

不整合面を含む地質構造の定性的な扱いについて

森田 凌平^{†1,a)} 高橋 和子^{†1}

概要: 本研究では、不整合面を含む地層を対象とし、定性的な記号表現を用いることで、計算量を削減しつつ直観的な理解や推論を可能にする手法を述べる。地層の断面図を矩形で切り取り、矩形内に存在する層同士の境界線を直線または曲線で近似的に描くことで領域に分割した矩形をモデルとして扱い、その記号表現を提案する。地層モデルからこの記号表現を得るアルゴリズムと、記号表現から地層モデルを描画するアルゴリズムを構築した。これにより、地層構造の時間的な変化や生成過程が明確になった。

Qualitative Treatment of Geological Structures Involving Unconformity Surfaces

1. はじめに

日本では地震が多く、地層の調査や解析が頻繁に行われている。地層構造の推測には局所データを用いるが、その解釈は人によって異なる。数値を用いず定性的に扱うことで、直観的な理解や推論が可能となり、解釈に対して納得のいく説明を与えることができる。定性表現とは、正確で詳細な数値データを使わず、対象のある性質に着目し、その特徴を述語や記号で表現するものである。空間データの特性を活かした推論手法として定性空間推論 [1] があり、その中でも本研究では隣接関係と構造に着目した定性表現を用いる。

谷内は、褶曲地層の形状に関する推論や、不整合地層を対象とした定性的な記号表現を提案した [2]。この研究では対象とする地層の局所データを矩形で切り出してモデル化し、その外周に注目した記号表現を与え、その表現上での推論を述べている。しかし、不整合地層の扱いについては不十分であり、褶曲と不整合面が混在する地層の扱いについては述べていない。

不整合地層には“地層全体が傾いた上に新たな層が堆積する”という特徴があり、外周に注目するだけでは構造の情報を十分に得ることができないため、地層の内部構造に関する情報を考慮する必要がある。傾斜不整合は、地層の形成過程や地質構造の変遷を理解する上で重要な地質構造

の一つである。傾斜不整合を含む地層の構造的な特徴を定性的に表現することで、地質学的知見の整理や地質調査への応用が期待される。

本研究では、傾斜不整合の形成過程に着目し、新たに構造の情報を表す定性的な記号表現を提案し、外周の情報を表す記号表現と組み合わせることで地層モデルを表現する。そして地層モデルから記号表現を得るアルゴリズムおよび記号表現から地層モデルを描画するアルゴリズムを構築する。これによって記号表現から地層の生成過程の説明を得ることを目的とする。

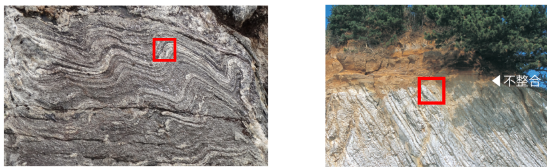
本論文の構成は以下のとおりである。第2章では対象とする地層モデルについて説明する。第3章では新たに提案した記号表現について説明する。第4章では地層モデルから記号列を得る方法について説明する。第5章では記号列から地層モデルを描画する方法について説明する。第6章では記号表現の評価を行う。第7章では本研究の結論を述べる。

2. 対象とする地層モデル

2.1 傾斜不整合

地層が曲がりくねるように変形した構造を持つ地層 (図 1(a)) を褶曲地層、重なり合った地層に時間的な隔たりが存在する構造を持つ地層 (図 1(b)) を不整合地層と呼ぶ。また不整合が生じた際に形成される境界面を不整合面と呼ぶ。褶曲については、地層が山状に盛り上がった構造を背斜、地層が谷状に沈み込んだ構造を向斜と呼ぶ。

^{†1} 現在、関西学院大学
Presently with Kwansai Gakuin University
^{a)} ryouhei120413@gmail.com



(a) 褶曲 [4] (b) 不整合 [5]

図 1: 対象とする地層

傾斜不整合の形成過程について説明する。最初の段階では、ほぼ水平に堆積した地層が形成される。この堆積は通常、海洋、湖沼、河川などの安定した堆積環境において進行し、砂岩、頁岩、積岩が積み重なる。堆積が終了した後、地殻運動により地層が変形し、傾斜が生じる。この段階では、元の堆積層が傾斜した状態に保たれる。地層が傾斜した後、地表に露出することで、侵食作用が開始される。風化や流水による侵食が進行し、傾斜した地層の上部が削られ、比較的平坦な侵食面が形成される。この侵食面が、後に不整合面となる。侵食面が形成された後、その上に新たな堆積が始まる。上位の地層は、下位の傾斜した地層と異なる角度で堆積する。その結果、新旧の地層間に明瞭な角度の不一致が確認されることで、傾斜不整合が形成される。この不一致は、地層の形成における時間的ギャップを示しており、地層の堆積、傾斜、侵食、再堆積という一連の地質過程を反映している (図 2)。

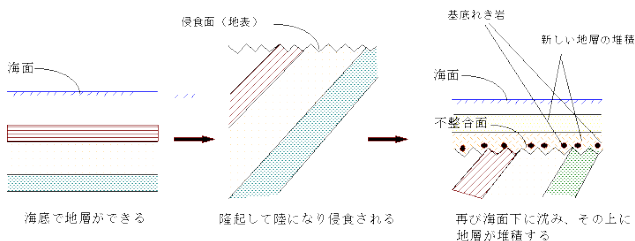


図 2: 傾斜不整合の生成過程 [3]

この結果、上位の地層は複数の下位の地層と接する場合があります。本研究ではこれを多接不整合面と呼ぶ。そして“多接不整合面を持つ不整合構造”を多接不整合、“多接不整合面に接する層のうち、最も新しい層以外の層”を不整合基層と呼ぶ (図 3)。

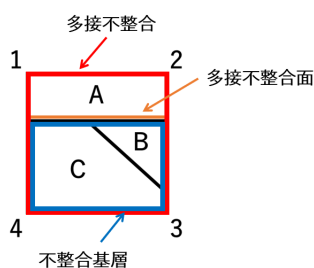


図 3: 多接不整合

2.2 地層モデル

本研究では褶曲地層と不整合地層を対象とする。対象とする地層を地面と垂直に切った断面図から、有限な矩形で切り取る。矩形の頂点に対して左上から時計回りに 1,2,3,4 という頂点番号を付与する。矩形内に存在する層同士の境界線を直線または曲線で近似的に描くことで領域に分割する。各領域は各層に対応する。侵食が起こっている部分は波線で表す。このようにして得られた図形を地層モデルとする。

図 1(a) の赤枠部分をモデル化すると図 4(a) のようになり、図 1(b) の赤枠部分をモデル化すると図 4(b) のようになる。また、図 4(b) のように層同士の境界線に対して、左右いずれかの辺から境界線が引かれているとき、このモデルは T 字構造を持つという。

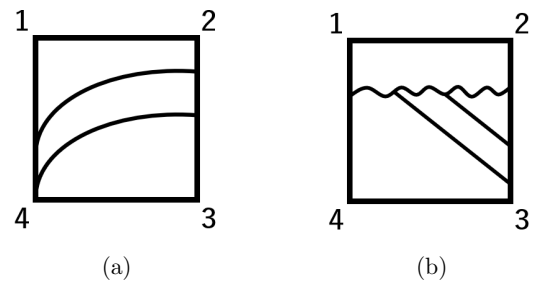


図 4: モデル化例

2.3 対象の条件

一般的な地質構造を扱うにあたり、以下の条件をすべて満たすデータを扱う。

- 条件 1. 堆積、侵食、傾斜、褶曲によって形成されている
- 条件 2. 傾斜の後は侵食が発生している
- 条件 3. 侵食によって任意の層が完全に失われていない
- 条件 4. 生成過程の最後が堆積
- 条件 5. 傾斜の回数は 2 回以下かつ連続で傾斜していない
- 条件 6. 褶曲の回数は 1 回以下

さらにモデルとして矩形を切り取る際には以下の条件二つを加える。

- 条件 7. 下辺に端点が存在しない
- 条件 8. 背斜・向斜部分の境界線の端点は右辺と左辺に出現する

条件 1 から 3 は、対象外としている地層変化を排除するものである。条件 4 から条件 8 は、単純な地層を扱うための条件である。一般的な地層の多くが単純であることから、本研究では単純な地層を対象としている。

3. モデルの記号表現

2.3節で述べた条件を満たすデータを(外周列, イベント列)として二項組で表す. 外周列は地層の隣接関係や頂点との関係を表す列であり, イベント列は地層の構造を表す列である. また, 各層は層記号と呼ばれるアルファベットで記述する.

3.1 外周列

外周列は [2] における定義と同様で, 地層モデルの外周を頂点番号 1 から時計回りに辿ったときに出現する層および頂点の列である. 層が推移した時, 推移後の層記号を順に加え, 頂点に出会えば頂点番号を順に加える. 図 5 の地層モデルの場合, 外周列は 1 から始まり, 1 を外周列に加える. その後頂点 2 を通り, 2 を外周列に加える. 辺 2,3 間で層が A から B, B から D に変化するため, 層記号 B と D を記号列に加える. 同様に 3,4 を外周列に加え, 辺 4,1 間で層が D から C, C から A に変化するため, 層記号 C と A を記号列に加える. この操作により外周列は “12BC34CA” となる.

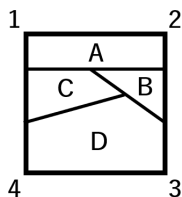


図 5: 不整合地層モデルの例

3.2 イベント列

イベント列は層記号, 傾斜記号, 褶曲記号, 侵食記号で構成される. イベント列における層記号は該当する層の堆積を表し, 堆積時に形成される多接不整合面も表現できる. 多接不整合面は “ $A(B_1 \dots B_n)$ ” と記述し, 不整合基層 B_1, \dots, B_n の上に層 A が堆積することを表す. 傾斜 (inclination) 記号 i_L, i_R は地層がどの方向に傾斜したかを表す. i_L は左側が下方向に傾いたことを表し, i_R は右側が下方向に傾いたことを表す. 褶曲 (fold) 記号 $f_1, f_2, f_3, f_4, f_A, f_S$ は地層がどの方向に褶曲したかを表す. f_1 は頂点 1 を中心として地層が曲がっていることを表し, f_2, f_3, f_4 も同様に各頂点を中心として地層が褶曲していることを表す. また f_A, f_S は背斜 (anticline) と向斜 (syncline) を表し, 背斜状, 向斜状に褶曲していることを表す. 侵食 (erosion) 記号 e は侵食のタイミングを表す. これらの記号を古い順に並べることで, イベント列は層の堆積, 傾斜, 褶曲, 侵食の時系列を表現している. 図 5 の地層モデルの場合 “ $DCi_L B(DC)i_R A(CB)$ ” となる.

3.3 具体例

外周列とイベント列を用いて地層モデルをどのように表現するか例を用いて説明する. 以下の例は対象外の地層モデルとなっているが, これは説明の簡単化のために対象とする地層モデルを簡略化しているためである.

図 6(a) は堆積のみで構成された地層モデルである. 外周列は “12BC34BA” となり, イベント列は “CBA” となる. イベント列は “層 C が堆積した後に層 B が堆積し, その後層 A が堆積したことを” 表している.

図 6(b) は堆積と褶曲で構成された地層モデルである. 外周列は “12BC34BA” となり, イベント列は “ $CBAf_1$ ” となる. イベント列は “層 A, B, C が堆積した後, 頂点 1 を中心に褶曲していることを” 表している.

図 6(c) も堆積と褶曲で構成された地層モデルである. 外周列は “12BC34BA” となり, イベント列は “ $CBAf_A$ ” となる. イベント列は “層 A, B, C が堆積した後, 向斜状に褶曲していることを” 表している.

図 6(d) は堆積と傾斜と侵食で構成された地層モデルである. 外周列は “12C34BA” となり, イベント列は “ $CBi_L e A(CB)$ ” となる. イベント列は “層 C, B が堆積した後に層全体の左側が下方向に傾斜し, 侵食が発生した後に層 C, B の上に層 A が堆積していることを” 表している.

図 6(a), 図 6(b), 図 6(c) の層の隣接関係は同じだが構造が異なる. つまり外周列だけではこれらの地層モデルを区別できない. しかしイベント列を組み合わせて用いることで構造の違いを表現できる.

既存の手法 [2] では層の隣接関係のみが記述されるのに対し, 本研究の表現では不整合や傾斜の方向も表現されており, 地層の変化を読み取ることが可能である.

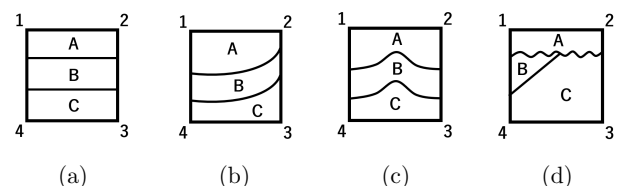


図 6: 同一の外周列を持つ地層モデル

4. 地層モデルから記号列を得る方法

4.1 記号表現への変換

地層モデルから外周列を得る方法は [6] に準じて, (i) 堆積順を求める, (ii) 堆積順に傾斜記号, 侵食記号などを追加する, という二つのステップで構成される.

まず, 堆積順を求める. 堆積順は層記号の列であり, 層記号を堆積した年代が古い順に並べたものである. 地層モデルの下辺に接する層を P_0 , 堆積した層の領域 (凸多角形) を L とする.

- (1) L を P_0 とする. P_0 を堆積順に加える.
- (2) L の辺の中で, L に含まれない層 Q との境界線かつ, 2層にのみ接する境界線 B_Q に着目し, Q を記号列に加え, L と Q を合わせた領域を新たに L とする.
- (3) (2) を全ての層を記号列に加えるまで繰り返す.

次に, 堆積順に傾斜記号 i_L, i_R を追加する.

上記の手法で得られた堆積順を S_1, \dots, S_n とする. また, 堆積順を求める過程で着目した境界線を順に $B_{Q_1}, \dots, B_{Q_{n-1}}$ とする. $i = 1, \dots, n-1$ に対して以下を繰り返すことで, S_1, \dots, S_n に対して i_L, i_R を加える位置を決める.

- (1) B_{Q_i} が左辺から右辺にひかれていない場合
 B_{Q_i} の傾斜方向を判定する. 傾斜方向は図において座標を調べ, 左に傾いている場合は i_L , 右に傾いている場合は i_R とそれぞれ判定する. この境界線に接する層の中で最も新しい層の直後に傾斜記号を追加する.
- (2) B_{Q_i} が左辺から右辺にひかれている場合
 $B_{Q_{i+1}}$ が左辺から右辺にひかれており, $B_{Q_{i+1}}$ のみが上辺・下辺に平行ならば, B_{Q_i} の傾斜方向を判定し, S_i の直後に傾斜記号を追加する.

次に, 堆積順に層の境界線を確認し, 以下の操作を行うことで侵食記号および不整合基層を追加する.

- (1) 波線の場合
その波線に接する層のうち最も新しい層記号の直前に侵食記号を追加する.
- (2) 多接不整合面の場合
多接不整合面に接する層の内, 最も新しい層記号の直後に不整合基層に該当する層記号を括弧付きで加える. 括弧内の不整合基層の順番は堆積順と同じにする.

4.2 複数のイベント列の導出

上述の手法によって地層モデルに対応するイベント列が一つ得られるが, 褶曲を含む場合は一般に対応するイベント列は一意的に定まらない.

図 7(a) の右側の図を最終的な地層モデルとする. 図 7(a) は層 C, B, A が堆積した後に頂点 3 を中心に褶曲している. イベント列は “ $CBAf_3$ ” となる. 図 7(b) は層 C, B, A が堆積した後に左側が下方向に傾き, 頂点 3 を中心に褶曲している. イベント列は “ $CBAi_Lf_3$ ” となる. 図 7(c) は層 C, B, A が堆積した後に頂点 3 を中心に褶曲し, 左側が下方向に傾いている. イベント列は “ $CBAf_3i_L$ ” となる. 図 7(d) は層 C, B, A が堆積した後に左側が下方向に傾き, 頂点 3 を中心に褶曲し, 再度左側が下方向に傾いている. イベント列は “ $CBAi_Lf_3i_L$ ” となる.

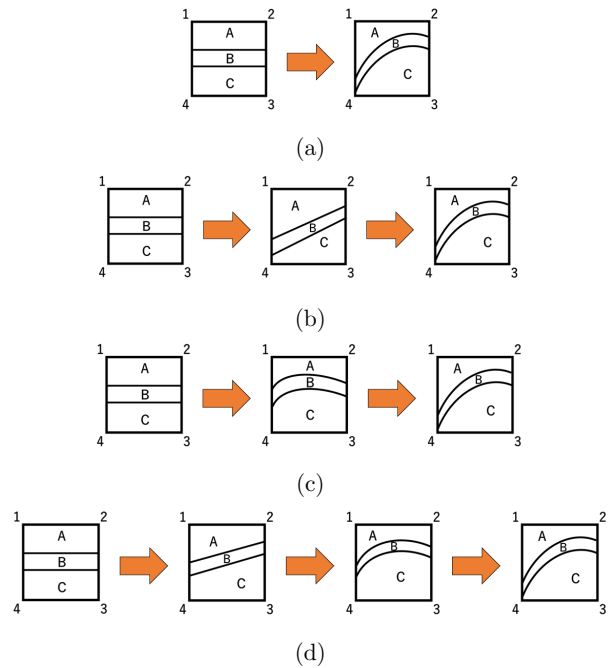


図 7: 生成過程の例

このように最終的な地層モデルが同じ形状を持っていても, 生成過程に違いがある場合は, それに基づいた複数の表現を得ることが可能である.

また, イベント列から, そのイベント列とは異なる生成過程 (イベント列) を推論することも可能である. 最終的な地層モデルが同一である場合においても, 生成過程が異なる場合に適用されるイベント列の推論規則を以下に示す.

$$f_{vertex} = i_{direction} f_{vertex}$$

$$= f_{vertex} i_{direction} = i_{direction} f_{vertex} i_{direction}$$

ここで, $vertex = 1, 2, 3, 4$ であり, $direction$ は次の条件を満たす.

- $vertex = 1, 3$ の場合, $direction = L$
- $vertex = 2, 4$ の場合, $direction = R$

また背斜および向斜についても, 生成過程が異なる場合に適用されるイベント列の推論規則を以下に示す. 本研究では背斜および向斜形成時に地層全体が傾斜することを考慮していないため, 生成過程の違いは限定的である.

$$i_{direction} f_{vertex} = f_{vertex} i_{direction}$$

ここで, $vertex = A, S$ であり, $direction = L, R$ である.

この規則は褶曲が “地層が曲がりくねるように変形した構造” という特殊な構造を持つため成立する. 一方, 傾斜のみの場合, 侵食を除くと地層の形状が直線であるため, 上記のような規則は成立しない. また, 連続して傾斜が生じる場合は本研究で対象外としている. さらに, 侵食における境界線と褶曲における境界線が異なることから, 侵食に関しても上記のような規則は成立しない.

5. 記号列から地層モデルを描画する方法

与えられた任意の記号表現に対して対象とする地層モデルが必ず存在するとは限らない。

例えば、外周列において、頂点番号 3,4 の間に層記号が存在する場合は、対象とする地層モデルの条件 7 を満たさない。

また、外周列とイベント列に矛盾があってははいけない。イベント列からは地層が変化したタイミング以外の情報も得られる。具体的には、外周上の端点の数、外周上の各端点の推移、頂点番号を除いた外周列である。この中で、外周上の端点の数および頂点番号を除いた外周列を用いて与えられた記号表現と矛盾がないことを調べる必要がある。

記号表現(外周列, イベント列)が与えられ、対応する地層モデルが存在する場合、それを描画する方法を以下に示す。

- (1) 外周列から辺上の端点および各端点の推移を求め、座標を決定する。
- (2) イベント列から最後に堆積した層 X の境界線の端点の組を求め、境界線 XB を他の境界線と交差しないよう描画する。イベント列上で X の直前(不整合基層, 傾斜記号, 褶曲記号を除く)が e の場合, 波線で描画する。またイベント列上で X の直後(不整合基層を除く)が傾斜記号もしくは褶曲記号の場合, XB 以降(XB を含む)の境界線はこれらの変化を反映した形にする。
- (3) X が T 字構造を持つかをイベント列で判定し, 該当する場合は XB 上に端点を追加し, 推移を求める。
- (4) 層 X の次に新しい層を X とし, (2) から (3) の操作を繰り返す。

以下に例を示す。図 8 は外周列 “12BCD34A” イベント列 “ $DCBi_ReA(DCB)$ ” から地層モデルを描画する過程を示したものである。

まず辺上の各端点の推移を求める。外周列から頂点 2 と頂点 3 の間に端点が三つあり、頂点 4 と頂点 1 の間に端点の一つがあると判定できる。同様に端点 1 は層 A から層 B に推移していると判定できるため、端点 1 の推移は “(A, B)” と判定できる。端点の推移は(推移前, 推移後)を表している。同様に端点 2 の推移は “(B, C)”, 端点 3 の推移は “(C, D)”, 端点 4 の推移は “(D, A)” である(図 8(a))。

次に最後に堆積した層 A の境界線の端点の組を求め、境界を描画する。層 A の境界線となる二つの端点の推移は “(A, *)” と “(*, A)” であるため、端点 1 と端点 4 が層 A の境界線の端点の組となる(図 8(b))。

次に境界線上に端点を追加する。層 A は “ $A(DCB)$ ” と

なっているため層 A が T 字構造を持つと判定できる。層 D, C, B と層 A が隣接しているので二つ端点を追加する。追加する端点は上記の説明より端点 5 が “(D, C)”, 端点 6 が “(C, B)” となる(図 8(c))。

次に層 B の境界線の端点の組を求め、境界を描画する。層 B の境界線の端点の組は端点 2 と端点 6 になるので、この 2 点を結ぶように描画する。またイベント列上で B の直後は “ i_R ” であるため、これ以降(B を含む)は右側に傾いた境界線を描画する必要がある(図 8(d))。

次に層 C の境界線の端点の組を求め、境界を描画する。層 C の境界線の端点の組端点 3 と端点 5 になるので、この 2 点を結ぶように描画する。この境界線も B と同様に右側に傾いた境界線として描画する(図 8(e))。

全ての端点を使用したため、操作を終了する。最終的な地層モデルは図 8(f) のようになる。

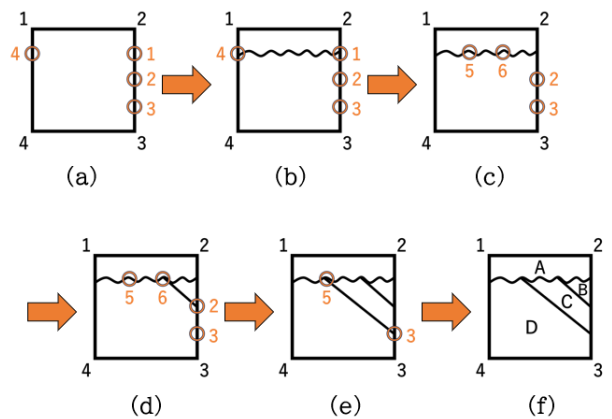


図 8: 記号列から地層モデルを描画する過程

6. 評価

提案手法が Web 上に公開されている地層の画像データにどこまで通用可能かを調査した。具体的には、検索キーワードとして “褶曲” および “不整合” を設定し、それぞれの検索結果の上位 50 枚の画像を対象とした。画像の種類としては、写真と、模式図など写真以外の画像の二通りである。写真の場合、画像処理あるいは目視による手作業でモデル化を行うが、今回は補正については考慮していないので、層同士の境界線が鮮明なもののみ有効とする。検索の結果、有効なデータは二つのキーワードについて、それぞれ 27 枚, 14 枚であった。これらが記号表現可能かどうかを調べた。なお、画像全体ではなく画像の一部を切り取った場合に提案手法で表現可能である場合も “記号表現可能な画像” として分類した。

“褶曲” を検索キーワードとした場合の結果は、模式図画像 16 枚, 有効な写真画像 27 枚, 写真画像の中で記号表現可能な画像 17 枚であった。図 9(a) は模式図の画像の例, 図 9(b) は有効でない画像の例, 図 9(c) は有効だが記号表

現できない画像の例, 図 9(d) は有効かつ記号表現できる画像の例をそれぞれ示す。

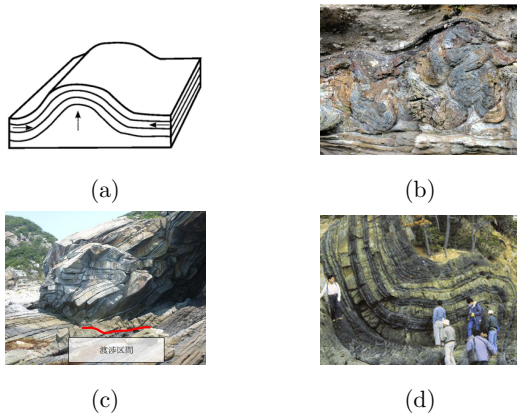


図 9: 褶曲の画像検索結果 [7][8][9][10]

“不整合”を検索キーワードとした場合の結果は, 模式図画像 23 枚, 有効な写真画像 14 枚, 写真画像の中で記号表現可能な画像 12 枚であった。図 10(a) は模式図の画像の例, 図 10(b) は有効でない画像の例, 図 10(c) は有効だが記号表現できない画像の例, 図 10(d) は有効かつ記号表現できる画像の例をそれぞれ示す。

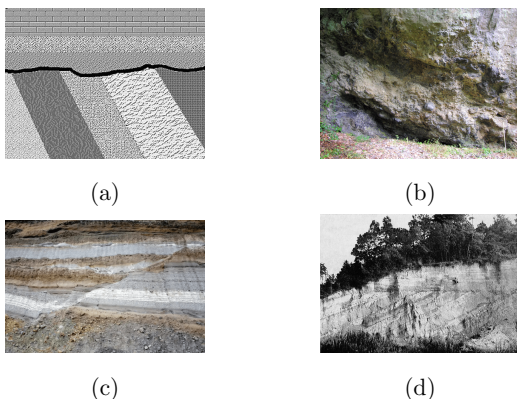


図 10: 不整合の画像検索結果 [11][12][13][14]

調査の結果, 褶曲および不整合に関する有効な写真画像すべてを, 提案手法で記号表現することは不可能であった。その要因として, 提案した記号表現における表現力の限界が考えられる。記号表現が不可能な画像は, 地層構造が複雑である傾向にあり, 主に単純な構造を対象とした本手法では, 適切に表現することが不可能であり, 表現を拡張する必要がある。

7. おわりに

本研究では, 褶曲や不整合面を含む地層を対象とし, 既存の手法を拡張した新しい記号表現を提案し, 地層モデルからこの記号表現を得るアルゴリズムおよび記号表現から地層モデルを描画するアルゴリズムを構築した。

地層構造の時間的な変化を表す“イベント列”を導入したことによって, 地層の生成過程を把握することが可能になるだけでなく, 同一の地質構造に対して異なる生成過程を表すことも可能になった。また, 地質構造の解析においては生成過程の解釈が専門家の判断によって異なる場合が多くあるが, イベント列を用いることで多様な視点を反映した複数の記号表現を与えることができるようになった。これらの解析を行うことで地層構造の解釈や推論に関する新たな知見を得る可能性がある。地質構造の解析においてこのような定性的な扱いをしたものはほとんどなく, 本研究はこの分野の新しいアプローチを提案するものである。

今後の課題として, 記号表現を拡張して断層や貫入, さらに複数の褶曲や不整合が複雑に絡み合う地層構造にも対応できる枠組みを構築することが考えられる。これによって, より多様な地層モデルを表現し記号表現の適用範囲を広げることができる。

参考文献

- [1] J.Chen, et al.: “A Survey of Qualitative Spatial Representations”, *The Knowledge Engineering Review*, Vol.30, No.1, pp.106-13(2013).
- [2] 谷内 勇太: “地質構造の推論に関する定性的アプローチ”, 関西学院大学大学院理工学研究科情報科学専攻修士論文(2024).
- [3] 地球の科学 (online), 入手先 (<https://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyuu/chishitsukozo-chishitsuchosa.htm>) (2024.12.3).
- [4] 板村地質研究所 (online), 入手先 (https://geo.w-human.com/e_science/stratum.html) (2024.12.3).
- [5] 学図プラス (online), 入手先 (<https://gakuto-plus.jp/12136>) (2024.12.3).
- [6] 森田 凌平, 谷内 勇太, 高橋 和子: “定性表現から地層を描画するプログラムの設計と実装”, 第 38 回人工知能学会全国大会 (JSAI2024)(2024).
- [7] ウィキペディア (online), 入手先 (<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%B6%E6%9B%B2>) (2025.1.9).
- [8] 朝新聞デジタル (online), 入手先 (<https://www.asahi.com/articles/ASS7045SKS70PTIB001M.html>) (2025.1.9).
- [9] すさみ町観光協会 (online), 入手先 (<https://susami-kanko.com/geopark-guide-phoenixfold/>) (2025.1.9).
- [10] 産総研地質調査センター (online), 入手先 (<https://www.gsj.jp/geology/geomap/process-field/formation.html>) (2025.1.9).
- [11] ウィキペディア (online), 入手先 (https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%8D%E6%95%B4%E5%90%88_%28%E5%9C%B0%E8%B3%AA%E5%AD%A6%29) (2025.1.9).
- [12] 産総研地質調査センター (online), 入手先 (<https://gbank.gsj.jp/geowords/picture/photo/unconformity.html>) (2025.1.9).
- [13] Study-Z(online), 入手先 (<https://study-z.net/100135244/2>) (2025.1.9).
- [14] 京都府レッドデータブック 2015(online), 入手先 (<https://www.pref.kyoto.jp/kanky/rdb/geo/db/soi0006.html>) (2025.1.9).