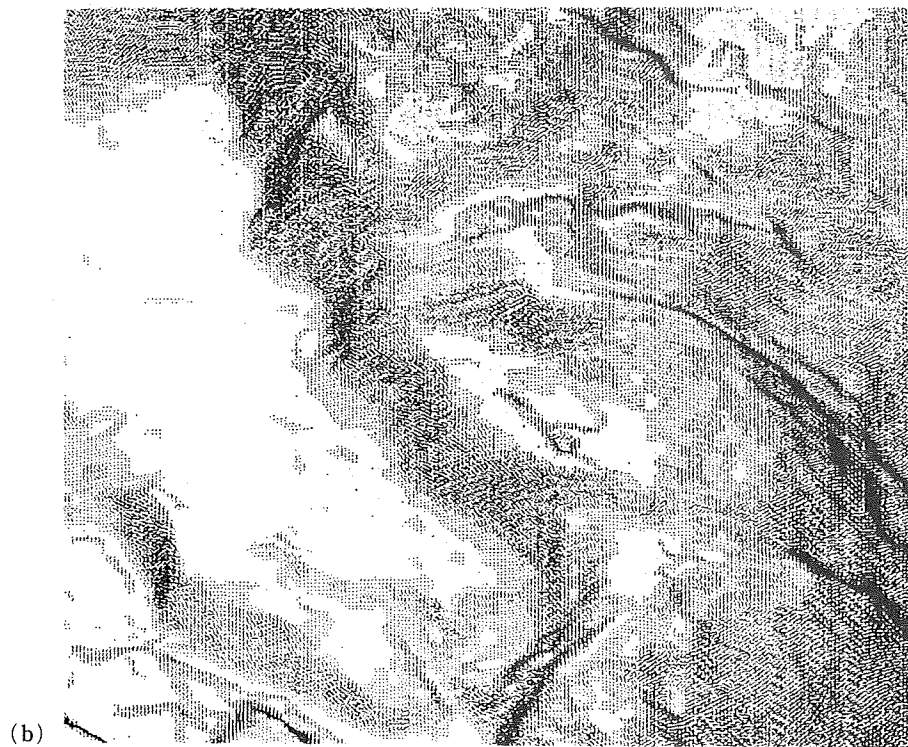
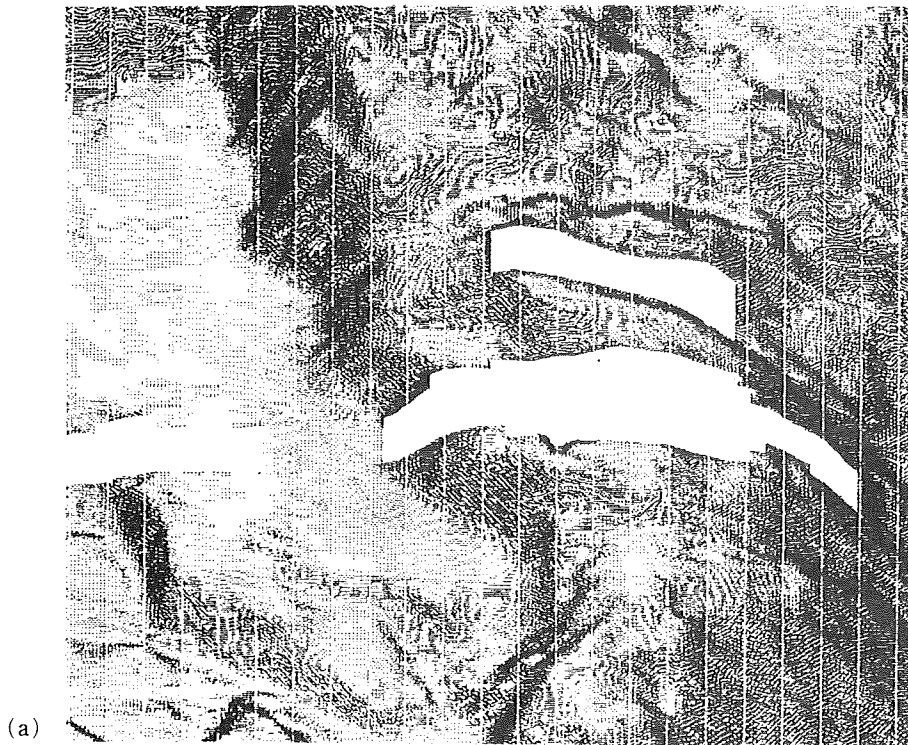


Figure 7 3-D image view which are remained white area by data loss and colored irregularly (a) and improved view (b).

図-(a)はこれらの色むらが発生した一例である。こういった現象を解消するために色々な処理を行った。縦縞の境界部に出来る白、または、黒の直線は、サブメッシュデータの位置を1行づつ交互に、左右0.1mmづつずらして目立たなくした。縞模様を押えるため、陰影度を落した。色バランスを損わないようにするため、傾斜に応じてサブメッシュ内にプロットする1~16の黒いドットのプロットする位置順を工夫した。また、サブメッシュの大きさもこの現象に深く拘っており、0.8mmより少し大きい位の値が適当である。サブメッシュの大きさを丁度0.8mmといったように切りのいい値とすると色むらが強調され好ましくない。このようにしてこの色むらをかなり解消することが出来た(第7図-(b))。

また、投影処理時に光を海底に当てる手法を試みたがあまり効果が無かった。もともと、光を当てるのは、二次元図を立体的に見せるための手法であり、今回のように三次元的手法を取っている場合にはあまり必要無い。かえって有効な傾斜情報を消すことにもなりかねない。

4. 相模トラフから伊豆・小笠原海溝のデータについての処理効果

この処理プログラムを用いて、昭和59年~60年度に水路部が行った相模トラフから伊豆・小笠原海溝にかけてのシービーム調査データに対して処理を試みた。測量区域は第8図に示すとおりである。シービーム作図プログラムによる等深線図及びこの処理結果を第9~14図に示す。第11図から第14図にかけての相模トラ

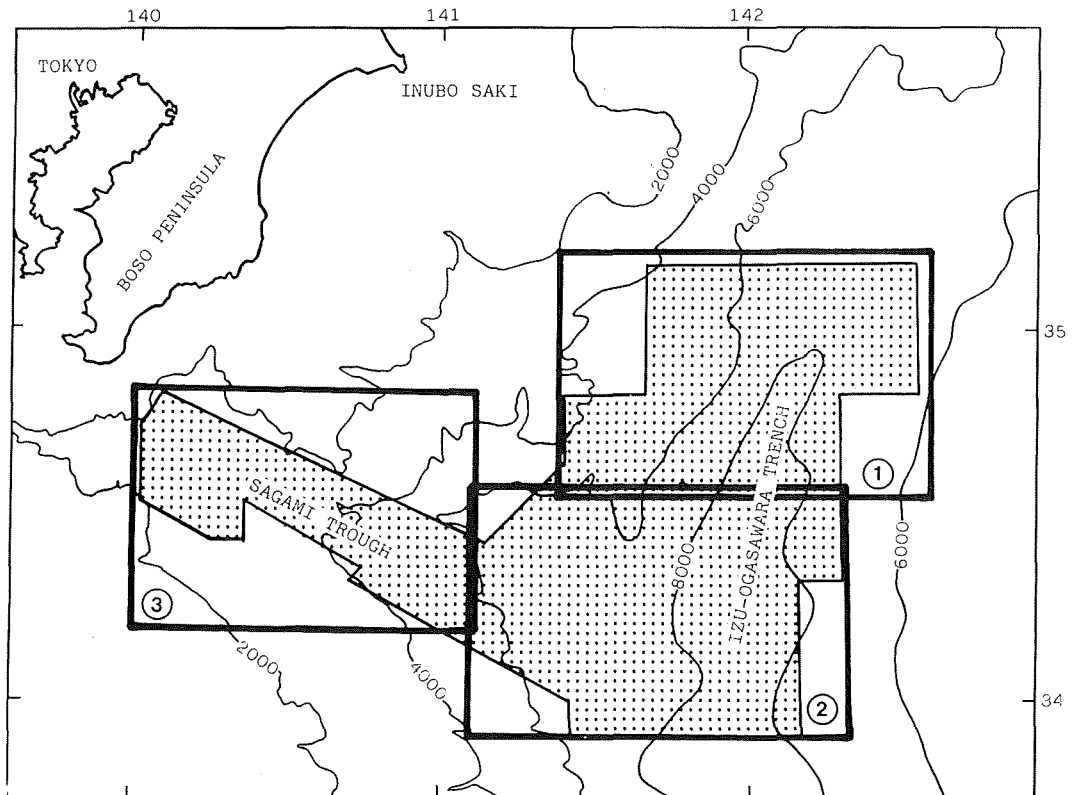


Figure 8 Index map of Sea Beam surveyed area (stippled) and drawing areas (boxes with heavy lines). ①, ② and ③ correspond with Figure 9-10, 11-12 and 13-14, respectively.

3-D IMAGE PROCESSING OF SEA BEAM BATHYMETRIC DATA-AS APPLIED
FROM THE SAGAMI TROUGH TO THE IZU-OGASAWARA TRENCH

* SEA BEAM SURVEY 1 *

PROJECTION IS MERKATOR (TOKYO DATUM - LAT. 35)

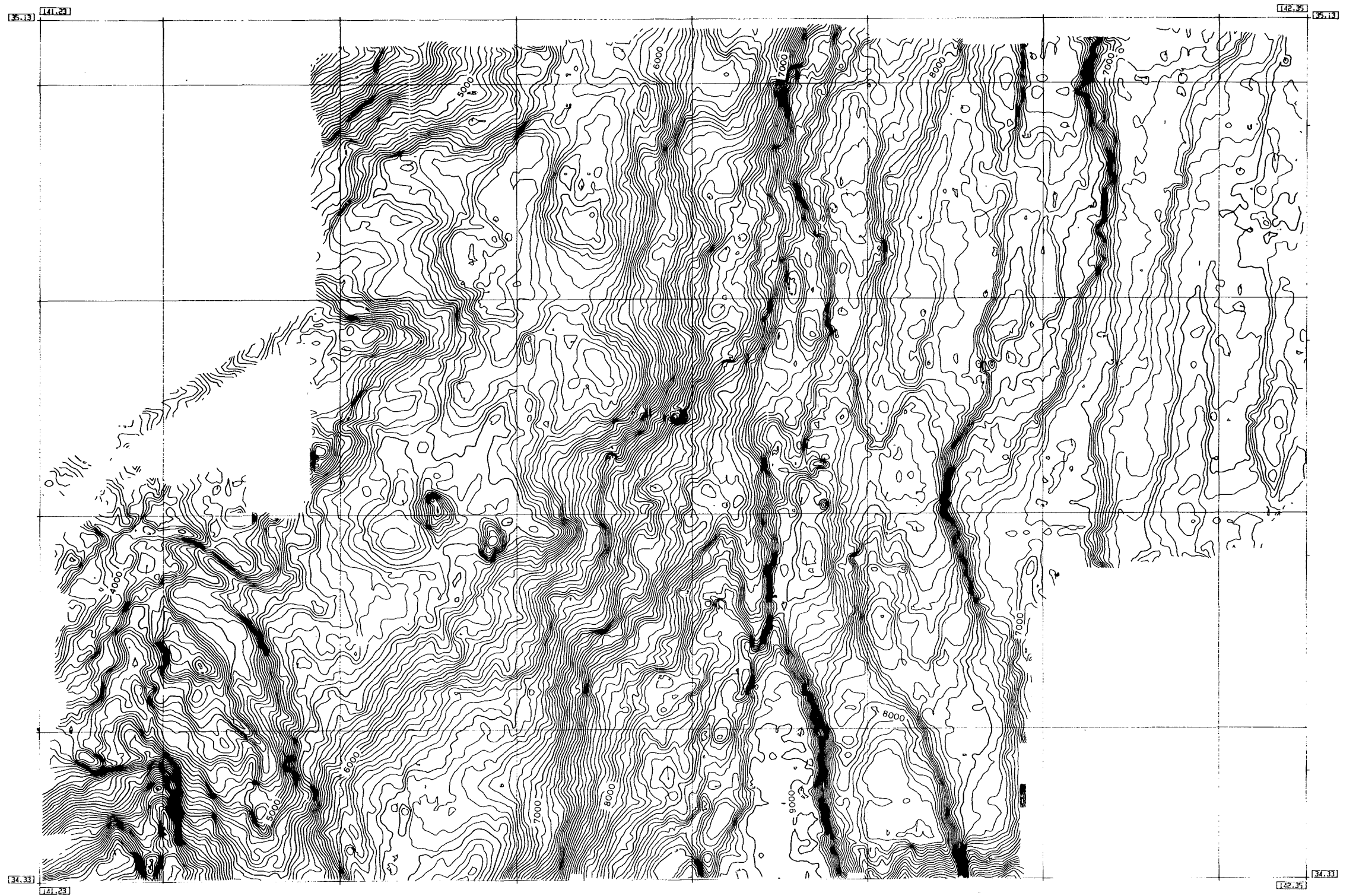


Figure 9 Contour map of ① in Figure 8. Contour interval 50m.

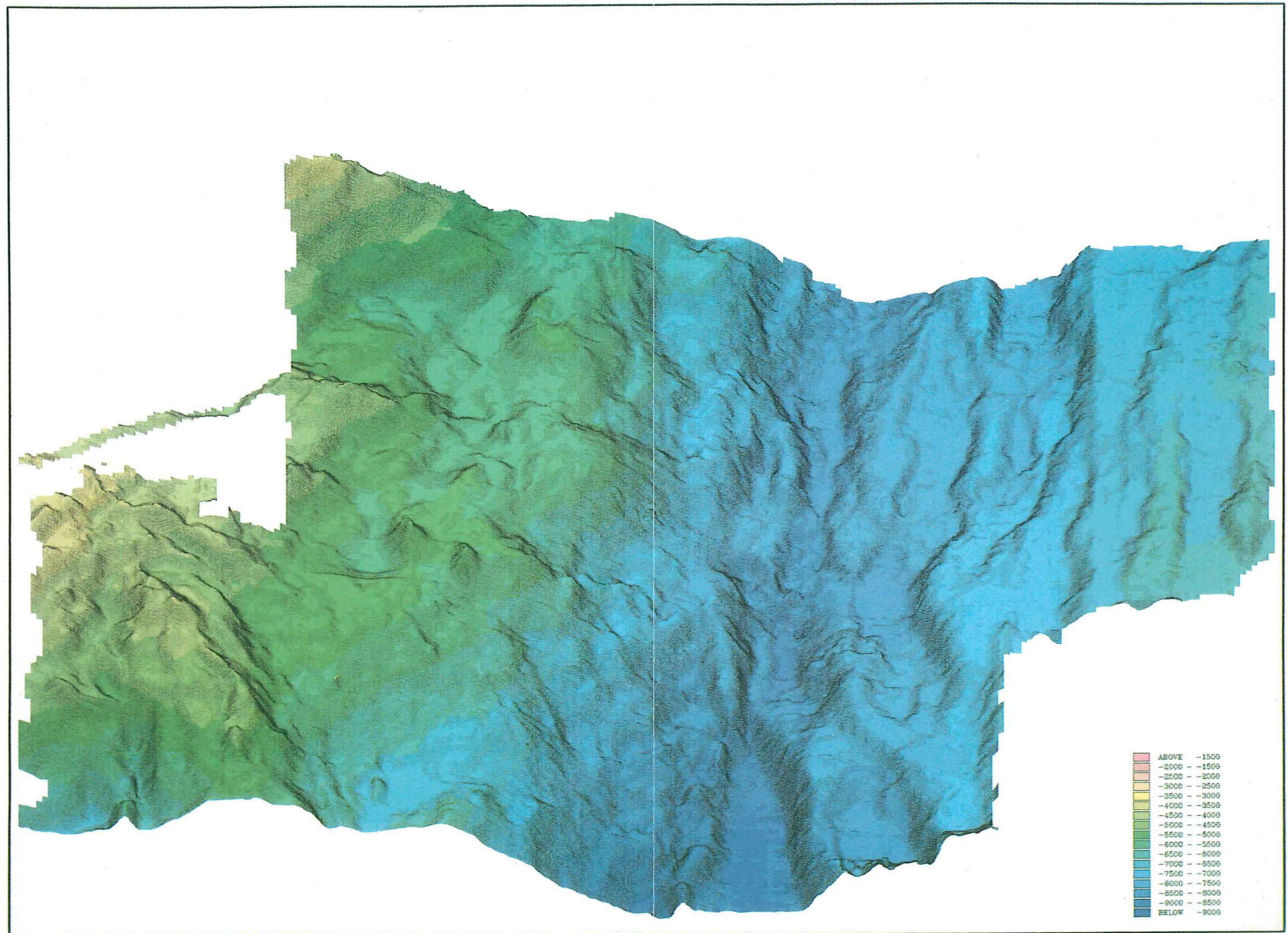


Figure 10 3-D image view of ① in Figure 8.

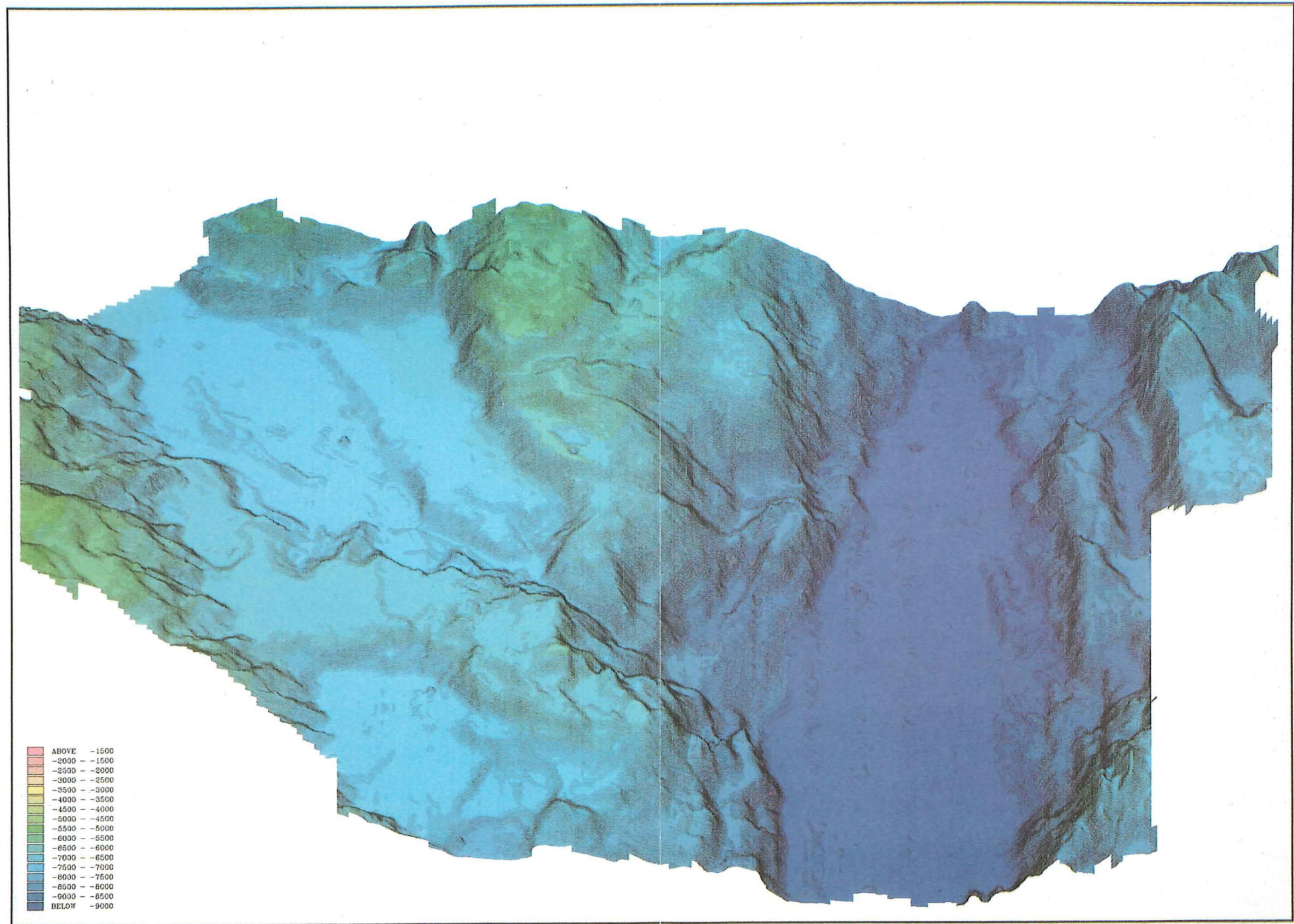


Figure 12 3-D image view of ② in Figure 8.

3-D IMAGE PROCESSING OF SEA BEAM BATHYMETRIC DATA-AS APPLIED
FROM THE SAGAMI TROUGH TO THE IZU-OGASAWARA TRENCH

* SEA BEAM SURVEY 3 * 1 / 100000
PROJECTION IS MERCA (TOKYO DATUM + LAT 3°)

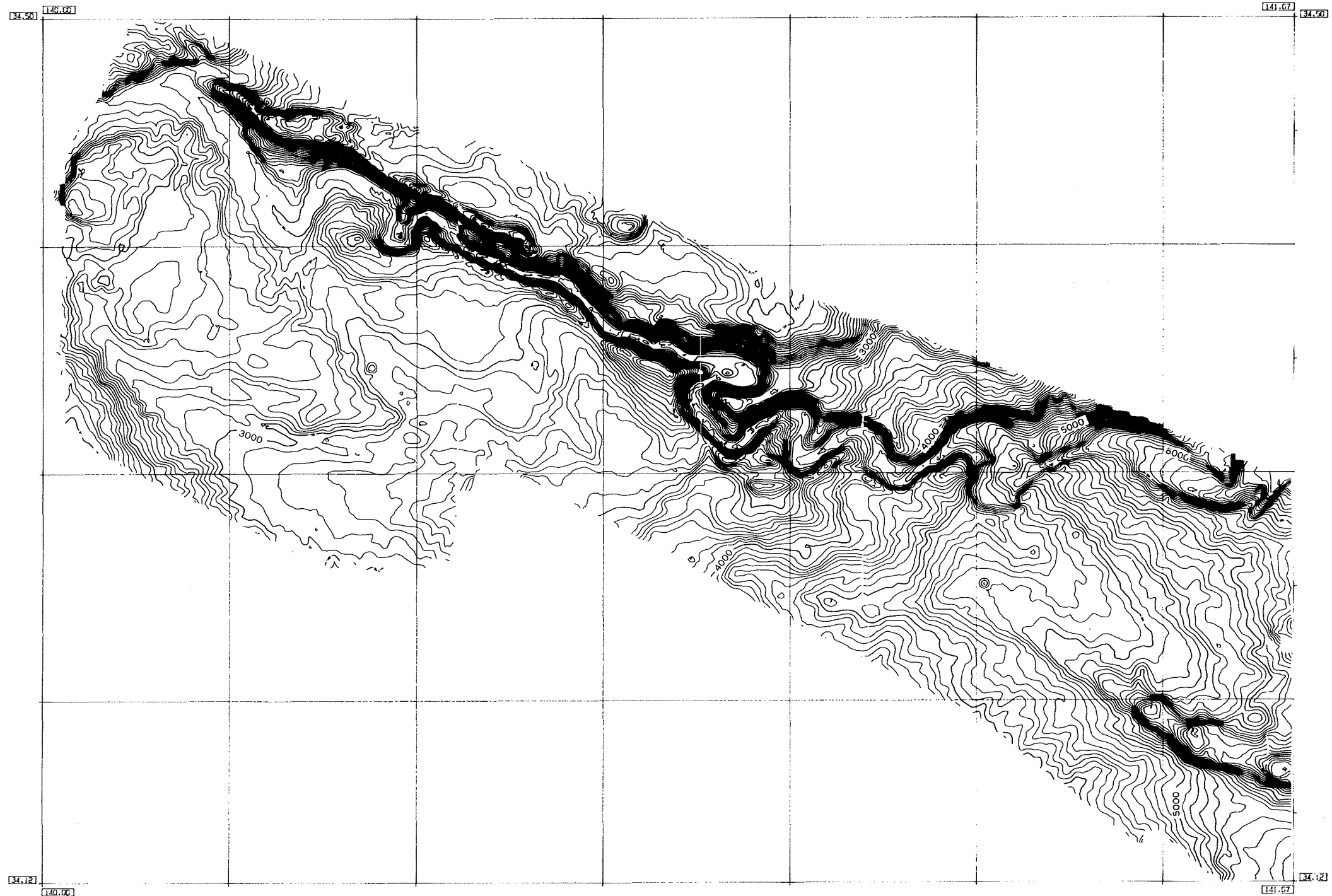


Figure 13 Contour map of ③ in Figure 8. Contour interval 50m.

CONTOUR PROCESSING OF SEA BEAM BATHYMETRIC DATA

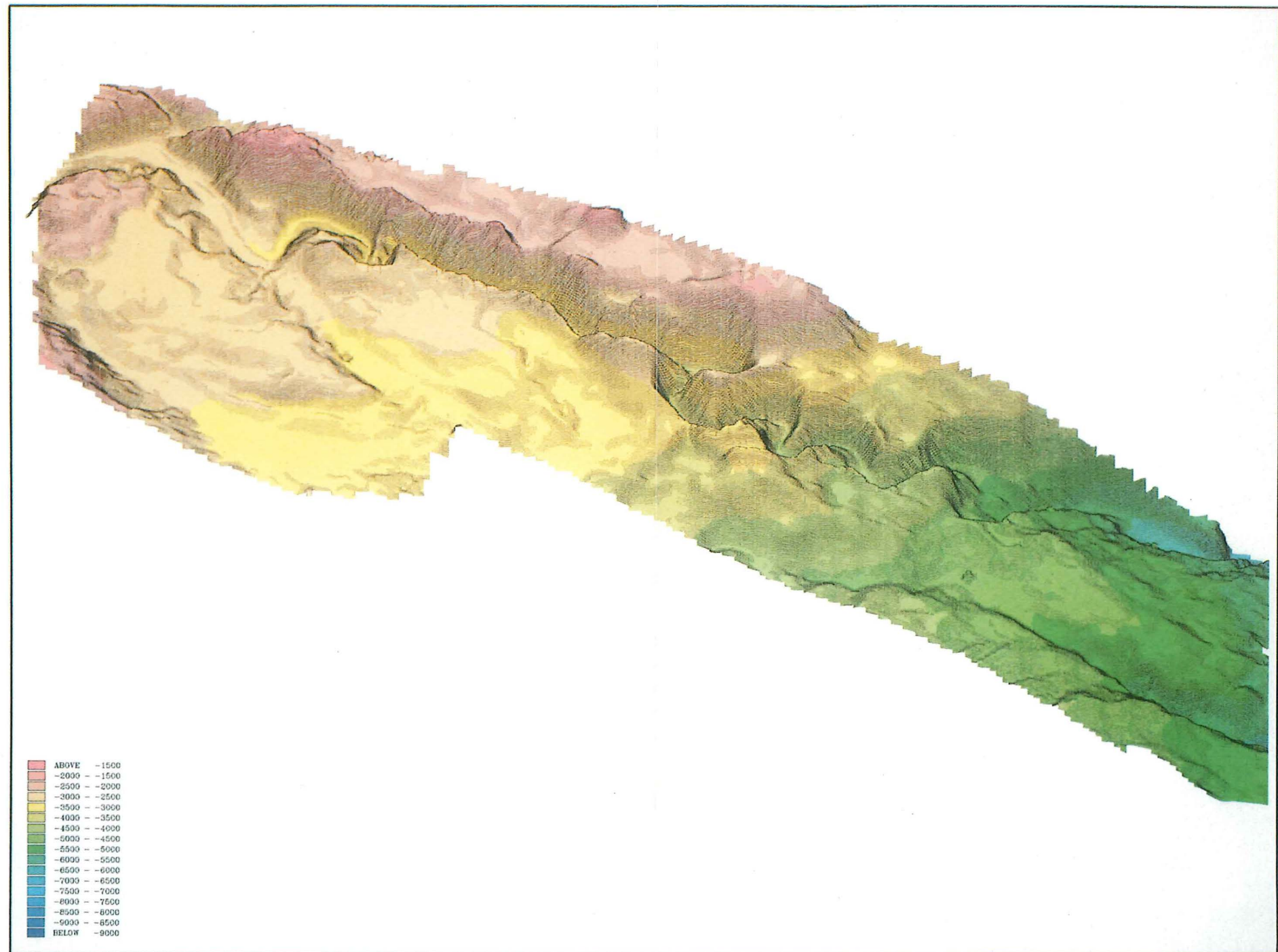


Figure 14 3-D image view of ③ in Figure 8.

フ東部から海溝三重点までの海底地形の特色については加藤ほか(1985)が述べている。本図を参考にしてこの部分の地形を見ると非常に判りやすい。このなかで参照した図(加藤ほか, 1985の第5, 6図)は今回と同じプロッターを使用して作成したメッシュ方式による鳥瞰図である。第12, 14図と比べると地形表現に於て、今回の処理法がいかに海底地形を旨く捕えているかが一目瞭然である。

第10図を見ると、この部分については、海溝底の東側斜面の海洋プレート部が、ほぼ南北方向に断層をいく段も形成しながら沈み込み、海溝底付近では地溝が形成されている様子が良く分かる。地形表面の形状を通して海溝底の西側部と東側部の地形変動の違いもはっきりと表われている。

第12図では、中央の上部と下部の地形の違い、上部平坦部に出来ている僅かな直線的な崖、上部の斜面上にある脹らみが下部境界部の脹らみと対立している様子が判る。

第14図は相模トラフ付近で確認された蛇行谷である。この図は幅が狭いので蛇行谷の北部と南部の地形については情報が少ないが、蛇行谷の両側に沿う高まりの連続性、蛇行谷の南方の緩斜面域の起伏等の形状等、谷の特徴が実に良く表現されている。

このように、今回作成した図は、断層の形状、地形表面の形態の違い、斜面上の地形の起伏、平坦部の僅かな地形変化、谷・窪地の形状等が視覚的に判り易く表現されているといえる。この表現法によって描かれた図は、地質構造が保存されやすいという海底地形の特徴を考えると、地質構造の地域的な差異、地形、地質構造の発達過程を推定し、議論する上で、重要な手段となると考えられる。

5. おわりに

シービームのデータ処理について、等深線図の作図法が確立し、また、今回の三次元表現処理法が出来上がったことにより、シービームの海底地形測量がハードからソフトまで整備されたといえる。シービームによる海底地形調査技術が他の測深機を用いた測量の調査・処理の発展に寄与することを期待する。

海洋調査課加藤 茂主任海洋調査官には本稿の不備な点の指摘や有益な助言を頂き厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 浅田 昭・中西 昭 1986:シービームデータの作図法, 水路部研究報告, No.22
- Edwards M. H., R. E. Arvidson, and E. A. Guinness 1984: Digital Image Processing of Seabeam Bathymetric Data for Structural Studies of Seamounts Near the East Pacific Rise. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. Vol.89, No. B13, pages 11,108-11,116
- 加藤 茂・ほか7名 1985:相模トラフ東部から海溝三重点までの海底地形. 水路部研究報告, No.20, 1-24ページ
- 木下 章・岡庭直久 1984:新しい地図表現(陰影)の試み. 国土地理院時報, No.60, 36-39ページ