

重複変形とオリオリ褶曲

—岐阜県の坂祝向斜に分布するチャート層の変形を例として—

青 野 宏 美

Superimposed Fold versus ‘OLI’OLI Fold in the Chert Beds of the ‘Sakahogi Syncline’, Gifu Prefecture

Hiromi AONO

Abstract

It is generally recognized that the superimposed folds were formed in the metamorphic and/or orogenic zone, which were suffered deformational processes more than twice. However, it has become clear that similar fold structures are formed in a single deformation process. Such a characteristic deformation of fold is named as “‘OLI’OLI fold” and discussed about the property in this paper. These “‘OLI’OLI fold” as a buckling fold is found in the world on the earth, for example, in the arc of the islands besides the trench or ‘basin-and-dome structure’ in Jura Mountains of Europe and Appalachian Mountains of the east side of North America.

En échelon fold axes are observed in the Sakahogi Syncline, Gifu Prefecture. It is probably explained by the “‘OLI’OLI fold” according to the gravity-sliding deformation. On the other hand, it is possible that the inclined plunging or reclined folds causes en échelon pattern of the fold axes on the ground surface.

Key words

superimposed fold, ‘OLI’OLI fold, chert beds, ‘Sakahogi Syncline’, Gifu Prefecture, En échelon fold axes

1. はじめに

褶曲の分類の中に「重複褶曲」がある。従来この重複変形であると考えられてきたものの中に、1回の変形過程で生じたと考えられるものに対して、新たに「オリオリ褶曲（‘OLI’OLI fold）」の名称を提案する。この褶曲は一度の変形で生じ、地球上の岩石層に対してさまざまなスケールで起こっている可能性がある。このアイデアは、折り紙の「ミウラ折り」に由来し、その応用として作成された「オリオリ・アーチ」に類似した一種の座屈褶曲である。この変形過程によれば、太平洋西岸のアーチ状に並行して連なる島弧と海溝列、西南日本南岸に見られるアーチ状の海岸線と前弧海盆の分布、スイスとフランスにまたがるジュラ山脈や北米アパラチア山脈のすべり面（デコルマン）を伴う褶曲の形状などを統一的に理解することができる。新たな作業仮説として過去の堆積盆の形成や中・古生界のチャート層に見られる褶曲の形態についても言及する。

2. 「ミウラ折り」と「オリオリ・アーチ」

地形図や案内図を小さく効率よく簡単に折り畳めて、開くときは地図の端を持って開けば一気に開くことができる紙の折り方を考案者の名前を取って「ミウラ折り」という。この「ミウラ折り」は、すでにいろいろな紙製品や人工衛星の太陽電池パネルなどに取り入れられている。また、肉薄の円筒を上下方向から強く圧縮すると、連続して折り畳まれた菱形のしわ状構造が生じる。この形は、円筒破壊の理論研究者の名前に因んで、「吉村パターン」と呼ばれている。モナリザの袖のしわ模様が広く知られているが、布地からできている円筒形をしたズボンにもこの模様が現れることがある（写真1）。この「吉村パターン」を用いて作られる造形は「オリオリ・アーチ」と呼ばれており、工業製品として円筒形をした缶飲料製品の表面模様にも応用されている（写真2）。この模様はインターネットの公式「ミウラ折り」サイト（（株）パテント・サポート機構）に展開図が掲載されており、その展開図の山折りと谷折りの部分を順に折っていくと、折り畳まれた紙全体がゆるいアーチ状の形状となり、その表面に独特の模様が現れる。写真3は、アーチの形状を真横から見たところであり、写真4は、オリオリ・アーチを裏返しにした背面を上から見たところである。

3. オリオリ・アーチ状の変形構造

「オリオリ」という言葉には、ハワイ語で‘愉快’、‘楽しい’の意味があるという。そこで、重複変形ではなく1回の座屈変形によって折り畳まれた結果として生じた褶曲構造を本論では、「オリオリ褶曲」（‘OLI’OLI fold）と呼ぶことにする。「オリオリ褶曲」の特徴として挙げられることは、1回の座屈変形であるにもかかわらず、複数の褶曲軸の交差が生じる点にある。わずかに歪んだ曲面が圧縮変形を受けた場合、隆起帯では2本の背斜軸が交差し、さらにそれらの背斜軸の交差点で交差する1本の向斜軸が生じ（図1上）、圧縮方向と平行な軸をもつ、ゆるいアンチフォームを形成する。またわずかに歪んだ沈降帯が圧縮変形を受けた場合は、2本の向斜軸が交差し、さらにそれらの向斜軸の交差点で交差する背斜軸が現われて（図1下）、圧縮方向と平行な軸をもつ、ゆるいシンフォームを形成し、その結果としてジグザグの堆積盆を生じることになる。さて、このような「オリオリ褶曲」とは、地球上でどのような場所に見られるのだろうか？

地球上で最大の座屈変形は何かといえば、海

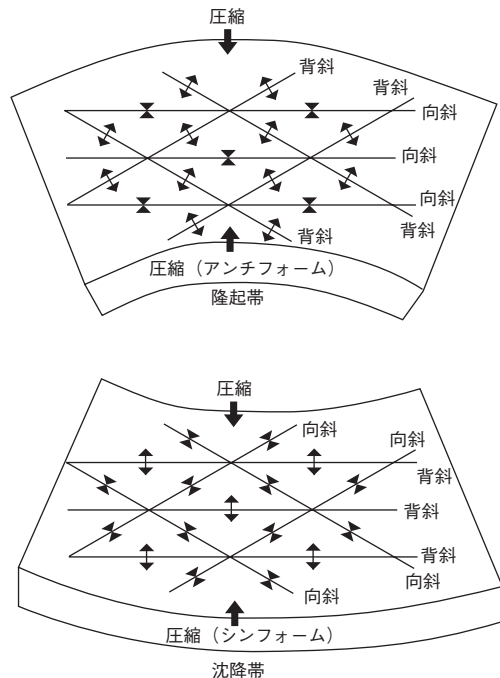


図1 オリオリ褶曲の形態。隆起帯では、圧縮方向に平行な軸をもつアンチフォームになる（上）。沈降帯では圧縮方向に平行な軸をもつシンフォームになり（下）、その結果沈降帯の向斜軸に沿ってジグザグの堆積盆が生じる。

洋プレートが重力によって沈む込むことによるプレート自身の変形であろう。海洋プレートが海溝で他の大陸または海洋プレートの直下に沈み込むときの断面図は、プレートの沈み込みの角度の違いはあれ、どの地質の教科書でも見られるように、いつもその断面図には平板を下方に曲げた図になっている。しかし厚さ100 kmもある海洋プレートの規模を考えると、実際の変形の様子は平板のプレートが単に折り曲げられたものではなく、球面上でのプレートの曲面が重力によって下方に引っ張り込まれるときにベコンと地球内部に曲げられた(深尾, 1985)形状をしており、座屈変形といえる。この現象は、深尾良夫さんの『球殻テクトニクス理論』として知られている。その様子はグーグル・アースの衛星写真にもよく表れている。

アリューシャン列島から千島列島・日本列島・伊豆—小笠原列島・マリアナ列島まで、太平洋西岸に島弧や火山弧に並行してアーチ状の海溝列が連なっている(写真5)。これらの海溝の大陸側には、それぞれアリューシャン海盆・オホーツク海盆・日本海海盆・伊豆—小笠原海盆・マリアナ海盆などの縁海が広がっている。一方、太平洋プレートの反対側の北米から南米にかけての沈み込み帯には、このようなアーチ状の海溝と対になる縁海は存在しない。つまり、海溝からのアーチ状に連なるプレートの沈み込み帯と縁海との形成過程には、強い関連性があったことを示唆している。おそらく海洋プレートの沈み込みにもなってアーチ状に海洋プレートの中央部がベコンと後退したときに、海溝に固着した大陸の一部が裂けて広がって、その開口部に沿ってマグマが上昇して、海洋地殻が形成され、島弧の背後に縁海が広がったものと考えられる。

このようなアーチ状の島弧や火山弧および海溝列は、太平洋プレートの西側だけではなく、大西洋の西側の一部にも見ることができる。カリブ海には、小アンチル列島に大西洋プレートの一部が西側に沈み込んでおり、その背後の小アンチル列島南部の西側に縁海としてのグレナダ海盆(写真6)が見られる(平, 2004)。また、南大西洋の南米と南極大陸の間には、スコシア列島の西側に大西洋プレートの一部が沈み込んでおり、サウス・サンドウィッチ海溝の形状は東側に張り出したアーチ状を呈している(写真7)。大西洋に見られるこれらの島弧と海溝のペアは、太平洋プレートが沈み込む海溝列ほどには発達していないが、いずれその裂け目が徐々に拡大していけば、将来は大西洋西岸の巨大な沈み込み帯へと発達する可能性も否定できない。

次に大きなオーダーの座屈変形として地球上に観察されるのは、フィリッピン海プレートの沈み込みに伴う、西南日本の海溝である駿河トラフから南海トラフにかけてとその陸棚斜面に見られる前弧海盆列(写真8)である。東から遠州海盆・熊野舟状海盆・室戸舟状海盆・土佐海段・日向海段(地質調査所, 1977)が東西方向に並んでいる。また、西南日本の太平洋側の海岸線は、静岡県の御前崎、和歌山県の潮岬、高知県の室戸岬と足摺岬、宮崎県の青島を挟んで北方に弓なりに湾曲しており、それらの岬付近を境にして、各前弧海盆が東西方向に並んでいるように見える。同じ沈み込み帯であるにもかかわらず、これらのアーチ状の海岸線や前弧海盆の組み合わせは、東北日本弧や琉球列島の陸棚斜面付近に見られる海盆列としては発達していない。

西南日本のネオテクトニクスの考え方によれば、南海トラフの前弧海盆では東西性の圧縮が卓越するために潮岬・室戸岬・足摺岬などが屈曲により隆起して、さらに南海トラフ側では逆断層を伴う南北性の圧縮が卓越している(Sugiyama, 1994)。南海トラフの形状が東西方向に直線的であるにもかかわらず、なぜ前弧海盆や岬の隆起帯を生じるのであろうか?この形成過程を「オリオリ褶曲」による座屈変形構造であると考えれば、簡単に説明することができる。つまり、西南日本の海岸線から、海溝にかけては斜面を伴う緩い曲面を呈しており、南海トラフの海溝側は、フィリッピン海プレートの沈み込みの影響が強いために、巨大逆断層運動を伴う南北性の圧縮が

卓越する。一方、逆断層を伴うすべり面（デコルマン）を境にして、より陸側の海底では、太平洋プレートによって東西方向に圧縮された結果、疑似円筒形をした斜面が座屈変形により「オリオリ褶曲」を形成して、その谷折り部分に相当する沈降域には前弧海盆を生じ、山折り部分に相当する隆起域には岬が生じたと考え、すっきりした説明が可能である。

4. 作業仮説としての「オリオリ褶曲」

ヨーロッパ大陸のジュラ山脈や北米大陸の大西洋側に見られるアパラチア山脈には、ともに東北東—西南西方向の軸を持つ連続した褶曲が見られる。このアパラチア山脈の褶曲(写真9)は、古生代前期のカレドニア造山運動に伴い、大陸プレートどうしの衝突によって形成されたとされている。また、スイスからフランスにまたがるジュラ山脈の褶曲(写真10)は、新生代のアルプス造山運動により、アフリカプレートとヨーロッパプレートが衝突した際にアルプス山脈の北側に、その下部にデコルマン（すべり面）をともなって生じたとされている。しかし、これらの褶曲列の軸は、一方向に傾いたままではなく、褶曲軸が上下にうねりながら細長いドーム・アンド・ベーズン構造を呈しているようにも見える。従来は、このような褶曲は2回以上の変形過程を経験した重複褶曲と考えられてきた。しかし、この褶曲が1回の座屈変形によって形成されたと考えれば、この連続したドーム・アンド・ベーズン構造は、典型的な「オリオリ褶曲」とみなすことができる。長野県から新潟県にかけて見られる新第三紀の堆積層に生じた、うねった細長いドーム・アンド・ベーズン構造も、「オリオリ褶曲」として説明できるかもしれない。

中生代のジュラ紀から白亜紀に堆積した手取層群の分布域(図2上)を眺めてみると、不規則に堆積盆が並んでいるように見える。これらの地層は、堆積後の衝上断層や横ずれ断層などによって水平方向に移動したり、褶曲などの変形が後から加えられているが、その分布域の形状は独特であり、初期の堆積盆の発生過程については、あまりよくわかっていないとは言えない。時代の変遷による堆積盆の中心移動(松川ほか, 2003)はあるものの、大雑把に手取層群の堆積盆全体の形状を眺めてみるとジグザグに連続して並んでいる(図2下)ようにも見える。

手取層群よりも古いジュラ系下部の来馬層群の堆積盆の発生については、横ずれ断層によるプル・アパート・ベーズンとしての仮説が出されている(熊崎・小嶋, 1996)。しかし雁行して並走する横ずれ断層によって引っ張られた結果生じた単なる沈降帯では、このようなジグザグの配列を説明することはできない。仮に、プル・アパート・ベーズンが生じたとして、その後、このわずかに歪んだ沈降帯に対して、応力場の方向が変化して圧縮場になったとすれば、オリオリ・アーチの背面部(写真4)に相当するジグザグ状の堆積盆の中に手取層群の堆積物が堆積することができる。つまり「オリオリ褶曲」のゆるい向斜部分が沈降

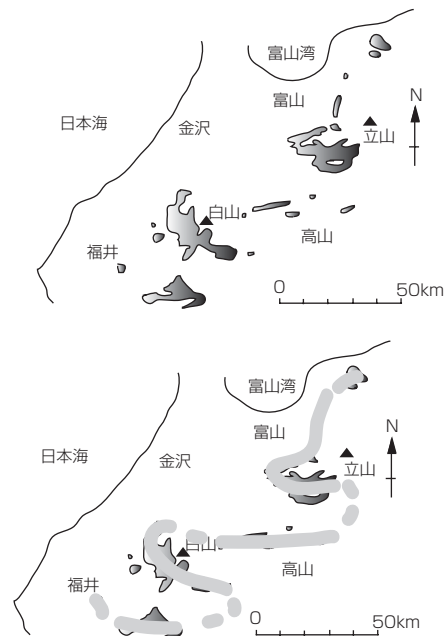


図2 手取層群の分布図(上)と堆積盆のジグザグ分布(下)

帯となり、初期の手取層群の受け皿としてのジグザグな堆積盆に相当すると考えられるのである。オリオリ褶曲による基盤の変形と、その結果生じた堆積盆の形成過程を図3に示す。

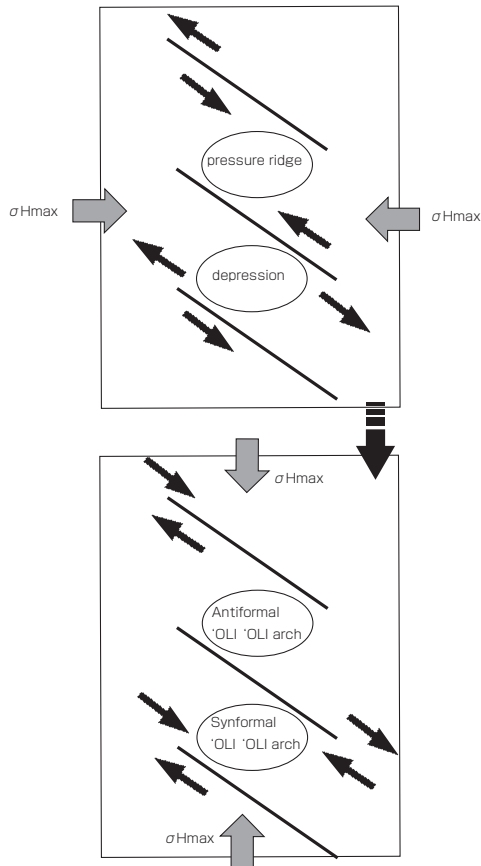


図3 オリオリ褶曲による基盤の変形と堆積盆の形成過程

岐阜県に見られる褶曲の解析で、各務原市のチャート層の向斜軸の復元を行った(青野, 2007)。木曾川周辺に分布する三畳~ジュラ紀にかけて堆積したチャート層は、西にゆるくプランジした軸をもつ坂祝向斜(図4)を形成し、この浸食に強くて硬いチャート層の分布は、グーグルアースの衛星画像(図5)や1/5万の地形図(図6)・デジタル地形図(写真11)にも、その特徴がよく表れている。地質学に関するどの教科書を見てもこれらの地層が付加体のデュープレックス構造の典型的な例として取り上げられている(例えば、木村, 1998)。しかし、これらの褶曲構造(図4・写真11)をよく見ると、各務原市のチャート層の向斜軸は、エシロン(雁行)状に配列しており(図7(上))、断面図を見ると向斜軸の両

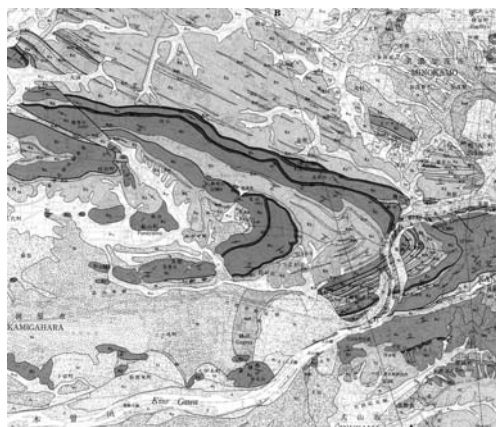


図4 坂祝向斜(地質図幅「岐阜」1/5万(1999)より)

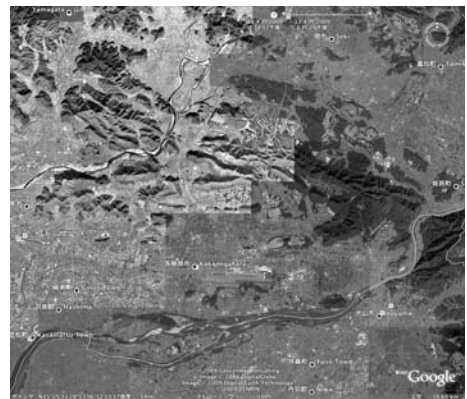


図5 坂祝向斜の地形(グーグルアース使用)



図6 坂祝向斜の地形(1/5万「岐阜」国土地理院より)

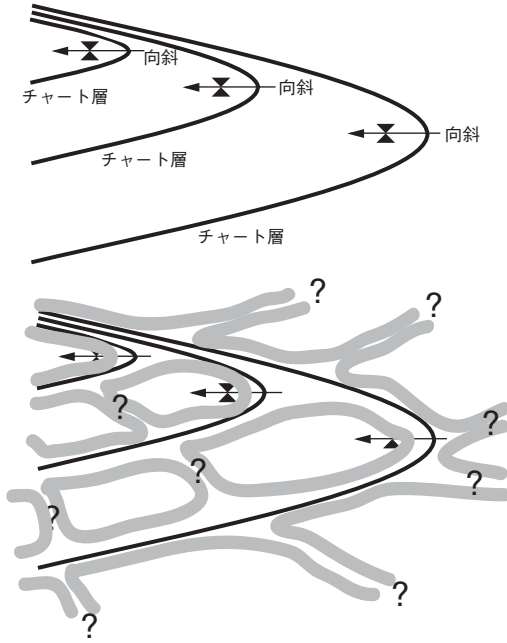


図7 岐阜県各務原市のチャート層の分布 (上) とオリオリ褶曲 (下)

層以外のやわらかな地層が削剥されたために、チャート層以外の下部または上部にある地層だけが見えているとすれば、「オリオリ褶曲」の一部が観察できる形状と考えられる。三波川帯の隆起によって、これらのシート状の地層がすべり面（デコルマン）上を重力滑りによって移動した結果、南北性の圧縮による座屈変形を受けて「オリオリ褶曲」を形成したと考えれば、この奇妙な向斜軸の配列や、褶曲軸の両側の地層の厚さの違いが総合的に理解できる。この考え方が、正しいのか間違っているのかについては、チャート層内部の小褶曲軸の分布を丹念に調べ直すことが必要であり、大構造の方向とは矛盾する褶曲軸を持つ小褶曲が重要な鍵を握っているかもしれない。いずれにしても、「吉村パターン」に類似した地層の変形構造が、日本または世界中のどこかで見出されても一向に不思議はない。

5. 非対称褶曲としての向斜構造

また、別の見方をした解答として、図8に示したような南北に非対称的な褶曲構造を考えることもできる。つまり、チャート層の包絡面の厚さが南北で極端に異なっている場合である。さらに、褶曲軸が西側に傾いているのみならず、褶曲軸面までもが南

側で、地層の厚さが極端に異なっている。エシェロン褶曲であれば、横ずれ断層帯内部のトランスプレッション構造として説明できるが、その場合も図7（上）のような配列にはならない。また、向斜軸の両側の地層の厚さの違いは、衝上断層によって絶ち切られたデュプレックス構造として、普通は説明されている（小川・久田, 2005）が、図7（上）のような褶曲軸の配列構造はやはり説明しきれず、この各務原市周辺の地質図が正しいとすれば、奇妙な向斜軸の配置である。先行研究では、この向斜軸の奇妙な配置に気付かなかったか、これらの向斜軸の配置を無視するか、無理やり褶曲軸をくねらせて連続させるか、断層でずらすしかなかったのであろう。しかし、これらの向斜軸の配置が正しいとしても、チャート層の分布や内部の詳細な小褶曲の構造については明らかにされているわけではない。仮に、チャート層が図7（下）のような分布をしていて、現在はそのチャート

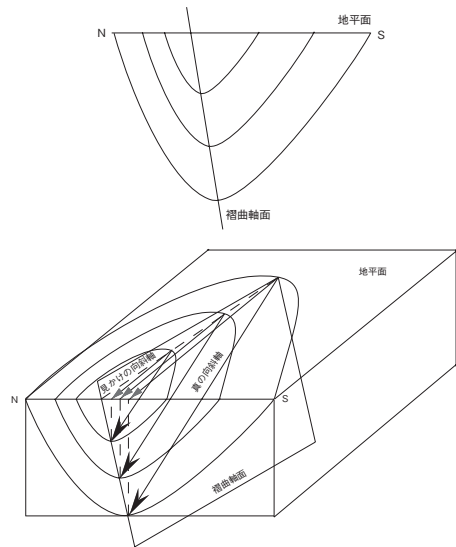


図8 非対称褶曲の断面図 (上) と傾いた褶曲軸面上にのるプランジした褶曲軸 (下)

側に傾斜（北フェルゲンツ）しているケースを考えると、チャートの各層に対応した褶曲軸は、傾いた褶曲軸面の上にあるために、地表面では見かけの向斜軸がエシェロン状にずれた配置を取ることになる（写真12）。このような地下の褶曲構造が正しいと仮定すると、ジュラ紀に海洋プレートが南側から沈み込んできた付加体を形成しているという構造（南フェルゲンツ）とは相容れないことになる。

6. お わ り に

変成帯や変動帯では、2回以上の複雑な変形構造として重複褶曲が一般的に認められてきた。しかし、この重複変形構造の中には、一回の変形過程で、重複褶曲と同じような変形構造を形成する可能性について指摘をした。このような褶曲に対してオリオリ褶曲（‘OLI‘OLI fold）という名称を新たに与え、その内部の性質について議論した。このような座屈褶曲としての変形構造は、プレートの沈み込みに伴う海溝列や縁海とアーチ状の島弧の連なり、海溝陸側斜面に見られる前弧海盆とその陸側に向って凹んだアーチ状の海岸線、内陸にジグザグに分布する堆積盆、アパラチア山脈やジュラ山脈に見られる細長いドーム・アンド・ベーズン構造やエシェロン状に分布する褶曲軸の存在など、地球上にさまざまなスケールで生じていると考えられる。

岐阜県各務原市周辺に分布するチャート層は、西にプランジする褶曲軸をもつ向斜構造として有名であるが、その東西方向の褶曲軸は、一直線ではなく、エシェロン（雁行）状にずれながら東西方向に連なっている。この構造は、南からの大規模な重力滑動によって異地性の岩体がすべり面（デゴルマン）上をスライドしてきた変形構造としてのオリオリ褶曲の可能性も否定できず、南に傾いた褶曲軸面状に向斜軸がプランジしてのっていると考えても説明が可能である。この場合は、この褶曲のフェルゲンツは北向きとなるので、従来考えられてきたように、美濃帯全体がジュラ紀の海洋プレートが南方から沈み込んで形成された付加体であるという説とは、矛盾する結果となる。今後は、さらにチャート層中の小褶曲構造の解析を詳細に調べることが必要である。

参 考 文 献

- 青野宏美（2007）：岐阜県美濃帯に見られる褶曲構造の解析，岐阜聖徳学園大学紀要，46，1-12。
深尾良夫（1985）：「地震・プレート・陸と海」，岩波ジュニア新書，228。
工業技術院地質調査所（監修）（1970）：地質図幅「岐阜県」1/15万
工業技術院地質調査所（1977）：西南日本外帯沖広域海底地質図，100万分の1
工業技術院地質調査所（1999）：地質図幅「岐阜」1/5万
国土地理院（2003）：数値地図25,000（地図画像）岐阜
熊崎直樹・小嶋 智（1996）：砕屑岩の組成から見た来馬層群（下部ジュラ系）の堆積史および構造発達史，地質学雑誌，102，285-302。
松川正樹・小荒井千人・塩野谷 奨・新海拓也・中田恒介・松井哲也・青野宏美・小林典夫・大久保 敦・林慶一・伊藤 慎（2003）：手取層群の主要分布域全域の層序と堆積盆地の変遷，地質学雑誌，109(7)，383-398。
小川勇次郎・久田健一郎（2005）：付加体地質学，共立出版，160。
Sugiyama, Y. (1994) : Neotectonics of southwest Japan due to the right oblique subduction of the Phillippine Sea plate, *Geofigics International*, 33, 53-76.
平 朝彦（2004）：地質学2—地層の解説—，岩波書店，441。



写真1 ズボンの裾に見られるオリオリ・アーチ



写真2 オリオリ・アーチ（左）と缶飲料製品（右）表面の模様

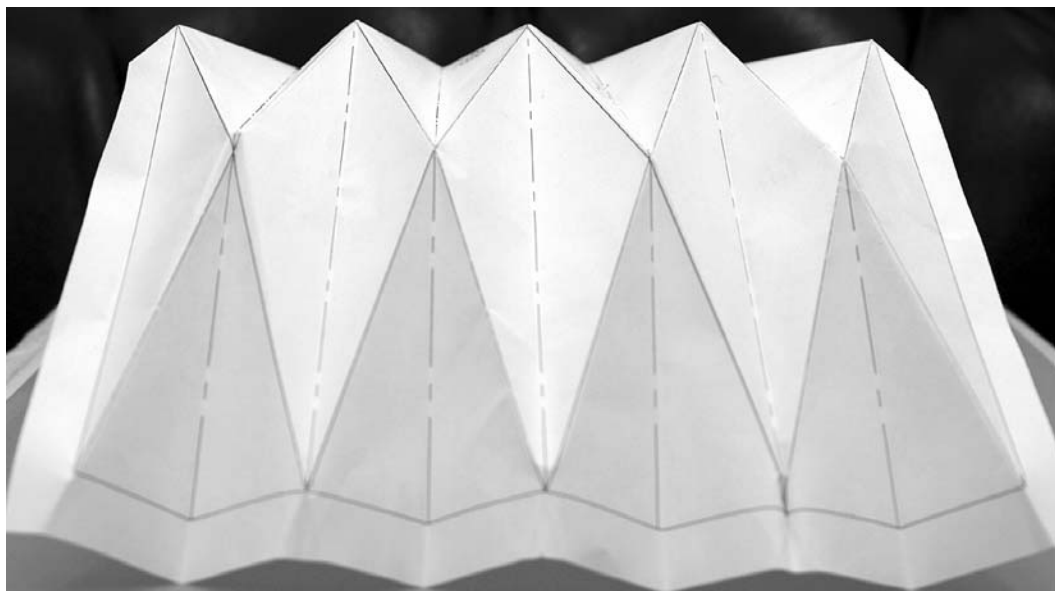


写真3 横から見たオリオリ・アーチ



写真4 裏返しにしたオリオリ・アーチ

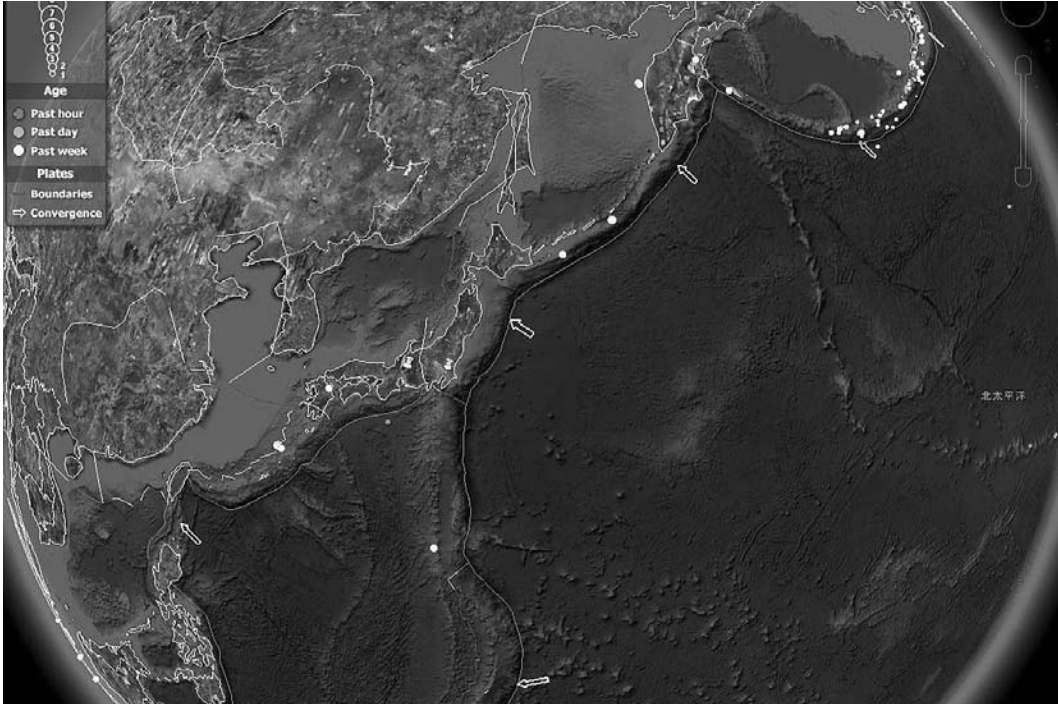


写真5 アーチ状に連なる太平洋プレート西岸の島弧と海溝列（グーグルアース使用）



写真6 大西洋側に凸形状を示す小アンチル列島とグレナダ海盆（グーグルアース使用）



写真9 北米大陸の大西洋側に見られるアパラチア山脈の褶曲（グーグルアース使用）

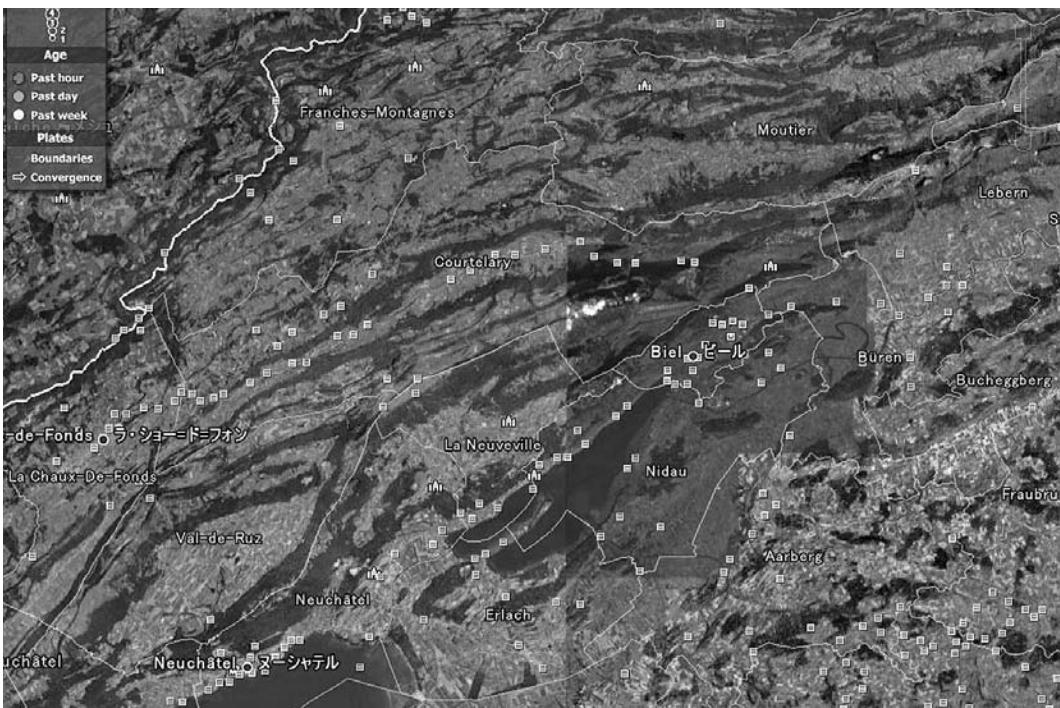


写真10 ヨーロッパ大陸に見られるジュラ山脈の褶曲（グーグルアース使用）



写真11：岐阜市金華山上空から眺めた坂祝向斜（カシミール3D使用）

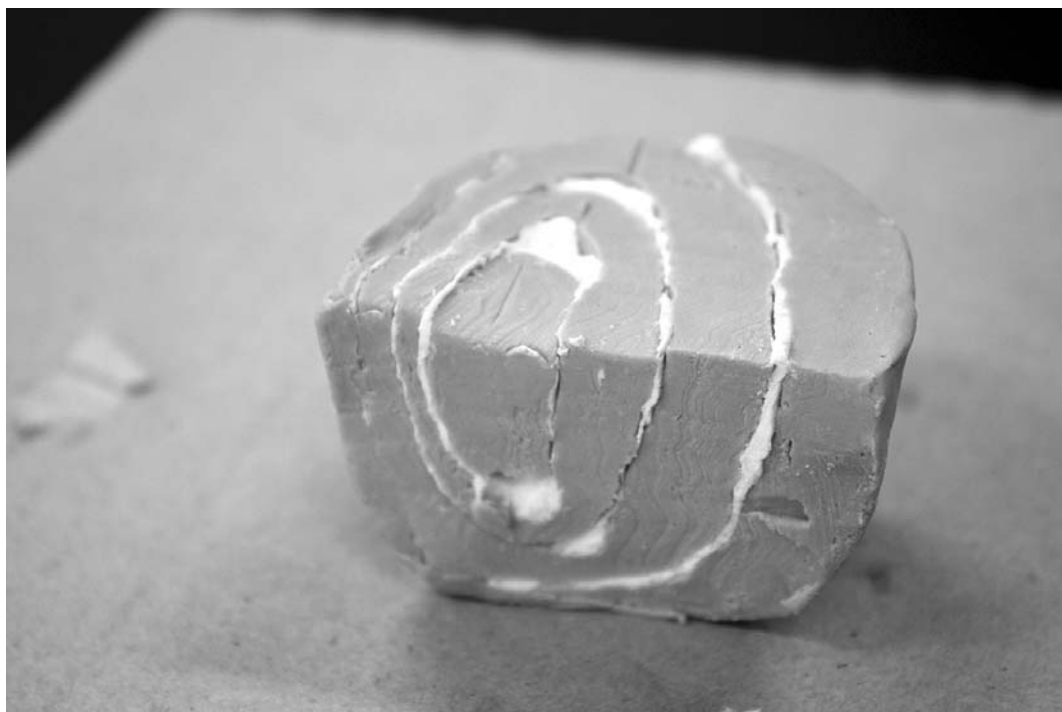


写真12 非対称褶曲の粘土モデル。褶曲軸の位置がエシェロン（雁行）状にずれていることに注意

