

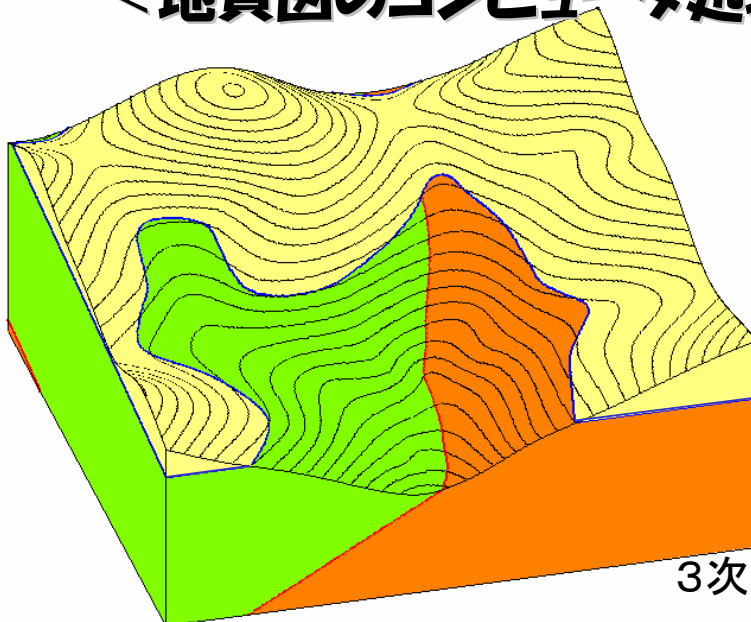
# 3次元地質モデリングの考え方



## 3次元地質モデリング

野外調査結果にもとづき、地下の地質構造を3次元モデルとして表現・可視化する一連の作業

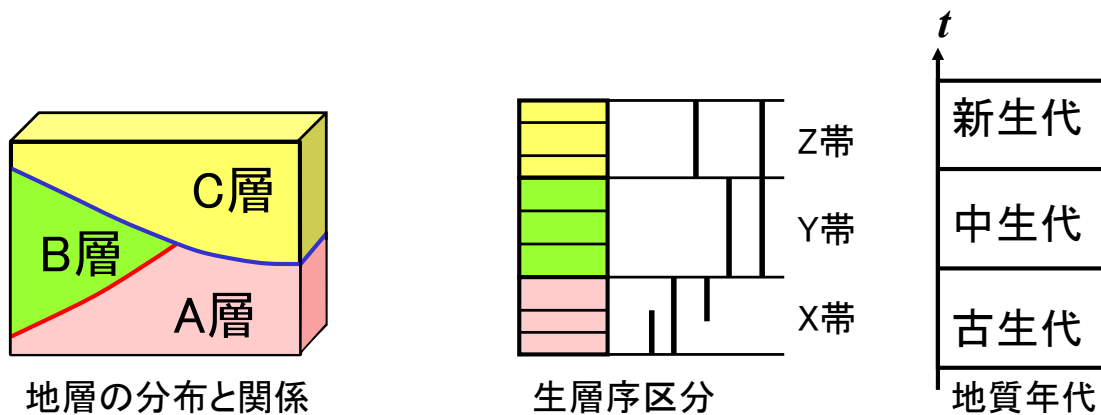
〈地質図のコンピュータ処理〉



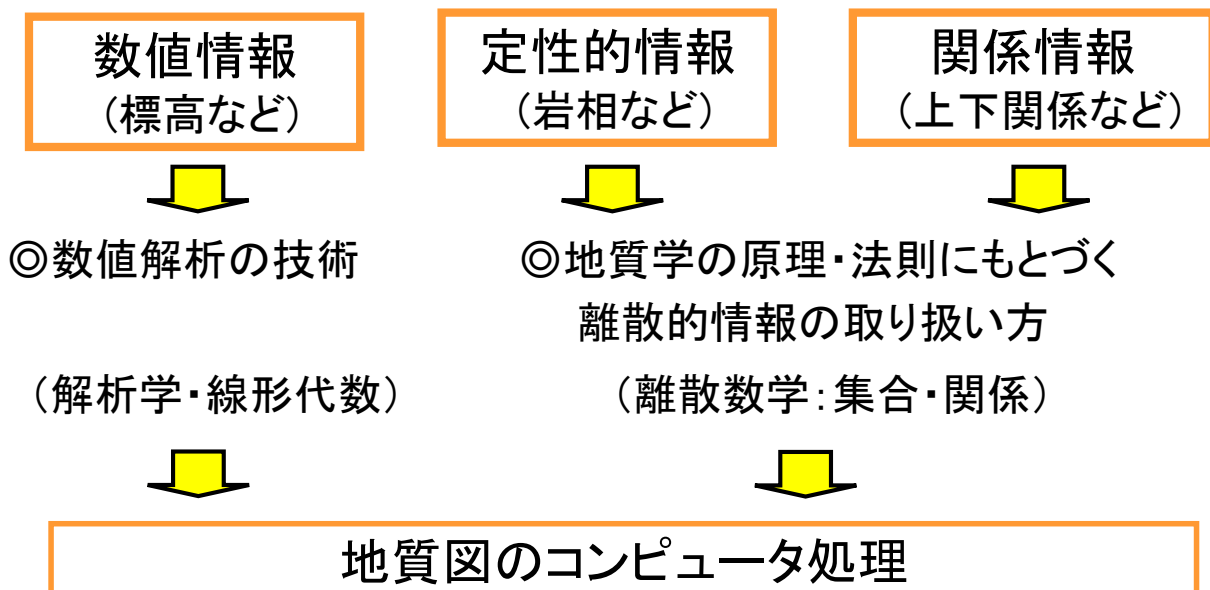
3次元地質モデルの例

## 留意点:地質学では空間や時間を離散的に取り扱う

- ◎空間をいくつかの地層や岩体に分割する
- ◎時間をいくつかの時代に区分する
- ◎離散的に認識された空間や時間の関係を議論する.
  - ・地層の上下関係や形成順序
  - ・化石による年代区分や地層の対比



## 留意点:地質図で扱う情報

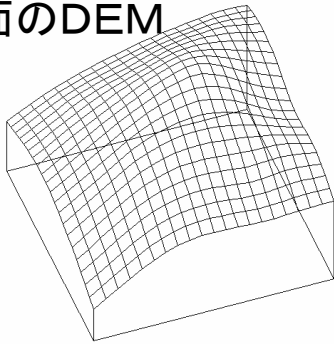


3次元地質モデリングには、コンピュータが得意とする  
**数値解析の技術**に地質学的意味をもつ**定性的情報**や  
**関係情報**を有機的に組み込んだ独特の技法が必要.

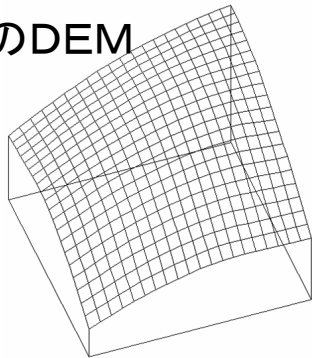
# 2つの地層で構成される3次元地質モデル

地形面と境界面のDEMがあれば、3次元地質モデルが確定する。

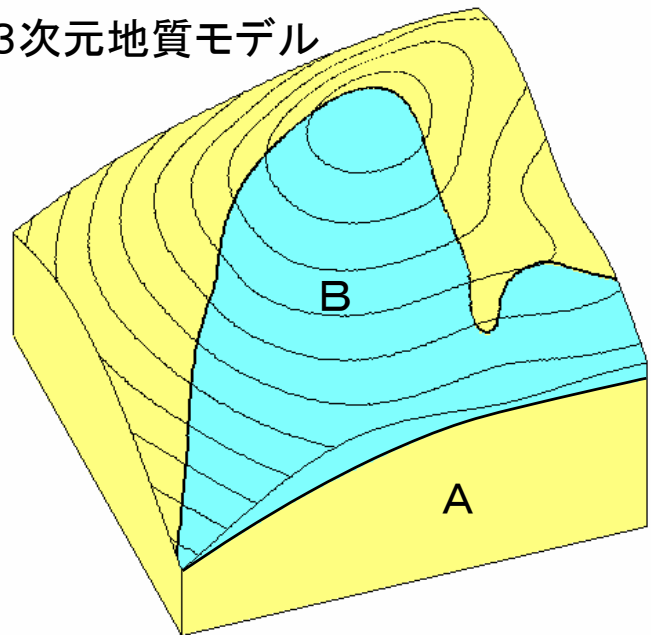
地形面のDEM



境界面のDEM



3次元地質モデル



境界面のDEMが焦点

## 境界面 $z = s(x, y)$ を決めるためのデータ

(1) 露頭位置  $(x_p, y_p, z_p)$

A層(下位)の露頭

$$s(x_p, y_p) \geq z_p$$

→  $x_p, y_p, z_p, 1$

B層(上位)の露頭

$$s(x_p, y_p) \leq z_p$$

→  $x_p, y_p, z_p, -1$

A層とB層の境界

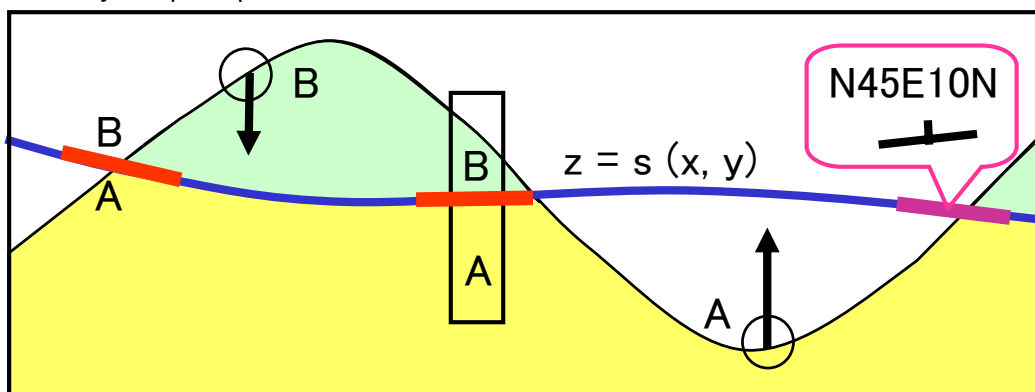
$$s(x_p, y_p) = z_p$$

→  $x_p, y_p, z_p, 0$

(2) 走向・傾斜 (傾斜角:  $\theta_q$ , 傾斜方位:  $\phi_q$ )

$$s_x(x_q, y_q) = -\tan \theta_q \sin \phi_q$$

$$s_y(x_q, y_q) = -\tan \theta_q \cos \phi_q$$



## 境界面の求め方: Horizon2000 (塩野ほか, 2001)

等式・不等式最適化問題として, 境界面を決定する方法

制約条件:

$$(1) s(x_p, y_p) \geq z_p$$

$$s(x_p, y_p) \leq z_p$$

$$s(x_p, y_p) = z_p$$

$$(2) s_x(x_q, y_q) = -\tan \theta_q \sin \phi_q$$

$$s_y(x_q, y_q) = -\tan \theta_q \cos \phi_q$$

のもとで, 目的関数(曲面の滑らかさを評価する汎関数)

$$J(f) = \iint (s_{xx}^2 + 2s_{xy}^2 + s_{yy}^2) dx dy$$

を最小にする関数  $s(x, y)$  を求めよ.

○ 野外調査データを境界面の決定に最大限に生かせる

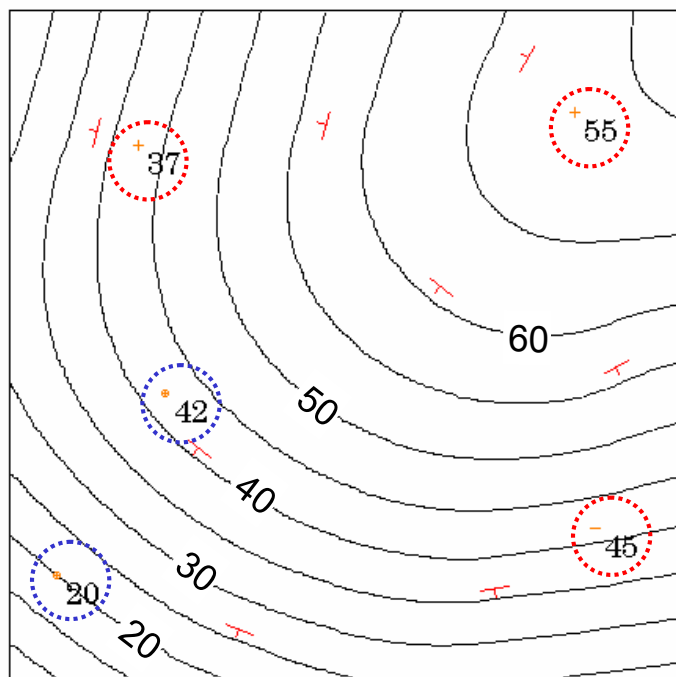
## Horizon2000による面の決定例

(1) 露頭位置に関するデータ

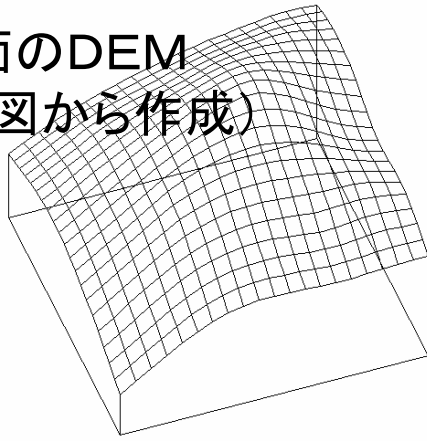
$p$	$x_p$	$y_p$	$z_p$	$l_p$
1	7	16	20	0
2	19	80	37	1
3	23	43	42	0
4	87	23	45	-1
5	84	85	55	1

(2) 走向傾斜に関するデータ

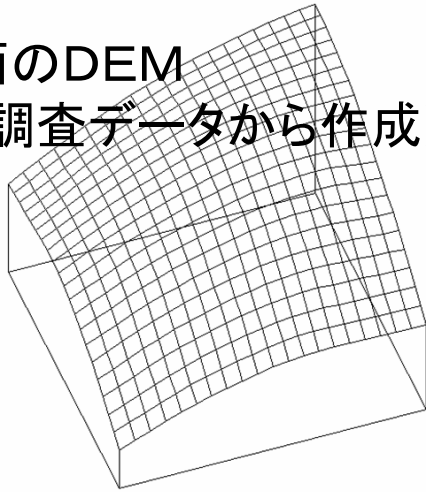
$q$	$x_q$	$y_q$	$z_q$	$\phi_q$	$\theta_q$
1	13	82	32	285	40
2	28	35	45	220	30
3	34	8	35	200	40
4	47	83	48	285	30
5	77	93	50	300	20
6	64	59	65	220	20
7	72	14	39	170	40
8	90	47	45	150	30



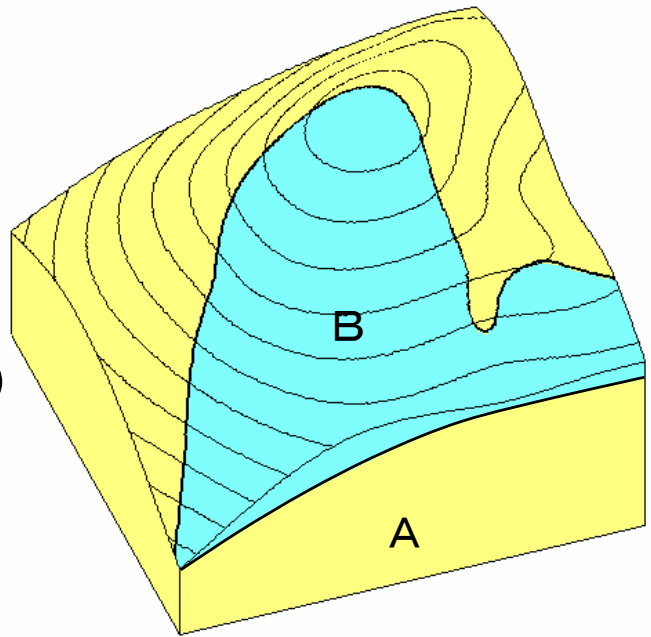
地形面のDEM  
(地形図から作成)



境界面のDEM  
(地質調査データから作成)

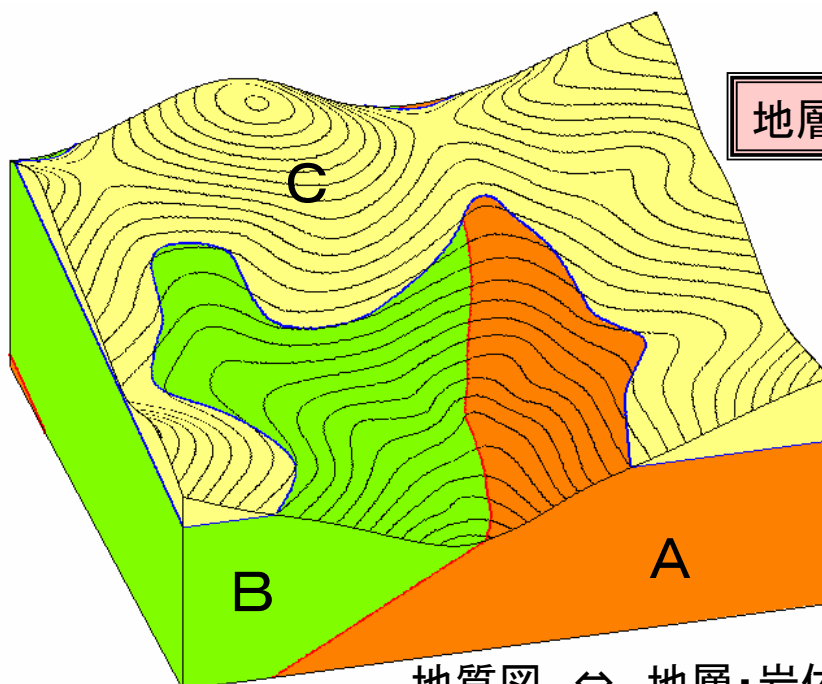


3次元地質モデル



## 3つの地層で構成される3次元地質モデル

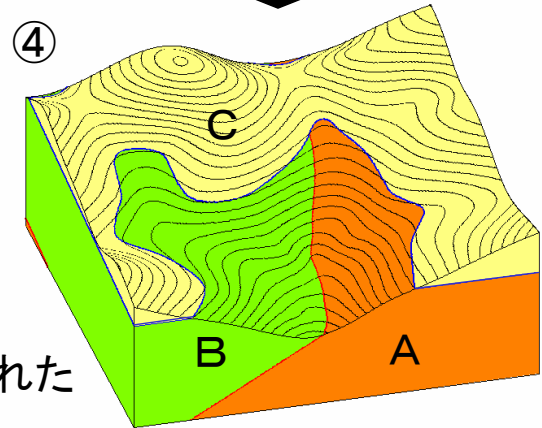
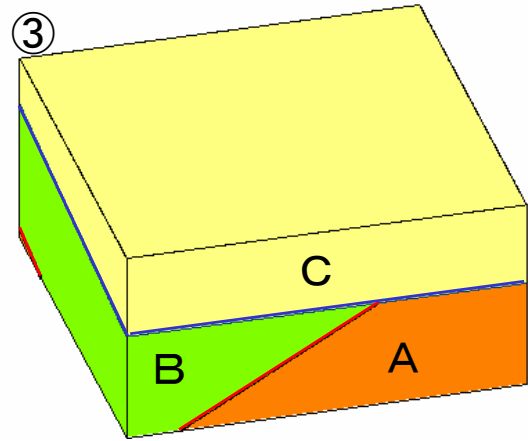
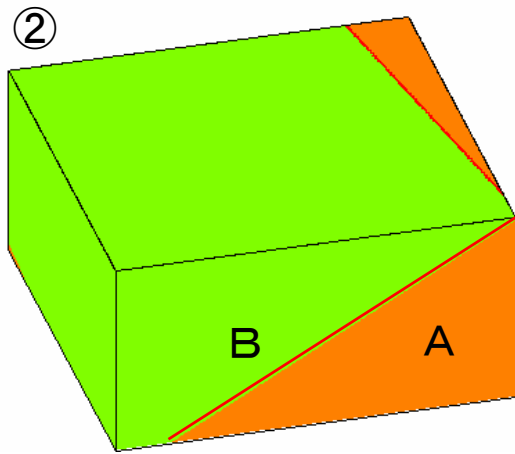
地層の空間分布と相互の関係を正確に表現する



地層が形成された歴史

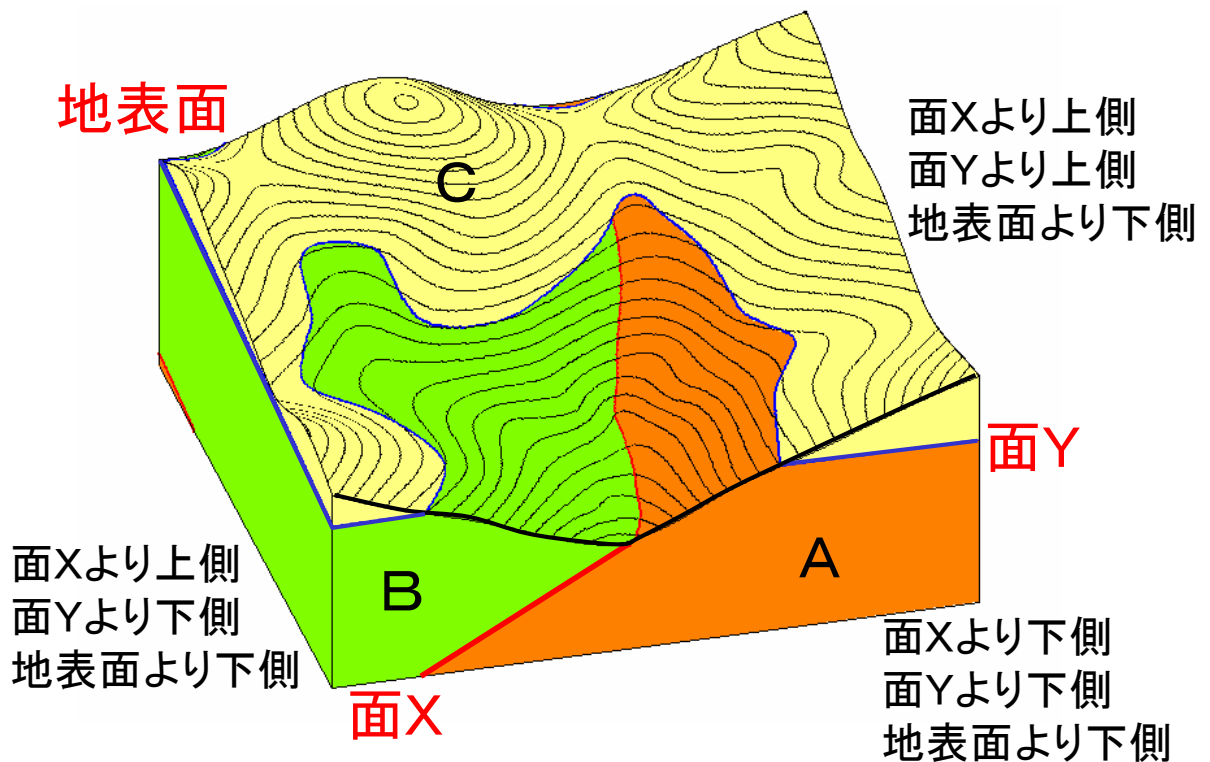
3つの地層の分布  
3つの地層の関係  
(C層がA層・B層を  
不整合で覆う)

地質図 ⇔ 地層・岩体が形成された歴史



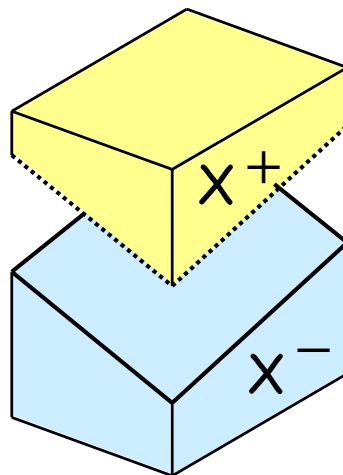
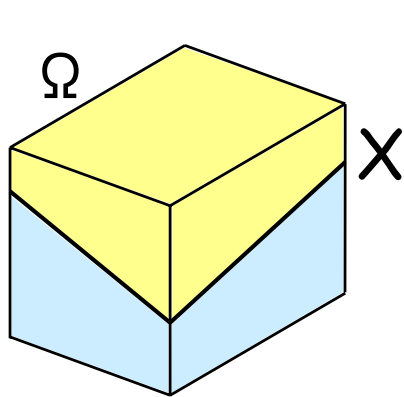
- ① A層の上にB層が堆積した
- ② 隆起して、A層・B層が侵食された
- ③ 沈降して、C層が堆積した
- ④ 隆起して、A層・B層・C層が侵食された

## 地層の分布域は境界面で囲まれた領域



# 地層の分布域の数学的表現(1)

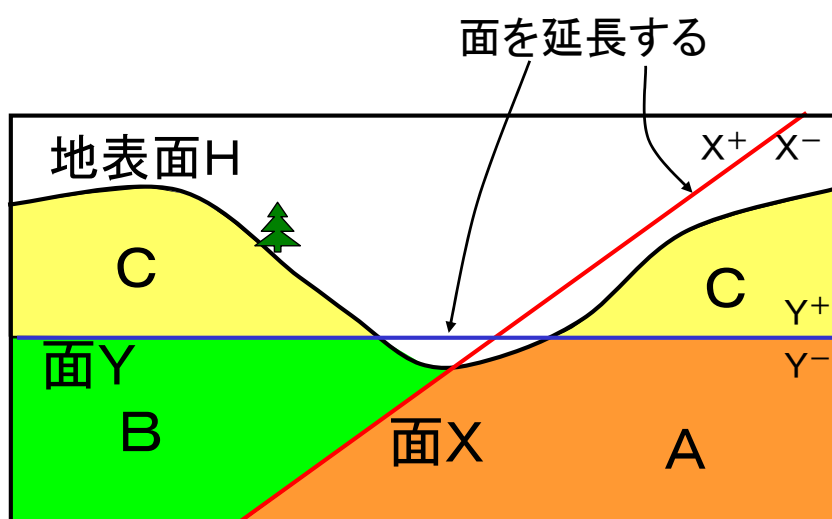
- ・地質調査の対象となる3次元空間を $\Omega$ とする.
- ・境界面 $X$ は空間 $\Omega$ を2分割する曲面である.  
 $X^+$ : 境界面 $X$ より上側の領域  
 $X^-$ : 境界面 $X$ より下側の領域



$$X^+ \cup X^- = \Omega$$

$$X^+ \cap X^- = \phi$$

# 地層の分布域の数学的表現(2)

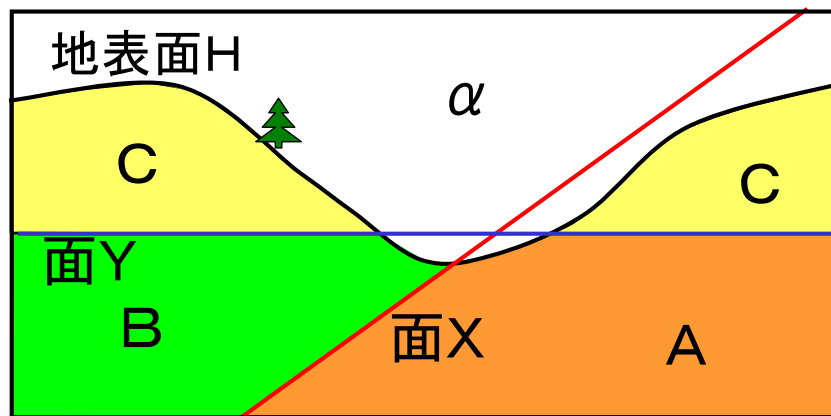


$C = Y^+ \cap H^+$   
 面 $X$ とは無関係  
 面 $Y$ より上側  
 地表面より下側

$B = X^+ \cap Y^- \cap H^-$   
 面 $X$ より上側  
 面 $Y$ より下側  
 地表面より下側

$A = X^- \cap Y^- \cap H^-$   
 面 $X$ より下側  
 面 $Y$ より下側  
 地表面より下側

# 地質構造の論理モデル: 地層と面の関係



$$A = X^- \cap Y^- \cap H^-$$

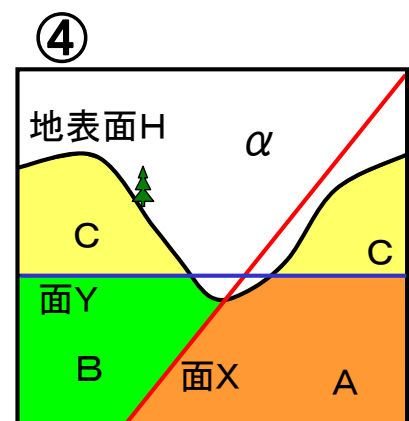
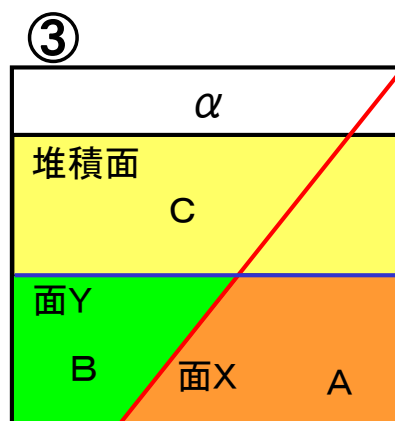
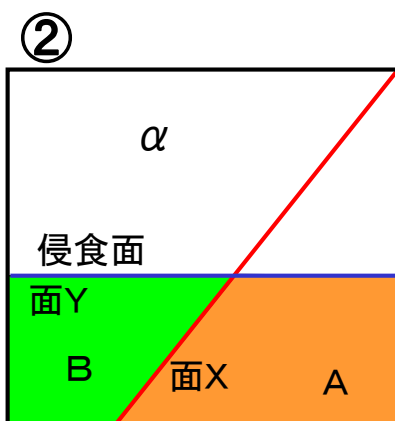
$$B = X^+ \cap Y^- \cap H^-$$

$$C = Y^+ \cap H^-$$

$$\alpha = H^+$$

	X	Y	H
A	-	-	-
B	+	-	-
C	*	+	-
$\alpha$	*	*	+

地質構造の論理モデルは  
地層が形成された歴史を反映する



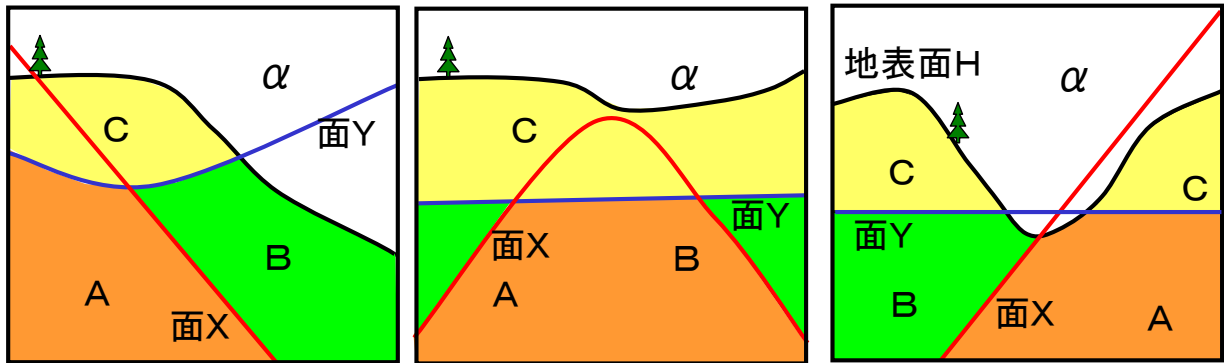
	X	Y
A	-	-
B	+	-
$\alpha$	*	+

- ① A層の上にB層が堆積した
- ② 隆起して, A層・B層が侵食された
- ③ 沈降して, C層が堆積した
- ④ 隆起して, A層・B層・C層が侵食された

	X	Y	H
A	-	-	-
B	+	-	-
C	*	+	-
$\alpha$	*	*	+



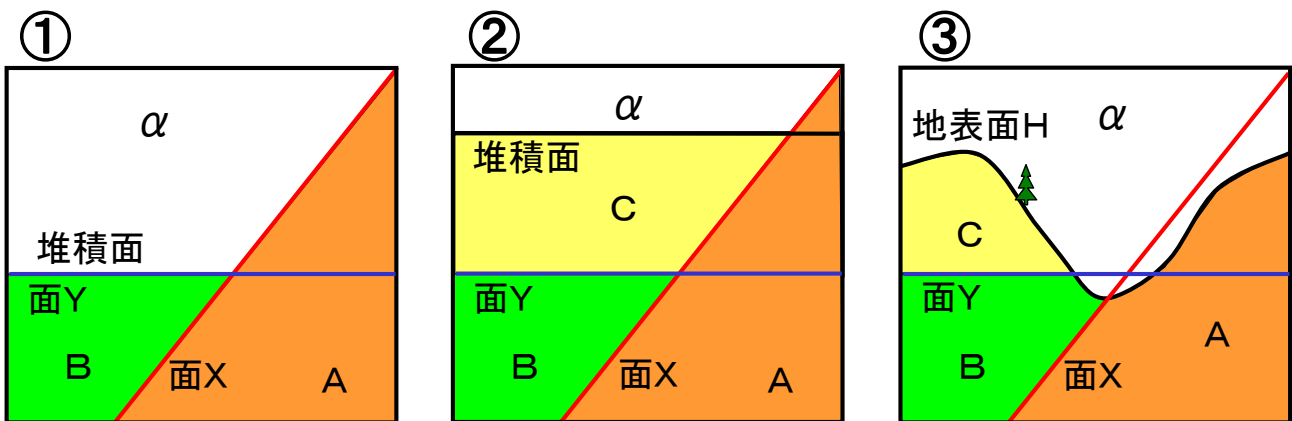
# 地層が形成された歴史が同じであれば 地質構造の論理モデルは同じである



- ① A層の上にB層が堆積した
- ② 隆起して、A層・B層が侵食された
- ③ 沈降して、C層が堆積した
- ④ 隆起して、A層・B層・C層が侵食された

	X	Y	H
A	—	—	—
B	+	—	—
C	*	+	—
$\alpha$	*	*	+

# 地質構造の論理モデルは 地層が形成された歴史を反映する

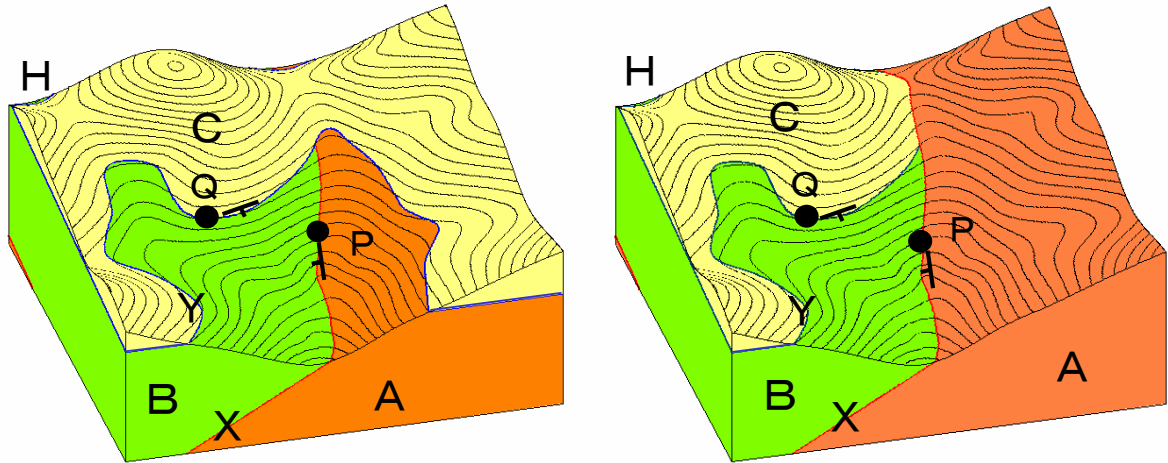


	X	Y
A	—	*
B	+	—
$\alpha$	+	+

- ① A層の上にB層が堆積した
- ② その上にC層が堆積した
- ③ 隆起して、A層・B層・C層が侵食された

	X	Y	H
A	—	*	—
B	+	—	—
C	+	+	—
$\alpha$	*	*	+

限られた露頭観察から地層の分布を推定するには地層が形成された歴史を反映した論理モデルが欠かせない



	X	Y	H
A	-	-	-
B	+	-	-
C	*	+	-
$\alpha$	*	*	+

	X	Y	H
A	-	*	-
B	+	-	-
C	+	+	-
$\alpha$	*	*	+

## 地質構造の論理モデルの作り方 (堆積と侵食によって形成された地質構造)

### 漸化式による一般表現

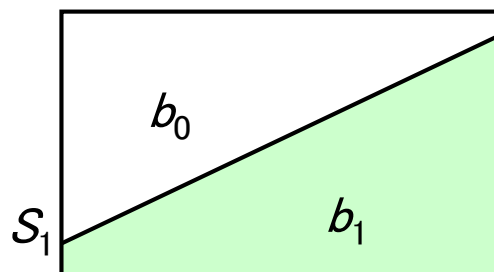
イベントの列  $V_n = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  に対して, (i)(ii)より導かれる  $\{b_0, b_1, \dots, b_M\}$  を  $V_n$  によって形成される地質構造とよび,  $b_0, b_1, \dots, b_M$  と  $S_1, S_2, \dots, S_P$  の関係を  $V_n$  によって形成される地質構造の論理モデルとよぶ.

初期状態 ( $k=1$  のとき)

(i)  $k=1$  のとき

$$b_1^{(1)} = S_1^-$$

$$b_0^{(1)} = S_1^+$$



(ii)  $k=2, \dots, n$  に対して

$v_{k+1} = c$  のとき,

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$b_{m+1}^{(k+1)} = b_0^{(k)} \cap S_{p+1}^-$$

$$b_0^{(k+1)} = b_0^{(k)} \cap S_{p+1}^+$$

$v_{k+1} = r$  のとき,

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} \cap S_{p+1}^-$$

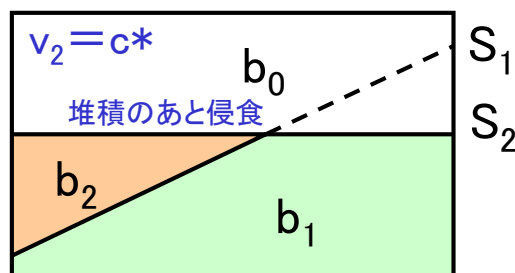
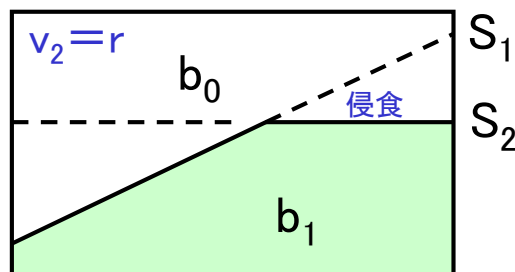
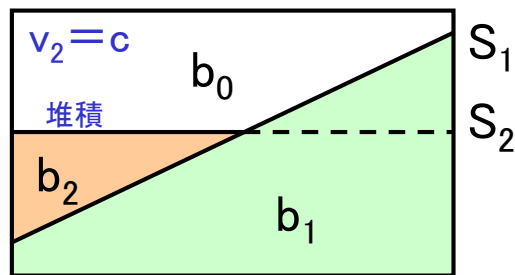
$$b_0^{(k+1)} = b_0^{(k)} \cup S_{p+1}^+$$

$v_{k+1} = c^*$  のとき,

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} \cap S_{p+1}^- \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$b_{m+1}^{(k+1)} = b_0^{(k)} \cap S_{p+1}^-$$

$$b_0^{(k+1)} = S_{p+1}^+$$



## 3次元地質モデル

地質構造の論理モデル

$$A = X^- \cap Y^-$$

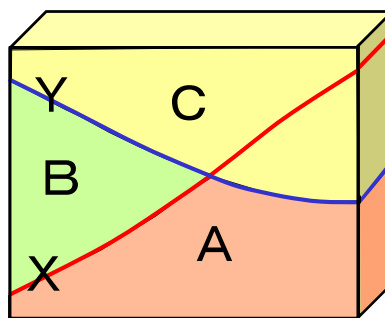
$$B = X^+ \cap Y^-$$

$$C = Y^+$$

境界面の形

$$\text{面XのDEM: } z = s_X(x, y)$$

$$\text{面YのDEM: } z = s_Y(x, y)$$



地質関数  $g(x, y, z)$

点  $P(x, y, z)$  にその点が含まれる地層を対応づける関数

$$g(x, y, z) = \begin{cases} A & ; (x, y, z) \text{ が } X \text{ より下側, かつ } Y \text{ より下側にあるとき} \\ B & ; (x, y, z) \text{ が } X \text{ より上側, かつ } Y \text{ より下側にあるとき} \\ C & ; (x, y, z) \text{ が } Y \text{ より上側にあるとき} \end{cases}$$

## 計算機処理: 一般的な取り扱い方 (1) minset

面XとYによって境される最小単位の領域は次の4種類が存在する。これらを面XとYによって生成されるminsetとよぶ。

$$m_{00} = X^- \cap Y^-$$

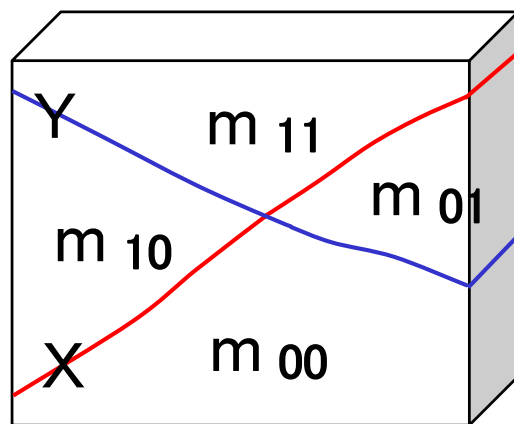
$$m_{01} = X^- \cap Y^+$$

$$m_{10} = X^+ \cap Y^-$$

$$m_{11} = X^+ \cap Y^+$$

minset は  $m_{d_1 d_2}$  で表す。  
ここで

$$d_1 = \begin{cases} 1 & ; X^+ \\ 0 & ; X^- \end{cases} \quad d_2 = \begin{cases} 1 & ; Y^+ \\ 0 & ; Y^- \end{cases}$$



## 計算機処理: 一般的な取り扱い方 (2) 関数 $g_1$

minset を単位に考えると、図の3つの地層A, B, Cはつぎのように表せる。

$$A = X^- \cap Y^- = m_{00}$$

$$B = X^+ \cap Y^- = m_{10}$$

$$C = Y^+ = m_{01} \cup m_{11}$$

この式から、各minsetがどの地層に含まれているかが読み取れる。

$$m_{00} \rightarrow A$$

$$m_{01} \rightarrow C$$

$$m_{10} \rightarrow B$$

$$m_{11} \rightarrow C$$

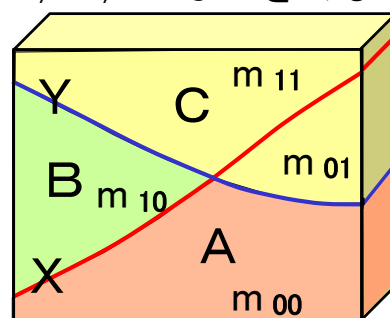
この関係を  $g_1(m)$  とする。

論理モデル

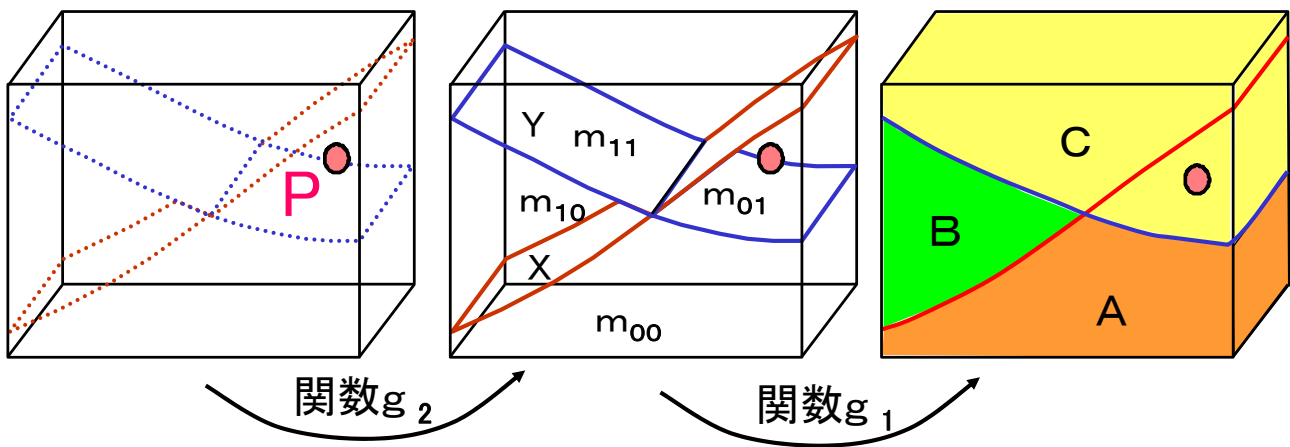
	X	Y
A	-	-
B	+	-
C	*	+



m	$g_1$
$m_{00}$	A
$m_{01}$	C
$m_{10}$	B
$m_{11}$	C



## 計算機処理:一般的な取り扱い方 (3)地質関数g



[境界面のDEM]

$$g_2(x, y, z) = m_{01}$$

[論理モデル]

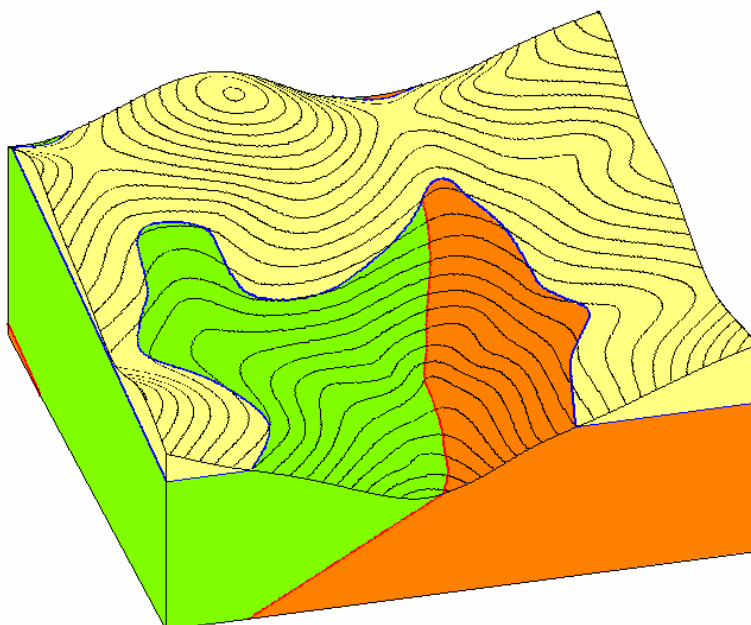
$$g_1(m_{01}) = C$$

$$g(x, y, z) = g_1(g_2(x, y, z)) = C$$

任意の点 $P(x, y, z)$ がどの地層内にあるかがわかる

## 計算機処理:一般的な取り扱い方 (4)可視化

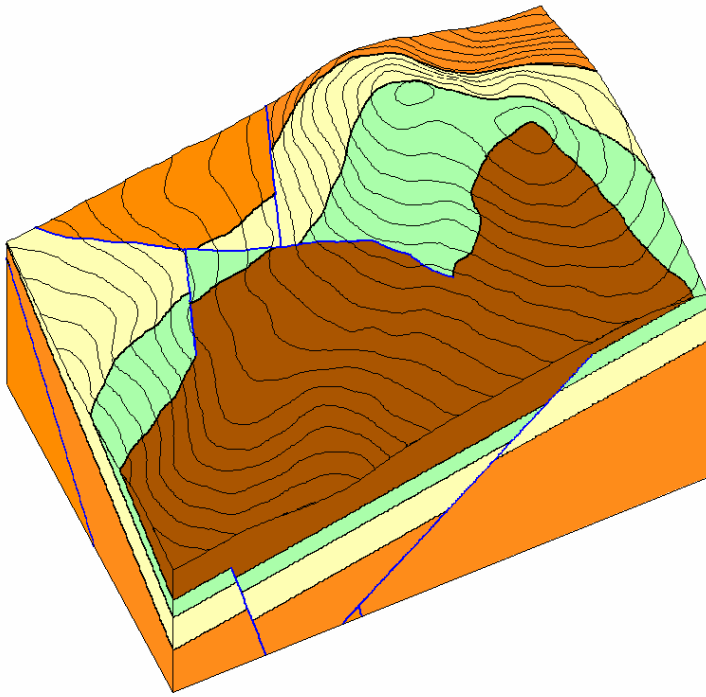
地質関数 $g$ にしたがって塗り分ける／地質境界線を描く



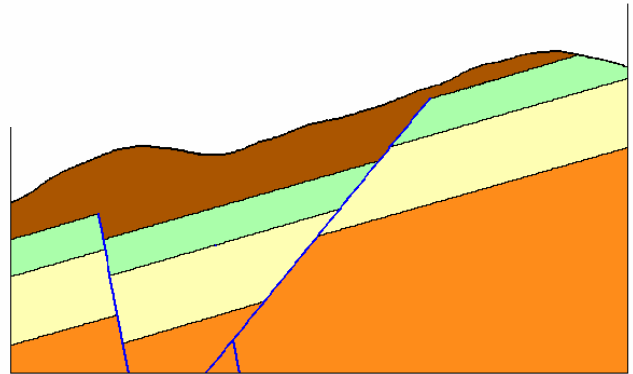
Geomodel2004  
(米澤ほか,2004)  
による可視化例

3次元地質モデルの可視化にはいろいろな技法がある(省略)

# 断層を含む地質構造 (米澤ほか,2005)

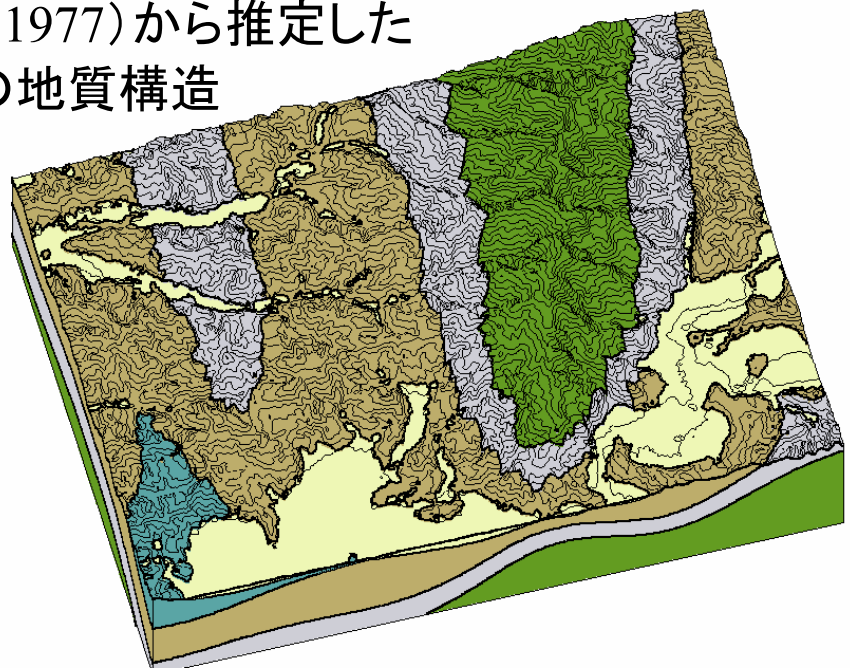


Geomodel2004  
(米澤ほか,2004)  
による可視化例

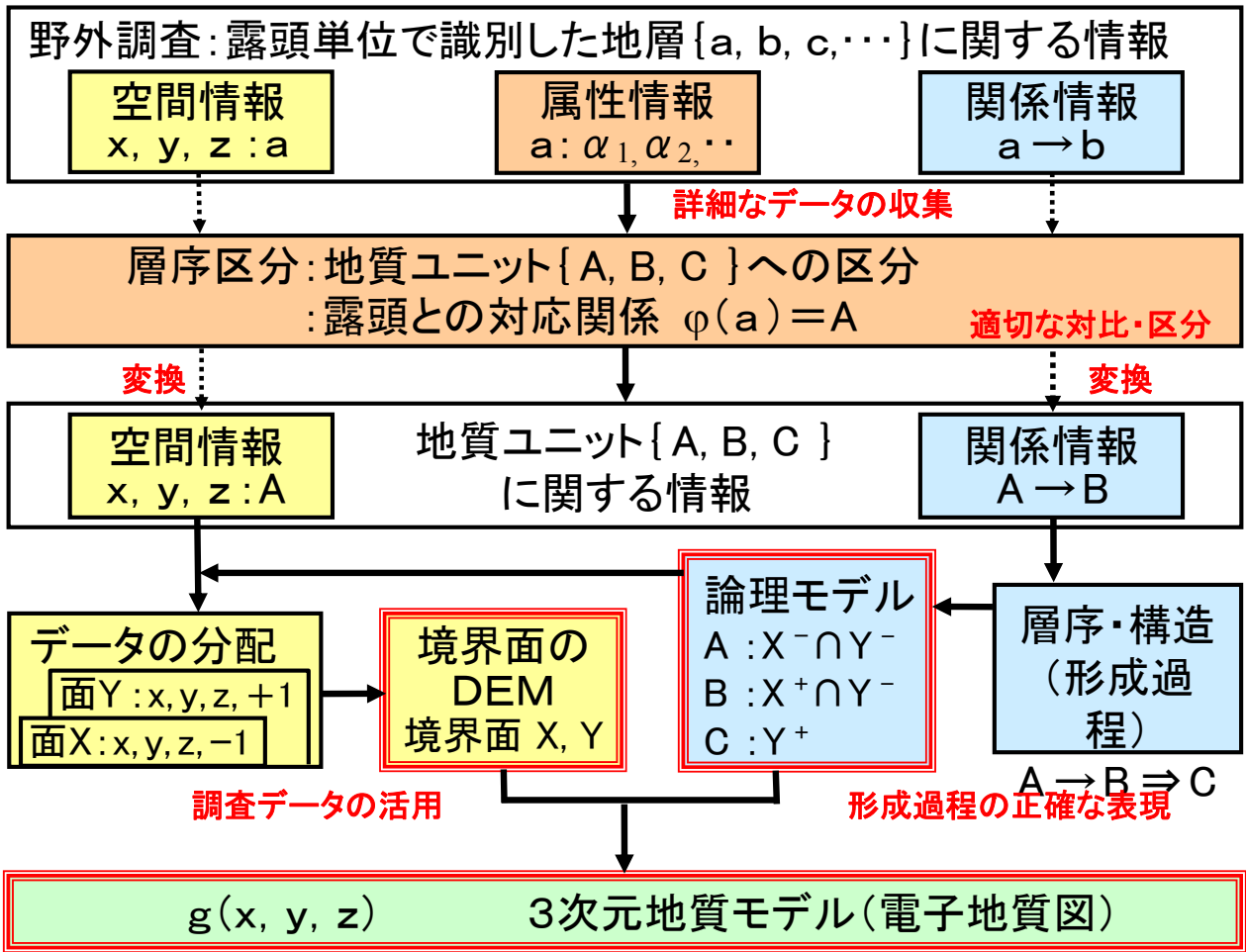


# 地質調査所発行5万分の1地質図幅 「本荘」(大沢ほか,1977)から推定した 秋田県本荘地域の地質構造 (米澤ほか, 2004)

Geomodel2004  
(米澤ほか,2004)  
による可視化例



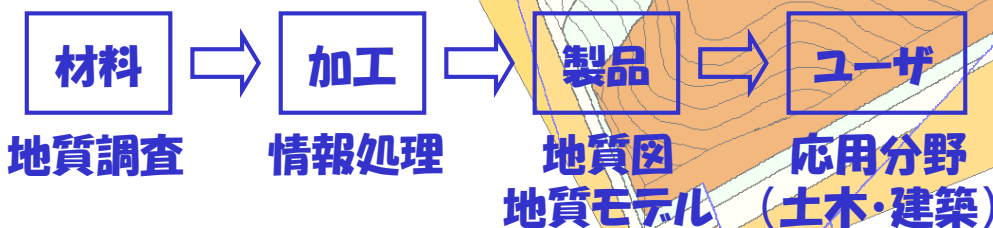
境界面は図幅に表示された地質体の分布と走向・傾斜から推定した。



## 3次元地質モデリングの利点

正確な地質情報を電子情報として提供できる。

- データ解析の手順を客観的に開示・検証できる。
- 地質構造の形成過程を正確に表現できる。
- 調査データを最大限に生かせる。
- 調査データの追加・修正に即応できる。
- 他分野での利用が容易である。



実用面での課題: CADへの対応 ⇒ 期待: CRCソリューションズ