GEOINFORUM-2023 功績賞記念講演(2023年6月22日:岡山理科大学)

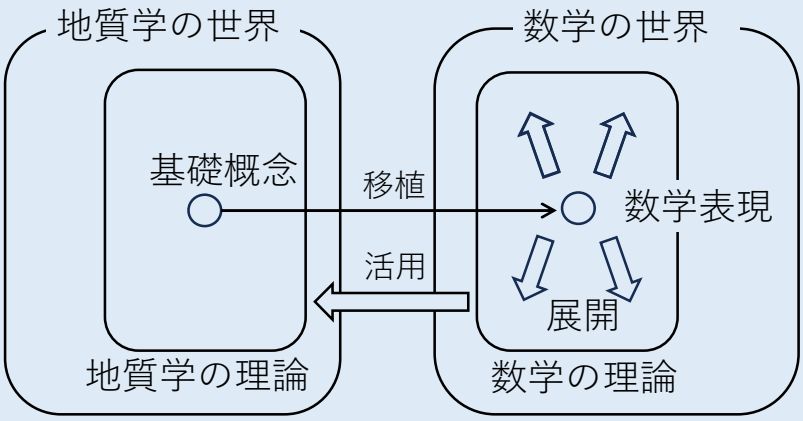
地質構造の論理モデルについて考えてきたこと

塩野 清治
（大阪市立大学名誉教授）

1

1．はじめに

地質学の基礎概念をうまく数学の世界に移植できれば，数学の世界で展開した「数学の理論」は「地質学の理論」として活用できる．この観点で「地質構造の論理モデル」のお話をします．

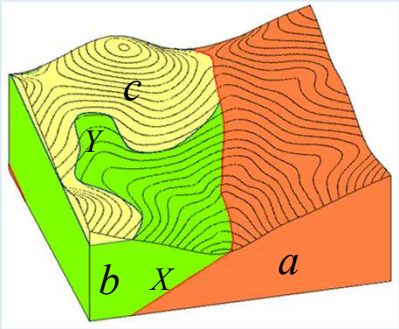


＊3次元地質モデリングについては 根本達也・野々垣 進・ベンカテッシュ ラガワン・升本眞二(2019) 情報地質，vol. 30, no. 4, pp. 181-195(30周年記念号)を．．．

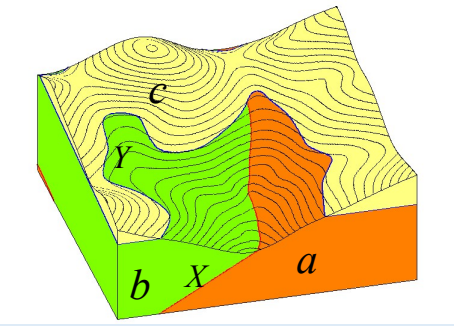
2

調査地域の「層序と構造」を再現する3次元地質モデルをえるには，地層と境界面の関係を正しく設定する必要がある

基盤aの上に地層bとcが堆積



地層aとbが侵食された後，地層cが堆積



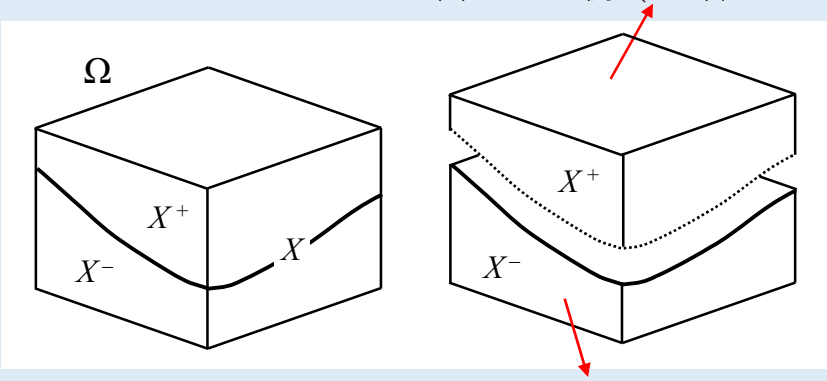
Geomodel2003による作図例(３つの面 X, Y, Hのデータは同じ)
米澤 剛・升本眞二・根本達也・坂本正徳・塩野清治（2004）情報地質, vol.15, no.4, pp.193-206.　Geomodel2000*に地質境界線の作図機能を追加.
*坂本正徳・塩野清治・升本眞二 (2000) 情報地質, vol.11, no.2, pp.116–117.

3

２．地質構造の論理モデルとその数式表現

定義： 面 X によって３次元領域Ωを上側の X^+と下側の X^-に２分割する.

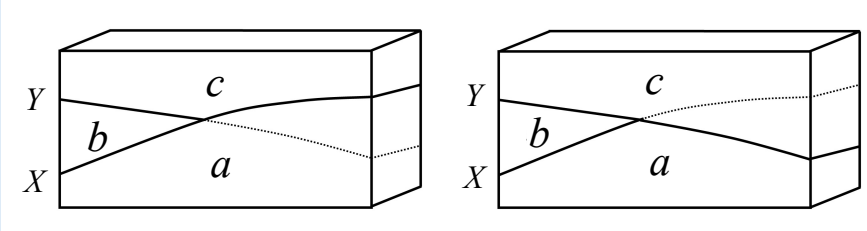
面Xより上側（Xを含まない）



面Xより下側（Xを含む）

4

地層a, b, cの分布域を「２分割されたブロック」の共通集合として表現した例



$a = X^-$
$b = X^+ \cap Y^-$
$c = X^+ \cap Y^+$

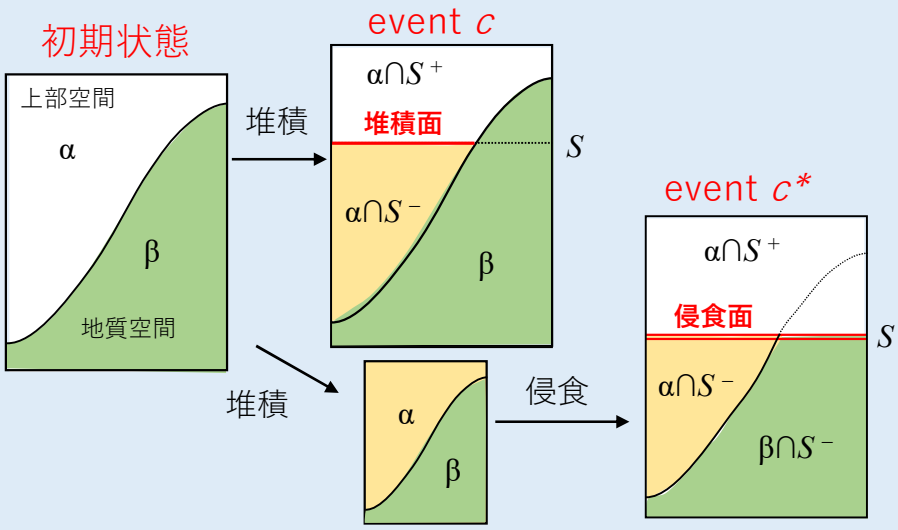
$a = X^- \cap Y^-$
$b = X^+ \cap Y^-$
$c = Y^+$

地層と境界面の関係を「地質構造の論理モデル」という．

5

2つのevent c, c^* で形成される地質構造の論理モデルに限定してお話します．

塩野清治・升本眞二・坂本正徳 (1998)
情報地質，vol. 9，no. 3，pp. 121-134.



6

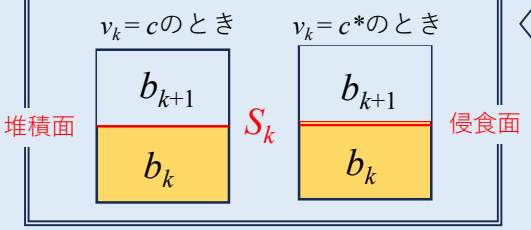
定義：event c, c^*で形成される地質構造(再帰的定義)

Eventの列 $V_n = (v_1, v_2, \ldots, v_n)$ に対して，(i)(ii)より導かれる

$B_n = \{b_1, b_2, \ldots, b_n, \alpha\}$

を「V_nによって形成される地質構造」という．

・b_kとb_{k+1}の接触面はS_k
・$v_k = c$ のとき，　S_kは堆積面
・$v_k = c^*$のとき，　S_kは侵食面



[B_1：初期状態]
(i) $k = 1$のとき
$b_1 = S_1^-$
$\alpha = S_1^+$

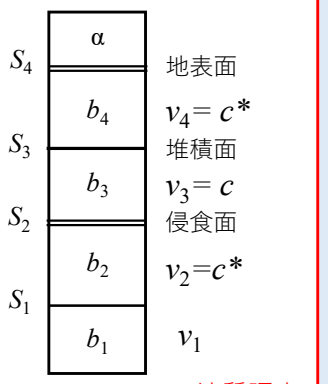
[$B_{k-1} \rightarrow B_k$：次の状態]
(ii) $k = 2, \ldots, n$に対して
・$v_k = c$のとき，
$b_i = b_i \ (i = 1, \ldots, k-1)$
$b_k = \alpha \cap S_k^-$
$\alpha = \alpha \cap S_k^+$
・$v_k = c^*$のとき，
$b_i = b_i \cap S_k^- \ (i = 1, \ldots, k-1)$
$b_k = \alpha \cap S_k^-$
$\alpha = S_k^+$

岩村里美・升本眞二・塩野清治（2012）

7

活用：地質調査で判明した層序(地層の順序と関係)から論理モデルを導く手順

(a) 層序(柱状図)



地質調査

(b) Eventの列

$V_4 = (v_1, c^*, c, c^*)$

(定義にしたがって式を展開する)

(c) 地質構造の論理モデル

$B_4 = \{b_1, b_2, b_3, b_4, \alpha\}$

$b_1 = S_1^- \cap S_2^- \cap S_4^-$
$b_2 = S_1^+ \cap S_2^- \cap S_4^-$
$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$
$b_4 = S_2^+ \cap S_3^+ \cap S_4^-$
$\alpha = S_4^+$

以下ではこの論理モデルを使用

岩村里美・升本眞二・塩野清治（2012）
情報地質，vol. 23, no. 1, pp. 3-16.

8

補足：地質構造の論理モデルはラベル付き２分木でグラフ表現できる．関係の全体像を把握するのに適している．

$V_4=(v_1, c^*, c, c^*)$の場合

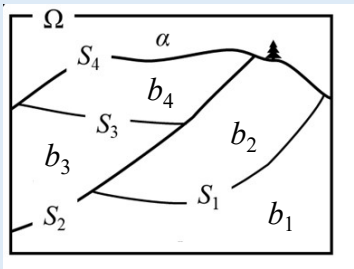
$b_1 = S_1^- \cap S_2^- \cap S_4^-$

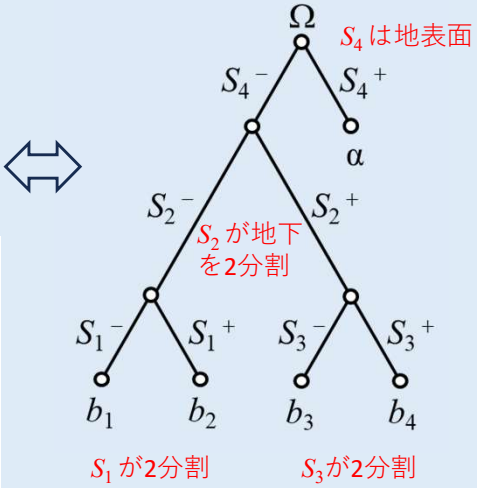
$b_2 = S_1^+ \cap S_2^- \cap S_4^-$

$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$

$b_4 = S_2^+ \cap S_3^+ \cap S_4^-$

$\alpha = S_4^+$





詳しくは，塩野清治・山根裕之（2009）情報地質，vo.20, no.3, pp.151-167.

9

3．地層の境界／接触面

ここだけの仮定：
X^+に面Xを含める．
$X^- \cap X^+ = X$

2つの地層の境界／接触面

$a \cap b = (X^- \cap X^+) \cap Y^- \cap H^-$
$= X \cap (Y^- \cap H^-)$

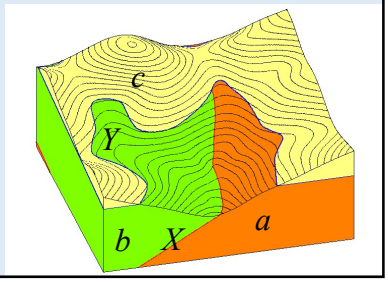
・aとbの境界は 面X.
・両者が接するのは，
面 Xのうち $(Y^- \cap H^-)$の部分.

$b \cap c = X^+ \cap (Y^+ \cap Y^-) \cap H^-$
$= X^+ \cap Y \cap H^-$

・bとcの境界は 面Y.
・両者が接するのは，
面 Yのうち $(X^+ \cap H^-)$の部分.

例：地層aとbが侵食された後，地層cが堆積した．
X：aとbの境界面
Y：侵食面
H：地表面

$a = X^- \cap Y^- \cap H^-$
$b = X^+ \cap Y^- \cap H^-$
$c = Y^+ \cap H^-$
$\alpha = H^+$（上部空間）



10

$b \cap \alpha = X^+ \cap Y^- \cap (H^+ \cap H^-)$
$= H \cap (X^+ \cap Y^-)$

・bとαの境界は 地表面H.
・両者が接するのは,
地表面 Hの内 $(X^+ \cap Y^-)$の部分.

例：地層aとbが侵食された後，地層cが堆積した.
X：aとbの境界面
Y：侵食面
H：地表面

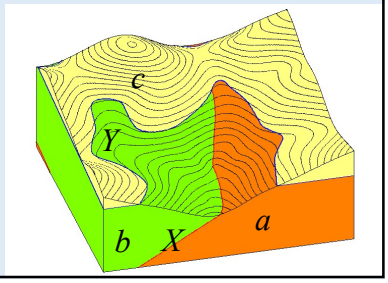
$a = X^- \cap Y^- \cap H^-$
$b = X^+ \cap Y^- \cap H^-$
$c = Y^+ \cap H^-$
$\alpha = H^+$（上部空間）

地層の分布域の3次元形状

以上をまとめると
$b = X^+ \cap Y^- \cap H^-$
で表現される地層bの3次元形状(分布域)は3つの面分：

$X \cap Y^- \cap H^-$ $(X^+ \rightarrow X)$
$X^+ \cap Y \cap H^-$ $(Y^- \rightarrow Y)$
$X^+ \cap Y^- \cap H$ $(H^- \rightarrow H)$

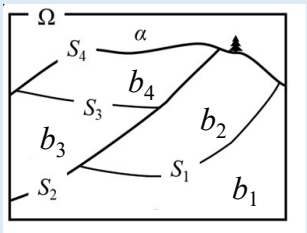
をつなぎ合わせたものである.



11

$V_4 = (v_1, c^*, c, c^*)$の場合で考えると

$b_1 = S_1^- \cap S_2^- \cap S_4^-$
$b_2 = S_1^+ \cap S_2^- \cap S_4^-$
$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$
$b_4 = S_2^+ \cap S_3^+ \cap S_4^-$
$\alpha = S_4^+$ （S_4は地表面）



地層b_1とb_3地層の境界／接触面

$b_1 \cap b_3 = S_1^- \cap (S_2^- \cap S_2^+) \cap S_3^- \cap S_4^-$
$= S_1^- \cap S_2 \cap S_3^- \cap S_4^-$

・b_1とb_3の境界は 面S_2 .
・両者が接するのは，面 S_2 のうち $(S_1^- \cap \underline{S_3^- \cap S_4^-})$ の部分.

模式断面図では描き切れていない

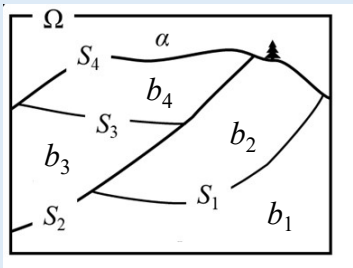
12

地層 b_3 と $b_1, b_2, b_4, \boldsymbol{\alpha}$ との接触面

$$b_3 \cap b_1 = S_1^- \cap S_2 \cap S_3^- \cap S_4^-$$
$$b_3 \cap b_2 = S_1^+ \cap S_2 \cap S_3^- \cap S_4^-$$
$$b_3 \cap b_4 = S_2^+ \cap S_3 \cap S_4^-$$
$$b_3 \cap \alpha = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4$$

＊$(b_3 \cap b_1)$と$(b_3 \cap b_2)$はともに面S_2に含まれる．両者をつなげると

$$(b_3 \cap b_1) \cup (b_3 \cap b_2) = S_2 \cap S_3^- \cap S_4^-$$



$$b_1 = S_1^- \cap S_2^- \cap S_4^-$$
$$b_2 = S_1^+ \cap S_2^- \cap S_4^-$$
$$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$$
$$b_4 = S_2^+ \cap S_3^+ \cap S_4^-$$
$$\alpha = S_4^+$$

地層b_3の分布域の3次元形状

$$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$$

で表現される地層b_3の3次元形状(分布域)は3つの面分：

$S_2 \cap S_3^- \cap S_4^-$　$(S_2^+ \rightarrow S_2)$
$S_2^+ \cap S_3 \cap S_4^-$　$(S_3^- \rightarrow S_3)$
$S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4$　$(S_4^- \rightarrow S_4)$

をつなぎ合わせたものである．

＊コンピュータ処理 が可能
大熊俊明・塩野清治（2016）GeoCalcVB：地質構造の論理モデルを解析するためのビット演算プログラム．情報地質，vol.27，no.4，pp.169-182.

13

4．露頭位置を境界面の推定に有効活用するには

露頭位置　：$P_k\,(x_k, y_k, z_k)$にb_3が露出
論理モデル：$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$　（S_4は地表面）
境界面　　：$S_1, S_2, S_3 \rightarrow f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y)$

S_1：P_kはS_1と無関係　⇒　－－－

S_2：P_kはS_2より上側にある　⇒　$f_2(x_k, y_k) \leqq z_\kappa$

S_3：P_kはS_3より下側にある　⇒　$f_3(x_k, y_k) \geqq z_\kappa$

露頭P_k $(k=1, 2, \ldots, N)$と面S_1, S_2, S_3の関係を調べると面$f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, $f_3(x, y)$に対する不等式標高データがえられる．

⇒　不等式標高データを満たす曲面を推定すると
露頭位置を最大限に活用した境界面の推定ができる

14

露頭位置　：$P_k\,(x_k, y_k, z_k)$にb_1とb_3の境界が露出

論理モデル：$b_1 = S_1^- \cap S_2^- \cap S_4^-$　（S_4は地表面）

$b_3 = S_2^+ \cap S_3^- \cap S_4^-$

・$P_k\,(x_k, y_k, z_k)$にb_1が露出するので

S_1：P_kはS_1より下側にある　⇒　$f_1(x_k, y_k) \leqq z_k$

S_2：P_kはS_2より下側にある　⇒　$f_2(x_k, y_k) \leqq z_k$

S_3：P_kはS_3と無関係　⇒　－－－

・$P_k\,(x_k, y_k, z_k)$にb_3が露出するので

S_1：P_kはS_1と無関係　⇒　－－－

S_2：P_kはS_2より上側にある　⇒　$f_2(x_k, y_k) \geqq z_k$

S_3：P_kはS_3より下側にある　⇒　$f_3(x_k, y_k) \leqq z_k$

＊上の不等式標高データで十分である．

$f_1(x_k, y_k) \leqq z_k$

$f_2(x_k, y_k) = z_k$　$[\leftarrow f_2(x_k, y_k) \leqq z_k$かつ$f_2(x_k, y_k) \geqq z_k]$

$f_3(x_k, y_k) \leqq z_k$

も有効である．　$\because b_1 \cap b_3 = S_2 \cap (S_1^- \cap S_3^- \cap S_4^-)$

15

不等式標高データ，走向・傾斜データを活用した曲面推定法

HORIZN（N88-BASIC）→ HORIZON(FORTRAN)

塩野清治・弘原海 清・升本眞二（1987）最適化原理による地層面の推定－不等式データや傾斜データを用いた曲面の推定－．情報地質，No.12，pp.299-328.

TERRAMOD（Visual Basic版）：推定と表示

坂本正徳・升本眞二・Venkatesh RAGHAVAN・塩野清治（1995b）の開発－デジタル標高データを用いた地形の3次元モデル作成プログラム－．情報地質，vol.6，no.4，pp.209-227.

Horizon2000（FORTRAN版）

塩野清治・能美洋介・升本眞二・坂本正徳（2001）Horizon2000：等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良．情報地質，vol.12, no.4, pp.229-249.

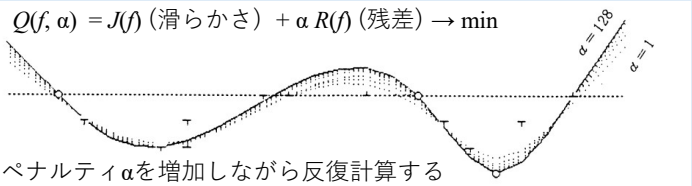
BS-Horizon（3次B-スプライン：FORTRAN版）

野々垣 進・升本 眞二・塩野清治（2008）BS-Horizon：3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定．情報地質，vol.19, no.2, pp.61-77.

Terramod-BS（BS-Horizon のVisual Basic版）

坂本正徳・野々垣 進・升本眞二（2012）BS-Horizonを組み込んだ地層境界面推定・表示 Visual Basicプログラム．情報地質，vol.23, no.4, pp.169-178.

$Q(f, \alpha) = J(f)$（滑らかさ）$+ \alpha\, R(f)$（残差）$\rightarrow$ min

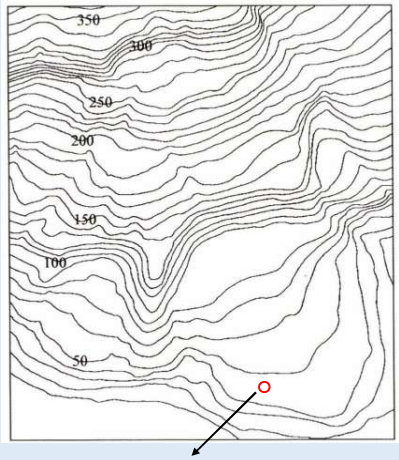


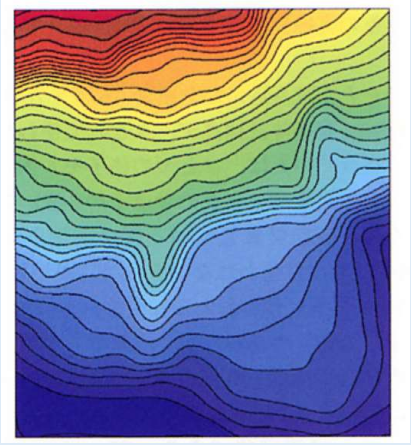
ペナルティαを増加しながら反復計算する

16

参考：Stripe法：等高線の間に分布する不等式標高情報からDEMの作成

能美洋介・塩野清治・升本眞二・ベンカテッシュ ラガワン（1999）地形図を基にしたDEMの作成法．情報地質，vol.10，no.4，pp.235-246.





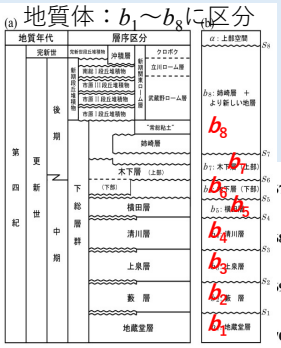
(x_k, y_k)：50mと60mの等高線の間の点

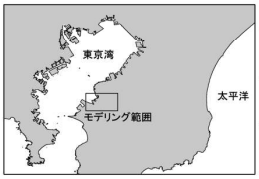
不等式標高データ：　$f(x_k, y_k) > 50,\quad f(x_k, y_k) < 60$

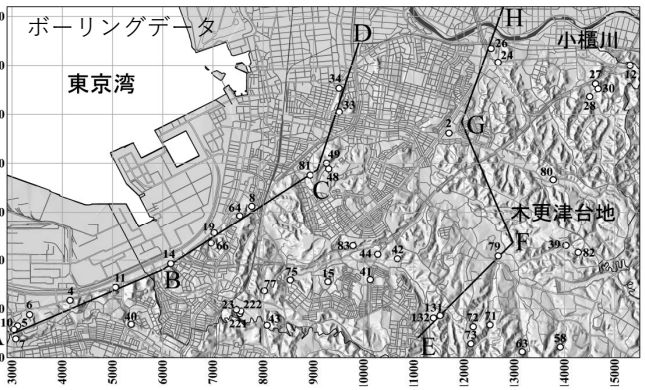
17

補足：3次元地質モデリング：木更津地域の例

野々垣 進・中澤 努 (2015) 論理的手法に基づく木更津地域の3次元地質モデリング. 情報地質, vol.26, no.1, pp.3–13.



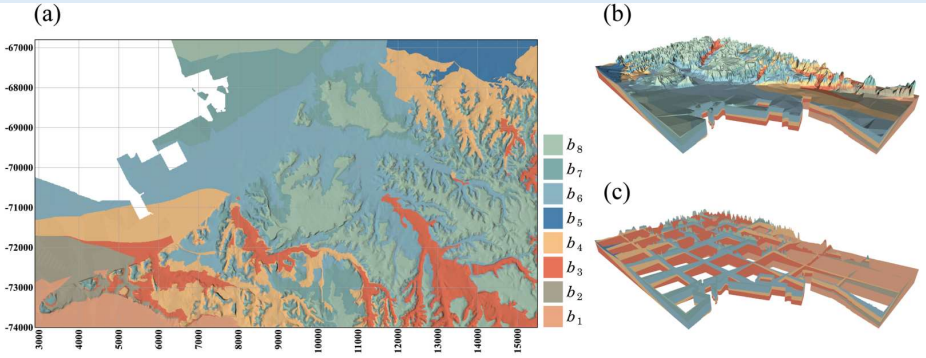




第１図　モデリング範囲と露頭柱状図の位置．番号を付記した白抜きの丸点が露頭柱状図の位置を表す．線分ABCDと線分EFGHは，第７図の断面図の測線を表す．座標値は，世界測地系（JGD2000）の平面直角座標系第９系による．背景図には，国土地理院（2014）の基盤地図情報を利用した．

18

V_8=(v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)で形成された地質構造の論理モデルにもとづき，44本のボーリングデータから読み取った等式・不等式標高データを使って，BS-Horizonで境界面S_1～S_7を推定した．
→ 3次元地質モデルのGRASS-GISによる可視化(Masumoto *et al*.,2004).



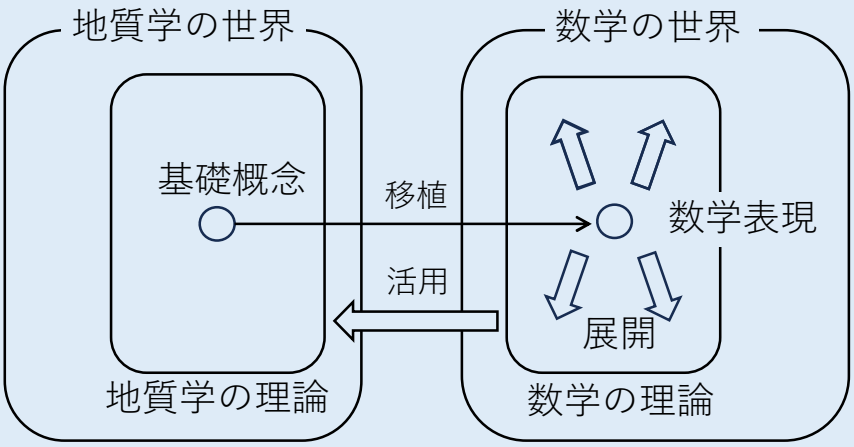
第５図　３次元地質モデル．(a) 地質平面図，(b) 立体地質図，(c) パネルダイアグラム．(a) では，地形による陰影を付加して地質分布を表示した．座標値は，世界測地系 (JGD2000) の平面直角座標系第９系による．(b) と (c) は北西部からの鳥瞰図であり，高さの強調を10倍としている．

Masumoto S., Raghavan V., Yonezawa G., Nemoto T., 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.

19

5．おわりに

地質学の基礎概念をうまく数学の世界に移植できれば，数学の世界で展開した「数学の理論」は「地質学の理論」として活用できる．具体例として「地質構造の論理モデル」のお話をしました．



20