

シービームデータによる海底地形図の作成

浅田 昭*・中西 昭*

CONTOUR PROCESSING OF SEA BEAM BATHYMETRIC DATA

Akira Asada* and Akira Nakanishi*

Abstract

In 1983 the survey vessel "Takuyo", equipped with a Sea Beam system, was used for a continental shelf and seafloor topographical survey for earthquake prediction. A computer aided contour processing system of digital Sea Beam data, logged on magnetic tapes was employed. The authors developed two contouring programs, as on-board contouring program and an on-shore contouring program. The on-board contouring program was to draw contour lines of the sea floor topography in time sequence, by reading Sea Beam data little by little. Since this program has a characteristic in drawing contour maps in accordance with swath survey width, contour lines in the crossing area of tracks are drawn so as to overlap one another. As the contour maps produced by this program come directly from raw data, they give much information, such as whether or not erroneous data exists, whether or not data dispersion and discrepancy between tracks is large. Within a period of a survey we can efficiently re-examine the survey plan. By means of collective processing of all data of map area, the on-shore contouring program produces final maps that require little or no correction. For this object, the program has many functions: to remove erroneous data, to reduce data dispersion effectively, to change the degree of detail expression in accordance with depth (it being defined by the density of mesh data in drawing contour lines), and so on. We can make an effective processing plan of editing raw data with reference to the on-board map.

1. はじめに

海底の地形を調査するのに、今までは単一ビームの測深機、しかも海底の断面を記録紙にアナログ式に記録するものを使っていた。まず、記録紙上から水深値を読み取り、更に海水中の音速度プロファイルに基づく水深補正を施し、手でプロットした航跡図の上に水深値を記入し、相当な手間を掛けて水深図を作成した。こうして出来上がった水深図から等深線をあれこれ考えながら引くことによって、やっと海底地形図（等深線図）ができた訳である。デジタル測深もさほど進んでいないのに急にシービームという世界最高の測深

* 海洋調査課 Ocean Surveys Division

システムが昭和58年9月水路部の測量船「拓洋」に導入された。世界に於けるシービームの評価は非常に高く、データの信頼性も高い。その威力は我々の目を見張らせるものであった。シービームを使って調査を開始すると次々に帯状の幅を持った海底地形図が展開してくる。これを航跡に沿って張り合せていくと既に完成された海底地形図が出来上ってくる。しかも、今までより実に詳細に海底を描写している。これだけでも我々を充分満足させるものであった。しかし、シービームのデータは磁気テープにデジタル値として記録されており、計算機処理によって水深の補正を施したり、航跡に沿ってデータを正しい位置に配置することによってより正確な海底地形図が得られる筈である。近年、水深のデジタル化、計算機による海底地形図の作成等の技術開発の必要性が高まってきており、シービームデータの等深線図作成法の研究はそれのみに止まらず今後の海底地形測量のデータ処理技術の向上に寄与するものと期待される。本稿ではシービームによるデジタル水深データの問題点、処理上の問題点も合せ、研究成果として完成したシービームデータの等深線図作成プログラムの紹介をする。

2. 研究の概要

本研究はシービームのデータを有効に処理し、シービームの性能をフルに発揮できる処理プログラムを開発することにある。しかし、シービームがわが国で始めて導入された測深システムであり、しかも、クロスファンビーム測深法によるナローマルチビーム測深機という特殊なシステムのため、不明な点が非常に多かった。こうした状況下で本研究がスタートした。この研究は科学技術庁の『我が国周辺200海里水域における新調査システムの開発に関する研究』の一環として行われたものであり、正式な課題名は「地球座標系に基づく海底地形情報展開手法の研究」である。水路部がこの課題、つまりは、シービームのデータから海底地形図を計算機を使って作成する研究を担当することとなった。また、シービームに関する課題はもう一つあり、海洋科学技術センターが「シービームの音線屈折補正に関する研究」を担当することとなった。これは、通常の測深機は海底に直下方向のみに音響パルスを発射し、海底で反射して帰ってくる信号との時間差を計測することによって水深を測る訳であるが、シービームは海底に斜に複数の音響ビームを発射しており、音速度の水深による変化によってビームが屈折して曲って海底に到達する、この屈折して曲ることによる測定誤差をリアルタイムで補正する研究を受け持つことになった。両研究とも昭和58年度から3年計画で行うこととなった。

本研究を進めている間にも、チャレンジャー海淵の世界最深部、相模トラフから海溝三重点にかけての測量データといった具合に、測量船「拓洋」からは次々とシービームのデータが寄せられ、早急に処理をして海底地形図を作成しなければならなかった。そこで、既存のコンタープログラムを使ってシービームのデータをとにかく図化してみることにした。意外にも、出来上がった図は非常に質の良いものであり海底の状況を実に良く表わしていた。これはひとえにシービームのデータの質が高かったことの証でもある。しかし、地形的に異常な箇所、データのバラツキや測線間の整合性等の点で悪い箇所もあった。データを幾つか加重平均してメッシュ化することによって飛躍的に地形図の質が向上した。シービームのデータのバラツキを押えることが一つの重要なポイントであることが判った。今にして思えば、チャレンジャー海淵の世界最深部、相模トラフから海溝三重点の、深く、急斜面で、しかも、複雑な海底地形データに最初に直面出来たのは非常に幸運であったと思う。これらの地形はシービームのデータの質が一番悪い箇所であり、我々にシービームの問題点を一度に提示してくれたからである。まず、これらのデータを使い、シービームの測深データの特徴を調べ、どの様な処理方によって図化したらよいのかを研究した(浅田ほか, 1985)。この成果を踏ま

え、船上処理を目的とした測線データ作図プログラムと陸上処理を目的とした広域データ作図プログラムという名の2つのプログラムを完成させた。

3. シービームによるデジタル測深の概要

シービームはデジタル測深機であり、航跡に沿って水深の60%幅のマルチ測深を行う優れた測深システムであり Swath Survey System と呼ばれている。このシステムはナロービーム測深機 (NBES: Narrow Beam Echo Sounder) とエコー処理機 (Echo Processor) の2つの機構を組合せたものである。シービームのデジタル測深機構について簡単に述べると以下の如しである (第1図参照)。

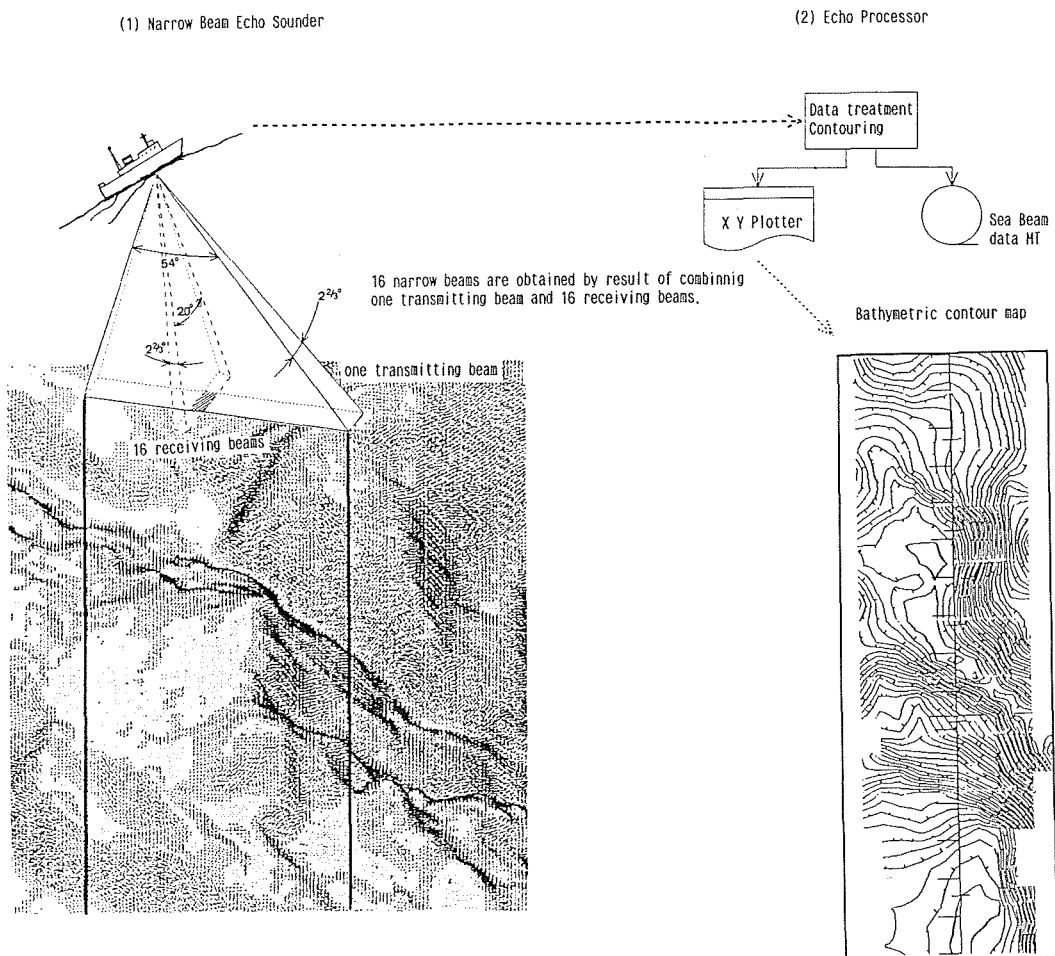


Figure 1 Sea Beam System.

(1) ナロービーム測深機

船の前後方向に約2.25度、左右方向に約54度の細長い指向特性を持った音響ビームを放射する。この時、船のピッチングによるビームの前後方向の揺れをなくすために、12.158KHzのパルス (通常7ms) に位相差をつけて20個の送波器アレイに掛けることにより、送波ビームが前後に揺れることが無いようにしてある。

海底で反射してきた音響ビームを40個のハイドロホンアレイで受信し、40個の信号の各々から90度位相差の4組の信号(45, 135, 225, 315度)をプリアンプの段階で作成し、ビームを船の左右方向に2%度刻みで分割するために、抵抗マトリックスによって4組の信号からさらに16個の位相の異なる信号を作り、 16×40 個の信号を合成している。こうしてハイドロホンアレイの中心軸の左右8個ずつ計16個に分割されたビーム信号が作られる。この16個のビーム信号は送波と受波の指向特性の合成効果によって、船の前後方向に2%度、左右方向に2%度の広がりをもつビーム信号となる。その後、16個のビーム信号はエコー処理機に送られる。

一方、船のローリングによって左右の受信方向のズレが生じないように、ローリングに連動したサーボモータ駆動のロータにより常に同じ受信回路に同一方向にビーム信号が入ってくるようになったロール補正機構が付いている。ここから直下のビーム信号が取り出され、簡単な機構によって水深値が計測される。「拓洋」の場合、この水深値は複合測位装置に送られ、測位データと一緒に磁気テープに収録されている。しかし、この水深データはエコー処理機で磁気テープに収録されたデータに比べるとエラーが多く、質的にかなり落ちる。

(2) エコー処理機

エコー処理機的主要機能は計算処理であり、各ビームの水深計算及び海底地形図の作図処理を行うもので

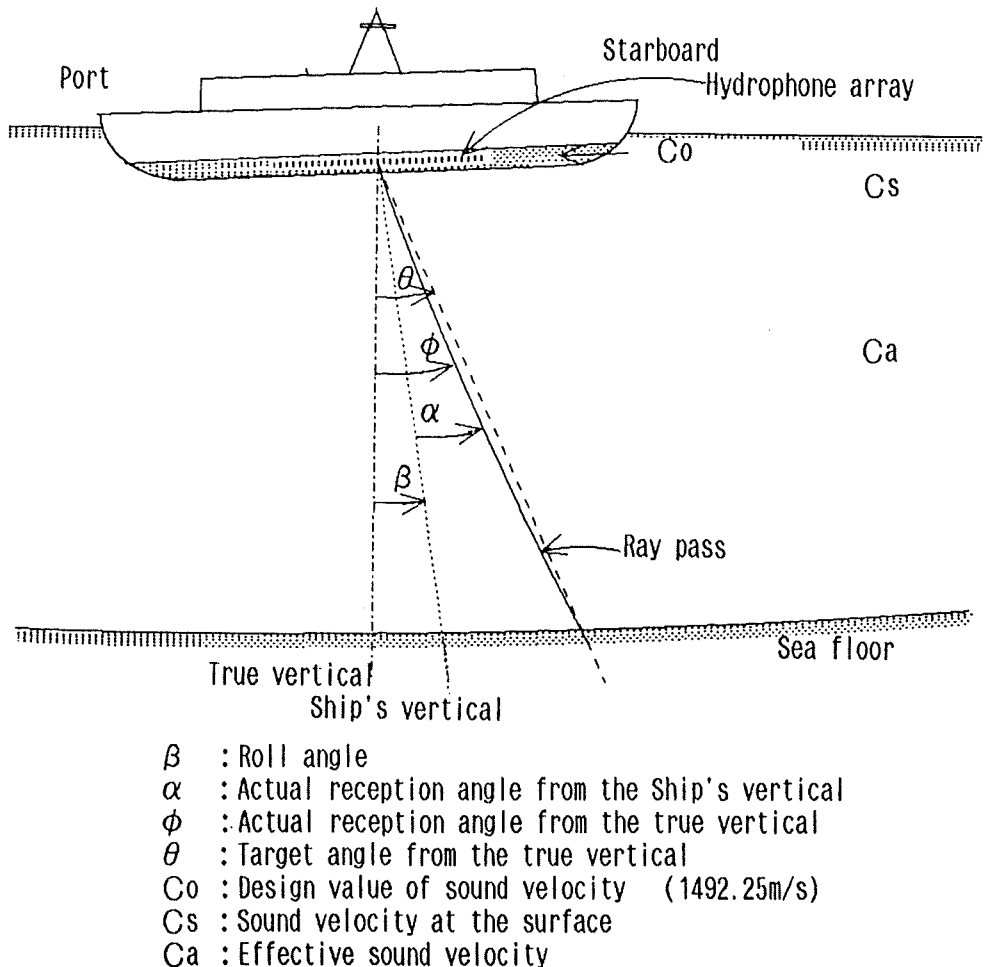


Figure 2 Sounding geometry in the athwarship vertical plane.

ある。まず、ナロービーム測深機から送られてきた16個のビーム信号をA/D変換する。A/D変換器は各々水深に対応してゲイトを開き、反射波が含まれている部分の信号のみをA/D変換する。反射波の波形からある種のアルゴリズム（GI社の秘密事項のため不明）で反射波受信時刻を決め、発振から受信までの時間差を計測する。この時間差データとビームの入射角度から音線屈折補正、ローリング補正を行なって水深値、横距離を計算する。水深値は屈折補正によって得られた水深に対応する時間に仮定音速度（1500m/s）をかけて算出し、横距離は実距離値で計算して磁気テープに収録する。音線屈折による補正処理は次のようになっている。

まず、実効音速度を求める。実効音速度 C_a は D' を水深とすると

$$C_a = \left(\int_0^{D'} V dD \right) / D' \tag{1}$$

によって求まるが、音速度プロファイルデータを表層から任意の深さまで10組入力して、次式によって近似的に求めている。

$$C_a = [\Sigma(D_{i+1} - D_i) \cdot (V_{i+1} + V_i)] / 2 / D' \tag{2}$$

また、入力データより深い部分は

$$V = V_{\max} + 0.0182 (D' - D_{\max}) \tag{3}$$

として計算し、使用している。 V_{\max} 、 D_{\max} は入力データの10組目、つまり、 V_9 と D_9 となる。このことから入力するデータはプロファイルカーブの面積が正確に表せられるように選ぶのが好ましいといえる。

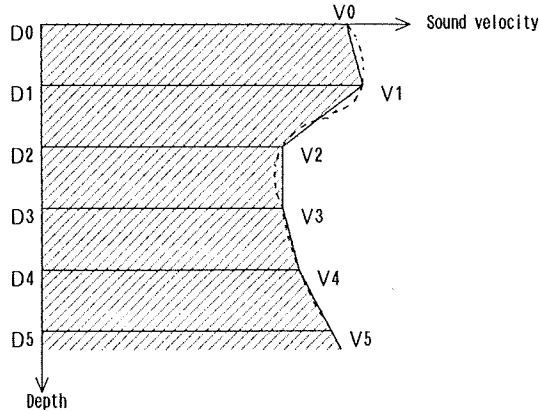


Figure 3 Sound velocity profile and the computation of the mean velocity.

次に実効音速度、表面音速度、そして基準音速度から次式により各ビームの水深値と横距離を計算している。つまり、海中の音速度構造を1つの実効音速度を持つ層にまとめてスネルの法則を用いて処理している。

$$\alpha_k = \sin^{-1} [(C_s / C_o) \sin \mu_k] \tag{4}$$

$$\phi_k = \alpha_k + \beta \tag{5}$$

$$\theta_k = \sin [(C_a / C_s) \sin \phi_k] \tag{6}$$

$$D_k = (1500 / 2) t \cos \theta_k \tag{7}$$

$$Y_k = (C_a / 2) t \sin \theta_k \tag{8}$$

ここで、 k はビーム番号であり、ハイドロホンアレイへの設計上の入射角 μ_k は

$$\mu_k = 0, \pm 8/3, \pm 2(8/3), \pm 3(8/3), \dots \quad (9)$$

となる。 α_k はハイドロホンドームへの入射角であり、 D_k と Y_k が求める水深と横距離である。

また、実際にはローリングによってビームが $\pm 2\%$ 度の範囲で揺れる訳であるが、作図処理を高速で行なう等の理由から、固定ビーム値を形成するようになっている。この固定ビーム角度は直下0度を中心として左右に 2% 度づつずれている。この計算方法はいたって簡単で、固定ビームを挟む2つのビームの水深に相

Table 1 Sea Beam data logged on a magnetic tape.

Word	Description	Binary Integer	Physical Value
1	RECORD LENGTH	76	76 (fixed)
2	BLOCK NUMBER	1~ 65535	same as left
3	HOUR	0~ 24	"
4	SECONDS (in tenths)	0~ 3599	"
5	HEADING	0~ 65535	left $\times 360/65536$ (°)
6	AVERAGE GATE DEPTH	0~ 65535	same as left (m)
7~22	16 DEPTH VALUES	0~ 65535	" (m)
23~38	16 CROSS TRACK VALUES (1st bit is -32768)	-32768~ 32767	" (m)

The header record format is as follows:

- | | | |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------|
| 1. RECORD LENGTH (76) | 2. BLOCK NUMBER (fixed at 0) |] ascii |
| 3. IDENTIFIER (fixed "SB") | 4-5. two-word TAPE NUMBER | |
| 6. DAY | 7. MONTH | |
| | 8. YEAR | |
| 9-10. two-word MISSION NUMBER | | |
| 11. MODIFIER ("BB" = begin mission, "CC" = mission continuation) | | |
| 12- . COMMENT | | |

当する時間差をデータを固定ビーム角度からのずれ角度に応じたウェイトを付けて加重平均して求めている。今、求めるビーム斜角度を ψ 、その水深を D とし、2つの斜角度 θ_1 と θ_2 のビームによって計測された水深値を D_1 、 D_2 とすると次式によって D が求まる。 $(\theta_2 > \psi > \theta_1)$

$$D = [(\theta_2 - \psi)D_1 + (\psi - \theta_1)D_2] / (\theta_2 - \theta_1) \tag{10}$$

シービームのデータは表-1のように、時間、船首方位角、16個の水深、水深値個々に対応する横距離16個を一組(1ショット)のデータとして磁気テープ上に記録されている。

一方、シービームの大きな特徴の一つであるが、この水深値と横距離を使ってリアルタイムで海底地形図を描く。今、船がどのような海底の上を走っているかがこの図から分る。しかし、船が常に直進をしているという仮定の上で海底地形図を随時描いている。船位情報は入力されず、スピード情報のみが位置情報として扱われる。つまり、この海底地形図は船が回頭していても、測線を蛇行してもまっすぐに描くので実際の海底の地形を歪めて表すことがある。また、かなり省力化したアルゴリズムで処理しているので問題点も多い。本質的には、シービームの測深・処理機能が正常に作動しているか等を見るためのモニターとして扱うべきものである。

4. シービームデータ処理に間する問題点

(1) データのバラツキ

約9000mの平坦な海底で実測したシービームのデータを同じ斜角度のビーム単位で並べて、水深値をプロットしたものを第4図に示す。この図では、ビーム番号8番が直下を示し、2 $\frac{1}{2}$ 度づつずれる毎に一つづつ

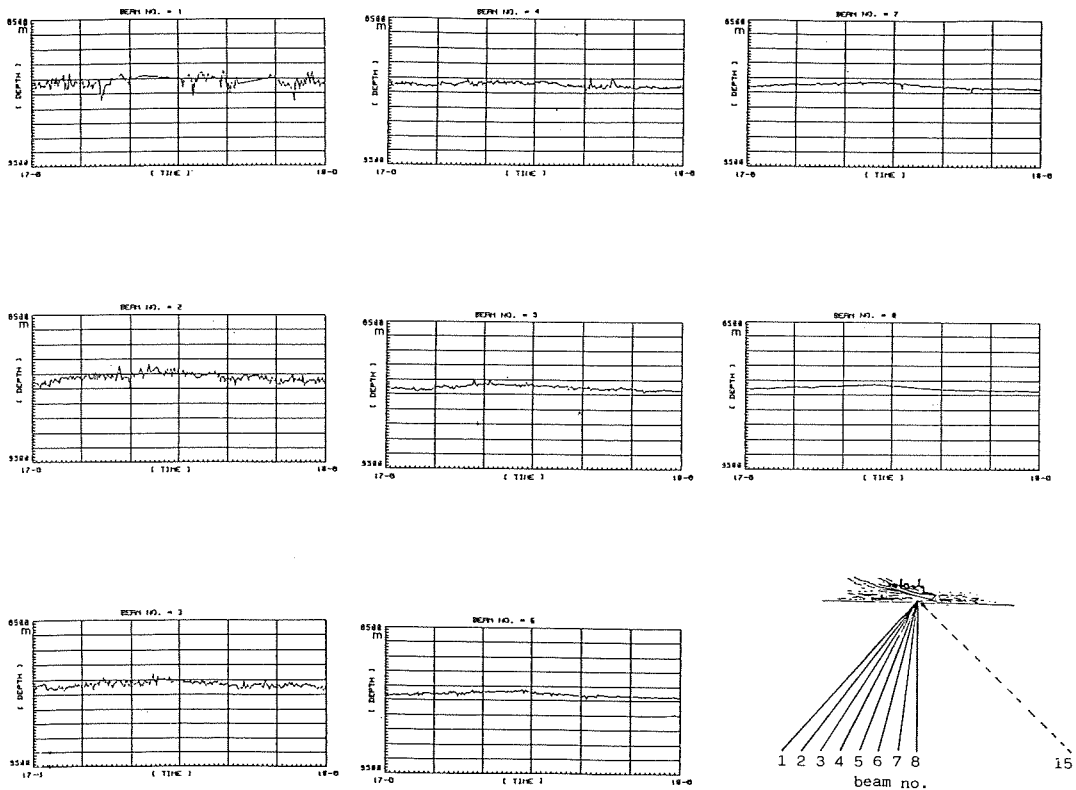


Figure 4 Dispersion in each beam data.

番号が増減している。概略、直下では±2~3m, 5番ビーム(8度の傾斜角度)では±10m, 2番ビーム(16度の傾斜角度)では±30mのバラツキを持っていることが分る。これから見てもデータのバラツキを押えることが不可欠であると言える。

第5図にデータをメッシュ状にまばらに抽出したものと、幾つものデータを加重平均的に処理してメッシュデータを作って図化した例を示す。これを見ると、データのバラツキを押えることの効果が分る。また、このメッシュデータを作成する処理法が有効であると言える。また、第4図をみると、バラツキの中にも大きなバラツキが所々現れているのが分る。この大きなバラツキのデータを削除すればより効果的にバラツキを押えることが出来る。つまり、ある程度の数のデータを集め、曲線近似式を求め、この近似式とデータの差の標準偏差でもって大きくバラツいているデータを削除するののひとつの方法である。

(2) 異常データ

シービームはかなり安定したデジタル測深を行うけれど、海象条件の悪い時や、急傾斜地を測量している時には、海底の地形とはかけ離れた値を持つことがある。しかし、これらの異常データは連続性が無いことが多く突発的に現れてくるので削除しやすい。作図した時も一目で異常であることに気付く(第6図参照)。こういった種類の異常データはビーム斜角度の大きいビームに存在することがほとんどである。

また、船が線替りを行う際に、時々異常データが混入することがあるので、回頭中のデータは削除するなり、後で充分注意を払う必要がある。この異常データも(1)で提案した方法で簡単に削除出来る。

(3) 斜測深の誤差

シービームは2-(2)で述べたような斜測深を行っている。海水中の音速度をCa一つにまとめているけれど、幾つかの音速度プロファイルを入れて精密に計算した値とこの式による水深値の差はほとんど問題無い値であった。(6)と(7)式から音速度プロファイルの誤差による影響を簡単に試算してみると、水深5000mの平らな海底で、ビームの傾斜角度20度、Caが10m/sの誤差(約0.6%の誤差となる)を持っていた場合、ビーム角度は約0.13度ずれていたことになる。

$$\sin \theta = (C_a / C_s) \sin \phi \quad (11)$$

$$\sin \theta' = (C'_a / C_s) \sin \phi = (C'_a / C_a) \sin \theta \quad (12)$$

$$\Delta \theta = \theta' - \theta = \sin^{-1}(1.004 \sin(20^\circ)) - 20^\circ = 0.13^\circ \quad (13)$$

このずれにより、水深値の誤差は

$$D = (1500/2) t \cos \theta \quad (14)$$

$$D' = (1500/2) t \cos \theta' = D \cos \theta' / \cos \theta \quad (15)$$

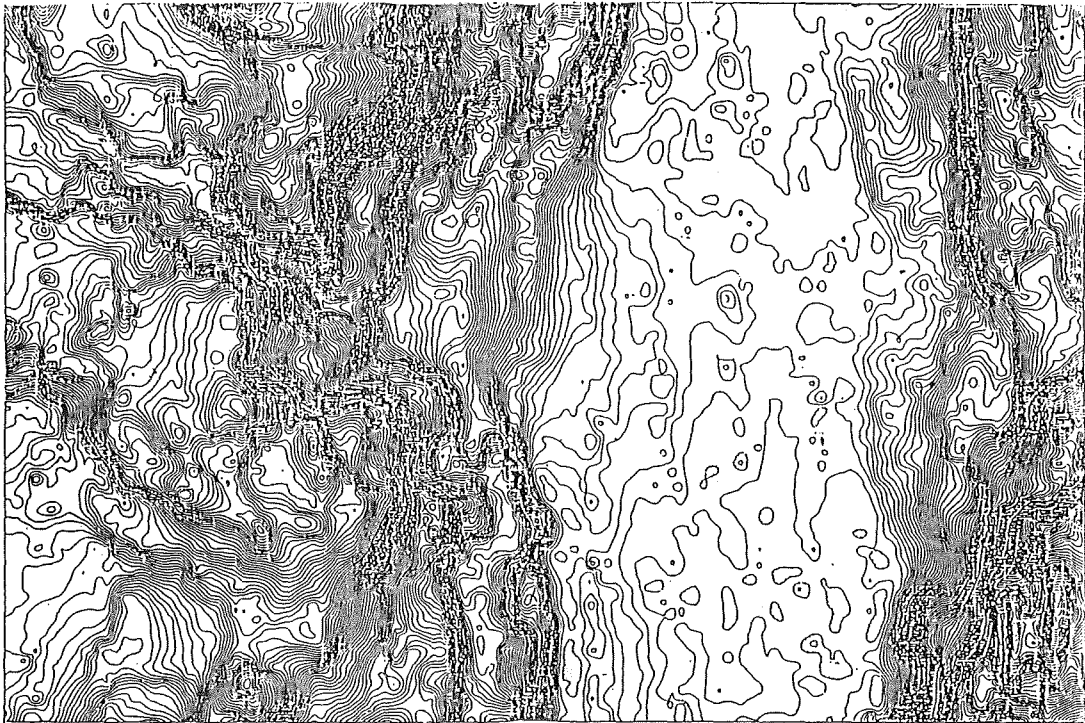
$$\Delta D = D' - D = 5000 \cos(20.13^\circ) / \cos(20^\circ) - 5000 \approx -4 \quad (16)$$

となり、約4mの誤差となる。また、横距離の誤差は約31mとなる。次に、海底が20度の下り傾斜を持っていた場合を考えると、水深は約15mの誤差となる。このほかに、ローリングがある場合には、データのバラツキを大きくしたりする。音速度プロファイルは出来るだけ正確に把握しておいた方が良いといえる。

実際には、海水中の音速度構造が水平層のみによって形成されているとは限らず、様々な形態をしていてかなり性質の異なる層が斜めに接していることもありうる。このような場合には、ビームは思わぬ方向に屈折していくことになる。たとえ、直下方向に発振されたビームでも同じである。これを補正することは相当難かしい。

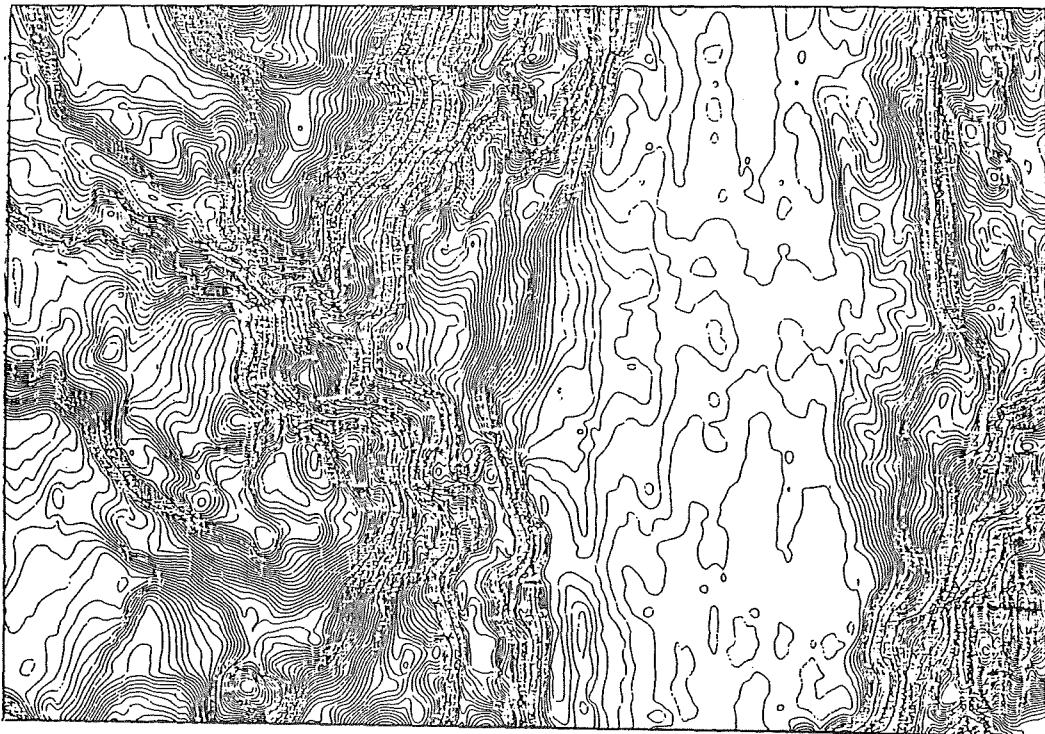
(4) 測位精度

測量船「拓洋」の測位装置は米マグナボックス社の複合測位装置モデル200であり、ロランCとNNSSを主



(a) extracting 7,000 data from 150,000 data

1km



(b) processing 150,000 data into 7,000 data

1km

Figure 5 Influence of data dispersion on a contour map.

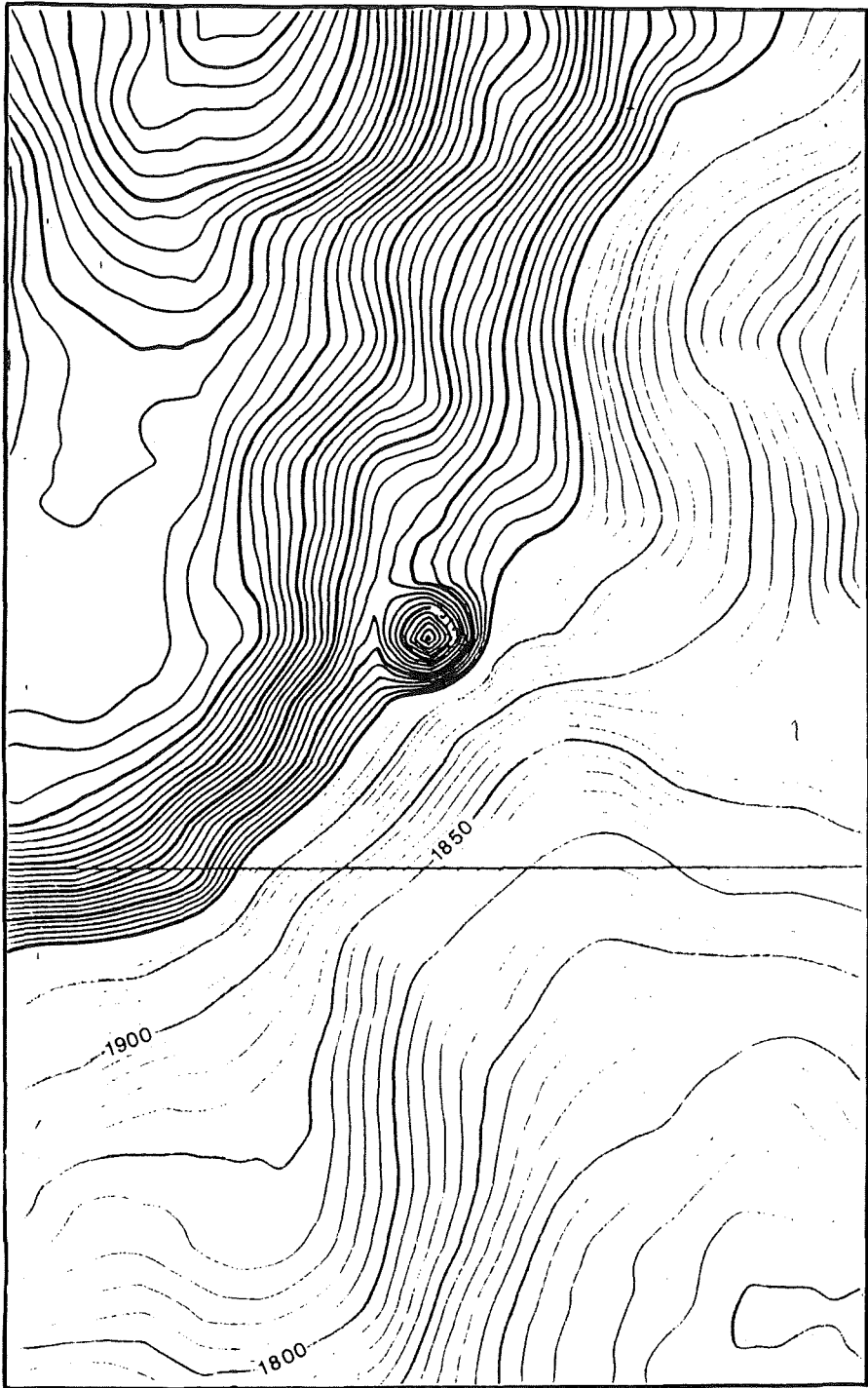


Figure 6 Erroneous data appeared on the contour map.

体としたものである。ほとんどの場合0.1海里より位置がずれることは無いが、それでも、たまに0.1海里ぐらゐずれることがある。海底の地形が複雑であり、かつ、このような測位誤差が起つた場合、シービームのデータの信頼性が高いので、測位誤差を補正しないと地形図に歪みを生じることがある。測位の生データを



Figure 7 Positioning error judged by the contour map.

注意深く見直すことにより、測位誤差の原因を見出して、解消できる場合もある。第7図は約0.1海里の測位誤差が生じたために等深線図がずれた例である。この図は後述する測線データ作図プログラムによって描いたものであり、測位誤差を発見するのに非常に効果的である。このようにシービームを使えば測位誤差も発見、修正できる。

(5) その他

第5図の伊豆・小笠原海溝底9200mの平坦部において、シービームで測量したところ、ビームの両端で数十mも浅く測定される現象が現われた。これは音線屈折で補正出来る値(10m以下)よりかなり大きく、はっきりした原因はつかめていない。このように原因がはっきりしない結果も時として現れてくることもある。この場合は補測等で、怪しい箇所の真上に測線を設けて再測するしか手立てが無い。

シービームのデータには測位のデータが含まれていないため、測位の磁気テープから時間を基に測位を拾い出して付加する必要がある。ここで、問題となる点は、シービームの時間データは0～24時までしか記録されていないためデータが何日に対応しているのかわからないことがよくある。また、シービームの磁気テープについて、データの最後にあるべきファイルマークがぬけていたり、再読不能なデータブロックがあったりすることがある。これらについては、HP-1000のような磁気テープ装置のハンドリング操作がある程度可能な融通性のある計算機で対応せざるを得ない。例えば、磁気テープを読んでいる途中でエラー箇所があった場合、コマンド等によってそのエラー箇所を読み飛ばし、処理を継続することが出来る。ところが、ACOS等高級計算機では融通性が無く、こういった対応ができないため継続処理が不可能である。

5. 処理の概要

5-1 測線データ作図プログラム

測量船「拓洋」の計算機システムHP-1000を使用し、測量作業と並行してシービームの作図処理を行うことを目的として測線データ作図プログラムを作成した。このプログラムは測線に沿って地形図を描いていく。つまり、シービームのデータを時系列に従って部分的に処理・作図し、これを繰り返していくものである。

本プログラムにより測量作業中に、既に収録された分のシービームデータを用いて海底地形図を描き、シービームデータの欠如、データの不良箇所の判断等が行えるので、作業中に測量作業計画の見直しを行い、測定の充実化、後処理の効率化を図ることができる。このような目的を持っているため、できるだけデータを生のまま描画するように配慮してある。

HP-1000計算機システムにはA0版の大型プロッターが接続してある。このプロッターの基本的使用法は、プロッター命令データを一旦ディスクにファイル（プロッターファイル）しておき、後でプロッター作動プログラムを走らせて任意プロッターファイルのデータを描かせるという方法である。この特徴を利用して、測線データ作図プログラムは図格描画処理と海底地形の作図処理とに分けた。つまり、最初に図格を描き、次にある時間範囲の海底地形図を描き、次々と部分海底地形図を重ねていくことができるようにした。

(1) 図格処理

作図座標系として、ランベルト正角円錐図法（2標準緯線）に、メルカトル図法、T. M. 図法をサブプログラムとして用意した。また、OTHERという名のサブプログラムを同形式で用意すれば任意の図法をとれるようにした。

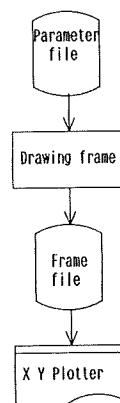


Figure 8 Flow of drawing a frame.
(the on-board contouring program)

処理パラメータはディスクファイルに書込まれており、エディット操作によって変更出来る。このパラメータファイルは(3)の等深線作図処理と共用している。これは、(3)も同じ図格パラメータを使用しなければならないことによる。これにより、プログラム処理が簡単に行える。測地系も任意のものがとれるように地球定数をパラメータとして与える方法を取った。

(2) データ結合処理

このプログラムはシービームデータに測位情報を付加するとともに、水深の音速度補正を行い、結合ファイルを作成する。このファイルは磁気テープにコピーして5-2の「広域データ作図プログラム」のシービーム情報ファイルとしても使用する。

処理パラメータはコンソール応答によるものとディスクファイルを使用するものに分けた。水深の音速度補正にはNP139測深補正表(Carter, 1980)を用いることとし、200m, 600m, 1000m, 2000m, 3000m, 4000m, 5000m, 6000m, 7000m, 8000m, 9000m, 10000m, 11000m, 12000mの測得水深値に対する真値を与え、その間はNP139測深補正表と同じくラグランジェの補間法を行うようにした。この方法により効率的に補正が行える。CTD等の実測音速プロファイルから補正を行う場合でも、この方法によってほとんど問題無い精度で補正が行なえる。船上で補正表が求められない場合はこのディスクファイルに測得水深値と同じ値を書いておけば未補正の結合ファイルが得られるので、陸上処理で改めて補正すれば良い。

コンソール応答によるパラメータはシービーム磁気テープの取り扱いに関するものであり、抽出時間範囲、シービームデータの年月日、磁気テープの掛け替え等である。

このプログラムはシービーム用と測位用の2台の磁気テープ装置を用いて処理する。まず、指定の抽出開始時間まで測位磁気テープを読み飛ばし2つの測位値を読み込む、続いて開始時刻までシービーム磁気テープを読み飛ばし、1ショットずつシービームデータを読み込んで2つの測位値で補間を行い、測位値を付加してディスク上に書き込んでいく。シービームデータの方が2つの測位データより時間的に後になれば次の測位データを1つ読み込む。これを繰り返していく。2つの測位データで狭んで補間するため、測位データ

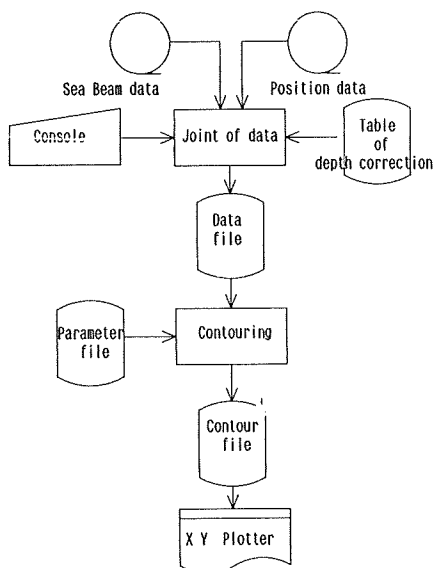


Figure 9 Flow of integration of Seabeam bathymetric data and position data to contouring. (the on-board contouring program)

の時間、位置情報は事前にチェックしておく必要がある。また、測位データの日付が数分間の間1日ずれていたために1日分のシービームデータをその位置に圧縮してしまったこともある。

また、この段階でビーム角度と書き込む位置を整理する。つまり、1ショットのシービームデータは最大16個あり、各々2%度ずつビームの斜角がずれている。直下と左右7個ずつのデータを有効としてディスク上には左端のデータから順番に書いていく。データが無いビームは水深値、横距離のスペースに零を書く。

(3) 等深線作図処理

このプログラムは250ショット分のデータ単位で作図していくようにしてあり、次の250ショットのデータとの接続がうまくつながるように配慮した。データの無い部分は作図しない、処理パラメータはディスク上に書き込まれており、図格パラメータと作図パラメータとからなる。作図パラメータではビームの横距離カット、中心から有効な左右のビーム数、等深線の間隔、各種表示パラメータとなっている。処理のフローは図-9に示す通りである。

・メッシュデータの作成

まず、(2)で作られたシービームと測位を結合したファイルからデータを250ショット分読み込み、船の経緯度値とビームの横距離、それと船首方向角からデータ1つずつの経緯度値を求め、作図図法に従った座標変換（経緯度からX、Y座標系へ）を行い、指定のメッシュ幅で作成したメッシュシステムにデータを振り分ける。次にデータが存在するメッシュについて、平均値をもってそのメッシュの代表水深値として、各メッシュの水深値を決定していく。さらに、一つのメッシュを4分割したサブメッシュシステムを作成し、メッシュデータから近似2次曲面式を求めて補間することにより各サブメッシュの水深値を決定する。

・等深線の開始位置のサーチ

データの存在領域の外周を一回りして等深線の開始点を捜す。続いて、データの欠損部の外周、データの存在領域の内部というようにして等深線の開始位置を捜し出す。この処理を等深線を引く全ての水深値に対して行なう。

・等深線の追跡

等深線の開始位置から回りのサブメッシュのどの辺に対応水深があるかを捜し、その点から次々と対応水深の位置を捜していく。開始位置に戻るか、データの欠損部、外郭部に突きあたるまで追跡していく。

・作図

1組の等深線データ群の開始から終りまで線をひく。この等深線が水深値を表示する線であれば、線の中に空白域を作り水深値をプロットする。太線に対応していれば2重線を引く。深度方向表示をする線であれば深い方に向かって線の所々にケバを付けて、傾斜の方向が分かるようにする。また、500m毎にプロッターのペンを替えていく。ペンは4色しか無いので4色を繰り返して使用する。

5-2 広域データ作図プログラム

5-1の(2)で得られたシービーム情報ファイルを基に、正確な、不良データの無い完成図に近い海底地形図を作成することを目的として本プログラムを開発した。このため、4で述べたシービームデータの特徴、問題点等を考慮し、不良データ、異常データの削除を幾段もの過程で行い、可能な限り削除することに務めた。メッシュの値を求めるにしても、位置を格子点等に固定するのではなくメッシュ内の任意の地点をとることが出来る用に配慮した。また、水深に応じてメッシュの大きさを間接的に変更する方策を取った。つまり、メッシュの最小値は最大水深地点に於けるシービームのビーム間隔によって決められるが、水深が浅ければ

データの密度が高くなり、より精密に海底を表わすことが出来るはずである。また、データの質がある程度ビームの斜角度に対応することから、ビームの斜角度に応じたウェイトを付けて処理を行なった。使用する計算機はデータが非常に多いことと、処理が複雑であることから水路部の計算機ACOS-650とした。

(1) 前処理

• データの表現法の変換

5-1の(2)で得られたシービーム情報ファイルのデータは、シービームのデータが多いため磁気テープへのデータの書き込み密度を高くするようにバイナリ値で書いてある。このため、ACOS計算機システムの数値表現法に変換する必要がある。例えば、整数値はHP-1000では基本的には8ビットの2バイト表現であり、ACOSでは9ビットの4バイトで表わされている。

さらに音速度プロファイルによる水深の補正をここでも行えるようにした。方法は5-1(2)と同じであるが、入力水深は任意の値を取れるようにした。

• フィルタリング処理

水深が深くなるに従い、シービームデータのバラツキが大きくなり、特にサイド方向のビームの傾斜の大きいデータに異常値を含む割合も多くなる。このため、同一ビームのデータを一列に並べ、一定間隔毎に曲線近似式を求め、ある一定レベルより離れるデータは異常データとして削除する。また、この近似式からの

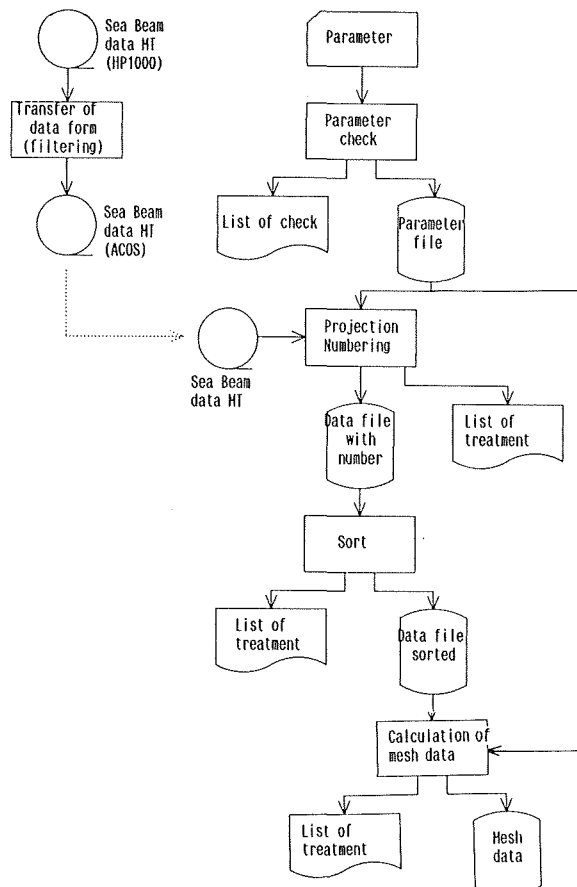


Figure 10 Flow of calculating a mesh system. (the on-shore contouring program)

標準偏差を計算し、ある一定レベル以上の偏差を持つデータ群は異常データ群と見なして削除する。

(2) データ処理

• メッシュシステムへのデータの振り分け

作図座標系、メッシュシステムへのデータの振り分け法等は5-1と同じであるが、ここでは入力データ全てを一度に行う。入力データのうち作図区域外に位置するものは削除する。区域内のデータは、対応するメッシュの番号、ビームの斜角度に対応した重み、座標値 X_i と Y_i (図上mm単位)、そして水深値 (m単位) をディスクファイルに書き込む。

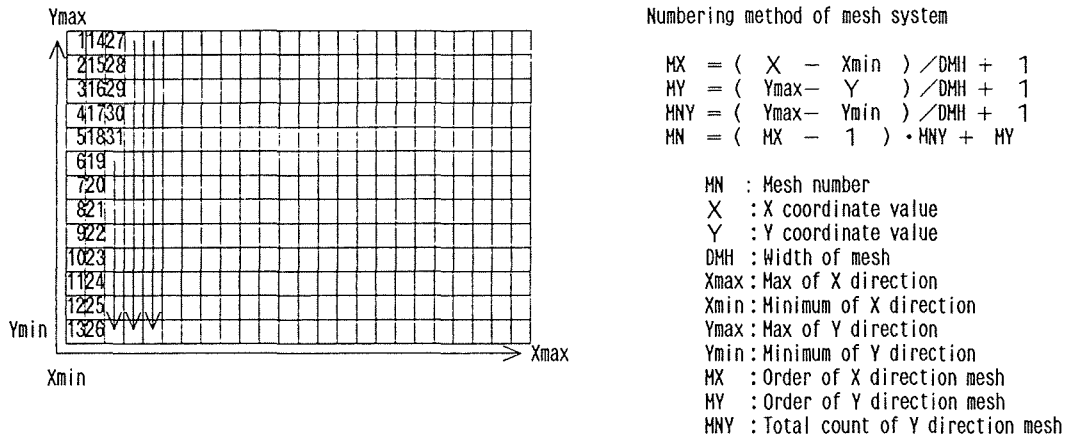


Figure 11 Numbering of mesh system.

• メッシュデータの計算

ディスクファイルに書き込まれたデータをソート処理によってメッシュ番号順に並べ直す。次に、同じメッシュ番号のデータを使って位置 X と Y 、水深値を計算して、重みの最大値を付加してディスク上に書き込み、メッシュファイルを作成する。メッシュ番号は図上左上端が1番であり、その下が2番、その下が3番というように下へ移っていく、そして、一番下に着いたら右隣りの最上端へ移る。つまり、メッシュファイルには左端から順番にデータが書き込まれ、データが無いメッシュは書かない。メッシュデータの一組は、 X 、 Y 、 Z となっている。さらに、 Z 、つまり水深値の小数点以下三桁目にウェイトの最大値を書込んである。このウェイトは0~8の値であり、直下ビームは8、左右に一つずつビームがずれる毎に1ずつ減少する。後で不良メッシュデータを削除する際に使用する。また、小数点以下三桁目の値であるのでそのまま水深値としても全く問題がない。

シービームの場合水深に応じてショット間隔が変わる、つまり、パルス波を發振し、海底で反射して、その反射波を受信してから次のパルスを發振するようになっている。このことから、浅い箇所ではデータが多く、深い箇所ではデータが少ない。また、ビーム間隔は2/3度で決まっているので海底上でのビーム間隔は当然広がる。という訳で、図の上でデータの密度が水深に応じて変化している。このことからすると、メッシュの幅は水深に応じて変える方が好ましい。また、データのバラツキを考えると深い方がバラツキも大きいので深いほどメッシュの幅を大きくして、バラツキを押えなければならない。そこで、図上の最大水深でメッシュ幅を決め、水深の浅い、つまり、データ量の多い箇所ではサブメッシュデータとしてひとつのメッシュ内に複数のデータを持てるようにした。このサブメッシュデータの中から一番信用性のあるものをそのメッシュ

ユの代表水深，つまりメッシュデータとして取り扱う。サブメッシュの大きさは次の等深線を引く際に作られるサブメッシュシステムと同一である。(3)ではメッシュシステムから3次曲面近似法によってサブメッシュシステムを作成する訳であるが，ここで，サブメッシュが既に作られているものはこの値を使い，無い部分のみ補間計算で求める。

このメッシュデータを計算する方法は以下の通りである。

- ①同一メッシュのデータをメッシュファイルから読み込む。このとき，ウェイトの最大値と3以上離れたデータ，指定した横距離より離れるデータ，左右両端の指定した個数のビームデータは削除する。これは，測線が交差しているとき等，質の悪いデータを取り除くのと，サブメッシュを求める時にサブメッシュが小さいために，2つの測線のデータがうまく交らなくてサブメッシュ間がバラツクのを避ける目的を持つ。次に，入力データをサブメッシュに振り分ける。ウェイトの最大値が5以上のメッシュについてのみサブメッシュを求める。これは，経験的に言って，ウェイトが5以上（ビーム角度が約10度以下）のデータにはほとんどミスデータがなく，信頼性が非常に高く，サブメッシュに分けて処理して問題が無いと判断したことによる。
- ②サブメッシュに於いて，データの個数が4以下の場合サブメッシュは求めない。ウェイトを付け，データの個数に応じて以下のようにして近似式を求め，サブメッシュの水深値を計算する。

データ数が0~4の場合・・・計算しない

データ数が5~10の場合・・・平面近似

データ数が11以上の場合・・・2次曲面近似

- ③メッシュデータは一番番ウェイト数の高かったサブメッシュとして，最初にメッシュデータファイルに出力し，続いてサブメッシュのデータを出力する。
- ④サブメッシュデータが1つも得られなかった場合には以下の近似式で加重平均してメッシュデータを求める。メッシュの水深値を求める位置は位置を加重平均して求める。つまり，ウェイトの重心点となり，一番信頼度の高い値が求まる点である。サブメッシュも同じである。

データ数が1~4の場合・・・単純平均

データ数が5~10の場合・・・平均近似

データ数が11以上の場合・・・2次曲面近似

(3) 等深線描処理

メッシュシステム上で一回に約一万点分に相当するメッシュデータを入力して作図し，次々と一万点分ずつ作図する。これは，このプログラムを計算機に掛けた際，100KWの容量で作動するように分割作図法を取ったことによる。一万点分のメッシュを考えた場合，メッシュ幅が5mmであれば50cm×50cmの作図領域に相当し，一図の分割数が少なく，きれいな図が得られる。容量を100KWに縮め，かつ，一回の作図領域を大きくする工夫をプログラム上で取ってある。

・サブメッシュデータの計算

サブメッシュデータは等深線を引く際に，メッシュデータからじかに引いたのでは，等深線が細かい地形を表現出来ないので，4×4のメッシュデータから中心のメッシュについて3次曲面近似法によってサブメッシュシステムを作成する。サブメッシュは中心の4個のメッシュデータによって作られる四角形の辺を何等分か（パラメータ指定）して作られる。データの欠損部分や外郭部では3次曲面式が求まらないので比例配分によって求める。3次曲面近似式は以下のようにして求める。ただし，中心の4個のメッシュが作る四角形の中にはこの4個の水深値の最大値より深い等深線を引かないように，また，最小値より浅い等深線を引

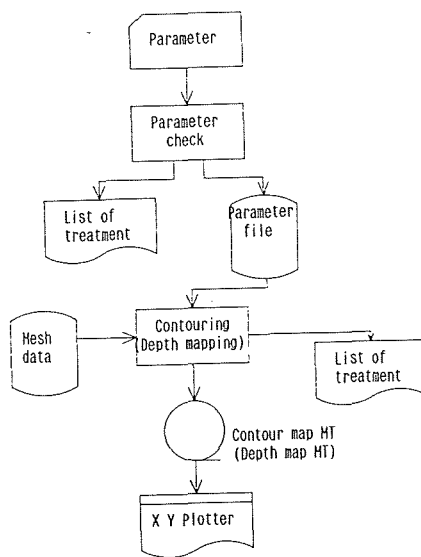


Figure 12 Flow of constructing a contour map.
(the on-shore contouring program)

かないように調整する。つまり，データにない等深線は作らない。

$$Z = C \cdot X_y \tag{17}$$

$$C = Z \cdot X_y^{-1} \tag{18}$$

ここでCは1行16列の3次曲面式の係数行列である。

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ \dots \ C_{14} \ C_{15} \ C_{16}] \tag{19}$$

X_y は16行16列の入力データから計算される行列である。

$$X_y = \begin{bmatrix} X_1^3 \cdot Y_1^3 & X_2^3 \cdot Y_2^3 & X_3^3 \cdot Y_3^3 & \dots & X_{14}^3 \cdot Y_{14}^3 & X_{15}^3 \cdot Y_{15}^3 & X_{16}^3 \cdot Y_{16}^3 \\ X_1^3 \cdot Y_1^2 & X_2^3 \cdot Y_2^2 & X_3^3 \cdot Y_3^2 & \dots & X_{14}^3 \cdot Y_{14}^2 & X_{15}^3 \cdot Y_{15}^2 & X_{16}^3 \cdot Y_{16}^2 \\ X_1^3 \cdot Y_1 & X_2^3 \cdot Y_2 & X_3^3 \cdot Y_3 & \dots & X_{14}^3 \cdot Y_{14} & X_{15}^3 \cdot Y_{15} & X_{16}^3 \cdot Y_{16} \\ X_1^3 & X_2^3 & X_3^3 & \dots & X_{14}^3 & X_{15}^3 & X_{16}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_1^3 & Y_2^3 & Y_3^3 & \dots & Y_{14}^3 & Y_{15}^3 & Y_{16}^3 \\ Y_1^2 & Y_2^2 & Y_3^2 & \dots & Y_{14}^2 & Y_{15}^2 & Y_{16}^2 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

Zは1行16列の水深データの行列である。

$$Z = [Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ \dots \ Z_{14} \ Z_{15} \ Z_{16}] \tag{21}$$

• 等深線の描画

等深線をサブメッシュシステムから引く方法は測線データ作図プログラムとほぼ同じである。異なる点は一度に扱うデータ量が極端に増えている点と、傾斜方向を表すケバ表示がない点である。代りに、極小地点（深みの中心）の回りにある一番深い等深線には深みを表す矢符を書くようにした。また、等深線に水深値

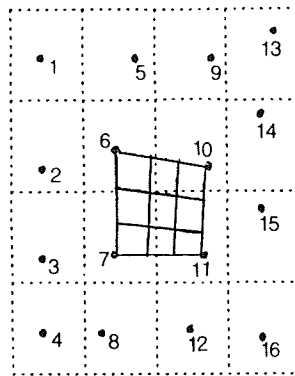


Figure 13 Sub-mesh system.

を書き込む際に、数字を一字ずつ等深線の線上に乗るように分けて書いた。これにより、数字が等深線を表わすことになるし、回りの等深線の上に重なることを避けられる。

(3) 水深図作成

メッシュファイルからメッシュデータのみを取り出し（サブメッシュは除く）、指定間隔置きメッシュデータをプロットして、水深図を作成する。水深値は200m以下の場合には小数点以下一桁までの値を、その他は整数部をプロットする。また、整数部の中心点が水深点となる。つまり、1桁ならその数字の中心、2桁なら2つの数字の中間、3桁なら真ん中の数字の中心となる。文字サイズを2mm以上として、プロッターのペンをロットリングに替えて書けば原図としても充分通用するぐらいきれいに仕上がる。

(4) データ編集処理

本作図プログラムを効果的に使用できるように、また、質を向上するために、メッシュデータを対象に以下のデータ編集処理プログラムを作成した。

・不良データ削除

メッシュデータを読み込み、水深値に附随しているウェイトの最大値が4以下のメッシュデータについて回りのメッシュデータを曲面近似し、そのメッシュ値が異常であるか判断して、異常メッシュデータは削除するものである。

・データの補間

不良データを削除するために各種のフィルターを設けてある。このため、測量区域を埋めつくして測量したとしても、所々メッシュデータが抜けて、空白となる部分が出ることもある。また、都合で測線間に隙間が出ることもある。このような箇所も等深線が引けるようにデータを補間する。補間法は海底の地形の、谷や尾根等、連続性を損うことが無いように、近似3次曲面式を用いて補間する。補間を行う場合、回りを取り囲むようにデータを抽出しないと、旨く補間出来ない。また、近似3次曲面式を求めるには縦・横4個（計16個）以上のデータが必要である。このため、補間点を中心にした8本の放射線で回りを8分割し、基本的には各区域からある距離内に於て距離的に異なるデータを3個と、測線状況に応じて決めた近傍のデータを抽出した。また、連続する2区域共、距離的に異なるデータが抽出出来なかった場合は補間しないようにした。

これはまた、(1)で測線間の整合性の悪い箇所のデータが抜け、その箇所を補間するので接続性が滑らかに

なり、整合性を改善したことにもなる。

6. 考 察

この2つの作図プログラムによって作図した伊豆・小笠原海溝の等深線図を第14, 15図に示す。シービームのデータの質が良いこともあるが、測線データ作図プログラムによって作成された等深線図も非常に良く海底の状況を表わしている。データの不良箇所、欠損箇所、測線間のデータの整合性、データの質等、非常に多くの情報をもたらしてくれる。第13図の東経142度、北緯34度24~28分付近に異常地形が描かれているが、これは表層探査装置の発振パルス中に含まれる3倍高調波成分によって干渉を受けた箇所である。この3倍高調波成分の信号強度はかなり強くシービームのアナログ記録にもはっきりと出てくる。測量の際には、特に気を付けなければならない点である。表層探査装置の発振のタイミングをずらしたりして、反射波と常に離しておく必要がある。測量作業中にこれ等の情報がこの図から与えられるので、補測等簡単に測量計画の見直しができる。

広域データ作図プログラムでは測線データ作図プログラムで出来た等深線を参考にして、不良データを削除する等、効率的にデータ処理の計画を立てることが出来る。広域データ作図プログラムではメッシュデータを正確に求めており、また、等深線を引くメッシュデータと水深図にプロットするメッシュデータが同じなので水深図と等深線図は完全に一致する。これは、等深線図の等深線を位置的に自由度のあるメッシュデータから直接引いた成果である。

7. おわりに

本プログラムの完成により、今後、シービームを使った海底地形調査がより充実されるものと期待される。ただし、シービームデータの処理については、シービームデータの性質、つまり、どれが異常データであり、どれがバラツキの現象であり、その度合はどの位か、測線間のデータの整合性が悪くないか等を的確に見極める目を養うことが肝要であるといえる。計算機処理によって作成されるため、これらの現象が判りにくいけれども、測線データ作図プログラムで作成した図はデータの性質がそのまま表現されているので、参考にして注意深くデータを検討する必要がある。またメッシュ幅の大きさをシービームのビーム間隔より大きくとることは特別の時以外は避けるべきである。この他、測位、時間のデータに間違いがないか、測量中に何か異常がなかったかどうか等、処理を行なう前に十分注意を払う必要がある。

本プログラムを作成するに当り、穀田昇一首席観測士をはじめ測量船「拓洋」の乗組員、大陸棚調査室の方々にはご協力を頂き厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 浅田 昭・谷 伸 1985 : 計算機によるシービームデータの作図法. シンポジウム資料-5, 最近の海底調査-5, 15-18, 69-82ページ.
- Carter, D. J. T. 1980 : Echo-sounding Correction Tables, NP139, Third Edition, The Hydrographic Department, Ministry of Defence, Taunton.
- Sea Beam Bathymetric Survey System-Technical Manual-, Vol.1-2, General Instrument Corp.

AKIRA ASADA

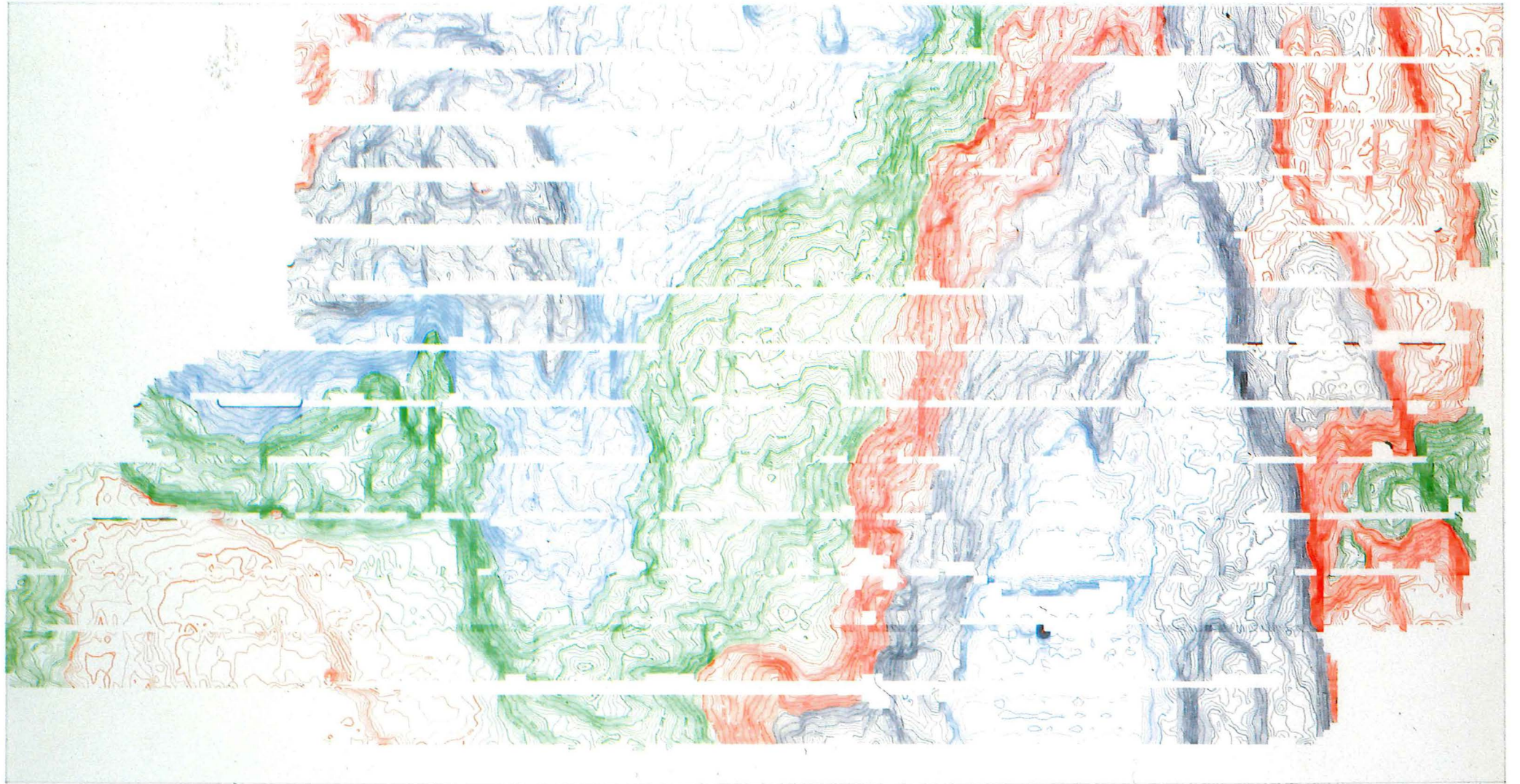


Figure 14 Contour map produced by the on-board contouring program.
Contour interval 20m.

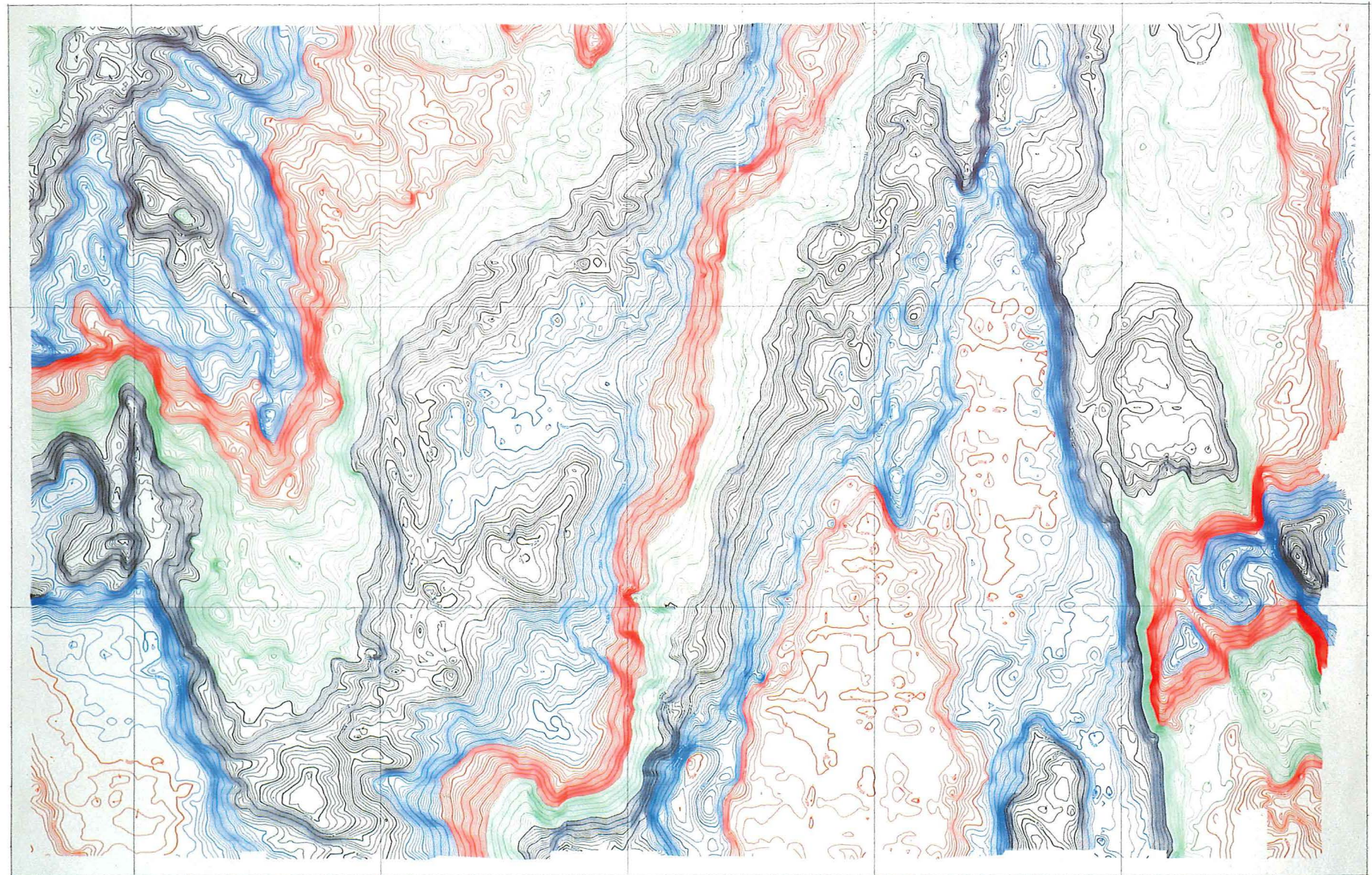


Figure 15 Contour map produced by the on-shore contouring program. Contour interval 20m.