

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4465404号
(P4465404)

(45) 発行日 平成22年5月19日 (2010.5.19)

(24) 登録日 平成22年2月26日 (2010.2.26)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 V 9/00 (2006.01) G O 1 V 9/00 J

請求項の数 7 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2008-548418 (P2008-548418) (86) (22) 出願日 平成18年12月27日 (2006.12.27) (65) 公表番号 特表2009-512880 (P2009-512880A) (43) 公表日 平成21年3月26日 (2009.3.26) (86) 国際出願番号 PCT/KR2006/005758 (87) 国際公開番号 W02008/069364 (87) 国際公開日 平成20年6月12日 (2008.6.12) 審査請求日 平成19年11月5日 (2007.11.5) (31) 優先権主張番号 10-2006-0124890 (32) 優先日 平成18年12月8日 (2006.12.8) (33) 優先権主張国 韓国 (KR)</p>	<p>(73) 特許権者 507321299 コリア インスティテュート オブ ゲオ サイエンス アンド ミネラル リソース ズ 大韓民国 テジョン 305-350, ユ ソン-グ, ガジョン-ドン, 30 (74) 代理人 100091683 弁理士 ▲吉▼川 俊雄 (72) 発明者 キム, ジュン ホ 大韓民国 テジョン 302-243, セ オ-グ, グワンジョ-ドン, テジャヨン メウル アパートメント, 103-140 4</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 物理探査資料の4次元逆算方法及びこれを用いた地下構造の4次元映像化方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

物理探査資料から地下物性分布を計算する逆算方法であって、

(a) 測定資料を空間と時間座標に定義し、時間によって連続して変化する地下構造である時空間モデルベクトル(P)を摸写するために予め選ばれた複数の基準時刻に対する複数の基準空間モデルベクトル(U)から構成される基準時空間モデルベクトル(U)を定義するステップと、

(b) 複数の基準空間モデルに対する数値モデリングのテイラー級数(Taylor series)展開を用いて任意の時刻の地下構造空間モデルに対する数値モデリングを近似し、空間領域及び時間領域で各々逆算に制限を加える逆算目的関数を定義して、前記逆算目的関数を用いて時空間座標に定義された測定資料から基準時空間モデルベクトル(U)を求めるステップと、

(c) 前記基準時空間モデルベクトル(U)から時空間モデルベクトル(P)を求めて時間によって変化する地下物性分布を算出するステップと、
 を含むことを特徴とする物理探査資料の4次元逆算方法。

【請求項2】

前記4次元逆算方法は、

同一な空間座標に対する地下物性は時間に対して鎖状的に変化するという仮定に基づいてなされることを特徴とする請求項1記載の物理探査資料の4次元逆算方法。

【請求項3】

任意の時間 (t) での空間ベクトル P (t) は、
下記の数式に定義されることを特徴とする請求項 1 記載の物理探査資料の 4 次元逆算方法

[数式]

$$P(t) = u_t + (t - \tau_t) v_t$$

(前記数式において、u は基準空間モデルベクトルであり、

$$v_t = \frac{du}{dt}$$

であり、 τ_t は予め選ばれた基準時刻である。)

【請求項 4】

前記 (b) ステップにおいて、

任意の時刻 $t \in [t_k, t_{k+1}]$ での地下構造空間モデルに対する数値モデリングは、
前記 2 つの基準時刻 (t_k, t_{k+1}) の基準空間モデルに対する数値モデリングの下記
の数式のようなテイラー 1 次級数展開を用いて近似する方法を使用することを特徴とする
請求項 1 記載の物理探査資料の 4 次元逆算方法。

[数式]

$$G(t) = \frac{t_{k+1} - t}{t_{k+1} - t_k} \{ F(u_k) + (t - t_k) J_k v_k \} + \frac{t - t_k}{t_{k+1} - t_k} \{ F(u_{k+1}) + (t - t_{k+1}) J_{k+1} v_{k+1} \}$$

($F(u_k)$ は基準空間モデル u_k に対する数値モデリングであり、 J_k は基準空間モデル
に対するモデル反応の偏微分であり、

$$v_t = \frac{du}{dt}$$

である)

【請求項 5】

前記 (b) ステップにおいて、

前記逆算目的関数は、下記の数式で表現される関数を用いることを特徴とする請求項 1 記
載の物理探査資料の 4 次元逆算方法。

[数式]

$$\Phi = \|e\|^2 + \lambda \psi + \alpha \Gamma$$

(前記の数式において、

$$e = d - G(U + \Delta U),$$

$$\psi = (\partial^a \Delta U)^T (\partial^a \Delta U),$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{n-1} \|(u_i + \Delta u_i) - (u_{i+1} + \Delta u_{i+1})\|^2 = \{M(U + \Delta U)\}^T M(U + \Delta U)$$

(Φ は空間領域での逆算制限関数、 Γ は時間領域での逆算制限関数、 λ 及び α は制限の程
度を調節するラグランジ乗数 (Lagrangian multiplier)、 d は測定資料ベクトル、 G は
与えられた地下構造に対する数値モデリング、即ち、数値シミュレーション結果、 U は複
数の基準空間モデルベクトル u で構成された基準時空間モデルベクトル、 M は対角列と 1
つの副対角列 (sub-diagonal elements) が各々 1 と - 1 で構成された正方行列である。
)

【請求項 6】

前記逆算目的関数は、

空間領域に対する制限と時間領域に対する制限を同時に逆算に導入し、時間領域に対する

10

20

30

40

50

制限では時間的に隣接する2つの基準空間モデル (u_k, u_{k+1}) の間に大きい変化が起きないという制限を使用することを特徴とする請求項1記載の物理探査資料の4次元逆算方法。

【請求項7】

地下構造の変化を4次元で映像化する方法であって、請求項1乃至請求項6のうち、いずれか1項の4次元逆算方法により得られた地下物性分布に基づいて時間によって変化する地下構造を映像化するステップを更に含むことを特徴とする地下構造の4次元映像化方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、物理探査資料の4次元逆算方法及びこれを用いた地下構造の4次元映像化方法に関し、より詳しくは、時間によって変化する地下構造に関する情報を獲得するために取得したそれぞれ異なる時間帯のモニタリング資料に対し、唯1回の逆算で時空間上(4次元)の地下物性分布を求めて、これを映像化する新たな4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法に関する。

【0002】

地球物理探査は、一点に対する情報でない、調査地域の2次元、または3次元の空間的な映像を得ることができる長所を持っており、このため、同一な地域で測定時間を異にして多数の探査を遂行する物理探査モニタリングは、時間の流れによる地下構造の変化を理解するために応用頻度が急激に増加している。適用可能な分野は、主要構造物地盤変形監視、汚染の拡散監視、地質災害の監視、地盤改良の判定、地下水の流通経路、水理伝導度、透水率、空隙率などの水理地質学的物性導出など、非常に広範囲な領域に跨る。

20

【背景技術】

【0003】

通常的なモニタリング資料の解釈方法は、互いに異なる時間帯に獲得した探査資料を独立的に逆算して各時間帯の映像を得た後、それらと比較することによって、時間に対する地盤の変化を解釈し観察する接近方法を取っている。しかしながら、このような接近は、多くの場合、地盤物性の変化程度がそれほど大きくないので、逆算雑音(inversion artifacts)により誤った解釈を誘発する可能性が相当に高い。

30

【0004】

図1は、時間によって変化する地下構造を映像化するための従来の逆算概念図である。

【0005】

従来の方法は、各モニタリング資料を別々に逆算して地下映像を具現するため、異なる時間帯の変化した地下構造を参照することが不可能であるので、地下映像の歪みが増幅する可能性が非常に高いし、特に地下変化の映像で表れる歪みが一層酷くなる。また、各モニタリング資料と地下空間を空間的な概念だけで把握するため、モニタリング資料測定の際に発生する地下構造の変化に対する考慮は不可能である。

【0006】

このような問題点を避けるために、初期資料の逆算結果を先験的地下モデル(a priori model)または基準モデルとして採択してモニタリング資料を逆算する方法が発表されたところがある(Locke, 1999; Labrecque and Yang, 2002)。しかしながら、モニタリング資料を独立的に逆算するという点では従来の方法と異なるところがないのみならず、モニタリング時間の間の映像の全体は、初期モデルに非常に高く依存することが自明である。

40

【0007】

一方、地下構造を映像化するための逆算において、通常的に使われる最も基本的な仮定は、資料を測定する間には地下構造が変化しないというものである。しかしながら、透水性が非常に高い土壌層で塩水注入実験などを行う場合には、電気伝導度が非常に高い流体が速い速度で移動するために、このように時間に対して静的な地下モデルに対する仮定は成立し難い。このような場合、資料取得の間に地下構造が変化するという点を逆算に含まなけ

50

れば、逆算結果で得られる地下映像が酷く歪むことは自明である。それにも拘わらず、いままで研究または開発された大部分の技術は、資料取得の間に地下構造が変化しないという仮定に即したものであった。

【 0 0 0 8 】

一方、Day-Lewisなど(2002)は、資料獲得の間に時間に対して変化する地下構造で獲得した試錐孔レーダートモグラフィーマonitoring探査資料の効率良い逆算法を開発したことがある。しかしながら、これらの接近方法は波動の到達走時を利用する走時トモグラフィの場合のみに応用が可能であり、一般的な物理探査資料の逆算への拡張は事実上不可能である。

【 発明の開示 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 9 】

以上のような従来技術の問題点を解決するために、本発明は、1)多数のモニタリング資料を同時に逆算して過去の技術より遥かに信頼度の高い地下映像の獲得が可能であり、2)地下構造が非常に速く変化する場合にも多数の反復測定資料だけでなく、唯1回の測定資料を用いても時間によって連続して変化する地下映像を計算できる新たな4次元逆算方法を提供することをその技術的課題とする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 0 】

上記の技術的課題を達成するために、本発明の4次元逆算方法は、地下探査資料から地下物性分布を計算する逆算方法であって、(a)測定資料を空間と時間座標に定義し、時間によって連続して変化する地下構造である時空間モデルベクトル(P)を摸写するために予め選ばれた複数の基準時刻に対する複数の基準空間モデルベクトル(U)から構成される基準時空間モデルベクトル(U)を定義するステップと、(b)複数の基準空間モデルに対する数値モデリングのテイラー級数(Taylor series)展開を用いて任意の時刻の地下構造空間モデルに対する数値モデリングを近似し、空間領域及び時間領域で各々逆算に制限を加える逆算目的関数を定義して、上記逆算目的関数を用いて時空間座標に定義された測定資料から基準時空間モデルベクトル(U)を求めるステップと、(c)上記基準時空間モデルベクトル(U)から時空間モデルベクトル(P)を求めて時間によって変化する地下物性分布を算出するステップと、を含む。

【 0 0 1 1 】

このような本発明の4次元逆算方法により、測定期間の間に発生する地下構造の変化を無視することができない場合にも信頼できる地下構造映像を構成できることになる。

【 0 0 1 2 】

従来の逆算方法において、測定資料は空間座標だけで定義されるが、本発明の4次元逆算方法では、時空間、即ち4次元座標に定義されることが特徴的である。

【 0 0 1 3 】

本発明の4次元逆算方法は、(a)ステップにおいて、同一な空間座標の地下物性の時間に対する変化が鎖状の変化に近似できるという仮定に基づいてなされる。これによって、任意の時間(t)での空間モデルベクトルP(t)は、下記の数式のように、予め選ばれた基準時刻での基準空間モデルベクトルuに定義され、これで、時間に対して連続して変化する時空間地下構造モデルを数個の基準空間モデルで摸写することができる。

【 0 0 1 4 】

[数式]

$$P(t) = u_i + (t - \tau_i) v_i$$

【 0 0 1 5 】

ここで、

10

20

30

40

$$v_k = \frac{du}{dt}$$

であり、 t_k は予め選ばれた基準時刻である。

【0016】

また、前記 (b) ステップにおいて、任意の時刻 $t \in [t_k, t_{k+1}]$ での地下構造空間モデルに対する数値モデリング $G(t)$ は2つの基準時刻 (t_k, t_{k+1}) に対する基準空間モデルに対する数値モデリング結果を用いた下記の数式のようなテイラー1次級数展開を用いて近似する方法を使用することを特徴とする。

【0017】

[数式]

$$G(t) = \frac{t_{k+1} - t}{t_{k+1} - t_k} \{F(u_k) + (t - t_k) J_k v_k\} + \frac{t - t_k}{t_{k+1} - t_k} \{F(u_{k+1}) + (t - t_{k+1}) J_{k+1} v_{k+1}\}$$

【0018】

ここで、 $F(u_k)$ は基準空間モデル u_k に対する数値モデリングであり、 J_k は基準空間モデルに対するモデル反応の偏微分である。

【0019】

上記 (a)、(b) ステップにより、連続して変化する時空間領域地下モデルを複数の基準空間モデルに近似し、多くの計算量を必要とする数多い空間モデルに対する数値モデリングの問題もまた基準空間モデルに基づいたモデリングを通じて近似する方法により解決した。

【0020】

逆算は反復的逆算過程を通じて最小化しようとする目的関数を用いて定義され、本発明の4次元逆算法もまた上記 (b) ステップの目的関数を用いて定義される。本発明の4次元逆算の目的関数は、測定資料と時空間モデルに対してシミュレーションした資料の間の誤差項、空間領域に対する制限項、時間領域に対する制限項の3つの項で構成される。空間領域に対する制限としては、地下構造が空間的にやんわりと変化するという平滑化制限を使用する。本発明の4次元逆算法の主要特徴中の1つが逆算に時間領域制限を導入したものであり、新しく導入した時間領域のために時間的に隣接する2つの基準空間モデルの間には大きい変化が起きないという制限を導入することが望ましい。このような4次元逆算の目的関数は、下記の関数に定義される。

【0021】

[数式]

$$\Phi = \|e'\|^2 + \lambda \psi + \alpha \Gamma$$

【0022】

前記の数式において、

$$e' = d - G(U + \Delta U),$$

$$\psi = (\partial^s \Delta U)^T (\partial^s \Delta U),$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{n-1} \|(u_i + \Delta u_i) - (u_{i+1} + \Delta u_{i+1})\|^2 = \{M(U + \Delta U)\}^T M(U + \Delta U)$$

【0023】

ここで、 Γ は空間領域での逆算制限関数、 ψ は時間領域での逆算制限関数、 λ 及び α は制限の程度を調節するラグランジ乗数 (Lagrangian multiplier)、 d は測定資料ベクトル、 G は与えられた地下構造に対する数値モデリング、即ち、数値シミュレーション結果、 U は複数の基準空間モデルベクトル u で構成された基準時空間モデルベクトル、 M は対角

10

20

30

40

50

列と1つの副対角列 (sub-diagonal elements) が各々1と-1で構成された正方行列である。

【0024】

また、上記の目的を達成するための本発明の4次元映像化方法は、前述した4次元逆算方法により得られた地下物性分布に基づいて、時間によって変化する地下構造を映像化するステップを更に含んでなされる。

【発明の効果】

【0025】

以上、説明した本発明により、多数のモニタリング資料を同時に逆算して、時間によって変化する地下構造を正確に計算することができ、資料測定過程の間、地下構造が速く変化する場合にも多数の反復測定資料でない唯1回の測定資料を用いて信頼すべき映像を提供できる新たな4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法を提供することができる。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0026】

以下、添付した図面を参考しつつ本発明の一実施形態による物理探査資料の4次元逆算方法及びこれを用いた地下構造の4次元映像化方法を詳細に説明する。

【0027】

本発明は、ここで説明される実施形態に限定されず、他の形態で具体化されることができる。むしろ、ここで紹介される実施形態は、開示された内容が徹底し、かつ完全になるように、そして当業者に本発明の思想が十分伝えられるようにするために提供されるものである。

20

【0028】

図2は、本発明の一実施形態による4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法に関する流れ図である。

【0029】

本発明は、物理探査資料から地下物性分布を計算する逆算方法及びこれを用いた映像化方法であって、(a)測定資料を空間と時間座標に定義し、時空間モデルベクトル(P)及び予め選ばれた複数の基準時刻に対する基準空間モデルベクトル(U)を定義して時空間モデルを定義するステップ(S1)と、(b)複数の基準空間モデルに対する数値モデリングのテイラー級数(Taylor series)展開を用いて、任意の時刻の地下構造空間モデルに対する数値モデリングを近似し、空間領域及び時間領域で全て制限を加える逆算目的関数を定義して、逆算目的関数を用いて時空間座標に定義された測定資料から基準時空間モデルベクトル(U)を求めるステップ(S2)と、(c)上記基準時空間モデルベクトル(U)から時空間モデルベクトル(P)を求めて、時空間領域地下物性分布を算出するステップ(S3)と、(d)地下物性分布に基づいて、時間によって変化する地下構造を映像化するステップ(S4)とを含む。

30

【0030】

本発明は多数のモニタリング資料を同時に逆算すると共に、地下構造が非常に速く変化して測定の間にも地下が変化する場合にも、多数の反復測定資料のみならず、唯1回の測定資料を用いても信頼すべき映像を提供できる新たな4次元逆算方法を提供する。

40

【0031】

このために、本発明の地下構造は、時間によって連続して変化するモデルと仮定し、従って、地下空間は空間モデルでない時空間モデルに定義される。測定資料もまた空間座標でない時空間座標に定義される。

【0032】

仮に、一定の時間間隔で地下時空間モデルを多数の空間モデルでサンプリングするならば、地下構造は数多い空間モデルで構成されるはずであるので、その全体を全て逆算することは事実上不可能である。このような問題に対する現実的な接近として予め選ばれた数個の基準時刻に対する地下空間モデル(以下、基準空間モデル)を設定し、同一な空間座標の物性は時間の流れによって鎖状的に変化するという仮定を採択した。

50

【 0 0 3 3 】

また、数多い空間モデルに対する数値モデリングもまた非常に多くの計算量を必要とするので、任意の時刻の地下構造に対する数値モデリングを基準空間モデルに基づいた数値モデリングのテイラー 1 次級数 (first order Taylor series) 展開を用いて近似する方法を採択した。

【 0 0 3 4 】

このような仮定と近似を通じて、時間によって連続して変化する地下の時空間モデルを求める問題は数個の基準モデルを求める問題に帰着する。

【 0 0 3 5 】

以下では、本発明の 4 次元逆算方法に関する地下構造の変数化及び数値モデリングについて詳細に説明する。

10

【 0 0 3 6 】

時間によって連続して変化する地下構造を一定の時間間隔でサンプリングすれば、地下構造は次のように時空間ベクトル (P) で定義されるはずである。

【 0 0 3 7 】

$$P = \{P_1, \dots, P_2, \dots, P_n\}$$

【 0 0 3 8 】

ここで、 p_i は時間 i に対する空間モデルベクトルである。時空間ベクトル P を構成する空間モデルベクトル p_i の数が非常に多いので、これを減らすために、次のように m ($m \ll n$) 個の予め選ばれた時刻 k に対する基準空間モデルベクトル u_k で構成される新たな基準時空間モデルを定義する。

20

【 0 0 3 9 】

$$U = \{u_1, \dots, u_t, \dots, u_m\}$$

【 0 0 4 0 】

同一な空間座標に対する地下物性が時間に対して鎖状的に変化すると仮定すれば、2 つの時刻 k と $k - 1$ との間に発生する物性変化速度ベクトルを数式 1 のように定義することができる。

【 0 0 4 1 】

【 数 1 】

$$v_k = \frac{du}{dt} = \frac{u_{k+1} - u_k}{\tau_{k+1} - \tau_k}$$

30

【 0 0 4 2 】

数式 1 を用いて任意の時間 t に対する地下空間ベクトルを数式 2 のように定義することができる。

【 0 0 4 3 】

【 数 2 】

$$P(t) = u_k + (t - \tau_k)v_k$$

40

【 0 0 4 4 】

このような仮定を通じて、空間領域地下空間モデルの数を減らしたとしても、時間の流れによる地下構造の反応を計算するための数値モデリングは元の多数の地下空間モデルに基づいて計算しなければならない。しかしながら、これは非常に長い計算時間を必要とする。

【 0 0 4 5 】

この問題を解決するために、任意の時刻 k D t D $k + 1$ の地下構造に対する数値モデリングを数式 3 のように 2 つの基準時刻の数値モデリング結果である $F(u_k)$, $F(u_{k+1})$ のテイラー 1 次級数展開に近似して、これを逆算に用いる。

50

【 0 0 4 6 】

【 数 3 】

$$G(t) = \frac{\tau_{k+1} - t}{\tau_{k+1} - \tau_k} \{F(u_k) + (t - \tau_k) J_k v_k\} + \frac{t - \tau_k}{\tau_{k+1} - \tau_k} \{F(u_{k+1}) + (t - \tau_{k+1}) J_{k+1} v_k\}$$

【 0 0 4 7 】

ここで、 J_k は基準空間モデル u_k に対するモデル反応の偏微分、即ちジャコビアン (Jacobian) 行列である。

【 0 0 4 8 】

前述したような仮定ト近似を採択すれば、時空間全体に亘る 4 次元地下構造を探す逆算は、数個の基準空間モデルベクトル (U) を求める問題に単純化される。 10

【 0 0 4 9 】

以下、本発明の 4 次元逆算方法に関する最小二乗逆算について詳細に説明する。

【 0 0 5 0 】

測定資料ベクトル (d) と基準時空間モデルによるシミュレーション資料、即ち理論資料ベクトルとの差である誤差ベクトル (e) は数式 4 に定義される。また、今後最適化して計算しようとする基準時空間モデルによる理論資料ベクトルと測定資料ベクトルとの差である予測誤差ベクトル (e') は数式 5 のように定義される。逆算問題は予測誤差ベクトルを最小化する基準時空間モデルの増分ベクトル U を求める問題に帰着する。

【 0 0 5 1 】

20

【 数 4 】

$$e = d - G(U)$$

【 0 0 5 2 】

【 数 5 】

$$e' = d - G(U + \Delta U)$$

【 0 0 5 3 】

地球物理学の逆算問題は、解の non-uniqueness と ill-posedness で特徴付けられることができ、このため、計算過程が発散する等、非常に不安定である。この問題を解決するために逆算に制限を加えることが通常的である。本発明では、時空間領域の地下構造を逆算するアルゴリズムを開発するために通常的に採択する逆算制限、即ち空間領域の制限だけでなく、時間領域の制限を更に導入する。時間領域の制限が可能であることは、本発明で地下構造モデルを時空間領域に拡張して定義したためである。本発明の 4 次元逆算は、誤差の二乗を最小化する最小二乗逆算に基づいており、時空間領域で制限を加えるので、数式 6 で表現される逆算目的関数 を最小化する問題に定義される。 30

【 0 0 5 4 】

【 数 6 】

$$\Phi = \|e'\|^2 + \lambda \psi + \alpha \Gamma$$

40

【 0 0 5 5 】

ここで、 λ は空間領域での逆算制限関数、 ψ は時間領域での逆算制限関数、 α 及び Γ は制限の程度を調節するラグランジ乗数 (Lagrangian multiplier) である。

【 0 0 5 6 】

空間領域制限には平滑化制限を導入し、時間領域の制限により時間的に隣接する 2 つの基準空間モデル、 u_k と u_{k+1} との間には大きい変化は発生しないという仮定を導入する。このような制限は、次のような数式 7 及び数式 8 の関数で表現される。

【 0 0 5 7 】

【数7】

$$\psi = (\partial^a \Delta U)^T (\partial^a \Delta U),$$

【0058】

【数8】

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{n-1} \|(u_t + \Delta u_t) - (u_{t+1} + \Delta u_{t+1})\|^2 = \{M(U + \Delta U)\}^T M(U + \Delta U)$$

【0059】

ここで、Mは対角列と1つの副対角列(sub-diagonal elements)が各々1と-1で構成された正方行列である。

10

【0060】

数式6の逆算目的関数を基準時空間増分ベクトル(U)に対して微分すれば、数式9のような基準時空間増分ベクトル(U)に対する解が得られる。

【0061】

【数9】

$$\Delta U = (A^T W_d A + C^T A C + \alpha M^T M)^{-1} (A^T W_d e - \alpha M^T M U)$$

【0062】

ここで、 W_d は資料重み付け行列であり、Aは基準空間モデルベクトルで構成された基準時空間モデルUに対する反応の偏微分行列であり、Cは空間領域での平滑化制限演算子である。空間領域制限の場合、Yiなど(2003)が提案したACB(Active Constraint Balancing)法を導入したので、空間領域制限を制御するためのラグランジ乗数は対角行列Aに定義されている。

20

【0063】

数式9を理論資料と測定資料の間の誤差が与えられた限界誤差に達するまで繰り返して計算することで、希望する地下構造時空間モデルを求めることができる。

【0064】

図1に、従来の方法と図3に本発明の4次元逆算概念を図示した。

【0065】

30

従来の方法は、各モニタリング資料を別々に逆算して地下映像を具現するために、他の時間帯の変化した地下構造を参照することが不可能である。このため、地下映像の歪みが増幅する可能性が非常に高いし、特に地下変化の映像で表れる歪みが一層酷くなる。また、各モニタリング資料と地下空間を空間的な概念だけで把握するので、モニタリング資料測定の間には発生できる地下構造の変化に対する考慮は不可能である。

【0066】

これに反して、本発明の4次元逆算は、測定資料と地下構造を共に時空間概念で把握するため、1種類の時空間領域資料、1つの時空間モデルに定義されて1回の逆算により時空間地下モデルを求めることができる。このため、互いに異なる時間帯の変化する地下構造を逆算過程で参照することができる。のみならず、唯1セットの資料を用いても時間に対して変化する地下構造の計算が可能になる。

40

【0067】

以上のように、図面と明細書を通じて最適の実施形態が開示された。ここで、特定の用語が使われたが、これは単に本発明を説明するために使われたものであり、意味の限定や特許請求範囲に記載された本発明の範囲を制限するために使われたのではない。従って、本技術分野の通常の知識を有する者であれば、これから多様な変形及び均等な他の実施形態が可能であることを理解するはずである。従って、本発明の本当の技術的保護範囲は特許請求範囲の技術的思想により定まるべきである。

【0068】

[実施形態]

50

以下、本発明の4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法の効用性を検証するための逆算実験に関して説明する。

【0069】

逆算実験は、試錐空間電気比抵抗トモグラフィー数値モデリング資料を用いて遂行した。電極配列としては、単極 - 双極子配列を採択し、時空間モデルは連続して変化する30個の空間モデル ($n = 30$) に設定した。30個のモデルに対して全て数値モデリングを遂行し、これら30セットの資料から1セットの資料を構成した。このように酷く地下構造が変化する時は、多数の反復測定モニタリング資料がある場合より唯1セットの資料のみ存在する場合ははるかに困難であることは自明である。この実験例では、唯1セット資料のみ得られた場合を仮定して実施したものである。

10

【0070】

1セットの資料は、1) 試錐空間探査、2) 同一試錐孔探査、3) 試錐孔 - 指標間探査資料から構成される。

【0071】

図4は、逆算実験のために設定した地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で示したものである。時刻 t は総測定時間に対して正規化した時刻を意味する。

【0072】

本発明では、全ての資料が時空間座標に定義され、数多い空間モデルを唯1セットの測定資料で求めるものであるので、資料測定順序が非常に重要な意味を有する。

【0073】

図5は、最初の逆算実験結果によって地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で示したものである。

20

【0074】

図5に図示された逆算実験は、無作為的に資料測定が遂行された場合であり、従って各測定方法による資料には30個の空間モデルに対する反応を全て含んでいる結果となる。逆算に設定した基準空間モデルの数は2つであり、それぞれの基準時刻は各々 $= 0.17$ と $= 0.83$ である。

【0075】

基準空間モデルが唯2つであり、唯1セットの資料のみ存在するにもかかわらず、逆算結果は時間の流れによって地下構造が変化するという事実と共に電気伝導度の高い領域が移動する形態をよく見せている。

30

【0076】

図6は、2番目の逆算実験結果によって地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で表したものである。

【0077】

ランダムに測定がなされた図5の場合とは異なり、1) 試錐空間探査、2) 同一試錐孔探査、3) 試錐孔 - 指標間探査の順に探査を遂行した場合を想定し、資料を構成して逆算実験を遂行した。

【0078】

この場合には試錐空間探査が初期になされたので、試錐空間の探査資料には初期時間帯のモデル (図4の (a) 及び (b)) に対する反応が主をなす。これに反して、試錐孔 - 指標間探査は後期時間帯になされたので、後期時間帯のモデル (図4の (e) 及び (f)) に対する反応が主をなすようになる。

40

【0079】

従って、各探査法によって地下構造が相異なるので、図5の場合に比べて相当に困難であることが容易に分かる。図6は、逆算結果の例であって、基準空間モデルの数とその基準時刻は図5と同一である。図6では、地下構造が変化する様相が図5に比べてはそれほど明確ではないが、資料獲得期間に地下構造が変化したという点と共に、電気伝導度の高い領域が移動する形態をよく見せている。

【0080】

50

基準空間モデルの数が変わることによる影響を探るために、基準空間モデルの数を3に設定した後、図6の計算に使われた実験資料をまた逆算した。しかしながら、その結果は図6に表れたものと殆ど同一であった。従って、時間が経ることによって、連続して変化する地下構造変化様相を映像化するためには、2、3個位の時刻の基準空間モデルでも充分であることが分かる。

【0081】

このような場合、従来の逆算方法により地下映像を抽出する場合には、1セットの資料のみ存在するので、唯1つの停止地下映像のみ獲得可能である。従って、地下構造の変化を抽出することが基本的に不可能であるだけでなく、映像の歪みもまた甚大である。

【0082】

以上、本発明は多数のモニタリング資料を同時に逆算すると共に、測定期間の間に発生する地下構造の変化を無視することができない場合にも信頼すべき地下構造映像を構成することができる物理探査資料の新たな4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法を提供する。

【0083】

試錐空間電気比抵抗トモグラフィー探査数値実験を通じて、唯1回の測定資料だけでも本発明の逆算方法を用いることで、連続して変化する地下構造映像の獲得が可能であることを立証した。

【0084】

本発明の実施形態では、電気比抵抗探査の場合について議論したが、本発明の4次元逆算は、数値モデリング、資料測定などの一般化した概念だけで構成されているので、電子探査、重力探査、レーダー、弾性波トモグラフィーなどの他の物理探査資料の逆算においても本発明で提案した逆算方法の適用が可能である。

【0085】

以上、詳細に説明した本発明は、物理探査資料の新たな4次元逆算方法及びこれを用いた地下構造の4次元映像化方法に用いられることができる。詳細には、本発明は、多数のモニタリング資料を同時に逆算して時間に対して変化する地下構造を正確に計算することができ、資料測定の間にも地下構造が速く変化する場合にも多数の反復測定資料でない唯1回の測定資料を用いても信頼すべき映像を提供できる新たな4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法に用いられることができる。

【図面の簡単な説明】

【0086】

【図1】時間によって変化する地下構造を映像化するための従来の逆算概念図である。

【図2】本発明の一実施形態による4次元逆算方法及びこれを用いた映像化方法に関する流れ図である。

【図3】本発明の一実施形態による4次元逆算の概念図である。

【図4】本発明の一実施形態による4次元逆算実験のために設定した地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で示した図である。

【図5】本発明の一実施形態による4次元逆算を用いた実験結果によって地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で示した図である。

【図6】本発明の一実施形態による4次元逆算を用いた実験結果によって地下空間の変化様相を各時刻でのスナップ映像で示した図である。

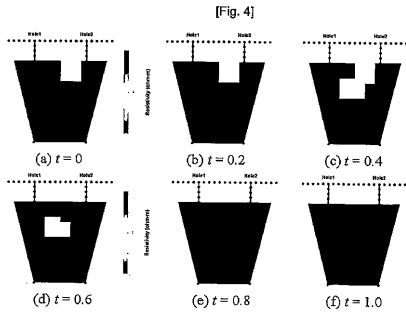
10

20

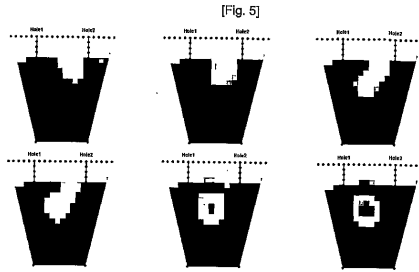
30

40

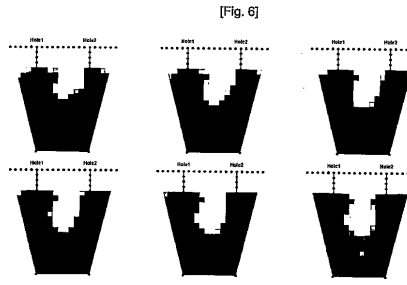
【 図 4 】



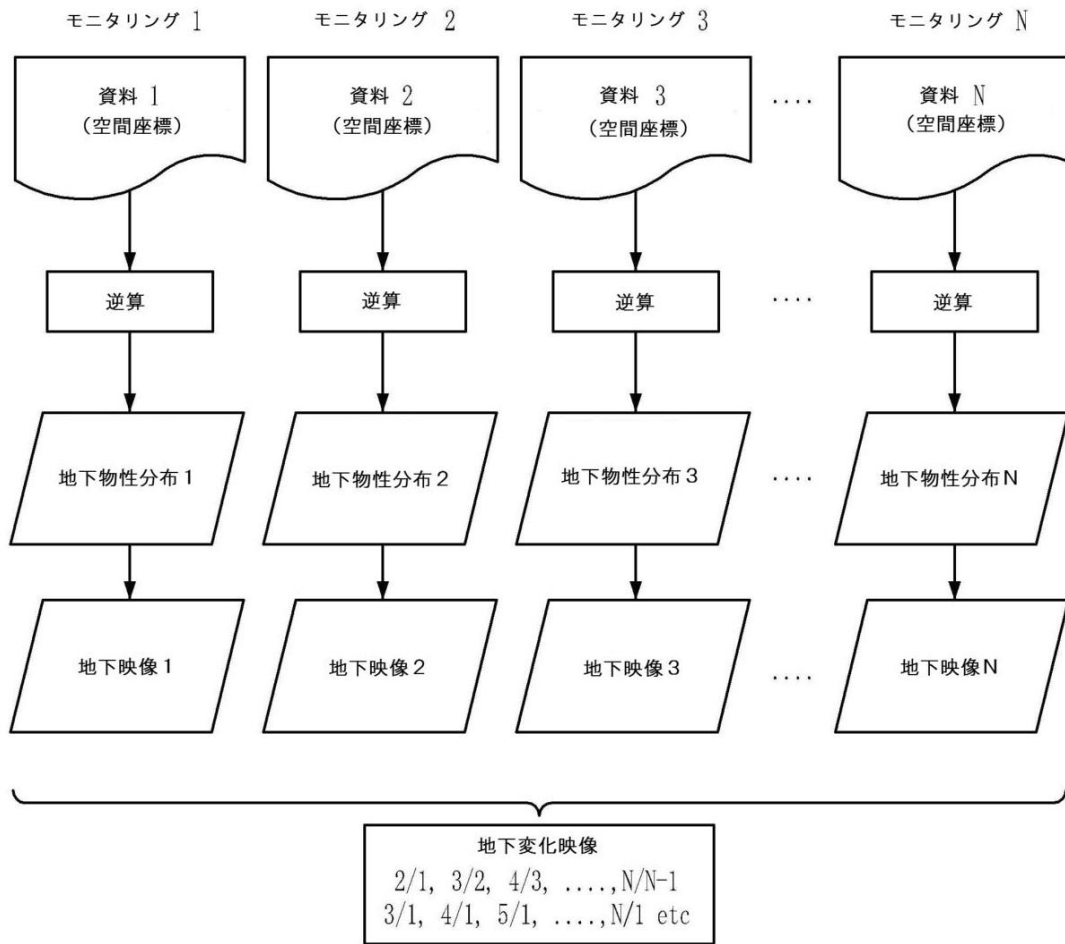
【 図 5 】



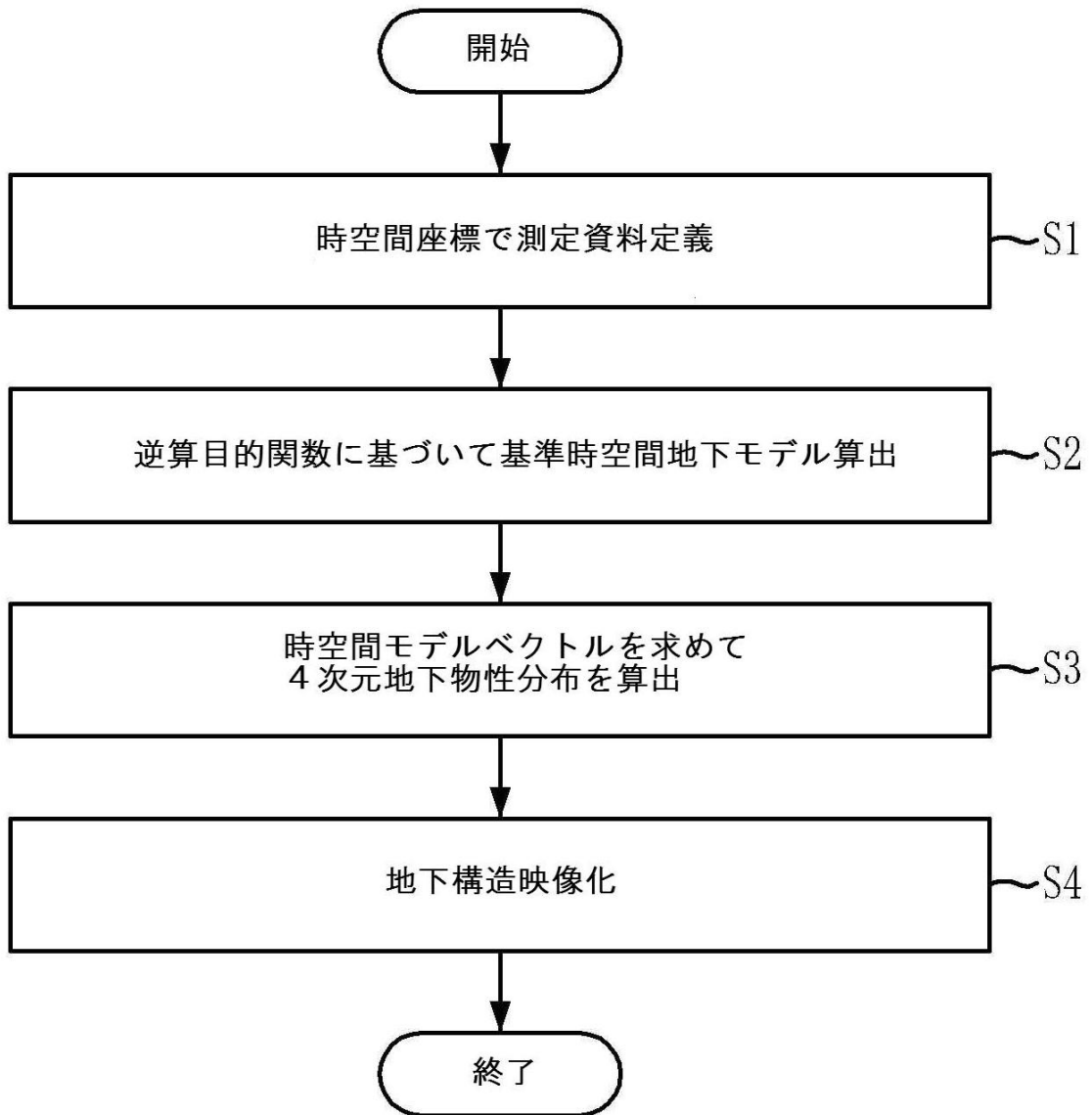
【 図 6 】



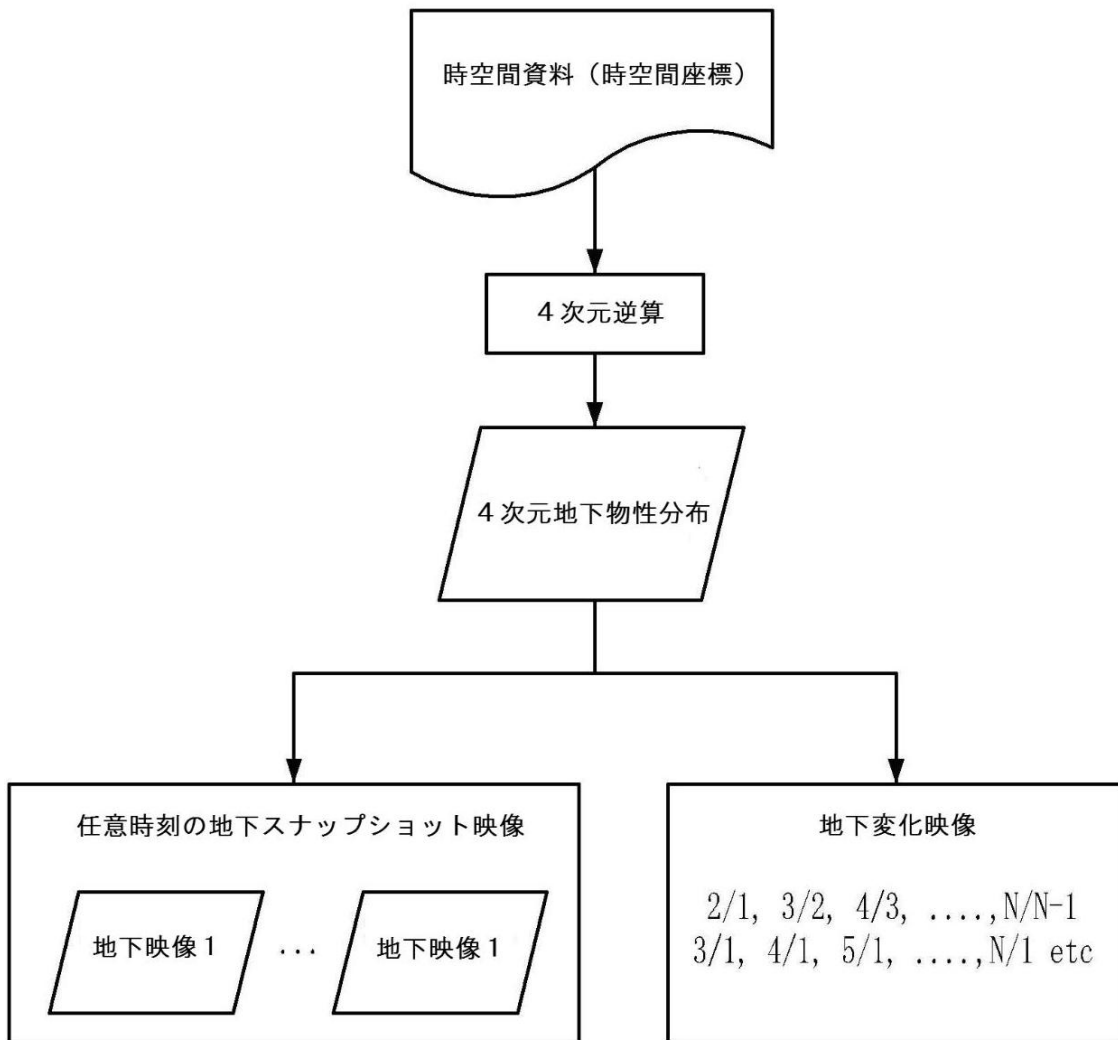
【図 1】



【図2】



【図3】



フロントページの続き

(72)発明者 イ, ミョン ジョン
大韓民国 テジョン 302-792, セオ-グ, ウォルピョン 3-ドン, フワンシル タウン
アパートメント, 108-1308

審査官 高見重雄

(56)参考文献 特開2002-071823(JP, A)
特開2006-053062(JP, A)
特開2000-258551(JP, A)
特開2003-288603(JP, A)
特開平06-318293(JP, A)
特開昭61-000773(JP, A)
米国特許出願公開第2005/0075789(US, A1)
米国特許出願公開第2006/0095239(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01V 9/00