

グラフ理論による逆転層の露頭構造と層序の数学的表現

河西秀夫*

Mathematical Models of Geological Structure of Outcrops and Stratigraphy of Turned Layers Based on Graph Theory

Hideo KASAI*

山梨学院大学, Yamanashi Gakuin University, Sakaori2-4-5, Koufu city, Yamanashi Prefecture 400-8575, Japan, E-mail kasai@ygu.ac.jp

キーワード: 構造グラフ, 層序グラフ, 層序, グラフ理論, 逆転層

Key words: : Structure Graph, Stratigraphic graph, Stratigraphy, Graph theory, Turned layer

1. 始めに

著者は露頭データベースの設計にあたり、露頭でみられる地質構造の記述方法としてラベル付き有向グラフを使用した構造グラフを提案し、その数学的背景を検討した(河西, 2005; Kasai, 2009; 河西 2012; 河西 2013; 河西 2015)。グラフの頂点のラベルは地層名、弧のラベルは地層間の接触関係である。また、露頭で観察される構造から得られる層序の記載方法として層序グラフを提案し、露頭構造から層序を求める推論の形式も提案した(河西, 2012, 2013, 2015)。ここで検討の対象とした露頭構造は、地層累重の法則と交叉切りの法則が適用できる地質構造と包含関係、同時異相であった。ただし、地層の逆転がない地質構造に限定した。今回は逆転層が存在する場合の露頭構造の記述に構造グラフと層序グラフが使用できるように検討した。

2. 構造グラフと層序グラフ

地層の逆転がない地質構造に対して、下で定義するような $V, R^\#, \phi_V, \phi_A$ で定義される有向グラフ $G=(V, R^\#, \phi_V, \phi_A)$ を「構造グラフ」と呼ぶ(河西, 2013, 河西 2015)。 $R^\#$ は次のようになる。

$$R^\# = \{(x, y) | xRy \vee xLy \vee xFy, x \in V, y \in V\}, R^\# \Leftrightarrow R^+ \vee xLy \vee xDy$$

x と y は地質体をあらわす。 $xR^\#y$ は空間的な上下関係 xRy , 貫入関係 xLy , 断層関係 xFy , 包含関係 xLy , 同時異相 xDy を統一的に表現したものである。

ϕ_V は V の元である各地質体に地層名を対応付ける写像、 ϕ_A は順序対 (x, y) に接触関係の名称の集合 $A = \{\text{整合, 不整合, 貫入, 断層, 包含, 同時異相}\}$ の1つの元を対応付ける写像 $\phi_A: R \rightarrow A$ である。構造グラフは露頭の構造を表すラベル付き有向グラフであり、頂点と弧はそれぞれ地質体と地質体間の接触関係を表している。

露頭における地質体の空間配置や接触関係の観察結果に地層累重の法則や交叉切りの法則、包含関係、同時異相関係を当てはめて地質体の新旧関係に変換した結果が層序グラフである。

以下のように定義される集合 V 上の関係 U^* で定義されるラベル付き有向グラフ $S=(VE^*, U^*, \phi_V, \phi_A)$ を「層序グラフ」という(河西 2012, 2013, 2015)。

E^* は形成時期に関する同値関係である。包含関係の場合は母岩を代表元とし、同時異相の場合は任意の地質体を代表元とする。この代表元を $[x]$ と表現する。包含関係あるいは同時異相関係にない場合は地質体そのものが代表元になる。これは $xR^\#y \Rightarrow [x]R^\#[y]$ である。

露頭断面で観察される地質体の集合 V の元である地質体 x と y が接触しており、 x が y より形成時期が古いとき、この関係を xUy と書く。 U は反対称的な関係であるとする。

U の推移的閉包に反射的性質を追加した関係(反射的かつ推移的閉包)を U^* とする。このとき上の推論規則は、 $[x]R^\#[y] \Rightarrow [x]U^*[y], [x]U^*[y] \wedge [y]U^*[z] \Rightarrow [x]U^*[z], \phi_A([x], [y]) = \phi_A(x, y)$ となる。

層序グラフは地質体間の新旧関係を表示したラベル付き有向グラフであり、頂点と弧はそれぞれ地質体と地質体間の新旧関係を表している。推移的閉包によりつけられた弧のラベルは一律に“推論”とする。本文では、地質体の形成順序と地質体間の接触関係を含めたものを層序と呼ぶ(河西, 2012)。

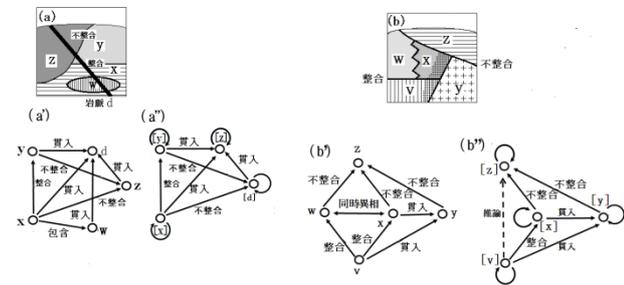
関係 U^* が成り立つ順序対 $([x], [y])$ の集合を、 $U^* = \{([x], [y]) | xU^*y, x \in V, y \in V\}$ と書く。関係 U^* は、反射律、反対称律、推移律を満たすので、 V 上の半順序である。 U^* が全順序になる場合に限り、 $i \leq j$ であれば $[v_i]U^*[v_j]$ であるといえる。この場合、 $P = ([v_1], [v_2], \dots, [v_n])$ は地層の形成順序を表しており、 $[v_1]$ が最も古い地質体、 $[v_n]$ が最も新しい地質体である。頂点を連結する弧 $[v_i][v_j]$ の位置に、接触関係の名称である弧 $[v_i][v_j]$ のラベル $\phi_A([v_i], [v_j])$ を代入した $P = ([v_1], \phi_A([v_1], [v_2]), [v_2], \dots, [v_{n-1}], \phi_A([v_{n-1}], [v_n]), [v_n])$ は地質体の形成順序と地質体間の接触関係を表しているため、「層序」である。

第1図に露頭断面の例を示す。対応する構造グラフ(a', b', c', d'), 層序グラフ(a'', b'', c'', d'')を断面の下に示す。

第1図の露頭断面(a)は互いに整合関係にある地質体 x と y を地質体 z が不整合に覆う例である。地質体 x には地質体 w が包含されている。さらに、岩脈 d がこれらの地質体に貫入している。地質体の集合は、 $V=\{w, x, y, z, d\}$ であり、接触関係は、 $xRy, xRz, yRz, xLw, xId, wId, yId, zId$ である。代表元は、 $[x]=\{x, w\}, [y]=\{y\}, [z]=\{z\}, [d]=\{d\}$ である。接触関係は、 $[x]R[y], [x]R[z], [y]R[z], [x]I[d], [y]I[d], [z]I[d]$ である。孤のラベルは $\phi_A([x],[y])=$ 整合、 $\phi_A([x],[z])=$ 不整合、 $\phi_A([y],[z])=$ 不整合、 $\phi_A([x],[d])=$ 貫入、 $\phi_A([y],[d])=$ 貫入、 $\phi_A([z],[d])=$ 貫入である。推論規則から、 $[x]R[y] \Rightarrow [x]U^*[y], [x]R[z] \Rightarrow [x]U^*[z], [y]R[z] \Rightarrow [y]U^*[z], [x]I[d] \Rightarrow [x]U^*[d], [y]I[d] \Rightarrow [y]U^*[d], [z]I[d] \Rightarrow [z]U^*[d]$ となり、層序は $P=([x], 整合, [y], 不整合, [z], 貫入, [d])$ となる。

第1図露頭断面(b)は、同時異相の関係にある地質体 w と x が地質体 v と整合関係にあり、これらに深成岩 y が貫入している。さらに地質体 z がこれら不整合に覆う構造である。図中の網かけは接触変成を受けている領域を示している。

地質体の集合は、 $V=\{v, w, x, y, z\}$ である。接触関係は、 $vRw, vRx, vLy, wRz, xRz, yRz$ である。代表元は、 $[v]=\{v\}, [x]=\{x, w\}, [y]=\{y\}, [z]=\{z\}$ であり、孤のラベルは、 $\phi_A([v],[x])=$ 整合、 $\phi_A([x],[z])=$ 不整合、 $\phi_A([v],[y])=$ 貫入、 $\phi_A([x],[y])=$ 貫入、 $\phi_A([y],[z])=$ 不整合である。推論規則から、 $[v]R[w] \Rightarrow [v]U^*[w], [v]R[x] \Rightarrow [v]U^*[x], [v]I[y] \Rightarrow [v]U^*[y], [w]R[z] \Rightarrow [w]U^*[z], [x]R[z] \Rightarrow [x]U^*[z], [y]R[z] \Rightarrow [y]U^*[z]$ となり、層序は $P=([v], 整合, [x], 貫入, [y], 不整合, [z])$ となる。



第1図 構造グラフと層序グラフ

各露頭断面に対応する構造グラフを(a'), (b')に、層序グラフを、(a''), (b'')に示す。

3. 逆転層の表現

3-1. 逆転層の構造グラフによる表現

互いに接触する地質体 x と地質体 y が逆転関係にある場合がある。

V の元である2つの地質体 x と y が接触しており、地質体 x が空間的に下側にあり、両者が逆転関係にあることを xTy と書き、このような関係にある順序対 (x, y) の集合を T と書く。 T は次のようになる。

$$T = \{ (x, y) | xTy, x \in V, y \in V \}$$

空間的な上下関係 xRy , 貫入関係 xLy , 断層関係 xFy , 包含関係 xLy , 同時異相 xDy , 逆転関係 xTy を統一的に表現するために、接触関係 $R^{\#}$ を次のように拡張する。

$xR^{\#}y \Leftrightarrow xR^+y \vee xLy \vee xDy \vee xTy, xR^+y \Leftrightarrow xRy \vee xLy \vee xFy$
 $xRy, xLy, xFy, xLy, xDy, xTy$ はいずれも $xR^{\#}y$ で統一的に表現される。 $xR^{\#}y$ が成り立つ順序対 (x, y) の集合を

$$R^{\#} = \{ (x, y) | xR^{\#}y \vee xLy \vee xDy \vee xTy, x \in V, y \in V \}$$

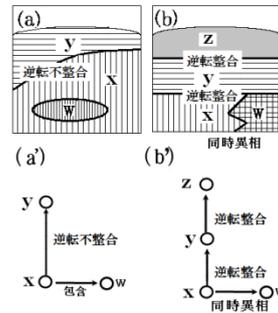
とし、構造グラフ G を $G=(V, R^{\#}, \phi_V, \phi_A)$ と再定義する。

ここで、 V は地質体の集合であり、 ϕ_V は頂点に地質体の名称を対応つける写像であり、 ϕ_A は順序対 (x, y) に接触関係の名称の集合 A の1つの元を対応つける写像である。 $A=\{$ 整合, 不整合, 貫入, 断層, 包含, 同時異相, 逆転整合, 逆転不整合 $\}$ となる。 $xR^{\#}y$ のとき、弧は x から y に向けて描かれる。

第2図は逆転層の構造グラフの例であり、いずれの露頭断面も露頭で逆転層であることが確認されているものとする。

第2図の露頭断面(a) は地質体 x と地質体 y が逆転不整合の関係にある例で、地質体 x は地質体 w を包含している。地質体の集合は $V=\{w, x, y\}$ であり、接触関係は xTy, xLw で、関係 $R^{\#}$ を使用すると $xR^{\#}y, xR^{\#}w$ である。孤のラベルは $\phi_A(x, y)=$ 逆転不整合、 $\phi_A(x, w)=$ 包含である。対応する構造グラフを(a')に示す。

第2図の露頭断面(b)は地質体 x, y, z が互いに逆転整合の関係にある例であり、地質体 x は地質体 w と同時異相の関係にある。地質体の集合は、 $V=\{w, x, y, z\}$ であり、接触関係は xTy, yTz, xDw であり、関係 $R^{\#}$ を使用すると、 $xR^{\#}y, yR^{\#}z, xR^{\#}w$ である。孤のラベルは $\phi_A(x, y)=$ 逆転整合、 $\phi_A(y, z)=$ 逆転整合、 $\phi_A(x, w)=$ 同時異相である。対応する構造グラフを(b')に示す。



第2図 逆転層の構造グラフ

各露頭断面に対応する構造グラフを、(a'), (b')に示す。

3-2. 逆転層の層序グラフによる表現

集合 V の任意の地質体 x と地質体 y が互いに接触しており、 x と y が逆転関係にある場合、空間的に下側にある地質体 x のほうが形成時期が新しい。

推論規則は、 $[x]T[y] \Rightarrow [y]U^*[x], \phi_A([x],[y])=$ 逆転整合 $\Rightarrow \phi_A([y],[x])=$ 整合、 $\phi_A([x],[y])=$ 逆転不整合 $\Rightarrow \phi_A([y],[x])=$ 不整合である。これを推論規則(1)とする。

地質体 x と y が逆転関係にある場合、両者の接触関係は逆転不整合と逆転整合のどちらかとする。

第3図に逆転層の例を示す。露頭断面は第2図と同じものである。露頭断面(a)の地質体の集合は $V=\{w, x, y\}$ であり、接触関係は xTy, xLw である。接触関係のラベルは $\phi_A(x, y)=$ 逆転不整合、 $\phi_A(x, z)=$ 包含である。

これらの地質体を類別すると代表元は $[x]=\{x, w\}, [y]=\{y\}$ であ

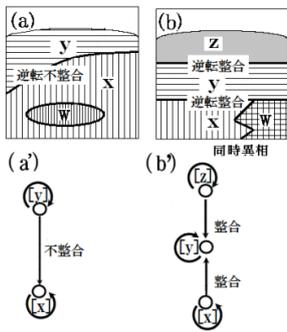
る。代表元を使用した接触関係と弧のラベルは、 $[x]T[y]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転不整合$ である。

推論規則(1)から、 $[x]T[y] \Rightarrow [y]U^*[x]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転整合 \Rightarrow \phi_A([x],[y])=整合$ となり、層序は、 $P'=([y], 不整合, [x])$ となる。

露頭断面(b)の地質体の集合は、 $V=\{w, x, y, z\}$ であり、接触関係は xTy , yTz , xDw である。これらの地質体を類別すると代表元は $[x]=\{x, w\}$, $[y]=\{y\}$, $[z]=\{z\}$ である。

代表元を使用した接触関係と弧のラベルは、 $[x]T[y]$, $[y]T[z]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転整合$ 、 $\phi_A([y],[z])=逆転整合$ である。

推論規則(1)から、 $[x]T[y] \Rightarrow [y]U^*[x]$ 、 $[y]T[z] \Rightarrow [z]U^*[y]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転不整合 \Rightarrow \phi_A([y],[z])=不整合$ 、 $\phi_A([y],[z])=逆転不整合 \Rightarrow \phi_A([z],[y])=不整合$ となり、層序は $P'=([z], 整合, [y], 整合, [x])$ となる。



第3図 逆転層の層序グラフ

各露頭断面に対応する層序グラフを(a), (b')に示す。

3-3. 逆転層の層序グラフの問題点

第4図(a)は、互いに逆転関係にある地質体 x, y を地質体 z が不整合に覆う例である。地質体 x は地質体 w をレンズ状に含んでいる。ただし、地質体 z は地質体 x と直接接していない。

第4図(a)の地質体の集合は $V=\{w, x, y, z\}$ であり、接触関係は、 xTy , yRz , xLw である。これらの地質体を形成時期により類別すると、 $[x]=\{x, w\}$, $[y]=\{y\}$, $[z]=\{z\}$ である。

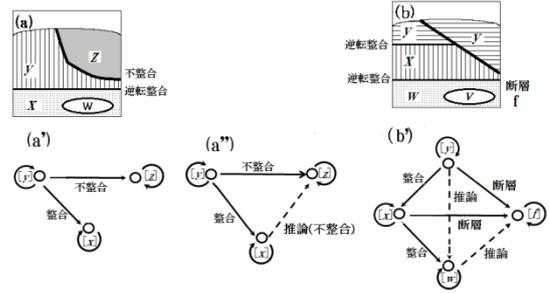
代表元を使用した接触関係と弧のラベルは、 $[x]T[y]$, $[y]R[z]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転整合$ 、 $\phi_A([y],[z])=不整合$ である。

推論規則(1)から、 $[x]T[y] \Rightarrow [y]U^*[x]$ 、 $[y]R[z] \Rightarrow [y]U^*[z]$ 、 $\phi_A([x],[y])=逆転整合 \Rightarrow \phi_A([y],[x])=整合$ となり、これから、次の層序が求まる。

$$P'_a=([y], 整合, [x], 整合), P'_b=([y], 不整合, [z])$$

層序グラフを(a')に示す。推論規則から部分的な層序は求まるが、全体的な層序は求まらない。地質体 $[z]$ は地質体 $[x]$ と直接接していないので、層序グラフでは頂点 $[x]$ と $[z]$ を結ぶ弧が描かれない。

しかし、実際の露頭判断では地質体 $[z]$ が最も新しいものと判断される。地質体 $[x]$, $[y]$ が逆転した後に、浸食され、地質体 $[z]$ がこれらの地質体を不整合に覆うという形成順序が推定される。これは、逆転関係にある地質体 $[x]$, $[y]$ を1つの地質体としてとらえることができる。



第4図 逆転層を不整合に覆う例と逆転層を切る断層の例

(a)は地質体 z は x と直接接していない例、(b)は地質体 w は断層 f と直接接していない例である。

一連の逆転層を H とすると、第4図(a)の地質体 $[x]$ と $[y]$ は H に属し、 $[z]$ は H に属していない。 $[x]$ と $[y]$ が H に属しているという関係を $[x]H[y]$ と書く。 H は対称的な関係であり、 H の反射的かつ推移的閉包を H^* としたとき、 H^* は反射律、対称律、推移律を満たす V 上の同値関係である。

露頭で観察される形成時期に関する地質体の同値類の集合 V をさらに一連の逆転層 H に属するという関係にあるという関係 H^* で類別できる。この時、同値類 $[x]$ と同値類の集合、すなわち商集合 V/H^* は、 $[x]=\{[y][y]H^*[x], [y] \in V\}$, $V/H^*=\{[x] \mid [x] \in V\}$ である。 $[x]$ は $[x]$ を元とする同値類であるが、本論文では、以下 $[x]$ を $[x]_H$ と表示する。例えば、形成時期に関する地質体の同値類 $[x]$ と $[y]$ が逆転関係にある場合、 $[x]_H=\{[x],[y]\}$ である。この場合、 $[x]$ が代表元であり、代表元は任意とする。地質体 $[x]$ が逆転していない場合は、 $[x]_H=\{[x]\}$ である。このように、逆転関係にある地質体を $[x]_H$ で一括表現できる。

一連の逆転層全体とその空間的に上位にある地質体の接触関係を $[x]_H R^+ [y]_H$ のようにあらわす。 V/E^* 上の関係から V/H^* 上の関係を定義する推論規則、 $[x]_H R^+ [y]_H \Rightarrow [x]_H R^+ [y]_H$ が得られる。

V/H^* 上の接触関係から新旧関係 U^* を推論する規則は $[x]_H R^+ [y]_H \Rightarrow [x]_H U^* [y]_H$, $[x]_H U^* [y]_H \wedge [y]_H U^* [z]_H \Rightarrow [x]_H U^* [z]_H$ である。

$[x]_H U^* [y]_H$ が成り立つ順序対 $([x]_H, [y]_H)$ の集合を U^* とし、層序グラフ S を、 $S=(V/T^*, U^*, \phi_v, \phi_A)$ のように再定義する。 ϕ_v はグラフの頂点 $[x]_H$ に代表元 $[x]$ の名称を対応付ける写像、 ϕ_A は同値類の順序対 $([x]_H, [y]_H)$ に接触関係の名称の集合 A の1つの元を対応付ける写像である。 $([x]_H, [y]_H)$ の接触関係の名称は順序 $([x], [y])$ の接触関係の名称と同じであり、 $\phi_A([x]_H, [y]_H)=\phi_A([x],[y])$ ($[x]_H \neq [y]_H$) となる。

商集合 V/H^* 上の関係 U^* は半順序であるから、 V/H^* の各元である同値類を番号付けることができる。 U^* が全順序になる場合、 C_m の並びは形成順序を表しており、層序は次のように表現される。

$$P^i=(C_1, \phi_A(C_1, C_2), C_2, \dots, C_{m-1}, \phi_A(C_{m-1}, C_m), C_m)$$

複数の形成時期に関する地質体の同値類 $[g_i]$ ($i=1, \dots, n$) が存在しているとする。 n は同値類の数であり、空間的に最も下側にある地質体は $[g_1]$ である。これらの地質体の内 $[g_i]$ ($i=1, \dots, n-1$) が逆転関係にありこれらの一連の逆転層を地質体 $[g_n]$ が不整合に

覆うとする一連の逆転層を $[V_x]_H$ とし、これらの逆転を不整合に覆う地質体を $[V_y]_H$ とすると、 $[V_x]_H = \{[g_1], [g_2], \dots, [g_{n-1}]\}$, $[V_y]_H = \{[g_n]\}$ である。

この同値類 $[V_x]_H$ と $[V_y]_H$ の接触関係は $[V_x]_H R^+ [V_y]_H$ であり、接触関係のラベルは $\phi_A([V_x]_H, [V_y]_H) = \text{不整合}$ である。

新旧関係は、 $[V_x]_H R^+ [V_y]_H \Rightarrow [V_x]_H U^* [V_y]_H$ であり、層序は $P' = ([V_x]_H, \text{不整合}, [V_y]_H)$ になる。

一方、一連の逆転層 H の間の層序は $P'_a = ([g_{n-1}], \phi_A([g_{n-1}], [g_{n-2}]), [g_{n-2}], \dots, [g_2], \phi_A([g_2], [g_1]), [g_1])$ である。一連の逆転層で形成時期が新しい地質体 $[g_1]$ を $[g_x]_H$ の代表元に選び、 $[V_y]_H$ の代表元として $[g_n]$ を選ぶと、 $[g_1]_H U^* [g_n]_H$ であり、接触関係は $\phi_A([g_1]_H, [g_n]_H) = \phi_A([V_x]_H, [V_y]_H) = \text{不整合}$ である。

$[V_y]_H$ の元の数が1の場合、すなわち $[V_y]_H = 1$ であるとき、 $[V_x]_H$ と $[V_y]_H$ の直積 K を取ると、 $K = \{([g_i], [g_n]) \mid [g_i] \in [V_x]_H, [g_n] \in [V_y]_H\}$ となり、 $[V_x]_H$ と $[V_y]_H$ の各元の関係 $([g_i], [g_n])$ が求まる。このとき、 $[V_x]_H U^* [V_y]_H \Rightarrow [g_i] U^* [g_n]$ が成立するものとする。代表元をそれぞれ $[g_i]$ と $[g_n]$ を選ぶと、 $([g_i], [g_n])$ が求まる。これを推論規則(2)とする。

層序グラフではこの推論から得られた弧を破線で表す。 $[g_i]$ と $[g_n]$ が直接接している場合は弧は実線になり、直接接していない場合は弧は破線になる。直接接していない場合の弧のラベルは“推論”とするが、接触関係の種類を明示する場合、“推論(接触関係名)”とする。

第4図の露頭断面(a)の例では、逆転関係の同値類は、 $[V_x]_H = \{[x], [y]\}$, $[V_z]_H = \{[z]\}$ であり、接触関係は、 $[V_x]_H R^+ [V_z]_H$ 、接触関係のラベルは $\phi_A([V_x]_H, [V_z]_H) = \text{不整合}$ である。新旧関係は、 $[V_x]_H R^+ [V_z]_H \Rightarrow [V_x]_H U^* [V_z]_H$ である。一連の逆転層の中で形成時期が最も新しい地質体は $[y]$ なので、 $[V_x]_H$ の代表元として $[y]$ を選び、 $[V_z]_H$ の代表元として $[z]$ を選ぶと、推論規則(2)から、 $[g_x]_H U^* [g_z]_H \Rightarrow [y] U^* [z]$, $\phi_A([y], [z]) = \text{不整合}$ になる。

$[x]$ と $[z]$ は直接接していないが、推論(2)から両者の関係を求めることができる。層序グラフでは頂点 $[x]$ と $[z]$ の間に破線の弧が引かれ、この方向は $[x]$ から $[z]$ の向きである。弧のラベルは“推論(不整合)”とする。層序は次のようになる。

$$P' = ([y], \text{整合}, [x], \text{整合}, [w], \text{推論(不整合)}, [z])$$

第4図(a)に層序グラフを示す。

第4図(b)は一連の逆転層を切る断層の例である。地質体 w, x, y は逆転しており、断層 f がこれらの逆転層を切っている。 f の上盤側には地質体 y が存在している。地質体 w は地質体 v をレンズ状に含んでいる。これらの地質体を形成時期に関する同値類にまとめると、 $[w] = \{w, v\}$, $[x] = \{x\}$, $[y] = \{y\}$, $[f] = \{f\}$ であり、接触関係は $[w] T [x]$, $[x] T [y]$, $[x] F [f]$, $[y] F [f]$ である。弧のラベルは、 $\phi_A([w], [x]) = \text{逆転不整合}$, $\phi_A([x], [y]) = \text{逆転不整合}$, $\phi_A([x], [f]) = \text{断層}$, $\phi_A([y], [f]) = \text{断層}$ である。 $[w] T [x] \Rightarrow [x] U^* [w]$, $[x] T [y] \Rightarrow [y] U^* [x]$, $[x] F [f] \Rightarrow [x] U^* [f]$, $[y] F [f] \Rightarrow [y] U^* [f]$ から、層序として $P'_a = ([y], \text{整合}, [x], \text{整合}, [w]), P'_b = ([x], \text{断層}, [f]), P'_c = ([y], \text{断層}, [f])$ が求まるが、全体的な層序は求まらない。一連の逆転層 H に属するという関係で類別すると、 $[V_x]_H = \{[w], [x], [y]\}$, $[f]_H = \{[f]\}$

となり、接触関係は $[V_x]_H F [f]_H$ である。弧のラベルは $\phi_A([V_x]_H, [f]_H) = \text{断層}$ である。 $[f]_H = 1$ なので、 $[V_x]_H$ と $[f]_H$ の内積をとると、 $([w], [f])$, $([x], [f])$, $([y], [f])$ が得られる。 $[V_x]_H U^* [V_y]_H \Rightarrow [g_i] U^* [g_n]$ より、層序として、 $P' = ([y], \text{整合}, [x], \text{整合}, [y], \text{断層}, [f])$ が求まる。

4. あとがき

逆転が存在する地質構造を対象にして検討した構造グラフと層序グラフを検討した。

露頭で観察される2つの地質体 x と y の接触関係を、 $x R^+ y \Leftrightarrow x R^- y \vee x L y \vee x D y \vee x T y$, $x R^- y \Leftrightarrow x R^+ y \vee x L y \vee x F y$ で表現した。接触関係は、上下関係($x R y$)、地層呈重の法則($x L y$)、交叉切りの法則($x D y$, $x F y$)、包含関係($x L y$)、同時異相($x T y$)、逆転関係($x T y$)を統一的に $x R^+ y$ で表現した。また、地質体の接触関係の情報を弧のラベル(整合、不整合、貫入、断層、包含、同時異相、逆転整合、逆転不整合)で表現した。このように接触関係の表現を拡張することにより、逆転関係が存在する露頭構造を構造グラフ (V, R) として表現できた。ここで、 V は地質体の集合である。

地質体の形成時期に関する同値類の代表元を $[x]$ で表すと、接触関係は $[x] R^+ [y]$ であり、新旧関係は $[x] R^+ [y] \Rightarrow [x] U^* [y]$ となる。さらに一連の逆転層 H に属する同値類を $[x]_H$ で表すと、新旧関係は $[x]_H R^+ [y]_H \Rightarrow [x]_H U^* [y]_H$ となる。一連の逆転層を $[x]_H = \{[x_i] \mid 1 \leq i \leq n-1\}$ とし、逆転層を覆う地質体を $[y]_H = \{[x_n]\}$ とする。 $[y]_H = 1$ の場合、 $[x]_H$ と $[y]_H$ の内積をとると、逆転層を構成する $[x_n]$ とそれを覆う地質体 $[x_n]$ の関係 $([x_i], [x_n])$ が求まる。 $\phi_A([x]_H, [y]_H) \Rightarrow \phi_A([x_i], [x_n])$ と $[x_i] T [x_{i+1}] \Rightarrow [x_{i+1}] U^* [x_i]$ から各地質体の新旧関係が求まる。

以上のようにして、逆転層を含めた地質構造に対する露頭構造や層序の表現が可能になった。

文 献

- 河西秀夫(2005) 個人用露頭データベースの設計について(3)一層序の表現方法の改善について一。情報地質, vol.16, no.2, pp.57-68.
- 河西秀夫(2006) 個人用露頭データベースの設計について(4)一基盤、被覆層、互層の理論的背景一。情報地質, vol.17, no.1, pp.13-27.
- Kasai, H.(2009) Design of geological exposure database -Structure graph: Mathematical model of geological structure of outcrops and regions based on graph theory-. *Geoinformatics*, vol.20, no.1, pp.17-29.
- 河西秀夫(2012) グラフ理論による露頭構造と層序の数学的表現。情報地質, vol.23, no.3, pp.109-120
- 河西秀夫(2013) グラフ理論による露頭構造と層序の数学的表現一貫入と断層の取り扱い一。情報地質, vol.24, no.4, pp.161-173
- 河西秀夫(2015) グラフ理論による露頭構造と層序の数学的表現一レンズ層と同時異相一。[w]{w,v} 情報地質, vol.26, no.2, pp.35-48