

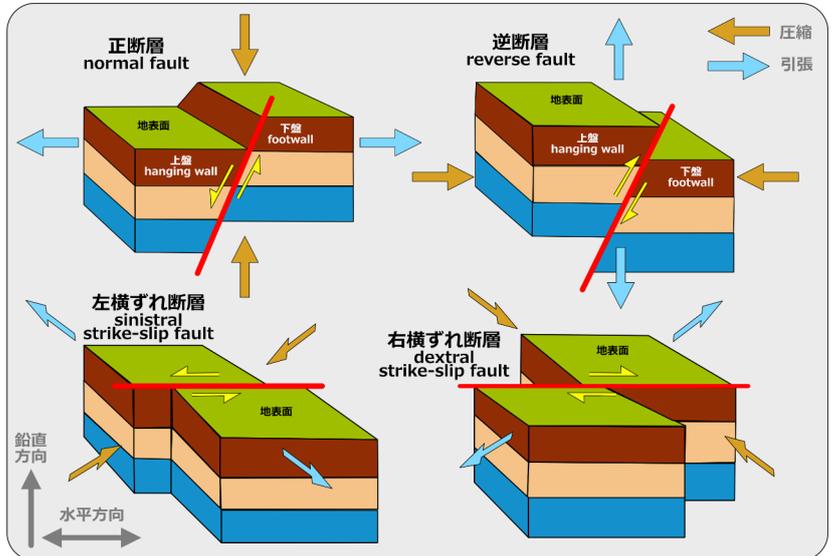


断層のパラドックス "Paradoxism" on the Faults

川村信人 北海道総合地質学研究センター(HRCG)

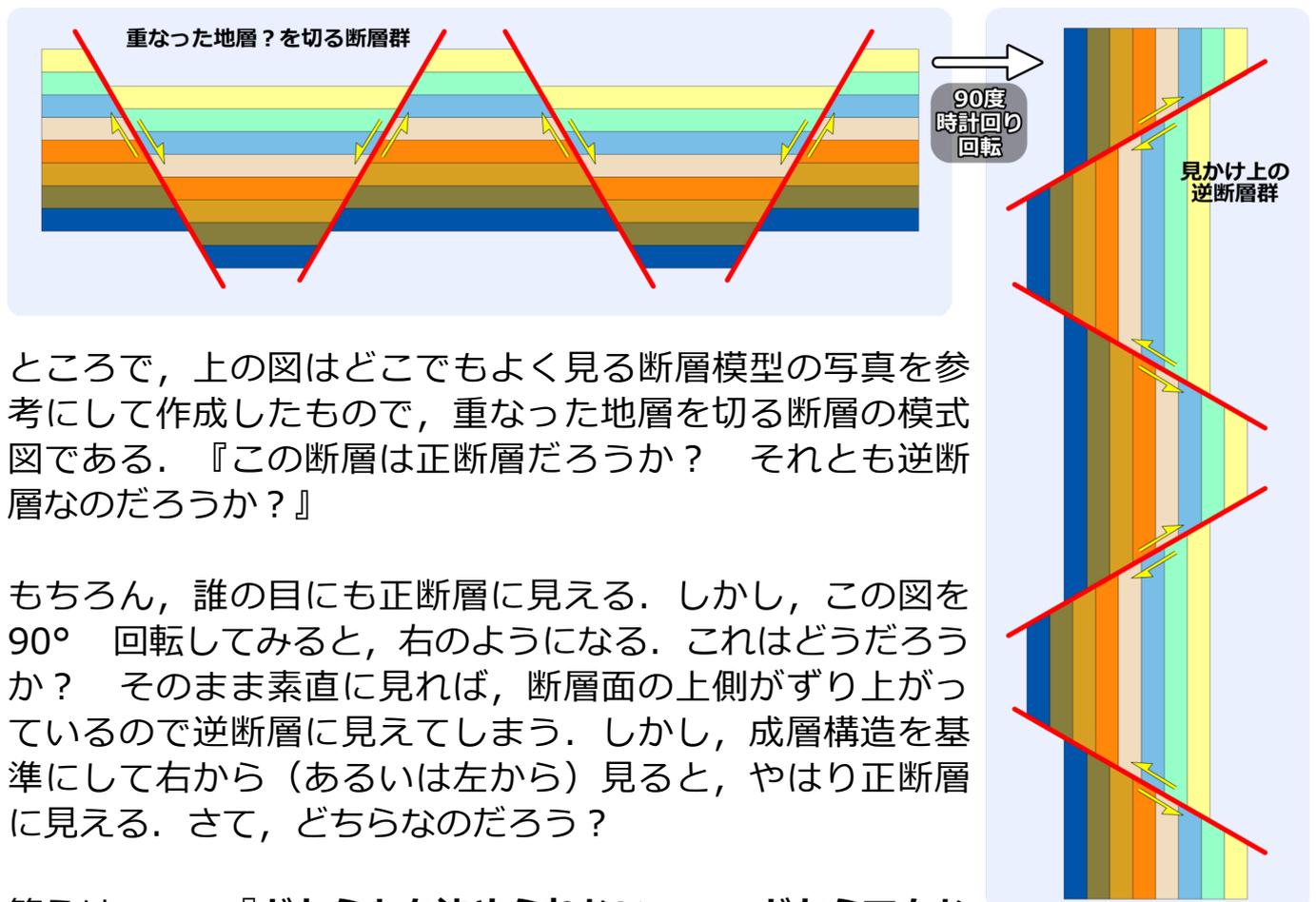
0. はじめに

少しでも地質学に知識のある人だったら誰でもが知っているように、断層 (fault) には、正断層 (normal fault) ・逆断層 (reverse fault) ・横ずれ断層 (strike-slip fault) という一般的かつ基本的な種類・区分がある (右図)。横ずれ断層には、そのずれ方向による二つのサブタイプがある。



断層の一般的な分類。地震調査研究推進本部による図を参考に作成。

このような断層の基本分類に文句のある人はいないだろう。



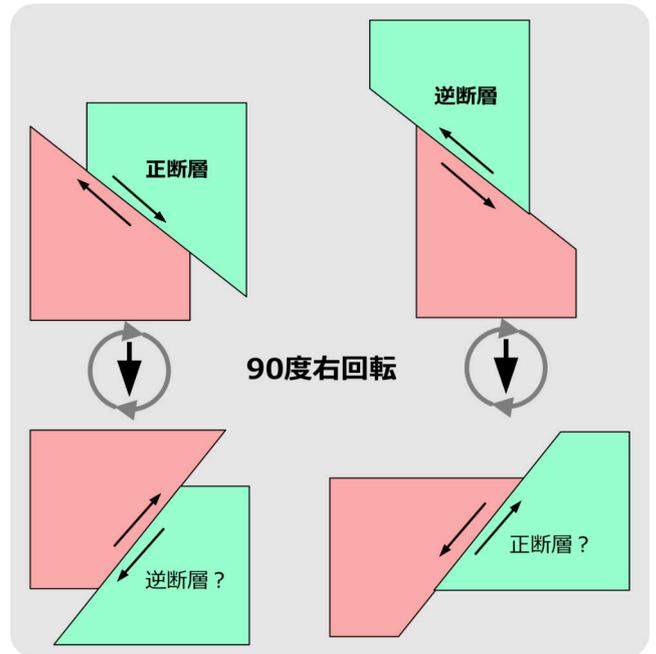
ところで、上の図はどこでもよく見る断層模型の写真を参考にして作成したもので、重なった地層を切る断層の模式図である。『この断層は正断層だろうか？ それとも逆断層なのだろうか？』

もちろん、誰の目にも正断層に見える。しかし、この図を90°回転してみると、右のようになる。これはどうだろうか？ そのまま素直に見れば、断層面の上側がずり上がっているので逆断層に見えてしまう。しかし、成層構造を基準にして右から (あるいは左から) 見ると、やはり正断層に見える。さて、どちらなのだろうか？

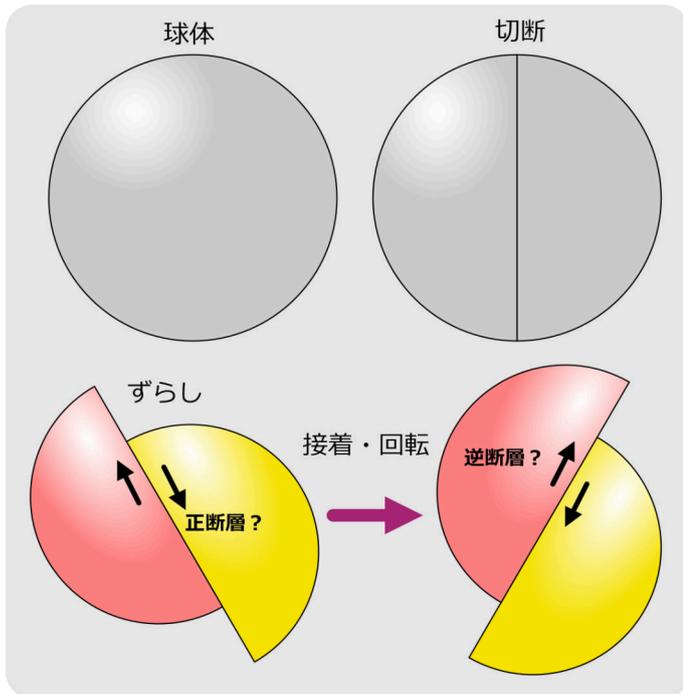
答えは... 『どちらとも決められない or どちらでもない』である。

『ちょっと待てよ！ 断層には正断層と逆断層があるというのは、どんな教科書にも書いてあることだぞ！？ 小学校の理科の教科書にも書いてある（かどうかは知らないが）、どっちでもないなんて．．．そんなことないだろ??』

これを簡略化して描いた右の図をよく見ていただきたい。回転させると正・逆断層はその逆に見えてくるのである。さてさて、どういうことになるのだろうか？



1. プラスチック球の思考実験



ここに球体がある（左図）。大きさや材料はなんでも良いが、手に持てる大きさとでカッターで切れる材料が良い。イメージとしては発泡スチロールである。これをカッターで半分に切断する。

切断面を 60 度左に傾けた（=右傾斜の）状態にし、その走向線を自分に向け、半分に切った球体の右半分を下方に 1/3 ほどずらす。これは正断層である。

この状態のまま切断面に瞬間接着剤を流し、正断層の状態を固定する。この（元は）球体を、2 m 離れて立っている実験助手 A 君にキャッチボールのように投げて渡す。

A 君に『この断層の種類はなにか?』と問う。答えは??

A 君が、仮にあまりモノを深く考えない人であったら、球体を“適当に”手に持って、『あ、正断層ですね』とか言うだろう。その時は『それ手の中で回してみたらどうなる?』と言ってあげよう。A 君が『どの種類でもないし、どの種類でもありますね』と言ったら、100 点満点である。

この実験では、球体の中に、“ずれの方向を識別するためのマーカー”が存在しない。実はこの実験では、マーカーは『球体の外面（球面形状）』そのものなのである。

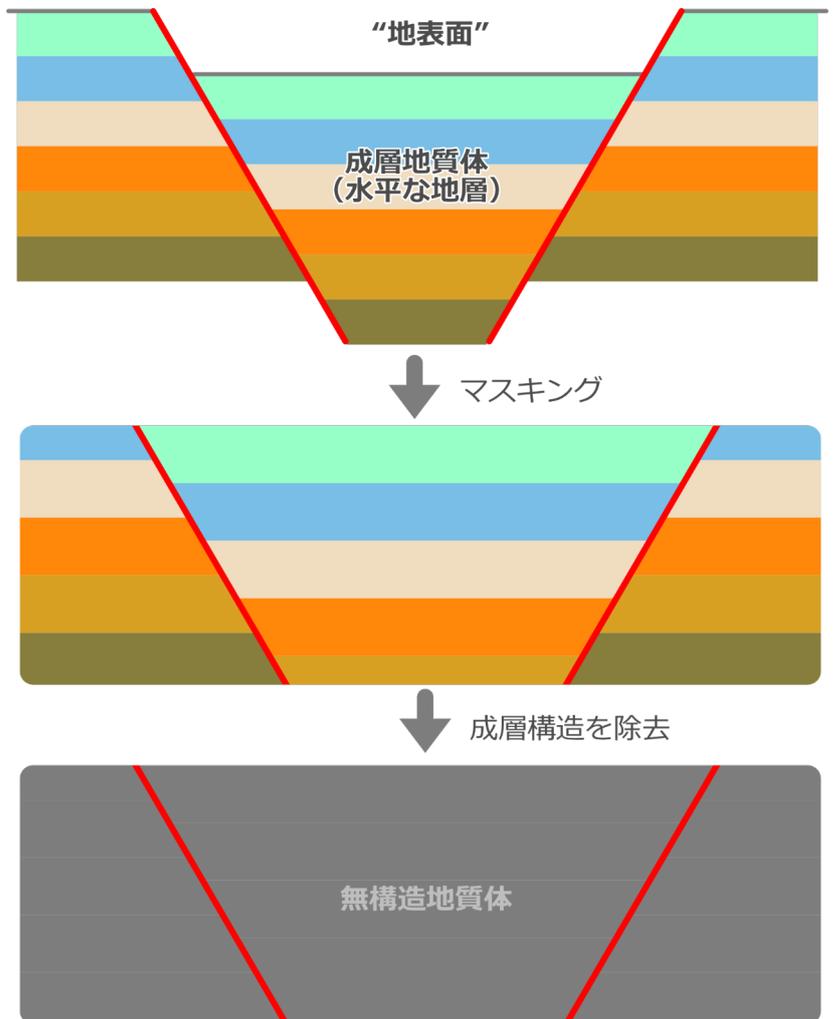
したがって、切断しずらした球体をカッターで元の外面が失われるまで削ってし

まうと、ずれの方向（・量）を認識できなくなり、そもそもそれが“断層”なのかさえ分からなくなってしまう。

2. 断層のずれマーカ-

断層の話が出る時、そのずれを示すマーカ-は、暗黙のうちに層理面・成層構造に割り当てられているのが普通である。最初にあげた断層の一般的分類や断層模型もそうである。

右の図は、一般的によく見られる正断層の概念図である。水平な地層の重なりがあり、2本の正断層によって切断され、中央部が落ち込んでリフト状になっている。これを見ると、『正断層は水平方向に引っ張られて生じる』というイメージが自然に湧いてくるだろう。



ここで、落ち込んだ地表面が見えないようにマスクし、さらに成層構造も除去してみるとどうなるだろうか？ もはや断層のずれは見え、それが正断層なのかどうかという判定はまったく不可能となってしまう。

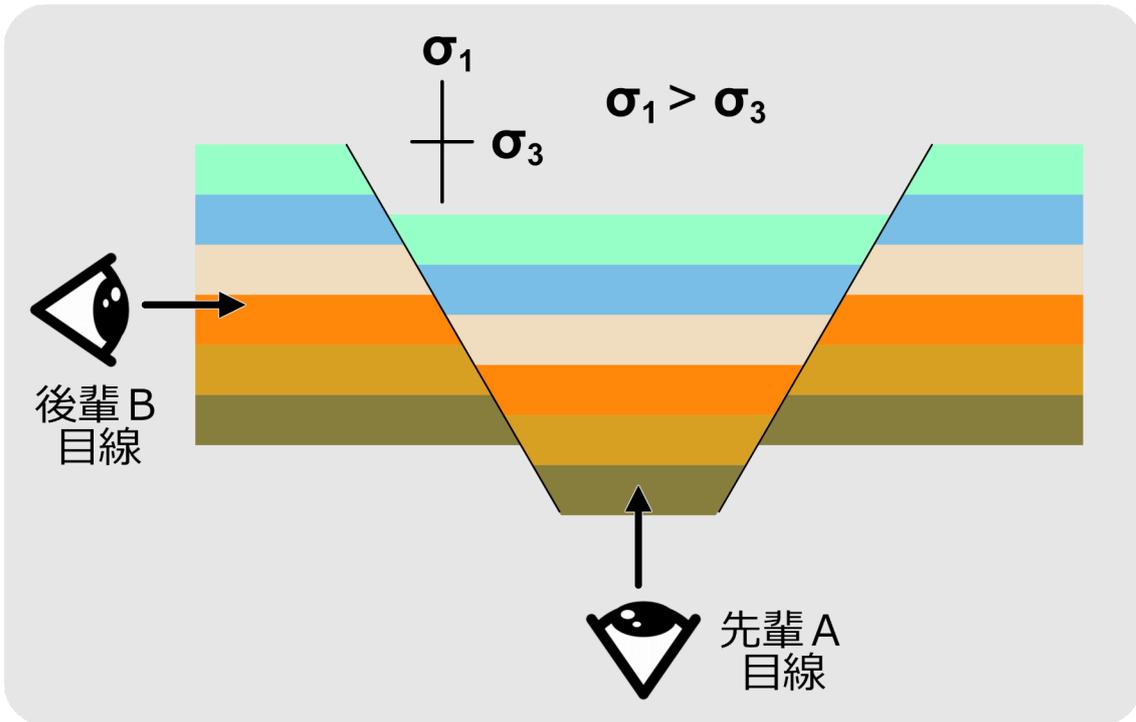
※ なお付け加えると、このような図で断層で切断される地層が水平層として描かれ、それがずれのマーカ-となることが多いのは、致し方ないこととはいえ、少し『ご都合主義的』であると思われる。水平層でなかったらどうなるか... やってみたがあまりに複雑で、明快な図示は筆者には不可能だった。

このような問題は、我々が実際に遭遇する地質学的断層の場合をよく考えてみると、少し寒気を引き起こす。地質体が塊状の火成岩だったらどうなるのだろうか？ ここではそれ以上考えないこととしたい。

3. やじきた院生の断層談義

上に示した正断層の図を、『川岸の露頭の上面』と仮定して欲しい。地質系大学院生AとBがその露頭の上でうんこすわりして議論している。先輩Aは成層構造の手前側から、後輩Bはそれを左側から見ている。よくある情景である。

- A 『おお、これは見事な正断層群だな。1億年前のこの場所は展張応力場にあったのだぞ。』
- B 『なに言ってるんですか先輩。どう見たって逆断層じゃないですか。圧縮されてできたんですよ。』
- A 『未熟者め。お前の目は腐っておるぞ。』
- B 『そんなぁ．．．ひどいじゃないですか。うえ～ん．．．先輩のいじわるう（ぽかぽか）。』
- A 『お、おいやめろ、いたいいたい．．．』
 (“ヤジキタ” になってしまった：◎しりあがり寿)



一体正しいのは先輩なのだろうか？ それとも?? 私の答えは、『**どっちも間違っている**』である。このあと二人は指導教官からこっぴどく絞られるのではないだろうか。

4. 一つの解題

結論：『正断層とか逆断層とかは、断層の属性 (property) ではなく**様相 (appearance, aspect)** である』

よく『どこからどう見ても○○だ』という表現がある。リンゴは（通常のスケールでは）どこからどう見たってリンゴに間違いは無い。ところが、『正断層』『逆断層』というのは、断層それ自体にそういうレッテルが貼ってあって、どうひっくり返して見ても違いが無い (= それ自身の属性) というわけではなく、『どこからどう見たとき』が**暗黙の了解・暗黙の前提**として決まっている。ところが、それはしばしば忘却され・混乱してしまうのである。

暗黙の前提は、(例えば) 逆断層の定義そのものの中に隠れている。『断層面上盤側がのし上がるセンスの断層を逆断層という』。ここに二度出てくる漢字がその答えである。『上』、つまり地球の鉛直方向で地球中心部から遠くなる方向。．．既にそこに“(地球上で) 絶対的な”座標が指定されている。要するに、『断層を**立面上で横から見たとき**に』(= elevation view : 以降“**立面ビュー**”と表記) でなくてははいけない。

正断層・逆断層にはしかし、ずれのセンスだけではない重要な“成因属性”も付与されている。例えば、日本語版 Wikipedia にはこういう表現がある – 『**逆断層は圧縮, 正断層は引張によって生じる**』。

これには大きな違和感を感じてしまう。なぜかと言うと、上に述べたように正・逆断層という用語の定義・概念には上下水平方向というものが埋め込まれているのだが、圧縮・引張には方向概念はデフォルトで埋め込まれていないからである。

つまり、正確には『**逆断層は水平方向の圧縮, 正断層は水平方向の引張によって生じる**』と書かなければいけない。

※ さらに煩いことを言えば、“水平方向”と言っても 360 度いろいろあるので、『断層面の走向に垂直な』あるいは『断層面の傾斜方向の』と書かなくては正確とは言えない。そこまでいちいち書かなければいけないと主張する人はいないと思うが。

発泡スチロールの球の場合は、上にあげた上下前提がそもそも無い世界の話なので、正・逆断層の区別は不可能あるいは無意味である。

我々が断層やその形成について論じるのは『**地球表層部での地質学的現象**』についてだけである。もちろん火星でも金星でも良いのだが、今のところそういう話はない。少なくとも、リンゴの切り方を断層として論じているわけではない。

“絶対的な”方向・方位概念の存在しない発泡スチロール球思考実験は、初めから**無意味**だったのである。

先輩 A と後輩 B は**平面上で上から見ている**(= plan view : 以降“**平面ビュー**”と表記) ので、そもそも二人とも間違っている。その平面ビューで正断層とか逆断層とか言うてはいけないのである。

これを圧縮場だとか展張場だとかいう見方ではなく、主応力軸 ($\sigma_1 \cdot \sigma_3$) といった語彙で話すと、二人の意見は当然なことに一致する。

先輩 A が下から見たとき正断層だとすると、 σ_1 は (図の) 上下方向、 σ_3 は左右方向である。つまり左右に (相対的に) 引っ張られて (= 上下に押されて) いる。

後輩 B が左から見たとき逆断層だとすると、 σ_1 は横向きの後輩 B から見て左右方向、 σ_3 は上下方向である。つまり、それぞれ図の上下方向・左右方向になり、先輩 A から見ればやはり左右に引っ張られて (上下に押されて) いる。

ということで、先輩 A と後輩 B の意見は晴れて一致し、あやしい男達の友情は保たれたのであった。めでたしめでたし (?) 。

このように考えてくると、最初にあげた“断層模型”の『正断層を 90° 回転させ

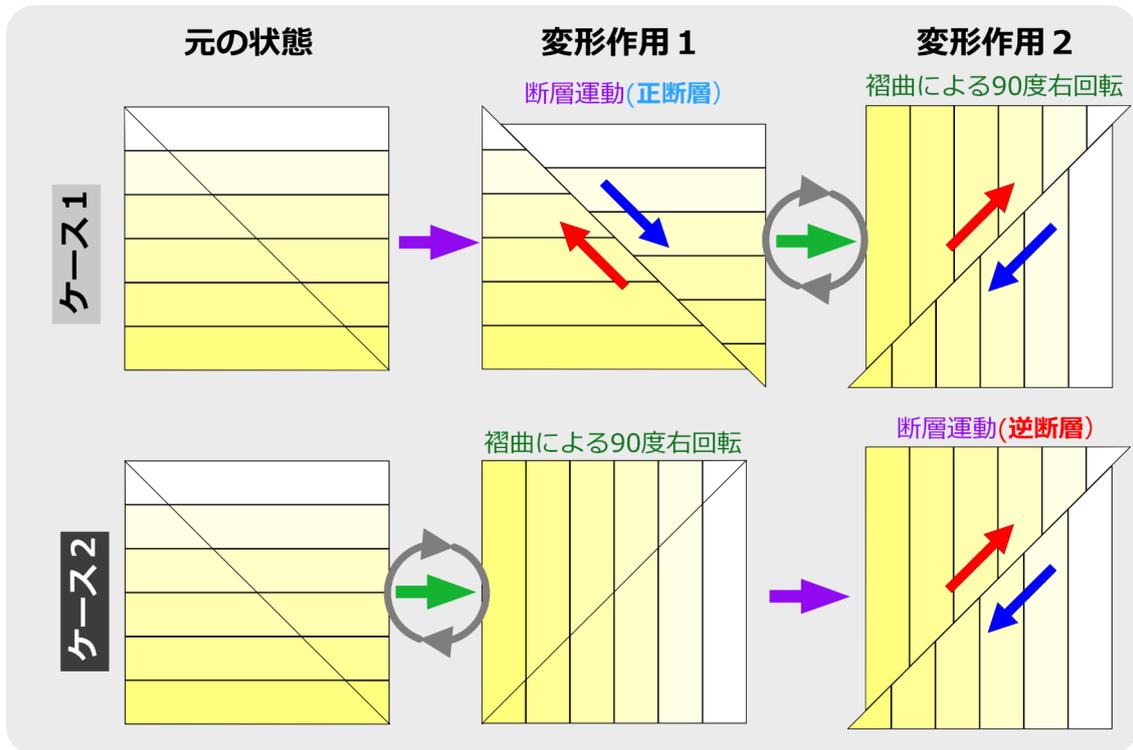
てみると逆断層に見える』というのがどういう理由なのかが分かってくる。まず、この断層模型図では『どちらが上なのか？』が指定されていない。つまりこのビューが立面ビューなのかそうでないのかは分からない。仮に、正断層に見える図が立面ビューだったとしても、視線をそのビューの方向を軸として 90° 回転させたら、それはもはや立面ビューではない。

正・逆断層という判定は、あくまでも**立面ビューの上で行わなくては行けない**のである。

それでは、視線を回転させたのではなく、その地層 (= 物体) と断層自体を 90° 回転させたらどうだろう？ 立面ビューであることには変わりはなく、上盤側がずり落ちた正断層になるだろう。その解釈は物体の回転が断層形成の前か後かで変わってくる。このことについては、次の章で記述する。

5. 構造地質学における実例

下の図を見て欲しい。これは露頭を横から見た立面ビューである。ケース1とケース2で最初と最後はどちらも同じ。見かけとしてはどちらも同じ見かけ上の逆断層で終わっている。しかし、その『機序』はまったく異なっている。



ケース1： まず正断層が生じた後、褶曲（等）により右に 90° 回転した。

ケース2： 褶曲(等)により右に 90° 回転した後、逆断層が生じた。

これをどちらと見るか、断層と回転のタイミング・時間差をどう見るか．．．で、当該地域のジオテクトニクスの解釈はまったく（正反対に）違ってくるのである。

私は実際、某付加体の地質巡検で、ある研究者がほぼ垂直な付加体変形層中に発達した断層系を見て『これは明らかに正断層だから．．．』と議論しているのを見たことがある。私はその後ろにいて、うーんそうなのかな？と思ったが、アタマをちゃんと整理できていなかったもので、何も言えなかった。もちろん、正（逆）断層は上から見ても下から見ても正（逆）断層なので、その研究者が変形層のオリジナルな上下方向を意識した上でそう言ったのであれば、問題は無いと思われるが。

この正断層と逆断層の話は、単なる形式論理上の詭弁に聞こえるかもしれない。『そんな誰でも分かっている事いちいち指摘するあなたは“詭弁を弄する論破魔”なのか？』もちろんそうではない。実際にテクトニクスをリストアする際に常に頭の隅に置いておかななくてははいけないことなのだ、ということをも主張しておきたい。

6. 断層の四元論

正断層と逆断層の定義が『上下方向暗黙埋め込み』であることは理解できた。つまり；

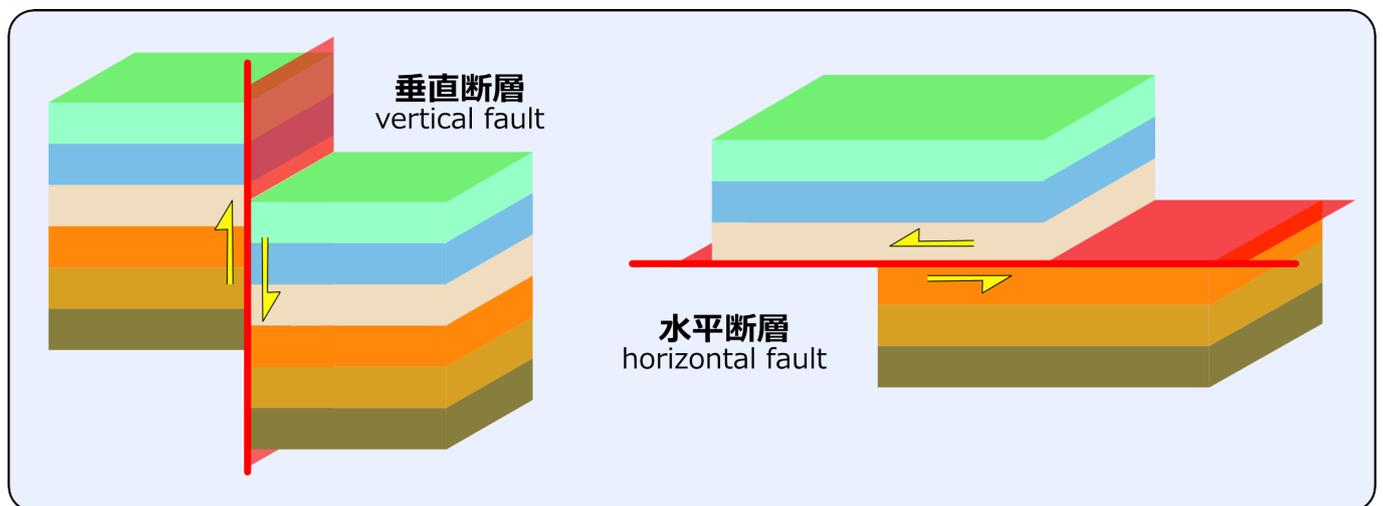
正断層：上盤がずり下がった・下盤がずり上がった。

逆断層：上盤がずり上がった・下盤がずり下がった。

※ 上盤は、英語では hanging wall, 下盤が footwall である。

ここまで考えてくると、『断層には正断層と逆断層がある』というのが不十分な表現であることが分る。

つまり、（立面ビューで変位の見える・表現できる）断層には**4種類**あることになる。正断層・逆断層と、垂直断層（vertical fault）・水平断層（horizontal fault）である。



垂直断層は、どちらが上盤か下盤かの区別がないので、正断層でも逆断層でもない。水平断層は、上盤と下盤の区別はあるが、どちらも下がっても上がってもい

ない（上図）。ただし、垂直・水平断層という用語は一般には無いようで、*Glossary of Geology* にも見当たらない。

なお、横ずれ断層も断層面の傾斜は垂直な場合が多いので、その場合は“垂直変位の無い垂直断層”であるとも言える。

この**四元論 (Quadrism?)** に、立面ビューでは変位を表現できず平面ビューで見なくてはいけない断層、つまり横ずれ断層を加えて合計 5 種類、ということになる。

注) この話には、断層の変位ベクトルの成分が．．．といった微妙な？観点は含まれない。あくまでも一般的なずれ方向、つまり変位が断層面の走向に対して垂直とした場合の話である（除く水平断層）。

昔、自分が学生・院生のころ、南部北上古生層の地質図を描くとき、先輩から『断層面の傾斜が分からないときは不明という意味で垂直に描く』ことを教えられた。これは、この四元論の観点から見ると、けっこうアブナイことをしていた．．．と思う。

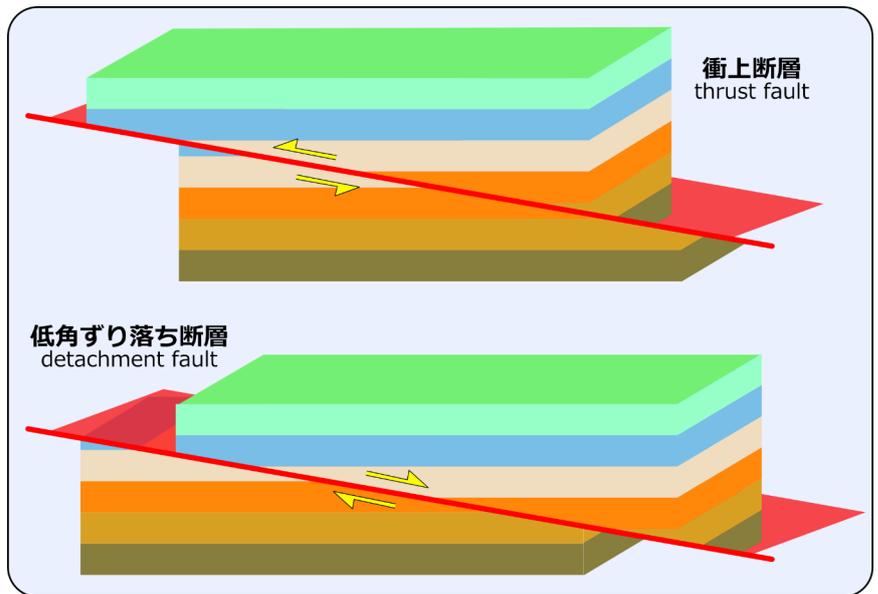
7. 低角断層

断層面の傾斜が緩くて水平に近い場合のみ、逆断層は『**衝上断層 thrust fault**』と呼ばれる（右図）。“緩い”というのが正確にどういう範囲なのかは規定されていないようであるが、一般的には 20° あるいは 10° 以下といったところだろうか。

その場合の正断層について specific な術語は無いと思われるが、“低角ずり落ち断層”といった表現があり得る。

それに対応する英語表現は筆者には分からないが、あえて言えば detachment fault だろうか。

これらは正・逆断層の特殊例とも言えるが、ある意味では水平断層のバリエーションでもあるとも言える（後述）。



8. 断層面傾斜のカオス

上に述べた**四元論**には大きな穴もある。つまり、自然界には垂直や水平といった“クリック位置”はないので、断層面がある場所では垂直（・水平）だが別の場所では垂直（・水平）ではないということが起こり得る．．．というかほとんどの

場合そうなるだろう。断層面が曲がっているということもあるし、凹凸があり平面ではない場合もある。そもそも測定には（クリノメータに限らず）誤差がある。そうすると、ある断層が、ある場所では逆断層だがすぐ隣の場所では正断層というわけのわからないことになってしまう。

水平（に近い）断層の場合、良く知られているように断層面自体がマクロオーダーで波打っている（undulated）場合が多い。そうすると、ある水平に近い傾斜と明確な単一の変位センスを持つ断層が、ある場所では衝上断層、他の場所では“低角ずり落ち断層”となってしまう。これは、明らかにおかしなことである。

もちろん、これらの穴をふさぐ方法は無い。例えば平均傾斜で扱うという手はある。しかし平均することに何の意味があるだろうか？ 仮に平均したとして... 傾斜が 90° (0°) なら垂直（水平）断層、 89° (1°) だったら正断層・逆断層と機械的に分類することに科学的な意味は無い。

ぴったり水平・垂直というのはどうせ極低確率事象だから omit してしまうという手も考えられる。その場合、四元論はやはり正断層・逆断層の二元論（dualism）でよいという元の木阿弥になる。

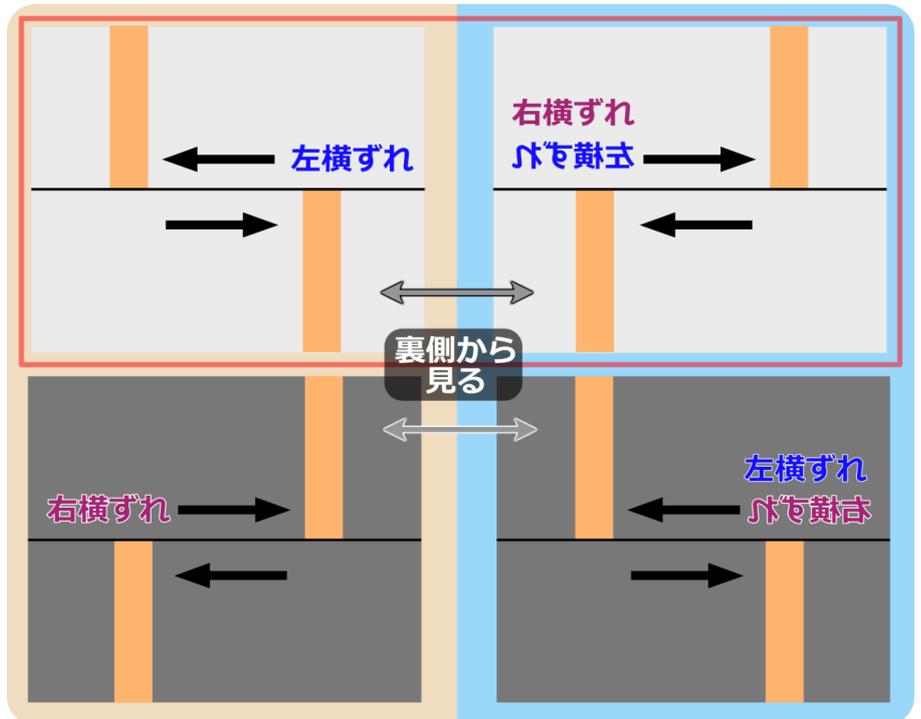
9. 右横ずれと左横ずれ

誰でもが知っている左横ずれ断層と右横ずれ断層の絵を見してみる（右図の上半分：赤枠内）。

断層のこちらから見ても、あちらから見ても、右横ずれと左横ずれのセンスは変わらない。そういうのは中学生（？）でも知っている。それがどうしたというのだろうか？

実はこの二つの断層、同じ断層なのである。ある横ずれ断層を地表面の上から見たところと、下から見上げたところというわけである。

つまり、正断層・逆断層と同じく、右横ずれ・左横ずれというのは『**地表面を平面ビューで鉛直方向の上から見た時**』という暗黙の定義が埋め込まれているのである。通常はこれが問題になることはない。地下に潜ってそこから上を見上げる人などいない、というかそのようなことはそもそも不可能だからである。



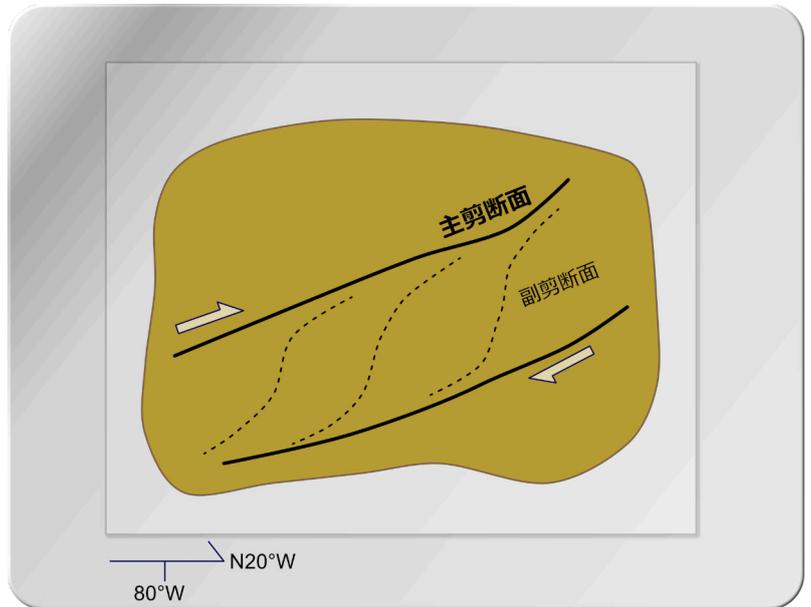
ということで結論：『右横ずれ・左横ずれというセンスも、断層（変形）の属性ではなく、その**様相**に過ぎない』。

10. 薄片断面でのずれセンス

変形センスを顕微鏡的に決定したい場合もあるだろう。つまり、どこかから岩石を採取してきて、薄片を作って顕微鏡で仔細に観察し岩石の変形センスを明らかにしたい。．．．その場合、以下のような方法が取られる。

まず、当然であるがサンプルは定方位でなければならない。定方位サンプルとは、野外での採取時にサンプル上に存在する面上にその走向傾斜を記録したものである。それだけでは面の向きを決定できないので、走向線の“どちらが●か”を記録する。●は通常は北（N）であるが、走向によっては東西という場合もある。よく使われるのは、走向線の●側に矢印を描いておくという手である。

次に、定方位サンプルから定方位薄片を作成する（右図）。チップの切り出しは、定方位面に平行に行われるのが普通である。なんらかの理由でそれができない場合、複雑な変換手順が必要となる。例えば、粘土等を土台にして定方位サンプルを記録方位と一致する姿勢で固定し、切断面をクリノメーターで測り直すという方法がある。



変形センスを知るには当然、切断面が剪断面に対して垂直でなくてはならない。定方位面が剪断面に垂直になっていない場合、上のような変換手順を行う。その上で、薄片作成面の方位を定方位サンプルと同じ方法で薄片上に記録する。また、切り出したチップの裏表を間違っって貼り付けることの無いように注意しなければならない。薄片を裏から見たら逆のセンスになってしまうためである。

この図の場合は、薄片面が $N20^{\circ}W$ $80^{\circ}W$ なので、右が北で東側から見ている（ほぼ）立面ビューで、薄片の上側が上方である。仮に主・副剪断面がどちらも薄片面に垂直で、両者の関係から変形センスが上図のように決定できた場合、この変形のセンスは『上盤側が北へ移動する（ずり上がる）センス』となる。前に書いたように、主剪断面が水平あるいはそれに近い場合は、“（ずり上がる）”の部分は削除される。

このような『知っている人には当たり前』のことをくどくどと書いたのには理由がある。以前、構造地質関係の研究室のゼミ発表を聞いた時、発表者の学生が「この薄片観察で分かるように、この変形センスは右ずれになります」というのを聞いて、ん？と思ったことがある。自分は構造岩石学の専門家ではないので、“定方位であっても薄片で右ずれというのはどういうことなのか？”という単に疑問と言うか違和感を感じただけだったのだが。

何を言いたいのかと言うと．．．研究している本人は自分の定方位薄片を見るときは『その姿勢・向きが脳内に埋め込まれている』ので、つい右ずれなどと言ってしまいが、他人に話す（≒論文に書く）ときにはそれを省略してはいけない、ということになるだろうか。

11. 一つの結論

以上考えてきたことから、結論的にはこうなってしまう。つまり、地球上（＝上下という概念のある場所）で．．．という制約を外してしまえば、既に述べたように正断層と逆断層も（垂直断層と水平断層も）ないのと同じく、横ずれ断層や右・左横ずれという区別もなく、**ただ1種類の『断層』**というものだけがあるということになってしまう。

断層の分類・タイプというのは、あくまでも上下の概念があるという前提で成立することなのである。

そうなるとももちろん、ある断層の様相・性格をどう（ユニバーサルに）表現するのかということになる。その答えは『断層面の姿勢』と『断層面のどちら側がどちらへ変位するか』を記述するということになるだろう。もっとも、断層面の姿勢や“どちら側”というのは、その場所の方位座標に依存するので、それが固定されていない場所（例えば；宇宙船内）では無意味ということにもなる。

断層に限った話ではないが、ある事象を分類し、その分類名で呼ぶという手法はクリアな科学的手法のように思える。『○○断層は（正・逆・横ずれ）断層である』と呼んでしまえばその意味は明確に定まり、他へ伝達するのにも都合が良いだろう。しかし、その前提を忘れてしまうと一定の（潜在的な）危険性を伴うことを念頭に置いておく必要があるだろう。



※ 図形はパラドックスのシンボル？ Penrose Triangle.
四元論だから四つ組み合わせた．．．わけではない。

付録コラム：断層模型をめぐる話

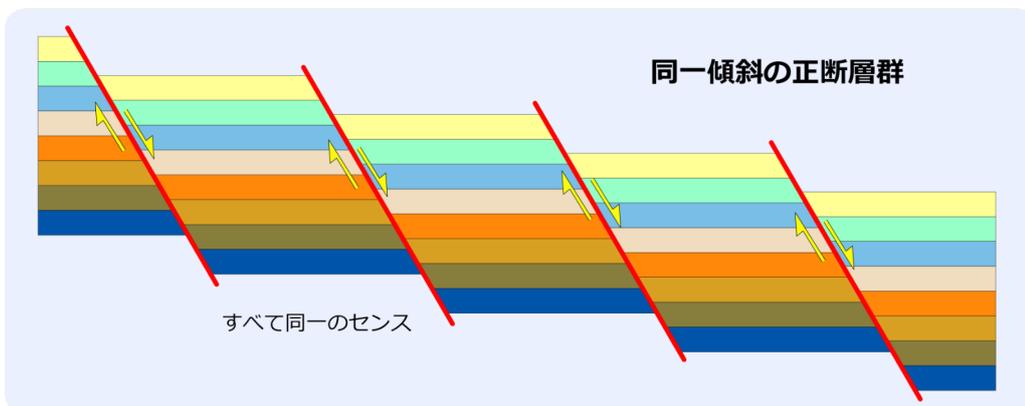
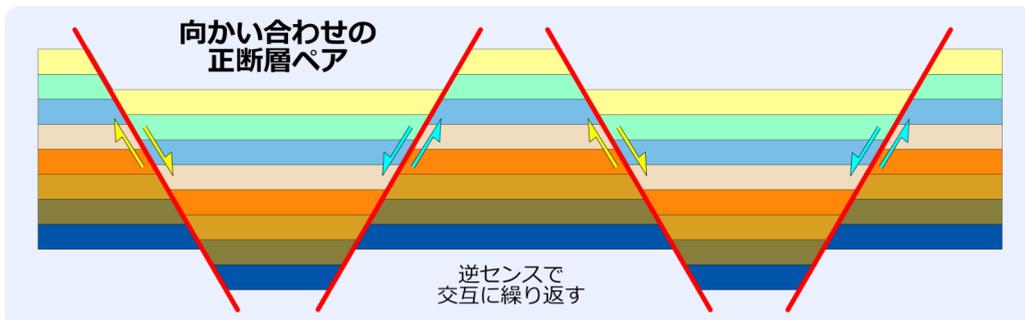
このドキュメント自体が本編『活断層の諸問題』の付録なのに、さらに付録というのにもヘンなのだが．．．内容は単に、断層に対する私の認識・見識不足が『断層模型』に対する多少の考察によって補完された、というだけのものである。

右の写真は、科学館の展示などでよく見られる断層模型である。この模型は逆断層となっている。



いつも思うのだが、こういう模型は、なぜ断層が向かい合わせに（ずれセンスが互い違いに）なって“共役断層”的な形態になっているのだろうか？

多分そこには“正断層はふつつ共役だから”（そんなことはないが）とかいった科学的な理由は無く、その理由は明白である。つまり、そうしないと片側に



にどんどんずれていき『**模型として不適格な形状**』になってしまうからである。

左の図は、それを正断層で表現したもので、断層を同一傾斜にすると、全体として直方体であるべき模型の形状が始末に負えないものになってしまうことが明白である。

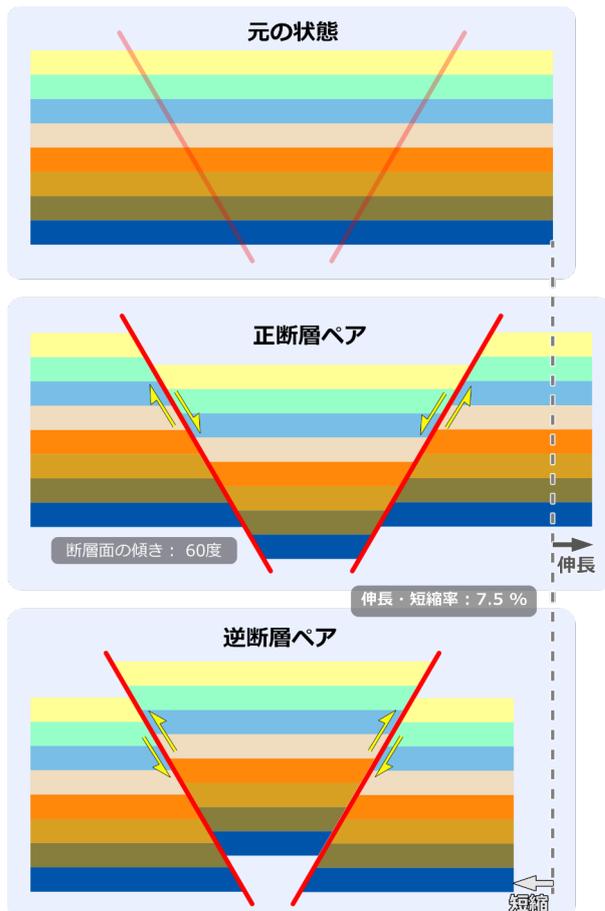
ところで、ここからが本題。この図を見ていて私は少し不思議だった。それは、正断層による“水平伸長量”である。正断層が単一傾斜になっている場合（上図下）は、一方向にずり下がっているだけなので水平方向に伸長していくのは自明である。しかし、“向かい合わせ正断層ペア”（上図上）の場合、互

いに逆向きにずれるので、水平変位が相殺してしまうのではないか？

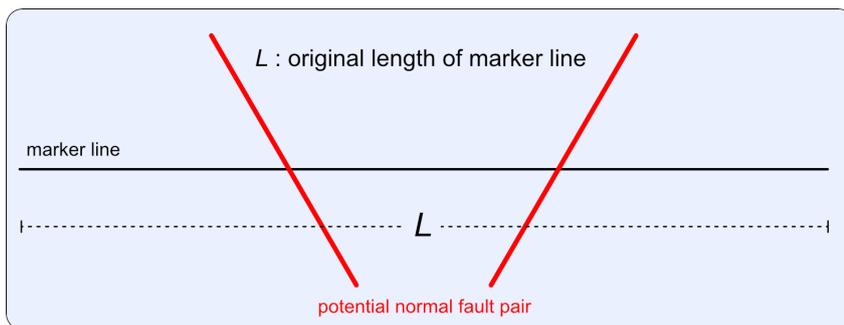
この想像というかイメージが間違っていることをはっきりさせるために、同一の落差を持つ向かい合わせ正・逆断層ペアによる変位を図上で実際に測ってみた（右図）。当然であるが、正・逆断層でまったく同じ伸長・短縮量となった。

つまり、断層で挟まれたブロックを水平方向に不動とすれば、両側のブロックが水平に移動し全体に伸長・短縮を起こしているということである。

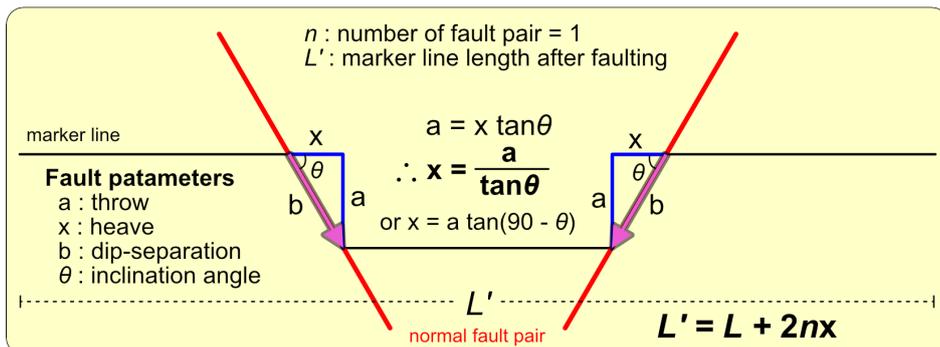
蛇足であるが、すぐに気づくように、右図のようなセッティングでは、断層ペアは図の下方ですぐに交差してしまう。その場合の切断関係や変位量がどうなるかは非常に複雑で良く分からず、あまり考えたくはない。断層モデルの作成者もおそらくそうで、その点は当然に（姑息にも？）回避されているわけである。



なお、正断層ペアにおける伸長量は変位ベクトルが断層面の走向に垂直な場合、下図のような計算となる。変位の基準となるマーカー線の当初の長さは



変位後にはその断層の“heave”（図中の x ）二つ分長くなる。“heave”は“throw”（図中の a ）を断層の傾斜（ θ ）の正接（ \tan ）で除したものである。



逆断層ペアでも符号が逆（＝短縮）になるだけで計算は同じになる。

※ “heave, throw” に対する日本語訳は不明。

向き合った正断層ペアによる水平伸長量。変位ベクトルは断層面の走向に垂直とする。