

# 日本海拡大： 新潟地域の現在の地殻変動の背景として

山路 敦<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

近年震災があいついだ新潟地域では、急速に地殻が変形していることが測地学的にわかってきた (Hashimoto and Jackson, 1993 ; Sagiya *et al.*, 2000). 測地学でとらえられる地表の最近数十年間の運動はそれとして、本州～北海道の日本海側の地殻変動をもう少し長期にわたって考えるとき、遠い過去の地殻変動にかんする理解が案外重要であることが、20年くらい前から認識されるようになった (中村, 1992 ; 佐藤, 1996 ; 岡村, 2002). すなわち、2,000～1,500 万年前の日本海拡大時につくられた断層が、現在の地殻変動でふたたび断層として利用される例が少ないことがわかってきたわけである。被害をもたらす地震も、そうした現象の一環としておこっているらしい (例えば Kato *et al.*, 2009). 小論では、日本海拡大の概要と、その新潟地域の今日の地殻変動への影響について、表層の地質調査をおこなう者の立場から紹介する。日本海拡大の時期と様式について研究者間で合意に達していないことも少なくないが、限られた誌面のなかで引用すべき研究でも言及していないものがあることをお許し願いたい。

## 2. 日本海拡大

いつどのようにして、日本海はできたのだろうか。この問題を考えるうえで、日本海の海底からの地質情報はいまだ不十分であり、陸域の地質情報を総合する必要がある。

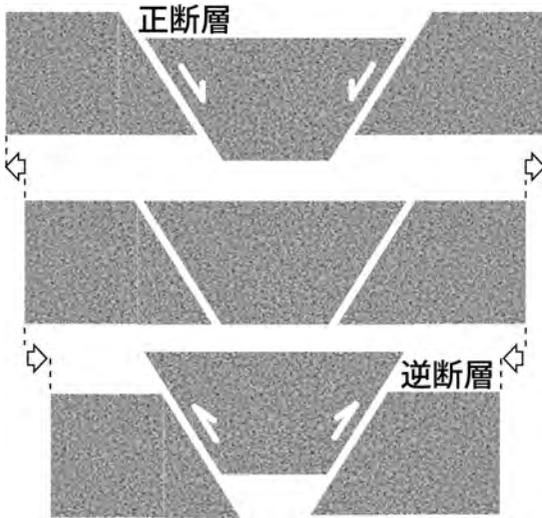
そこで重要な制約条件となるのは、いつどこで、どんな地層がどれだけたまったかを記述する層位学 (層序学) である。厚い地層がたまるには、その容器としての堆積盆ができなければならないが、その形成

は大規模な沈降運動がおこったことを意味する。化石や放射性元素で地層の年代を測ると、いつその運動がおこったかわかるし、地層の厚さからはその規模が判断できる。筆者が教育を受けた東北大学では北村信教授のもと、日本海拡大期の層序の研究を推進していた。日本海拡大について、1980年代に層序から具体的に論ずることができるようになるには、放射年代や微化石データの蓄積が重要だったことは論をまたないが、筆者が大学院に進学した頃の東北大学では、栗田泰夫氏による発見が重要だったと思う。栗田氏は「グリーンタフ」として一括されてきた地層たちのなかに、中新世後期から鮮新世のコールドロン (火山性陥没構造) を認め、また、日本海拡大期 (古第三紀末～中期中新世) の「真性」グリーンタフとは識別できることを明らかにした (栗田, 1984)。紛らわしい顔つきをした中新世後期や鮮新世の「にせ」グリーンタフと区別して、「真性」グリーンタフのテクトニクス上の意味を問う前提が整ったわけである。それにはまた、火山地形が侵食で消えている、中新世のコールドロンについての吉田武義氏による四国での詳細な研究 (Yoshida, 1984) の影響があっただろう。その頃はまだ白亜紀とも古第三紀ともされていた日本海拡大を、まさに「真性」グリーンタフの時代のイベントであると論じた Otofuji and Masuda (1983) の衝撃も忘れがたい。それによって、この時代の層序とテクトニクスにかんする研究が大きな刺激を受けた。

アジア大陸の東縁の地殻が引きちぎられて、沿海州～朝鮮半島のすぐ横にあった本州は、日本海拡大とともに現在の場所まで移動した。地殻が水平方向に引きちぎられる現象をリフティング (rifting), それが進化する時期をリフト期という。地殻が水平に伸のばされ、引きちぎられる地殻変動を、伸張テクトニクス (extension tectonics) というが、その際にできる断層

1) 京都大学 大学院 理学研究科

キーワード：日本海、リフティング、小断層、層序、断層、褶曲、地震

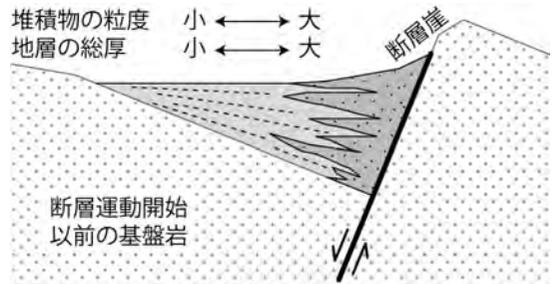


第1図 断層の種類と地殻の伸縮の関係をしめす模式図。

はもっぱら正断層で、ところどころ正断層たちをつなぐ横ずれ断層や、水平ずれ成分を有する正断層も動く。反対に、正断層がたくさん動くということは、地殻が水平に伸びることを意味する(第1図)。断層がずれるだけなら、地殻の体積は保存するので、水平に伸びた分だけ地殻は薄くなる。地殻が薄くなると、アイソスターを保つために沈降がおこる。沈降したところは堆積盆になって、厚く地層がたまる。このロジックを逆にたどると、沈降のプロセスを層位的に読み取ることができ、さらには地殻が引きのぼされるプロセスを読み取ることができる。

リフト期には、ハーフグラーベンという、地質断面図上で三角形をなす堆積盆が多数つくられる(第2図)。盆地は片側において正断層で基盤と接する。両側が正断層になって落ち込んだ盆地をフルグラーベンまたは単にグラーベンという。通常、ハーフグラーベンの幅は10km程度で、数kmの厚さの地層をためる。地質調査により、そうした地質構造がとらえられたなら、そこにたまった地層から、地殻伸長の時期や量がわかる。写真1は、日本海拡大時に動いた正断層の実例である。新潟県北部から庄内平野にかけて、日本海拡大時のグラーベンやハーフグラーベンがいくつも露出し、当時の地殻変動をうかがい知ることができる(Yamaji, 1990)。

日本海沿岸ではひろく漸新世末から中新世初期



第2図 ハーフグラーベンの模式的断面図。地層の厚さと粒度は、断層に向かって増大する。断層近傍では、相対的に隆起する正断層をはさんで反対側から土砂が供給され、崖錐成や扇状地成の地層がたまる。



写真1 日本海拡大時につくられた断層の例(新潟県関川村)。角礫はすべて断層の右側と同じ岩質の花崗岩。断層運動で、礫岩層が引きずられている(破線)。太実線は断層。

(2,500～2,000万年前)に、火砕流堆積物がひろく堆積したが、この凝灰岩層は第2図にしめたようなハーフグラーベンの構造をとらないことから、大規模な伸張テクトニクスがおこったのはこの凝灰岩が堆積した後、すなわち2,000万年くらい前からである。ただし、それ以前にも、散発的ながら正断層の活動はあり、また、現在の日本海沿岸で浅海の環境が出現するのが3,200～3,500万年前であるから(鹿野ほか, 2008)、日本海側でローカルに海進がおこる程度の沈降と伸張テクトニクスは漸新世初期には始まっていたらしい(Kano et al., 2007)。とはいえ、漸新世のハーフグラーベンは、現在の本州の陸域をみる限り片手で数えるほどしかない(例えば六甲山地の北側の三田;尾崎・

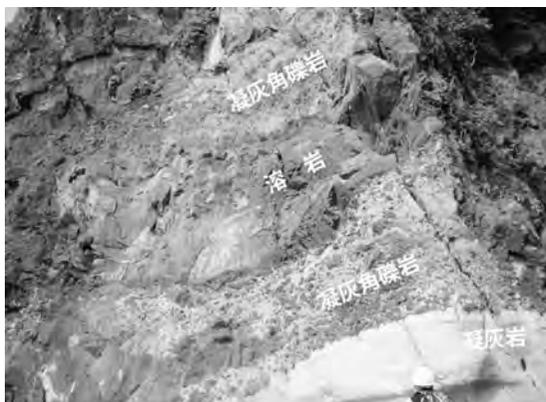


写真2 リフト期の玄武岩溶岩(新潟県村上市勝木海岸、早田層下部(山路, 1989)。



写真3 リフト期の河川成堆積物(山形県鶴岡市油戸付近)。温海層荒倉山礫岩部層(山路, 1989)。チャネル充填堆積物が累重している。

松浦, 1988)。したがって陸域をみる限り, 2,000 万年より前に地殻が伸びた量は小さかったようだ。ただし, 海域ではもっと古くからリフティングがおこっていたかもしれないが, その有無については今後の問題である。

2,000~1,500 万年前の西南日本の古地磁気回転(例えば, Otofujii, 1996)を重視する研究者は, 日本海拡大を主として, 2,000 万年より若いイベントとみなしている。さもなければ, この古地磁気回転より前に, 日本列島がほぼ現在の位置まで移動してしまい, 古地磁気回転の意味を日本海拡大と別に考えなければならぬからである。

さて, 2,000 万年くらい前に日本海形成にいたるリフティングが本格化し, 断層運動とともに火山活動も活発におこった。グラーベンを埋めている地層の主体は, それ以降の, グリーンタフとよばれる溶岩や火山砕屑物に富む堆積物からなる(写真2)。火山の縁辺部では, 湖沼や河川の堆積物が堆積していた。後者の例を写真3に示す。こうした非海成の当時の環境は, 日本海の向こう岸, 韓国でも想定されている(例えば, 徳橋ほか, 2006)。この時期を含む東北日本の新第三紀~第四紀の火成活動については, 最近, 周藤(2009)と吉田(2009)が総括している。また, 西南日本については, 木村(2009)のレビュー論文がある。

リフティングの終了時期は, どんなデータを重視するかにより約1,200 万年前とみる説から1,500 万年前とみる説まであり, 研究者間の不一致が大きい問題である。筆者は後者の説にくみする。関東以西のテ

クトニクスと, 沈降様式の転換の, 2つの理由からである。西南日本の応力場は, 1,500 万年前に伸張から圧縮に転じたらしい(Yamaji and Yoshida, 1998)。これはおそらく, 若い四国海盆の沈み込み開始のためである。実際, 伊豆弧由来の火山灰の房総半島における初出現から, Takahashi and Saito (1999)は伊豆弧が本州に衝突を始めたのは1,500 万年前であると結論づけている。グラーベンを画する正断層が不整合で上位の地層に覆われる構造からリフト期の終了の年代が一般に判定できるが, 日本海をつくらリフティングについて, こうした構造は少数の地域で認定されているにすぎない。典型的なのは, 仙台湾(中村, 2002)と鈴鹿山地(吉田ほか, 1995)である。また, Yamaji (1990)は, グラーベン群のローカルな沈降とホルスト群の相対的隆起という対照的な昇降運動が終了し, 広域的沈降に転じたのが1,500 万年前であることを, 新潟山形県境地域の層序からしめしている。将来, 日本海で深海掘削をおこなうときには, 埋没したグラーベン構造を地震探査で把握したうえでそれをおこなうようにすれば, 日本海がいつどのように拡大したかという日本海形成問題は, おおかた決着するだろうし, そのような深海掘削でなければならない。

日本海形成についての筆者の描像を, カラー口絵にしめた。素粒子論では, ある粒子の存在を仮定すると観測が説明できるというたぐいの論法がおこなわれているが, それをまねて, 平家プレートというものを想定して当時のさまざまな地質現象を説明しようとしたのがこのモデルである(Yamaji and Yoshida,

1998)。このプレート名は、日本列島のテクトニクスを短期間支配して没したことにちなむ。このモデルで重視したのは、古地磁気回転・応力場変遷・堆積盆の昇降運動ならびに西南日本外帯で1,500万年ほど前から起こった「外帯火成活動」である。すぐ前の時代まで付加帯であった、すなわち海溝に非常に近いところでおこったこの特異な火成活動を、四国海盆の拡大軸の沈み込みで説明する研究者は多い。しかしその広がりには関東山地から屋久島にまでおよび、しかも発生時期は、この範囲で時間差を議論できないくらい同時的である。こうした特徴は、西南日本に直交して沈み込む四国海盆の拡大軸では役不足であり、拡大軸の沈み込みとすればもう一枚上手の役者が必要であるとして考案したものである。カラー口絵には、古地形もしめしている。本州～北海道の日本海側の地殻は引き伸ばされて大きく沈降した。約1,600万年前には、本州のほぼ全域が水没し、ところどころに島々が残るといった状況になった。このモデルは約1,500万年前に関東～屋久島の前面でほぼ同時に拡大軸の沈み込みがあったとして、外帯火成活動の広がり開始の同時性を説明している。栃木県や茨城県でアイスランド岩という特異な火山岩が出現する(高橋ほか, 1995; 田切ほか, 2008)ことも、これで説明できる(Yamaji and Yoshida, 1998)。それに続いて若い四国海盆が沈み込み始めたため、この火成活動がおこっただけでなく、西南日本は持ち上げられ、ほぼ全域がふたたび海面上に浮上した。また、同時に、西南日本は伸張応力場から圧縮応力場に転換した。この図には、最近の重要な指摘、すなわち、高橋(2006)によって提案された北部フォッサマグナから銚子付近にいたる右横ずれ構造線もしめされている。高橋が依拠したのは、主として中新世初期の火山フロントのこの線をはさんだずれで、その量は200kmに達する。論拠はまったく異なるが、同様の描像はKobayashi(1941)も述べており、この断層に関東構造線という名前を与えている。その大規模な右ずれのため、西南日本では山陰～北陸の沖合にある薄化した地殻が、東北日本では現在の陸域まで東進した。言い換えると、東北日本は西南日本よりも大きく引き伸ばされ、深い海盆がリフティングの後、残ることになった。このくぼみは1,000万年ほどかけて、泥質岩で徐々に埋め立てられることになる。新潟地域で若い堆積岩が5 km以上の厚さをもつのも、そのせいである(山路,

2010)。中新世より若い地層が西南日本で分布が狭く厚さも小さいのに対して、東北日本ではその逆であるという、糸静線あたりを境界とする東北日本と西南日本の地質の対照は、こうして1,500万年前に生じたのである。

この時代につくられた正断層たちが、のちに圧縮応力にさらされるようになると逆断層として再利用され、内陸型地震をおこすようになった。圧縮応力場になったのは、西南日本では日本海拡大の直後あるいは最末期、約1,500万年前からであるが(Yamaji and Yoshida, 1998)、おそらく応力レベルは低く、地殻の短縮速度は中新世末になるまで無視しうるほどだった。中新世末になると、Otsuka(1939)が指摘したように、(台湾-) 宍道褶曲帯として知られる構造がつくられた。それは、500～800万年前の出来事であるという(伊藤, 2000)。その後、西南日本の短縮変形は不活発となり、第四紀の横ずれ断層主体の運動に引き継がれる。東北日本は褶曲するほどではなかったが、1,000万年前に若干の隆起がおこっている(Nakajima *et al.*, 2006; Fujiwara *et al.*, 2008)。Nakajimaらが指摘するように、こうした隆起または不整合形成は、時期は若干ずれるものの、琉球弧までおよぶ広域的な現象であり、このとき圧縮応力場への転換がおこったように思われる。そして400万年ほど前に応力レベルが高まって、短縮変形がそれ以前に比べて格段に加速して、現在にいたったようである(Sato, 1994)。

### 3. 第四紀の地殻変動

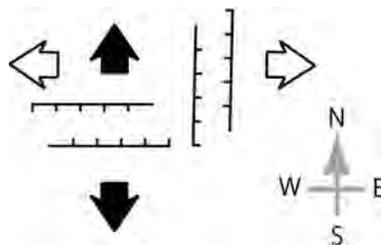
日本海のリフティングのときに活動した主要な正断層たちは、現在、圧縮応力場で逆断層として再利用されているという説を冒頭で紹介したが、日本海拡大時につくられた正断層の走向にはバリエーションがある。島弧と平行、すなわち東北日本ではNS、西南日本ではENE-WSWトレンドのものが多かったが、それと高角で交わる正断層も少なからず活動した(小林ほか, 2005)。このことは、グラーベンの伸長方向やその頻度から判断できる。新潟県北部では、古地磁気方位のばらつきから、そうしたNW-SEトレンドの断層が活動したと推定されている(Mino *et al.*, 2001)。

新潟地域でいえば、NE-SW方向が島弧方向である。周囲の山地に露出する前期中新世のグラーベンをみると、これと高角で交わるトレンドの正断層も存

在する。新潟地域では300万年ほど前から、NE-SW方向の褶曲軸をもつ褶曲構造が発達しつつある(岸・宮脇, 1996; 池田・山路, 2008)。地殻深部の応力は、これと直交する水平圧縮である(例えばKato *et al.*, 2006)。この応力状態で動きやすいのはNE-SW方向の断層であり(Sibson, 2009)、それが深部で動くことにより、浅部地殻の軟弱で厚い被覆層が褶曲構造をつくるわけである。この方向に交わる基盤の断裂は、横ずれ断層または縦ずれ成分を伴う横ずれ断層として深部で活動しているだろう。

新潟地域におけるこうした褶曲形成機構に関する理解は、1970年代初期の見解(鈴木ほか, 1971; 小玉ほか, 1974; 鈴木・三梨, 1974; 植村・高橋, 1974)、すなわち、基盤ブロックの差別的運動により、浅部で褶曲ができるという見解を大筋で支持する。大筋でというのは、深部の現象に関する解釈に違いがあるからである。70年代までは水平方向のテクトニックな大規模運動を想定しなかったため、背斜と向斜の下の基盤には、それぞれ上昇と隆起を考えた。しかし今日ではそのように個々の背斜・向斜について、浅部と深部の振る舞いのあいだに一対一対応を必ずしも認めないという違いがある(例えばSato *et al.*, 2004; Kato *et al.*, 2005)。アルプスやアパラチアのように何千万年もかけて大変形をおこした造山帯では、浅いところの褶曲構造と深部の構造が水平に近い断層で切断されていることが19世紀末から知られていたが、日本海側の第四紀の褶曲帯でもそうした深部と浅部との単純ではない関係が認識されるようになったのは、最近のことである。

新潟地域では、個々の背斜や向斜はNE-SW方向に延々と続くわけではなく、地図上でみると、10~30 km程度の長さをもつこの方向の背斜・向斜が隣接している。もしNE-SW方向に延々と同じ構造が続くのであれば、つまり地殻変動による変形像が金太郎飴のように実は二次元的絵でしかなければ、褶曲軸に直交する鉛直断面で、この地域の地殻変動の全容を考えることができる。実際は、三次元的な褶曲形態をしているわけで、こうした複雑さは、地下に埋まっているグラベンたちの方向の複雑さに、少なくとも一部は由来するのだろう。三次元的ということは、堆積層の厚さ分布や地層面の傾斜がNE-SW方向にも変化するということであるが、そのような複雑な内部構造が地殻浅部にあるために、地震波が増幅されて、



第3図 走向の異なる2組の正断層と、応力の関係。

地表で強震動を感ずる場所が、複雑な分布をすると考えられる。この意味で、地下数kmの地質構造の把握が今後重要だろう。

最後に、われわれが近年すすめてきた、小断層の調査について紹介したい。変位量が数mm~数mという断層たちである。そうした規模の断層は、中越地域に高密度で分布する。例えば十日町付近の200万年くらい前の地層を調査すると、10m歩くごとに見つかる、というような密度である。大断層と違って高密度なので、断層たちを動かした地殻変動の力の場をきめ細かく推定できるだろう、という目論見で始めた研究である。小断層に注目した研究は、1960年代後半から70年代前半にかけて盛んにおこなわれたが(例えば, Uemura and Shimohata, 1972; 新津背斜団体研究グループ, 1977)、当時とはいくつかの点で大きな違いがある。ここで一番重要なのは、断層活動が二次元的か三次元的か、という違いである。例えば第3図のように、走向が南北と東西の正断層群があったとすると、当時の考え方ではそれらが同時に活動することはなく、走向に直交するそれぞれ東西と南北の引っ張りが別の時代に働いたとされた。時代ごとには、第1図の断面図のような二次元的な図式で考えれば十分とされたわけである。今日では、さまざまな方向の断層が同時に動くことを認めている。第3図の4条の断層が地質学的には同じ時代に活動すると、地殻は東西にも南北にも引きのばされ、それを補償するように、鉛直方向に短縮する。すなわち、三次元的変形である(山路, 2001)。例えば、十日町西方の渋海川向斜は褶曲軸が水平なので、地質図をみる限りでは、褶曲軸に直交する鉛直断面内の二次元的運動によって褶曲がつくられたようにみえる。ところがそこにみられる小断層群は、褶曲軸と直交方向のみならず、平行方向の運動もしめしているのである。しかも



写真4 澁海川向斜に露出する約150万年前の砂礫岩。礫が多い層を白棒でしめす。ツルハシが突き刺さるほど軟弱な地層であるが、小断層に切られている。

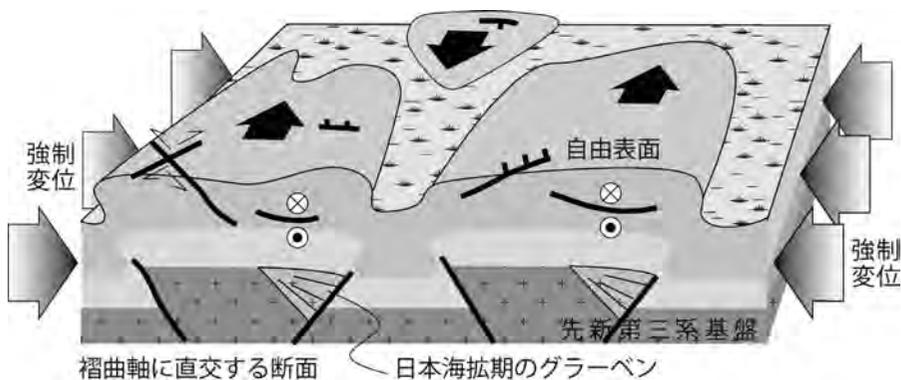
褶曲軸に平行な走向をもつ逆断層は意外なことに少なく、褶曲軸と平行で上盤側が小国盆地に向かって滑り降りる成分を持つ小断層が多い。

こうしたことからわれわれは、若く軟弱な堆積層が(写真4)、背斜のような構造的高まりから周囲の構造的な低所に向かって、露頭の規模では小断層の活動として、巨視的にみると流動しているのだと考えている(Yamaji *et al.*, 2005; Otsubo, 2006; 池田・山路, 2008)。澁海川向斜の場合、小国盆地の構造的な低所(depression)への流動である。こうした運動は地すべりとは似て非なるものである。地すべりなら、すべり面の最低点は、すべり行く方向の低地の標高程度かそれより高いだろう。巨視的流動をになう小断層とい

っているものは、もっと深いところまで分布すると考えている。地下深部は広域的な水平圧縮応力が作用しているが、浅いところはローカルな地形荷重の影響でそれとは異なる応力状態になる。巨視的流動がおこるのは、たぶん地下数百mまでの浅部における変形である。

活褶曲が成長しつつある中越地域では、地質図規模の活断層があるだけでなく、「活小断層」というものも活動していると筆者は考えている(第4図)。その一つ一つは、変位量が数mm～数十cmと小さいものの、地下構造物にとっては、新種の脅威として認識すべきではなかろうか。例えば、山古志村南部の木沢トンネルは中越地震のとき、NW-SE走向の正断層で破壊されたのだが、地すべり性正断層にしては地形と不調和であるという(森・土谷, 2005)。地形的な高所から低所へとすべっているわけではないということだが、その代わり、地質構造のうえでは南南西に褶曲軸が傾く峠背斜の高所から隣接する金比羅山向斜の低所に向かって上盤が動いたことが報告されている。これなど「活小断層」が地下構造物を破壊した例であるかもしれない。小規模な断層の変位が地下構造物を破壊した可能性は、辻ほか(2009)も合成開口レーダーの観測データから論じている。

2004年の中越地震では、地下10kmほどのところの逆断層が震源として想定され(平田ほか, 2007)、その延長線上にある地表の活断層が地震時に動いた(鈴木ほか, 2004)。奇妙なことに、深さ10km～15kmにおける震源断層の変位量は数m規模であったのに、地表の断層の変位量は一桁小さかった。すなわ



第4図 新潟地域における地質図規模の褶曲構造の形成と、露頭規模の小断層による巨視的流動(黒矢印)を説明するための模式図。

ち、震源から地表まで10kmほどのあいだに、変位量を減じたわけである(渡辺ほか, 2005)。この変位量の減衰は、震源域における1枚の断層面上の変位量が、軟弱な被覆層のなかで小断層として枝分かれして分散した結果ではなかろうか。そのとき、活小断層たちが動いたのではないか。活小断層の危険性を指摘したところで、筆を置くことにする。

#### 文 献

- 栗田泰夫 (1984) : カルデラとスラストのテクトニクス, 構造地質, no.30, 59.
- Fujiwara, O., Y. Yanagisawa, T. Irizuki, M. Shimamoto, H. Hayashi, T. Danhara, K. Fuse and H. Iwano (2008) : Chronological data for the Middle Miocene to Pliocene around the southwestern Sendai Plain, with special reference to the uplift history of the Ou Backbone Range. *Bulletin of the Geological Society of Japan*, 59, 423-438.
- Hashimoto, M. and D.D. Jackson (1993) : Plate tectonics and crustal deformation around the Japanese islands. *Journal of Geophysical Research*, 92, 16149-16166.
- 平田 直・佐藤比呂志・酒井慎一・加藤愛太郎 (2007) : 2007年新潟県中越沖地震の震源断層-大地震を起こす「長岡平野西縁断層帯」と関係するか-. *科学*, 77, 930-934.
- 池田昌之・山路 敦 (2008) : 新潟県長岡市北東方, 東山背斜の形成時期: 古流向と地質構造からの推定. *地質学雑誌*, 114, 405-414.
- 伊藤康人 (2000) : 日本海南部～九州周辺の新生代後期テクトニクス. *石油技術協会誌*, 65, 48-57.
- 鹿野和彦・小布施明子・佐藤雄大・大口健志・小笠原憲四郎 (2008) : 男鹿半島潮瀬ノ岬砂礫岩の年代層所学的位置づけ. *石油技術協会誌*, 73, 86-96.
- Kano, K., K. Uto and T. Ohguchi (2007) : Eocene to Oligocene marine transgression on the Japan Sea coast: implication to the opening of the Japan Sea. *Journal of Asian Earth Science*, 30, 20-32.
- Kato, A., S. Sakai, N. Hirata, E. Kurashimo, T. Iidaka and T. Kanazawa (2006) : Imaging the seismic structure and stress field in the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake: structural zones of weakness and seismogenic stress concentration by ductile flow. *Journal of Geophysical Research*, 111, B08308.
- Kato, A. *et al.* (2009) : Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 131-138.
- Kato, N. *et al.* (2005) : Geologic fault model based on the high-resolution seismic reflection profile and aftershock distribution associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M.6.8), central Japan. *Earth, Planets and Space*, 57, 447-452.
- 木村純一 (2009) : 島弧火山岩と火山作用, 概説. 日本地質学会編, 日本地質地方誌, 中国地方, 342-349.
- 岸 清・宮協理一郎 (1996) : 新潟県柏崎平野周辺における鮮新世-更新世の褶曲形成史. *地質学雑誌*, 105, 88-112.
- Kobayashi, T. (1941) : The Sakawa Orogenic Cycle and its bearing on the origin of the Japanese Islands. *Journal of the Faculty of Science, Imperial University of Tokyo, Section 2*, 5, 578p.
- 小林博文・山路 敦・増田富士雄 (2005) : 能登半島輪島地域の中新統の層序・堆積環境・テクトニクス. *地質学雑誌*, 111, 286-299.
- 小玉喜三郎・鈴木尉元・小川銀三・丸太美幸 (1974) : 箱形褶曲の内部構造について-スケール・モデル実験による研究-. *地質調査所報告*, no.250, 121-143.
- 松原尚志 (2009) : 中国山地南部-瀬戸内海東部沿岸地域. 日本地質学会編, 日本地質地方誌, 中国地方, 110-112.
- Mino, K., A. Yamaji and N. Ishikawa (2001) : The block rotation in the Uetsu area, northern part of Niigata Prefecture, Japan. *Earth Planets and Space*, 53, 805-815.
- 森 伸一郎・土谷基大 (2005) : 新潟県中越地震における木沢トンネルの被害とそのメカニズム. *土木学会地震工学論文集*, 28, 1-10.
- Nakajima, T., T. Danhara and K. Chinzei (2006) : Uplift of the Ou Backbone Range in Northeast Japan at around 10 Ma and its implication for the tectonic evolution of the eastern margin of Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241, 28-48.
- 中村光一 (1992) : 反転テクトニクス (inversion tectonics) の地質構造表現. *構造地質*, 38, 3-45.
- 中村光一 (2002) : 沈降と隆起, そして改進と海退の歴史-仙台湾, コンピュータグラフィックス日本列島の地質, 丸善 (日本列島の地質編集委員会編).
- 新津背斜団体研究グループ (1977) : 新潟油田新津背斜の形成機構. *地球科学*, 31, 70-82.
- 岡村行信 (2002) : 新第三紀以降の歪み集中帯. 大竹正和・太田陽子・平 朝彦編, 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会, 111-121.
- Otofuji, Y. (1996) : Large tectonic movement of the Japan Arc in late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: review and synthesis. *Island Arc*, 5, 229-249.
- Otofuji, Y. and T. Masuda (1983) : Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 349-359.
- Otsubo, M. (2006) : Depth-dependent state of stress revealed by fault-slip analysis in the Niigata fold belt, Japan. *Doctoral Thesis, Kyoto University*.
- Otsuka, Y. (1939) : Tertiary crustal deformations in Japan. *Jubilee Publication for Commemoration of Professor H. Yabe's 60<sup>th</sup> Birthday*, 481-519.
- 尾崎正紀・松浦浩久 (1988) : 三田地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅).
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000) : Continuous GPS Array and Presentday crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 2303-2322.
- Sato, H. (1994) : The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22261-22274.
- 佐藤比呂志 (1996) : 日本列島のインバージョンテクトニクス. *活断層研究*, no.15, 128-132.
- Sato, H. *et al.* (2004) : Formation and shortening deformation of a back-arc rift basin revealed by deep seismic profiling, central Japan. *Tectonophysics*, 388, 47-58.
- 周藤賢治 (2009) : 東北日本弧-日本海の拡大とマグマの生成-. 共立出版, 252p.
- Sibson, R.H. (2009) : Rupturing in overpressured crust during com-

- pressional inversion-the case from NE Honshu, Japan. *Tectonophysics*, 473, 404-416.
- 鈴木康弘・渡辺満久・廣内大助 (2004) : 2004年新潟県中越地震の地表地震断層. *地学雑誌*, 113, 861-870.
- 鈴木尉元・三梨 昂 (1974) : 信越堆積盆地の地質構造区分, 地質構造発達過程と褶曲の形成機構について. *地質調査所報告*, no.250, 79-91.
- 鈴木尉元・三梨 昂・景山邦夫・島田忠夫・宮下美智夫・小玉喜三郎 (1971) : 新潟県第三系堆積盆に発達する褶曲の形成機構について. *地質学雑誌*, 77, 301-315.
- 田切美智雄・青井亜紀子・笠井勝美・天野一男 (2008) : 大子地域中新世火山岩類の化学組成とK-Ar年代-大子地域と茂木地域に産する新第三紀火山岩類の組成・層序対比. *地質学雑誌*, 114, 300-313.
- 高橋正樹・野口高明・田切美智雄 (1995) : 希土類元素からみた東北日本中新世アイスランタイトの成因. *地質学論集*, no.44, 65-74.
- 高橋雅紀 (2006) : 日本海拡大時の東北日本弧と西南日本弧の境界. *地質学雑誌*, 112, 14-32.
- Takahashi, M. and K. Saito (1999) : Miocene intra-arc bending at arc collision zone, central Japan: Reply. *Island Arc*, 8, 117-123.
- 徳橋秀一ほか (2006) : 韓国南東部第三紀ポハン堆積盆に発達する中新世トウムサンファンデルタの堆積物と堆積様式の特徴-日本海(東海)拡大最盛期における日本海最西端部の堆積作用. *地質ニュース*, 619, 26-46.
- 辻 健・山本勝也・山田泰広・松岡俊文・朝倉俊弘 (2009) : 干渉SAR解析による新潟県中越沖地震に伴う山岳トンネル被害メカニズムの解明. *土木学会論文集C*, 65, 989-997.
- Uemura, T. and I. Shimohata (1972) : Neutral surface of a fold and its bearing on folding. 24<sup>th</sup> International Geological Congress, Section 3, 1972, 599-604.
- 植村 武・高橋 明 (1974) : 基盤の運動像と被覆第三系の褶曲-新潟県北部櫛形山脈の例. *地質調査所報告*, no.250, 1-21.
- 渡辺満久・鈴木康弘・伊藤武男 (2005) : 変動地形に基づく2004年中越地震の断層モデル. *地震*, 58, 297-307.
- 山路 敦 (1989) : 温海附近の地質と羽越地域における前期中新世のリフティング. *地質学論集*, 32, 305-320.
- Yamaji, A. (1990) : Rapid intra-arc rifting in Miocene Northeast Japan. *Tectonics*, 9, 365-378.
- 山路 敦 (2001) : 新しい小断層解析. *地質学雑誌*, 107, 461-479.
- 山路 敦 (2010) : 日本海拡大後の東北日本火山弧における地殻生長量. *月刊地球*, 印刷中.
- 山路 敦・佐藤比呂志 (1989) : 中新世における東北本州弧の沈降運動とそのメカニズム. *地質学論集*, no.32, 339-349.
- Yamaji, A., S. Tomita and M. Otsubo (2005) : Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, 27, 161-170.
- Yamaji, A. and T. Yoshida (1998) : Near trench magmatism and Miocene tectonics of the SW Japan arc: the Heike plate hypothesis. *Journal of Mineralogy, Petrology, and Economic Geology*, 94, 389-408.
- 吉田史郎・高橋裕平・西岡芳晴 (1995) : 津西部の地質. *地域地質研究報告*, 5万分の1地質図幅. *地質調査所*.
- Yoshida, T. (1984) : Tertiary Ishizuchi Cauldron, Southwest Japan Arc, formation by ring fracture subsidence. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8502-8510.
- 吉田武義 (2009) : 東北本州弧における後期新生代の火成活動史. *地球科学*, 63, 269-288.
- 
- YAMAJI Atsushi (2010) : Japan Sea Opening and the background of active tectonics in the Niigata and surrounding regions.
- 

<受付: 2010年7月23日>