北陸および信越地域における後期新生代の地質構造発達史

Geologic structure and late Cenozoic evolution of the Hokuriku and Shin'etsu regions, north-central Japan

Abstract

竹内 章*

*Akira Takeuchi**

2009年10月7日受付.

2010年6月4日受理.

* 富山大学大学院理工学研究部
Graduate school of Science and Engineering
for Research, University of Toyama, Toyama
930-8555, Japan

Corresponding author; A. Takeuchi,
takeuchi@sci.u-toyama.ac.jp

The Hokuriku and Shin'etsu region, which represents the northern boundary zone of the Northeast and Southwest Honshu arcs, is characterized by frequent earthquakes as large as magnitude 6.8–6.9 (Richter scale) along a latest Cenozoic thrust-and-fold belt. Based on a recently updated tephrochronology, this paper seeks to reconstruct the geomorphologic and geologic evolution of the region. It is shown that the present tectonic geomorphology in the region has been influenced by the superposition and intersection of three tectonic trends (N–S, E–W, and NE–SW; these trends are defined by the orientations of tectonic features such as faults, fold axes, and elongate basins) since the Miocene.

Sedimentary basins that have been active since the Early Miocene have developed into Quaternary coastal plains. Reverse faults along the foot of areas of mountains and hills surrounded by coastal plains have produced relatively strong crustal earthquakes, thereby promoting the development of the most recent (NE–SW) tectonic trend. Typical tectonic inversion has occurred in Northeast Japan, especially in the northern Fossa Magna district, where the boundary faults of Miocene sedimentary basins have been reactivated as reverse faults, although basin inversion has yet to occur in the reverse-fault province of the Hokuriku district. By comparing the evolution of geomorphologic and geologic structures on both sides of north-central Japan, this paper emphasizes the million-year scale of reversals in the stress field and its migration, which is important in understanding the origin of strain concentration in north-central Japan and the cause of crustal earthquakes in the Hokuriku and Shin'etsu region.

Keywords: crustal movement, intersecting structure, zone of strain concentration, fault province

はじめに

「平成19年(2007年)能登半島地震」(マグニチュードMj6.9)は、能登半島西岸海域、深さ11 kmを震源として発生した。同地震は、日本海側で発生する中規模以上の地震の発生様式が、今まで考えられていた単純な反転テクトニクスによる地質構造モデルとは異なるタイプの震源断層によることを示唆するものであった。同地震の発生からわずか3.7ヶ月後に「平成19年(2007年)新潟県中越沖地震」(Mj6.8)が中越沖の深さ約15 kmを震源として発生した。中越地域では2年9ヶ月前に内陸で「平成15年(2004年)中越地震」が発生しており、時空間の近接性から3つの地震の関係が注目されている。本稿は、日本地質学会構造部会の討論会「日本海沿岸褶曲・断層帯の形成・成長と地震活動」における講演をまとめたものである。中部日本における日本海沿岸域の活構造と地震の関係を解明する目的で、能登半島を含む北陸東部の地形と地質構造の特異性に焦点を当て、地質構造

発達と地殻変動史をたどり、アクティブテクトニクス(現在進行中の地殻変動)や地震発生とのかかわりを議論する。

地形・地質構造とその発達過程

1. 対象地域

小論の対象地域は能登半島および佐渡島周辺の海域を含む中部地方の日本海側に位置し、陸域は石川県、富山県、長野県北信地方、新潟県上越・中越・佐渡地方からなる。本地域には、新生代後期の富山堆積盆、信越堆積盆、新潟堆積盆が発達し、基盤は先新生界西南日本の内帯に属する。なお、本稿で地形と地質構造の発達史を議論する際、中越地域はフォッサマグナ地域に含めない(植村・山田編, 1988; 植村, 1990)。また、富山トラフは、本州日本海側の大陸棚中央部にある南北方向の細長い凹地(トラフ)で海域における東北日本と西南日本の境界域をなす。

本稿では、ある地質時代の断層分布について、断層の長さや走向・傾斜、変位センスによる断層型(逆断層、横ずれ断

Fig. 1. Active Fault Provinces in the Chubu Region, Japan. The map shows the distribution of active faults (thin lines; after Nakata and Imaizumi, 2002) and active fault provinces (thick solid lines (observed) and dashed lines (inferred); Research Group for Active Faults, 1991; Takeuchi, 1999). Roman numerals and letters are used to identify fault provinces and individual faults, respectively (see the main text). ISTL: Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, A: Atotsugawa Fault System, S: Shogawa Faults, MT: Morimoto-Togashi Faults, T: Tonami-heiya Faults, K: Kurehayama Fault, U: Uozu Fault, Ta: faults along the western margin of the Takada Plain, N: Faults along the western margin of the Nagaoka Plain, M: Muikamachi Faults, Z: Faults along the western margin of the Nagano Plain. (中部地方の活断層区、活断層分布は中田・今泉(2002)、活断層区は活断層研究会(1991)・竹内(1999)による。ローマ数字とアルファベットは、活断層区の識別符号(本文参照)。境界線 ISTL は糸魚川-静岡構造線断層帯とその延長にあたる。A: 跡津川断層系, S: 庄川断層帯, MT: 森本-富樫断層帯, T: 砺波平野断層帯, K: 呉羽山断層, U: 魚津断層, Ta: 高田平野西縁断層, N: 長岡平野西縁断層帯, M: 六日町断層帯, Z: 長野盆地西縁断層帯。)

層など)、断層分布密度などの地域的な特性から分帯できる場合、その区域の単位を断層区と定義する。活断層については活断層区と呼ぶ。活断層研究会(1991)は、日本内陸および周辺海域の活断層は大きく12の活断層区に区分した。また、活断層区は、起震応力場の区域性を反映していると考えられる。逆断層区は、そこに分布する断層のほとんどが逆断層であり、他のタイプの断層が見られないか、あっても副次的なものである区域を指す。そして、逆断層の走向に卓越方向が見られる。横ずれ断層区は、そこに分布する断層のほとんどが横ずれ断層であり、他のタイプの断層が見られないか、あっても副次的なものである区域を指す。ここでは、走向や変位センスで共役セットをなす2系統の断層系が見られることもある。

また、歪集中帯は、広域的に地殻変動場を見た場合、測地学的には変位分布パターンが急変し、歪速度の大きくなっている帯状地域を、また地質学的には断層や褶曲などの変形構造

Fig. 2. Example of a pre-Middle Pleistocene tilted zone. (Top) Location map of the Uozu-Tomari area in eastern Toyama Prefecture. Solid line: Uozu Fault and Miyazaki-oki Fault, dashed line: Western margin of steeply tilted zone, double line: Kurobishi-yama Fault. The base topographic map is from Google Maps. (Bottom) Geological cross-section through the Tomari area in eastern Toyama Prefecture. The X-Y section is from Ito (1985). The Middle Pliocene strata include tuff (dashes), sandstone (dots), and mudstone (oblique and horizontal stripes); Middle Pleistocene strata consist of overlying terrace gravels (small circles). (先更新世前期急斜帯の例。(上) 富山県東部魚津-泊地域の断層位置図。実線: 魚津断層・宮崎沖断層, 破線: 急傾斜帯西縁, 二重線: 黒菱山断層。地形図はグーグルマップによる。(下) 富山県東部泊地域丘陵部の地質断面図。伊藤(1985)のX-Y断面にA-B断面を加筆。中部中新統は、凝灰岩(短線文), 砂岩(砂目), 泥岩(斜線・横線)などからなる。更新統中部は、高位段丘礫層(丸文。)

が集中している地帯を指す。新生代の日本では、瑞穂-フォッサマグナ褶曲帯(大塚, 1942)をはじめ、各地で地質学的意味での変形集中帯が知られていたが、1995年以降、国土地理院のGPS精密測地網が整備されたことにより、新潟-神戸構造帯(Sagiya et al., 2000)の存在が明らかとなり、糸魚川-静岡構造線を横切ることで注目されている。

Fig. 1に中部地方内帯の活断層分布(中田・今泉, 2002)と活断層区(活断層研究会, 1991; 竹内, 1999)を示す。飛騨山脈で逆断層区IIa, IIbおよびIVaと横ずれ断層区IVcが隣接する。内陸地殻内地震の発生との関係で近年注目される強

短縮の新潟－神戸構造帯が活断層区を横切る。

2. 年代論の進展

北陸および信越地域に分布する新生界上部の層序学的研究については、1980年代に化石年代層序がほぼ確立した（鹿野ほか編, 1991; 藤井ほか, 1992; 日本地質学会編, 2006）。能登半島において広い分布が知られている陸成層（新生界下部）については、火山岩類の年代測定データが増えて、混乱した層序が整理されつつある（日本地質学会編, 2006）。また、近年は海洋古環境の解析を目的として、とくに更新世以降の時代についての年代マーカーによる年代層序の高精度化が行われている。

鮮新統および更新統については、中部地方に分布するテフラの広域対比と年代決定（田村・山崎, 2004; Nagahashi and Satoguchi, 2005 など）が進み、断層活動史や飛騨山脈の隆起の時代論などで大幅な進展があった。例えば、飛騨山脈北端側には南北ないし北北東－南南西走向の黒菱山断層に平行して急傾斜帯があり、広域テフラの対比からこの撓曲運動は70万年前頃より前に形成されていたことが明らかとなった。鮮新統以下の地層は、40～60°傾斜しているが、ほぼ水平な棚山礫層に傾斜不整合で覆われている（Fig. 2）。この急傾斜構造については、約30°反時計まわりの回転が検出されている（伊藤, 1985; 伊藤・渡辺, 1988）。模式地の呉羽山礫層はピンクタフ（貝塩上宝テフラ）を含むが、棚山礫層にも上部にこのタフが挟まれることから棚山礫層は呉羽山礫層に対比される（田村・山崎, 2004）。このことから、この傾斜運動はピンクタフが堆積した70万年前頃より前に形成されていたことがわかる。

以下で行う構造発達史の議論でも、これらの成果に準拠した時代論の枠組みを用いる。なお、最近、第四紀の定義（鮮新世／更新世境界の年代）について国際的に改訂が行われたことから、本稿もこれに従う。その上で、新生代（界）の区分については、新第三紀（系）や古第三紀（系）の用語を準用する。

3. 海岸平野と半島の形成

現在の飛騨高原や能登半島は、厚い堆積層をもつ海岸平野や沿岸海域とは異なる、先新生界基盤岩が露出する隆起帯である。能登半島および周辺の浅海域は、100万年前頃より前の約500万年間は広く平低な陸域だったか、あるいは極浅い多島海であり（藤井ほか, 1992）、半島をなすようになったのは、50万年前以降であると考えられている（太田・平川, 1979）。

本稿では、主に、漸新世以降の本州の地体構造を対象とし、糸魚川－静岡構造線以西の西南日本の地質構造発達史に関わる、つぎの5つのステージの地殻運動に注目して日本海海底や沿岸部の地形発達を考察する。また、本稿でいう東北日本は、便宜上、北部フォッサマグナ地域を含み、南部フォッサマグナ地域は除外する。

(1) リフト期 [3200 万年前－2800 万年前] 国際深海掘削計画 ODP により 1989 年に実施された日本海盆・大和海盆での掘削は、日本海地域の形成年代にかかわる重要な資料を提供した。Tamaki et al. (1992) によれば、漸新世前期

(3200 万年前) に大陸地殻の薄化が始まり、それが漸新世後期 (2800 万年前) に海底拡大へ様式転化したことにより、日本海盆の形成が始まった。漸新世末～前期中新世には、富山トラフと北陸や新潟では南北ないし北西－南東走向のリフトが形成された（例えば、志岐・立石, 1991; 石田, 1991; 小林ほか, 2005）。

(2) 日本海の海底拡大期 [2800 万年前－1800 万年前] 日本海地域の海底拡大の場合は、その北部から南西へと移動し、大和海盆や対馬海盆を形成したが、1800 万年前には停止した（Tamaki et al., 1992; Jolivet and Tamaki, 1992; Jolivet et al., 1994）。北陸地方では、前期中新世中葉（およそ 2000 万～1800 万年前の期間）に、海底火山活動を伴う基盤の断裂によって地溝状凹地群（島弧内リフト）が形成された（坂本, 1966）。富山湾は、元来、富山トラフの地溝が枝分かれした湾入部であり、湾岸の海底断層は日本海開裂期に形成された（岡村, 2002）。

(3) 堆積盆形成期 [1800 万年前－1500 万年前] 北陸地方ではこの期間に 3,000 m に達する急激な沈降により堆積盆を形成した（藤井ほか, 1992; 鮎野, 2001; 竹内, 2004; など）。これらの堆積盆地は、加賀・富山など現在の海岸沖積平野とほぼ同じ場所に位置する。なかでも能登半島と中央高地に挟まれた加賀－富山平野の先新生界基盤岩の深度は少なくとも 2,000 m～3,000 m である（古瀬・河野, 1990）。また、基盤の凹地を安山岩や玄武岩など比較的高密度の岩石が占めることにより、ブーゲー重力異常の正異常が高い狭長な地帯として表現される（先名ほか, 2004, 2005a, 2005b; 石渡, 2006; 竹内, 2008）。

(4) 堆積盆分化と堆積層変形の進行 [1500 万年前－500 万年前] 現在の丘陵地や中山間地（医王山－宝達丘陵や射水丘陵、八尾地域など）と能登半島は、堆積盆地の周縁部をなし、1500 万年前頃から 1300 万年前頃までの間、堆積速度が低減した（柳沢・吉川, 2006）。

山陰地方の島根半島では 1400 万年前頃に南北圧縮の応力場で堆積盆地が反転し始めたこととされ（鹿野ほか, 2000）、600 万年前頃に矢道褶曲帯の形成が完了した（多井, 1973; 鹿野・吉田, 1985; 野村, 1986）。このような南北圧縮場の広がりは、800 万年前頃から広域的になり、山陰から北陸にかけての日本海側で西南本州弧に平行な東西走向の逆断層および褶曲構造による変形集中帯が発達した（例えば、徳山ほか, 2001）。

こうした短縮テクトニクスによる変形集中帯としては、北陸地方では、能登半島北部（奥能登）の若山川断層帯（Fig. 3 の W）や半島基部にある宝達山北断層帯（Fig. 3 の H）が該当する。北陸地方の新生代堆積盆地は、飛騨地域側から日本海に向かって埋立てが進んできたが、能登半島の微化石年代層序では、中期中新世以降、海底表層で海緑石が生じた無堆積期間が複数回検出されている（柳沢・吉川, 2006; 渡辺, 2006）。つまり、富山湾は、現在まで堆積物による埋め立てからとり残された地溝といえる（岡村, 2002）。

(5) 現行テクトニクス期 [400 万年前－現在] 西南日本の東部では鮮新世後半から、南北走向の軸をもつ隆起・沈降運動（基盤の波状変形）が始まったが、中新世末以降の曙礫岩

Fig. 3. Simplified geologic map of Noto Peninsula. Thick solid lines: faults. W: Wakayama-gawa Faults, K: Korosa Fault, H: Northern margin of Mt. Houdatsu. Based on the Geologic Map of Ishikawa Prefecture (Kaseno et al., 1992). (能登半島の地質略図 (紮野ほか, 1992 を簡略化). W: 若山川断層帯, K: コロサ断層, H: 宝達山北縁断層帯.)

の形成に象徴される伊豆弧の沈み込みに起因する北西-南東圧縮場が重複するテクトニクス場になって、北東-南西方向が顕著な現在の活構造の発現に至る (Kaizuka and Imaizumi, 1984; 竹内, 1991, 1999; 徳山ほか, 2001; 松田・町田, 2006; 新妻, 2006)。

このステージの断層ブロック運動は既存の地質構造が新しい構造に改変されていく過程であり、現在の飛騨山脈、能登半島、富山湾などの地形形成にも深く関与している。この過程は、全域で同時に始まったのではなく、南東 (東海地方) から北西 (北陸地方や近畿地方) へと開始年代が若くなる傾向が認められる (竹内・岡田, 1988)。また、この過程は局所的には、かつての南北ないし北東-南西走向の正断層が逆断層として再活動するという断層運動センスの反転も含む (例えば、呉羽山断層: 富山県, 1996)。しかし、北陸新第三系堆積盆地では、信越堆積盆 (竹内, 1981) のように中新世に厚い堆積層を埋積した堆積盆地全体が一転して隆起帯に変わるという「盆地反転」にはならず、沖積平野として地層の堆積が継続している。

北陸・信越地域の現行造山運動

北陸および信越地域では地形と地質が明瞭に対応し、最近の地質時代が造山運動の時代であることを如実に示す。中・古生界と古第三系は山地を構成し、新第三系と更新統下部～中部は丘陵、更新統上部は台地、そして完新統は沖積低地を作るという具合である。地殻変動様式と地形もよく対応する。例えば、逆断層帯は、台地や丘陵と海岸平野や扇状地との境

界にあり、その活動に伴って山側の地形面や地層が傾斜している (Fig. 2)。

活断層区 (Fig. 1) と地形区についても同様に対応関係があり、石川・富山の各海岸平野と能登半島が逆断層区 (IVa) であり、美濃両白山地・飛騨高原・飛騨山脈などの中央高地は横ずれ断層区 (IVc) に属する (活断層研究会, 1991; 竹内, 1999; 2003 など)。とくにIVc 区の間山部では、天正 13 年の白川谷の地震 (M7.8) や明治 23 (1891) 年の濃尾地震 (M8.0)、など、震源地となる地震の規模が大きい。

鮮新世以降の北陸地方において、飛騨変成岩類や古第三系～下部中新統の火山岩類を広く露出させた隆起は、大きく 3 段階の地塊運動に分けられる。まず、鮮新世～更新世前期にコロサ断層 (Fig. 3 の K) や宝達山北縁断層帯 (Fig. 3 の H) などの東西性逆断層による短縮構造が完成した。この時期には、奥能登から金沢沖海底でも東西性逆断層が発達した (田中, 1979; 片川ほか, 2005; Itoh et al., 2006)。

次の更新世中頃には、医王山丘陵から両白山地に至る南北方向の隆起帯と、富山平野・高山盆地や加賀平野・大野盆地などの南北方向の沈降帯を含む東西短縮テクトニクスが起きた (藤田, 1968)。すなわち、前述した第 4 ステージの東西系から第 5 ステージ初期の南北系へと、構造方向が異なる地殻変動を経て、地域毎の相違が顕著になり、最終段階の段丘時代 (約 50 万年前以降) では、北東-南西走向の逆断層によって、断層下盤側で低地帯、富山平野や金沢平野などの沈降と、上盤側で隣接域の隆起が起こり、現在の地塊構造が発達した (藤井ほか, 1992; 紮野, 2001; 町田ほか編, 2006)。

一方、東北日本の背弧域（日本海東縁—フォッサマグナ変動帯）における短縮テクトニクスは、全域で同時に始まったのではなく、南から北へと開始年代が若くなる傾向が認められる。すなわち、同変動帯南部の信越地域は、他地域に先駆けて 600 万年前頃から南北走向の褶曲運動が始まり、400 万年前頃には現在と同じ NE-SW 走向（新潟方向）の断層・褶曲運動が重複して、両者が消長を繰返しながら活構造に引き継がれている（竹内, 1981, 2003）。日本海東縁変動帯の北半部では、現在の活断層の活動開始が 300 万年前頃までしか遡れない（栗田, 1988; 池田ほか, 2002）ことはよく知られている。

交 差 構 造

前述のように西南日本では島弧に平行な方向の長波長の隆起・沈降軸およびそれと直交する半島—山地列（隆起軸）と盆地列（沈降軸）の起伏が交差する（藤田, 1968）。富山トラフ南部を含むフォッサマグナ地域と北陸地方の地形地質構造では、より小さなスケールでの交差構造が顕著である。例えば、能登半島の概形は半島基部に見られる海岸線の南北方向と奥能登地区に顕著な東北東—西南西方向との交差構造からなる（太田・平川, 1979; 岡村, 2007）。

富山トラフは、南半部が能登半島と飛騨山脈・西頸城山地で囲まれ、深海湾の富山湾を含むトラフ底は、逆断層と背斜構造による丘陵地形やそれらを横切る海底谷で特徴づけられる（岡村, 2002）。とくに富山湾および上越沖～中越沖の海底に見られる変動地形は、隣接する陸域の海岸平野や丘陵に見られる北東—南西方向の褶曲や断層と調和的で、陸域活断層の一部は海域まで連続している（富山県, 1996）。一方、石油公団（2002）、門澤ほか（2006）、村本ほか（2007）などによれば、基礎試錐「佐渡南西沖」海域には、中新世の正断層が鮮新世に反転してできた南北走向の隆起帯が、北東—南西走向の断層関連褶曲によって両端を切られている。このように、能登半島を含む北陸地方の交差構造は、多段階で形成され、中規模の地形構造に反映している。

北部フォッサマグナ地域では、中期中新世に南北に伸びた広大なトラフ状海盆があり、難波山相と呼ばれる特異なタービダイトが堆積した（遠藤・立石, 1990）。その後は、東に隣接する新潟堆積盆と連続した堆積システムとなり、中新世末頃から新潟方向と呼ばれる北北東—南南西の走向で高い変形度もつ褶曲が進行した（植村, 1990; Takano, 2002; Takano et al., 2005）。糸魚川—静岡構造線（以下、ISTL）に代表される南北性の構造トレンドは、富山トラフの中～上部中新統の構造にも認められる。富山トラフの構造トレンドは、北西—南東と南北の 2 方向であり、新潟地方では初期リフト活動（およそ 2400 万年前から 1700 万年前頃）に、中期中新世後半以降の北東—南西方向の背弧リフトが重複した関係とみられる（Takeuchi, 2004）。

北部フォッサマグナ地域の南北性褶曲は、赤石山脈の隆起と曙礫層の堆積、伊勢湾・濃尾平野側の沈降と東濃・木曽山脈側の隆起を含む一連の地塊傾斜運動（濃尾傾動地塊：松沢, 1968）や、東海地方外帯の隆起などの現象とほぼ同時（およ

そ 600 万年前）に開始する（竹内・岡田, 1988）。しかし、東北地方の日本海側でその脊梁（火山前線）と同方向の軸をもつ褶曲構造が顕在化するのには 300 万年前であり（岡村ほか, 1998; 大竹ほか編, 2002; など）、明らかに遅延が認められる。

富山トラフから北部フォッサマグナにかけての地帯を挟んだ東西両側では、中期中新世以来、異なる方向の断層運動が隣り合ってきた（Takeuchi, 2004）。よく知られるように、西南日本では、中新世中期（約 1500 万年前）に南海トラフからフィリピン海プレート沈み込みが始まり（例えば、Seno and Maruyama, 1984; 西村・湯浅, 1991; 鹿野ほか, 1991）、ほぼ同時にその日本海側にある堆積盆で東西性の断層や褶曲が開始した（前述）。この時期は、信越堆積盆においても、東西走向の緩い褶曲が生じた（「別所フェーズの褶曲」：本間, 1931）。

中新世後期以降も、島弧ごとに異なる方向の断層系が、フォッサマグナと富山トラフに沿って隣接して形成された。鮮新世（400 万年前頃）になると、西南日本側では東西方向の構造が発達（再活動）したのに対して、日本海東縁部～信越堆積盆で新潟方向（北東—南西走向）での断層・褶曲運動が始まった（Niitsuma et al., 2003）。Fig. 4 に、北陸～信越～富山トラフ～佐渡海嶺の活断層分布を示す。活断層の卓越走向は北東—南西方向で、中期中新世の島弧内リフト以降の構造が再活動したことが示唆される。なお、ISTL 北部の活断層や高田盆地西縁断層など、南北走向の断層も依然活動的である。

地殻内地震の震源断層の形状

中越地震、能登半島地震、中越沖地震は新生代堆積盆の基盤である地殻上部（深さ 10～15 km）で発生し、震源断層はいずれも北東—南西走向の逆断層であり、本震の断層面とこれに共役な断層面上で余震が発生している（平松, 2007; Kato et al., 2008）。能登半島地震の震源断層は、深部で高角な断層で右横ずれセンスの変位成分を伴う逆断層である（平田ほか, 2007; 雨貝ほか, 2007）。Fig. 5 はこの震源断層の模式図であり、能登半島と周辺海域に分布する断層は、日本海の形成時に伸張応力場で形成された正断層が、現在の東西圧縮のもとで運動センスが反転し、逆断層として再活動していると考えられた（平田ほか, 2007）。しかし、能登半島北部の前期中新世堆積盆と南側（能登半島中部）の基盤山地との境界断層 Fb は、今回の地震では活動していない。実際は、まず境界断層 Fb の下盤側で初期破壊（高角な横すべり）が起き、引き続いて境界断層 Fb の上盤において Fb と共役的な断層 F14 が右横ずれセンスの斜めすべりを生じた（平田ほか, 2007）。これは地震発生を地質構造が規制していること、すなわち、断層・褶曲帯の深部地質構造（高角な断層破碎帯あるいは塑性変形帯）の再活動を示唆する。本州の現生応力場における圧縮主応力軸の平均方位は東西ないし北西—南東方向であり（例えば、岡田・安藤, 1979; 活断層研究会, 1980; 塚原・池田, 1991）、能登半島地震震源域とその周辺における断層・褶曲帯の卓越走向とは有意に斜交することから、この

Fig. 4. Map showing the distribution of active faults in the northern Chubu region (i.e., north-central Japan), including the Hokuriku, Shin'etsu, Toyama Trough, and Sado Ridge districts. Active faults are after Research Group for Active Faults (1991) and Nakata and Imaizumi (2002). Thick solid lines: thrusts (black) and strike-slip faults (gray). Shading indicates fault provinces, including the Japan-Sea-side thrust fault province (horizontal stripes), the strike-slip-bearing thrust fault province (dots), and the Miocene Rift zone in the Northern Fossa Magna and Toyama Trough region (vertical stripes). Contour interval is 500 m. Stars indicate the epicenters of four recent earthquakes with magnitudes greater than 6.8 (Richter scale). (北陸～信越～富山トラフ～佐渡海嶺の活断層分布. 太実線: 活断層 (黒線: 逆断層, 灰線: 横ずれ断層). 横縞: 日本海側逆断層区, 斜め縞: 横ずれ成分を伴う逆断層区. 砂目: 北フォッサ～富山トラフの中新世リフト帯. 活断層分布は活断層研究会(1991), 中田・今泉 (2002) による. 等高線・等深線は 500 m 間隔. 星印は近年発生したマグニチュード 6.8 以上の地震の震央.)

再活動が単純な反転テクトニクスで説明できるとは考えられない. また, 深部で高角となる断層にリトリック断層モデルを当てはめることには無理がある.

既述のとおり, 東北日本側の信越地方と西南日本側の北陸地方とでは, 地質構造やその発達史に大きな差異があり, 更新世中期以降, 西南日本に広がった横ずれの活断層区は, 高角～鉛直な断層からなり, 東北日本には見られない. このことは, 日本海を含む島弧規模の地殻運動様式に変化があったことを示唆し, とくにタイミングの観点からは, フィリピン海プレートの浮揚性沈み込み (とくに伊豆衝突, 80 万年前頃) と日本海東縁がプレート境界になる過程 (50 万年前以降) のオンセットがこの変化に起因する可能性が考えられる (竹内, 1991, 1999; Takeuchi, 2004).

議 論

1. 地殻内地震発生場の地質構造

東北日本側では, 日本海を形成したリフト活動に続く中新世の伸張テクトニクスと, 鮮新世中頃から顕著になりだす短縮テクトニクスとの間には, 500 万年間以上の時間間隙があった. 地震発生メカニズムを考えると, 断層のすべり面

Fig. 5. Model of the source fault for the 2007 Noto Peninsula Earthquake. Note the relationship between the initial rupture and subsequent oblique slip on the high-angle slip plane of the strike-slip fault. Modified from Hirata et al. (2007). (能登半島地震の震源断層モデル. 高角横ずれ断層による初期破壊と引き続く斜めすべりの位置関係を表現した. 平田ほか (2007) を加筆修正.)

が固着するのに十分な長さである. 一方, 北陸から富山トラフにかけての西南日本側では, 約 1500 万年前頃の西南日本の回転・屈曲を契機にそれまでの伸長テクトニクスが終息したこと, その頃から 500 万年前頃まで南北圧縮の場が継続したこと, その後, 100 万年前頃までには東西圧縮の場へ転換し, さらにごく最近 (50 万年前頃) には北西～南東圧縮のオンセットがあった, というように, 地殻変動ステージを区切る広域応力場の変遷が少なくとも 4 回あった (例えば, 竹内, 2004; Takeuchi, 2004). このような転換やそれに伴う構造方向の変化と交差構造の発達, 日本海拡大時のリトリックな正断層が最近になって逆断層に反転したという単純な地史モデルでは議論の対象外である. この論点は中部地方日本海沿岸域の震源断層や歪集中帯についての構造地質学的な考察において重要である.

近年の能登半島地震や中越地震・中越沖地震の本震や最大余震は, 10 km 前後の深さで発生している. 北陸の新生代堆積盆は 3 km 程度の堆積層を有しているため, 震源断層は堆積層の基底より有意に深い基盤岩中にある. これらの地震では, いずれも, 明瞭な地表地震断層は出現しなかったが, それぞれが地質構造や地形を発達させてきた断層運動の 1 コマと見ることができる. そこで, 震源断層と震源域の地形の対応関係に注目すると, 震源断層の上盤側陸域は丘陵・山地などの隆起域があり, 下盤側には平地や海岸平野などをつくった沈降域が隣接することが多い. 例えば, 中越地震では, 震源断層は逆断層の共役セットであるが, 上盤は共通の東山丘陵であり, 下盤側に長岡平野と小出一六日町盆地がある. これら東山丘陵や六日町盆地はともに, 日本海拡大時の堆積盆側 (新発田～小出線以西) に位置する. このような隆起域や沈降域は日本海拡大時 (島弧内リフト) 以降に形成されていた堆積盆の範囲, すなわち当時の引張テクトニクス場にあ

り、現在の逆断層運動は反転テクトニクスの結果である。ただし、本稿では、堆積盆を縁取る境界断層が反転したものかどうかという点に注目する。

具体例として北陸の海岸平野にある活断層を取り上げて地殻内地震発生場を考えてみよう。金沢平野と富山平野およびその縁辺には、逆断層型の森本—富樫断層帯、砺波平野断層帯、魚津断層帯などがある（例えば、竹村・藤井, 1984; 松浦ほか 2006; 地震調査研究推進本部, 2008^{脚注1}）。すでに述べた堆積盆の発達史と応力場の転換を考慮すると、これらの逆断層の由来については、同じ断層群による反転テクトニクス（正断層から逆断層に変位センスを反転）が想定できる。しかし、断層帯両側の層序や層厚の関係は、神城断層、長野盆地西縁断層など東北日本側の堆積盆の境界断層とは異なり、約 1600 万年前頃（前期中新世末）までの火山地域で相対的隆起側であった場所は、その後も沈降地域になることはなく、鮮新世中頃以降の応力場では、隆起域側に傾斜した逆断層群が再活動または新たに形成された。とくに魚津断層帯は、堆積盆の境界断層である黒菱山断層とは 10 km 近く離れて盆地内に位置し（Fig. 3）、山地側に傾斜する逆断層であることから（松浦ほか, 2006）、中新世堆積盆の境界断層が反転活動したものではないことが明らかである。この観点からすると、北陸地方の逆断層型断層帯は、新潟地方の中新世堆積盆周縁で発生した 2004 年の中越地震や 2007 年の中越沖地震の震源断層とは、成因や活動性が異なる可能性がある。

なお、有意な横ずれ成分を伴う逆断層で発生した 2007 年能登半島地震は、震源域が中期中新世以降の南北圧縮応力場で反転テクトニクスが行われた場所であることから、そうした既存断層のひとつが変位方向を変えて再活動したと見ることができる。

北陸・信越地域の地殻内地震については、中新世堆積盆の縁辺で、下部地殻に生じた歪集中が上部地殻（地震発生層）の逆断層運動を駆動する仕組みがあると考えられる（Takeuchi, 2004）。そのような深部構造については、近年、地震波トモグラフィにより議論されるようになり、その付近の上部地殻で地震の P 波速度が小さく、また下部地殻の P 波・S 波速度比も小さくなっていること（Nakajima and Hasegawa, 2007; Kato et al., 2009）からリフト形成時の断裂帯深部や地殻内流体との関係が注目されている。また、地震発生帯での共役断層セットの活動を再現できるシミュレーションも行われている（例えば、Shibasaki et al., 2008）。しかし、直接的に地質構造との対応が考えられる分解能は残念ながらまだない。

2. 糸魚川—静岡構造線（ISTL）と新潟—神戸構造帯（NKTZ）の交差

信越地域の ISTL は新第三系（信越堆積盆）とその基盤との境界断層とされ、とくに ISTL 中部は本邦第一級の活断層とされている（活断層研究会, 1991; 地震調査研究推進本部,

2008^{脚注1}）。一方、富山トラフへの ISTL の北方延長については、海域の反射法地震探査断面（石田, 1991; 石油公団, 2002; 門澤ほか, 2006; など）によれば、断層関係というよりもむしろアバット関係に近い不整合面である。ISTL 中部については、地質境界の深部延長を活動的な地震性断層と考えるならば、その地下形状を地震活動で検討できる。1985 年 1 月から 2007 年 12 月までの地震気象庁一元化震源の分布をみると、ISTL に沿って地殻微小地震が帯状に配列している（Fig. 6）。とくに、ISTL 中南部の西側（Ak: 赤石山地）では幅広い帯状分布を示し、低角逆断層の存在が示唆される。一方、ISTL 中北部の東側（Ck: 筑摩山地）では、南北の狭い線状配列が見られる。この微小地震帯は地震発生帯（上部地殻）における高角断層の存在を示唆しており、これこそが、中新世信越堆積盆の形成と沈降を担った基盤構造（正断層群）ではないだろうか。このほか Fig. 6 では、1984 年の長野県西部地震（Ng）、2004 年の中越地震（Ch）などの余震や 1965～1967 年の松代群発地震（Mt）による塊状分布のほか、飛騨山脈（Nk）や跡津川断層沿いの線状配列（At）が見られる。

現在、中部日本の日本海側は北西—南東方向に主圧力軸をもつ均一な広域テクトニック応力場にある（塚原・小林, 1991; 塚原, 2002）。応力場の広域的均一性に対して、変形場では信濃川地震帯や新潟—神戸構造帯（Sagiya et al, 2000）など歪集中帯や不均質構造が知られている。

中部日本でもとりわけ微小地震活動が活発な飛騨山脈は、西南日本の東端部に位置し、断層・褶曲などの構造運動が活発な北部フォッサマグナ地域に隣接する。飛騨山脈の西側に広がる飛騨高原では、跡津川断層系や庄川断層帯など日本第一級の横ずれ断層が分布し、安政の飛越地震や天正の白川地震など、マグニチュード 7.5 前後の歴史地震も知られている。一方、東側では 2004 年の中越地震や 1847 年の善光寺地震に象徴される信濃川地震帯があり、逆断層地帯であることが知られている。このように、均一な応力場と同じ歪集中帯にあるとされながら、飛騨山脈と ISTL を境に様相は異なる。

では、両者の境界に位置する飛騨山脈では、どのような地殻運動が起きているか。例えば、国土地理院による 100 年間の水準測量データでは、本州の新潟—神戸構造帯とその周辺が沈降傾向にある（国見ほか, 2001）。一方、GPS 測地観測によると、少なくとも 1998 年以降、飛騨山脈は隆起傾向にあることも明らかになってきた（道家ほか, 2008）。このことは、地形形成に直接かわる上部地殻の地質構造（主に南北トレンド）とより深部まで達する北東—南西方向の不均質構造が斜交していることを示している。

一般に、現在の平均的地殻応力場は、地震の発震機構解析や活断層分布、火山体の側火口配列（岩脈群）などから推定される（塚原・池田, 1991; 竹内, 1999; など）。飛騨山脈は地震活動も活発で、活断層や火山などの活構造が分布し、これらのデータから応力場の推定が可能である。活断層分布からみれば、飛騨山脈以西の中部地方は、境峠断層・阿寺断層・御母衣断層・根尾谷断層・跡津川断層など、大規模な横ずれ断層が分布する。また、境峠・神谷断層帯（左横ずれ）が焼

^{脚注1} 地震調査研究推進本部（The Headquarters for Earthquake Research Promotion）、2008、活断層の長期評価 [Long-term Evaluation of Active Faults]、地震に関する評価。http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_danso.htm

Fig. 6. Map of seismic activity in the northern Chubu region, central Japan. Epicenter data are from the Japan Meteorological Agency unitary hypocenter data (95,277 earthquakes from January 1996 to December 2007; Central Disaster Prevention Council, 2008). The data shown are shallow events (<50 km in depth and magnitude > 1 on the Richter scale). The distribution of active faults (solid lines) is after Research Group for Active Faults (1991). Areas of higher activity are labeled as follows: aftershock areas of the 1948 Fukui Earthquake (Fk), 2007 Noto Peninsula Earthquake (Nt), 1993 off Noto Peninsula Earthquake (oS), 2007 Niigata Prefecture Chu'etsu-oki Earthquake (oC), 2004 Niigata Prefecture Chu'etsu Earthquake (Ch), 1984 Western Nagano Prefecture Earthquake (Ng), and 1858 Hietsu Earthquake along the Atotsu-gawa Fault system (At). Also shown are the Norikura volcanic line (Nk), Chikuma Mountains (Ck), Hakuba Basin (Hk), and Matsushiro Earthquake swarm (Mt). (中部地方北部の地震活動。気象庁一元震源データ (1996 年 1 月から 2007 年 12 月までの 95,277 個の地震) のプロット [M1 以上, 深度 50 km 以浅; 中央防災会議 (2008) による]。活断層 (実線) 分布は, 活断層研究会 (1991) による。地震密集部をラベルで示した。Fk: 1949 年福井地震余震域, Nt: 2007 年能登半島地震余震域, oS: 1993 年能登半島沖地震余震域, oC: 2007 年中越沖地震余震域, Ch: 2004 年中越地震余震域, Ng: 1984 年長野県西部地震余震域, At: 跡津川断層系に沿う飛越地震余震域, Nk: 乗鞍火山列, Ck: 筑摩山地, Hk: 白馬盆地, Mt: 松代群発地震。)

岳付近を通過すること, 跡津川断層・牛首断層の東方延長の雪倉断層・早乙女岳断層や霧訪山・奈良井断層帯 (右横ずれ) が ISTL と近接することなどは, 横ずれ断層が飛驒山脈を横断していることを示す。これらの横ずれ断層を代表する跡津川断層では, 地表トレース沿いに地震活動が活発で, 微小地震の震源分布から, ほぼ鉛直な断層面が地下 10 ~ 13 km まで明瞭に確認できる (和田ほか, 2002; 2007)。

現在の活断層区 IVc における横ずれ断層型の応力場は, 少なくとも, 日本の活断層のなかでも活動開始年代が若いとされる跡津川断層系の活動が開始した時代 (70 万年前頃: 東郷・岡田, 1983) までは遡る。和田ほか (2007) によれば, 飛驒山脈で発生する地震の発震機構は横ずれ断層型が卓越し, わずかに正断層型が含まれるが低角逆断層型は認められない。発震機構から求められる主圧力軸は北西-南東方向であり, 立山火山にある爆裂火口群の定向配列や弥陀ヶ原断層

の変位センスなどもこれに調和的である。なお, 原山 (2006) は, 飛驒山脈の構造発達について更新統火山岩類をまき込む激しい傾動ないし転倒を伴う逆断層運動があったとしているが, 少なくとも現在の応力場では説明できない。

前述のように, 更新世中頃以降の飛驒山脈は全般的に横ずれ断層が卓越する応力場にあり, 表層の重力性構造や胴切性の正断層地震は認められるものの, 南北走向の逆断層が活動している兆候はない。飛驒山脈の北部では, 70 万年前頃より前に東西圧縮による南北走向 (北北東-南南西を含む) の逆断層や撓曲ないし褶曲が形成された。その後この運動は沈静化し, 現在の飛驒山脈北端部および北方隣接海域では, 北東-南西走向の逆断層および断層関連褶曲が顕著である。

鮮新世以降の各時代に活動していた断層の分布パターンを見ると, 幅 50 km 程度の帯状活動域があり, これが時代毎に遷移した (竹内, 1999; Takeuchi, 2004; など)。国土地理院

の GPS 観測網から検出された新潟—神戸構造帯 (Sagiya et al., 2000) での歪集中は、その現代版と言える。

ま と め

1. 近年大きな進展がみられた北陸の年代層序を踏まえ、北信越の地形・地質構造とその発達史を概括した。
2. 中新世以降の北信越では、南北、東西、北東—南西の 3 方向の交差構造が見られること、断層や褶曲の重複構造が現在の地形を形成したこと、などを指摘した。
3. 北陸の逆断層区では、中新世堆積盆を形成した断層による反転構造は見られないことを指摘した。一方、北部フォッサの逆断層区では長野盆地西縁断層や ISTL 中北部など、典型的な盆地反転構造が見られる。
4. 中規模地殻内地震は、中新世堆積盆海岸由来の海岸平野を取巻く丘陵・山地のうち、北東—南西走向の地形発達を助長するセンスの逆断層運動によって発生している。
5. 北信越で発生する地殻内地震の発生メカニズムを解明する目的で、この地域の地質構造および変動地形の発達過程を考察し、中部日本の地質構造を斜断する歪集中帯について地質学的時空スケールでの変遷を議論した。

謝 辞

日本列島周辺域の応力場・歪場に関する総合集中観測や討論をしていただいた京都大学飯尾能久教授、名古屋大学鷺谷威教授、東京大学岩崎貴哉教授、建築研究所芝崎文一郎博士に深謝する。また、数次にわたり懇切に査読していただいた産業技術総合研究所岡本行信博士、福井大学山本博文教授、ならびに匿名の査読者各位に対して心から感謝する。本研究では科研費補助金「日本海東縁変動帯と本州中部・富山トラフの交差構造と重複テクトニクス」の一部を使用した。

文 献

- 雨貝知美・和田弘人・藤原みどり・鈴木 敬・飛田幹男・矢来博司 (Amagai, T., Wada, H., Fujiwara, M., Suzuki, T., Tobita, M. and Karai, H.), 2007, 合成開口レーダーを用いた平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震に伴う地殻・地盤変動の検出. 国土地理院時報 (*Jour. GSI.*), **113**, 3-11.
- 栗田泰夫 (Awata, Y.), 1988, 東北日本弧内帯の短縮変動と太平洋プレート運動. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **10**, 586-591.
- 中央防災会議 (Central Disaster Prevention Council), 2008, 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 (1858 飛越地震). [*Special investigation committee report concerning succession of disaster lesson (the 1858 Hi'etsu Earthquake)*]*. 203p. <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/kyoukun/rep/1858-hietsuJISHIN/index.html>
- 道家涼介・竹内 章・安江健一・畠本和也・松浦友紀 (Doke, R., Takeuchi A., Yasue, K., Hatamoto, K. and Matsu'ura, Y.), 2008, GPS 観測データから見た北アルプス立山における最近の地殻変動. 東大震研集報 (*Bull. Earthq. Res. Inst.*), **83**, 193-201.
- 遠藤正孝・立石雅昭 (Endo, M. and Tateishi, M.), 1990, 北部フォッサマグナ, 中新世の難波山海底扇状地の復元. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **96**, 193-209.
- 藤井昭二・粕野義夫・中川登美雄 (Fujii, S., Kaseno, Y. and Nakagawa, T.), 1992, 北陸地域における新第三系の層序対比と新第三紀古地理. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 37, 85-95.
- 古瀬慶博・河野芳輝 (Furuse Y. and Kono, Y.), 1990, 水平方向の密度変化を考慮した重力インバース法による 3 次元地下構造解析—北陸地方への適用. 地震第 2 輯 (*Jour. Seismol. Soc. Japan, Ser. 2*), **43**, 1-11.

- 原山 智 (Harayama, S.), 2006, 槍—穂高火山: 傾動した第四紀初頭のカルデラ火山, 日本地質学会編, 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology of Japan Vol.4, Chubu District*]*, 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 328-329.
- 平田 直・佐藤比呂志・能登半島地震合同余震観測グループ (Hirata, N., Sato, H. and Collab. Obs. Group for Noto Peninsula Earthq.), 2007, 2007 年能登半島地震の意味. 科学 (*Kagaku*), **77**, 562-566.
- 平松良浩 (Hiramatsu, Y.), 2007, 平成 19 年能登半島地震: 地震活動とメカニズム. 地球科学 (*Earth Sci (Chikyu Kagaku)*), **61**, 243-254.
- 北陸の自然をたずねて編集委員会編著 (Ed. Commit. Visitting the Nature in Hokuriku, ed.), 2001, 北陸の自然をたずねて. 新訂版日曜の地学 6 [*Visitting the Nature in Hokuriku, Japan, New ed. Sunday Geology Ser. 6*]*, 築地書館 (Tsukiji Shokan)*, 242p.
- 本間不二男 (Honma, F.), 1931, 信濃中部地質誌 [*Geology of central Shinano*]*. 古今書院 (Kokon Shoin), 616p.
- 藤田和夫 (Huzita, K.), 1968, 六甲変動, その発生前後—西南日本の交差構造と第四紀地殻変動—. 第四紀研究 (*Quatern. Res.*), **7**, 248-260.
- 池田安隆 (Ikeda, Y.), 1990, 断層による山脈の隆起. 米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄編, 変動地形とテクトニクス [*Tectonic Geomorphology*]*, 古今書院 (Kokon Shoin). 45-59.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編 (Ikeda, Y., Imaizumi, T., Togo, M., Hirakawa, K., Miyauchi, T. and Sato, H., eds.), 2002, 第四紀逆断層アトラス [*Atlas of Quaternary Thrust Faults in Japan*]*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press.), 254p.
- Kaizuka, S. and Imaizumi, T., 1984, Horizontal strain rates of the Japanese Islands estimated from Quaternary fault data. *Geogr. Rep. Tokyo Metrop. Univ.*, **19**, 43-65.
- 石田 聖 (Ishida, H.), 1991, 富山湾—新潟頸城沖の地質構造—特に“糸魚川—静岡構造線”の北方延長について—. 日本地質学会第 98 年学術大会講演要旨 (*Abstr. 98th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan*), 309.
- 石渡 明 (Ishiwatari, A.), 2006, 能登の漸新世～中新世火山岩類: 陸弧の多様な溶岩・火砕岩. 日本地質学会編, 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology of Japan Vol.4, Chubu District*]*, 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 336-337.
- 伊藤康人 (Itoh, Y.), 1985, 富山県泊地域の新第三系の層序と年代. 大阪微化石研究会機関誌 (*News of Osaka Micropaleontologist*), **13**, 1-12.
- 伊藤康人・渡辺真人 (Itoh, Y. and Watanabe, M.), 1988, 古地磁気から推定した富山県東端部泊地域の回転運動. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **94**, 457-460.
- Itoh, Y., Uno, K. and Arato, H., 2006, Seismic evidence of divergent rifting and subsequent deformation in the southern Japan Sea, and a Cenozoic tectonic synthesis of the eastern Eurasian margin. *Jour. Asian Earth Sci.*, **27**, 933-942.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and the volcanic activity of the Northeast Japan arc. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **127/128**, Part 2, 1311-1331.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 22237-22259.
- 貝塚爽平編 (Kaizuka, S., ed.), 1997, 世界の地形 [*Geomorphology of the World*]*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 364p.
- 鹿野和彦・加藤碩一・柳沢幸夫・吉田史郎編 (Kano, K., Kato, K., Yanagisawa, Y. and Yoshida, S., eds.), 1991, 日本の新生界層序と地史. 地調報告 (*Rep., Geol. Surv. Japan*), no.274, 114p.
- 鹿野和彦・山内靖喜・三宅康幸 (Kano, K., Yamauchi, Y. and Miyake, Y.), 2000, 島根半島の中新世火砕岩. 日本地質学会第 107 年学術大会見学旅行案内書 (*Guidebook for Excursion of 107th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan*), 23-34.
- 鹿野和彦・吉田史郎 (Kano, K. and Yoshida, S.), 1985, 境港地域の地質. 地域地質研究報告 (*Geology of the Sakaiminato Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 57p.
- 粕野義夫 (Kaseno, Y.), 1993, 石川県地質誌—新版・石川県地質図 (縮尺 10 万分の 1) および説明書— [*Geology of Ishikawa Prefecture—New edition: Geological Map of Ishikawa Prefecture and Its explanation*]*. 石川県・北陸地質研究所 (Ishikawa Pref. and Hokuriku Geol. Inst.), 321p.
- 粕野義夫 (Kaseno, Y.), 2001, 石川県地質誌・補遺 [*Geology of Ishikawa Prefecture: Supplement*]*. 北陸地質研究所 (Hokuriku Geol. Inst.),

- 194p.
- 片川秀基・浜田昌明・吉田 進・廉澤 宏・三橋 明・河野芳輝・衣笠善博 (Katagawa, H., Hamada, M., Yoshida, S., Yasuzawa, H., Mihashi, A., Kono, Y. and Kinugasa, Y.), 2005, 能登半島西方海域の第三紀～第四紀地質構造形成. 地学雑 (*Jour. Geogr.*), **114**, 791-810.
- Kato, A., Kurashimo, E., Igarashi, T., Sakai, S., Iidaka, T., Shinohara, M., Kanazawa, T., Yamada, T., Hirata, N. and Iwasaki, N., 2009, Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05301, doi: 10.1029/2008GL036450.
- Kato, A., Sakai, S., Kurashimo, E., Igarashi, T., Iidaka, T., Hirata, N., Iwasaki, T., Kanazawa, T. and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake, 2008, Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, **60**, 1111-1116.
- 活断層研究会編 (The Research Group for Active Faults, ed.), 1980, 日本の活断層一分布図と資料 [Active Faults in Japan-distribution map and the related materials]*. 東京大学出版会, 363p.
- 活断層研究会編 (The Research Group for Active Faults, ed.), 1991, 新編日本の活断層一分布図と資料—[Active Faults in Japan, New Edition-distribution map and the related materials]. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 448p.
- 小林博文・山路 敦・増田富士雄 (Kobayashi, H., Yamaji, A. and Masuda, F.), 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. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **111**, 286-299.
- 国土地理院 (Geographical Survey Institute), 1999, 日本の典型地形—都道府県別一覧. 地理院技術資料 (*Tec. Note, Geogr. Surv. Inst. Japan*), D・1-No.357, 316p.
- 国見利夫・高野良仁・鈴木 実・斎藤 正・成田次範・岡村盛司 (Kunimi, T., Takano, Y., Suzuki, M., Saito, T., Narita, T. and Okamura, S.), 2001, 水準測量データから求めた日本列島 100 年間の地殻上下変動. 国土地理院時報 (*Jour. GSI.*), **96**, 23-37.
- 町田 洋・松田時彦・梅津正倫・小泉武栄編 (Machida, H., Matsuda, T., Umezumi, M. and Koizumi, T., eds), 2006, 日本の地形, 5, 中部 [*Geomorphology of Japan, 5, Chubu*]*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 392p.
- 松田時彦・町田 洋 (Matsuda, T. and Machida, H.), 2006, 9 中部の地形発達史. 日本の地形, 5, 中部 [*Geomorphology of Japan, 5, Chubu*]*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 323-339.
- 松浦旅人・吉岡敏和・宮脇理一郎・横田 裕・古澤 明 (Matsuura, T., Yoshioka, T., Miyawaki, R., Yokota, Y. and Furusawa, A.), 2006, 魚津断層帯の第四紀断層運動と地下地質. 活断層研究 (*Active Fault Res.*), **26**, 137-150.
- 松沢 勲 (Matsuzawa, I.), 1968, 本州中部における傾動運動について: 特に濃尾傾動地塊の構造発展. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **74**, 61-71.
- 門澤伸昭・金子光好・大澤正博 (Monzawa, N., Kaneko, M. and Osawa, M.), 2006, 基礎試錐「佐渡南西沖」の掘削結果に基づいた佐渡～富山湾海域における石油システムの考察. 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*), **71**, 618-627.
- 村本宏司・大沢正博・木田昌宏・有坂春彦 (Muramoto, K., Osawa, M., Kida, M. and Arisaka, H.), 2007, 佐渡南西沖の日本海大水深域における石油システムについて—基礎物理探査「佐渡南西」と基礎試錐「佐渡南西沖」の結果を踏まえて—. 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*), **72**, 76-88.
- Nagahashi, Y. and Satoguchi, Y., 2007, Stratigraphy of the Pliocene to Lower Pleistocene marine formations in Japan on the basis of tephra beds correlation. *Quatern. Res.*, **46**, 205-213.
- 中田 高・今泉俊文 (Nakata, T. and Imaizumi, T.), 2002, 活断層詳細デジタルマップ [*Digital Active Fault map of Japan*]. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 68p.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2007, Deep crustal structure along the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan: Its origin and segmentation. *Earth Planets Space*, **59**, e5-e8.
- Niitsuma, S., Niitsuma, N. and Saito, K., 2003, Evolution of the Komiji Syncline in the North Fossa Magna, central Japan: Paleomagnetic and K-Ar age insights. *Island Arc*, **12**, 310-323.
- 新妻信明 (Niitsuma, N.), 2006, 16.5 遅沢砂岩の貝化石と曙礫岩. 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology in Japan, Vol. 4 Chubu Region*]*, 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 384-387.
- 日本地質学会編 (Geological Society of Japan), 2006, 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology in Japan, Vol. 4 Chubu Region*]*. 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 588p.
- 西村 昭・湯浅真人 (Nishimura, A. and Yuasa, M.), 1991, 伊豆・小笠原弧のスミスリフト—海洋性島弧における背弧リフトの形成の一例—. 地球科学 (*Earth Sci (Chikyu Kagaku)*), **45**, 333-344.
- 野村律夫 (Nomura, R.), 1986, 島根半島中央部中新統の地質—その 1 層序について—. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **92**, 405-420.
- 大塚彌之助 (Otuka, Y.), 1942, 活動してゐる皺曲構造. 地震 (*Jour. Seismol. Soc. Japan (Zishin)*), **14**, 14-31.
- 岡田篤正・安藤雅孝 (Okada, A. and Ando, M.), 1979, 日本の活断層と地震. 科学 (*Kagaku*), **49**, 158-169.
- 岡村行信 (Okamura, Y.), 2002, 能登半島東方海底地質図. 海洋地質図 (*Marine Geol. Map Ser.*), no. 59 (CD), 産業技術総合研究所地質調査総合センター (Geol. Survey of Japan, AIST.).
- 岡村行信 (Okamura, Y.), 2007, 能登半島及びその周辺海域の地質構造発達史と活構造. 活断層・古地震研究報告 (*Ann. Rep. Active Fault Paleoeearthquake. Res.*), no. 7, 産総研地質調査総合センター (Geol. Survey of Japan, AIST.), 197-207.
- 岡村行信・倉本真一・佐藤幹夫 (Okamura, Y., Kuramoto, S., and Sato, M.), 1998, 日本海東縁海域の活構造およびその地震との関係. 地調月報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **49**, 1-18.
- 太田陽子・平川一臣 (Ota, Y. and Hirakawa, K.), 1979, 能登半島の海成段丘とその変形. 地理評 (*Geogr. Rev. Japan*), **52**, 169-189.
- 大竹政和・平 朝彦・太田陽子編 (Otake, M., Taira, A. and Ota, Y., eds), 2002, 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス [Active Faults and Seismotectonics along the Eastern Margin of Japan Sea]*. 東大出版会 (Univ. Tokyo Press), 201p.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T., 2000, Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan. *PAGEOPH*, **157**, 2303-2322.
- 坂本 亨 (Sakamoto, T.), 1966, 富山積成盆地南半部の新生界とその構造発達史. 地調報告 (*Rep. Geol. Surv. Japan*), no. 213, 1-28.
- 石油公団 (Japan National Oil Corporation), 2002, 平成 13 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「佐渡南西沖」解釈作業報告書 [2001 Fiscal Year Report of Interpretation Work on the Basic Physical Exploration for Domestic Oil and Natural Gasses at "Southwest off Sado"]*. 48p.
- 先名重樹・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 譲・森川信之・本多 亮・小林京子・大井昌弘・八十島裕・神野達夫・奥村直子 (Senna, S., Fujiwara, H., Kawai, S., Aoi, S., Kunugi, T., Ishii, T., Hayakawa, Y., Morikawa, N., Honda, R., Kobayashi, K., Oi, M., Yasojima, Y., Jinno, T. and Okumura, N.), 2004, 森本・富樫断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討. 防災科技研究資料 (*Tech. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disaster Prev.*), no. 255 (CD-ROM).
- 先名重樹・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 譲・森川信之・本多 亮・小林京子・大井昌弘・八十島裕・奥村直子 (Senna, S., Fujiwara, H., Kawai, S., Aoi, S., Kunugi, T., Ishii, T., Hayakawa, Y., Morikawa, N., Honda, R., Kobayashi, K., Oi, M., Yasojima, Y., Jinno, T., and Okumura, N.), 2005a, 砺波平野断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討. 防災科技研究資料 (*Tech. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disaster Prev.*), no. 263 (CD-ROM).
- 先名重樹・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 譲・森川信之・小林京子・大井昌弘・奥村直子 (Senna, S., Fujiwara, H., Kawai, S., Aoi, S., Kunugi, T., Ishii, T., Hayakawa, Y., Morikawa, N., Kobayashi, K., Oi, M. and Okumura, N.), 2005b, 高山・大原断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討. 防災科技研究資料 (*Tech. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disaster Prev.*), no. 282 (CD-ROM).
- Seno, T. and Maruyama, S., 1984, Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea. *Tectonophysics*, **102**, 53-84.
- Shibazaki, B., Garatani, K., Iwasaki, T., Tanaka, A. and Iio, Y., 2008, Faulting processes controlled by the nonlinear flow in the deeper crust and upper mantle beneath the northeastern Japanese island arc. *Jour. Geophys. Res.*, **113**, B08415, doi: 10.1029/2007JB005361.

- 志岐常正・立石雅昭 (Shiki, T. and Tateishi, M.), 1991, フォッサマグナオラーコジン説について. 上田誠也教授退官記念論文集—活動的縁辺域—. 月刊地球号外 (*Chikyu Monthly, Extra ed.*), no. 3, 106-112.
- 多井義郎 (Tai, Y.), 1973, いわゆる糸道褶曲帯について. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 9, 137-146.
- Takano, O., 2002, Changes in depositional systems and sequences in response to basin evolution in a rifted and inverted basin: an example from the Neogene Niigata-Shin'etsu basin, Northern Fossa Magna, central Japan. *Sediment. Geol.*, **152**, 79-97.
- Takano, O., Tateishi, M. and Endo, M., 2005, Tectonic controls of a backarc trough-fill turbidite system: The Pliocene Tamugigawa Formation in the Niigata-Shin'etsu inverted rift basin, Northern Fossa Magna, central Japan. *Sediment. Geol.*, **176**, 247-279.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 1981, 広域応力場の変遷と堆積盆のテクトニクス. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **87**, 737-751.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 1991, 中央日本のネオテクトニクスと伊豆小笠原弧. 地学雑 (*Jour. Geogr.*), **100**, 540-551.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 1995, 背弧盆形成のテクトニクス—北部フォッサマグナ (信越堆積盆) の起源. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **17**, 644-651.
- Takeuchi, A., 1996, Recent crustal movements and strains along the eastern margin of Japan Sea Floor. In Isezaki, N. et al., eds., *Geology and Geophysics of the Japan Sea. Japan-USSR Monograph, Ser. 1*, 385-398.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 1999, 北信越地区における鮮新世以降の応力場とテクトニクスの変遷. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **21**, 583-588.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 2003, 地震地体構造と深部プロセス. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **25**, 269-272.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 2004, 北陸地方の地質と地質構造. 基礎工 (*Basement Engin.*), **32** (10), 6-11.
- Takeuchi, A., 2004, Basement-involved tectonics in the North Fossa Magna, central Japan: The significance of the northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. *Earth Planets Space*, **56**, 1261-1269.
- 竹内 章 (Takeuchi, A.), 2008, 富山湾の地形と地質. 月刊海洋 (*Kaiyo Monthly, Extra ed.*), **47**, 22-30.
- 竹内 章・岡田篤正 (Takeuchi, A. and Okada, A.), 1988, 地殻運動. 山下昇・糸野義夫・糸魚川淳二編, 日本の地質 5 中部地方 II [*Geology of Japan Ser. 5, Chubu District II*]*, 共立出版 (Kyoritsu Shuppan), 192-194.
- 竹村利夫・藤井昭二 (Takemura, T. and Fujii, S.), 1984, 飛騨山地北縁部の活断層群. 第四紀研究 (*Quatern. Res.*), **22**, 297-312.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J. and Pisciotto, K., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling program. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **127/128**, Part 2, 1333-1348.
- 田村糸子・山崎晴雄 (Tamura, I. and Yamazaki, H.), 2004, 北陸層群のテフクロノロジー—テフラ層序および広域テフラ層との対比に基づく北陸層群の堆積年代—. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **110**, 417-436.
- 田中 隆 (Tanaka, T.), 1979, 北陸・山陰沖の堆積盆地の分布と性格. 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*), **44**, 308-320.
- 東郷正美・岡田篤正 (Togo, M. and Okada, A.), 1983, 断層変位地形からみた跡津川断層. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **5**, 359-366.
- 徳山英一・本座栄一・木村政昭・倉本真一・芦寿一郎・岡村行信・荒戸裕之・伊藤康人・徐 垣・日野亮太・野原 壮・阿部寛信・坂井真一・向山建二郎 (Tokuyama, H., Honza, E., Kimura, M., Kuramoto, S., Ashi, J., Okamura, Y., Arato, H., Ito, Y., So, W., Hino, R., Nohara, S., Abe, H., Sakai, S. and Mukaiyama, K.), 2001, 日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史 (CD-ROM 版). 海洋調査技術 (*Ocean Res. Technol.*), **13**, 別添 CD-ROM.
- 富山県 (Toyama Prefecture), 1996, 呉羽山断層に関する調査. 平成 7 年度地震調査研究交付金成果報告書 [*Products Rep. Earthq. Invest. Res. Grant in 1995 Fiscal. Year*]*, 科学技術庁 (Sci. Tech. Agency), 235p.
- 塚原弘昭 (Tsukahara, H.), 2002, 日本列島の広域起震応力区. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **25**, 302-309.
- 塚原弘昭・池田隆司 (Tsukahara, H. and Ikeda, R.), 1991, 本州中央部の地殻応力方位分布—応力区とその成因—. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **97**, 461-474.
- 塚原弘昭・小林洋二 (Tsukahara, H. and Kobayashi, Y.), 1991, 中・西部日本の地殻応力. 地震第 2 輯 (*Jour. Seismol. Soc. Japan, Ser. 2*), **44**, 221-231.
- 植村 武・山田哲雄編 (Uemura, T. and Yamada, T., eds), 1988, 日本の地質 4 中部地方 I. [*Geology of Japan Ser. 4, Chubu District I*]*, 共立出版 (Kyoritsu Shuppan), 332p.
- 植村 武 (Uemura, T.), 1990, 東北本州背弧南部における後期新生代の褶曲機構と地殻変動. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 34, 199-209.
- 和田博夫・伊藤 潔・大見士朗・平野憲雄・小泉 誠 (Wada, H., Ito, K., Omi, S., Hirano, N. and Koizumi, M.), 2002, 飛騨地域における地震活動の線状配列. 京大防災研年報 (*Ann. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.*), no. 45 B, 555-560.
- 和田博夫・伊藤 潔・大見士朗・平野憲雄 (Wada, H., Ito K., Omi, S., and Hirano, N.), 2007, 上宝観測所における跡津川断層周辺における稠密地震観測—36 年間の観測と解析結果. 京大防災研年報 (*Ann. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*)*, no. 50 B, 313-320.
- 渡辺真人 (Watanabe, M.), 2006, 藪田層・姿層境界の海緑石砂岩: 海底地形の影響を受けた生物減物質に富む堆積物の堆積と断続. 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology of Japan Ser. 4, Chubu District*]*, 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 348-349.
- 柳沢幸夫・吉川敏之 (Yanagisawa, Y. and Yoshikawa, T.), 2006, 珠洲地域の珪藻質泥岩と海緑石砂岩: 日本安定期の中新世海成堆積物. 日本地方地質誌 4 中部地方 [*Regional Geology of Japan Ser. 4, Chubu District*]*, 朝倉書店 (Asakura Pub. Co.), 346-347.

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

竹内 章, 2010, 北陸および信越地域における後期新生代の地質構造発達史. 地質雑, **116**, 624–635. (Takeuchi, A., 2010, Geologic structure and late Cenozoic evolution of the Hokuriku and Shin'etsu regions, north-central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 624–635.)

東北日本弧と西南日本弧にまたがる北陸および信越地域は、新生代末の衝上断層褶曲帯であり、中規模の地殻内地震が頻発することで特徴づけられる。最近刷新されたテフラ年代学にもとづいて、この地域の地形地質発達史を総括した。

この地域の海岸平野は前期中新世から存続してきた堆積盆地であり、南北、東西、北東-南西の3構造方向からなる交差構造が発達した。第四紀には海岸平野に接する山地・丘陵の麓にある北東-南西走向の逆断層運動が活発で、強い地殻内地震が発生する。しかし、同じ逆断層区でありながら、北部フォッサマグナ地区では典型的な反転構造が発達し、北陸の堆積盆地では、境界断層による「盆地反転」は見られないという相違がある。

このような構造発達史の比較から、地殻内地震の発生原因、ならびに中部地方の北部を縦断する歪集中帯の成因を理解する上で、100万年スケールでの応力場の逆転や移動現象が重要であることを指摘した。