論 説

個人用露頭（野帳）データベースの設計について(2) — 層序の表現方法について —

河西 秀夫*

A Design of Personal Geological Outcrop (Field Not) Database (part 2) - On the Expression Method of the Stratigraphy -

Hideo KASAI*

Abstract : Description of the outcrop is important in the geological survey. The arrangement of the observation result becomes a big burden as the survey goes on. For this reason, it is desirable that database has not only outcrop lists but also have functions which construct the geological structure of the investigation area from outcrop.

The author propose the stratigraphical graph and the stratigraphical formula as the descriptive method of outcrop data on the outcrop database. A directed labeled graph is applied to this graph; vertexes of the graph correspond to layers and arcs of the graph correspond to the contact relations. Each arc of the graph connects from the lower layer to upper layer. The label of vertex is the layer name, and the label of arc is the name of contact relation. The name of the layer and the contact relation are related to the description of the layer and the contact relation under the binary relation respectively.

The stratigraphical formula expresses the stratigraphical graph with a set form: This formula expresses the contact relation of the two layers with the form (lower layer unit)(relation unit)(upper layer unit), where layer units are represented by layer names and contact units are by symbols. With this formula, we are able to express the data outcrop data uniformly, including the case that boundary of layers is unknown and the case that the condition of boundary is estimated from neighboring outcrops. The stratigraphy of the investigation area can be established through operation of the stratigraphical formulae of outcrop. The author propose the algorithm of this operation.

Key words : Database, Outcrop, Stratigraphy, Stratigraphical formula, Directed labeled graph

1. はじめに

地質調査では露頭の記載が重要であるが、調査が進むにつれて観察結果の整理が大きな負担になってくる。このため、露頭のデータベース化が必要となってくる。データベースの必要性は岩崎・松山(1992)、横田(1996)、佐野(1997)により提唱されている。

露頭データベースは単なる露頭リストだけのデータベースだけでなく、露頭で観察される地質構造や地層及び接触部の記載、写真やスケッチなどの画像を統一的に管理できることが必要であり、さらにこれらの露頭データを整理検討できる機能をもつデータベースが必要である。また、横田(1996)は観察記録などの非数値的データの取り扱いの必要性和、複数の露頭の層序から組み立てられる層序も中間的地質モデルとしてデータベースに登録しておく必要性を提唱

している。これは、演算可能な形式の露頭層序の表現形式を検討する必要性を意味している。このためには、露頭で観察される層序や観察結果の記載などのデータの表現方法を理論的に検討する必要がある。地質学論理に基づいた地質構造や層序の数学的研究には、塩野・弘原海(1992)、塩野(1999)等の一連の研究があるが、彼らは集合論や記号論理などの離散数学を使用している。

吉田他(2000)、勝野他(2002)は露頭データベースを試作している。これらのデータベースは観察記録を文字情報として登録が可能になっている。しかし、これらのデータベースでは層序の確定までは踏み込んでいない。

著者は露頭データベースの作成に関して、二項関係とラベル付き有向グラフを利用して露頭の層序と観察結果の記述方法の検討を行った(河西, 2000)。今回、露頭で観察さ

2002年11月16日受付, 2003年6月11日受理

日本情報地質学会Geoinformatics-2002(福岡, 2002年6月)で一部講演

* 山梨学院大学 Yamanashi Gakuin University, Sakaori 2-4-5, Kofu, Yamanashi, 400-0861, Japan. E-mail: kasai@ygu.ac.jp

れる層序を式で表現する方法を導入し、さらに露頭観察記載データの入力部分のアルゴリズムを開発した。層序を記載した式を層序式と名づける。この層序式は露頭で観察される地質構造を式で表現するものであるが、複数の露頭単位の地質構造を結合することによって、ある特定の地域の層序が表現できる。また、特定の露頭で接触関係が確認できずに周辺の露頭群から推定できる場合も、式で表現可能である。これは横田(1996)の中間モデルの形成が可能であることを意味している。

今回、この層序式の理論、層序式の結合アルゴリズム、露頭観察結果の入力方法を報告する。

2. 露頭から得られる情報の数学的表現

露頭から得られる情報GIは、露頭の位置Xと層序Wからなる有限集合である。

$$GI = \{X, W\}$$

層序は地層の堆積順序と地層間の接触関係をあらわすものである。上下に重なる2つの地層 L_i と L_j の層序は、接触関係を表す関係Rを使用して次のように二項関係で表示される(河西, 2000)。

$$L_i \text{が} L_j \text{の下位ならば, } L_i R L_j \quad (1)$$

露頭データベースを作成する場合、露頭のデータとして層序だけでなく接触面や各地層の観察結果(記載事項)もデータとして入力する必要がある。これらの観察結果も考慮すると、(1)式の接触関係は次のように二項関係#を使用して表現できる。

$$WL_i \# WL_j \\ \# = W C n_{ij} H W C p_{ij}$$

#は接触関係の持つ情報、 WL_i と WL_j は地層名称、 $W C n_{ij}$ は接触関係の種類、 $W C p_{ij}$ は接触面の性質である。関係Hは「性質を持つ」という関係である。関係#は2つの地層の重なり合いの順序も含んでおり、#の左側が下位となる。

地層の観察内容の記載は、二項関係Hを使用して次のように表現できる。

$$WL_i H WLP_i$$

WLP_i は地層 WL_i の観察記載データ(性質)である。

「性質を持つ」ことを意味する二項関係Hを使用すると、地層や接触関係の名称だけでなく、両者の記載事項(性質の情報)も次のように表現できる。

$$(WL_i H WLP_i) (\# \# H \# \# P) (WL_j H WLP_j) \quad (2)$$

WLP_i は WL_i の記載内容、 $\# \#$ は接触関係の種類の一般的表現、 $\# \# P$ は $\# \#$ の記載内容、 WLP_j は WL_j の記載内容である。

露頭から接触関係が判断できないが、周辺の露頭から接触関係が推定できる場合がある。また、接触関係が未露出で不明の場合もある。接触関係が不明の場合は、不明であるという二項関係N#を使用すると、(2)式は次のようにな

る。

$$(WL_i H WLP_i) (N \# H \Phi) (WL_j H WLP_j)$$

この場合、接触関係N#の性質は空値 Φ となる。一方、推定の場合も、推定であるという二項関係E#を使用すると次のように表現できる。

$$(WL_i H WLP_i) (E \# H \Phi) (WL_j H WLP_j)$$

推定の場合も接触関係E#の性質は空値 Φ となる。

このように、(2)式を使用すると露頭から得られる情報を統一的に表現できる。

3. 層序グラフ

3-1 ラベル付有向グラフ

複数の点とそれらを結ぶ線からなる図形をグラフという。点を節点、点を結ぶ線を辺と呼ぶ。グラフは節点の集合Vと辺の集合Eからなる図形である。グラフを構成する節点を $L_1, L_2, \dots, L_n$ 、辺を $a_1, a_2, \dots, a_m$ とすると、節点の集合Vと辺の集合Eは次のように表現される。

$$V = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$$

$$E = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$$

始点から終点までの経路は節点と辺の列Wで次のように表現される。

$$W = (L_1, a_1, L_2, a_2, \dots, L_n)$$

すべての辺が異なる経路を小道という。さらに節点がすべて異なる経路を道という。

辺に方向性があるグラフを有向グラフという。有向グラフの辺を特に弧と称する。各弧には始点と終点が存在し、弧は始点から終点の方向に向く。始点と終点と同じである弧をループという。ラベル付有向グラフは節点と弧にラベルがついたものである。ラベルとは節点や弧の性質や特徴をあらわすものである。ラベル付有向グラフの例を第1図に示す。

第1図 ラベル付有向グラフ

ラベル付有向グラフで、丸印が節点、矢印が弧をあらわす。弧には方向性がある。L1, L2, L3が節点のラベル、a1, a2, a3が弧のラベルである。L1が始点、L3が終点で、(L1, a1, L2, a2, L3)と(L1, a3, L3)の2つの道が存在する。

3-2 層序グラフ

節点の集合Vを地層の集合、辺の集合Eを(1)で定義されたV上の関係Rとするラベル付有向グラフを層序グラフとよぶ。層序グラフは節点と弧で層序を表現するもので、節

点は地層、弧は接触関係に相当する。弧は下位の地層から上位の地層に向く。ここでは矢印で方向性を示している。また、節点と弧にはラベルがつくが、節点のラベルは地層名称、弧のラベルは接触関係名称とする。

層序グラフは層序を幾何学的に表現したものであるが、層序は節点 L_i と弧 a_{ij} の列で次のように表示できるものとする。この場合、列の左側が下位である。

$$W = (L_1, a_1, L_2, a_2, L_3, \dots, L_n)$$

この列に同じ弧は現れない。列 W は L_1 から L_n に向かう小道である。 $L_i \neq L_{i+1}$ のとき列の左側にある節点 L_i が下位の地層をあらわす。このようにすべての地層は連続して上下に積み重なっているものと仮定する。以下、これを仮定1と呼ぶ。

また、「性質を持つ」という二項関係 H を使用して地層と接触関係の持つ情報（ラベル）をあわせて表示すると次のようになる。

$$W = (L_1HLP_1, a_1HaP_1, L_2HLP_2, a_2HaP_2, \dots, L_nHLP_n)$$

LP_i は節点 L_i のラベル、 aPi は弧 a_i のラベルである。

層序グラフの例を第2図に示す。第2図(a)は上下に積み重なる地層の関係が整合である例、(b)と(c)は断層が存在する露頭の例、(d)は単一の地層からなる露頭の例である。図中の L_1, L_2, L_3 は節点のラベル（地層名称）、整合、不整合、断層は弧（接触関係）のラベルである。第2図(b)の例では L_1 と L_2 が整合関係で堆積し、 L_3 が L_1 と L_2 に断層で接触している。この例では、露頭の層序は次の道で表示される。

$$W = (L_1, \text{整合}, L_2, \text{断層}, L_3) \quad (3)$$

第2図 層序グラフと層序の対応

露頭で見られる層序と層序グラフでの表現の例を示す。(a)は2つの地層 L_1 と L_2 が整合関係で接触している例である。(b)は3つの地層 L_1, L_2, L_3 が存在している露頭の例で、 L_1 と L_2 が整合関係で接触し、 L_3 が断層で L_1 と L_2 と接触している例である。 L_1 から L_3 までの2つの弧が存在する。(c)は L_1 内部に断層が存在する場合である。層内断層はループで表現される。(d)は単一の地層 L_1 からなる露頭の例である。

これは断層の形成時期が L_2 と L_3 の間であることを意味している。しかし、今回検討している露頭データベースの入力単位は露頭構造である。(3)式では、層序的には問題がないが、 L_3 は L_1 と断層で接触しているという構造が明記されていない。このため、第2図(b)の例では次のように2

つの道 W_1 と W_2 があることを明記する必要がある。

$$W_1 = (L_1, \text{整合}, L_2, \text{断層}, L_3)$$

$$W_2 = (L_1, \text{断層}, L_3)$$

第2図(c)は L_1 の内部に断層がある場合である。 $W = (L_1, \text{不整合}, L_2)$ の表記では L_1 内部の断層を表現できない。このため、 L_1 内部の断層をループで表わし、小道の表現として次のように表現する。

$$W = (L_1, \text{断層}, L_1, \text{不整合}, L_2)$$

したがって、道には同じ弧は現れないが、同じ節点は現れることになる。ただし、同じ節点の間には1つの弧の存在しか許されず、この場合の弧のラベルは断層や露頭の範囲で確認される貫入岩体に限定される。以下、これを仮定2と称する。

第2図(d)の場合は

$$W = (L_1)$$

で表現される。

層序グラフには次の性質がある。

- ① 層序グラフは仮定1より、 $E = \Phi$ のとき弧立点からなる。弧立点からなる層序グラフは単一の地層からなる露頭を意味する。
- ② 仮定1より、層序グラフは多重弧が許されないで、多重グラフとはならない。ループは許される。ループは単一層内のみで確認される断層（層内断層と称する）か岩脈を意味する。
- ③ 各節点の出次数と入次数はそれぞれ2以下である。ループの端点 W の始点または終点でないときには、出次数と入次数がそれぞれ2である節点はループの端点である。弧立点の場合は出次数と入次数とも0である。

3-3 層序グラフの連結

露頭で観察される層序を露頭層序グラフ O_i ($i = 1, \dots, n$, n は露頭数)、ある特定地域の層序を地域層序グラフ A と称する。露頭層序グラフと地域層序グラフともラベル付き有向グラフである。ある特定地域を構成する層序の一部が露頭で観察されるので、露頭層序グラフは地域層序グラフの部分有向グラフである。地質調査ではこの地域層序の組み立てが目的の1つであるが、これは複数の部分有向グラフ O_i から有向グラフ A を復元することに相当する。この復元作業は露頭層序グラフ O_i と O_j の演算になる。複数の地域層序グラフからさらに広い地域の層序グラフが求められるので、地域層序グラフも部分有向グラフと考えられる。この地域層序グラフは横田(1996)の中間的な地質モデルに相当する。ここでの議論は露頭層序グラフと地域層序グラフの両方を含めて、層序グラフという用語で統一する。

層序グラフの弧はラベルにより、結合の強さが異なるという性質を持つ。隣接する節点をそれぞれ L_i と L_j とし、弧を a_{ij} とする。弧 a_{ij} のラベルが「整合」の場合、節点 L_i と L_j 、弧 a_{ij} の3つを切り離すことができず、道 (L_i, a_{ij}, L_j) は固定されたものとなる。一方、弧 a_{ij} のラベルが「不整合」や「断層」などの層序学の不連続関係を表すものである場合、

節点 L_i と L_j の間に複数の節点が挿入され、新たな道が形成される。以下、これを仮定3とする。

任意の層序グラフ X と Y に対して、両者の間に道が形成されて新しい層序グラフ Z が生成される場合がある。 X と Y から Z を生成することを層序グラフの連結と称する。この Z の生成方法として接合、包含、挿入を定義する。

① 層序グラフ X の道を $(L_1, a_1, L_2, \dots, L_m)$ とし、層序グラフ Y の道を $(L_n, a_n, L_{n+1}, \dots, L_k)$ とする。 X の終点 L_m と Y の始点 L_n が同一の場合、 L_1 から L_m までの道が形成される。これは、 X と Y が連結して新しい道 Z が形成される事を意味している。 X と Y が終点と始点で連結することを接合と呼ぶことにする。

層序グラフ X の上位の地層を表す連続した節点 $(L_g, \dots, L_m)$ と Y の下位の地層を表す連続した節点 $(L_n, \dots, L_k)$ が同一の場合、 X と Y は接合され、新しい層序グラフ Z が作成される(第3図(a))。 L_m は X の最上位の単位、 L_n は Y の最下位の節点を現す。

接合の演算子の記号を $+$ であらわすと次のようになる。

$$Z = (X - X[L_g, \dots, L_m]) + Y \quad (4)$$

ただし、演算子の左側が下位、右側が上位であるとする。 $X[L_g, \dots, L_m]$ は X の複数の節点 $(L_g, \dots, L_m)$ を意味し、 $X - X[L_g, \dots, L_m]$ は X から上位の節点を取り除く事を意味する。

X と最上位の節点 L_m と Y の最下位の節点 L_n のみが同一の節点の場合は、(4)式は次のようになる。

$$Z = (X - X[L_m]) + Y$$

(4)式を簡略化して、次のように表現できるものとする。

$$Z = X + Y$$

したがって、この接合は可換ではない。すなわち、

$$X + Y \neq Y + X$$

である。

たとえば、

$$X = (L_1, a_1, L_2, a_2, L_3, a_3, L_4)$$

$$Y = (L_3, a_4, L_4, a_5, L_5)$$

とすると、

$$Z = (L_1, a_1, L_2, a_2, L_3, a_4, L_4, a_5, L_5)$$

となる。この場合、層序グラフ X の節点 L_3 と L_4 は Y と重複するので取り除かれる。

② 層序グラフ Y の隣接する2つの節点 L_a と L_k が存在し、この2つの節点間の弧のラベルが不整合や断層などの不連続関係であるとする。層序グラフ X に2つの節点 L_a と L_k が存在し、かつ、この2つの節点の間に1つ以上の節点が存在する場合、仮定3より層序グラフ Y は層序グラフ X に含まれる(第3図(b))。このように X に Y が含まれることを包含とよぶ。

たとえば、

$$X = (L_a, a_a, L_b, a_b, L_k), Y = (L_a, a_d, L_k)$$

弧 a_d が不連続関係ならば、

$$Z = (L_a, a_a, L_b, a_b, L_k)$$

となる。

Y が X の部分グラフである場合は Y は X に含まれる。

たとえば、

$$X = (L_1, a_1, L_2, a_2, L_3)$$

$$Y = (L_2, a_2, L_3)$$

とすると、

$$Z = (L_1, a_1, L_2, a_2, L_3) = X$$

となる。

第3図 層序グラフの連結

2つの層序グラフ X と Y の連結方法を示す。図中の○印は節点を表し、矢印は弧を表す。グラフの下側が下位である。(a)は接合、(b)は包含、(c)と(d)は挿入を示す。

- ③ 層序グラフXに隣接する2つの節点 L_a と L_k が存在し、この2つの節点間の弧のラベルが不整合や断層などの不連続関係であるとする。層序グラフYに隣接する2つの節点 L_m と L_p が存在するとする。2つの節点 L_m と L_p を結ぶ弧のラベルが整合であり、かつ、節点 L_a と節点 L_m が同一ならば、仮定3より、3つの節点 $L_m (=L_a)$ 、 L_p 、 L_k からなる層序グラフZが生成され、節点 L_p と L_k の間に弧 a_j が新たに生成される。このとき、弧 a_j のラベルは不明になる（第3図(c)）。この演算を以下、挿入と呼ぶ。

たとえば、

$$X = (L_a, a_{ak}, L_k), Y = (L_m, a_{mp}, L_p)$$

弧 a_{ak} が不整合、弧 a_{mp} が整合で、かつ $L_a = L_m$ ならば、

$$Z = ((L_a, a_{mp}, L_p), a_j, L_k)$$

となる。ただし、 a_j のラベルは不明になる。

- ④ 層序グラフXに隣接する2つの節点 L_a と L_k が存在し、この2つの節点間の弧のラベルが不整合や断層などの不連続関係であるとする。層序グラフYに隣接する2つの節点 L_m と L_p が存在するとする。2つの節点 L_m と L_p を結ぶ弧のラベルが整合であり、かつ、節点 L_k と節点 L_p が同一ならば、3つの節点 L_a 、 L_m 、 $L_p (=L_k)$ からなる層序グラフZが生成され、節点 L_a と L_m の間に弧 a_i が新たに生成される。このとき、弧 a_i のラベルは不明になる（第3図(d)）。これは挿入である。

たとえば、

$$X = (L_a, a_{ak}, L_k), Y = (L_m, a_{mp}, L_p)$$

弧 a_{ak} が不整合、弧 a_{mp} が整合で、かつ $L_k = L_p$ ならば、

$$Z = ((L_a, a_i, L_m), a_{mp}, L_k)$$

となる。ただし、 a_i は不明になる。

4. 層序式

4-1 層序式

露頭で観察された層序を表現する方法として層序式を導入する。

地層単元を地層名称とする。関係単元を接触関係別の記号で表す。接触する2つの地層に対して、（下位にある地層単元）（関係単元）（上位にある地層単元）の順に並べて、2つの地層の接触関係を表現する。このように、地層単元の記号と関係単元の記号を組み合わせる層序を表現したものを層序式と定義する。

層序式は層序グラフを一定の規則を使用した式で表現したものであり、地層単元は層序グラフの節点のラベル、関係単元は層序グラフのラベル付弧に相当する。地層名称はユーザーが自由につけるものとする。第1表はこの関係単元の記号の例で、第4図は層序式の例である。

第1表の関係単元の記号は推定関係の表現を可能にするために、2文字で表現されている。たとえば、露頭で確認された不整合の記号を「 $\sim\sim$ 」とすると、周辺の露頭群から推定された不整合は「 $? \sim$ 」となる。これにより、不整合が確認された露頭と推定不整合の露頭が区別できる。また、接触関係が不明の場合も「 $? ?$ 」で表現される。この

第1表 関係単元の記号の例

接触関係	記号	接触関係	記号
整合関係	$\rightarrow\rightarrow$	推定整合関係	$? \rightarrow$
不整合関係	$\sim\sim$	推定不整合関係	$? \sim$
断層関係	$//$	推定断層関係	$? /$
貫入関係	$\uparrow\uparrow$	推定貫入関係	$? \uparrow$
不明	$? ?$		

2つの地層間の接触関係を関係単元で示す。この例は露頭で判断できる接触関係のみを示している。必要に応じて追加できるようにする必要がある。

第4図 層序式の例

第1表に示す記号を使用した層序式の例である。(c)はL3がL1とL2に断層で接触している例であるが、露頭の構造を示すために2つの層序式が示されている。

「 $? ?$ 」は調査が進むにつれて、推定の記号に変わる場合もある。しかし、露頭データベースの場合は路頭で観察された接触関係の情報は重要であり、途中で推定を確認に変更することは本来の観察情報を喪失することになる。このため、データベース上の記録では確認と推定の区別は重要である。また、関係単元の記号は使用者が必要に応じて追加できるようにすることにする。

層序式の性質は前述の層序グラフの性質を継承する。層序式の性質は次のとおりである。

- ① 層序式は少なくとも1つ地層単元から構成され、空値の層序式は存在しない。単一の地層からなる露頭の層序式は1つの地層単元しか持たない。
- ② 接触する2つの地層単元 L_i と L_j に対して、両単元を結ぶ唯一つの関係単元Rが存在する。関係単元は接触関係を意味し、下位から上位に向かう方向性を有する。次式に示すように対象的ではない。

$$L_i R L_j \neq L_j R L_i$$

- ③ 次のような同一の地層単元を結ぶ関係単元Rの存在が許される。

$$L_i R L_j$$

この場合の関係単元は単一層内のみで確認される断層(層内断層と称する)か岩脈を意味する。

4-2 層序式の基本的演算

複数の露頭単位の層序式が連結されて、ある特定地域の層序式が構築される。層序式の演算は層序グラフの連結の性質を継承しており、その基本的な演算は次の通りである。ここでは、層序式Qに含まれる単元KをQ[K]であらわす。

- ① 2つの層序式XとYの基本的演算には、 $X+Y$ 、 $X\supseteq Y$ 、 $X\leftarrow Y$ の3通りがある。+は接合を、 $\supseteq$ は包含を、 $\leftarrow$ は挿入を意味する。

- ② $X+Y$ の接合が可能な場合は、X〔最上位の地層単元〕=Y〔最下位の地層単元〕の場合である。接合された層序式をZとすると、次のように表現される。

$$Z=(X-X[L_u])+Y$$

$[L_u]$ は層序式Xの最上位の地層単元である。 $(X-X[L_u])$ は層序式Xの最上位の地層単元を取り除くことを意味しており、これはXとYの重複部を取り除くことを意味している。

- ③ $X\supseteq Y$ とは、YがXの一部になっている場合か一致する場合である。Yの単元数が1の場合も成立する。この場合、新しい層序式Zは $Z=X\supseteq Y$ で表現される。

- ④ Yに隣接する2つの地層単元 $Y[L_a]$ と $Y[L_k]$ が存在し、 $Y[L_k]$ は $Y[L_a]$ の上位にあるとする。この2つの単元の間関係単元 $Y[a_{ak}]$ が不連続関係のラベル(不整合や断層など)を持つ単元であるとする。層序式Xにこの2つの地層単元 L_a と L_k が同じ順序で存在し、かつ、 $X[L_a]$ と $X[L_k]$ の間に異なる複数の地層単元 $X[L_i]$ ($i=1,\dots,n$)が存在する場合、YはXに包含される。この場合、新しい層序式Zは

$$Z=X\supseteq Y$$

で表現される。

たとえば、

$$X=L_a\sim\sim L_c\rightarrow L_k, Y=L_a\sim\sim L_k$$

の場合、YはXに包含される。

- ⑤ Xの隣接する2つの地層単元 $X[L_a]$ と $X[L_k]$ が存在し、 $X[L_k]$ は $X[L_a]$ の上位にあるとする。この2つの単元の間関係単元 $X[a_{ak}]$ のラベルが不整合や断層などの不連続関係であるとする。Yに隣接する2つの地層単元 $Y[L_m]$ と $Y[L_p]$ が存在し、 $Y[L_p]$ は $Y[L_m]$ の上位とする。この2つの単元の間関係単元 $Y[a_{mp}]$ のラベルが整合であるとする。 $X[L_a]=Y[L_m]$ ならば、 $Y[L_p]$ は $X[L_a]$ と $X[L_k]$ の間に挿入され、新しい層序式Zが生成される。この場合、新しい層序式Zは

$$Z=X\leftarrow Y$$

たとえば、

$$X=L_a\sim\sim L_k, Y=L_m\rightarrow L_p$$

かつ

$$X[L_a]=Y[L_m] \text{ ならば}$$

$$Z=L_a\rightarrow L_p??L_k$$

- ⑥ Xの隣接する2つの地層単元 $X[L_a]$ と $X[L_k]$ が存在し、 $X[L_k]$ は $X[L_a]$ の上位にあるとする。この2つの単元の間関係単元 $X[a_{ak}]$ のラベルが不整合や断層などの不連続関係であるとする。Yに隣接する2つの地層単元 $Y[L_m]$ と $Y[L_p]$ が存在し、 $Y[L_p]$ は $Y[L_m]$ の上位とする。この2つの単元の間関係単元 $Y[a_{mp}]$ のラベルが整合であるとする。 $X[L_k]=Y[L_p]$ ならば、 $Y[L_m]$ は $X[L_a]$ と $X[L_k]$ の間に挿入され、新しい層序式Zが生成される。この場合、新しい層序式Zは

$$Z=X\leftarrow Y$$

で表現される。

たとえば、

$$X=L_a\sim\sim L_k, Y=L_m\rightarrow L_p$$

かつ

$$X[L_k]=Y[L_p] \text{ ならば}$$

$$Z=L_a??L_m\rightarrow L_k$$

5. 露頭層序式の入力と演算のアルゴリズム

5-1 露頭層序式の入力

開発したプログラムは層序式の入力部分と演算部分である。露頭データの入力画面を第5図に示す。入力する露頭データは、露頭番号、調査日付、露頭位置(露頭の住所)、層序式、露頭座標(地図上の位置)、UTM座標、露頭の位置が表示されている2万5000分の1地図名称、標高、地層と接触部の観察結果、図面(写真、スケッチなど)、画像の説明である。

第6図は層序式の入力部分で第5図の一部である。露頭の層序は、露頭構造の欄に露頭層序式で入力する。層序式の入力後、「分解」ボタンをクリックすると各単元に分解される。分解された単元は、観察結果の記載欄のタグに表示される。このタグをクリックすると、指定された単元の記載用テキストボックスが表示されるので、ここに観察結果を入力する。記載方式は自由である。記載後、「登録」ボタンをクリックすると、登録が終了する。この方式は前述の(2)式を具体化したものである。

5-2 露頭層序式演算のアルゴリズムについて

ここでは各露頭で観察される層序式を露頭層序式 O_i 、ある一定の地域の層序をあらわす層序式を地域層序式Aと称する。複数の露頭層序式 O_i から地域層序式Aを構築するアルゴリズムは次のようになる。このアルゴリズムでは、層序式をグラフに戻しており、また、地層名称が同一な地層単元を同一なもの仮定している。

- ① 前処理として、推定の関係単元の記号をもつ層序式を確定の関係単元をもつ層序式に変更する。この変更はメモリ上で行う。

第5図 露頭データの入力画面

入力する露頭データは、露頭番号，調査日付，露頭位置（露頭の住所），層序式，露頭座標（地図上の位置），UTM座標，露頭の位置が表示されている2万5000分の1地図名称，標高，地層と接触部の観察結果，図面（写真，スケッチなど），画像の説明である。

第6図 層序式の記入例

第5図の一部(層序式，露頭の位置が表示されている2万5000分の1地図名称，標高，地層と接触部の観察結果の部分)を示す。この例では露頭構造の欄に「粘板岩↑↑花崗岩～凝灰角礫岩」という層序式が入力されている。「分解」ボタンをクリックすると，観察結果記載欄のタグに各単元が表示される。この例では，「↑↑」のタグをクリックして表示した観察結果記載欄に貫入関係に関する観察結果を記載している。

② 前処理の続きとして、同一層内の断層表示（層内断層）あるいは岩脈をもつ層序式の関係単元の記号を削除する。例えば、 $O_i = L_i // L_i$ を $O_i = L_i$ に変更する。// は断層を意味する関係単元である。この変更はメモリ上で行う。

③ チェック済みの露頭層序式の数を0で初期化する。

④ 各露頭層序式 O_i ($i = 0 \sim n$, n は検討する露頭数) を単元 U_i に分解する。分解した露頭層序式は次のようになる。

$$O_i = (U_1, U_2, \dots, U_m)$$

m は単元数である。

たとえば、 $O_i = L_1 \rightarrow L_2 \sim L_3$ の場合は、

$$O_i = (L_1, \rightarrow, L_2, \sim, L_3)$$

とする。

⑤ 分解した露頭層序式 O_i のうち、最も単元数が多い露頭層序式 O_k を仮の地域層序式 A とする。 $A = O_k$ である。

⑥ 露頭層序式 O_i と仮の地域層序式 A を比較する。

(ア) 露頭構造式 O_i が仮の地域層序式 A に包含される場合は、地域層序式はそのまま変更しない。 O_i が A に一致する場合も同様である。 O_i をチェック済みにする。

$$O_i \subseteq A \text{ ならば, } A = A$$

(イ) O_i の上位の連続した単元 $O_i [U_k, \dots, U_u]$ と A の最初の連続した単元 $A [U_1, \dots, U_i]$ が一致する場合は(4)式により接合可能で、 O_i と A を接合する。 O_i をチェック済みにし、接合後の地域層序式 A を再び単元に分解する。 $O_i[U_u]$ は O_i の最上位単元、 $A[U_1]$ は A の最下位の単元である。

$$O_i [U_k, \dots, U_u] = A [U_1, \dots, U_i] \text{ ならば}$$

$$A = (O_i - O_i [U_k, \dots, U_u]) + A \text{ とする。}$$

(ウ) O_i の最初の連続した単元、すなわち $O_i [U_1, \dots, U_j]$ と A の上位の連続した単元 $A [U_k, \dots, U_u]$ が一致する場合は(4)式により接合可能で、 O_i と A を連結する。 O_i をチェック済みにし、接合後の地域層序式 A を再び単元に分解する。 $O_i[U_1]$ は O_i の最下位の単元、 $A[U_u]$ は A の最上位の単元である。

$$O_i [U_1, \dots, U_j] = A [U_k, \dots, U_u] \text{ ならば}$$

$$A = (A - A [U_k, \dots, U_u]) + O_i$$

(エ) O_i に不整合や断層等の不連続関係や不明を含む場合の処理を行う。たとえば、地域層序式

$$A = L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_4 \rightarrow L_5 \rightarrow L_6$$

に露頭層序式

$$O_i = L_1 \rightarrow L_2 // L_5 \rightarrow L_6$$

を結合する場合を考える。この場合、 O_i は A に包含されるのは明白であるが、前述の(ア)の方法では演算ができない。このため、次のような方法で判定する。

i) O_i を最初に出現する不整合や断層などの不連続関係あるいは不明の関係単元を境にして2つの層序式に分解する。この2つの層序式を O_{i1} , O_{i2} とする。 O_i に複数の不連続の関係単元が存在する場合は最初に出現する関係単元で2つの層序式に分解する。前述の例では、

$$O_{i1} = L_1 \rightarrow L_2, O_{i2} = L_5 \rightarrow L_6$$

となる。

ii) O_{i1} と O_{i2} の両方が A に包含される場合は、 O_i は A に包含される。 O_i をチェック済みにする。前述の例では、 O_{i1} と O_{i2} の両方が A に包含される。

$$O_i = O_{i1} * O_{i2}$$

$$O_{i1} \subseteq A, O_{i2} \subseteq A$$

ならば

$$O_i \subseteq A$$

ただし、 $*$ は断層や不整合などの不連続関係あるいは不明の関係単元である。

iii) O_{i1} が A に包含されるが、 O_{i2} が A に包含されない場合は、 O_{i2} を新たな O_i とする。この場合、 O_i をチェック済みにしない。たとえば、

$$A = L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_4 \rightarrow L_5 \rightarrow L_6$$

に露頭層序式

$$O_i = L_1 \rightarrow L_2 // L_6 \rightarrow L_7 \text{ を結合する場合,}$$

$$O_{i1} = L_1 \rightarrow L_2, O_{i2} = L_6 \rightarrow L_7$$

O_{i1} は A に包含されるが、 O_{i2} は A に包含されない。この場合、 O_{i2} が新たな O_i となる。

$$O_i = O_{i1} * O_{i2}$$

$$O_{i1} \subseteq A, O_{i2} \not\subseteq A$$

ならば

$$O_i = O_{i2}$$

ただし、 $*$ は断層や不整合などの不連続関係あるいは不明の関係単元である。

iv) O_{i2} が A に包含されるが、 O_{i1} が A に包含されない場合は、 O_{i1} を新たな O_i とする。この場合、 O_i をチェック済みにしない。たとえば、 $A = L_3 \rightarrow L_4 \rightarrow L_5 \rightarrow L_6$ に露頭層序式 $O_i = L_1 \rightarrow L_2 // L_5 \rightarrow L_6$ を結合する場合、 $O_{i1} = L_1 \rightarrow L_2$ と $O_{i2} = L_5 \rightarrow L_6$ となる。 O_{i2} は A に包含されるが、 O_{i1} は A に包含されない。この場合、 O_{i1} が新たな O_i となる。

$$O_i = O_{i1} * O_{i2}$$

$$O_{i1} \not\subseteq A, O_{i2} \subseteq A$$

ならば

$$O_i = O_{i1}$$

ただし、 $*$ は断層や不整合などの不連続関係あるいは不明の関係単元である。

⑦ チェック済みの露頭層序式の数を数える。チェック済みの個数が変化しなければ終了し、変化した場合は再び⑥以下の作業を繰り返す。

5-3 露頭層序式の演算の結果

第7図に露頭層序式の演算結果の例を示す。第7図は演算結果を表示した画面である。図の左側の欄上部には各露頭で観察された露頭層序式が表示されている。左側の欄の下部は演算中の露頭層序式が途中経過として表示されている。右側の欄には、結合された層序式（地域層序式）が途中経過とともに表示されている。右側の欄の下部には結合

第7図 露頭層序式の演算結果

各露頭の層序式を連結して地域層序式を作成した例である。画面左欄上部には各露頭の層序式が表示されている。左欄下部は使用された露頭層序式が途中結果として表示される。右欄が連結の状態であり、連結の途中結果とともに表示される。右欄下部には連結されない露頭層序式が表示される。

ができなかった露頭層序式が表示される。

結合されなかった層序式が存在することは、地域層序式を組み立てる上でまだ情報が不足している場合、あるいはすべての地層が上下関係で順序付けられない場合のどちらかを意味する。両者を含めてさらに調査を進めることになる。

6. おわりに

露頭で観察されるデータの表現形式として層序グラフと層序式を導入した。層序式は層序グラフを式で表現したものである。層序式を使用すると層序と地層及び接触関係の性質が統一的に記述でき、データベースの入力形式として都合がよい。また、露頭単位の層序式を連結して、ある一定地域の層序を組み立てることもできる。今回は、層序式の理論と層序式の連結のアルゴリズム、露頭データの入力プログラムを検討した。

露頭間の層序式を結合する時に、結合されない露頭単位の層序式が残る場合がある。この場合は、層序に関する情報が不足しているかあるいはすべての地層が上下関係で順序付けられない場合のどちらかであり、連結する為の調査をさらに進めることになる。このように、調査の途中で順次検討が可能になる。

第4図(c)のような場合、L2の形成後、断層が形成されているので、層序としては「L1→→L2／／L3」であらわされる。しかし、この層序式ではL1とL3が断層で接していることが明示されていない。露頭構造を明示的に表示するためには、「L1／／L3」の層序式も必要になり、1つの露頭に2つの層序式が存在することになる。層序式は1つの式で、層序のみでなく露頭構造も表現できることが望まし

い。このため、層序式の表現方法をさらに検討する必要がある。また、この層序式の表現の変更に伴うアルゴリズムの検討も必要になる。

文 献

- 岩崎好規・松山紀香（1992）路頭データベース作成への提言．第3回日本情報地質学会GEOINFORUM'92，講演予集集，pp. 11-12.
- 河西秀夫（2000）個人用露頭データベースの設計についてー露頭構造の数式化に関する考察ー．情報地質，vol. 11，no. 4，pp. 235-240.
- 勝野直樹・西岡孝章・林浩司・伊佐治寿英・野澤竜二郎・鈴木康弘（2002）参加型WebGISを活用した露頭情報システムの構築例．情報地質，vol. 13，no. 2，pp. 74-75.
- 佐野雅弘（1997）デジタルフィールドマップ．日本情報地質学会シンポジウム'97，地球情報の特性と処理，講演論文集，pp. 27-32.
- 塩野清治・弘原海清（1992）地層累重の法則に関連する公理系の試案．情報地質，vol. 3，no. 4，pp. 213-223.
- 塩野清治（1999）地層累重の法則を保存する層序区分の数学的基礎．情報地質，vol. 10，no. 4，pp. 213-223.
- 横田修一郎（1996）路頭データベースの作成はなぜ困難か？ 情報地質，vol. 7，no. 4，pp. 297-301.
- 吉田研一・塩野清治・升本眞二（2000）野外地質調査支援システム-MidFielder-の試作．情報地質，vol. 11，no. 2，pp. 148-149.

要 旨

個人用露頭（野帳）データベースの設計について(2) 一層序の表現方法について

：河西秀夫

地質調査では露頭の記載が重要であるが、調査が進むにつれて観察結果の整理が大きな負担になる。このため、露頭データを整理検討できる露頭データベースの開発が必要になる。

著者はデータベース上の露頭の層序の記載方法として層序グラフと層序式を提案した。層序グラフはラベル付有向グラフを応用したものであり、節点が地層に相当し、弧が接触関係に相当する。弧は下位の地層から上位の地層である。節点のラベルは地層名称であり、弧のラベルは接触関係の名称である。地層の観察記載の内容は2項関係で地層名称に、接触関係の観察記載の内容は2項関係で接触関係の名称に関連付けられている。

層序式は層序グラフを式で表現したものであり、（下位にある地層単元）（関係単元）（上位にある地層単元）の順に並べて二つの地層の接触関係を表現する。地層単元は地層名称で表現され、関係単元は記号で表現される。層序式は、接触関係が不明の場合や周辺の露頭から推定される場合も含めて露頭の層序を統一的に表現できる。また、複数の露頭の層序式を連結することにより、ある一定地域の層序の組み立てが可能になる。著者はこの原理に基づいたアルゴリズムを示した。

キーワード：データベース、露頭、層序、層序式、ラベル付き有向グラフ