



地質構造形成史を考慮した3次元地質構造の簡便なモデル化 —新潟県中越地方南部の地震空白域を例として—

長郁夫¹⁾、西開地一志²⁾、柳沢幸夫³⁾、長谷川功⁴⁾、桑原保人⁵⁾

1) 正会員 (独)産業技術総合研究所, 研究員 理博

e-mail: ikuo-chou@aist.go.jp

2) ジーエスアイ株式会社

e-mail: nishikaichi@gsinsl.gsinet.co.jp

3) (独)産業技術総合研究所, 主任研究員 理博

e-mail: y.yanagisawa@aist.go.jp

4) (独)産業技術総合研究所, 客員研究員 理博

e-mail: i-hasegawa@aist.go.jp

5) (独)産業技術総合研究所, 研究グループ長 理博

e-mail: y-kuwahara@aist.go.jp

要 約

近年、著者らの一部は3次元地質構造の簡便なモデル化のために地質構造形成史の知見からモデルを拘束する手法を開発した。本研究では同手法の位置付けを明らかにするとともに、同手法のこれまでの適用例よりも地質学的に複雑な地域(新潟県中越地方南部地域)のモデル化を試みて手法の有効性を確認する。我々の位置付けでは、同手法は、既存の地質図を3次元的かつ定量的に再構成するための簡便な手段である。モデルの単純化や地質学的知見の曖昧さを考慮すると、探査データの少ない地域における巨視的なモデル化に有効と期待する。新潟県中越地方南部地域のモデル化については、地質構造形成史で重要と考えられる情報と地質図データ及び比較的少量の探査データを併せて用いることにより大局的な3次元地質構造をモデル化することができた。このモデルは、地震空白域であり将来の地震発生が危惧される同地域の基礎的な地盤モデルとして役立てられる。

キーワード: 3次元、地質構造、地質構造形成史、強震動

1. はじめに

近年、強震動予測のために地下の3次元物性値構造がモデル化されてきている¹⁻⁵⁾。3次元物性値構造のモデル化の際は、その骨格としてまず3次元地質構造をモデル化するアプローチが良く用いられている。強震動波形の計算に直接必要なのは物性値構造であるから、理想的には、検層を含む多種類の物理探査をまんべんなく実施して地下の3次元物性値構造を直接モデル化すれば良い(図1、矢印a)。しかしコストや地形、人間の生活活動等の観点からそれは一般に困難なので、現実的には、既存の地質断面や物理探査結果等からまず3次元的地質構造をモデル化し、それを介して物性値構造モデ

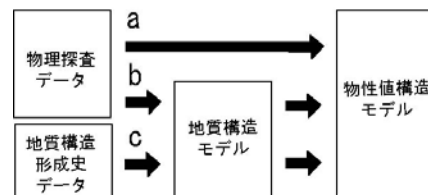


図1 物性値構造モデルの構築

ルに帰す方法が用いられている(同図、矢印 b)。

物性値構造モデルの基礎として 3 次元地質構造モデルが欲しいが、それを構築するためには基礎となる探査データが少ないというような場合、地質構造形成史の知見を有効に活用することにより探査データの不足を補えないだろうか(同図、矢印 c)。実は、地質学者が描く地表の地質図や地質断面図の作成は、程度の差こそあれ、そのような知見に頼っている。

上記の目的に適した 3 次元地質構造モデル化手法が、本研究の著者のうち長谷川・西開地⁶⁾、長谷川・他⁷⁾により提案された。またそれを実現するソフト(Geomap3D)が(株)ジーエスアイにより開発された⁸⁾。長谷川・西開地⁶⁾は同手法を 2004 年新潟県中越地震本震域および茨城県つくば地域の 3 次元地質構造モデルの作成に適用したが、現段階ではまだ適用例が少なく、手法の位置付けもなされていない。

本研究の第 1 の目的は、長谷川・西開地⁶⁾の手法の位置付けを明確にすること及びこれまでの適用例よりも地質学的に複雑な地域をモデル化して手法の有効性を確認することである。探査データが少なくても適用可能で、データの増強に応じて更新や結合が容易な 3 次元モデルの構築方法は、実用性が重視される強震動予測の分野では特に必用であろう。同手法の位置付けや可能性を検討することは、全国的な物性値モデルの構築とそれに引き続く強震動予測のために有用と考える。

本研究の第 2 の目的は、2004 年新潟県中越地震本震の南部域をモデル化することである。この地域は新潟-神戸歪集中帯に属し⁹⁾、1847 年善光寺地震(M7.4)と 2004 年新潟県中越地震(M6.8)に挟まれた地震空白域の 1 つと認識されている。地震発生予測の観点から、同地域の構造をモデル化することは緊急の課題と言える。すなわち同地域の 3 次元地質構造モデルは、将来的な大地震の発生に備えるための^{10, 11)}、またそれに基づいて強震動を予測するための基礎データとなると考えられる。また、この地域は北部フォッサマグナ¹²⁾に含まれ、日本列島の形成に関わる重要な地質構造線(柏崎-千葉構造線¹²⁾)と 2004 年新潟県中越地震本震の発生に関与した可能性が高い地質構造線(新発田-小出構造線¹³⁾)とが会合場所にあたる(3.1 節)。地質学的には比較的複雑な構造を有すると考えられるから、第 1 の目的にも相応しいと考えられる。

以下ではまず 2 章で地質構造モデル化手法の位置付けと内容を述べる。3 章でモデル化地域の地質構造形成史を、4 章でデータを、5.1 節でモデル化内容を説明する。5.2 節でモデルを観察して評価する。6 章でモデル化内容を再検討し手法の将来的な可能性に触れる。

2. 手法

2.1 コンセプト

現在の地質構造は、堆積直後の初生的な地質構造が褶曲や断層等の造構運動を受け、削剥された結果である(図 2)。地質図は、それが地表に現われた姿である。我々はこのような考え方に基づいて 3 次元地質構造のモデル化に次のデータを用いる。すなわち、

- ・初生的構造と現在の構造をつなぐ造構運動と侵食(地質構造形成史)に関する定性的な知見。
- ・現在の地下構造の探査データ。
- ・現在の地質図。

モデル化の流れは、まず地質構造形成史に関わる知見(モデル)を介し、探査データを初生的な地質構造のモデル化に利用することに始まる(図 2 左端)。一旦初生的構造がモデル化されれば、それはやはり地質構造形成史モデルを介して現在のモデルに帰結するので、地質図データとの比較が可能になる。こうして、

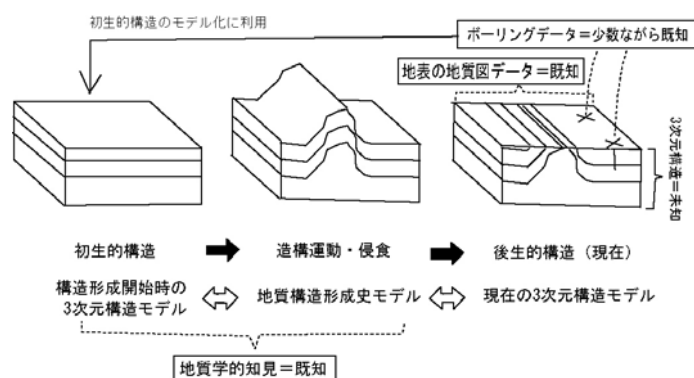


図 2 地質構造形成史のモデル化を介して現在の 3 次元地質構造モデルを得る概念。

地質図、探査、地質学的知見のデータをモデル全体の拘束に帰することにより、単独では利用し難い少数の探査データの情報を合理的に活用することが狙いである。

2.2 方法論としての位置付け

1 章でも触れた通り、地質学者が地質図や地質断面図を描く場合には探査データだけではなく暗に或いは明示的に地質学的知見を基礎とする。従って、既存の地質図と少数の探査データに本手法を適用することは(2.1 節)、地質学者が既存の反射データや基準ボーリングデータに地質構造形成史の解釈を併せて描いてきた地表地質図と地質断面を、3 次元的な補間法を利用して再構成する試みと位置付けられる。本手法では地質学的知見の曖昧な部分はモデルの単純化で対処する(2.3 節)。したがって巨視的なモデル化に有効と考えられる。探査データでチューニングする前の雛形の作成に効果的かもしれない。速度構造や減衰構造のトモグラフィ・インバージョンにおける初期モデル或いは先験分布を与えるための骨格としての利用も考えられる。

更に一般的な可能性として、このような手法は、従来、資源工学、防災、地球科学等、諸々の研究に関わる基礎データとして作成されてきた全国の地質図を 3 次元数値データに変換するための簡便なアプローチに成り得ると考えられる。数値データは結合や修正が容易であり、強震動評価のための地盤モデルに留まらず、様々な情報のプラットフォームとして汎用性が期待される。

2.3 地質構造形成史のモデル化

長谷川・西開地⁶⁾は地質構造を形成する営力として堆積、侵食、貫入、変形を考えた。これらの要素は本来相互に影響を及ぼし合いながら地質学的な時間の進展とともに漸次地形を変化させる。しかし彼らのモデルには、営力の作用する順序以外の時間のファクターは含まれない。例えば堆積であれば、地質学的時間のある時点(時点 1)からある時点(時点 2)の間の堆積の総量(層厚の変化)のみを考えることにする。「ある時点」とは必ずしも絶対的な時間ではなく、地質学的なあるイベントの前後というように漠然としたもので構わない。他の営力についても同様である。また、複数の営力が同時に作用することは想定しない。単一の営力の作用で時点1から時点2の間にどれだけ地形が変化したかに着目する。この変化によりできた地形あるいは変化分そのものは、地質形成面と呼ばれる 3 次元空間内の曲面で表現する(表1)。

表1 地質形成面の属性

面	データ	地形(地表面の標高)の変化	内容
堆積面	標高	$a_{new}(x, y) = \begin{cases} f(x, y) (f > a_{old}) \\ a_{old}(x, y) (f \leq a_{old}) \end{cases}$	堆積層の上面を表現する。想定面の標高が下位の面の標高よりも高い場合にのみ有効。
侵食面	標高	$a_{new}(x, y) = \begin{cases} f(x, y) (f < a_{old}) \\ a_{old}(x, y) (f \geq a_{old}) \end{cases}$	それよりも標高の高い地形を削り取る。想定面の標高が下位の面の標高よりも低い場合にのみ有効。
貫入面	標高	$a_{new}(x, y) = \begin{cases} f(x, y) ((x, y) \in D) \\ a_{old}(x, y) ((x, y) \notin D) \end{cases}$	それよりも下位の地形を押し退けるように閉曲面 D を形成する。曲面内部を貫入岩と見ると。
変形面	鉛直変位	$a_{new}(x, y) = a_{old}(x, y) + f(x, y)$	それよりも下位の地層を鉛直方向に指定した量だけ移動させる。褶曲や地盤の沈下、隆起を表現する。
基底面	—	—	モデルの最下部を表す。

※1 (x, y) は緯度、経度を表す。 $a_{old}(x, y)$, $a_{new}(x, y)$ は地質形成面を与える前後の地表面の標高を表す。

※2 長谷川・西開地⁶⁾は上の表の他にも堆積(厚)、侵食(厚)、海水面、自由面、亀裂面、挟み層等、種々の形成面を提案しているが、ここでは本研究で用いるものだけ列挙した。

例えば時点1から時点2の間に地層が堆積した場合、堆積面はその上面標高を表す面として定義する。土地が隆起・沈降した場合、それは変形面で表現する。変形面は、地下全体の鉛直変位量の2次元分布として定義する。このように、地質形成面を与えると、地形(地表面の標高)が、或いは地下構造全体が変化する。こうして地質形成面を時代順に与えたものが地質構造形成史のモデルとなる。モデル化地域に想定されるすべての地質形成面を作用させれば、現在の3次元地質構造モデルとなる。

地質形成面は、不規則な位置(緯度、経度) (x_k, y_k) ($k=1, \dots, N$) で与えられるデータ(標高や層厚、変形量等)を d_k 、誤差を e_k として、次式を満たす関数 f でモデル化する。

$$d_k = f(x_k, y_k) + e_k \quad (1)$$

関数 f の与え方は付録1で、本研究による具体的なデータの与え方は5.1節で述べる。

3. モデル化地域の地質構造形成史

3.1 モデル化地域の設定とテクトニクス

2004年新潟県中越地震本震の南部域、具体的には、東西、南北にそれぞれ約64km、33kmの矩形領域(東経 $138^\circ 15' - 138^\circ 58'$ 、北緯 $36^\circ 54' - 37^\circ 12'$)をモデル化地域とする(図3)。モデル化地域の属する北部フォッサマグナから東北日本までの日本海沿岸には新第三系(新第三紀に堆積した地層)による6km以上の厚さに達する堆積盆地が分布する。そこでは概ね南-北から南西-北東軸の褶曲構造が発達する。

このような地質構造の形成は、中新世前期の日本海拡大¹⁴⁻¹⁶⁾に端を発する¹⁷⁻¹⁹⁾。中新世中期(16-10Ma)以降、モデル化地域周辺部では日本海拡大に引き続いて大規模な沈降(リフティング)が起こり、広大な堆積盆地が形成された^{例えば、20)}。堆積盆形成開始時は、糸魚川-静岡構造線(図3)よりも東側はほとんど海没しており、東北日本弧は多島海としての概観を有していた^{例えば、21)}。一方、糸魚川-静岡構造線の西側に位置する西南日本側は山地であった。その結果、堆積盆地南西部では海底扇状地が発達して礫や砂等の粗粒が堆積し、盆地中央部では沈降部を埋めるように泥やシルトの細粒の堆積がなされていた。初期的には盆地全体が沈降したが、中新世後期以降は沈降域が局所化し、北北東-南南西を長軸とする海盆が形成された。

リフティングは伸張場で起こったと考えられるが、鮮新世後期以降(3.4Ma~)は圧縮場に転じ始め(インバージョン)^{22, 23)}、それまでに形成された正断層や横ずれ断層は逆断層として再活動を開始した^{19, 24-26)}。更新世(1.6Ma~)になると、モデル化地域南東部から南西部にかけての後背山地(図4を参照。以下、地名等には同図を参照のことが隆起して堆積物の供給が増加した²⁷⁾。また、魚沼層(3.2節)の堆積直後には急激な褶曲活動が始まった^{例えば、20)}。モデル化地域の堆積環境は、沈降速度と堆積速度のバランスにより、遠洋性の環境から次第に近海、内湾、汽水、淡水性まで変化した。

現在の水系と地形の概略は、褶曲構造の形成とともに背斜(水平面を基準として波が上に閉じていく山形

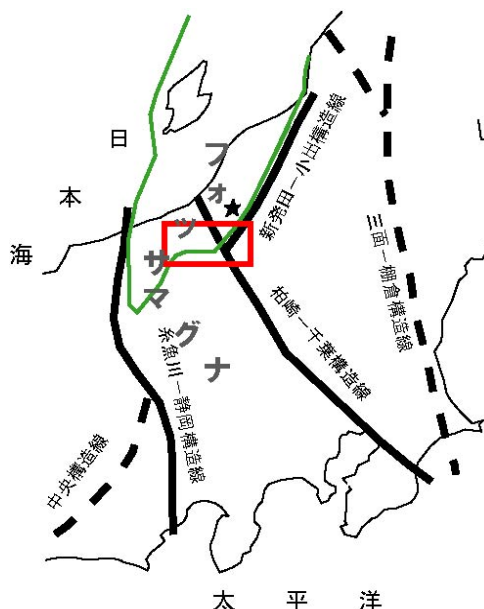


図3 モデル化地域(赤矩形)。星印は2004年新潟県中越地震の震央。構造線を黒線と黒破線、新第三系が厚く堆積する領域を緑線で示す。

の部分) 軸より始まる陸化によって決まったと考えられる²⁸⁾。例えば、北北東-南南西に並走する山地・丘陵は背斜構造に対応し、信濃川、渋海川、鯖石川などの主要な河川は向斜(水平面を基準として波が下に閉じていく谷形の部分) 構造の中を流れる。

魚沼丘陵の形成(傾動・隆起)は、そのような造構運動の結果の1つである。それまで一様な堆積平野だった魚沼地方では、魚沼丘陵東部の新発田-小出構造線¹³⁾に沿う隆起により、越後山脈との間に挟まれる六日町盆地が取り残される形となった。西側の十日町付近では越後山脈からの直接の供給を絶たれ、代わって南西から火山岩を含む堆積物が供給された²⁹⁾。こうして向斜構造に規定されて十日町盆地が形成された。魚沼丘陵は東縁の六日町断層、西縁の十日町断層、丘陵北部の諏訪峠撓曲³⁰⁾(田麦山背斜東翼の急傾斜部)によって現在も隆起しており、中でも特に六日町断層の寄与が大きい³¹⁾。

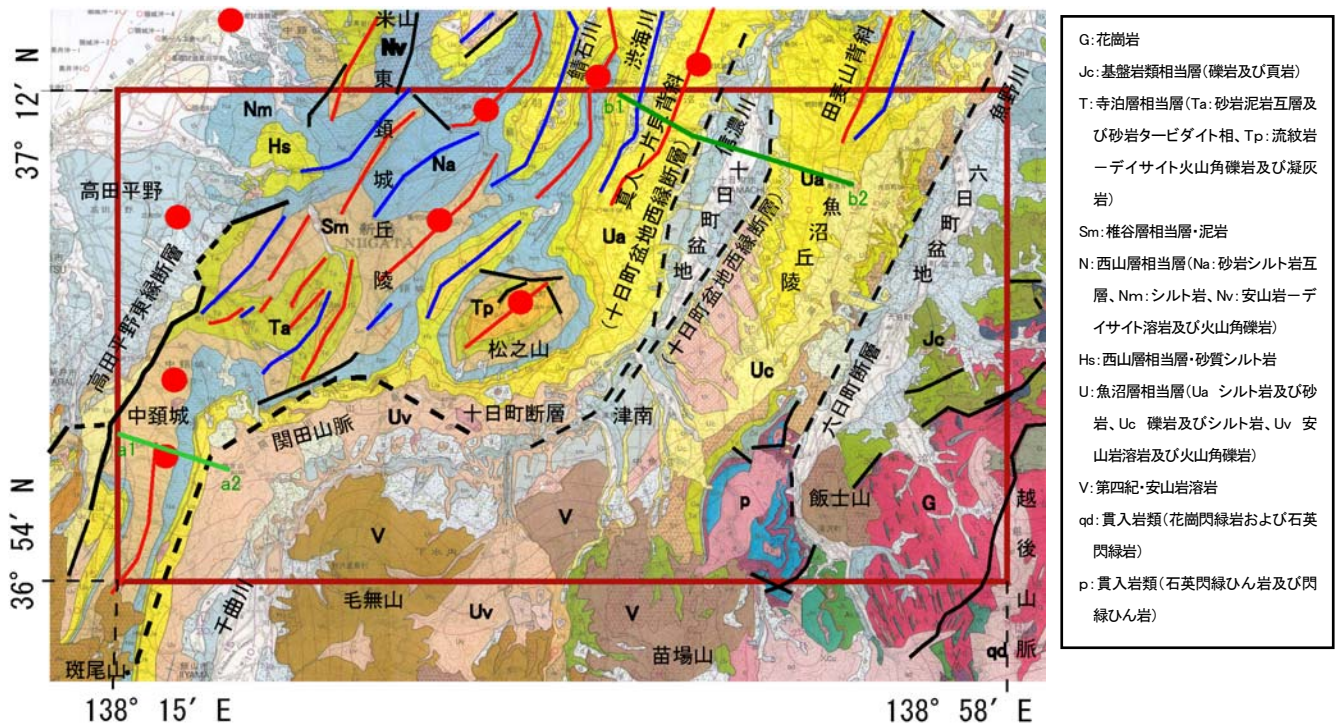


図4 モデル化地域の地質図。20万分の1地質図「高田」に加筆修正。赤矩形はモデル化地域を示す。赤線(青線)は背斜(向斜)軸、赤丸は本研究で用いる基準ボーリング地点を示す。黒線は断層、黒点線は産業技術総合研究所³²⁾を参考として書き加えた活断層を示す。緑線 a1-a2、b1-b2 はそれぞれ図13の断面図(a)、(b)に対応する。

3.2 層序の設定

新潟県下の新第三系から下部更新統に対応する標準的な地質年代は、三川期、津川期、七谷期、寺泊期、椎谷期、西山期、灰爪期に分けられ、場合によっては魚沼期が含まれる²⁰⁾。

三川期の地層(以下、単に三川層と呼ぶ。他の地質層の場合も同様)は、中新世前期の非海成の火山岩と火砕岩を主体とする、堆積盆地形成以前の堆積物から成る。そこで本研究では三川層とそれよりも下位の地層を基盤岩類とみなす。また本研究では津川層と七谷層をまとめ、改めて七谷層とする。近年の調査によりこれらの地層は同時異相(同時代に堆積した異なる相の地層)であることが判明したからである。本研究における七谷層の位置付けは次の通りである。すなわち、日本海拡大期の急激な沈降に伴う海成堆積物による地層であり、岩相は、火山活動が激しかったところでは変質凝灰岩(いわゆるグリーンタフ)、非活発な場所では

砂岩、泥岩となる。七谷期は前半に火山活動が激しく、従来は前者が津川層として捉えられてきた。

西山層以上の地層は互いに同時異相の関係にある³³⁾。よって本研究では従来灰爪層、魚沼層と別々に呼ばれてきた層をまとめて魚沼層と呼ぶことにする。

以上より、本研究で用いる層序は、下位から基盤岩類、七谷層、寺泊層、椎谷層、西山層、魚沼層となる。地域ごとの地層区分との対比表を付録2に示しておく。

4. データ

モデル化に用いるデータを表2にまとめる。同表の通り、既存の地質図とそれを作成するために利用された幾つかのボーリングデータをモデル化の基礎とし、その他比較的入手しやすいデータとして、重力基盤、標高データを用いる。

表2 データと利用目的

項目	抽出情報	利用目的 (本文該当箇所)と説明	
重力基盤 ³⁴⁾	モデル化地域南部(後背山地部)の重力基盤標高	堆積盆地(形成時点)のモデル化(5.1節 a)	後背山地部の基盤岩類の変形面のモデル化に用いる。
5万分の1地質図 ³⁵⁻⁴²⁾ (柿崎、岡野町、小千谷、高田東部、松之山、十日町、飯田町、苗場山、越後湯沢)	ボーリングデータ9本分		盆地部における基盤岩類の変形面のモデル化及び各地質層の堆積面のモデル化に用いる。
	地質断面図		ボーリングデータ削剥分を補正する際の参考として用いる。
		褶曲のモデル化(5.1節 b)	褶曲のモデル化の際、変形面に変位量を与えるための参考として用いる。
20万分の1地質図「高田」(地質調査所発行、1994年版)(図4)	背斜軸、向斜軸の位置		褶曲変動を考慮する際、変位を与える位置として用いる。
	地表の地質分布		最適な褶曲の変位量を与えるための指標として用いる。
5万分の1地質図 ³⁹⁾ (高田東部)	高田平野沖積部基底の標高	褶曲形成後の陸化削剥のモデル化(5.1節 c)	陸化削剥と堆積により形成された現在の地形面を得るために用いる。
標高データ(国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高))	モデル化地域の標高データ	褶曲形成後の陸化削剥と堆積のモデル化(5.1節 c)	

5. モデル化

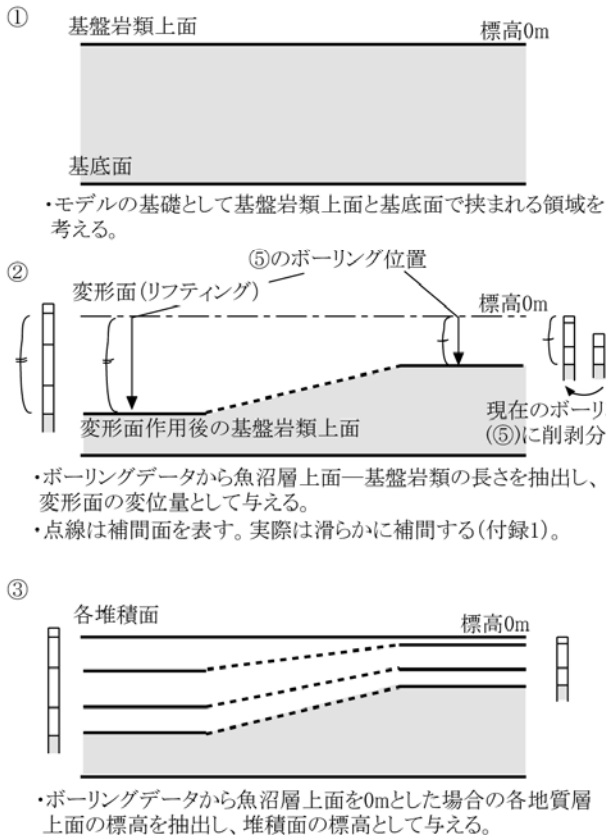
5.1 地質構造形成史モデル

モデル化地域の地質構造形成過程(3.1節)を単純化してまとめれば、中新世中期以降のリフティングに伴う堆積盆地の形成、鮮新世から更新世のインバージョンに伴う褶曲活動、及び陸化に伴う侵食と堆積の3つのイベントに分けられそうである。最初のイベントである堆積盆地形成を、褶曲による大規模な変形を受ける前の初生的構造(2.1節)の形成と捉える。

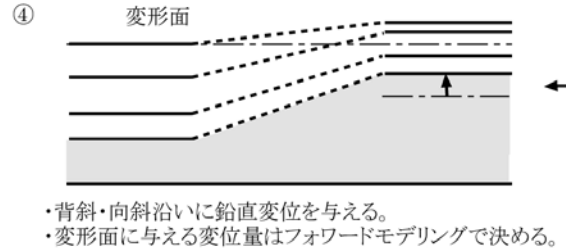
各イベントを適当地質形成面(2.1節)の組み合わせで表現する。詳細は以下に説明するが、図5にモデ

ル化の流れを、表3に各イベントと地質形成面の対応をまとめておくので適宜参照されたい。

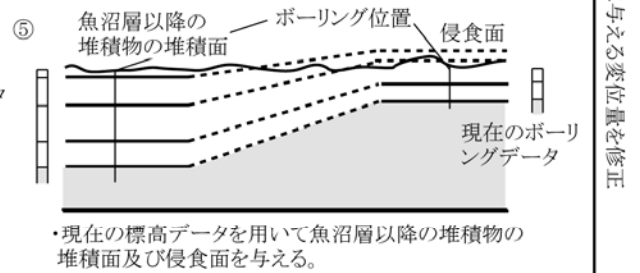
a. イベント1: 堆積盆地の形成



b. イベント2: 褶曲の形成



c. イベント3: 侵食と堆積



モデル修正の検討

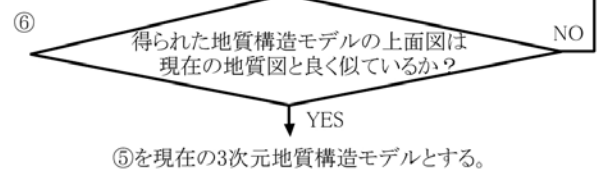


図5 モデル化の流れ。

表3 モデル化した地質学的イベントと適用した地質形成面

地質イベントと年代	地質形成面
イベント3: 侵食と堆積 (更新世～現在)	堆積面(魚沼層以降の堆積物)
	侵食面(高田平野)
イベント2: 褶曲の形成 (鮮新世後期～更新世)	変形面(褶曲)
イベント1: 堆積盆地の形成 (中新世中期～鮮新世後期)	堆積面(魚沼層)
	堆積面(西山層)
	堆積面(椎谷層)
	貫入面(貫入岩)
	堆積面(寺泊層)
	堆積面(七谷層)
	変形面(リフティング)
	堆積面(基盤岩類)
基底面	

※下から上の順に時代が新しくなる。地質形成面は下から上の順に作用させる。

a. イベント1:堆積盆地の形成

堆積盆地形成直後の状態を次の手順でモデル化した。まず便宜的に深さ 25km (標高 -25km) にモデルの基底面として基底面を与え、標高 0m に基盤岩類(三川層以下)の上面を水平な堆積面として設置した。基底面と基盤岩類の堆積面で挟まれる直方体を想像すれば良い。次に、この直方体の上面すなわち基盤岩類の堆積面に変形面を作用させて後背山地部と堆積盆地の形状を与えた。具体的には、後背山地部(モデル化地域東端部~南東部~南部)を除く盆地部ではボーリングデータ(4章)を用いて七谷層下面から魚沼層上面までの厚さ分変形面に下方向の変位を与えた。後背山地部はボーリングデータがないので、重力基盤データが基盤岩類の標高となるように変形面に変位を与えた。最後に、魚沼層上面の標高を基準(0m)とした時の各堆積層(3.2節)の標高(負値)をボーリング点ごとに計算し、地層ごとに堆積面をモデル化して時代順に与えた(図 5①-③、図 6上、表 3)。

ボーリングデータとして、上記用途に用いるために、次のような補正を施したものを用了。すなわち、堆積盆地形成当時は存在したが後に削剥され失われたと考えられる層についてはその削剥分を適当に補った。まず地質図に添付される地質断面図を参照して、削剥されたと考えられる層がボーリング周辺に分布するか確認した。分布する場合、その上位・下位に別の層が存在して、該当層の層厚を押さえることが可能な場合には、断面図からそれを読み取りボーリングデータに外挿した。上記のケースに当てはまらない時は、近隣のボーリングデータを参考にして層厚を補充した。

最表層の魚沼層については上限を抑えることができない。ここではボーリングデータの層厚をそのまま用いるか近隣のボーリングデータを参考にして補充するに留めた。本研究の魚沼層の層厚にはこの処理による曖昧さ(過小評価)が伴うので注意されたい。

以上の手順で作成された堆積面の例として、図 7 に椎谷層の堆積面を示す。堆積面はまばらなボーリング点で与えられる地層面標高を滑らかにつなぐ面となっていることが見てとれる。なおボーリングデータのまったく存在しないモデル化地域南東部には適当なダミーデータを入れて堆積面の不自然な振動を防いでいる。いずれにしても、モデル化地域南部から東部にかけては堆積面の標高が基盤岩類の標高よりも低くなるので、表 1 の通り、堆積面は無効となる。

モデル化地域南東部には火成岩の貫入が見られる(図 4 右下のp印、図 6 各パネル右方の緑部)。この貫入岩は寺泊期における火山活動に関わるマグマ溜りであり、全体としては瘤のような形状を示す構造の一部

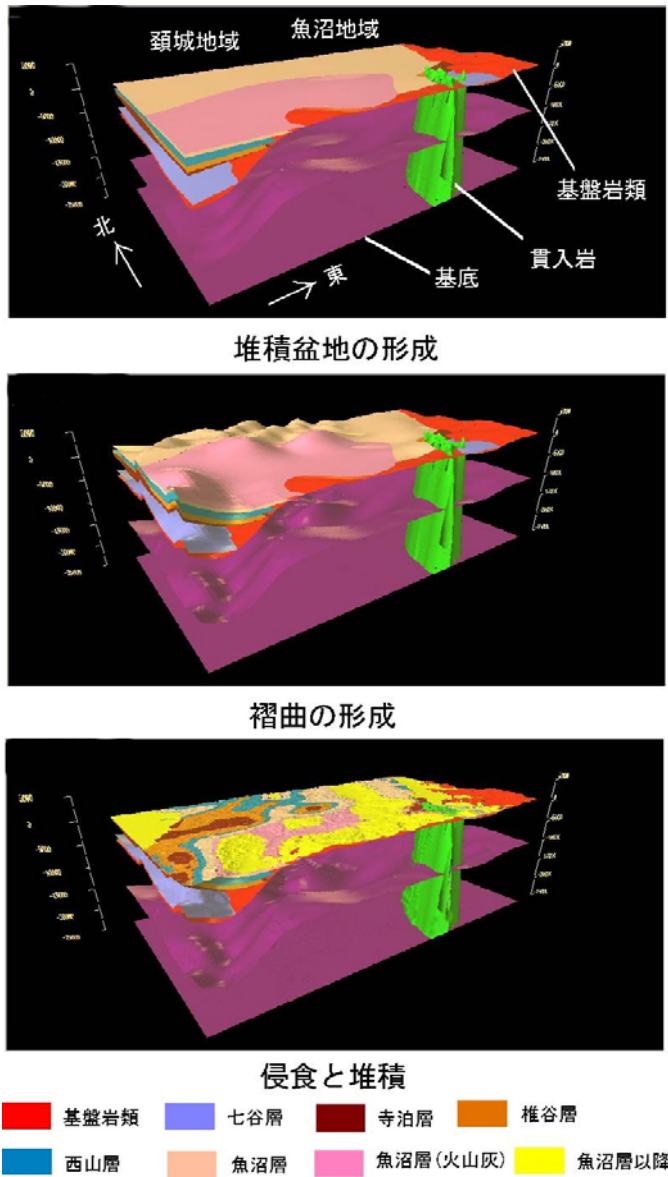


図 6 地質構造形成史モデル。

或いは大部分が隆起、削剥されて現在の姿になったと考えられる。しかしその地下構造及び形成過程の詳細は明らかでない。そこでここでは地質図と標高のデータから現在の貫入岩上面の座標、標高を読み取って紡錘状の貫入面を生成し、寺泊層と椎谷層の堆積の間に貫入というイベントを挿入した(表 3)。

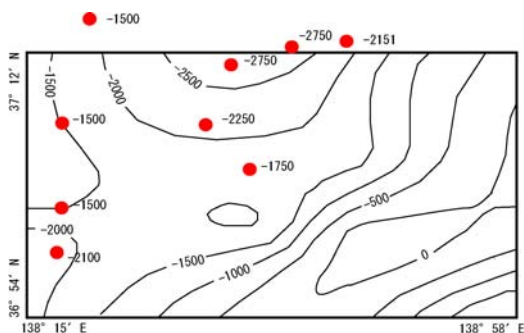


図 7 堆積盆地形成時(図 6 上に対応)の椎谷層の堆積面標高[m]。500m 間隔の等高線で表す。矩形で囲まれた領域がモデル領域となる。赤丸はボーリング位置。赤丸に付した数字は与えた椎谷層の堆積面標高データ[m]。

b. イベント 2・褶曲の形成

褶曲による造構運動は、次の方針でモデル化した。すなわち、地質図(図 4)から背斜軸を読み取りそれに沿って魚沼層以下を隆起させた(図 5④)。具体的には、変形面に鉛直上方の変位を与え、その一方で、向斜軸に沿って鉛直変位を 0 または小さい値 (> 0) に抑えた。隆起の変位量は、本節 a から c のプロセスにより得られる現在の 3 次元的地質構造モデルの地表の地質分布が 20 万分の 1 地質図と一致するように決定した(フォワードモデリング)(図 5⑥)。変位量の推定の際は、5 万分の 1 地質図に掲載されている地質断面の地層の傾斜を参考にした(図 8)。地質断面図のない部分については基本的には同様な断面が褶曲軸に沿って連続すると想定した。

図 6 中では、「a. 堆積盆地の形成」で作成した堆積盆地構造モデルにこうして得られた変形面を作用させた結果である。背斜軸と向斜軸の密度が大きい部分では上記の相対変位の与え方の方針を完全に踏襲できない部分もあったが、全般的には上記方針にのっとり変形面をモデル化した。

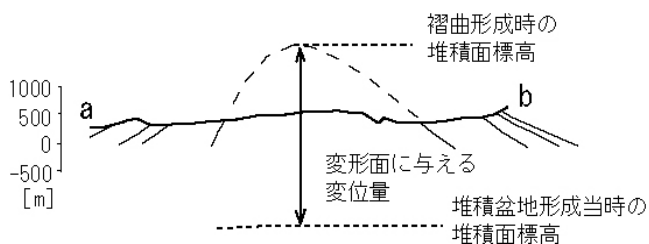


図 8 地質断面図から想定される変位量(矢印)。実線は地質断面図に記載されている解釈断面、破線は地層の傾きから想定される褶曲の状態。

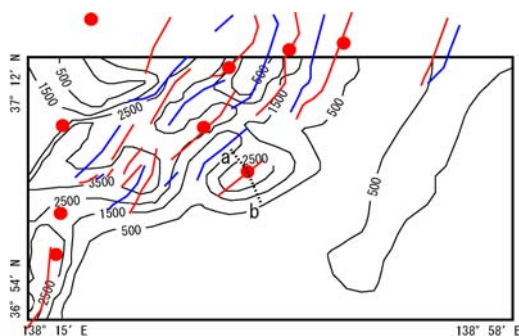


図 9 褶曲のモデル化(図 6 中に対応)で変形面に与えた変位量[m]。参考のためボーリング位置(赤丸)及び背斜軸(赤線)、向斜軸(青線)の分布も同時にプロットする。中央の点線 ab は図 8 で示す地質断面に対応する。

図 9 にこの変形面の変位量を示す。同図の通り、モデル化地域西側(東頸城、中頸城地域)では変位量が大きく最大 3500m を上回る。それと比して、東部では褶曲による変位はあまり目立たないことが分かる。

図 9 の等高線の分布は、図 7 で表される堆積面標高と比して非常に複雑である。モデル化地域西部で

は、隣り合うボーリング点の間にいくつもの山谷ができています。「a. イベント 1: 堆積盆地の形成」の場合のようにボーリング点間の滑らかな補間ではこのような複雑な特徴はモデル化できない。ここでは褶曲軸分布と地表地質分布データを併せフォワードモデリングすることでボーリング点が少ない状況を補ったことになる。

c. イベント 3: 侵食と堆積

5 万分の 1 地質図「高田東部」を参考として、高田平野を一律に標高-200m まで侵食させた。具体的には、高田平野部のみ侵食面に標高-200m を与えた。また、現在の地形標高よりも標高の高い地点は侵食させて現在の標高に修整した。逆に現在の地形標高よりも標高の低い地点では「魚沼層以降の堆積物」を堆積させて現在の標高に修整した(図 5⑤、図 6 下)。具体的には侵食面と堆積面にそれぞれ数値地図標高データを与えた。

5.2 現在の 3 次元地質構造モデル

図10は、5.1 節のプロセスで得られた現在の 3 次元地質構造モデルの上面図と 20 万分の 1 地質図との比較である。同図より、地質図データが比較的良く再現されていることが分かる。西部の高田平野と東部の越後山脈及びそれに挟まれる丘陵地域の地質分布のパターンが比較的良く再現されている。褶曲のモデル化により北北東-南南西を軸とする構造(十日町盆地、魚沼丘陵、六日町盆地等)に沿う地質分布が良く再現されている。また褶曲後の侵食作用のモデル化により、モデル化地域中央部(松之山)の寺泊層の目玉のような地表露出部やその周辺部の地質分布パターンが良く再現されている。

図11 は、モデルの東西断面である。3 次元地質構造の全般的な特徴として、地下では第三系の地層としてひとつながりになっており、特に寺泊層が全体に広く分布することが分かる。また地下の地質構造が南部に向うにつれて単純化することが分かる。同図に示されるボーリング点の間隔と地質構造のスケールを比較すると、地質構造にはボーリング間隔よりも短波長の成分が含まれることが分かる。特に浅層部では、途中でとぎれたり、ボーリング点とボーリング点の間にだけ存在するような、断片的な構造も見られる。このような構造をボーリングデータの補間だけで再現することは不可能である。地質構造の短波長成分は褶曲による変動(図 9)をモデル化することにより、また断片的な構造は侵食と堆積をモデル化することにより再現することができた。例えば断面 A4 では松之山で上位層が剝離されて寺泊層が地表に露出する様子が描かれ、また断面 A1 では毛無山から西方に向かうにつれ剝離により上位の地層から順に地表に露出する様子が描かれた。こうして地質構造形成史のモデル化を介することにより比較的複雑な地質構造を容易に再現できた。

ここには図示していないが、褶曲前の堆積盆地(図6上)の断面を見ると、椎谷層は寺泊層と比べて東西方向の層厚変化が大きい。これは椎谷期に堆積盆地の分化が進行したという既存の研究成果^(例えば、20)と整合的である。またやはり褶曲前の堆積盆地の断面によれば、西山層の層厚は北方向に系統的に厚くなる。モデル化地域では西山期に浅海化傾向が見られたと考えられているので、これに伴って堆積中心が北方に移動したと考えられる。これも既存の研究と調和的である。

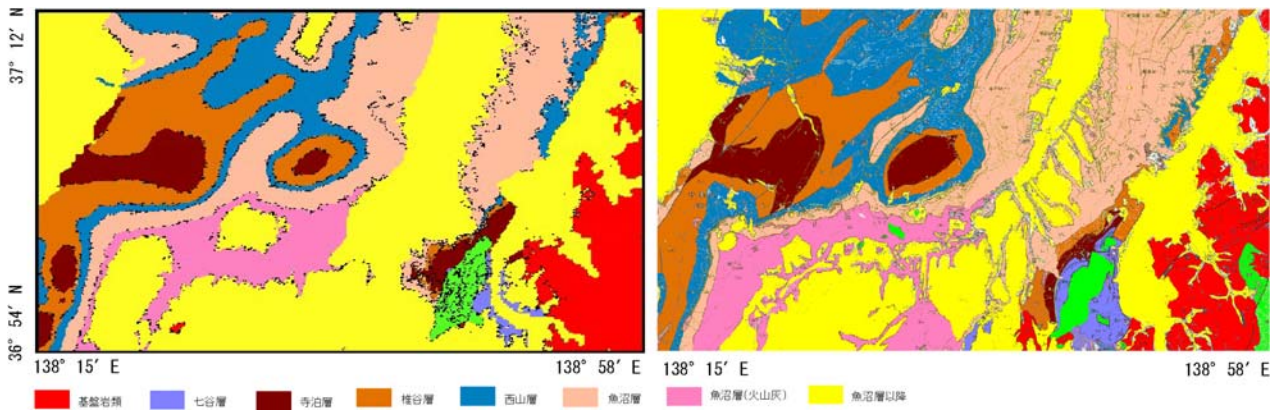


図10 現在の地質分布に関するモデル（左）と地質図データ（右）の比較。右の地質図は本研究の層区分による色分けを用いて地質調査所の20万分の1地質図「高田」（図4）を再描画したものである。

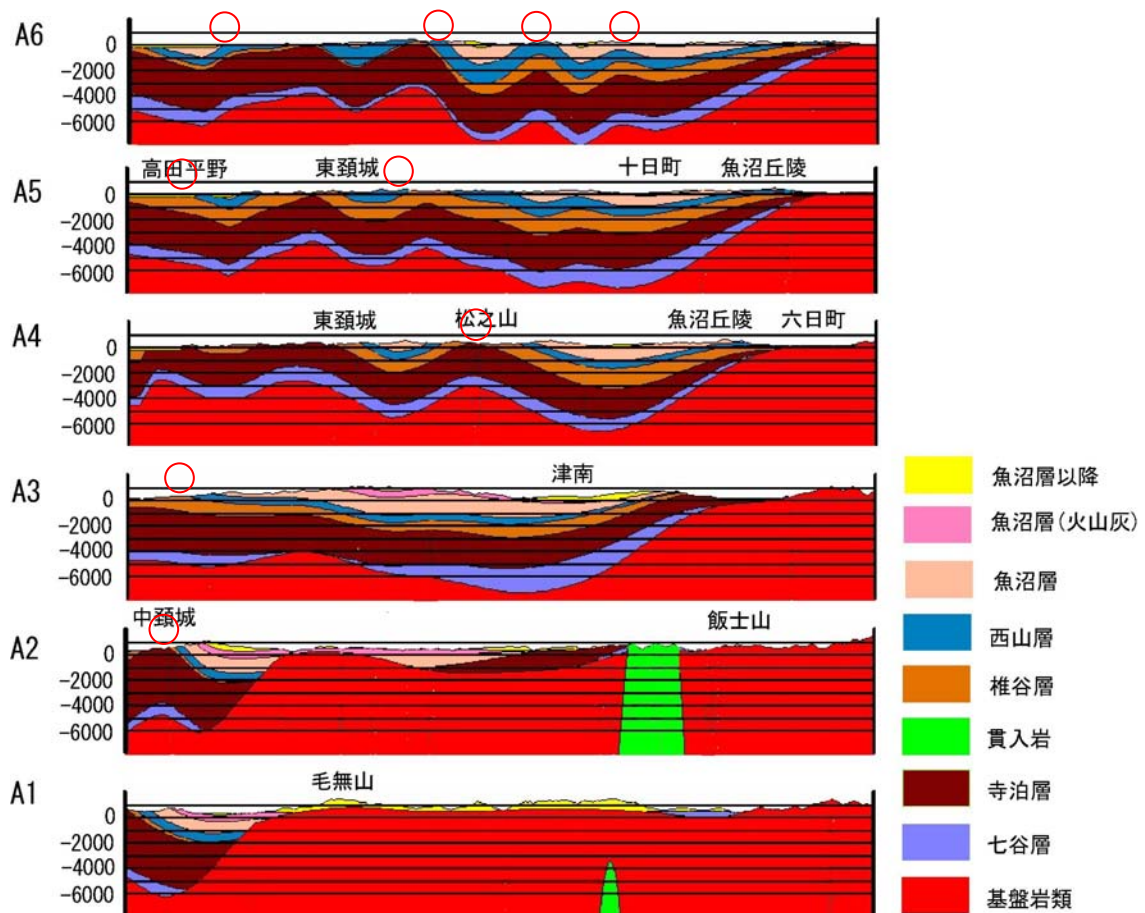


図11 モデルの東西鉛直断面。南方から見た場合（左右がそれぞれ西東に対応する）で、アスペクト比は1：1。モデル領域を等間隔に5等分し、南から順に断面A1、A2、…、A6とする。赤丸はボーリング点を最も近い断面に投影した位置を表す。

6. 議論

6.1 褶曲のモデル化

モデル化地域の褶曲形成機構に関わる近年の報告^{例えば、19, 43-46)}をまとめると、「鮮新世後期以降、当該地域ではテクトニック・インバージョン(3.1 節)により基盤及び被覆層内部に東西圧縮場が形成されている。その中で、基盤中の(或いは被覆層内部に達する、或いは被覆層内部に孤立する)逆断層が活動してきた。主な褶曲はこれらの複合的な要因で形成された」というような筋書きが尤もらしいように思われる。すなわち当該地域の褶曲は座屈と断層関連褶曲を基礎としている。

一般的な座屈褶曲においては、地表で観測される褶曲がどの程度の深度まで同様に続いているかは、コンピテント層と呼ばれる相対的に変形しにくい層の厚さによる。深部では異なる波長で褶曲している可能性もある。また断層関連褶曲の場合、断層という不連続を基本とする。したがって、個々の褶曲についてその深部構造がどうなっているか確認するためには、褶曲軸ごとにボーリングや反射法探査を実施する必要があり、簡便なモデル化から離れてしまう。

本研究では、地表で観察される褶曲の影響が基盤まで同様に続くこととみなし、変形面で褶曲を表現した。褶曲の深部構造をモデル化するには、既存の研究や報告からモデル化地域で卓越する褶曲のタイプを検討しておいて、このように先験的に褶曲のタイプを定めてその表現を決定するのが、簡便なモデル化という課題に対する現実的な回答のように思われる。検証あるいは参考として用いることができる反射断面があればなお良い。例えば図 12 はモデル化地域北部(図 4 の b1-b2 にほぼ対応する)で実施された反射法探査の解釈断面⁴⁷⁾である。モデル化地域の一般的な褶曲形成機構として、解釈断面に示される褶曲構造は同図の黒矢印で示されるような水平圧縮場で逆断層運動と密接に関係して発達したと考えられる。他方、解釈断面では地表の背斜軸、向斜軸の直下で地下深部まですべての層が同様に褶曲していることから、この褶曲構造は同図の点線の矢印で表されるように、便宜上深部から突き上げるような変位を与えてモデル化しても、巨視的なスケールでは許容されるように見える。これ以外のモデル化地域周辺の既存の反射断面^{例えば、4, 48, 49)}や地質断面推定図からも同様のことが言える。

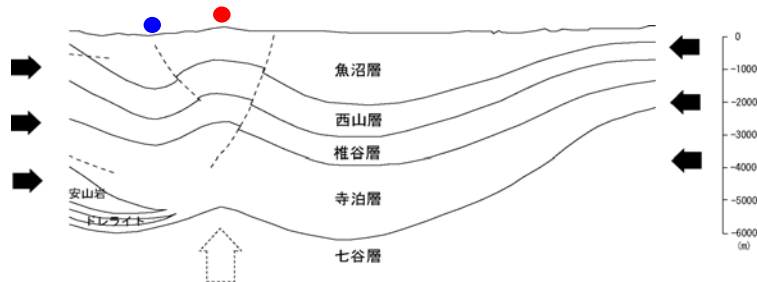


図12 モデル化地域北部で実施された反射法探査の解釈断面(石油公団の解釈断面⁴⁷⁾に加筆修正)。測線は図4のb1-b2にほぼ対応する。南方から見た場合(左右がそれぞれ西東に対応する)で、アスペクト比は1:1。点線は断層、赤(青)丸は背斜(向斜)軸を表す。黒矢印は水平圧縮のイメージ、点線矢印は本モデル化で便宜的に施した処理(変形面による鉛直変位)のイメージを表す。

6.2 断層のモデル化

断層運動はモデル化地域の地質構造形成過程を特徴付ける重要なファクターである(6.1 節)。しかしモデル化地域においては断層運動による造構を調査・観測を基礎として記述するのは、現時点では事実上困難なようである。まず地下深部における断層のジオメトリには不明点が多い。例えば、存在の確実な六日町断層(3.1 節)のジオメトリを表す代表的パラメータである傾斜だけを取り上げても、様々な見方がある。すなわ

ち、新第三系堆積盆地の基底部に沿う¹⁹⁾(従って比較的低位)、60°程度^{45,46)}(図14)、45°³²⁾、地表近くでは80°程度でリストラックに傾斜が変わる⁵⁰⁾等がある。十日町断層帯の場合、その存在も現時点では曖昧である。文部科学省が長期評価の対象とする十日町盆地東縁・西縁断層のうち東部は池田他¹⁹⁾はほとんど記載していない。西部は新潟県²⁰⁾は記載していない。本研究で用いた20万分の1地質図には両方とも記載がない。断層の形成時期や変位速度、累積変位量等の詳細を記述するパラメータも、六日町断層を除いてほとんど得られていない。そして、例えこれらのデータが存在したとしても、断層端や断層の深部形状をどのようにモデル化すれば良いかという問題が残る。

一方、モデル化地域では、大域的な造構運動ならば、変形面による褶曲のモデル化で近似的に表現できると考えられた(6.1節)。よって本研究では断層運動をモデル化しなかった。

6.3 地質図との対応について

2.2節の位置付けによれば、本手法を適用して得られる3次元地質構造モデルは、基礎データとして用いた地質図(4章)及びそれに添付されている地質断面と整合的なモデルになると予想される。例えば図13は、新潟県²⁰⁾による地質断面図と我々のモデルとの比較である。新潟県²⁰⁾は、我々が用いた5万分の1及び20万分の1地質図を含む各種の地質資料を編纂してまとめられた資料である。断層の有無や椎谷層の層厚の相違等は目に付くものの、全体的な褶曲の傾向や地表面が各地層を切る様子等が互いに良く似ていることは一見して明らかである。本研究ではモデル化のデータとして地質図掲載の地質断面を直接的には用いていないが、ボーリングデータの補正の際と褶曲の変位量を与える際に地質図の断面図を参考にした(表2)。これは、地質図作成者と我々で共通の地質学的イメージを、定量的に持つために役立つと考えられる。同じ地質学的イメージを、一方では地質断面、また一方では3次元モデルとして具体化したと解釈できる。

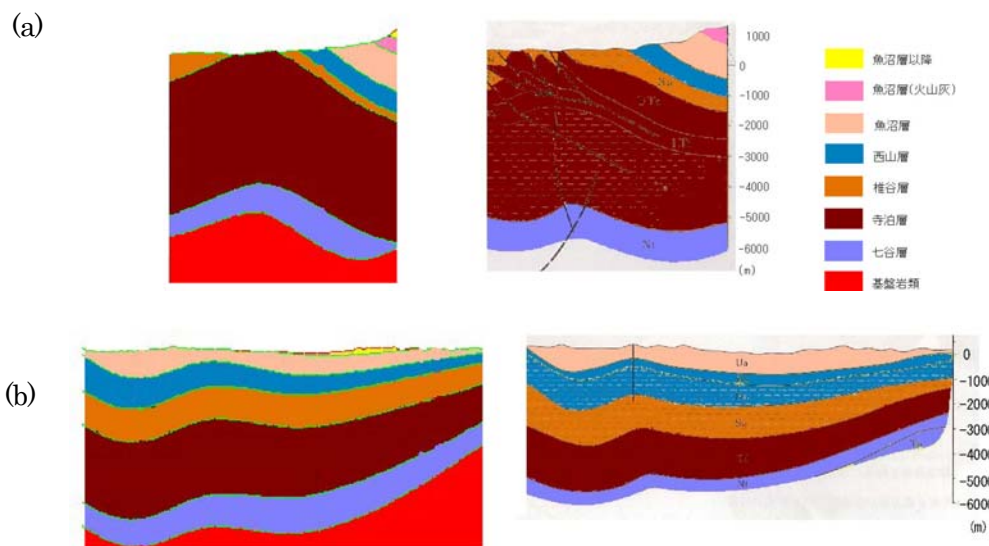


図13 モデル(左)と既存の地質断面(新潟県²⁰⁾の資料に添付される地質断面に加筆修正(右)との比較。右は反射法探査と地質ボーリングを基礎として描かれた断面である。(a)、(b)それぞれ図4の緑線a1-a2、b1-b2に対応する。アスペクト比は1:1。

6.4 地質構造と物性値構造との対応について

図14はS波速度構造のトモグラフィ・インバージョン結果⁵¹⁾と本研究の地質構造モデルとの比較である。これらは比較的良く対応するよう見える。実際これまでも地質構造とS波速度構造は大枠として良く対応す

ることが、大阪堆積盆地^{2, 52, 53}、京都堆積盆地³等で経験的に示されてきている。従って、物性値構造モデルを構築するための最も単純なアプローチとしては、地質構造モデルの各層に適当な物性定数を割り付けるやり方が考えられる^{例えば、53}。そしてこのようなモデルの高度化にあたっては、同一層内の物性変化を考慮するやり方が考えられる。例えば、同一層内の鉛直方向の物性変化については、近年は、圧密による物性値の深度依存性がモデル化されるようになってきている¹⁻³。一方、水平方向の物性変化については、それを記述するための手法は確立していない。

地質構造形成史に基づく本手法のようなアプローチにより、地質学的な根拠のもとに、水平方向の物性変化をモデル化できる可能性がある。同一層内の岩相の水平方向の不均質(例えば3.2節で述べたような同時異相)は主に堆積環境の地域性に起因し、本手法のアプローチは、堆積時の初生的構造まで遡るモデル化を基本とするからである(2.1節)。例えば本研究の場合特に魚沼層内の岩相に強い不均質が見られるが³⁶、その原因は、同層の堆積時に海成から陸成まで堆積環境が変化したこと及び供給源と水系が変化したこと(3.1節)に求めることができる。従って初生構造のモデル化の際に堆積学の知見を基礎として同一地層内の岩相の水平方向不均質の情報をモデルに組み込むことは原理的に可能であり、後は本研究と同様に、それにひき続く地質学的イベントを順次モデル化することにより、現在の地質構造に帰着させられる。このように作られた岩相の水平方向の不均質を含んだ地質構造モデルは物性値モデルの高度化に役立つと期待される。以上のようなモデル高度化の具体化は本研究の枠組みを超えるので今後の課題としたい。

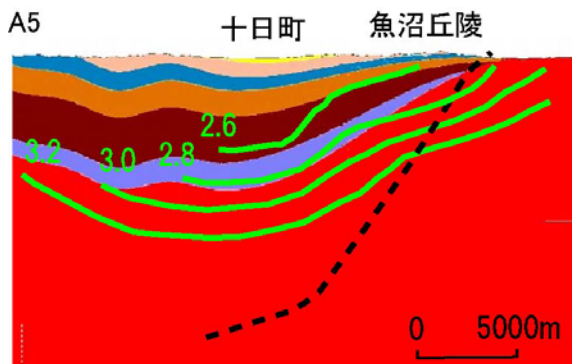


図14 本研究で得られた地質構造モデルの鉛直断面(図11のA5断面の一部)と自然地震を用いた速度トモグラフィ・インバージョン結果⁵¹⁾によるS波速度の等速度線(緑線。数字の単位はkm/s)との比較。岡村・柳沢⁴⁵⁾による六日町断層の断面(黒点線)も比較のためにプロットした。

7. まとめ

既存の地質図と少量の探査データ及び地質構造形成過程の知見を組み合わせる3次元地質構造を簡便にモデル化するための手法が近年開発された。本研究ではこの手法の位置付けを示し、これまでの適用例よりも地質学的に複雑と考えられる中越地方南部地域に適用した。

手法の位置付けとして、同手法は、地質学者が既存の反射データや基準ボーリングデータに地質構造形成史の解釈を併せて描いてきた地表地質図と地質断面を、3次元的な補間法を利用して再構成する手段と言える。モデル化の基礎データとなる地質学的知見の曖昧さと、結果として生じるモデルの単純化を考慮すると、探査データのない地域、或いは少ない地域の巨視的なモデル化に有効と考えられる。地質構造形成過程を考慮する手法の一般的特徴として同一地層内の岩相の不均質をモデル化できる可能性があり、物性値モデルの高度化における新たな展開に繋がると期待される。

中越地方南部地域のモデル化に際しては、我々は同地域の地質構造形成史を単純化して3つの地質学的イベントの重ね合わせで表現した上で少量の探査データを併せて用いた。その結果、南部に向うにつれて単純化する同地域の大局的な褶曲構造をモデル化することができた。このモデルは既存の地質学的情報やトモグラフィ結果とも整合的で、手法の有効性を示している。このモデルは、地震空白域であり将来の地震発生が危惧される同地域の基礎的な地盤モデルとして役立てられると考える。

謝辞 (独)防災科学技術研究所の武田哲也博士からトモグラフィ・インバージョン結果のデジタル・データを頂いた。本研究は産業技術総合研究所研究部門重点化予算に拠る。また、3名の査読者のコメントは本文の改善に大いに役立った。記して感謝致します。

付録1 地質形成面を表現する関数

Geomap3D では塩野他⁵⁴⁾に従って式(1)の補間面を与えている。以下にその内容を簡単に記述する。詳細は同文献を参照されたい。

まず、不規則点 (x_k, y_k) ($k=1, \dots, N$)で与えられるデータ d_k を包含する長方形 ($x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$, $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$) をモ

デル領域とし、その内部を等間隔 に分割する

($X_i = x_{\min} + (i-1)\Delta x$, $Y_j = y_{\min} + (j-1)\Delta y$; $i=1, \dots, N_x$, $j=1, \dots, N_y$) (付図1(a))。関数 f はこうして分割された格子セル ($X_i \leq x \leq X_{i+1}$, $Y_j \leq y \leq Y_{j+1}$) ごとにその頂点 f_{ij} , f_{i+1j} , f_{ij+1} , f_{i+1j+1} で与えられる4値の線形補間で定義される区分的な関数とする (付図1(b))。すなわち、

$$f(x_k, y_k) = (1 - \xi_k)(1 - \eta_k)f_{ij} + (1 - \xi_k)\eta_k f_{ij+1} + \xi_k(1 - \eta_k)f_{i+1j} + \xi_k\eta_k f_{i+1j+1}, \quad (A1)$$

但し、

$$\xi_k = (x_k - X_i) / \Delta x, \eta_k = (y_k - Y_j) / \Delta y. \quad (A2)$$

未知数 f_{ij} は関数値とデータの残差 2 乗和

$$\phi = \sum_{k=1}^N e_k^2 = \sum_{k=1}^N [f(x_k, y_k) - d_k]^2, \quad (A3)$$

及び、次の2つの平滑化拘束条件

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y} (f_{i+1j} - f_{ij})^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y-1} (f_{ij+1} - f_{ij})^2, \quad (A4)$$

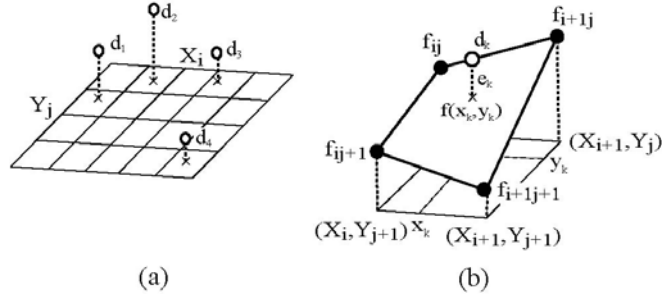
及び

$$J_2 = \sum_{i=2}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y} (f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j})^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=2}^{N_y-1} (f_{ij+1} - 2f_{ij} + f_{ij-1})^2 + 2 \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} (f_{i+1j+1} - f_{i+1j} - f_{ij+1} + f_{ij})^2, \quad (A5)$$

の線形和

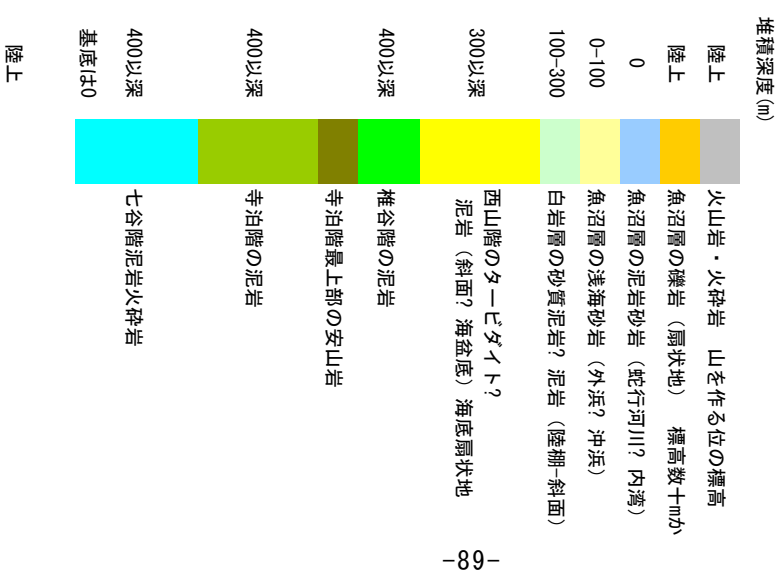
$$Q = a\phi + m_1 J_1 + m_2 J_2, \quad (A6)$$

を最小化するように選ぶ。具体的には、 a , m_1 , m_2 に適当な正値を与え、 Q を未知数で偏微分して0と置いて得られる $N_x N_y$ 元連立方程式(正規方程式)を解けば良い。



付図1 地質形成面のモデル化。

時代	1/5万図幅	小千谷			十日町	越後湯沢	苗場山	
		西部	中部	東部			東部	西部
更新世 中期 前期	魚沼	魚沼層上部 (U1)	魚沼層上部 (U1)	魚沼層上部 (U6)	魚沼層上部 (U6)	苗場火山	志賀火山	外丸層
							鳥甲火山	
鮮新世 後期 前期	灰爪	魚沼層 (U2+U1)	魚沼層 (U2+3)	魚沼層中部 (U2)	魚沼層中部 (U4)	志久見川累層	上郷累層	
		和南津層	和南津層	魚沼層下部 (U1)	魚沼層下部 (U6)		東ノ沢層	天水山累層
中新世 後期 中期 前期	西山階	牛ヶ首層	白岩層	魚沼層下部 (U1)	和南津層	岩之沢層		
		川口層	白岩層	和南津層	白岩層			
中新世 中期 前期	椎谷階	荒谷層						
中新世 中期 前期	寺泊階		貴木層	一村尾層	一村尾層	西田尻層	西田尻層	
					律沢層	律沢層	律沢層	秋山郷累層
中新世 中期 前期	七谷階		西名層	大沢層	大沢層 (上部)	大沢層	大沢層	
					上野層 (下部)	上野層 (Mt1)	上野層 (Uw1)	外ノ川層
中新世 中期 前期			清本層 八海山層 大倉層			清津層	結束層	
						白坂層	結束層	結束層
						松川層		



時代	1/5万図幅		飯山				高田東部		松之山温泉	岡野町	柿崎
	地域		東部	中部	西部	南東部	北西部		南部のみ	南東部のみ	
更新世	中期	魚沼	毛無山 (新期)	野々海川火砕岩	斑尾火山 黒岩・茶屋池火山岩類	奈良立層Nv	猿橋層	魚沼層Ut	魚沼層U1		
			毛無山 (旧期)								安山岩火砕岩類 (04)
更新世	前期	魚沼	虚空蔵・瑞穂	大川層 (01+1)	大川層 (01+2)	奈良立層Ns		魚沼層Ut	魚沼層U4		
			灰爪	堰口層	堰口層	白岩層	浦川原層	東川層	東川層	浦川原層	
鮮新世	後期	西山階	一ノ瀬層	一ノ瀬層	一ノ瀬層	田麦山層	浦川原層	東川層	田麦山層	田麦山層	
											濁池層
鮮新世	前期	椎谷階		富倉層 (上部)	須川層	須川層	須川層	須川層	須川層	竹ノ鼻層	
											富倉層 (榑本部層)
鮮新世	後期	寺泊階		富倉層 (下部) 下部寺泊層 難波山層				松之山層 寺泊層	寺泊層	小萱層	
											富倉層 (下部) 下部寺泊層 難波山層
鮮新世	中期	七谷階		七谷層				七谷層	七谷層		
											七谷層
鮮新世	前期										

参考文献

- 1) 愛知県:平成14年度地震関係基礎調査交付金 濃尾平野地下構造調査(概要版)、2003年.
- 2) 堀川晴央、水野清秀、石山達也、佐竹健治、関口春子、加瀬祐子、杉山雄一、横田裕、末廣匡基、横倉高伸、岩淵洋、北田奈緒子、Pitarka Arben:断層による不連続を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル、活断層・古地震研究報告、Vol. 3、2003年、pp. 225-259.
- 3) 京都市:京都盆地の地下構造、京都市消防局防災対策室、2003年.
- 4) 古村孝志、三宅弘恵、瀧瀬一起、須田茂幸、川崎慎治:小千谷市付近のP波・S波反射法探査と地下構造モデル構築、日本地震学会2005年秋季大会、2005年、P177.
- 5) 文部科学省地震調査研究推進本部:地下構造調査報告書、<http://www.jishin.go.jp>、2005年.
- 6) 長谷川功、西開地一志:Geomap3Dを用いた3次元地質構造モデルの構築—つくば地域、中越地震震源域を例として—、情報地質、Vol.16、2005年、pp.76-77.
- 7) 長谷川功、西開地一志、桑原保人:中越地震震源域の3次元地質構造モデルと震源との関係、<http://www.gsj.jp/jishin/jishin.html>、2005年.
- 8) 豊田守、西開地一志:Geomap3Dのシステム紹介、情報地質、Vol.16、2005年、pp.146-147.
- 9) Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada: Continuous GPS Array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 157, 2004, pp.2303-2322.
- 10) 大竹政和:第160回地震予知連絡会資料、2005年、国土地理院.
- 11) 桑原保人、今西和俊、武田哲也:新潟県中越地震の震源隣接域における微小地震観測、地質ニュース607号、2005年、pp.34-38.
- 12) 山下昇:フォッサマグナ、1995年、東海大学出版会、310p.
- 13) 山下昇:柏崎—銚子線の提唱、星野通平・青木斌編「島弧と海洋」、1970年、東海大学出版会、pp.179-191.
- 14) Otofujii, Y., Y. Matsuda and T. Nohda: Opening mode of the Japan Sea inferred from the palaeomagnetism of the Japan Arc, *Nature*, Vol. 317, pp.603-604.
- 15) Jolivet, L., K. Tamaki and M. Fournier: Japan sea, opening history and mechanism—A synthesis, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, 1994, pp.22237-22259.
- 16) Sato, H.: The relationship between late cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, 1994, pp.22261-22274.
- 17) 佐藤比呂志:日本列島のインバージョンテクトニクス、活断層研究、15号、1996年、pp.128-132.
- 18) 佐藤比呂志、池田安隆:東北日本の地殻構造と伸張テクトニクス、月刊地球/号外 No. 27, 1999年、pp. 135-141.
- 19) 池田安隆、今泉俊文、東郷正美、平川一臣、宮内崇裕、佐藤比呂志:第四紀逆断層アトラス、2002年、東京大学出版会.
- 20) 新潟県:新潟県地質図説明書(2000年版)、2000年、新潟県地質図改訂委員会編.
- 21) Chinzei, K. Late cenozoic zoogeography of the sea of Japan area, *Episodes*, Vol. 14, 1991, pp. 231-235.
- 22) 細川秀夫、竹内章:日本列島の古応力場と火成活動—新第三紀の変遷史—、1983年、Vol.53、pp.624-631.
- 23) 大槻憲四郎:鉦脈による新第三紀東北本州弧の造構応力場復元、地質学論集、1989年、第32号、pp.281-304.
- 24) 中村光一:反転テクトニクス(inversion tectonics)とその地質構造表現、構造地質、1992年、38号、pp.3-45.
- 25) 岡村行信、佐藤幹夫、渡辺真人、山本博文:日本海南東部のインバージョン・テクトニクス、構造地質、1992年、38号、pp.47-58.
- 26) 山田康広、服部昌樹、国安稔:新潟油田地域におけるインバージョン・テクトニクス、構造地質、1992年、

- 38号、pp.59-72.
- 27) 小林巖雄、立石雅昭、安井賢、風岡修、黒川勝己、油井裕、渡辺箕久男:新潟堆積盆地における西山・灰爪層、魚沼層の層序と古環境、地質学雑誌、Vol.92、1986年、pp. 375-390.
 - 28) 貝塚爽平:発達史地形学、2002年、東京大学出版会、pp.223-225.
 - 29) 内藤博夫:新潟県十日町付近の地形—魚沼地方の地形発達史についての若干の考察、地理学評論、Vol.32、1965年、pp.613-629.
 - 30) 柳沢幸夫、小林巖雄、竹内圭史、立石雅昭、茅原一也、加藤碩一:小千谷地域の地質、1986年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 31) 金幸隆:魚沼丘陵の隆起過程と六日町断層の活動累積、活断層研究、24号、2004年、pp.63-75.
 - 32) 産業技術総合研究所:活断層データベース、<http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/>、2005年.
 - 33) 菊池かおる、黒川勝己、丸山直子、落合浩代、小林巖雄:新潟油田地域、灰爪層・西山層と魚沼層群の火山灰層による対比、地質学雑誌、Vol.90、1984年、pp.101-115.
 - 34) 駒沢正夫:2004年新潟県中越地震—震源域付近の詳細重力異常図、http://unit.aist.go.jp/igg/rg/geophysmap-rg/grav/niigata_grav.html、2004年.
 - 35) 茅原一也、小松正幸、島津光夫、久保田喜裕、塩川智:越後湯沢地域の地質、1981年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 36) 柳沢幸夫、茅原一也、鈴木尉元、植村武、小玉喜三郎、加藤碩一:十日町地域の地質、1985年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 37) 小林巖雄、立石雅昭、黒川勝己、吉村尚久、加藤碩一:岡野町地域の地質、1989年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 38) 島津光夫、立石雅昭:苗場山地域の地質、1993年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 39) 竹内圭史、加藤碩一:高田東部地域の地質、1994年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 40) 竹内圭史、吉村尚久、加藤碩一:柿崎地域の地質、1998年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 41) 竹内圭史、吉川敏之、釜井俊孝:松之山温泉地域の地質、2000年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 42) 柳沢幸夫、金子孝之、赤羽貞幸、栗田康夫、釜井俊孝、土谷信之:飯山地域の地質、2001年、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所.
 - 43) Okamura, Y.: Fault-related folds and an imbricate thrust system on the northwestern margin of the northern Fossa Magna region, central Japan, Island arc, Vol.12, 2003, pp.61-73.
 - 44) Kato, N., T. Echigo, H. Sato, M. Tateishi, S. Ogino, S. Sakai, S. Toda, S. Koshiya, T. Ito, T. Toyoshima, T. Imaizumi, H. Kato, and S. Abe: Geologic fault model based on the high-resolution seismic reflection profile and aftershock distribution associated with the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake (M6.8), central Japan, Earth Planets Space, Vol.57, 2005, pp.447-452.
 - 45) 岡村行信、柳沢幸夫:新潟県中越地震と地質構造との関係、地質ニュース607号、2005年、pp.13-17.
 - 46) Sato, H. and N. Kato: Relationship between geologic structure and the source fault of the 2004 Mid-Niigata earthquake, central Japan, Earth Planets Space, Vol. 57, 2005, pp.453-457.
 - 47) 石油公団、昭和62年度基礎物理探査「頸城～田麦山地域」調査報告書、1987年.
 - 48) 石油公団、平成元年度基礎試錐「東頸城」地質検討会、1992年.
 - 49) 石油公団、平成9年度基礎試錐「東山」地質検討会、2000年.
 - 50) Imanishi, K., Y. Kuwahara, T. Tetsuya, and Y. Haryu: Fault structures and stress field in the southern end of the source region of the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake deduced from precise earthquake locations and focal mechanism solutions, Earth Planets Space, Vol. 58, 2006, pp.831-841.

- 51) 武田哲也、桑原保人、今西和俊、針生義勝: Double-Difference Tomography 法による2004年新潟県中越地震震源域南部の地殻構造、地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集、2005年、S101-007.
- 52) 松本正毅、小池章久、山田雅行、伊藤佳洋、岩崎好規、横田裕、伊藤信一: 地下深部における大阪層群の動的特性、物理探査学会第98回学術講演回要旨、pp.54-58.
- 53) 長郁夫、趙伯明、香川敬生: 増幅スペクトルを評価するための浅部S波速度構造のモデル化—大阪湾岸部一、日本地震工学会論文集、Vol.5、2005年、pp.1-16.
- 54) 塩野清治、升本真二、弘原海清: 1988年、BASICによるコンターマップ II 応用編、共立出版、171p.

(受理:2006年4月18日)

(掲載決定:2006年10月10日)

Modeling of Three-Dimensional Geological Structure with Constraints of Geotectonic History: Application to a Seismic Gap Region South of the 2004 Mid Niigata Earthquake

CHO Ikuo¹⁾, NISHIKAICHI Kazushi²⁾, YANAGISAWA Yukio³⁾,
HASEGAWA Isao⁴⁾ and KUWAHARA Yasuto⁵⁾

1) Researcher, Geological Survey of Japan, AIST, Dr. Sci.

2) Researcher, GSI Corporation

3) Senior Researcher, Geological Survey of Japan, AIST, Dr. Sci.

4) Visiting Researcher, Geological Survey of Japan, AIST, Dr. Sci.

5) Group Leader, Geological Survey of Japan, AIST, Dr. Sci.

ABSTRACT

We have constructed a three-dimensional (3D) model of geological structure of a seismic gap region south of the 2004 Mid Niigata Earthquake with a recently-proposed 3D modeling method using constraints of geotectonic history revealed by geological studies. The large-scale, say 64 km x 33 km, 3D geological structure was successfully modeled on the basis of surface geological maps, a relatively small amount of exploration data and the information of the important geotectonic processes. We have pointed out an advantage and a disadvantage of the method: This method is considered to be a powerful tool to construct and revise a three-dimensional model of a region without sufficient exploration data, and to be appropriate for such a large-scale region in view of the simplification incorporated to the model. We consider that the resultant 3D model can be used for a strong ground motion prediction in the future earthquake region.

Key words: three dimensions, geological structure, geotectonic history, strong ground motions