論 説

拡張地質関数を用いた地質境界線の表示

米澤 剛*・升本 眞二*・根本 達也*・坂本 正徳**・塩野 清治*

Visualization of Geologic Boundaries Based on Generalized Geologic Function

Go YONEZAWA*, Shinji MASUMOTO*, Tatsuya NEMOTO*,
Masanori SAKAMOTO** and Kiyoji SHIONO*

Abstract : The geologic function that assigns a unique geologic unit to every point in the objective three dimensional (3-D) space is a key element of a computer geo-mapping. Algorithms for construction and visualization of 3-D geologic model based on the geologic function have been widely developed. As the concept of geologic boundary is not contained in the geologic function, it was newly defined a generalized geologic function that assigns a pair of directly above and below geologic units to every point in the objective 3-D space. The generalized geologic function clarifies a boundary of geologic units to be visualized. Visual Basic program Geomodel2003 was developed to visualize geologic boundaries on the objective surface by embedding sub-routines for visualization of geologic boundary which had been developed in the Geomodel2000. We verified the adequacy and usefulness of the proposed algorithm. Application of Geomodel2003 to a test data in Honjyo area, Akita Prefecture, Japan, proved that the proposed algorithm is valid 3-D geologic modeling.

Key word : Geologic function, Geologic boundary, Generalized geologic function, Objective surface, Geomodel2003

1. はじめに

地質図を作成するには、

- ① 地形図上に地質体と地質体の境界である地質境界線を描く、
- ② 地質境界線で囲まれた領域を地質体に対応した色で塗り分ける、

という2つの作業が必要である。

Sakamoto *et al.*(1993), 升本ほか(1997), 塩野ほか(1998), 塩野ほか(2000)などにより、地質構造の論理モデルにもとづく3次元地質モデルのコンピュータ処理法が開発されてきた。3次元地質モデルを可視化する手法として、升本ほか(1999)や升本ほか(2000)などによる GRASS GIS(USACE,1993 など)を活用した方法や、坂本ほか(2000)の Visual Basic プログラム Geomodel2000 を用いた方法が提案された。これらの手法では地表面あるいは断面上の各点を地質関数の値にしたがって色分けして、地質平面図や地質断面図、立体地質図などを作成できるが、地質図の重要

な要素の一つである地質境界線の表示に関しては未解決の課題として残されていた。この課題を解決するために升本ほか(2001)や米澤ほか(2002)は、Geomodel2000 において格子セルと呼ばれる格子線に囲まれた領域ごとに、地質関数で求めた4隅の格子点の地質体が異なればその格子セル内に地質境界線を描き、同じであれば地質境界線を描かないという操作の繰り返しで地質境界線を描ける可能性があることを示した。しかしながら、この単純な原理では格子間隔を大きくしたとき、実際には存在しない地質境界線が表示されるという欠点がある。現実的には格子間隔を小さくすることで問題を回避できる可能性は高いが、地質境界線を表示する原理としては不十分である。

一方、GRASS GISを用いた3次元地質モデルの可視化において、升本ほか(2000)や Masumoto *et al.*(2004)などにより、地質境界面を可視化する方法がすでに開発されている。この原理は地質関数の性質を応用して、境界面上にある点の上側にある地質体と下側にある地質体を求め、異な

2003年9月25日受付, 2004年11月7日受理

Geoinform2002 (2002年6月, 福岡), Geoinform2003 (2003年6月, 北海道)で一部講演。

* 大阪市立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

E-mail: goy@sci.osaka-cu.ac.jp

** 国学院大学自然科学研究室 Laboratory of Natural Science, Kokugakuin University, 4-10-28 Higashi, Shibuya-ku, Tokyo 150-8440, Japan.

ればその点は地質境界と判断している．境界面の中から地質境界と判断された部分のみを表示することで，地質境界面を可視化している．

著者らはこの地質境界面を可視化する原理を用いることで，地質境界線の表示に関する課題を解決できると考え，新たに地質関数を拡張した「拡張地質関数」を提案する．本論文では以下，まず，拡張地質関数を厳密に定義し，その機能を説明する．次に，拡張地質関数を活用すると，地質体と地質体の境界が明確に定義でき，実際に存在する地質境界線だけを表示できることを示す．最後に，地質境界線を表示するための原理を示し，その原理にしたがって作成したプログラム Geomodel2003 を3次元地質モデルに適用して，地質境界線の表示法の妥当性を検証した結果を示す．

2. 地質図を作成するための基礎概念

本論文の主題である拡張地質関数を議論するための準備として，地質構造の論理モデル，*minset*，地質関数などの基礎概念を Shiono *et al.*(1994)，塩野ほか(1998)，塩野(1999)にしたがって簡単に説明する．

2.1 地質構造の論理モデル

地質調査の対象となる3次元空間を Ω とし，空間 Ω には原点 O ，水平東向きに x 軸，水平北向きに y 軸，鉛直上向きに z 軸をもつ座標系 $O\text{-}xyz$ が設定されているとする．

S が空間 Ω を上下に2つの領域に分割する面であるとき，面 S より上側の領域を S^+ ，面 S より下側の領域を S^- とかく．面 S は S^- に含めるものとする(第1図)．本論文では以下，空間 Ω を上下2つの領域に分割する面 S は $z=s(x,y)$ のような一価関数で表されるとし， S^+ と S^- をそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} S^+ &= \{(x,y,z) | z > s(x,y)\} \\ S^- &= \{(x,y,z) | z \leq s(x,y)\} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

とみなして議論を進める．定義により， S^+ と S^- の間にはつねに

$$\left. \begin{aligned} S^+ \cup S^- &= \Omega \\ S^+ \cap S^- &= \phi \quad (\text{空集合}) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

という関係が成り立つ．

空間 Ω は地表面より下側にある地層や岩体からなる部分(以下，これを地質空間という)と地表面より上側にある大気や水からなる部分(以下，これを上部空間という)で構成される．地質空間を構成する地層や岩体は地質図上に表現する単位に区分されているものとし，以下，個々の地質単位が分布する領域を $b_1, b_2, \dots, b_n$ で表す．また，上部空間は b_0 で表す．本論文では空間 Ω を構成する単位という意味で $b_0, b_1, \dots, b_n$ を総称して地質体とよぶ．ただし，ここでは後の処理を一般化するために，上部空間 b_0 も地質体に含めることにする．

第2図は，地質体 b_1 を基盤として地質体 b_2 が堆積した後侵食作用があった場合の地質体と面の関係を例示する模式断面図である．面 S_1 は地質体 b_1 と b_2 の地質境界面を通り空間 Ω を2分割する面であり，面 S_2 は地表面である．こ

第1図 空間 Ω を2分割する面．
面 S は S^- に含まれる．

第2図 地質体 b_0, b_1, b_2 の分布域を示す模式断面図．
面 S_1 は境界面(点線は b_0 内への延長部である)，
面 S_2 は地表面を表す．

のとき，基盤 b_1 ，堆積層 b_2 ，上部空間 b_0 の分布域はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= S_1^- \cap S_2^- \\ b_2 &= S_1^+ \cap S_2^- \\ b_0 &= S_2^+ \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

と表現できる．

一般に地質体の分布域 $b_0, b_1, \dots, b_n$ は面 $S_1, \dots, S_q$ によって境された領域として定義できる．このような地質体の分布域と面の論理的関係を「地質構造の論理モデル」という．

2.2 地質関数

面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ によって分割される最小単位の領域を面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ によって生成される *minset* (Gill, 1976) という．各 *minset* は面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ に対して， q 桁の2進数 $d_1 d_2 \dots d_q$ を添え字にもつ 2^q 種類の変数

$$m_{d_1 d_2 \dots d_q} = X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_q \quad (2.4)$$

で表すことができる．ここで，

$$X_k = \begin{cases} S_k^-; & d_k = 0 \text{ のとき,} \\ S_k^+; & d_k = 1 \text{ のとき,} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, q) \quad (2.5)$$

である．

たとえば，空間 Ω を2分割する2つの面 S_1 と S_2 によって生成される *minset* は，

$$\left. \begin{aligned} m_{00} &= S_1^- \cap S_2^- \\ m_{01} &= S_1^- \cap S_2^+ \\ m_{10} &= S_1^+ \cap S_2^- \\ m_{11} &= S_1^+ \cap S_2^+ \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

第3図 minsetの表現 (塩野, 1999).
(a) 面 S_1, S_2 によって生成される minset.
(b) 地質体 b_0, b_1, b_2 と minset との関係.

の4種類である(第3図(a)).

地質構造の論理モデルが与えられると, 地質体の分布域 $b_0, b_1, \dots, b_n$ はそれぞれ面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ によって生成される minset の和集合として表現できる. その結果, 各 minset に対して, それが含まれる地質体に対応づけることができる.

各 minset に地質体に対応づける手続きを第2図に示した地質構造を例にして説明する. この場合, 地質構造の論理モデルは(2.2)式の通りであるので, 各地質体の分布域はそれぞれ minset を用いて,

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= (S_1^- \cup S_1^+) \cap S_2^+ \\ &= (S_1^- \cap S_2^+) \cup (S_1^+ \cap S_2^+) \\ &= m_{01} \cup m_{11} \\ b_1 &= m_{00} \\ b_2 &= m_{10} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

と表現できる(第3図(b)). 4つの minset $m_{00}, m_{01}, m_{10}, m_{11}$ は, それぞれ b_0, b_1, b_2 のいずれか一つの地質体を構成するブロックになっている. つまり,

$$\left. \begin{aligned} m_{00} &\subseteq b_1; m_{00} \text{ は } b_1 \text{ に含まれる,} \\ m_{01} &\subseteq b_0; m_{01} \text{ は } b_0 \text{ に含まれる,} \\ m_{10} &\subseteq b_2; m_{10} \text{ は } b_2 \text{ に含まれる,} \\ m_{11} &\subseteq b_0; m_{11} \text{ は } b_0 \text{ に含まれる,} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

という対応関係が成り立つことがわかる. これは minset の集合 $M = \{m_{00}, m_{01}, m_{10}, m_{11}\}$ から地質体の集合 $B = \{b_0, b_1, b_2\}$ への関数である. この関数を $g_1: M \rightarrow B$ としたとき,

$$\left. \begin{aligned} g_1(m_{00}) &= b_1 \\ g_1(m_{01}) &= b_0 \\ g_1(m_{10}) &= b_2 \\ g_1(m_{11}) &= b_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

である. この関数 g_1 は第1表のように表すことができる.

一般に地質体の分布域 $b_0, b_1, \dots, b_n$ と面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ の関係 (地質構造の論理モデル) が与えられると, 一定の機械的手続きにより minset の集合 M から地質体の集合 B への関数 g_1 を定めることができる.

一方, 面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ の具体的な形状が与えられると, 空間 Ω 内の任意の点 $P(x, y, z)$ に対して,

$$d_k = \begin{cases} 0; & P \text{ が } S_k \text{ より下側または } S_k \text{ 上にある,} \\ 1; & P \text{ が } S_k \text{ より上側にある,} \end{cases} \quad (2.10)$$

ただし, $k = 1, 2, \dots, q$ である,

で定まる q 桁の2進数 $d_1 d_2 \dots d_q$ を対応づけることができる. この2進数は点 P が含まれる minset の添え字を表す. このようにして空間 Ω 内の任意の点に対して, その点が含まれる minset を対応づける関数を $g_2: \Omega \rightarrow M$ とする.

以上のように定義される関数 g_1 と関数 g_2 を合成した関数を $g: \Omega \rightarrow B$ とし,

$$g(x, y, z) = g_1(g_2(x, y, z)) \quad (2.11)$$

で表現する. これを地質関数 (升本ほか, 1997) といい, 地質関数 g は空間 Ω 内の任意の点に対して, その点が含まれる地質体に対応づける関数である.

第2図に示した地質構造を例にして, 代表的な5点 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3), P_4(x_4, y_4, z_4), P_5(x_5, y_5, z_5)$ に対する地質関数の値を示す (第4図)

面 S_1 と S_2 の両方に対して下側にある点 P_1 では, (2.10)式より $d_1 = 0, d_2 = 0$ となる. $m_{d_1 d_2}$ なので m_{00} となるため,

$$g_2(x_1, y_1, z_1) = m_{00} \quad (2.12)$$

である. 一方, (2.9)式より

$$g(m_{00}) = b_1 \quad (2.13)$$

であることから

$$\left. \begin{aligned} g(x_1, y_1, z_1) &= g_1(g_2(x_1, y_1, z_1)) \\ &= g_1(m_{00}) \\ &= b_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

がえられる.

面 S_1 上にある点 P_2 では, (2.10)式より $d_1 = 0$ である (S_1^- は面 S_1 を含む) から, 点 P_2 は点 P_1 と同じく m_{00} に含まれることになる. したがって

$$g_2(x_2, y_2, z_2) = b_1 \quad (2.15)$$

である.

第1表 関数 g_1 の対応表.

m	$g_1(m)$
m_{00}	b_1
m_{01}	b_0
m_{10}	b_2
m_{11}	b_0

第4図 点 P_1 から点 P_5 における地質関数の値.
 b_0, b_1, b_2 は地質体を表し, () 内は地質関数の値を示す. 面 S_1 は境界面, 面 S_2 は地表面を表す.

同様にして,

$$\left. \begin{aligned} g(x_3, y_3, z_3) &= b_2 \\ g(x_4, y_4, z_4) &= b_0 \\ g(x_5, y_5, z_5) &= b_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

がえられる.

3. 拡張地質関数

空間 Ω 内の点 P を中心とする半径 ε の球 V_ε を考える. 点 P がある地質体 b の内部にあるとき, 半径 ε を適当に小さくすれば, 球 V_ε もまた地質体 b の内部に含まれるようになり, 球 V_ε 内の点に対する地質関数 g の値はすべて地質体 b となる. しかしながら, 点 P が下位の地質体 b と上位の地質体 b' の境界面上にあるとき, 半径 ε をどのように小さくしても, 球 V_ε 内には地質体 b と b' の2種類の地質体が存在して, 球 V_ε 内の点に対する地質関数 g の値は一定しない. この性質を利用して, 点 P が地質体内部の点であるかあるいは境界面上の点であるかを判別する方法を考える.

3.1 直下にある minset と直上にある minset

空間 Ω を2分割する面 S によって生成される minset m_0 と m_1 を考えた場合, 第5図に示すような面 S 上にある点 $P(x, y, z)$ は, (2.1)式の定義より m_0 に含まれるとされる. さらに, 点 $P(x, y, z)$ より微小な距離 $\varepsilon > 0$ だけ下側にある点 $P'(x, y, z - \varepsilon)$ もまた m_0 に含まれる. このように点 P よりも微小な距離だけ下側にある点が含まれる minset を点 P の直下にある minset とよぶ. 点 P より微小な距離 ε だけ上側にある点 $P''(x, y, z + \varepsilon)$ は上側の minset m_1 に含まれる. このように点 P よりも微小な距離だけ上側にある点が含まれる minset を点 P の直上にある minset とよぶ.

空間 Ω を上下に2分割する面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ によって生成される minset で, 一般的に説明する. 各面の具体的な形状がわかっているとき, 空間 Ω 内の任意の点 $P(x, y, z)$ に対して,

$$c_k = \begin{cases} 0; & P \text{ が } S_k \text{ より下側にある,} \\ *; & P \text{ が } S_k \text{ 上にある,} \\ 1; & P \text{ が } S_k \text{ より上側にある,} \end{cases} \quad (3.1)$$

ただし, $k = 1, 2, \dots, q$ である,

で定まる q 個の文字からなる文字列 $c_1 c_2 \dots c_q$ を対応づけることができる.

点 P が面上の点でない場合, 文字列は 0 と 1 のみで構成される. この文字列を2進数と解釈すれば, 関数 g_2 の場合と同様に, この2進数は点 P が含まれる minset の添え字を表す.

点 P がある面上の点である場合, 文字列に $*$ が含まれることになる. たとえば, 点 P が k 番目の面 S_k 上にあり, そのほかの面上にはない場合, 文字列 $c_1 c_2 \dots c_q$ における k 番目の文字 c_k が $*$ となり, そのほかの文字は 0 または 1 のいずれかとなる. このとき点 P より微小な距離 ε だけ下側にある点 $P'(x, y, z - \varepsilon)$ を考えると, $c_k = *$ ではなく $c_k = 0$ である. つまり $*$ を 0 で置き換えると, 0 と 1 のみで構成され

第5図 面 S 上の点 P の直下にある minset と直上にある minset.
点 P より微小な距離 ε だけ下側にある minset は m_0 であり,
上側にある minset は m_1 である.

る文字列がえられる. これを2進数と解釈すると, minset の定義から点 P が含まれる minset の添え字を表すことは明らかであり, 点 $P'(x, y, z - \varepsilon)$ もまたこの minset に含まれる. このような minset を点 P の直下にある minset という. 一方, 点 P より微小な距離 ε だけ上側にある点 $P''(x, y, z + \varepsilon)$ を考えると, $c_k = *$ ではなく $c_k = 1$ である. つまり文字列に含まれる $*$ を 1 で置き換えた場合も 0 と 1 のみで構成される文字列がえられる. この文字列に相当する2進数を添え字にもつ minset には点 P は含まれないが, 点 $P''(x, y, z + \varepsilon)$ はこの minset に含まれる. このような minset を点 P の直上にある minset という.

点 P が複数の面上にあるとき, 文字列には複数の $*$ が含まれることになるが, 同様に考えることにより, 点 P の直下にある minset や点 P の直上にある minset という概念を導入することができる. 一般的に次のように定義できる.

空間 Ω 内の任意の点 $P(x, y, z)$ に対して, (3.1)式で定まる q 個の文字からなる文字列を $c_1 c_2 \dots c_q$ とする. 文字列に含まれるすべての $*$ を 0 で置き換えた文字列を2進数とみなし, その2進数を添え字にもつ minset を「点 P の直下にある minset」とよぶ. 文字列に含まれるすべての $*$ を 1 で置き換えた文字列を2進数とみなし, その2進数を添え字にもつ minset を「点 P の直上にある minset」とよぶ.

なお, この定義にしたがって, 点 P が面上にない場合, 「点 P の直下にある minset」と「点 P の直上にある minset」はともに点 P が含まれる minset そのものとなる.

以上の定義にしたがって, 空間 Ω 内の任意の点 $P(x, y, z)$ に対して, 直下にある minset m と直上にある minset m' の対 (m, m') を対応づける関数を $g_2': \Omega \rightarrow M \times M$ とする.

第4図に示した5点 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3), P_4(x_4, y_4, z_4), P_5(x_5, y_5, z_5)$ に対する関数 g_2' の値を以下に例示する.

面 S_1 と S_2 の両方に対して下側にある点 P_1 では, (3.1)式より $c_1 c_2 = 00$ となり,

$$g_2'(x_1, y_1, z_1) = (m_{00}, m_{00}) \quad (3.2)$$

である.

面 S_1 上にあり, 面 S_2 より下側にある点 P_2 では, (3.1)式より $c_1 c_2 = *0$ である. $c_1 = *$ を 0 と 1 で置き換えると, 2

つの文字列00と10がえられるので,

$$g_2'(x_2, y_2, z_2) = (m_{00}, m_{10}) \quad (3.3)$$

である.

面 S_1 より上側にあり, 面 S_2 上にある点 P_3 では, $c_1 c_2 = 1^*$ であるから,

$$g_2'(x_3, y_3, z_3) = (m_{10}, m_{11}) \quad (3.4)$$

である.

面 S_1 上にあり, 面 S_2 より上側にある点 P_4 では, $c_1 c_2 = *1$ であるから,

$$g_2'(x_4, y_4, z_4) = (m_{01}, m_{11}) \quad (3.5)$$

である.

面 S_1 と面 S_2 上にある点 P_5 では, $c_1 c_2 = **$ であるから, すべての $*$ を 0 で置き換えると 00 がえられ, 1 で置き換えると 11 がえられるので,

$$g_2'(x_5, y_5, z_5) = (m_{00}, m_{11}) \quad (3.6)$$

である.

3.2 拡張地質関数

空間 Ω 内の任意の点 P に対して, 関数 $g_2' : \Omega \rightarrow M \times M$ により直下にある minset と直上にある minset の対 (m, m') が対応づけられるが, さらに関数 $g_1 : M \rightarrow B$ により点 P の直下にある minset m に対して, それが含まれる地質体 $g_1(m)$ が対応づけられる. これを「点 P の直下にある地質体」とよぶ. 同様に点 P の直上にある minset m' に対応づけられる地質体 $g_1(m')$ を「点 P の直上にある地質体」とよぶ.

このような手続きで, 空間 Ω 内の任意の点 P に対して, 点 P の直下にある地質体と点 P の直上にある地質体の対を対応づける関数 $g' : \Omega \rightarrow B \times B$ を定めることができる. この関数 g' を「拡張地質関数」とよぶ. minset の対 (m, m') に対して地質体の対 $(g_1(m), g_1(m'))$ を対応づける関数を $g_1' : M \times M \rightarrow B \times B$ としたとき, 拡張地質関数 g' は,

$$g'(x, y, z) = g_1'(g_2'(x, y, z)) \quad (3.7)$$

で定義することができる.

第2図に示した地質構造を例にして, 代表的な5点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$, $P_4(x_4, y_4, z_4)$, $P_5(x_5, y_5, z_5)$ に対する拡張地質関数の値を示す (第6図).

第6図 点 P_1 から点 P_5 における拡張地質関数の値.
 b_0, b_1, b_2 は地質体を表し, () 内は (直下にある地質体, 直上にある地質体) を示す. 面 S_1 は境界面, 面 S_2 は地表面を表す.

面 S_1 と S_2 の両方に対して下側にある点 P_1 では,

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x_1, y_1, z_1) &= (m_{00}, m_{00}) \\ g_1(m_{00}) &= b_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

より

$$\left. \begin{aligned} g'(x_1, y_1, z_1) &= g_1'(g_2'(x_1, y_1, z_1)) \\ &= g_1'(m_{00}, m_{00}) \\ &= (g_1(m_{00}), g_1(m_{00})) \\ &= (b_1, b_1) \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

である.

面 S_1 上にあり, 面 S_2 より下側にある点 P_2 では,

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x_2, y_2, z_2) &= (m_{00}, m_{10}) \\ g_1(m_{00}) &= b_1 \\ g_1(m_{10}) &= b_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

より

$$\left. \begin{aligned} g'(x_2, y_2, z_2) &= g_1'(g_2'(x_2, y_2, z_2)) \\ &= g_1'(m_{00}, m_{10}) \\ &= (g_1(m_{00}), g_1(m_{10})) \\ &= (b_1, b_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

である. P_2 の直下にある地質体が b_1 であり, 直上にある地質体が b_2 であることは, P_2 は2つの地質体 b_1 と b_2 の境界面上の点であることを意味する.

同様に, 面 S_1 より上側にあり, 面 S_2 上にある点 P_3 では,

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x_3, y_3, z_3) &= (m_{10}, m_{11}) \\ g_1(m_{10}) &= b_2 \\ g_1(m_{11}) &= b_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

より

$$g'(x_3, y_3, z_3) = (b_2, b_0) \quad (3.13)$$

である. この結果から, P_3 は2つの地質体 b_2 と b_0 の境界面上の点であること, いいかえれば地質体 b_2 が分布する地表面上の点であることがわかる.

面 S_1 上にあり, 面 S_2 より上側にある点 P_4 では,

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x_4, y_4, z_4) &= (m_{01}, m_{11}) \\ g_1(m_{01}) &= b_0 \\ g_1(m_{11}) &= b_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

より

$$g'(x_4, y_4, z_4) = (b_0, b_0) \quad (3.15)$$

である. この場合, P_4 の直下にある minset m_{01} と直上にある minset m_{11} は異なっているが, g_1 の値が同じであるから, 直下にある地質体と直上にある地質体はともに b_0 となる (P_4 は上部空間内の点であることを意味する).

面 S_1 と S_2 上にある点 P_5 では,

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x_5, y_5, z_5) &= (m_{00}, m_{11}) \\ g_1(m_{00}) &= b_1 \\ g_1(m_{11}) &= b_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

より

$$g'(x_5, y_5, z_5) = (b_1, b_0) \quad (3.17)$$

である.

第7図は直下にある地質体と直上にある地質体を定める上記の手続きをまとめたものである.

第7図 拡張地質関数 g' を求める一連の流れ.点 P_2 の直下にある地質体と直上にある地質体の定め方.

- ① 面に対する位置関係から文字列 $*0$ を定める.
- ② 文字列に含まれる $*$ を0と1に置き換えることにより, 直下にある $minset$ m_{00} と直上にある $minset$ m_{10} を定める.
- ③ 関数 g_1 にもとづいて, m_{00} が含まれる地質体 b_1 と m_{10} が含まれる地質体 b_2 を定める.

3.3 任意の点の直下にある $minset$ と直上にある $minset$ を定めるアルゴリズム

3.1では, 空間 Ω 内の点 $P(x, y, z)$ と面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ の位置関係から文字列 $c_1c_2 \dots c_q$ を定めた後に, 文字列に含まれる $*$ を1または0で置き換えると直下にある $minset$ や直上にある $minset$ が求められると説明した. 文字列を定める処理と文字列に含まれる $*$ を1または0で置き換える処理は下の手順①または②にしたがって一括処理できることは明らかである. ただし, 空間 Ω を上下に2分割する面 $S_1, S_2, \dots, S_q$ の標高を $z_k = s_k(x, y)$ ($k = 1, \dots, q$)とし, 点 P の標高 H との標高差を

$$D_k = H - z_k \quad (3.18)$$

とする.

- ① $d_k (k = 1, \dots, q)$ を

$$\left. \begin{array}{ll} D_k > 0 \text{ のとき} & d_k = 1 \\ D_k = 0 \text{ のとき} & d_k = 0 \\ D_k < 0 \text{ のとき} & d_k = 0 \end{array} \right\} \quad (3.19)$$

としてえられる q 桁の2進数 $d_1d_2 \dots d_q$ は, 点 P の直下にある $minset$ の添え字を表す.

- ② $d'_k (k = 1, \dots, q)$ を

$$\left. \begin{array}{ll} D_k > 0 \text{ のとき} & d'_k = 1 \\ D_k = 0 \text{ のとき} & d'_k = 1 \\ D_k < 0 \text{ のとき} & d'_k = 0 \end{array} \right\} \quad (3.20)$$

としてえられる q 桁の2進数 $d'_1d'_2 \dots d'_q$ は, 点 P の直上にある $minset$ の添え字を表す.

点 P の直下にある $minset$ と直上にある $minset$ は①と②にしたがって決定できるが, コンピュータ処理する場合には多少の注意が必要である. コンピュータにおける数値計算は有限な桁数の近似計算であり, 点 P と面 S_k の標高差 D_k を実数で取り扱うとき, $D_k = 0$ となることはないからである. 丸め誤差を考慮して, 点 $P(x, y, z)$ が面の標高 z_k に対して $\pm \epsilon$ の範囲にある場合には, 点 P は面上の点とするのが妥当であろう (第8図). この場合, ①と②は次のように

第8図 直下にある $minset$ と直上にある $minset$ の求め方.

なる.

- ①' $d'_k (k = 1, \dots, q)$ を

$$\left. \begin{array}{ll} D_k > \epsilon \text{ のとき} & d'_k = 1 \\ |D_k| \leq \epsilon \text{ のとき} & d'_k = 0 \\ D_k < -\epsilon \text{ のとき} & d'_k = 0 \end{array} \right\} \quad (3.19')$$

としてえられる q 桁の2進数 $d'_1d'_2 \dots d'_q$ は, 点 P の直下にある $minset$ の添え字を表す.

- ②' $d'_k (k = 1, \dots, q)$ を

$$\left. \begin{array}{ll} D_k > \epsilon \text{ のとき} & d'_k = 1 \\ |D_k| \leq \epsilon \text{ のとき} & d'_k = 1 \\ D_k < -\epsilon \text{ のとき} & d'_k = 0 \end{array} \right\} \quad (3.20')$$

としてえられる q 桁の2進数 $d'_1d'_2 \dots d'_q$ は, 点 P の直上にある $minset$ の添え字を表す.

4. Geomodel2003における地質境界線の表示

Geomodel2000は地質構造の論理モデルと地質関数を用いて, 3次元地質モデルを構築・可視化するVisual Basicプログラムである. Geomodel2000はユーザーが指定した「地質表示面」における地質体の分布域を地質関数にもとづいて

て色分けして表示する。地質関数では地質境界を識別できないため、Geomodel2000では地質境界線を表示できなかったが、拡張地質関数による地質境界を判断する機能を追加すれば地質境界線を含む地質図を作成できると考えて、Visual Basic プログラム「Geomodel2003」を作成した。以下、Geomodel2003を用いて地質境界線を表示する原理と地質境界線を含む地質図の表示法を示し、その有効性と妥当性を検証する。

4.1 地質境界線を表示するための基本原理

Geomodel2003は任意の切断面で立体地質図、平面地質図や地質断面図を表現できる。この任意の切断面を地質表示面とよぶ。また、地表面も地質表示面の一つとする。Geomodel2003で扱う地質表示面と境界面のデータは、それぞれ格子データの形式(DEM)で任意に与えることができる。ここでの格子データは、長方形の領域($x_{min} \leq x \leq x_{max}, y_{min} \leq y \leq y_{max}$)をx軸方向に間隔 Δx で($Nx-1$)等分、y軸方向に間隔 Δy で($Ny-1$)等分する格子を設定し、格子点(x_i, y_j) ($i=1, 2, \dots, Nx; j=1, 2, \dots, Ny$)における地質表示面の標高 $h_{ij} = h(x_i, y_j)$ または境界面の標高 $s_{ij} = s(x_i, y_j)$ の値を与えたデータである。

格子点での地質表示面と各境界面の標高差を

$$b_{ij} = h_{ij} - s_{ij} \quad (4.1)$$

で表し、格子セルごとに格子線上で標高差が0となる点を求める。すべての点において、直下にあるminsetと直上にあるminsetを定めるアルゴリズムを適用し、その点の直下にある地質体と直上にある地質体を求める。一つの格子セル内において標高差が0となる2点が、

- (a) 2点とも直下にある地質体と直上にある地質体異なる、
- (b) 1点は直下にある地質体と直上にある地質体異なる、もう1点は直下にある地質体と直上にある地質体は同じである、

(a)と(b)のどちらかを満たしているとき、2点をつなぎ地質境界線とした。これらを各格子セルで境界面の数だけ繰り返す。これにより、地質表示面に地質境界線を表示することができる。

地質断面図に地質境界線を表示するには別のアルゴリズムを適用してもよいが、断面図に格子を設定して格子点に与える値の工夫をおこなえば、地質表示面に地質境界線を表示するアルゴリズムと同じ処理が可能となる。具体的にはxy平面上で任意の点Pを通り、方位角が α の方向(北から時計回りに測る)に伸びる直線(これを測線とよび、測線方向にt軸を設定する)に沿った地質断面図を考え、測線に沿ったtz平面上に断面格子を設定する。格子点の値は底面の標高を基準とした格子点の標高と各境界面との標高差を与えた。これにより断面格子の格子点の値は、地質表示面と境界面の標高差 b_{ij} とみなすことができる。このアルゴリズムは、立体地質図の側面にも適用できる。

4.2 Geomodel2003の使用方法

4.1の原理を組み込んだGeomodel2003の基本的な使用方法について説明し、実際に地質境界線を含む地質図を作成する。Geomodel2003を起動すると、設定画面と出力画面が表示される。設定画面は地質図を作成する上で必要なデータやパラメータを入力する画面である。入力した情報にしたがって地質図を作成でき、作成した地質図は出力画面に表示される。Geomodel2003を用いて地質図を作成する手順を設定画面①から④の設定パネルにしたがって示す。

データは塩野ほか(2000)のデータを使用し、地質体 b_1 と b_2 の境界を通る面を S_1 とし、地質体 b_1 と b_2 が地質体 b_3 と接している面を S_2 、面 S_3 は地表面とする。地質構造の論理モデルは、

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= S_1^- \cap S_2^- \cap S_3^- \\ b_2 &= S_1^+ \cap S_2^- \cap S_3^- \\ b_3 &= S_2^+ \cap S_3^- \\ b_0 &= S_3^+ \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

と表現できる。境界面 S_1, S_2, S_3 はDEMで与えられ、地質表示面は境界面 S_3 を指定した。

① 論理モデル

- (1) 地質構造の論理モデルを入力する。

第9図(a)の設定画面から地質構造の論理モデルのテキスト形式のデータ(第2表)をGeomodel2003に入力する。データの1行目の3は境界面の数を表す。+1は境界面より上側の領域を表し、-1は境界面より下側の領域を表す。0は境界面とは無関係であることを表す。

- (2) 境界面の格子データファイルを指定する。

第9図(a)の設定画面から面 S_1, S_2, S_3 の格子データファイルを順番に指定する。

- (3) 地質体の色を指定する。

第9図(a)の設定画面から地質体 b_1, b_2, b_3 の色を下位から順番に指定する。

② 表示格子作成

- (4) 地質表示面の格子データファイルを指定する。

第9図(b)の設定画面から地質表示面の格子データファイルを指定する。地表面上に地質分布を表示するので、境界面 S_3 を指定する。

- (5) 地質体分布の表示法を選択する。

第9図(b)の設定画面から地質体分布域の表示法を選択する。地質平面図と立体地質図を作成する場合は、

第2表 Geomodel2003に入力する地質構造の論理モデルのテキストファイル。

3, S1, S2, S3
b1, -1, -1, -1
b2, +1, -1, -1
b3, 0, +1, -1
b0, 0, 0, +1

設定画面(5-1)に底面の標高を入力し、「表示格子の作成」ボタンをクリックする。地質断面図を作成する場合は、設定画面(5-2)の測線の基点(x, y)を入力し、方角指定もしくは終点指定をおこなう。測線の指定が終わると、「表示格子の作成」ボタンをクリックする。

③ 描画設定

(6) 表示パラメータを設定する。

第9図(c)の設定画面から地質平面図または地質断面図(2次元)、立体地質図(3次元)の表示に用いるパラメータを設定する。等高線を表示する場合は、枠内の「コンターの設定」をおこなう。また、枠内の「画像選択前にチェック」において地質境界線を表示または非表示にすることができる。

ここまでの設定を終えると、下枠内の「描画面面操作」のボタンを選択して地質図を表示できる。このとき、地質平面図または立体地質図を表示する場合は、「地質図」というボタンを選択する。第9図(d)に塩野ほか(2000)の立体地質図の表示例(格子数は 41×41)を示す。Geomodel2003では格子セル内を1色の色で塗りつぶすため、色の境目が格子の縁にそってギザギザになる。これは格子データを補間により格子数の多い格子データに変換することで避けることができる。また、地質断面図を表示する場合は、「断面図」というボタンを選択する。第9図(e)に塩野ほか(2000)の地質断面図の表示例を示す。測線は基点(0,0)から終点(1000,1000)を指定した。

④ 出力

作成した地質図は第9図(f)の設定画面から画像ファイル(BMP形式)として保存できる。クリップボードへコピーすると、他のソフトで画像を使用できる。

Geomodel2003では地質境界線を区別するために、地質境界線の色を変更して表示する機能も付属として付け加えた。第10図に地質境界線の色を指定する設定画面と描画面面を示す。使用したデータは塩野ほか(1990)のデータである。地質構造の論理モデルを入力し、表示された地質構造の論理モデルの境界面の名前をマウスでクリックすることで、境界線に任意の色を指定できる。例えば、この機能をつけることで地質境界線をそれぞれ区別でき、断層を含む地質構造では断層線と地質境界線の違いを明確に表示できる。

4.3 拡張地質関数を用いた地質境界線の表示

(a) 地質境界線の表示法の検証

本論文では拡張地質関数を用いた地質境界線の表示法について述べたが、升本ほか(2001)や米澤ほか(2002)では地質関数を用いて地質境界線を表示した。地質境界線の表示において、地質関数を用いた場合と拡張地質関数を用いた場合の比較を示す。使用したデータは4.2と同様、塩野ほか(2000)のデータである。

第11図(a)は地質関数を用いた地質境界線の表示法を適用した地質平面図である。格子数は 41×41 とし、格子線を比較のために表示した。第11図(a)の丸で囲んだ部分の格子セルを第11図(b)に示す。このセルは面 S_1 と面 S_2 が交わる部分である。この表示法は格子線上での地質表示面と各境界面との交点を求め、地質関数で求めた格子セルの4隅の格子点の地質体が一つでも異なればその交点をつないで地質境界線を描き、すべて同じときには地質境界線を描かないという単純な原理である。第11図(b)の④の格子セルでは、4隅の格子点の地質体がすべて b_3 であるため、交点をつないでいない。この表示法では格子間隔を大きくしたとき、実際には存在しない地質境界線が表示されるという問題が生じる。現実的には格子間隔を小さくすることで問題を回避できるが、地質境界線を表示する原理としては不完全である。

第11図(c)は拡張地質関数を用いた地質境界線の表示法を適用して描いた地質平面図である。第11図(c)の丸で囲んだ部分の格子セルを第11図(d)に示す。このセルは面 S_1 と S_2 が交わる部分である。第11図(d)の③の格子セルに注目すると、格子線上にある地質表示面と境界面 S_1 の交点の点 C_1 は拡張地質関数により (b_1, b_2) で直下にある地質体と直上にある地質体異なる。点 C_2 は (b_3, b_3) で直下にある地質体と直上にある地質体が同じである。このとき、4.1に示す判断にもとづき2点をつないで地質境界線とした。地質表示面と境界面 S_2 の交点は拡張地質関数により (b_2, b_3) と (b_1, b_3) で2点とも直下にある地質体と直上にある地質体異なるため、2点をつないで地質境界線とした。これにより、格子数を変えても不適切な地質境界線は表示されず、地質関数を用いた表示法に比べて改善された。

この表示法では格子セル内において2つの地質境界線が交差する場合、実際に存在しない地質境界線が描かれることになる。第12図に示す③の格子セルのように2つの地質境界線が交差する交点において、拡張地質関数を適用すれば原理的には途中まで線を引くことは可能であるが、Geomodel2003では採用していない。これは(4.1)式で示したように、格子線上で地質表示面と各境界面の標高差が0となる点のみを求め、地質表示面上で複数の境界面が交わる点を求めているためである。

(b) 地質表示面について

Geomodel2003で扱う地質表示面は、入力したDEMの標高値から 10^{-6} だけ低い標高値に変換して処理している。これは地質表示面に地表面のDEMをそのまま入力した場合、地質表示面上に実際には存在しない地質境界線が表れてくるためである。第13図にその例を示す。地質体 b_1 を基盤として地質体 b_2 が堆積した後に侵食作用があり、その後地質体 b_3 が堆積した場合の地質構造である。面 S_1 は地質体 b_1 と b_2 の地質境界面を通り空間 Ω を2分割する面であり、面 S_2 は地質体 b_1 と b_2 が地質体 b_3 と接して空間 Ω を2分割する面である。面 S_3 は地表面である。面 S_3 をそのまま地質表

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

第9図 Geomodel2003の画面。塩野ほか(2000)のデータを使用した。

- (a) ①論理モデル設定画面, (b) ②表示格子設定画面,
- (c) ③描画設定画面, (d) 地質平面図の出力例(等高線間隔は10m),
- (e) 立体地質図の出力例, (f) 地質断面図の出力例。

第10図 地質境界線の色の設定画面。
塩野ほか (1997) のデータを使用した。

第11図 塩野ほか (2000) のデータを用いた地質境界線の表示例 (格子数は 41×41 , 等高線間隔 10m).
 b_1, b_2, b_3 は地質体, 面 S_1, S_2 は境界面を表す. (a) 地質関数を用いて地質境界線を表示した例 (地質平面図).
 (b) 格子セルの4隅の格子点における地質体を用いた地質境界線の表示法. ①から④は格子セルの番号を示す.
 ●上の地質体は地質関数より求めた. (c) 拡張地質関数を用いて地質境界線を表示した例 (地質平面図).
 ●上の地質体は地質関数より求めた. (d) 格子線上にある点の直下にある地質体と直上にある地質体を用いた地質境界線の表示法. ●は拡張地質関数より地質境界上の点と判断された点であり, ○は地質境界上の点ではないと判断された点である.

第12図 格子セル内における地質境界線の描き方。
 b_1, b_2, b_3 は地質体を表し、面 S_1, S_2 は境界面を表す。
●は拡張地質関数により地質境界上の点と判断された点であり、○は地質境界上の点ではないと判断された点である。

第13図 地質表示面 H の設定。
 b_1, b_2, b_3 は地質体を表し、面 S_1, S_2, S_3 は境界面を表す。
●は拡張地質関数により地質境界上の点と判断された点であり、○は地質境界上の点ではないと判断された点である。

示面として扱うと、面 S_1 と面 S_3 が交わる点では拡張地質関数により (b_3, b_0) という値がえられる。これは直下にある地質体と直上にある地質体が異なるため、この点は地質境界上の点であると判断される。この問題を解決するため、地質表示面は与えたDEMよりも問題にならないだけ低い標高をもつ面 H とすると、面 S_1 と面 H が交わる点では (b_3, b_3) という値がえられる。直下にある地質体と直上にある地質体は同じであるため、この点は地質境界ではないという判断が可能である。

地質表示面という概念を導入することで、任意の断面に地質境界線を含む地質図を作成できる。第14図(a)は塩野ほか(2000)のデータに走向 $N45^\circ W$ 、傾斜 $20^\circ N$ の地質表示面を与えたときの地質境界線を含む立体地質断面図である。格子数は 41×41 とした。第14図(b)は地質表示面に標高160mの水平面を与えたときの地質境界線を含む立体地質断面図である。Geomodel2003では、地質表示面に与え

第14図 地質表示面の与え方を変えた地質境界線の表示例（格子数は 41×41 、等高線間隔10m）。
塩野ほか(2000)のデータを使用した。

(a) 地質表示面を斜めの面($N45^\circ W, 20^\circ N$)としたときの地質境界線の表示例（立体地質図）。(b) 地質表示面を水平面（標高160m）としたときの地質境界線の表示例（立体地質図）。

る面の違いでさまざまな地質図が表現できる。

(c) 実際の3次元地質モデルへの適用

これまでGeomodel2000では表現できなかった地質境界線を拡張地質関数の原理を導入したGeomodel2003を用いて、実際の3次元地質モデルに適用した例を示す。ここでは地質調査所発行の5万分の1地質図幅「本荘」（大沢ほか, 1977）の北部地域（南北約6.5km×東西約8.7km）の3次元地質モデルを適用した。3次元地質モデルの構築方法は升本ほか(2000)に従った。第15図(a)は地質体の分布を立体地質図に表現した例である。第15図(b)は立体地質図に地質境界線を表示した例である。地質境界線を表示することで、より明確な立体地質図を作成できた。また、側面にも地質境界線が正しく表示されていることがわかる。第15

第15図 「本荘」地域（大沢ほか,1977）での地質境界線の表示例（等高線間隔20m）.

(a) 地質境界線を含まない立体地質図の表示例. (b) 立体地質図の表示例.
(c) 地質平面図の表示例. (d)地質断面図の表示例.

図(c)は地質平面図に地質境界線を表示した例である. 第15図(d)は(c)における測線A-A', B-B', C-C'間の断面図の表示例である. これにより, 作成したGeomodel2003は地質図の表示法として必要な図が描けることがわかる.

(d) その他の表示法

3次元地質モデルの可視化手法として, 升本ほか(2000)や Masumoto *et al.*(2004)などは, GRASS GISを用いた地質境界面の可視化をおこなってきた. この原理は境界面上の点の直下にある地質体と直上にある地質体を求め, 両者が同じ部分をマスクすることで地質境界面を可視化している. 具体的には, 境界面上の点の直下にある地質体は2.2で示した地質関数の概念を用いて求めている. 境界面上の点の直上にある地質体は(2.10)式で示した関数 g_2 の定義を, 空間 Ω 内の任意の点が境界面上にある場合も2進数の1を機械的に対応づける, と再定義することで求めている. このとき, 境界面上の点とその点の直上の $\minset$ に含まれると考えている. この原理は拡張地質関数の概念と同様の原理

である. ただし, 拡張地質関数という概念を新たに定義したことで, 境界面上の点の直下にある地質体と直上にある地質体を同時に対応づけることができ, その理論的な根拠も示されたといえる. さらに, 拡張地質関数を用いた地質境界線の表示法を導入することで, GRASS GISで扱われていなかった地質境界線を表示できる可能性がでてきた.

5. おわりに

地質関数をもとに3次元空間内の任意の点に対して, その点の直下にある地質体と直上にある地質体の対を対応づける拡張地質関数を新しく定義した. 拡張地質関数を境界面上の点に適用することで, 地質境界を判断することができる. この概念を用いて地質境界線を表示する原理・アルゴリズムを開発し, Visual Basicプログラム Geomodel2003を作成した. Geomodel2003は従来開発されてきたサブルーチンをそのまま活用できるように改良をおこない, 地質平面図, 地質断面図, 立体地質図のすべてに地質境界線を表示することができた. また, Geomodel2003における地

質境界線の表示法の妥当性を検証し、これまで課題として残されていた、実際に存在する地質境界線のみを地質図に表示できることを示した。今後、本論文で示した地質境界線の表示法を GRASS GIS に導入することで、これまで扱われていなかった地質境界線を GRASS GIS でも扱える可能性がある。

本論文で示した Geomodel2003 のプログラムは、日本情報地質学会のホームページ(<http://www.jsgi.org/>)上でダウンロードできる。

本研究を進めるにあたり、科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)、課題番号：14540430）の一部を使用した。

文 献

- Gill, A.(1976)*Applied Algebra for the Computer Sciences*. Prentice-Hall, Inc., 432p.
- 升本眞二・塩野清治・Venkatesh Raghavan・坂本正徳・弘原海 清（1997）地質情報と GIS —地質図情報の特殊性について—。情報地質，vol.8, no.2, pp.99-106.
- 升本眞二・Venkatesh Raghavan・青山隆行・塩野清治（1999）地質図幅をデータとした GIS による 3 次元地質モデル—新潟県小千谷地域の例—。情報地質，vol.10, no.2, pp.96-99.
- 升本眞二・根本達也・Venkatesh Raghavan・塩野清治（2000）GRASS GIS による地質断面図の可視化。情報地質，vol.11, no.2, pp.92-95.
- 升本眞二・根本達也・坂本正徳・塩野清治（2001）地質関数を用いた地質境界線の可視化。情報地質，vol.12, no.2, pp.94-95.
- Masumoto S., Raghavan V., Yonezawa G., Nemoto T. and Shiono K. (2004) Construction and Visualization of a Three Dimensional Geologic Model Using GRASS GIS. *Transactions in GIS*, vol.8, no.2, pp.211-223.
- 大沢 稔・高安泰助・池辺 稔・藤岡一男（1977）本荘地域の地質。地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），地質調査所，54p.
- Sakamoto M., Shiono K., Masumoto S. and Wadatsumi K. (1993) A Computerized Geologic Mapping System Based on Logical Model of Geologic Structures. *Nonrenewable Resources*, vol.2, no.2, pp.140-147.
- 坂本正徳・塩野清治・升本眞二（2000）論理地質学の理論を導入した 3 次元地質図作成システムの実用構成。情報地質，vol.11, no.2, pp.116-117.
- 塩野清治・升本眞二・弘原海 清（1990）パソコンによる地質図学演習。共立出版，174p.
- Shiono K., Masumoto S. and Sakamoto M. (1994) On Formal Expression of Spatial Distribution of Strata Using Boundary Surfaces. *Geoinformatics*, vol.5, no.4, pp.223-232.
- 塩野清治・升本眞二・坂本正徳（1998）地層の 3 次元分布の特性と地質図作成のアルゴリズム—地質構造の論理モデル—。情報地質，vol.9, no.3, pp.121-134.
- 塩野清治（1999）地質学のための離散数学入門。情報地質，vol.10, no.1, pp.13-42.
- 塩野清治・升本眞二・坂本正徳・八尾 昭（2000）地質調査と地質図の論理—コンピュータ処理の課題—。情報地質，vol.11, no.4, pp.241-252.
- U.S. Army Corp of Engineers (1993) *GRASS User's Reference Manual, ver.4.1*: Construction Engineering Research Laboratory Champaign, IL, 563p.
- 米澤 剛・升本眞二・坂本正徳・塩野清治（2002）地質境界線を可視化するための基本アルゴリズムと Geomodel 2000 への適用。情報地質，vol.13, no.2, pp.128-129.

要 旨

拡張地質関数を用いた地質境界線の表示

: 米澤 剛・升本 眞二・根本 達也・坂本 正徳・塩野 清治

地質関数は3次元空間内の任意の点に対して、その点がどの地質体に含まれるかを特定することができる関数であり、地質図のコンピュータ処理の基本要素である。地質関数を基礎にして3次元地質構造のモデル化あるいは可視化のアルゴリズムが開発されてきた。しかし、地質関数は地質境界という概念を含まないため、地質境界線の取り扱いが未解決の課題として残されていた。本論文ではこの課題を解決するために、3次元空間内の任意の点にその点の直下にある地質体と直上にある地質体の対を対応づける拡張地質関数を新たに定義した。拡張地質関数により地質体と地質体の境界を明確に定義できるため、地質図に地質境界線を表現することが可能となる。この拡張地質関数にもとづいて地質表示面に地質境界線を作図するアルゴリズムを開発し、Visual Basic プログラム Geomodel2003 として具体化した。このプログラムは従来開発されてきた Geomodel2000 を基礎にしている。既存のサブルーチンは可能な限りそのまま活用し、境界線を描くのに必要な部分のみを新たに追加した。いくつかのモデルを使って、アルゴリズムの妥当性と有効性を検証した。秋田県の本荘地域の3次元地質モデルを Geomodel2003 に適用して地質平面図、地質断面図や立体地質図のすべてに地質境界線を表示できることを確認した。

キーワード：地質関数，地質境界線，拡張地質関数，地質表示面，Geomodel2003