

電気探査装置に内蔵した解析部への 並列処理技術の活用

佐野 康・田子公一・大橋武一郎

The Application of Parallel Processing to Built-in Software of Resistivitymeter for 2-D Inversion

Ko SANO, Koichi TAGO and Takeichiro OHHASHI

Abstract

The geophysical exploration such as geotomography, 2-D survey and 3-D survey have been carried out to investigate the ground structure precisely. The computer processings necessarily required for the analysis because the data volume is usually very large for such geophysical survey. On the other hand, although checking data on site is required to obtain good results, it is difficult to evaluate the data quality by only checking each data value separately. The instruments for geophysical survey, which are equiped with built-in software to analyze the data on site, have been developed. However, long processing time is required for such large volume data by the built-in software and decrease the survey efficiency. Therefore, fast data processing is required for the analysis on site comparable with efficient survey.

Parallel processing is one of effective method to improve the processing speed. Therefore, built-in parallel processing system for two-dimensional resistivity inversion has been developed. The processing flow of the two-dimensional resistivity inversion by conventional built-in software is as follows (Fig.2).

- ① Measured data is converted into the set of one-dimensional data in advance using space filter and interpolation.
- ② Each 1-D data is analyzed respectively by use of Linear Filter Method and Modified Cholesky Method.
- ③ Two-dimensional resistivity profile is obtained as a inversion result using such 1-D analysis results.

SIMD (Single Instruction stream Multiple Data stream) type processing method was used for built-in parallel processing system as many independent 1-D analysis were required.

Four Transputers (T800) were used as processors for parellel processing. Those were connected in a tree structure (Fig.4). MPU (1), called root processor, has a role as a scheduler to share 1-D data among processores as well as data processing.

The processing time was compared with those of other processing systems to evaluate the effect of parallel processing using synthetic data which is obtained by assuming that the number of electrode is 50, electrode spacing is 1 m and survey depth is 10 m. As a result, it is recognized that the parallel processing is faster than conventional built in

system by as much as approximately 30 times (Fig.7). This system was applied to the survey to estimate the distribution of the fault. As the 2-D resistivity profiles were obtained on the site, the quality of data obtained could be examined, and further, survey plan could be modified quickly on the site to estimate the fault distribution effectively.

1 まえがき

物理探査によって地下構造を精密に把握するために、ジオトモグラフィや3次元探査などが行われている。このような探査においては、多数の測定点を配置し、それらの測定点の様々な組合せに関して測定を実施するために、膨大な量のデータが得られることになる。したがって、解析を行うに当たっては、コンピュータを使用して、高度な処理が行われている。

一方、精度の良い探査結果を得るためには、現場で得られるデータを吟味することが必要であるが、個々のデータを個別に調べるだけでは評価できない場合が多い。そのためには、これまでも地震探査や電気探査については、測定装置内に解析プログラムを組み込み、現場において、概略の解析結果が得られるようにした装置が開発されている。

このように、一連の探査の作業中に、測定データの良否が評価できることの利点に引き替え、多量のデータを用いて解析を行う場合には、処理時間が長くなり、この間は探査作業が中断されるので、探査作業そのものの能率は低下することになる。たとえば、現存の解析プログラム(16ビットCPUと浮動小数点演算プロセッサを使用)を内蔵する探査装置による場合には、電極数が30本程度の探査についての解析でさえ、30分以上の時間を要している。

したがって、現場において解析結果が把握でき、しかも能率的に探査を実施するためには、解析のための時間を大幅に短縮することが必要であると考えられる。

2 解析ソフトウェアの並列化

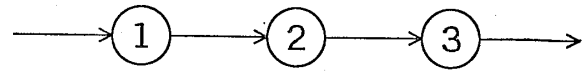
現場における解析において、探査装置内での処理速度を向上させる方法の1つとして、ソフトウェアの並列化がある。そこで、電気探査比抵抗法の2次元解析についてのソフトウェアの並列化を試みた。

2・1 並列処理のデータフロー

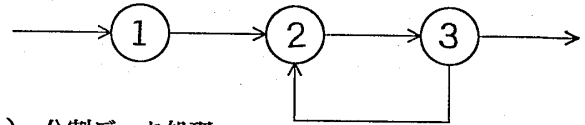
並列化できる処理の方法は、パイプライン処理と分割データ処理の2者が代表的な方法である。

パイプライン処理は、最初の処理が終わると、つぎの

(a) フィードバックのないパイプライン処理



(b) フィードバックのあるパイプライン処理



(c) 分割データ処理

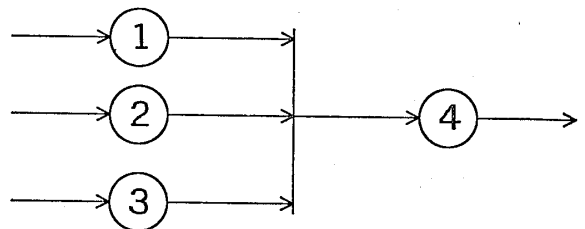


図-1 並列化できる処理方法

Fig.1 Typical flow of parallel processing.

処理に移るもので、図-1(a)に示すように、①から②へ、②から③へと一方向に流れてゆく処理である。このような処理を1つのプロセッサで行う場合には、まず、最初の1つのデータについて①から③までの処理を行い、その後、つぎのデータについて同様の処理を行うということを繰り返すことになる。

しかしながら、データの量が多く、つぎつぎと流れてゆく場合には、流れ作業のように、それぞれの処理を受持つ複数のプロセッサを用いて同時に処理することが可能になる。すなわち、1つのプロセッサではシーケンシャルな流れになるパイプライン処理も、複数のプロセッサを使用することによって、並列化が可能になる。

これに対して、図-1(b)に示すように、フィードバックがあるパイプライン処理においては、フィードバック部で待ち時間が生じる。すなわち、図中の③から②にフィードバックされ、その処理が終わるまでは、①からのつぎのデータを②に入力することができず、その間は待ち状態になる。このような場合には、並列化による効果はあまり期待できないことになる。

一方、分割データ処理は、図-1(c)に示すように、異なる複数の処理(①, ②, ③)の結果を用いて、つぎの処理(④)が実行される流れである。この場合、最初に行われる複数の処理が相互の関連がなく独立のもので

あれば、並列化が可能である。この場合、相互に関連があると、待ち時間が生じて並列化の効果が小さくなる。

上記のほかに、解析時間の短縮に有効な並列化が可能で処理としては、フィードバックのないパイプラインと分割データ処理を組み合わせたネットワーク型のパイプライン処理などもある。

2・2 解析ソフトウェアの並列化

図一2は、比抵抗法の2次元解析のためのフローチャートである。この図によって明らかなように、この処理の流れは、フィードバックのあるパイプライン処理である。ここに、'理論電位計算'から'収束判定'までの処理を並列化しても、モデルの修正というフィードバックがあるため、時間短縮の効果は期待できない。したがって、効果的に並列化するためには、フィードバックのないパイプライン処理か分割データ処理ができる部分を見出す必要がある。

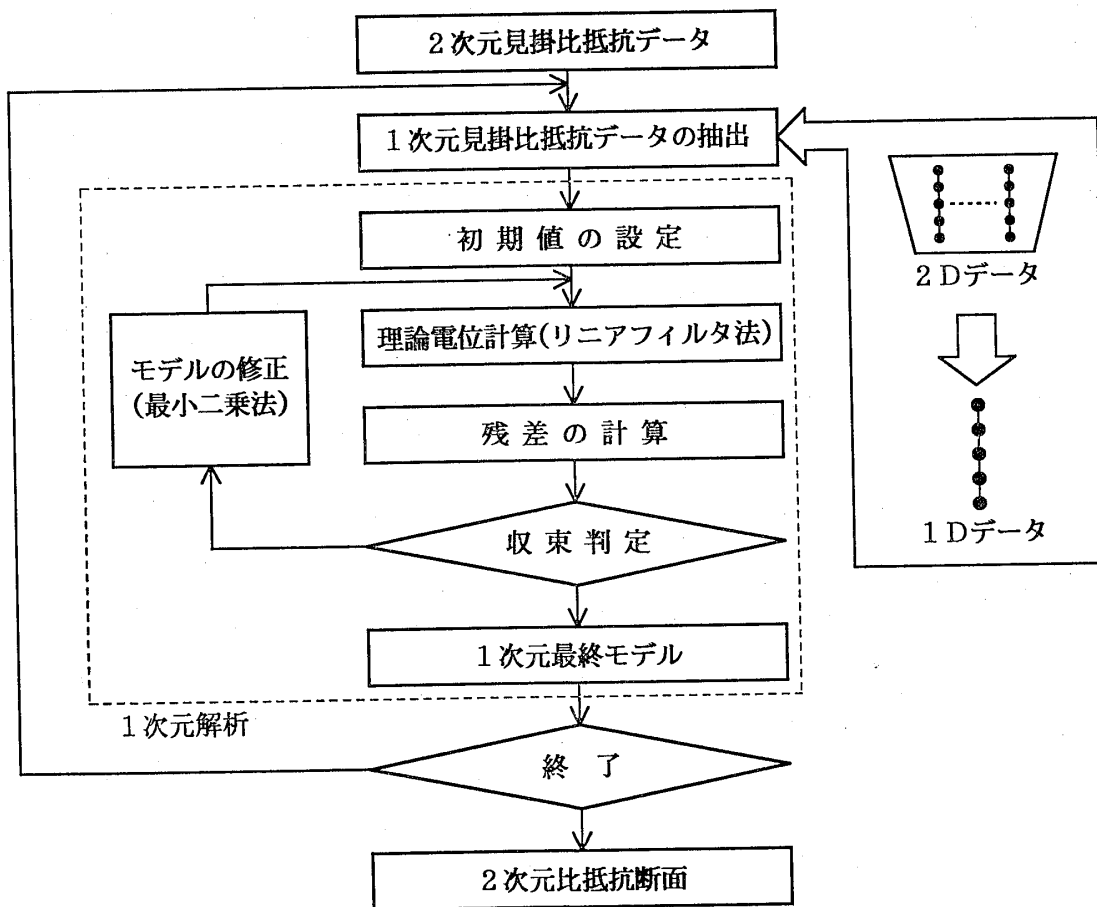
図一2に示してある破線で囲まれている'初期値の設定'から'1次元最終モデル'までの処理過程は、1次元の解析を行う部分であり、この部分を1つの処理単位

とみなすことができる。この波線で囲まれた部分の処理で用いられるデータは、2次元見掛比抵抗データから変換された1次元見掛比抵抗データの集合である。そして、それぞれの1次元データを解析し、その結果を用いて2次元断面を得ているのである。

そこで、1次元データの解析処理を測定点ごとに、独立して処理することを考えて、分割データ処理として、並列処理化を行うこととした。すなわち、図一2の破線で囲まれている部分(初期値の設定から1次元最終モデルまで)を1つの処理単位とみなし、図一3に示すように、4個の並列処理プロセッサにおいて同時に処理できるようにした。

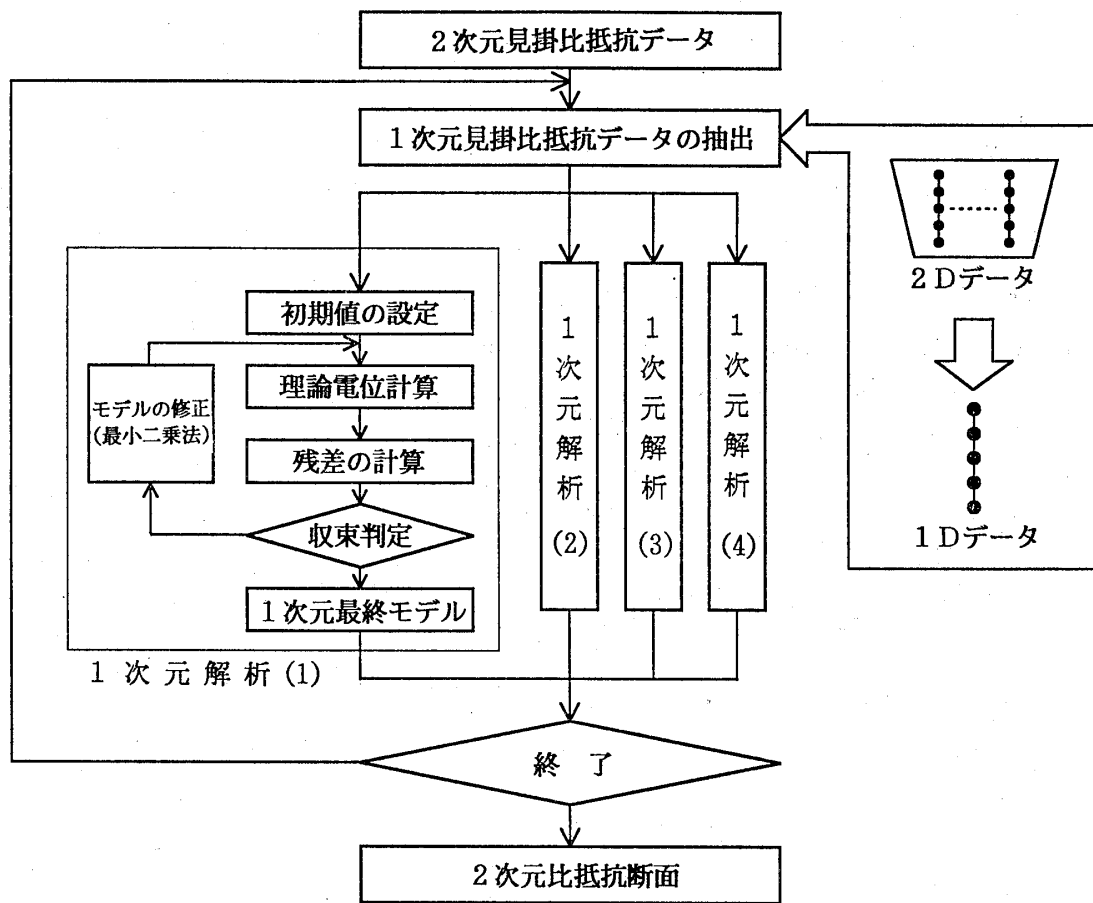
さらに、それぞれのプロセッサにおける1次元解析に要する処理時間は一定ではないので、この解析処理が早く終わったプロセッサから順に、つぎのデータを入力して、解析処理を進めるという管理を行うスケジューラの役割を持たせるようにした。

3 ハードウェアの構成



図一2 比抵抗法2次元解析の流れ

Fig.2 Flow of two-dimentional resistivity inversion.



図一3 2次元比抵抗解析の並列処理

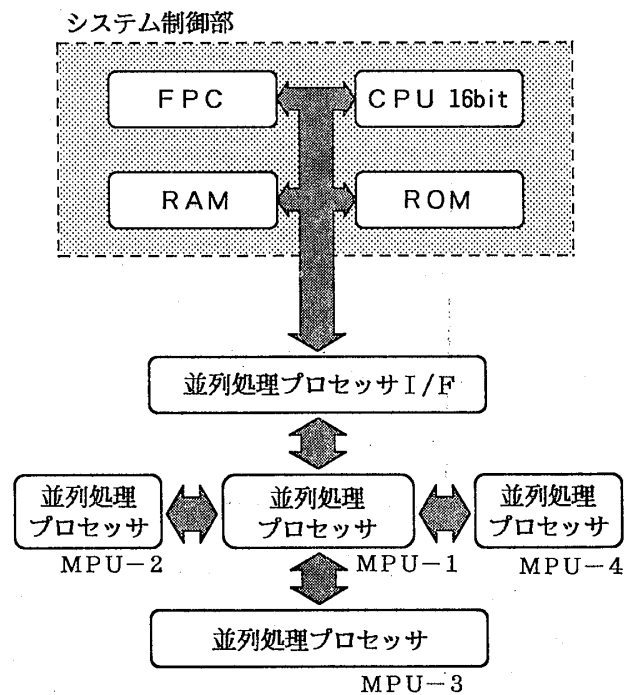
Fig.3 Parallel processing of two-dimensional resistivity inversion.

探査装置に組み込むことができる並列処理用プロセッサとしては、現在のところ、英国インモス社製のトランスピュータと呼ばれているもの以外に、利用できるものはないと思われる。したがって、それらの製品のうち、性能がよいと考えられる T 800を採用することにした。

並列処理のためのハードウェアの構成は、図一4に示すとおりであり、システム全体は、16ビットのプロセッサで制御されている。

並列処理は、4つのプロセッサによって行われ、これらのプロセッサは、図一4に示すように、MPU(1)を中心に他の3つのプロセッサが接続されて、ツリー構造と呼ばれる構造となっている。ここに、並列化のために4つのプロセッサを用いることにしたのは、このトランスピュータが、他と接続できるリンクインターフェースを4つ有しており、ツリー構造を構成しやすいためであった。

MPU(1)は、他のプロセッサと同様に、演算処理を行うとともに、並列処理を制御する役割を兼ね、'ルート並列処理プロセッサ'と呼ばれており、さきに述べたスケジューラの役目も行っている。データ収録時には、



図一4 並列処理のためのハードウェア構成

Fig.4 Structure of the parallel processing system.

システム制御部だけが動作し、解析時には並列処理部のみが機能する。解析時には、システム制御部から、並列処理プロセッサインターフェースを経由して、プログラムやデータがMPU(1)に送られる。MPU(1)は、並列処理プログラムに基づいて、他の並列処理プロセッサ(MPU(2)~MPU(4))に対して処理を分担させ、それぞれにおいても処理を行う。それぞれのプロセッサの処理結果は、MPU(1)を経由して、システム制御部のプロセッサに返される。

4 並列処理化による処理時間の短縮効果

並列処理化によって、処理時間がどの程度短縮されたかを調べるために、モデルデータを用いて評価した。使

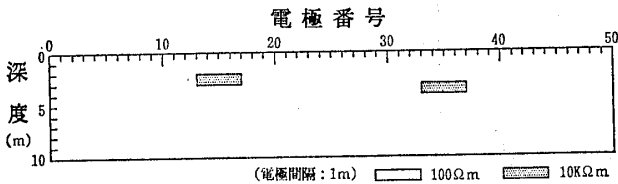


図-5 評価のために用いた比抵抗構造モデル
Fig.5 Structure of the resistivity model for evaluation.

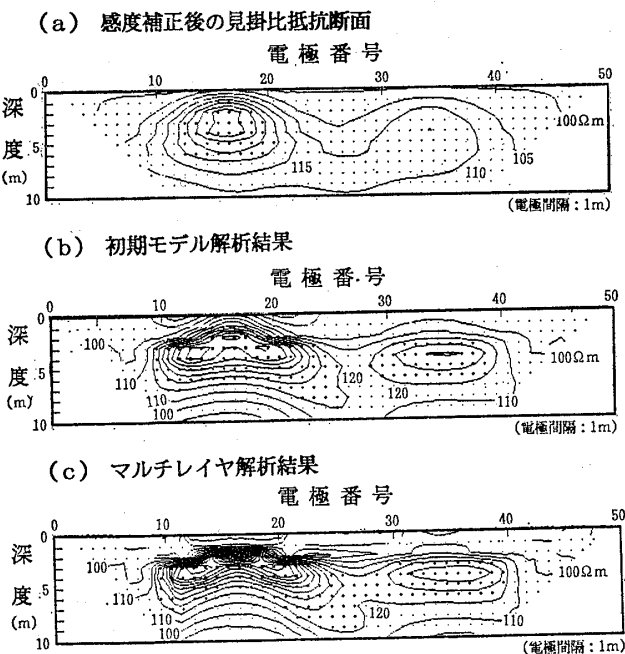


図-6 モデルデータの解析結果
16ビットCPU(68000)および浮動少数点演算プロセッサ(68881)を併用した処理システムによる解析結果
Fig.6 Analysis result for the resistivity model. This result was obtained by 16 bit CPU (68000) with FPC (68881).

用したモデルは、電極数が50本、電極間隔は1mとし、探査深度を10mとしたもので、データの総数は445個である。モデルの構造は、図-5に示すように、比抵抗値が100Ω・mである媒質中に、比抵抗値が10kΩ・mで厚さ1mの物質が、電極番号13から17の区間の深度2mのところ、および、電極番号33から37の区間の深度3mのところの2箇所が存在するものである。

一方、処理時間を比較するために用いた処理システムは、下記の5種類とした。

- ① トランスピュータを4個用いた並列処理システム
- ② トランスピュータを1個だけ用いた処理システム
- ③ 16ビットCPU(68000)および浮動小数点演算プロセッサ(68881)を併用した処理システム
(従来の電気探査装置に使用しているシステム)
- ④ 16ビットCPU(80286・12MHz)および浮動小数点演算プロセッサ(80287・10MHz)を併用した処理システム
- ⑤ 16ビットCPU(80286・10MHz)を用いた処理システム

これらの処理システムによって上記のモデルについて解析(付記参照)を行うに当たって、処理システムの種類

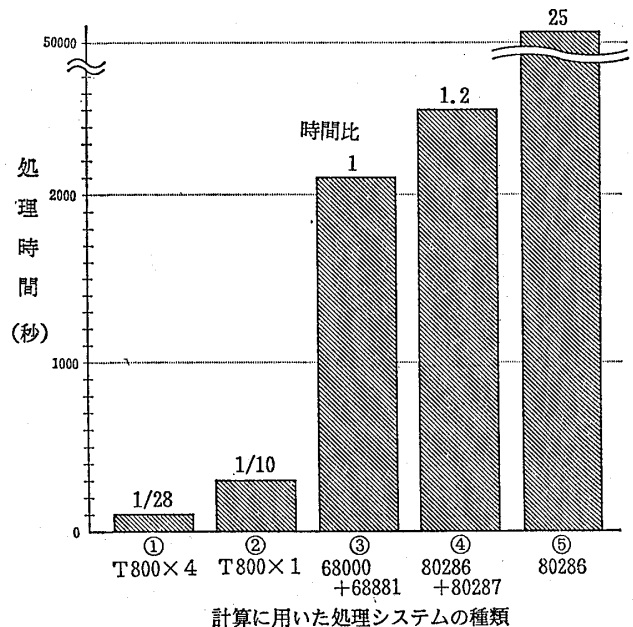


図-7 モデルデータについての解析処理時間の比較
図中の柱状グラフ上の数字は、③のシステムを基準としたときの処理時間の比
(電極数: 50, 電極間隔: 1m, 探査深度: 10m)
Fig.7 The comparison of processing time. The numbers on the top of columns show the ratio of processing time. (Number of electrodes: 50, Electrode spacing: 1m, Survey depth: 10m)

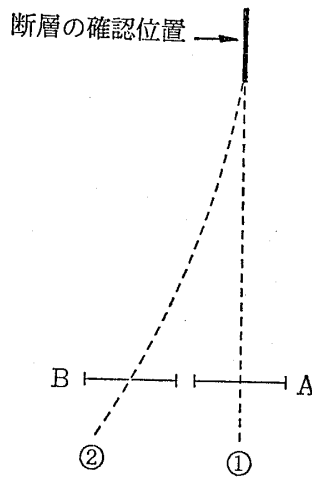
によって、異なる結果が得られるようでは、いずれかのシステムが誤った処理をしていることになり、正確に処理時間を比較することにはならない。したがって、それぞれの処理システムの解析結果を比較して、同じ結果が得られていることを確認した。解析結果（処理システム③による）を図-6に示す。

解析に要した処理時間としては、演算を開始してから終了するまでの時間とし、各システムに内蔵されているクロックを用いて計測した。その結果得られた処理時間を比較して、図-7に示す。この図に示すように、従来の探査装置において用いられている68000を用いたシス

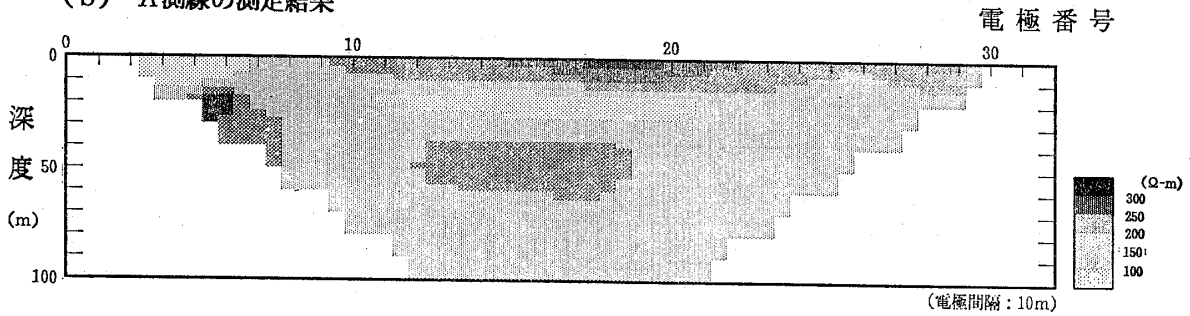
テムによる処理時間を1として、これに対する他のシステムによる処理時間の比を示すと、図中に示すようになる。すなわち、トランスピュータを4個用いたシステムでは、従来のシステムに比べて、28倍の速さで処理することができ、また、トランスピュータを1個用いた場合に比べると、約3倍の速さとなっている。

並列処理においては、使用するプロセッサの数が多くほど、より多くの処理を同時に行うことができるので、処理時間が短縮されることになるが、プログラム中には、先行する処理がすべてのデータについて終了しなければ、つぎの処理が行えないことなどがあり、一般には、

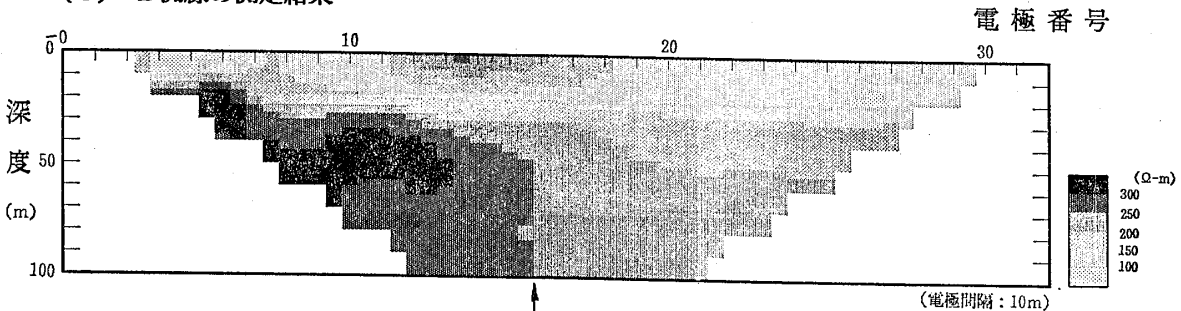
(a) 断層の推定位置と測線配置



(b) A測線の測定結果



(c) B測線の測定結果



断層に対応していると考えられる比抵抗の不連続変化

図-8 野外での解析結果例

Fig. 8 Examples of analysis results on the site.

すべての処理を並列化することは困難である。また、プロセッサ間の通信に要する時間なども必要であり、処理時間は、必ずしも、プロセッサの数と単純には対応しない。今回の並列処理においては、図-5に示したモデルを用いて、4個のプロセッサを使用したシステムによって、1個の場合の約1/3の処理時間を得ており、かなり効率良く並列処理化ができたといえる。

演算時間は、対象とするデータの量や内容によって、大きく変化するものであるが、各システム間の処理時間の比は、ほとんど変わらないものと思われる。

5 野外における使用例

並列処理システムは、探査装置の制御部とは並列処理インターフェースを経由して、通信する構造になっており、制御部とは分離して、高速処理用の拡張ボードとしてまとめて、探査装置内に実装できるようにした。

また、解析プログラムも並列処理システムが実装されているときには、並列処理を行い、実装されていないときには、16ビットCPUと浮動小数点演算プロセッサを用いて処理を行うようにした。

図-8は、上記のように構成された電気探査装置によって測定した結果を示したものである。この測定は、地質調査による情報から予測された断層を確認するために実施したものである。

当初は、断層が、図-8(a)の①の方向に存在するであろうと考えられていたので、その確認のために、測線Aを設定して測定を実施した。しかしながら、(b)に示すように、断層の存在を示すような特徴的な解析結果は得られなかった。そこで、測線Bを設定して測定したところ、(c)に示すような結果が得られた。この図によると、電極番号15番と16番の中間部において、横方向に比抵抗値が不連続的に変化し、その不連続部が直線的に下方に延びており、これが断層を示すものと判断した。したがって、この断層は、②に示すような方向に延びているものと考えられた。

これらの2つの測線について、解析に要した時間は、並列処理を行った場合、それぞれ約1分であった。

この処理時間を従来の処理システムによる処理時間と比較するために、拡張ボードを外して(さきに述べた処理システム③になる)解析すると、約30分を要した。この野外実験においても、トランスペュータを4個用いた並列処理システムによる並列処理化によって、処理時間が1/30程度に短縮されることが確認された。

この箇所においては、断層の位置の確認が課題となっ

ており、現場において、測定後1分程度の時間内に探査結果が得られたことから、その結果に応じて、測線の追加などの臨機応変の処置が可能であった。

6 あとがき

電気探査装置における解析処理の速度を増加させるために、並列処理化を行い、従来の30倍に近い速度で処理することが可能になった。

物理探査用機器においては、一般に、解析用プロセッサとして、装置の制御用プロセッサを利用している。解析処理の速度を増加させるために、そのプロセッサを処理速度の早いものに変更する方法は、消費電力の増加や発熱などの問題があり、必ずしも適切であるとはいえない面を有している。これに対して、並列化する方法は、解析時の処理速度だけを向上させるもので、有望なシステムといえることができる。

試作したシステムは4個のプロセッサを使用したものであるが、その数を増やすことはそれほど困難ではなく、処理速度をさらに増加させることは可能である。

並列処理技術は、電気探査に限ったものではなく、多量のデータを扱うさまざまな計測に、効果的に適用することができる技術であり、今後、さらに、その利用技術を高度なものへと展開したいと考えている。

参考文献

- (1) Ohhashi, T., Tago, K., Nakade, K., Sano, K. and Katayama, K. (1989): An Automatic Data Acquisition and Analysis Technique for Seismic Refraction Method. 59th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- (2) Tago, K. and Ohhashi, T. (1989): Development of McOHM-II as Renovative Electrical Prospecting Instrument. 応用地質年報, No.11, pp.39~53.
- (3) 島 裕雅 (1990): 比抵抗2次元簡易解析法と適用例 物理探査学会第82回学術講演会論文集, pp.361~364.

付記 解析ソフトウェアの構造

並列処理化に当たって、その構成の基本となったソフトウェアは、つぎの通りである。

1) 感度補正

2次元比抵抗解析のためのソフトウェアは、2極法による測定データを用いることを前提にしている。この2極法による測定においては、一般的には、測定点を電極間の中心直下の、深度が電極間隔に相当する位置としているが、その感度は、測定点直下よりも、水平方向にやや離れた位置で高くなっている。したがって、測定によって得られた見掛け比抵抗の値をそのまま用いて、解析を行うと偽像が現われたりして、比抵抗構造に大きい影響を与えることになる。

この欠点を補うために、図-9に示すような空間フィルタを用いて、感度が、測定点直下で大きく、離れた位置では小さくなるように補正した。これによって、周辺

からの影響を少なくすることができるので、解析の精度を向上させることができる。

2) 1次元データの集合への変換

感度補正によって得られたデータは、図-10(A)に示すように、○印の位置を測定点としたときに得られたデータとみなすことができる。これらの測定点は、電極の直下および電極間の中央の直下に分布しているが、電極の直下と電極間中央の直下では、深度が異なっている。

このような測定点分布から得られたデータを、同等な1次元データとして揃えるために補間を行う。この補間したデータは、図-10(B)に示すように、測定点ごとに独立した1次元データの集合と考えることができ、これらのデータを1次元解析して、その結果を用いて2次元

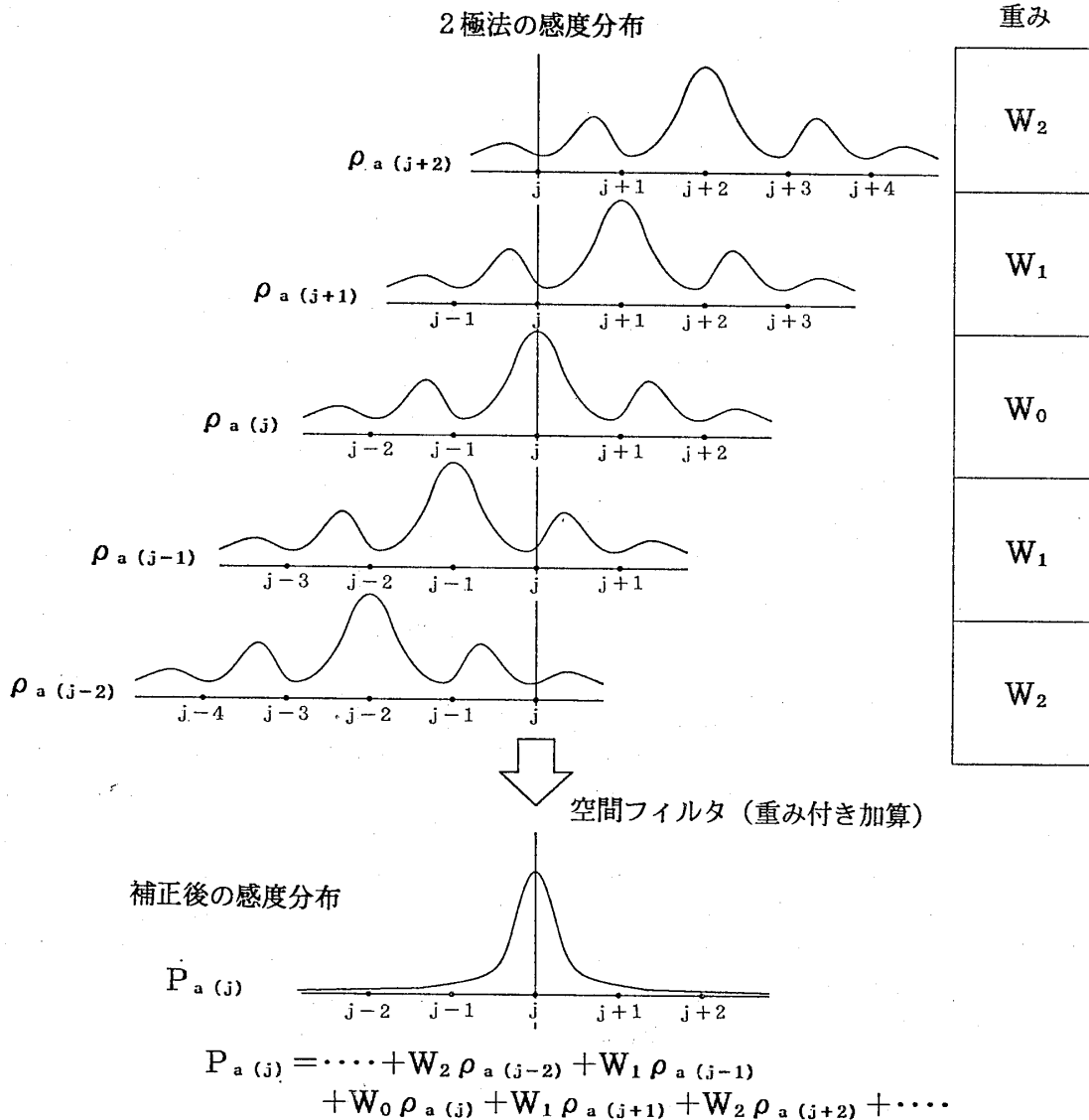


図-9 感度補正の原理

Fig.9 Schematic explanation of the compensation for sensitivity.

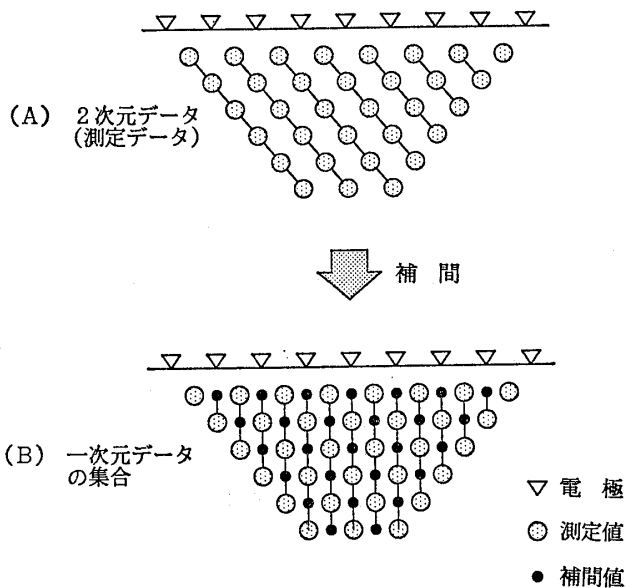


図-10 「1次元データの集合」への変換
 Fig. 10 Conversion of data from measured 2-D data to the set of 1-D data.

断面を得ることができる。

3) 比抵抗構造の初期モデル解析

感度補正を行い、1次元データの集合へと変換されたデータを用いて、比抵抗構造の初期モデルを決定する。この初期モデル解析は、つぎに実施するマルチレイヤ解析の初期値を求めるために行うもので、多数の1次元の簡単な解析である。

それぞれの1次元の解析は、最小電極間隔を各層の厚さとし、10層構造として実施する。最初は、各層の比抵抗がすべて100 Ω·mと仮定して、見掛比抵抗値を計算する。そして、その計算値と測定された見掛比抵抗値との差を求め、その値を用いて、上部2層について2×2の連立方程式を解いて、比抵抗値を修正し、より実際に近い値を求める。つぎに、これらの2層を合体して1層とみなし、3層目についても同様の解析を行う。このようにして、10層すべてについての比抵抗を計算する。

この方法の特徴は、最初に、100Ω·mの比抵抗構造を仮定しているために、演算時間を短縮することができることであり、単純な構造については、初期解析の結果を用いて2次元断面を作成し、概略の構造を把握すること

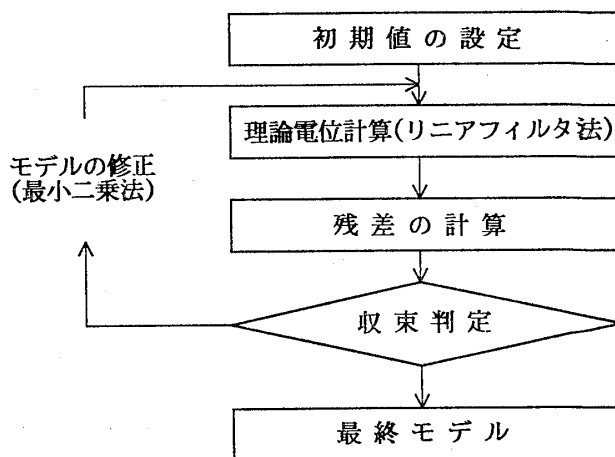


図-11 マルチレイヤ解析の流れ図
 Fig. 11 Flow of the multi-layer analysis.

ができる。しかしながら、この方法は、演算回数が少ないために、求められる結果についての精度が悪いという欠点がある。したがって、比抵抗構造をより正確に求めるためには、この解析結果を初期値として、マルチレイヤ解析を行うことが必要である。

4) マルチレイヤ解析

マルチレイヤ解析は、初期モデル解析の結果を初期値として、多数の1次元解析を精度よく行って、2次元断面を作成するものである。解析の流れは、図-11に示すとおりである。この解析は、初期モデルについて、リニアフィルタ法によって理論電位計算を行い、実測値と比較して、残差が小さくなるように、インバージョン計算を行って、逐次修正するという方法である。

1次元解析における理論電位計算については、必要とするリニアフィルタはいくつか提案されているが、ここでは、6 point / decade のリニアフィルタ (Koefoed, 1979) を使用した。

また、インバージョン計算には、修正コレスキー分解法を用いた非線形最小二乗法を採用した。

参考文献

Koefoed, Otto (1979): Geosounding Principles, I, Resistivity Sounding Measurements, Elsevier Scientific Publishing Company.

