北陸地方における日本海拡大期火成活動の時空変遷：漸新世～中期中新世火山岩類の層序，年代，岩石学的特徴

Temporal and spatial changes of magmatism related to the Japan Sea opening in the Hokuriku region, central Japan: stratigraphy, chronology and petrology of Oligocene to middle Miocene volcanic rocks

山田来樹* 高橋俊郎**

Raiki Yamada and Toshiro Takahashi***

2020年10月8日受付.

2021年6月6日受理.

* 新潟大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology,
Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho,
Niigata 950-2181, Japan

** 新潟大学理学部
Faculty of Science, Niigata University, 8050,
Ikarashi 2-no-cho, Niigata 950-2181, Japan

Corresponding author: R. Yamada,
yamada.raiki.geo@gmail.com

Abstract

The opening of the Japan Sea, one of the Oligocene to Miocene back-arc formations in the western Pacific, was the most significant Cenozoic event in the Japan arc. Extensive magmatism occurred during this event in the Japan Sea and the circum-Japan Sea province, including the Hokuriku region where volcanism was initiated with basalts and andesites (Konosuyama Formation) in the Noto peninsula in the early Oligocene (ca. 33 Ma?). In the Early Miocene, andesitic volcanism (Kamiwazumi and Matsunagi formations) followed the deposition of late Oligocene dacitic pyroclastic flows (Goroku Formation). Rhyolitic pyroclastic rocks including moonstone rhyolites were deposited widely as pyroclastic flows in the Hokuriku region from ca. 23–22 Ma. The moonstone rhyolites are alkalic in composition, suggesting a continental-arc rift origin. From ca. 21–17 Ma, basaltic to andesitic volcanic rocks (Iwaine and Ito-o formations and Besshodake andesites) of various geochemical compositions (tholeiitic and calc-alkalic basalts to andesites, adakite, and high-Mg andesite) were effused widely in the Hokuriku region. This basaltic to andesitic volcanism was followed from ca. 17–16 Ma by active dacitic to rhyolitic volcanism (Iozen and Fukuhira formations) with geochemical compositions indicating a continental-arc to island-arc origin. This rhyolitic volcanic episode, and minor basalts and andesites from 16 Ma, mark the end of the magmatism related to the opening of the Japan Sea, coinciding with the termination of the clockwise rotation of southwest Japan. Previous petrological and geochemical studies suggest that magmatism related to the opening of the Japan Sea in the Hokuriku region was caused by upwelling of the asthenosphere into the mantle wedge below the margin of the eastern Eurasian continent.

Keywords: Japan Sea opening, Oligocene, Miocene, volcanic rocks, stratigraphy, petrology, Hokuriku region

はじめに

日本海拡大(日本海開裂とも; Japan Sea opening; opening of the Japan Sea)は漸新世～中新世に西太平洋地域で一斉に起こった背弧拡大のひとつであり、中生代以降東アジア地域で形成されてきた日本列島の原形がユーラシア大陸縁辺から引き離されて現在の島弧系を形成するに至った重要な地質学的イベントである。日本海拡大は後期始新世の頃に始まったと考えられ(Kano et al., 2007), その後漸新世に起きた日本列島での広域不整合形成(鹿野ほか, 1991; Kano et al., 2007)を経て, 日本海は20–15 Ma頃に急速に拡大した(鹿野, 2018; 中嶋, 2018)。鹿野(2018)と中嶋(2018)は

日本列島(一部海外も含まれる)の広範囲に及ぶ始新統～第四系の層序・岩相・年代をレビューした。その中で彼らは日本列島周辺で起きた新生代イベントをいくつかのステージに区分している。それらをまとめると日本海拡大期の地質イベントは, 陸弧内リフティング期(44–28 Ma), 漸新世広域不整合形成期(28–21 Ma), リフティング再開期(21–18 Ma), リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)の4ステージに大きく分けることが出来る。陸弧内リフティング期にはリフティングがゆっくりと開始し(Kano et al., 2007), 西南日本では大規模珪長質活動(Imaoka et al., 2011)が起き, 東北日本弧においては枯渇した同位体組成をもつ玄武岩が噴出して(周藤, 2009; Shuto et al., 2015)。漸新世広域不整合

形成期に入ると、アセノスフェアの上昇によって日本列島はドーム状に隆起することで広域不整合が形成されたが(Kano et al., 2007; 鹿野, 2018), 23 Ma 頃からは日本海の東縁でリフティングが顕在化し始めた(鹿野, 2018). 21 Ma 頃(リフティング再開期)には日本海側でリフト堆積盆の形成が開始した後(中嶋, 2018), 19–17 Ma の不整合形成(Kano et al., 2007)を挟んで, 18–15.3 Ma に日本列島は回転運動を伴って(例えば, Otofujii et al., 1985; Hoshi et al., 2015; 星, 2018)大陸から大きく引き離されたと考えられる. 東北日本弧では 15.3 Ma 以降もリフティングが継続するものの(鹿野, 2018; 中嶋, 2018), 北陸地方を取り扱う本稿ではこれ以降, 44–15.3 Ma に形成された始新統～中部中新統をまとめて「日本海拡大期層」と呼ぶ.

北陸地方は現在の西南日本弧東縁に位置し, 富山県から福井県にかけて日本海拡大期に形成・堆積した漸新統(一部は始新統?)～中部中新統が広範囲に分布している(Fig. 1). 北陸地方の日本海拡大期層(特に富山県の黒瀬谷層)は貝化石や植物化石, 海棲大型動物化石, その他様々な化石を多産することで非常に有名であり(津田, 1955; 鮎野, 1964), 日本海拡大時の日本列島の古環境を知る上で欠かすことの出来ない日本海拡大期層代表地域のひとつである. また, 北陸地方は西南日本弧の東縁に位置するため, 18–16 Ma の時計回り回転時に約 600 km(星, 2018)も移動した地域にあたる. 北陸地方での日本海拡大期層の研究は化石と碎屑岩類を中心に行われ, 古地理の復元(藤井ほか, 1992a)や堆積盆形成テクトニクス(中嶋ほか, 2019)が論じられている. しかし, 北陸地方の日本海拡大期火成岩類の産状や成因については化石や碎屑岩類に関する研究の解像度と比較すると研究例が少ない. これまでの研究からは, 東北日本弧で報告されている当時のマントルウェッジが現在と比較して高温だったことを示唆するアダカイト質火山岩類(Yamamoto and Hoang, 2009; Sato et al., 2013, 2014)が北陸地方からも発見されている一方で, マントルウェッジの化学組成変化を反映する東北日本弧で認められている玄武岩～安山岩類の Sr, Nd 同位体比の時間的変化(Nohda and Wasserburg, 1986; Nohda et al., 1988; Ujike and Tsuchiya, 1993; Hanyu et al., 2006; 周藤, 2009; Shuto et al., 2015)が北陸地方でも認められるかは不明である. また, 前期～中期中新世には北陸地方が当時の火山フロントに位置していたという指摘(高橋・周藤, 1999; 高橋, 2006)がある一方で, さらに前弧側にも同時期の火山岩類(岐阜県の可児層群蜂屋層; 糸魚川, 1980; 野村, 1992)が分布するという矛盾もある. さらに, 西南日本弧の中で同じ背弧側に位置する山陰地域での漸新世

珪長質火成活動(Imaoka et al., 2011)や, 前期～中期中新世に山陰地域を含む西南日本弧全域で起きた火成活動(Kimura et al., 2003, 2005)との関係も未解明の問題のひとつである. これらを解明するためには, 日本海拡大時に北陸地方で起きた火成活動の情報の整理が不可欠である. これらを踏まえて本論では, 火成岩類を中心として北陸地方に分布する日本海拡大期層の現在までに行われた層序, 岩相, 年代, 岩石学的研究をレビューした上で, 北陸地方における日本海拡大期火成活動の時空変遷の概要と問題点について論ずる.

日本海拡大の拡大様式と原因のモデル

日本海の拡大様式については, いわゆる観音開きモデル(Otofujii et al., 1985), プルアパート海盆モデル(Lallemand and Jolivet, 1986; 相馬・丸山, 1989; 柳井ほか, 2010), 2 段階拡大モデル(Hayashida et al., 1991)などがある. 地質構造や現在の地質現象に注目すると, 千島弧や伊豆一小笠原弧, 琉球弧を除いて日本列島は大きく東北日本弧と西南日本弧に分けることができる. 観音開きモデルは古地磁気学的手法と解釈に基づいて, 日本海拡大時に東北日本弧が反時計回り, 西南日本弧が時計回りに 15 Ma 頃に急速回転することによって日本海が拡大したというモデル(Otofujii et al., 1985)である. Hoshi et al. (2015) と星(2018)は古地磁気データの地域比較を行い, 西南日本弧の回転が 15 Ma ではなく 18–16 Ma に起きたことを示している. プルアパート海盆モデルには, 日本列島が横ずれ断層に伴って東北・西南日本弧が平行移動しつつ南下したという考え(Lallemand and Jolivet, 1986)と, 日本列島がいくつかの微小ブロックに分かれて大陸側から押し出されるようにして日本海が拡大したという考え(相馬・丸山, 1989; 柳井ほか, 2010)がある. 2 段階拡大モデル(Hayashida et al., 1991)は東北・西南日本弧が平行拡大(20–16 Ma)した後, 16–14 Ma に観音開きをしたというモデルである. これらのモデルの議論は未だ解決を見ないが, 特に観音開きモデルとプルアパート海盆モデルは両者が互いを取り入れたモデルも提案されており, 両者が本質的に異なるモデルであるとも言えなくなってきたという指摘(中嶋, 2018)もある.

日本海の拡大様式と同様に, 日本海を含めて西太平洋地域でこの時期に多数の背弧海盆が形成された理由についても, いくつかの仮説がある. アセノスフェアのマントルウェッジへの貫入モデル(Tatsumi et al., 1989; Okamura et al., 1998; Zadeh et al., 2013), 太平洋・フィリピン海プレートのロールバックモデル(Martin, 2011), インド亜大陸ー

Fig. 1(←). Index map showing the distributions of Oligocene to Miocene igneous rocks formed during and immediately after the opening of the Japan Sea in the Hokuriku region. The map is modified from the 1:200,000 geological map of the northern Noto Peninsula (Ozaki, 2010), the 1:100,000 geological map of Fukui Prefecture (Fukui Prefecture, 2010), and the seamless geological map V2 [URL1]). Abbreviations: Akh (Akahotani F.), As (Arashimadake Diorite), Aw (Awagura F.), Bsd (Besshodake Andesite), Fk (Fukuhira F.), Gh (Gouno-hakusan Granodiorite), Gr (Goroku F.), Hrz (Horyuzan F.), Ic (Ichinose Rhyolite), Io (Iozen F.), It (Ito-o F.), Ita (Itao F.), Iw (Iwaine F.), Kn (Kunimidake Volcanic Rocks), Kns (Kono-suyama F.), Kw (Kamizawumi F.), Mts (Matsunagi F.), Ns (Nishitani F.), Sz (Suizu Granodiorite), Tr (Tori F.), Wg (Wagatani F.), Ws (Mt. Wasso Moonstone Rhyolite), Ymn (Yamanaka F.), and Pref. (Prefecture).

Fig. 2. Regional comparison of the Oligocene to Middle Miocene stratigraphic classification in the Hokuriku region. Abbreviations: F. (Formation), Fs. (formations).

ユーラシア大陸衝突モデル(Kimura and Tamaki, 1986; Jolivet et al., 1994; Ren et al., 2002; Horne et al., 2017), 太平洋プレートの斜め沈み込みモデル(Yin, 2010)などである。アセノスフェアのマントルウェッジへの貫入モデルはマントル側からマントルウェッジへブルームが湧昇することによって、火成弧が海溝側に押し出されて背弧海盆が形成されるという考え(Tatsumi et al., 1989)である。このモデルは火成岩類の化学組成の時間変化に注目したもので、岩石学・地球化学者に支持されているモデルである。インド亜大陸-ユーラシア大陸衝突モデルは、インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突がユーラシア大陸を変形させることによって東アジアで横ずれ運動が生じたという考え(Kimura and Tamaki, 1986; Jolivet et al., 1994; Horne et al., 2017)と、衝突がマントル対流に影響を及ぼして東アジア直下のマントルウェッジにアセノスフェアが貫入したという考え(Ren et al., 2002)に大別される。太平洋・フィリピン海プレートのロールバックモデル(Martin, 2011)と太平洋プレートの斜め沈み込みモデル(Yin, 2010)は一見類似しているが、前者はスラブロールバックによる引張応力によって、後者は斜め沈み込みによって生じた横ずれ運動が、日本海拡大を誘引したと主張している。

日本海拡大の開始・終了時期、拡大様式、拡大原因を明らかにするためには、現在残されている地質から過去を遡らなければならないが、その中でも火成岩類は日本海拡大時の地球内部(上部マントル~地殻)の情報を我々にもたらしてくれると期待される。さらに、火成岩類の情報を砕屑岩や古生物の情報と組み合わせることで、日本海拡大時の地下と地表の

様子をより詳細に明らかにすることができ、列挙したような問題の解決に寄与できると考えられる。

富山県に分布する日本海拡大期層の層序、岩相および年代

北陸地方の中でも、富山県、石川県加賀地域、福井県嶺北地域にかけての地域には日本海拡大期層(漸新統~中部中新統)が連続して帯状に分布している(Fig. 1)。本論では北陸地方新第三系の模式地(例えば、加越累層群; 池辺, 1949)として、古くから多くの研究がなされてきた富山県富山市南部の八尾地域の層序を対比基準とし、各地域の層序を説明する。Fig. 2に示されている八尾地域と各地域の対比は、現在までに報告されている各層の岩相と年代を加味しておこった。

北陸地方の新第三系の模式地として知られる八尾地域の日本海拡大期層の層序は、槇山(1930)が報告して以来、多くの研究者によってその層序区分が示されてきた(今村, 1932a, 1936; 中世古, 1953, 1954; 津田, 1953, 1955; 坂本・野沢, 1960; 早川, 1983; 早川・竹村, 1987; Yamada and Yamada, 2018; 中嶋ほか, 2019)。また、八尾地域やその周辺地域の層序を基にして、富山県内や北陸地方の広範囲の層序区分が多くの研究によって総括されてきた(今村, 1937; 藤田・中川, 1948; 池辺, 1949; 池辺・中世古, 1955; Matsumoto and Ikebe, 1958; 坂本ほか, 1959; 粕野ほか, 1961; 坂本, 1966; 山下ほか, 1988; 粕野・下川, 1989; 藤井ほか, 1992a; 藤井ほか, 1992b; Yamada and Yamada, 2018)。最近では、中嶋ほか(2019)が岩相層序や年代層序、生層序などを再検討し、八尾地域の日本海拡大期層の層序区

Fig. 3. Comparison of lithological characteristics between major areas, showing the temporal change in volcanism related to the Japan Sea opening in the Hokuriku region. Stratigraphy and lithology are after Bito et al. (1980), Fukui Prefecture (2010), Ganzawa (1983), Ishida et al. (1998), Kaneko (2001), Kano et al. (1999, 2002, 2007, AIST), Kaseno (1993), Kobayashi et al. (2005), Nakagawa and Tahara (1991), Nakajima et al. (2019), Ozaki (2010), Sakamoto et al. (1959), Sakamoto (1966), Sudo (1979a, b), Tsukawaki and Ooji (2008), Umeda (1997), Yamada et al. (2017), Yanagisawa (1999) and Yoshikawa et al. (2002). Abbreviations: F. (Formation), Fs. (formations).

分および年代論を見直した。よって本論では、中嶋ほか (2019) による層序区分を基準として各層を記述する。雁沢 (1983), 柳沢 (1999), 金子 (2001), 中嶋ほか (2019) の区分に基づくと、富山県内の日本海拡大期層はおおよそ下位より、刀利層、檜原層、岩稲層、医王山層、黒瀬谷層、福平層、砂子坂層、土山層、東別所層、御峰層にまとめられる (Fig. 2)。

1. 漸新世広域不整合形成期 (28–21 Ma)

刀利層は富山県西部に狭く分布し、主に円礫を含む礫岩、アルコース質粗粒砂岩および流紋岩質溶結凝灰岩 (白中月長石流紋岩部層) からなる (Fig. 3)。この流紋岩質溶結凝灰岩は月長石を特徴的に含んでおり、月長石流紋岩として古くからその存在が知られている (今村, 1932b)。刀利層白中月長石流紋岩部層は主に溶結した流紋岩質火砕岩からなる複数枚

のフローユニットからなる火砕流堆積物で、特徴的に赤色を呈する(山崎・宮島, 1970; 須藤 1979b; 雁沢, 1983; 山田ほか, 2019)。白中月長石流紋岩部層からは 25–24 Ma の K–Ar 年代(植田・青木, 1970), 25.0–22.2 Ma のジルコン・フィッシュン・トラック年代(以下, ジルコン FT 年代; 雁沢, 1983; 中島ほか, 1983)が報告されてきたが, 最近では 22.5–22.4 Ma のジルコン U–Pb 年代(大田ほか, 2019; 山田ほか, 2019)が報告されている。これらは調和的な年代値を示し, 白中月長石流紋岩部層が約 23–22 Ma に形成されたことを示唆する。なお, ジルコン FT 年代は Hurford (1990) による標準化の勧告以前の年代値は参考値として扱う必要がある。

楡原層は富山県東部から中央部にかけて狭長で断続的な分布をもち, 主に円礫を含む礫岩とアルコース質砂岩からなる地層である(Fig. 3; 早川・竹村, 1987; 柏木, 2012; 中嶋ほか, 2019)。

2. リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)

岩稲層は富山県東部から石川県加賀地域にかけて帯状に広く分布し, その相当層は福井県まで連続して分布する(Fig. 1)。富山県内に分布する岩稲層相当層としては, 富山県東部の雁蔵層(伊藤, 1985; 竹内ほか, 2017)や富山・岐阜県境に分布する檜峠層(野沢ほか, 1981)がある。岩稲層は主に複輝石安山岩類と同質の火砕岩類からなるが(Matsumoto and Ikebe, 1958; 高橋・周藤, 1999; Yamada and Yamada, 2018), いくつかの地域では特徴的に本層最下部が角閃石安山岩類から構成される(坂本・野沢, 1960; 雁沢, 1983; Yamada and Yamada, 2018)。クリンカーを伴う溶岩が認められる一方で(高橋・周藤, 1999; 金子, 2001; Yamada and Yamada, 2018), 枕状溶岩(藤井ほか, 1992b)やハイアロクラスタイト(雁沢, 1983)も報告されている。岩稲層の安山岩類および岩稲層相当の岩脈からは, 18.9–13.6 Ma の K–Ar 年代(柴田, 1973; 石油公団, 1985; 新村ほか, 1994; 金子, 2001; 新村・荒川, 2008), 17.2 ± 0.9 Ma のジルコン FT 年代(伊藤・渡辺, 2006; 医王山層の可能性もある(金子, 2001))および 17.6 ± 0.3 Ma のジルコン U–Pb 年代(中嶋ほか, 2019)が得られているが, 若い年代を示す K–Ar 年代は変質による若返りを起こしている可能性が指摘されている(柴田, 1973)。中嶋ほか(2019)は放射年代や古地磁気層序などから, 本層の形成年代を 17.5–17.2 Ma と推定している。

医王山層は富山県中央部から石川県加賀地域にかけて帯状に分布し, その相当層は特に加賀地域では厚く分布する(Fig. 1)。主に流紋岩類と同質の火砕岩類からなり, 流紋岩溶岩や火砕流堆積物が多く観察されている(井上ほか, 1964; 松尾・中西, 1967; 雁沢, 1983; 藤井ほか, 1992b; 山田ほか, 2019)。水底に噴出した枕状溶岩と思われる構造が観察される一方で(井上ほか, 1964), 大気中での高温酸化を示唆する赤色を帯びた流紋岩類や溶結凝灰岩も報告されている(松尾・中西, 1967; 鮎野, 1993)。富山県の医王山層からは 17.2–15.0 Ma のジルコン FT 年代(雁沢, 1983; 伊藤・渡辺, 2005)と変質で若返りが指摘されている 14.3–14.1 Ma の

全岩 K–Ar 年代(柴田, 1973; 金子, 2001)が報告されていたが, 山田ほか(2019)が雁沢(1983)の FU06(16.5 ± 1.4 Ma)と同じ露頭試料から 16.3 ± 0.6 Ma のジルコン U–Pb 年代を報告した。富山県東部に分布する医王山層相当層である笹川層は, 泥岩と流紋岩類からなる。流紋岩類は軽石質凝灰岩礫岩を主体とするが, 一部では塊状溶岩が観察される(竹内ほか, 2017)。笹川層からは 16.3–16.2 Ma のジルコン U–Pb 年代と(Itoh et al., 2016; 竹内ほか, 2017), 18.2–14.0 Ma のジルコン FT 年代(伊藤, 1985; Itoh et al., 2016; 竹内ほか, 2017)が報告されている。

黒瀬谷層は富山県中央部に分布し, 主に礫岩と砂岩泥岩互層からなる(Fig. 3; 津田, 1953, 1955; 坂本・野沢, 1960; 早川・竹村, 1987; 金子, 2001; 中嶋ほか, 2019)。黒瀬谷層は多種多様な化石を多産することでも有名で, 主に本層から産出する軟体動物化石群集は八尾動物群(黒瀬谷動物群とも; Oyama, 1950; Tsuda, 1960; 鮎野, 1964)と呼ばれる。黒瀬谷層最上部の山田中凝灰岩層(16.6 ± 0.2 Ma(ジルコン U–Pb); 中嶋ほか, 2019)は厚い凝灰岩で, 富山県内で広く追跡される(早川・竹村, 1987; 中嶋ほか, 2019)。

福平層は富山県東部に分布する黒瀬谷層の同時異相で, デイサイト～安山岩質火砕岩を主体とし溶岩や碎屑岩類を伴う岩相を示すが, 少量の玄武岩も含まれる(Fig. 3; 金子, 2001)。クリンカーを伴う溶岩や火山弾, 火山豆石などが見られる一方でハイアロクラスタイトも認められることから, 本層は陸域と水域の両方で形成されたと考えられている(金子, 2001)。福平層からは 15.34–12.19 Ma の全岩 K–Ar 年代(山田ほか, 1998; 金子, 2001)および 14.3 ± 0.7 Ma のジルコン FT 年代(伊藤・渡辺, 2006)が得られているが, 竹内ほか(2017)は福平層の同一試料から 15.9 ± 0.2 Ma のジルコン U–Pb 年代と 12.2 ± 1.0 Ma のジルコン FT 年代を報告し, K–Ar 年代とあわせて福平層の定置年代を 16–12 Ma と考察している。しかし, 多くの K–Ar 年代, ジルコン FT 年代はジルコン U–Pb 年代と大きく乖離し, 上位の東別所層との年代よりも有意に若い。

東別所層は富山県東部から中央部にかけて分布し, 主に塊状の泥岩からなる(Fig. 3; 津田, 1953, 1955; 坂本・野沢, 1960; 早川・竹村, 1987; 中嶋ほか, 2019)。砂子坂層, 土山層および御峰層は富山県西部に狭く分布し, 黒瀬谷層と東別所層に相当する。これら 3 つの層は主に火山砕屑性の砂岩や泥岩からなるが, しばしば凝灰岩を挟む(井上ほか, 1964; 柳沢, 1999)。

石川県加賀地域に分布する日本海拡大期層の層序, 岩相および年代

石川県加賀地域(金沢市周辺～加賀市周辺)に分布する日本海拡大期層の層序学的研究は, 石川県金沢市周辺を対象にしたものが多く, 小松市や加賀市周辺の研究は非常に少ない。鮎野(1993), 鹿野ほか(1999), 塚脇・陰地(2008), 山田ほか(2017)の区分に基づくと, 石川県加賀地域の日本海拡大期層は下位より, 鷺走ヶ岳月長石流紋岩, 岩稲層, 医王山層, 砂子坂層, 七曲層, 朝ヶ屋層, 下荒屋層, 山科層に

まとめられる (Fig. 2).

1. 漸新世広域不整合形成期(28–21 Ma)

鷲走ヶ岳月長石流紋岩は刀利層や楡原層に相当し (Fig. 2), 手取川上流の鷲走ヶ岳周辺に分布する (石田ほか, 1998). この他にも、直海谷川流域 (板谷層; 粕野・山田, 1987; 粕野, 1993), 宝達山周辺 (山崎・宮島, 1970), 九谷ダム周辺になどにも相当層の露出が知られる. これらは富山県の刀利層や楡原層とは異なって礫岩が発達せず, 主に流紋岩質火砕岩類からなる (Fig. 3; 粕野・山田, 1987; 粕野, 1993; 石田ほか, 1998). 一方、宝達山周辺に分布するものは礫岩や砂岩を主体とし、太田層と呼ばれる (角ほか, 1989; 粕野, 1993). 鷲走ヶ岳月長石流紋岩は溶結した火砕流堆積物の典型的な層序が観察できる 1 枚の溶結凝灰岩からなる (石田ほか, 1998). 板尾層はデイサイト～流紋岩質溶結凝灰岩からなる (粕野・山田, 1987; 粕野, 1993). 石川県の鷲走ヶ岳月長石流紋岩からは、石田ほか (1998) が全岩 Rb–Sr アイソクロン年代として 19.5 ± 0.6 Ma を、元素移動の程度が大きい層準を除いたサンプルのみで 21.4 ± 1.9 Ma の全岩 Rb–Sr アイソクロン年代を算出している. また、伊藤ほか (2001) は同じ鷲走ヶ岳月長石流紋岩から 21.6–20.0 Ma のジルコン FT 年代を報告しているが、彼らは石田ほか (1998) が報告した Rb–Sr 年代や古地磁気の考察と併せて 20 Ma 頃の年代は熱水変質活動を反映していると考察している.

2. リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)

岩稲層は富山県内と同様に安山岩類および同質火砕岩を主体とし、加賀地域を NE–SW 方向に横断する形で連続的に分布する (粕野, 1993; Fig. 1). 加賀地域南部では我谷層 (粕野, 1993) や栢野層 (尾藤ほか, 1980), 宝達山周辺では瓜生層 (角ほか, 1989; 粕野, 1993) とそれぞれ呼称される. 加賀地域南部に分布する我谷層は、安山岩質火砕岩および単斜輝石安山岩溶岩を主体とし、砂岩や泥岩が挟在する (尾藤ほか, 1980; 粕野・山田, 1988; 粕野, 1993). 石川県加賀地域の宝達山周辺に分布する瓜生層は、主に安山岩質火砕岩類および火山性砕屑岩類からなる. 火砕岩の大部分は溶結凝灰岩からなり、水域を含む低い陸地に堆積したと解釈されている (角ほか, 1989). これらの地層からは放射年代は報告されていない.

医王山層も富山県内と同様に流紋岩類および同質火砕岩を主体とする (Fig. 3; 粕野, 1993; 鹿野ほか, 1999). 加賀地域北部では医王山層、加賀地域南部では山中層 (尾藤ほか, 1980) と呼称されるが、文献によってはそれらの代わりに赤穂谷層と館層 (富井ほか, 2002) と呼称される場合もある. 山中層は軽石凝灰岩および凝灰岩を主体とし、流理構造が発達した流紋岩溶岩や溶結凝灰岩を挟在する (尾藤ほか, 1980; 粕野, 1993; 福井県, 2010). 赤穂谷層は、角礫を含んだ様々な色調を呈する堅硬な凝灰岩を主体とし、流紋岩や砕屑岩が挟在する (富井ほか, 2002). 赤穂谷層上位の館層も類似した岩相を持ち、デイサイト質軽石凝灰岩を主体としてデイサイト～流紋岩が見られる (富井ほか, 2002). 石川県の医王山層からは模式地付近で 15.4–15.0 Ma のジルコン FT

年代 (伊藤ほか, 2000) のみが報告されていたが、最近、上口・長谷部 (2019) が白山市鶴来地域から 21.0–17.2 Ma のジルコン U–Pb 年代と 15.7–12.2 Ma のジルコン FT 年代を報告した. ただし、上口・長谷部 (2019) が報告したジルコン U–Pb 年代は、下位の岩稲層 (17.5–17.2 Ma?; 中嶋ほか, 2019) よりも古い年代であり、従来考えられてきた年代層序と大きく矛盾する.

砂子坂層、七曲層、朝ヶ屋層、下荒屋層、山科層は富山県の黒瀬谷層や東別所層に相当し、主に砕屑岩類からなる (Figs. 2, 3). それぞれ砂子坂層は砂岩から、七曲層は火砕岩や泥岩から、朝ヶ屋層は泥岩から、下荒屋層は礫岩や砂岩から、山科層は泥岩から主に構成される (粕野, 1993; 鹿野ほか, 1999; 塚脇・陰地, 2008; 山田ほか, 2017). また、金沢地域の七曲層は黒壁玄武岩 (16.4–12.4 Ma; 中嶋ほか, 1990; 酒寄ほか, 1997) と呼ばれる集塊岩状の玄武岩質溶岩を挟む (粕野, 1993). これらの地層は加賀地域南部では河南層、細坪層および大聖寺層 (尾藤ほか, 1980; 鹿野ほか, 1999), 宝達山周辺では宮島層 (あるいは河合層) および嘉例谷層と呼ばれる (粕野, 1993). これらの地層は主に砕屑岩 (礫岩、砂岩、泥岩) からなるが、しばしば珪長質火砕岩類および流紋岩を挟む (尾藤ほか, 1980; 角ほか, 1989; 粕野, 1993).

福井県嶺北地域に分布する日本海拡大期層の層序、岩相および年代

福井県嶺北地域に分布する日本海拡大期層の研究は、主に福井市西部の丹生山地で行われ、福井県の他地域の層序は丹生山地に対比される形で層序が示される場合がほとんどである. 鹿野ほか (2007), 福井県 (2010), 中江ほか (2013) の区分に基づくと、福井県嶺北地域の日本海拡大期層は下位より、西谷層、糸生層、国見層、荒谷層にまとめられる (Fig. 2).

1. 漸新世広域不整合形成期(28–21 Ma)

西谷層は岩相と年代から刀利層と楡原層に対比される地層で (Fig. 2), かつては西谷流紋岩 (河合, 1956) という名称で知られていた. 西谷層は灰色～赤色を呈する流紋岩質溶結凝灰岩～非溶結凝灰岩 (陸上火砕流堆積物) を主体とするが (河合, 1956, 1964; 三浦, 1979; 鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010; 中江ほか, 2013, 2015), 一部では刀利層や楡原層の岩相に類似した礫種の円礫を含む礫岩 (矢良巣岳礫岩) が発達する (Fig. 3; 梅田, 1997). 福井県の西谷層からは、中嶋ほか (1983) と鹿野ほか (2007) がジルコン FT 年代を報告しており 27.2–21.7 Ma の年代値を得ているが、そのほとんどは 22 Ma 前後に集中する.

2. リフティング再開期(21–18 Ma)

糸生層は主に玄武岩～安山岩類および同質火砕岩類から構成され、岩稲層に対比される (Figs. 2, 3; 三浦・東, 1974; 三浦, 1979; 鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010). 糸生層に対比される地層は、永平寺地域では浄法寺層や竹田層と呼称される (福井県, 2010). 糸生層の模式地である丹生山地では、火山岩類はクリンカーを伴ったアア溶岩ないしブロック溶岩の産状を示すほか、スコリア流堆積物やアグルチネートなども

観察され、本層上部にはデイサイト質火砕流堆積物も認められる(鹿野ほか, 2007). 丹生山地外の福井県内に分布する糸生層および相当層の安山岩類の大部分は溶岩や岩脈の産状を呈し、一部に枕状溶岩やハイアロクラスタイトが認められる(富岡ほか, 2000; 吉川, 2006; 福井県, 2010; 中江ほか, 2013, 2015). これらの岩相的特徴は、糸生層の火山岩類が陸上もしくは浅い水域に定置した特徴を示す(三浦・東, 1974; 三浦, 1979; 富岡ほか, 2000; 吉川, 2006; 鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010). 糸生層からは 21.1 ± 0.8 Ma の Ar-Ar 年代(Yabe, 2008), 17.1 ± 0.4 Ma の K-Ar 年代(中島ほか, 1990), $20.2-15.4$ Ma のジルコン FT 年代(広岡ほか, 1972; 中島ほか, 1983; 鹿野ほか, 2007)が報告されていて、鹿野ほか(2007)は上下の地層との層序関係と年代から本層の年代を $20-18$ Ma と推定している. これらの年代は岩相と層準によって対比されている岩層の年代よりも有意に古い(Fig. 3).

福井県内では糸生層と同時期に形成された深成岩体がいくつか分布する. 勝原閃緑岩は周縁部に環状岩脈や岩脈群、火山岩類を伴う荒島岳コールドロンの中心部に分布し、細粒な閃緑岩類からなる(富岡ほか, 2000; 福井県, 2010). 荒島岳コールドロンの深成岩と火山岩からは $20.9-17.7$ Ma の K-Ar 年代が報告されており(Ishihara et al., 1988; 富岡ほか, 2000), 火山岩類は 20 Ma 頃に成層火山を形成し、深成岩(勝原閃緑岩)は 18 Ma 頃に固結したと解釈された(富岡ほか, 2000). 能郷白山花崗閃緑岩は細粒～粗粒の花崗閃緑岩からなり(河合, 1964; 小井土ほか, 1995; 中江ほか, 2015), 周囲の中新世安山岩類とともに火山-深成複合岩体をなしていると考えられる(小井土ほか, 1995). 本岩体からは $19.70-18.58$ Ma の K-Ar 年代(小井土ほか, 1995)が報告されている. 杉津花崗閃緑岩は花崗閃緑岩を主体として周囲をトータル岩が取り囲む深成岩体で(中江ほか, 2013), 中新世安山岩類を生成したマグマ溜まりの可能性がある(福井県, 2010). 周囲の火山岩では、陸上に噴出した溶岩とそれに連続する岩株状の岩体や、デイサイト溶岩ドーム、アグルチネートなどが観察される(鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010). 杉津花崗閃緑岩からは 20.0 ± 1.2 Ma のジルコン FT 年代(伊藤, 2006)が報告されている. これら深成岩体から得られている年代は、糸生層の年代と調和的である.

3. リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)

国見層と荒谷層は砕屑岩類を主体とし(Fig. 3; 中川・田原, 1991; 鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010), 黒瀬谷層や東別所層に相当する(Fig. 2). 国見層は礫岩、砂岩、泥岩を主体とし、安山岩～デイサイト質の火砕岩を挟む(鹿野ほか, 2007). 荒谷層は砂岩、泥岩を主体とし、安山岩～流紋岩質の火砕岩を挟む(鹿野ほか, 2007).

国見層と荒谷層の上位には、日本海拡大終了直後に噴出したと考えられている(鹿野, 2018)火山岩類が複数分布する. 市ノ瀬流紋岩は下位の国見層と荒谷層を不整合で覆う中部中新統で、流紋岩溶岩ドームおよび同質火砕岩類からなる地層である(鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010). 浄法寺地域では冠岳流紋岩や鍋倉山流紋岩として分布する(福井県,

2010). 市ノ瀬流紋岩からは $15.7-11.1$ Ma のジルコン FT 年代(中島・水島, 1984; 鹿野ほか, 2007)と $15.3-14.4$ Ma の全岩 K-Ar 年代(中島ほか, 1990)が報告されているが、鹿野ほか(2007)は中島・水島(1984)が報告した 11.1 ± 1.5 Ma のジルコン FT 年代について年代較正が行われていない点などから疑問を呈している. 国見岳火山岩は市ノ瀬流紋岩のさらに上位に当たる地層で、玄武岩～安山岩溶岩を主体とし少量のデイサイトを伴う(氏家・弘田, 1993; 鹿野ほか, 2007; 福井県, 2010). 国見岳火山岩からは中島ほか(1990)が 15.0 ± 0.4 Ma の K-Ar 年代を報告している.

能登半島北部に分布する日本海拡大期層の層序、岩相および年代

能登半島北部の日本海拡大期層の区分は文献によって大きく異なるが、吉川ほか(2002)や尾崎(2010)の区分に基づくと、能登半島の日本海拡大期層は以下のようにまとめられる. 能登半島の日本海拡大期層は北東部では下位より高洲山層、合鹿層、神和住層、馬繰層、宝立山層、東院内層、法住寺層、粟蔵層から、北西部～中部では高洲山層、大福寺層、縄又層、別所岳安山岩類、道下層から構成される(Fig. 2). 高洲山層や別所岳安山岩類はかつてまとめて穴水(累)層と呼称されていたが、本論では吉川ほか(2002)や尾崎(2010)に従う.

1. 陸弧内リフティング期(44–28 Ma)

高洲山層は主に玄武岩～安山岩類からなる下部～上部漸新統で、この時代の地層は北陸地方の他地域では分布しない(Figs. 2, 3; 吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010). 高洲山層の火山岩類は溶岩や貫入岩として観察され(保科, 1984; 鮎野, 1993; 上松ほか, 1995; López and Ishiwatari, 2002; 吉川ほか, 2002), 安山岩溶岩は塊状部と角礫部を伴ったブロック溶岩の産状を示すこともある(吉川ほか, 2002). これらの観察から、高洲山層は陸上での火山活動の結果であると解釈されている(吉川ほか, 2002). 忍閃緑岩は主に角閃石閃緑岩からなり(上松ほか, 1995; 吉川ほか, 2002), 周囲の高洲山層の給源となったマグマ溜まりをなしていた可能性がある(吉川ほか, 2002).

高洲山層からはおおよそ $29-20$ Ma の K-Ar 年代が柴田ほか(1981)と塚本(1988)によって報告されているが、そのほとんどは 24 Ma 以前に集中する. 高洲山層に密接して分布する忍閃緑岩からは、 28.9 ± 1.0 Ma の高洲山層と調和的な K-Ar 年代が報告されている(柴田ほか, 1984). 最近、陳ほか(2020)は高洲山層の安山岩溶岩から 32.8 ± 2.3 Ma の、忍閃緑岩から 28.09 ± 0.67 Ma のジルコン U-Pb 年代を報告している. 他方で、高洲山層の安山岩や珪長質火砕岩からは $56.7-45.7$ Ma の有意に古い K-Ar 年代(塚本, 1988)が報告されているため、前期漸新世以前の火成活動年代や分布を制約するためには、高洲山層の層序や年代を詳細に調べる必要があるだろう.

2. 漸新世広域不整合形成期(28–21 Ma)

合鹿層はデイサイト質火砕岩を主体とし、砕屑岩を伴う上部漸新統である(Fig. 3). デイサイト質火砕岩の多くは溶結

Fig. 4. Schematic illustration of the spatial change in volcanism related to the Japan Sea opening in the Hokuriku region. Tectonic interpretations are after Kano (2018) and Nakajima (2018). Abbreviations: F. (Formation), Fs. (formations).

～非溶結の軽石凝灰岩からなり(保科, 1984; 吉川ほか, 2002), 陸上で堆積した火砕流堆積物であると解釈されている(吉川ほか, 2002). 合鹿層から得られている放射年代は少なく, 塚本(1988)が 14.5 ± 0.5 Ma の K–Ar 年代を, 吉川ほか(2002)が 25.2 ± 1.3 Ma の K–Ar 年代と 24.5 ± 1.5 Ma のジルコン FT 年代を報告している. 吉川ほか(2002)は塚本(1988)が合鹿層から得た年代値について, 観察される層序と矛盾することと変質の度合いから, その年代値の確度が低いと判断している.

神和住層と馬縹層は同時異相の関係にあり, 神和住層は主に無斑晶質安山岩から(保科, 1984; 吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010), 馬縹層は主に輝石安山岩からなり(Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010), 両層ともに砕屑岩や火砕岩を伴う(Fig. 3). 神和住層の無斑晶質安山岩は上部および下部クリンカーを伴うブロック溶岩の産状を呈し, 複数枚の溶岩流が観察される(保科, 1984; 吉川ほか, 2002). 馬縹層の複輝石安山岩はクリンカーを伴ったブロック溶岩やア溶岩の産状を呈するほか, 一部は岩床やジグソーフィット組織を伴う水中火山岩の産状を示す(Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002). これらの溶岩に挟在する砂岩からは海棲貝化石の産出が知られている(Kano et al., 2002). また, 馬縹層の火砕岩類は火砕流堆積物の産状を示し, 火山豆石や脱ガス構造が認められる(Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002). これらのことから, 神和住層は陸上で, 馬縹層は陸上もしくは浅海で堆積したと考えられる(保科, 1984; Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002). 年代に関しては, 神和住層からは $22.8\text{--}19.3$ Ma の K–Ar 年代(柴田ほか, 1981; 塚本,

1988)が, 馬縹層からは $27.8\text{--}18.9$ Ma の K–Ar 年代(塚本, 1988; Kano et al., 2002)と $21.3\text{--}17.8$ Ma のジルコン FT 年代(Kano et al., 2002), $24.4\text{--}23.49$ Ma の Ar–Ar 年代(Kano et al., 2007)が報告されている. 吉川ほか(2002)は報告されている年代や層序関係などから, 神和住層の堆積年代を $23\text{--}20$ Ma, 馬縹層の堆積年代を $23\text{--}19$ Ma と推定している.

神和住層と馬縹層もしくはそれより上位の層に相当すると考えられる同時代の火山岩類が, 能登半島北方の舳倉島と七ツ島に分布している. 舳倉島の火山岩類(以下, 舳倉島火山岩類と仮称する)と七ツ島火山岩類はともに安山岩溶岩と安山岩質凝灰角礫岩からなり, 高温酸化を受けた様子やクリンカーを伴うなどの産状から, 陸上に噴出した火山岩であると考えられている(石田ほか, 1962; 佐藤, 1989). 舳倉島火山岩類からは佐藤(1989)が 20.5 ± 0.8 Ma の K–Ar 年代を報告しているが, 七ツ島火山岩類からは若い 14.8 ± 0.7 Ma の K–Ar 年代が報告されている. これらの火山岩類は孤立して分布するため, 今後更なる年代学的な検討が待たれる.

大福寺層は細礫を含む砂岩からなる下部中新統で, 層準や岩相から刀利層や楡原層に相当する(粕野・山田, 1991; 尾崎, 2010; Fig. 2).

3. リフティング再開期(21–18 Ma)

宝立山層は, 主にデイサイト質火砕岩およびデイサイト～流紋岩からなる下部中新統である(Fig. 3). デイサイト質火砕岩の大部分は軽石凝灰岩や凝灰岩, 凝灰角礫岩で構成され, 一部は溶結している(保科, 1984; 吉川ほか, 2002). 脱

ガス構造が見られることや岩相の特徴などから、火砕流堆積物だと考えられる(吉川ほか, 2002)。デイサイト～流紋岩は溶岩および角礫岩を伴う溶岩ドームとして観察される(吉川ほか, 2002)。宝立山層からは 19.5–16.4 Ma のジルコン FT 年代(吉川ほか, 2002)と 15.2 ± 0.6 Ma の全岩 K–Ar 年代(柴田ほか, 1981)が報告されているが、吉川ほか(2002)は放射年代と上位の地層から見いだされる珪藻化石年代との関係から本層の定置年代を 19.5–18 Ma と推定している。

縄文層は主に砕屑岩(砂岩, 砂岩泥岩互層, 礫岩)からなり、デイサイト質火砕岩類などを挟む(鮎野, 1993; 小林ほか, 2005; 尾崎, 2010)。層序関係や台島型植物群の産出などから下部中新統と推定されている(小林ほか, 2005; Fig. 3)。

4. リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)

別所岳安山岩類は主に安山岩類および同質火砕岩からなる下部～中部中新統で(鮎野, 1993; 尾崎, 2010)、年代と岩相から岩稲層に対比される(Fig. 2)。氷見～灘浦地域では熊淵層(鮎野・下川, 1989)と呼ばれることもある。別所岳安山岩類からは 17–15 Ma の K–Ar 年代(柴田ほか, 1981; 塚本, 1988)が報告されている。

道下層は礫岩を主体とし、上部では砂岩や泥岩の互層からなる地層で(鮎野, 1993; 小林ほか, 2005; 尾崎, 2010)、黒瀬谷層に相当すると考えられる。層序関係や台島型植物群の産出などから下部～中部中新統と推定されている(小林ほか, 2005)。

東院内層は礫岩, 砂岩, 泥岩から、法住寺層は主にシルト岩からなる下部～中部中新統で(鮎野, 1993; Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010)、年代と岩相から黒瀬谷層と東別所層に相当すると考えられる(Fig. 2)。氷見～灘浦地域では谷口層と中波層(鮎野・下川, 1989)と呼ばれる。

粟蔵層は法住寺層を覆い、流紋岩と同質火砕岩類からなる中部中新統である(Fig. 3; 鮎野, 1993; Kano et al., 2002; 吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010)。輪島市町野町曾々木の岩倉山を中心に塊状の黒雲母流紋岩およびその角礫岩がドーム状の貫入岩体として分布し、その周縁に流紋岩質軽石凝灰岩～凝灰岩および砂岩～シルト岩が分布する(吉川ほか, 2002; 尾崎, 2010)。粟蔵層からは 16.1 ± 0.4 Ma の黒雲母 K–Ar 年代と 15.9 ± 1.5 Ma の全岩 K–Ar 年代(塚本, 1988)が得られているが、吉川ほか(2002)は珪藻化石年代から本層の堆積年代を 15.6 Ma 前後と推察している。

北陸地方における日本海拡大期火成活動の時空変遷とマグマ成因

1. 陸弧内リフティング期(44–28 Ma)

北陸地方に残されている日本海拡大期の火成岩類で最も古い年代を示すものは、能登半島に分布する高洲山層と忍岡緑岩で、約 33–26 Ma の火成活動によって形成されたと考えられる(Fig. 4)。ただし、先述したように高洲山層からは暁新世～始新世の年代(塚本, 1988)を示す火山岩類が報告されているため、田万川期(44–30 Ma)前半に形成された火成岩もこの地域に分布している可能性がある。また、高洲山層が形成された前期漸新世には日本列島全域が隆起して広域不整

合が形成され、漸新世末期まで継続した(鹿野ほか, 1991; Kano et al., 2007)。

高洲山層は現在の日本列島火山活動では出現しない多様な化学組成をもつ玄武岩～安山岩類から構成され、特に高マグネシア安山岩(HMA)の組成を示す無斑晶質安山岩とそれに付随する玄武岩～安山岩に注目した研究が行われてきた(上松ほか, 1995; López and Ishiwatari, 2002; Sato et al., 2013)。これらの玄武岩～安山岩類に含まれる鉱物は高い Mg# を示し、さらに火山岩の多くは中央海嶺玄武岩(MORB)～マントル系列の非常に枯渇した Sr, Nd 同位体比を示す(上松ほか, 1995; Sato et al., 2013)。これらのことから、その起源マグマはアセノスフェアの貫入の影響を受けた高温のマントルウェッジおよび沈み込む海洋地殻の部分溶融によって形成されたと考えられている(Sato et al., 2013)。このような火成活動は東北日本弧でも見出されており(周藤, 2009; Sato et al., 2013, 2014; Shuto et al., 2015)、北陸地方では東北日本弧から延長される陸弧火成活動が起きていたと考えられる。西南日本弧で認められる珪長質火成活動(Imaoka et al., 2011)は北陸地方では知られていないが、高洲山層から報告されている暁新世～始新世火山岩類の中には珪長質火山岩類も含まれている(塚本, 1988)。この西南日本弧の珪長質火成活動もアセノスフェアのマントルウェッジへの進入によって起きたと考えられている(Imaoka et al., 2011)。

2. 漸新世広域不整合形成期(28–21 Ma)

高洲山層を形成した火成活動が終了した後、25 Ma 頃には能登半島でデイサイト質の火砕流堆積物や溶岩流が噴出し、合鹿層を形成した。合鹿層の火山岩に関する岩石学的研究は行われておらず、北陸地方の他地域では同時期の火成活動は知られていないため、デイサイト質マグマの成因や前後の火成活動との関係は明らかではない。その前後の 24 Ma 頃には日本海盆の海洋地殻も盛んに形成され始めた(Kaneoka et al., 1992, 1996)。23–20 Ma 頃には馬縹層や神和住層といった玄武岩質～安山岩質火山活動が生じた(Fig. 4)。両層の玄武岩～安山岩の中にブロンザイト斑晶を含む無斑晶質安山岩(保科, 1984)が分布することは知られているが、両層を形成した安山岩類の成因については両層の岩石学データが不足しているため不明である。Shimazu et al. (1993)は神和住層(馬縹層の可能性もある)および穴水層(現在の層序区分でどの層に当たるかは明確ではない)から安山岩類の全岩化学組成を示して、Sr, Nd 同位体比が肥沃的であることなどから、これら能登半島の安山岩類が大陸地殻下のリソスフェリックマントルに由来するものであると結論付けた。最近では Okamura et al. (2016)が北部フォッサマグナ地域に分布する日本海拡大期火山岩類の成因を考察する比較対象として、神和住層と馬縹層、別所岳安山岩類の全岩化学組成を示している。神和住層のブロンザイト安山岩について、前弧域に位置する千葉県銚子地域でもこの時期に噴出したと考えられているブロンザイトを含む高マグネシア安山岩が同様に報告されており(Hanyu et al., 2006)、現在の背弧側と前弧側の非常に興味深い類似点である。

一方で、同時期の 23–22 Ma 頃には富山県、石川県加賀

地域、福井県嶺北地域では月長石を含む流紋岩の噴出が広く起こった(Fig. 4). この月長石流紋岩は陸成ではあるが、漸新世の大規模不整合を作る隆起の中で局所的に生じたリフト(中嶋, 2018)の中に礫岩(刀利層や楡原層)を伴って噴出したと考えられる. この流紋岩はアルカリ元素に富み、プレート内流紋岩に類似した化学組成を持つことで特徴づけられる(石田ほか, 1998; Ayalew and Ishiwatari, 2011). 山田ほか(2019)は世界の新生代流紋岩類と全岩化学組成を比較し、刀利層白中月長石流紋岩部層が大陸リフトと陸弧に産する流紋岩との中間的な化学組成を持つことを指摘している. さらに彼らは刀利層白中月長石流紋岩部層を形成した流紋岩マグマについて、本流紋岩がSタイプ花崗岩様の化学組成を示すことやSr, Nd同位体が肥沃的であることなどから、その成因を堆積岩起源の中部～上部地殻の溶融であると考察している(山田ほか, 2019; Yamada et al., 2019). また、石田ほか(1998)や石渡・辻森(2001), Ayalew and Ishiwatari(2011)は北陸地方の複数の月長石流紋岩の化学組成を報告し、それら月長石流紋岩の化学組成に地域差があることを見出している. それらの中でも鷲走ヶ岳月長石流紋岩が最もプレート内流紋岩に類似した化学組成を持ち、それ以外は鷲走ヶ岳月長石流紋岩よりも低いZr量などで特徴づけられる(石渡・辻森, 2001). プレート内流紋岩に類似しつつも沈み込み帯の影響を受けた化学組成を持つことから、これらの月長石流紋岩は日本海拡大初期の大陸縁辺でのリフティングに関連した火成活動によって形成されたと解釈されている(石田ほか, 1998; 石渡・辻森, 2001; Ayalew and Ishiwatari, 2011; Yamada et al., 2019). しかし、これら月長石流紋岩は玄武岩などの苦鉄質～中間質火成岩類を伴っておらず、月長石流紋岩マグマを形成した熱源等、明らかになっていない点も多い.

3. リフティング再開期(21–18 Ma)～リフト堆積盆急速形成期(18–15.3 Ma)

21 Ma頃は能登半島では神和住層と馬縹層を形成した安山岩質火成活動が継続し、19.5–18 Maにはデイサイト質火砕流の噴出によって宝立山層が堆積した(Fig. 4). リフト堆積盆急速形成期に入ると能登半島北西部～南部では、岩稲層に対比される安山岩類が噴出・堆積して別所岳安山岩類が形成された. また、舩倉島火山岩類はリフティング再開期に、七ツ島火山岩類はリフト堆積盆急速形成期に形成された安山岩類の可能性もある. 一方、富山県、石川県加賀地域、福井県嶺北地域では月長石流紋岩の噴出が22 Ma頃に終了し、火成活動の空白期を置いて21 Ma頃に福井県嶺北地域で玄武岩～安山岩質の火成活動が開始した. 特にリフト堆積盆急速形成期の18–16 Maに北陸地方を含む西南日本弧は大きな回転運動を受け(例えば、Otofujii et al., 1985; Hoshi et al., 2015; 星, 2018), 日本海は急速に拡大した. また、分布が連続している糸生層と岩稲層の形成年代は、糸生層が21–18 Ma(鹿野ほか, 2007; Yabe, 2008), 岩稲層が17.5–17.2 Ma(中嶋ほか, 2019)と推定されている. このことは、日本海が大きく拡大した時期に苦鉄質～中間質火成活動の年代に地域差があることを示している. その理由について

は火成活動の中心が移動したことを示しているのか、それとも富山県側では糸生層の下部が欠如しているのか(三浦・東, 1974; 三浦, 1979)などが考えられるが、これを明らかにするためには石川県の相当層(我谷層など)も含めた詳細な層序と年代の対比が必要である.

佐藤(1989)は、能登半島北方に位置する舩倉島と七ツ島からもブロンザイトを含む無斑晶質安山岩を報告し、初生玄武岩質マグマとデイサイト質マグマの混合によって生成されたと考察している. 糸生層の火山岩類については葛木・石渡(2001, 2002)や山崎・石渡(2007)が玄武岩～デイサイトの化学組成を報告し、高カリウム玄武岩や、低・高Ni玄武岩、アダカイト質安山岩～デイサイトなど多様な玄武岩～安山岩類が糸生層に分布することを明らかにした. 糸生層に伴う深成岩類については、富岡ほか(2000)が荒島岳コールドロンに見られる火山岩類と深成岩類の全岩主要・微量元素組成とSr同位体組成を示してその成因を論じている. それによると、荒島岳コールドロンを形成した苦鉄質マグマはアルカリに富む島弧玄武岩マグマとMORBに近いソレアイト玄武岩マグマとの混合、および基盤岩を構成している泥質片麻岩の同化を経て生成されたものだと考察されている. また、石渡・大浜(1997)は福井県嶺北地域と石川県加賀地域、富山県西部の糸生層・我谷層・岩稲層に見られる玄武岩質岩脈から高アルミナ玄武岩やシヨシナイト系列玄武岩を報告し、西から東に向かって地殻同化の程度が大きくなることを指摘している. このことは上記の糸生層と岩稲層の年代差と何らかの関係がある可能性がある.

この時期の火山岩類で最もマグマ成因の検討が進んでいるのは岩稲層である. 岩稲層の安山岩類については、石渡・大浜(1997)や高橋・周藤(1999), 土橋・石渡(2006), 石渡ほか(2007), Sato et al.(2013), Yamada et al.(2019), Watanabe et al.(2020)などがその地球化学的特徴と成因を議論している. 岩稲層の中でも特に注目されているのはアダカイト質安山岩で富山県内から多くの報告があるが(高橋・周藤, 1999; 土橋・石渡, 2006; 石渡ほか, 2007; Yamada et al., 2019; Watanabe et al., 2020), 本層最下部の角閃石安山岩のみがアダカイトの化学組成を示すこと(高橋・周藤, 1999; Yamada and Yamada, 2018)は非常に興味深い. アダカイト質安山岩以外にも、岩稲層は高マグネシア安山岩(HMA)やカルクアルカリ系列安山岩、ソレアイト系列安山岩といった多様な組成をもつ玄武岩～安山岩から構成されることが報告されている(高橋・周藤, 1999). 当時のマントルウェッジがアセノスフェアの湧昇によって現在と比較して高温状態であったことが、沈み込むスラブの溶融(アダカイト質安山岩)や高温マントルウェッジの溶融の溶融を引き起こし、一部は大陸地殻物質を同化することによって、このような化学組成の多様性が生み出されたと考えられている(石渡・大浜, 1997; 高橋・周藤, 1999; Sato et al., 2013).

17 Maを過ぎると能登半島では火成活動が急速に減退したが、富山県、石川県加賀地方、福井県嶺北地方では医王山層に代表される大規模な珪長質火成活動が広範囲で起きた. これらの流紋岩類で最も岩石成因が研究されているのは医王

山層で、森下ほか(2006), Ayalew and Ishiwatari (2011), Yamada et al. (2019), 山田ほか(2019)などによる報告がある。森下ほか(2006)は医王山層中に見られる暗色珪質脈の構造・組織と化学組成を詳細に調べ、その成因が母岩の破碎と SiO_2 の選択的付加を受けた結果形成されたものであると論じている。Ayalew and Ishiwatari (2011) と Yamada et al. (2019), 山田ほか(2019)は医王山層を形成した流紋岩マグマの特徴や成因を考察し、医王山層の流紋岩が沈み込み帯流紋岩の化学組成に類似していることを指摘した上で、日本海の拡大によって陸弧から島弧へと移り変わっていく過程を反映しているのではないかと考察している。さらに山田ほか(2019)は全岩化学組成の変化や同位体比などの検討から、医王山層の流紋岩マグマはIタイプ花崗岩のような化学組成を持ち、下部～中部地殻の火成岩が溶融してできたものであると考えた。しかし、岩稲層などの苦鉄質～中間質火成活動に続いて、なぜこのように大量の流紋岩質マグマが生成される環境が生じたのかは未だ明らかにされていない。一方、富山県東部では安山岩～デイサイト質火成活動が起きることで福平層が堆積し、石川県金沢地域では七曲層の堆積時に玄武岩質マグマが噴出した(黒壁玄武岩)。Watanabe and Takahashi (2019)は福平層の火山岩類のうち、玄武岩と安山岩の全岩化学組成の概要を報告し、他の流紋岩と同程度に肥沃な Sr–Nd 同位体比を持つことを見出している。また、黒壁玄武岩の玄武岩類は低カリウム玄武岩の化学組成を示し、同時期に噴出した東北日本弧の玄武岩類や第四紀東北日本弧の火山フロント付近の火山岩類と類似した化学組成をもつ(酒寄ほか, 1997)。

この医王山層や福平層の火成活動が起きた頃には、北陸地方の特に富山堆積盆周辺では堆積盆が大きく沈降を開始し、その沈降量は 2000 m ほどにも及んだ(早川・竹村, 1987; Itoh et al., 1997)。これに従ってマングローブ林のような環境を示す陸成～浅海成層(黒瀬谷層など; 山野井・津田, 1986)や、漸深海などの環境を示す泥岩(東別所層など)が北陸地方に広く堆積した。この間にも、一部では火成活動が断発的に起きたが(例えば、粟蔵層, 国見層, 黒壁玄武岩)、北陸地方の火成活動は医王山層や福平層などの火成活動の終了を以ておおよそ 16 Ma 頃には急速に減退した。

おわりに

本論では北陸地方に分布する日本海拡大期層の火山岩類を中心とした層序を概観した後、火成岩類についてその岩石学および地球化学的研究を重要な地層と文献に絞ってレビューした。日本海拡大期に北陸地方ではどのような火成活動が起きていたのかが整理された一方で、その問題点も明らかになった。

北陸地方の日本海拡大期層は八尾一門ノ沢動物群の呼称が用いられるようにその化石群や堆積盆発達史が注目されてきたが、火山岩類の層序や岩相に関する研究は碎屑岩類と比較すると、必ずしも充分に明らかになってはいない。特に岩石学および地球化学的研究は、高洲山層と富山県内の岩稲層を構成する玄武岩～安山岩類の研究例がほとんどで、他の苦

鉄質～中間質火成岩類や珪長質火成岩類については少なく、広域的なマグマ成因および日本海拡大との関係は明らかにはなっていない。また、年代学的研究にもその密度に地域差があるため、北陸地方の火成活動史および堆積盆発達史の全体像が捉えられているとは言えないだろう。

日本海拡大期に東北日本弧で起きた Sr, Nd 同位体比に代表される火山岩類の化学組成とその時間変化(Nohda and Wasserburg, 1986; Nohda et al., 1988; Ujike and Tsuchiya, 1993; Hanyu et al., 2006; 周藤, 2009; Shuto et al., 2015)は、アセノスフェアの湧昇によって当時のマントルウェッジが現在と比較して高温であったことと、マントルウェッジの熱状態変化によって化学組成の時間変化が生じたことを示している(周藤, 2009; 吉田, 2009; Shuto et al., 2015)。また、同じ西南日本弧では 25–17 Ma に山陰地域や隠岐地域で非アルカリ玄武岩～デイサイト(一部アルカリ系列)の火成活動が起きていた(Kimura et al., 2003, 2005)。瀬戸内地域ではフィリピン海プレートの沈み込み開始に起因する中性～酸性火山活動(いわゆる瀬戸内火山岩類および外帯酸性岩類)が起きたが(中田・高橋, 1979; 巽, 2003; Tatsumi, 2006; 新正ほか, 2007), その年代は 16 Ma 以降に集中し 14 Ma 前後に活動のピークを迎えている(Tatsumi, 2006; 巽ほか, 2010)。これらの火成活動と北陸地方で起きた火成活動を比較するためには、北陸地域に分布する日本海拡大期火山岩類のより詳細な岩石学的、地球化学的データおよび放射年代が必要になる。特に北陸地域の日本海拡大期層から報告されている放射年代は、日本海拡大期に活発に起きた熱水活動などによる若返りを受けやすい K–Ar 年代やジルコン FT 年代の報告がほとんどである。したがって、既存の年代値の再評価や近年技術が発達したジルコン U–Pb 年代などによる年代データを蓄積し、基礎地質学に基づく他地域との岩相・年代の対比をおこなった上で、岩石学的・地球化学的手法によって火成活動の原因を考察することが今後求められる。

謝 辞

本稿は査読者である産業技術総合研究所の中嶋 健博士と鹿野和彦博士、および担当編集委員である愛媛大学の齊藤哲准教授の建設的なコメントにより大きく改善された。また、愛知教育大学の星 博幸教授は本特集号が企画されるにあたり、小論を執筆する機会を与えてくださった。新潟大学の M. Satish-Kumar 教授は、英文を丁寧に校閲してくださった。以上の方々に深く感謝し、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Ayalew, D. and Ishiwatari, A., 2011, Comparison of rhyolites from continental rift, continental arc and oceanic island arc: Implication for the mechanism of silicic magma generation. *Isl. Arc*, **20**, 78–93.
- 尾藤章雄・早川俊之・鮎野義夫・小笠原憲四郎・高山俊昭, 1980, 石川県加賀市付近の新第三系層序. 金沢大学教養部論集, 自然科学, **17**, 45–70. [Bito, A., Hayakawa, T., Kaseno, Y., Ogasawara,

- K. and Takayama, T., 1980. The Neogene stratigraphy around Kaga City, Ishikawa Prefecture, Japan. *Ann. Sci. Kanazawa Univ.*, **17**, 45–70.]
- 陳 翔羽・大田敬豊・久保見幸・長田充弘・山本鋼志・大藤 茂, 2020, 石川県能登半島の高洲山層と忍閑緑岩の形成年代と道下層の後背 地. JpGU-AGU Joint Meeting 2020 要旨, SGL34-P07. [Chen, X., Ota, H., Kubomi, K., Nagata, M., Yamamoto, K. and Otoh, S., 2020, Formation ages of the Konosuyama Formation and the Shinobu Diorite and the provenance of the Douge Formation in the Noto Peninsula, central Japan. *JpGU-AGU Joint Meet. 2020, Abstr.*, SGL34-P07.]
- 藤井昭二・粕野義夫・中川登美雄, 1992a, 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, **37**, 85–95. [Fujii, S., Kaseno, Y. and Nakagawa, T., 1992a, Neogene paleogeography in the Hokuriku region, Central Japan, based on the revised stratigraphic correlation. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **37**, 85–95.]
- 藤井昭二・相馬恒雄・後藤道治・神島利夫・清水正之・金子一夫……呂本順亮, 1992b, 10 万分の 1 富山県地質図説明書. 内外地図株式会社, 201 p. [Fujii, S., Sohma, T., Goto, M., Kamishima, T., Shimizu, M., Kaneko, K., Muramoto, J., 1992b, *Explanatory Text of the Geological Map of Toyama Prefecture, Scale 1: 100,000*. Naigai Map Production Co., 201 p.]*
- 福井県, 2010, 福井県地質図(2010 年版)および同説明書. 福井県建設技術公社, 173 p. [Fukui Prefecture, 2010, *Geological Map of Fukui Prefecture and Its Explanatory Note*. Fukui Pref. Public Co. Construct. Tech., 173 p.]
- 藤田和夫・中川衷三, 1948, 富山県砺波地方の第三紀層. 地質雑, **54**, 125. [Fujita, K. and Nakagawa, C., 1948, The Tertiary in the Tonami area, Toyama Prefecture. *J. Geol. Soc. Japan*, **54**, 125.]*
- 雁沢好博, 1983, フィッション・トラック法によるグリーン・タフ変動の年代区分, その 2—富山県太美山地域—. 地質雑, **89**, 271–286. [Ganzawa, Y., 1983, “Green Tuff” Movement defined by fission track ages of igneous rocks Part 2—Futomiya area of Toyama Prefecture, central Japan—. *J. Geol. Soc. Japan*, **89**, 271–286.]
- Hanyu, T., Tatsumi, Y., Nakai, S., Chang, Q., Miyazaki, T., Sato, K., Yoshida, T., 2006, Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: Constraints from geochemistry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q08002, doi: 10.1029/2005GC001220.
- 早川秀樹, 1983, 富山県八尾地域西部の新第三系の層序と年代. 大阪微化石研究会機関誌, **10**, 1–13. [Hayakawa, H., 1983, Stratigraphy and geochronology of the Neogene in the west part of the Yatsuo area, Toyama Prefecture, Central Japan. *News Osaka Micropaleontol.*, **10**, 1–13.]
- 早川秀樹・竹村厚司, 1987, 富山県八尾地域の新第三系. 地質雑, **93**, 717–732. [Hayakawa, H. and Takemura, A., 1987, The Neogene System in the Yatsuo area, Toyama Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **93**, 717–732.]
- Hayashida, A., Fukui, T. and Torii, M., 1991, Paleomagnetism of the Early Miocene Kani Group in southwest Japan and its implication for the opening of the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1095–1098.
- 広岡公夫・奥出恒夫・西村 進, 1972, 福井県丹生山地火山岩の古地磁気. 福井大学教育学部紀要, 第 II 部(自然科学), **22**, 第 2 集, 1–15. [Hirooka, K., Okude, T. and Nishimura, S., 1972, Paleomagnetic study on the volcanic rocks from Niu Mountainland in Fukui Prefecture, Japan. *Mem. Fac. Educ. Fukui Univ., Ser II(Nat. Sci.)*, **22**, 2, 1–15.]
- Horne, A. V., Sato, H. and Ishiyama, T., 2017, Evolution of the Sea of Japan back-arc and some unsolved issues. *Tectonophysics*, **710–711**, 6–20.
- 星 博幸, 2018, 中新世における西南日本の時計回り回転. 地質雑, **124**, 675–691. [Hoshi, H., 2018, Miocene clockwise rotation of Southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **124**, 675–691.]
- Hoshi, H., Kato, D., Ando, Y. and Nakashima, K., 2015, Timing of clockwise rotation of Southwest Japan: constraints from new middle Miocene paleomagnetic results. *Earth Planets Space*, **67**, 92, doi: 10.1186/s40623-015-0266-3.
- 保科 裕, 1984, 能登半島北部の新第三紀火山岩類: 特に無斑晶質安山岩類について. 地質学論集, **24**, 45–58. [Hoshina, H., 1984, Neogene volcanic rocks in the northern part of the Noto Peninsula, with special reference to aphyric andesites. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **24**, 45–58.]
- Hurford, A. J., 1990, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommission of Geochronology. *Chem. Geol.*, **80**, 171–178.
- 池辺展生, 1949, 富山県西部及石川県東部の第三紀層(富山県及石川県の地質学的研究 1). 地学, **1**, 14–26. [Ikebe, N., 1949, Tertiary in the western Toyama Prefecture and the eastern Ishikawa Prefecture: geological studies in Toyama and Ishikawa prefectures 1. *Sci. Earth (Chigaku)*, **1**, 14–26.]*
- 池辺展生・中世古幸次郎, 1955, 富山積成盆地の新第三系層序の再検討. 地質雑, **61**, 360. [Ikebe, N. and Nakaseko, K., 1955, Re-examination of Neogene stratigraphy in the Toyama sedimentary basin. *J. Geol. Soc. Japan*, **61**, 360.]*
- 今村外治, 1932a, 八尾第三紀層, 特に含有孔虫岩の分布に就きて. 地質雑, **39**, 310–312. [Imamura, S., 1932a, Tertiary in the Yatsuo area: on the distribution of foraminifer-rich rocks. *J. Geol. Soc. Japan*, **39**, 310–312.]*
- 今村外治, 1932b, 富山県に於ける月長石流紋岩の新産地. 地質雑, **39**, 669–670. [Imamura, S., 1932b, New locality of moonstone rhyolite in Toyama Prefecture. *J. Geol. Soc. Japan*, **39**, 669–670.]*
- 今村外治, 1936, 富山県地質概要. 富山博物学会誌, **1**, 1–25. [Imamura, S., 1936, Outline of geology of Toyama Prefecture. *J. Toyama Nat. Hist. Soc.*, **1**, 1–25.]*
- 今村外治, 1937, 神通川流域の地質に就いて. 富高博物同好会誌, **3**, 1–11. [Imamura, S., 1937, Geology of the Jinzugawa basin. *J. Nat. Hist. Assoc. Toyama High Sch.*, **3**, 1–11.]*
- Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, K., Itaya, T., Iizumi, S., 2011, K–Ar age and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster: Implications for Eocene–Oligocene thermo-tectonic reactivation. *J. Asian Earth Sci.*, **40**, 509–533.
- 井上正昭・水野篤行・野沢 保, 1964, 城端. 5 万分の 1 地質図幅および同説明書, 地質調査所, 32 p. [Inoue, M., Mizuno, A. and Nozawa, T., 1964, *Geological Map of Johana, Scale 1: 50,000 and Its Explanatory Text*. Geol. Surv. Japan, 32 p.]
- 石田勇人・石渡 明・加々美寛雄, 1998, 新第三系北陸層群の鷺走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩. 地質雑, **104**, 281–295. [Ishida, H., Ishiwatari, A. and Kagami, H., 1998, The Mt. Wasso moonstone rhyolitic welded tuff in the Neogene Hokuriku Group, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **104**, 281–295.]
- 石田志朗・粕野義夫・中西信弘・坂本 亨・山崎正男, 1962, 能登半島沖, 舩倉島・七ツ島の地質. 地質雑, **68**, 461–468. [Ishida, S., Kaseno, Y., Nakanishi, N., Sakamoto, T. and Yamasaki, M., 1962, Geology of Hegura-jima and Nanatsu-jima off Noto Peninsula, Central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **68**, 461–468.]
- Ishihara, S., Shibata, K. and Uchiumi, S., 1988, Discovery of Miocene granitoids in eastern Fukui Prefecture, central Japan. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **83**, 332–337.
- 石渡 明・土橋広宣・周藤賢治・佐藤 誠, 2007, 富山県西部の中新世アダカイトの Sr・Nd 同位体比およびその斜長石 Sr 量. 日本地質学会第 114 年学術大会講演要旨, 357. [Ishiwatari, A., Tsuchihashi, N., Shuto, K. and Sato, M., 2007, Sr–Nd isotopic ratio of the Miocene adakite in western Toyama Prefecture, central Japan and Sr content of its plagioclase. *114th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 357.]
- 石渡 明・大浜 啓, 1997, 北陸地方の中新統岩縞累層中の単斜輝石玄

- 武岩脈：シヨシナイト系列を含む多様な陸弧マグマと単斜輝石斑晶の成因。地質雑, **103**, 565–578. [Ishiwatari, A. and Ohama, H., 1997. Clinopyroxene basalt dikes in the Miocene Iwaine Formation, Hokuriku Province, Japan: Various continental arc magmas including shoshonite and origin of the clinopyroxene phenocrysts. *J. Geol. Soc. Japan*, **103**, 565–578.]
- 石渡 明・辻森 樹, 2001, 日本海及びその周辺の岩石。日本海学研究叢書, 富山県, 59 p. [Ishiwatari, A. and Tsujimori, T., 2001, *Rocks of the Japan Sea and Surrounding Areas*. Japan Sea Study Ser., Toyama Pref., 59 p.]
- 伊藤久敏, 2006, フィッション・トラック法から推定される柳ヶ瀬断層北部周辺の前期中新世における火成活動と断層活動への制約。地質雑, **112**, 612–615. [Ito, H., 2006, Early Miocene igneous activity around northern part of the Yanagase fault and constraints on its fault activity from fission-track thermochronology. *J. Geol. Soc. Japan*, **112**, 612–615.]
- 伊藤康人, 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, **13**, 1–12. [Itoh, Y., 1985, Stratigraphy and geochronology of the Neogene in the Tomari area, Toyama Prefecture, Central Japan. *News Osaka Micropaleontol.*, **13**, 1–12.]
- 伊藤康人・土志田正二・北田数也・檀原 徹, 2001, 石川県に分布する鷲走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩の古地磁気とフィッション・トラック年代。地調研報, **52**, 573–579. [Itoh, Y., Doshida, S., Kitada, K. and Danhara, T., 2001, Paleomagnetism and fission-track ages of the Mt. Wasso moonstone rhyolitic welded tuff in the Ishikawa Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **52**, 573–579.]
- Itoh, Y., Kusumoto, S. and Uda, T., 2016, *Tanayama Terrace, A Multidisciplinary Study of an Arc-Arc Collision Front*. LAP LAMBERT Academic Publ., Saarbrücken, 103 p.
- Itoh, Y., Nakajima, T. and Takemura, A., 1997, Neogene deformation of the back-arc shelf of Southwest Japan and its impact on the paleoenvironments of the Japan Sea. *Tectonophysics*, **281**, 71–82.
- 伊藤康人・渡辺真人, 2005, 八尾地域下部中新統のフィッション・トラック年代と古地磁気極性。地調研報, **56**, 425–429. [Itoh, Y. and Watanabe, M., 2005, Fission-track dating and paleomagnetic polarity of the Lower Miocene in the Yatsuo area, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **56**, 425–429.]
- 伊藤康人・渡辺真人, 2006, 魚津地域下部—中部中新統のフィッション・トラック年代測定。地調研報, **57**, 57–59. [Itoh, Y. and Watanabe, M., 2006, Fission-track dating of the Lower to Middle Miocene in the Uozu area, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **57**, 57–59.]
- 伊藤康人・山本朗子・岩野英樹・檀原 徹・渡辺真人, 2000, 金沢・医王山地域に分布する中新統の古地磁気とフィッション・トラック年代。地調月報, **51**, 495–504. [Itoh, Y., Yamamoto, A., Iwano, H., Danhara, T. and Watanabe, M., 2000, Paleomagnetism and fission-track ages of the Miocene sequence in the Kanazawa and Iozon areas, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **51**, 495–504.]
- 糸魚川淳二, 1980, 瑞浪地域の地質。瑞浪市化石博物館専報, **1**, 1–50. [Itoigawa, J., 1980, Geology of the Mizunami district, central Japan. *Monogr. Mizunami Fossil Mus.*, **1**, 1–50.]
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **99**, 22237–22259.
- 上口 椋・長谷部徳子, 2019, 北陸層群における火山性堆積物のフィッション・トラック年代及びU–Pb年代測定。フィッション・トラック, ニュースレター, **32**, 17–19. [Kamiguchi, R. and Hasebe, N., 2019, Fission track and U–Pb age determination on volcanoclastic rocks from Hokuriku Group. *Fission Track News Lett.*, **32**, 17–19.]
- 金子一夫, 2001, 富山県東部に分布する中新世火山岩—火山砕屑岩の層序と造構造史。地質雑, **107**, 729–748. [Kaneko, K., 2001, Stratigraphy and geotectonic history of Miocene volcanic-volcanoclastic rocks in the eastern part of Toyama Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **107**, 729–748.]
- Kaneoka, I., Matsuda, J., Lelikov, E. P. and S'edin, V. T., 1996, Isotope geochemistry of igneous rocks in the Japan Sea. In Isezaki, N., Bersenev, I. I., Tamaki, K., Karp, B. Y. and Lelikov, E. P., eds., *Geology and Geophysics of the Japan Sea (Japan-USSR Monograph Series, Vol. 1)*, TERRAPUB, Tokyo, 369–383.
- Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S. and Tamaki, K., 1992, ⁴⁰Ar–³⁹Ar analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: constraints on the age of formation of the Japan Sea. In Tamaki, K., Suehiro, H., Allan, J., McWilliams, M. et al., eds., *Proc. Ocean Drill. Program, Sci. Result*, **127/128**, Pt. 2, Ocean Drill. Program, College Station, Texas, 819–836.
- 鹿野和彦, 2018, グリーンタフの層序学的枠組みと地質学的事象。地質雑, **124**, 781–803. [Kano, K., 2018, Stratigraphic framework of the Green Tuff successions in Japan with reference to the associated geologic events. *J. Geol. Soc. Japan*, **124**, 781–803.]
- 鹿野和彦・原山 智・山本博文・竹内 誠・宇都浩三・駒澤正夫……須藤定久, 1999, 金沢。20 万分の1 地質図幅, 地質調査所。[Kano, K., Harayama, S., Yamamoto, H., Takeuchi, M., Uto, K., Komazawa, M., Sudo, S., 1999, *Geological Map of Japan 1: 200,000, Kanazawa*. Geol. Surv. Japan.]
- 鹿野和彦・加藤碩一・柳沢幸夫・吉田史郎, 1991, 日本の新生界層序と地史。地調報告, **274**, 地質調査所, 114p. [Kano, K., Kato, H., Yanagisawa, Y. and Yoshida, F., 1991, *Stratigraphy and Geologic History of the Cenozoic of Japan*. Rep. Geol. Surv. Japan, **274**, Geol. Surv. Japan, 114p.]
- Kano, K., Uto, K. and Ohguchi, T., 2007, Stratigraphic review of Eocene to Oligocene successions along the eastern Japan Sea: Implication for early opening of the Japan Sea. *J. Asian Earth Sci.*, **30**, 20–32.
- 鹿野和彦・山本博文・中川登美雄, 2007, 福井地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 68 p. [Kano, K., Yamamoto, H. and Nakagawa, T., 2007, *Geology of the Fukui District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, AIST, 68 p.]
- Kano, K., Yoshikawa, T., Yanagisawa, Y., Ogasawara, K. and Danhara, T., 2002, An unconformity in the early Miocene syn-rifting succession, northern Noto Peninsula, Japan: Evidence for short-term uplifting precedent to the rapid opening of the Japan Sea. *Isl. Arc*, **11**, 170–184.
- 粕野義夫, 1964, 北陸の新第三系—Biostratigraphyの現状と問題点—。化石, **7**, 27–35. [Kaseno, Y., 1964, Biostratigraphic problems of the Neogene strata in Hokuriku region, central Japan. *Fossils*, **7**, 27–35.]
- 粕野義夫, 1993, 石川県地質誌, 新版・石川県地質図(10 万分の1)説明書。石川県・北陸地質研究所, 321 p. [Kaseno, Y., 1993, *Geology of Ishikawa-ken, Japan (with Geological Maps)*. Ishikawa Pref. and Geol. Inst. Hokuriku, 321 p.]
- 粕野義夫・坂本 亨・石田志朗, 1961, 北陸東部の新第三紀地史に関する一試論。松下 進・池辺展生・森島正夫・中沢圭二・藤田和夫・石田志朗編, 横山次郎教授記念論文集, 横山次郎教授退官記念事業会, 83–95. [Kaseno, Y., Sakamoto, T. and Ishida, S., 1961, A contribution to the Neogene history of the eastern Hokuriku district, central Japan. In Matsushita, S., Ikebe, N., Morishima, M., Nakazawa, K., Fujita, K. and Ishida, S., eds., *Professor Jiro Makiyama Memorial Volume*, Prof. Jiro Makiyama Mem. Committee, 83–95.]
- 粕野義夫・下川弘晃, 1989, 石川・富山両県の新第三系層序。小林巖雄・立石雅昭編, 古日本海, **2**, 56–64. [Kaseno, Y. and Shimokawa, H., 1989, Neogene stratigraphy in Ishikawa and Toyama prefectures. In Kobayashi, I. and Tateishi, M., eds., *Paleo-Japan Sea*, **2**, 56–64.]*
- 粕野義夫・山田一雄, 1987, 表層地質図「鶴来」。5 万分の1 土地分類

- 基本調査「鶴来」, 石川県, 19-26. [Kaseno, Y. and Yamada, K., 1987, Surface geological map "Tsurugi". *Fundamental Land Classification Survey "Tsurugi"*, 1: 50,000, Ishikawa Pref., 19-26.]
- 鮎野義夫・山田一雄, 1988, 表層地質図「大聖寺・三国・永平寺(石川県分)」, 5 万分の 1 土地分類基本調査「大聖寺・三国・永平寺(石川県分)」, 石川県, 22-33. [Kaseno, Y. and Yamada, K., 1987, Surface Geological Map "Daishoji, Mikuni and Eiheiji (in Ishikawa Prefecture)". *Fundamental Land Classification Survey "Daishoji, Mikuni and Eiheiji (in Ishikawa Prefecture)"*, 1: 50,000, Ishikawa Pref., 22-33.]
- 鮎野義夫・山田一雄, 1991, 表層地質図「穴水・富来・剣地」, 5 万分の 1 土地分類基本調査「穴水・富来・剣地」, 石川県, 19-28. [Kaseno, Y. and Yamada, K., 1991, Surface Geological Map "Anamizu, Togi and Tsurugi". *Fundamental Land Classification Survey "Anamizu, Togi and Tsurugi"*, 1: 50,000, Ishikawa Pref., 19-28.]
- 柏木健司, 2012, 富山県八尾地域の楡原層(下部中新統)の堆積環境とチャート礫から産出した中・古生代放射虫化石. 福井県立恐竜博物館紀要, 11, 27-47. [Kashiwagi, K., 2012, Sedimentary environment of the Nirehara Formation (Lower Miocene) in the Yatsuo area, Toyama Prefecture of central Japan and Paleozoic and Mesozoic radiolarian fossils from chert pebbles and cobbles. *Mem. Fukui Pref. Dinosaur Mus.*, 11, 27-47.]
- 葛木健夫・石渡 明, 2001, 福井県北部の中新統系生累層に産するアルカリに富む玄武岩について. 日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨, 297. [Katsuragi, T. and Ishiwatari, A., 2001, Petrological study about alkali rich Miocene basalt in north part of Fukui prefecture. *108th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 297.]
- 葛木健夫・石渡 明, 2002, 福井県越前中央山地に分布する中新統系生累層火山岩類: 未分化なカルクアルカリマグマについて. 日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨, 318. [Katsuragi, T. and Ishiwatari, A., 2002, Miocene volcanic rocks of the Ito Formation, Echizen Central Mountains, Fukui prefecture: primitive calc-alkaline magmas. *109th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 318.]
- 河合正虎, 1956, 飛騨山地西部における後期中生代の地殻変動: 第 1 報(荒島岳南方山地の地質学的研究). 地質雑, 62, 559-573. [Kawai, M., 1956, On the late Mesozoic movement in the western part of Hida Plateau, Part 1. *J. Geol. Soc. Japan*, 62, 559-573.]
- 河合正虎, 1964, 根尾. 5 万分の 1 地質図幅および同説明書, 地質調査所, 66 p. [Kawai, M., 1964, *Geological Map of Neo, Scale 1: 50,000 and Its Explanatory Text*. Geol. Surv. Japan, 66 p.]
- Kimura, G. and Tamaki, K., 1986, Collision, rotation, and back-arc spreading in the region of the Okhotsk and Japan seas. *Tectonics*, 5, 389-401.
- Kimura, J. I., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., and Tanase, A., 2003, Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. *Isl. Arc*, 12, 22-45.
- Kimura, J. I., Stern, R. J. and Yoshida, T., 2005, Reinitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 117, 969-986.
- 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・テクニクス. 地質雑, 111, 286-299. [Kobayashi, H., Yamaji, A. and Masuda, F., 2005, Miocene stratigraphy, sedimentary environments and tectonics in the Wajima area, Noto Peninsula, southern margin of the Japan Sea. *J. Geol. Soc. Japan*, 111, 286-299.]
- 小井土由光・原山 智・遠藤俊治・下畑五夫, 1995, 両白山地における火成岩類の K-Ar 年代. 岐阜県博物館調査報告, 16, 15-20. [Koido, Y., Harayama, S., Endo, S. and Shimohata, I., 1995, K-Ar ages of igneous rocks in the Ryohaku mountains, central Japan. *Bull. Gifu Pref. Mus.*, 16, 15-20.]
- Lallemant, S. and Jolivet, L., 1986, Japan Sea: a pull-apart basin? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76, 375-389.
- López, J. C. and Ishiwatari, A., 2002, Petrogenesis of the tholeiitic basalt, calc-alkaline basaltic andesite and high magnesian andesite lava succession of the Oligo-Miocene Anamizu Formation in northeastern Noto Peninsula, central Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 97, 85-113.
- 横山次郎, 1930, 石川富山両県下の第三紀層概観. 地球, 14, 161-174. [Makiyama, J., 1930, Outline of Tertiary in Ishikawa and Toyama prefectures. *Chikyū*, 14, 161-174.]*
- Martin, A. K., 2011, Double saloon door tectonics in the Japan Sea, Fossa Magna, and the Japan Island Arc. *Tectonophysics*, 498, 45-65.
- Matsumoto, T. and Ikebe, N., 1958, Volcanostratigraphical studies on the Neogenic Hokuriku Province, north central Japan with special references to the volcanic rocks in the Toyama basin. *J. Inst. Polytech. Osaka City Univ., Ser. G, Geosci.*, 3, 79-112.
- 松尾秀邦・中西信弘, 1967, 金沢市医王山北麓部の医王山累層並びに医王山植物群. 早坂一郎先生喜寿記念文集, 早坂一郎先生喜寿記念事業会, 287-296. [Matsuo, H. and Nakanishi, N., 1967, The Iozen Formation and the Iozen Flora in the northern foot area of Mt. Iozen, Kanazawa City. *Professor Ichiro Hayasaka's 77th Birthday Memorial Volume*, Prof. Ichiro Hayasaka's 77th Birthday Mem. Committee, 287-296.]*
- 三浦 静, 1979, 北陸地方新第三系下部の火山層について. 地質学論集, 16, 149-155. [Miura, S., 1979, On the volcanostratigraphy of the Lower Neogene Tertiary in Hokuriku district, central Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 16, 149-155.]
- 三浦 静・東 洋一, 1974, 北陸積成区における下部中新統に関する諸問題. 福井大学教育学部紀要, 第 II 部(自然科学), 24, 15-25. [Miura, S. and Azuma, Y., 1974, On some problems relating to the Early Miocene formations in the Hokuriku sedimentary basin, central Japan. *Mem. Fac. Educ. Fukui Univ., Ser. II, Nat. Sci.*, 24, 15-25.]
- 森下知晃・荒井章司・脇本理恵・水田敏夫・石山大三・佐藤比奈子……山本真也, 2006, 石川県南部地域の第三紀流紋岩(医王山累層)中に産する暗色珪質脈の岩石学的特徴. 地質雑, 112, 273-283. [Morishita, T., Arai, S., Wakimoto, R., Mizuta, T., Ishiyama, D., Sato, H., and Yamamoto, S., 2006, Petrological characteristics of dark-colored silica veins in Tertiary rhyolite (the Iozen Formation) from the southern part of Ishikawa Prefecture, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 112, 273-283.]
- 中田節也・高橋正樹, 1979, 西南日本外帯・瀬戸内区における中新世の中性~珪長質マグマの化学組成広域的变化. 地質雑, 85, 571-582. [Nakada, S. and Takahashi, M., 1979, Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the Outer Zone and the Setouchi Province of Southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 85, 571-582.]
- 中江 訓・小松原 琢・高橋裕平・吉川敏之, 2013, 今庄及び竹波地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 110 p. [Nakae, S., Komatsubara, T., Takahashi, Y. and Yoshikawa, T., 2013, *Geology of the Imajo and Takenami District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, AIST, 110 p.]
- 中江 訓・小松原 琢・吉川敏之, 2015, 冠山地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 107 p. [Nakae, S., Komatsubara, T. and Yoshikawa, T., 2015, *Geology of the Kanmuri Yama District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, AIST, 107 p.]
- 中川登美雄・田原憲博, 1991, 福井県丹生山地北部中新統の岩相層序. 三浦静教授退官記念論文集, 三浦静教授退官記念会, 11-27. [Nakagawa, T. and Tahara, N., 1991, The Miocene lithostratigraphy in the northern part of the Niu mountains, Fukui Prefecture, central Japan. *Professor Shizuka Miura Memorial Volume*, Prof. Shizuka Miura Mem. Committee, 11-27.]
- 中島正志・水島聡子, 1984, 北陸地方の Miogypsina-Operculina 層

- 準のフィッション・トラック年代. 地質雑, **90**, 667–670. [Nakajima, T. and Mizushima, S., 1984, Fission-track ages of Miogypsina–Operculina horizons in Hokuriku District, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **90**, 667–670.]
- 中島正志・森本祐一郎・鈴木由紀江・渡邊 勇・三浦 静, 1983, 福井県第三系のフィッション・トラック年代. 福井大学教育学部紀要, 第Ⅱ部(自然科学), **33**, 53–65. [Nakajima, T., Morimoto, Y., Suzuki, Y., Watanabe, I. and Miura, S., 1983, Fission track ages of the Tertiary rocks distributed in Fukui Prefecture. *Mem. Fac. Educ. Fukui Univ., Ser II, Nat. Sci.*, **33**, 53–65.]
- 中島正志・沢田順弘・中川登美雄・林 昌代・板谷徹丸, 1990, 福井県北部新第三系の K–Ar 年代と古地磁気: 西南日本ブロックの回転に関して. 岩鉱, **85**, 45–59. [Nakajima, T., Sawada, Y., Nakagawa, T., Hayashi, A. and Itaya, T., 1990, Paleomagnetic results and K–Ar dating on Miocene rocks in the northern part of Fukui Prefecture, Central Japan: with reference to the rotation of Southwest Japan. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **85**, 45–59.]
- 中嶋 健, 2018, 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. 地質雑, **124**, 693–722. [Nakajima, T., 2018, Tectonics of sedimentary basins in and around Japan since the opening of the Sea of Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **124**, 693–722.]
- 中嶋 健・岩野秀樹・檀原 徹・山下 透・柳沢幸夫・谷村好洋……今堀誠一, 2019, 富山県八尾地域の新生界年代層序の再検討とテクトニクス. 地質雑, **125**, 483–516. [Nakajima, T., Iwano, H., Danhara, T., Yamashita, T., Yanagisawa, Y., Tanimura, Y., … Imahori, S., 2019, Revised Cenozoic chronostratigraphy and tectonics in the Yatsuo Area, Toyama Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **125**, 483–516.]
- 中世古幸次郎, 1953, 富山県南部の上部新第三紀層の層序. 大阪大学南校・北校理科報告, **2**, 87–100. [Nakaseko, K., 1953, On the stratigraphy of the upper Neogene formation in the southern part of Toyama Prefecture. *Sci. Rep. South Coll. North Coll. Osaka Univ.*, **2**, 87–100.]*
- 中世古幸次郎, 1954, 富山県南部の上部新第三紀層の層序の修正. 大阪大学南校・北校理科報告, **3**, 97–105. [Nakaseko, K., 1954, Correction of the stratigraphy of the upper Neogene formation in the southern Toyama Prefecture. *Sci. Rep. South Coll. North Coll. Osaka Univ.*, **3**, 97–105.]*
- Nohda S. and Wasserburg, G. J., 1986, Trends of Sr and Nd isotopes through time near the Japan Sea in northeastern Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **78**, 157–167.
- Nohda, S., Tatsumi, Y., Otofujii, Y., Matsuda, T. and Ishizaka, K., 1988, Asthenospheric injection and back-arc opening: isotopic evidence from northeast Japan. *Chem. Geol.*, **68**, 317–327.
- 野村隆光, 1992, 岐阜県南部, 中新統峰屋層の層序: 瀬戸内区中新世初期の火山活動. 瑞浪市化石博物館研究報告, **19**, 75–101. [Nomura, T., 1992, Stratigraphy of the Miocene Hachiya Formation, Gifu Prefecture, Central Japan; An instance of the volcanism took place in the Setouchi Geologic Province during Early Miocene. *Bull. Mizunami Fossil Mus.*, **19**, 75–101.]
- 野沢 保・坂本 亨・加納 隆・稲月恒夫, 1981, 白木峰地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 85 p. [Nozawa, T., Sakamoto, T., Kano, T. and Inazuki, T., 1981, *Geology of the Shirakimine District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, 85 p.]
- Okamura, S., Arculus, R. J., Martynov, Y. A., Kagami, H., Yoshida, T., Kawano, Y., 1998, Multiple magma sources involved in marginal-sea formation: Pb, Sr, and Nd isotopic evidence from the Japan Sea region. *Geology*, **26**, 619–622.
- Okamura, S., Inaba, M., Adachi, Y. and Shinjo, R., 2016, Miocene–Pliocene mantle depletion event in the northern Fossa Magna, western NE Japan. *J. Geodyn.*, **97**, 42–61.
- 大田敬豊・金子一夫・山本鋼志・大藤 茂, 2019, 富山県西部, 刀利層のジルコン年代と後背地の検討. 日本地質学会第 126 年学術大会講演要旨, 215. [Ota, H., Kaneko, K., Yamamoto, K. and Otoh, S., 2019, The Tori Formation in western Toyama Prefecture: Zircon ages and provenance. *126th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 215.]
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, **317**, 603–604.
- Oyama, K., 1950, *Studies on fossil molluscan biocoenosis, no. 1. Biocoenological studies of the mangrove swamps, with description of new species from Yatsuo Group*. Rep. Geol. Surv. Japan, 132, 16p.
- 尾崎正紀, 2010, 能登半島北部 20 万分の 1 地質図. 海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図 S-1, 産総研地質調査総合センター, 15 p. [Ozaki, M., 2010, *1: 200,000 Geological Map of the Northern Part of Noto Peninsula*. S-1. Seamless Geo-information of Coastal Zone "Northern Coastal Zone of Noto Peninsula", Geol. Surv. Japan, AIST, 15p.]
- Ren, R., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, **344**, 175–205.
- 坂本 亨, 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, 213, 28 p. [Sakamoto, T., 1966, *Cenozoic Strata and Structural Development in the Southern Half of the Toyama Basin, Central Japan*. Rep. Geol. Surv. Japan, **213**, 28 p.]
- 坂本 亨・今井 功・水野篤行・角 靖夫・井上正昭, 1959, 富山積成盆地南縁部の新生界. 地調月報, **10**, 75–82. [Sakamoto, T., Imai, I., Mizuno, A., Sumi, Y. and Inoue, M., 1959, Cenozoic strata in the southern part of the Toyama sedimentary basin. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **10**, 75–82.]
- 坂本 亨・野沢 保, 1960, 八尾. 5 万分の 1 地質図幅および同説明書, 地質調査所, 69 p. [Sakamoto, T. and Nozawa, T., 1960, *Geological Map of Yatsuo, Scale 1: 50,000 and Its Explanatory Text*. Geol. Surv. Japan, 69 p.]
- 酒寄淳史・河村潤一・山岸智和・杉本幹博・吉田武義, 1997, 石川県の中新統七曲層中に産する玄武岩の岩石学的特徴: 背弧側地域の低カリウム玄武岩. 岩鉱, **92**, 410–424. [Sakayori, A., Kawamura, J., Yamagishi, T., Sugimoto, M. and Yoshida, T., 1997, Petrological characteristics of basalts from the Miocene Nanamagari Formation in Ishikawa Prefecture: Low-K basalts from the back-arc side of central Japan. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **92**, 410–424.]
- 佐藤博明, 1989, 高マグネシア安山岩類の生成環境に関する研究. 昭和 63 年度科学研究費補助金一般 C 研究成果報告書, 99 p. [Sato, H., 1989, *Genetic Environments of High-Magnesian Andesite and Related Rocks*. Rep. Grant-in-Aid Sci. Res. (C), no. 61540593, 99p.]
- Sato, M., Shuto, K., Nohara-Imanaka, R., Takazawa, E., Osanai, Y. and Nakano, N., 2014, Repeated magmatism at 34 and 23–20 Ma producing high magnesian adakitic andesites and transitional basalts on southern Okushiri Island, NE Japan arc. *Lithos*, **205**, 60–83.
- Sato, M., Shuto, K., Uematsu, M., Takahashi, T., Ayabe, M., Takanashi, K., … Kawabata, H., 2013, Origin of Late Oligocene to Middle Miocene adakitic andesites, high magnesian andesites and basalts from the back-arc margin of the SW and NE Japan arcs. *J. Petrol.*, **54**, 481–524.
- 石油公団, 1985, 基礎試錐「富山」調査報告書. 石油公団, 60p. [Japan National Oil Corporation, 1985, *Survey Report of MITI "Toyama" Well*. Japan National Oil Corporation, 60p.]*
- 柴田 賢, 1973, 北陸層群中の火山岩類の K–Ar 年代. 地質学論集, **8**, 143–149. [Shibata, K., 1973, K–Ar ages of volcanic rocks from the Hokuriku group. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **8**, 143–149.]
- 柴田 賢・佐藤博明・中川正巳, 1981, 能登半島新第三系火山岩の K–Ar 年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, **76**, 248–252. [Shibata, K., Sato, H. and Nakagawa, M., 1981, K–Ar ages of Neogene volcanic rocks from the Noto Peninsula. *J. Japan. Assoc. Miner-*

- al. *Petrol. Econ. Geol.*, **76**, 248–252.]
- 柴田 賢・内海 茂・宇都浩三・中川忠夫, 1984, K–Ar 年代測定結果 2: 地質調査所測定未公表資料. 地調月報, **35**, 331–340. [Shibata, K., Uchiumi, S., Uto, K. and Nakagawa, T., 1984, K–Ar age results 2: new data from the Geological Survey of Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **35**, 331–340.]
- Shimazu, M., Kagami, H., Kawano, Y. and Yamamoto, G., 1993, Geochemistry of Early-Middle Miocene volcanic rocks in the back-arc regions of Japan: Sado, Noto and Tadami areas. *J. Geol. Soc. Japan*, **99**, 799–811.
- 新正裕尚・折橋裕二・和田稯隆・角井朝昭・中井俊一, 2007, 紀伊半島中新世珪長質火成岩類の全岩組成の広域的変化. 地質雑, **113**, 310–325. [Shinjoe, H., Orihashi, Y., Wada, Y., Sumii, T. and Nakano, S., 2007, Regional variation of whole rock chemistry of the Miocene felsic igneous rocks in the Kii Peninsula, southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **113**, 310–325.]
- 新村太郎・荒川洋二, 2008, 富山県西部の中新統岩屑層に産する安山岩の K–Ar 年代. 熊本学園大学論集『総合科学』, **15**, 19–27. [Shinmura, T. and Arakawa, Y., 2008, K–Ar age of andesite lava in Miocene Iwaine Formation, western part of Toyama Prefecture, central Japan. *Kumamoto Gakuen Univ. J. Liberal Arts Sci.*, **15**, 19–27.]
- 新村太郎・小林洋二・荒川洋二・板谷徹丸, 1994, 飛騨地域に分布する安山岩岩脈の K–Ar 年代. 岩鉱, **89**, 285–293. [Shinmura, T., Kobayashi, Y., Arakawa, Y. and Itaya, T., 1994, K–Ar ages of andesite dykes in the Hida region. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **89**, 285–293.]
- 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, 236 p. [Shuto, K., 2009, *The Northeast Japan Arc, Opening of the Japan Sea and Magma Genesis*. Kyoritsu Publ. Co., 236p.]
- Shuto, K., Imanaka, R. N., Sato, M., Takahashi, T., Takazawa, E., Kawabata, H., Takanashi, K.,...Fujibayashi, N., 2015, Across-arc variations in geochemistry of Oligocene to Quaternary basalts from the NE Japan Arc: Constraints on source composition, mantle melting and slab input composition. *J. Petrol.*, **56**, 2257–2294.
- 相馬恒雄・丸山茂徳, 1989, 日本海の形成とフォッサマグナの起源. 月刊地球, **11**, 526–531. [Sohma, T. and Maruyama, S., 1989, Formation of the Japan Sea and the origin of Fossa Magna. *Chikyū Mon.*, **11**, 526–531.]*
- 須藤定久, 1979a, 刀利礫岩層と日本海の形成. 研究連絡誌「日本海」, **10**, 183–185. [Sudo, S., 1979a, On the formation of the Japan Sea from the suggestion of the Tori Conglomerate Formation. *Circular Nihonkai (Japan Sea)*, **10**, 183–185.]
- 須藤定久, 1979b, 富山県太美山山地の地質(概報). 地質学論集, **17**, 187–194. [Sudo, S., 1979b, On the geology of the Futomiyama Mountains, Toyama Prefecture, central Japan (preliminary report). *Mem. Geol. Surv. Japan*, **17**, 187–194.]
- 角 靖夫・野沢 保・井上正昭, 1989, 石動地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 118 p. [Sumi., Y., Nozawa, T. and Inoue, M., 1989, *Geology of the Isurugi District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, 118 p.]
- 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. 地質雑, **112**, 14–32. [Takahashi, M., 2006, Tectonic boundary between Northeast and Southwest Japan Arcs during Japan Sea opening. *J. Geol. Soc. Japan*, **112**, 14–32.]
- 高橋俊郎・周藤賢治, 1999, 富山県南部の中新統岩屑層のアダカイト質安山岩, 高マグネシア安山岩, カルカルカリ系列安山岩およびソレライト系列安山岩の成因. 地質雑, **105**, 789–809. [Takahashi, T. and Shuto, K., 1999, Genesis of adakitic andesite, high-magnesian andesite, calc-alkaline andesite and tholeiitic andesite in the Miocene Iwaine Formation, southern part of Toyama Prefecture, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **105**, 789–809.]
- 竹内 誠・古川竜太・長森英明・及川輝樹, 2017, 泊地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 121 p. [Takeuchi M., Furukawa, R., Nagamori, H. and Oikawa, T., 2017, *Geology of the Tomari District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, AIST, 121 p.]
- 巽 好幸, 2003, 安山岩と大陸の起源, ローカルからグローバルへ. 東京大学出版会, 213 p. [Tatsumi, Y., 2003, *High-Mg Andesite Genesis, Continental Crust Formation, and Mantle Evolution*. Univ. Tokyo Press, 213p.]
- Tatsumi, Y., 2006, High-Mg andesites in the Setouchi Volcanic Belt, southwestern Japan: analogy to Archean magmatism and continental crust formation? *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**, 467–499.
- Tatsumi, Y., Otofujii, Y., Matsuda, T. and Honda, S., 1989, Opening of the Sea of Japan back-arc basin by asthenospheric injection. *Tectonophysics*, **166**, 317–329.
- 巽 好幸・谷 健一郎・佐藤佳子・檀原 徹・兵藤博信・川畑 博..... Dunkley, D.J., 2010, マルチ年代測定による信頼性の高い火山活動年代の推定: 小豆島に分布する瀬戸内火山岩類への適用. 地質雑, **116**, 661–679. [Tatsumi, Y., Tani, K., Sato, K., Danhara, T., Hyodo, H., Kawabata, H.,...Dunkley, D. J., 2010, Multi-chronology of volcanic rocks leading to reliable age estimate of volcanic activity: an example from the Setouchi volcanic rocks on Shodo-Shima Island, SW Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **116**, 661–679.]
- 富井康博・前田崇志・塚脇真二, 2002, 石川県辰口町～小松市北部地域における地質学的研究. 日本海域研究, **33**, 1–22. [Tomii, Y., Maeda, T. and Tsukawaki, S., 2002, Geological study of the area of Tatsunokuchi Town and the northern part of Komatsu City, Ishikawa Prefecture, central Japan. *Japan Sea Res.*, **33**, 1–22.]
- 富岡伸芳・石渡 明・棚瀬充史・清水 智・加々美寛雄, 2000, 福井県大野市, 前期中新世荒島岳コールドロンの地質と岩石. 地質雑, **106**, 313–329. [Tomioka, N., Ishiwatari, A., Tanase, A., Shimizu, S. and Kagami, H., 2000, Geology and petrology of the Early Miocene Arashimadake cauldron in Ono City, Fukui Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **106**, 313–329.]
- 土橋広宣・石渡 明, 2006, 富山県西部の中新世火山岩類から見出されたアダカイト質角閃石安山岩と捕獲岩について. 日本地質学会第 113 年学術大会講演要旨, 243. [Tsuchihashi, H. and Ishiwatari, A., 2006, Adakitic hornblende-andesite and xenoliths in the Miocene volcanic rocks, western part of Toyama Prefecture, central Japan. *113th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 243.]
- 津田禾粒, 1953, 富山県八尾町附近の地質—特に八尾層群に関する地質学的研究—. 新潟大学理学部研究報告, 第二類, **1**, 1–35. [Tsuda, K., 1953, Geology of Yatsuo Area in Toyama Prefecture. *J. Fac. Sci. Niigata Univ., Ser. 2*, **1**, 1–35.]
- 津田禾粒, 1955, 八尾層群の堆積環境について: いわゆる Green Tuff 地域の中新統に関する堆積環境の研究(その 1). 地質雑, **61**, 532–542. [Tsuda, K., 1955, On the sedimentary environment of the Yatsuo Group: A study of the sedimentary environment of the Miocene deposits in the so-called “Green Tuff” Region (Part 1). *J. Geol. Soc. Japan*, **61**, 532–542.]
- Tsuda, K., 1960, Paleo-ecology of the Kurosedani fauna. *J. Fac. Sci. Niigata Univ., Ser. 2*, **3**, 171–203.
- 塚本一郎, 1988, 能登半島各地火山岩の K–Ar 法による年代測定値資料. 鮎野義夫編, 石川県地質誌, 新版・石川県地質図(10 万分の 1)説明書. 石川県・北陸地質研究所, 225–226. [Tsukamoto, I., 1988, K–Ar ages of volcanic rocks from the Noto Peninsula. In Kaseno, Y., ed., *Geology of Ishikawa-ken, Japan (with Geological Maps)*. Ishikawa Pref. and Geol. Inst. Hokuriku, 225–226.]
- 塚脇真二・陰地章仁, 2008, 石川県金沢市ならびにその周辺地域の上部新生界層序. 日本海域研究, **39**, 17–30. [Tsukawaki, S. and Ooji, A., 2008, Upper Cenozoic stratigraphy of Kanazawa City and its environs, central Japan. *Japan Sea Res.*, **39**, 17–30.]

- 植田良夫・青木謙一郎, 1970, 富山県南西部に分布する月長石流紋岩の K-Ar 年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, **63**, 28–29. [Ueda, Y. and Aoki, K., 1970, K-Ar dating on moonstone rhyolite in Toyama Prefecture, central Honshu. *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **63**, 28–29.]
- 上松昌勝・周藤賢治・加々美寛雄, 1995, 能登半島北部漸新統六水累層に産するソレライト質玄武岩, 高マグネシア安山岩, 古銅輝石安山岩およびアダカイト様安山岩の成因. 地質学論集, **44**, 101–124. [Uematsu, M., Shuto, K. and Kagami, H., 1995, Genesis of tholeiitic basalt, high magnesian andesite, bronzite andesite and adakite-like andesite of the Late Oligocene Anamizu Formation, northern Noto Peninsula, Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **44**, 101–124.]
- 氏家 治・弘田貴巳, 1993, 福井県西部, 国見岳の中新世低カリウムソレライトの化学組成. 岩鉱, **88**, 379–389. [Ujike, O. and Hirota, T., 1993, Chemical composition of Miocene low-K tholeiites from Kunimi-dake, Fukui. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **88**, 379–389.]
- Ujike, O. and Tsuchiya, N., 1993, Geochemistry of Miocene basaltic rocks temporally straddling the rifting of lithosphere at the Akita–Yamagata area, northeast Japan. *Chem. Geol.*, **104**, 61–74.
- 梅田美由紀, 1997, 美濃帯南条山地中生界を覆う後期漸新世礫岩中の正珪岩礫の特徴とチャート礫より得られた放散虫化石. 地球科学, **51**, 199–211. [Umeda, M., 1997, Petrography of ortho-quartzite clasts and radiolarian fossils in chert clasts in the Late Oligocene conglomerate on the Mesozoic complex of the Nanjo Massif in the Mino Terrane, Central Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **51**, 199–211.]
- Watanabe, S. and Takahashi, T., 2019, Petrological and geochemical features of Miocene adakitic volcanic rocks in eastern part of Hokuriku region, SW Japan. *Japan Geosci. Union Annu. Meet. 2019, Abstr.*, SGC41-P05.
- Watanabe, S., Yamada, R. and Takahashi, T., 2020, Miocene adakitic volcanism in Toyama prefecture in the Hokuriku region, northern end of the SW Japan arc. *JpGU-AGU Joint Meet. 2020, Abstr.*, SGC49-01.
- Yabe, A., 2008, Plant megafossil assemblage from the Lower Miocene Ito-o Formation, Fukui Prefecture, central Japan. *Mem. Fukui Pref. Dinosaur Mus.*, **7**, 1–24.
- 山田直利・坂本 亨・金子一夫, 1998, 富山県東部に「高峯山火山」は存在するか: K-Ar 年代測定結果. 地球科学, **52**, 235–239. [Yamada, N., Sakamoto, T. and Kaneko, K., 1998, K-Ar ages of “the Takamineyama Volcanic Rocks”, Toyama Prefecture, central Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **52**, 235–239.]
- Yamada, R., Takahashi, T. and Ueda, H., 2019, Petrogenesis of Oligocene to Miocene volcanic rocks in the Tonami area, central Japan: temporal evolution of continental-to island-arc volcanism during the Japan Sea opening. *Japan Geosci. Union Ann. Meet. 2019, Abstr.*, SGL28-P01.
- 山田来樹・高橋俊郎・植田勇人, 2019, 富山県南砺市に分布する漸新世～中新世流紋岩類のジルコン U-Pb 年代とその成因. 日本地質学会第 126 年学術大会講演要旨, 174. [Yamada, R., Takahashi, T. and Ueda, H., 2019, Zircon U-Pb ages and the origin of Oligocene to Miocene rhyolites in Nanto City, Toyama Prefecture, central Japan. *126th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 174.]
- Yamada, R. and Yamada, N., 2018, Lithostratigraphy of the Miocene Iwaine Formation in the Yatsuo area, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ. (Geol.)*, **33**, 25–40.
- 山田敏弘・手塚翔太・神谷隆宏・柳沢幸夫, 2017, 金沢市南部に分布する中新統「犀川層」の層序学的再検討. 地調研報, **68**, 183–221. [Yamada, T., Teduka, S., Kamiya, T. and Yanagisawa, Y., 2017, Stratigraphic revision of the Miocene “Saikawa Formation” distributed in the southern Kanazawa area, Ishikawa Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **68**, 183–221.]
- Yamamoto, T. and Hoang, N., 2009, Synchronous Japan Sea opening Miocene fore-arc volcanism in the Abukuma Mountains, NE Japan: An advancing hot asthenosphere flow versus Pacific slab melting. *Lithos*, **112**, 575–590.
- 山野井徹・津田禾粒, 1986, 富山県黒瀬谷層(中部中新統)に見出されるマングローブ林の様相. 国立科博専報, **19**, 55–68. [Yamanoi, T. and Tsuda, K., 1986, On the conditions of paleo-mangrove forest in the Kurosedani Formation (Middle Miocene), central Japan. *Mem. Nat. Sci. Mus.*, **19**, 55–68.]
- 山崎正男・宮島吉雄, 1970, 富山県南西部に分布する月長石流紋岩の噴出時代について. 岩石鉱物鉱床学会誌, **63**, 22–27. [Yamasaki, M. and Miyajima, Y., 1970, Eruption age of moonstone rhyolite in Toyama Prefecture, central Honshu. *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **63**, 22–27.]
- 山下 昇・鮎野義夫・糸魚川淳二編, 1988, 日本の地質 5, 中部地方 II. 共立出版, 310 p. [Yamashita, N., Kaseno, Y. and Itoigawa, J., eds., 1988, *Regional Geology of Japan, Part 5, Chubu II*. Kyoritsu Shuppan, 310p.]
- 山崎 亮・石渡 明, 2007, 福井県丹生山地に分布する中新統糸生累層火山岩類の岩石学的研究: 特に低 Ni 玄武岩について. 日本地質学会第 114 年学術大会講演要旨, 305. [Yamazaki, R. and Ishiwatari, A., 2007, Petrologic study of volcanic rocks from the Miocene Ito Formation in the Niu Mountains, Fukui Prefecture, central Japan: with notes on low-Ni basalt. *114th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 305.]
- 柳沢幸夫, 1999, 富山・石川県境の匠王山地域に分布する中新統の珪藻化石層序と対比. 地調月報, **50**, 67–81. [Yanagisawa, Y., 1999, Diatom biostratigraphy of the Miocene sequence in the Itozen area, Hokuriku Province, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 67–81.]
- 柳井修一・青木一勝・赤堀良光, 2010, 日本海の拡大と構造線: MTL, TTL, そしてフォッサマグナ. 地学雑誌, **119**, 1079–1124. [Yanai, S., Aoki, K. and Akahori, Y., 2010, Opening of Japan Sea and major tectonic lines of Japan: MTL, TTL and Fossa Magna. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **119**, 1079–1124.]
- Yin, A., 2010, Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, **488**, 293–325.
- 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. [Yoshida, T., 2009, Late Cenozoic magmatism in the northeast Honshu arc, Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **63**, 269–288.]
- 吉川敏之, 2006, 福井県大野市南方, 平家平付近の第三系と地すべり. 地調研報, **57**, 121–126. [Yoshikawa, T., 2006, Geology of the Tertiary and landslide around Heike-daira, Fukui Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **57**, 121–126.]
- 吉川敏之・鹿野和彦・柳沢幸夫・駒澤正夫・上嶋正人・木川栄一, 2002, 珠洲岬, 能登飯田及び宝立山地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 76 p. [Yoshikawa, T., Kano, K., Yanagisawa, Y., Komazawa, M., Joshima, M. and Kikawa, E., 2002, *Geology of the Suzimisa, Noto-iida and Horyuzan District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, AIST, 76 p.]
- Zadeh, A. I., Honda, S. and Tsepelev, I., 2013, Linking mantle upwelling with the lithosphere descent and the Japan Sea evolution: a hypothesis. *Sci. Rep.*, **3**, 1137, doi: 10.1038/srep01137.
- [URL] 産総研地質調査総合センター(The Geological Survey of Japan, AIST), 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2(1: 200,000 Seamless Geological Map of Japan, V2), <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2.html>.

* English translation from the original written in Japanese.

(著者プロフィール)

山田来樹 新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程在籍. 17 年富山大学理学部卒, 19 年 新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了. 研究内容: 地質学・岩石学・地球化学的手法を用いた地球

の火成活動と大陸の進化過程の解明。本研究では原稿の立案、文献調査および原稿執筆を担当。E-mail: yamada.raiki.geo@gmail.com

高橋俊郎 新潟大学理学部地質科学プログラム准教授。96年 新潟大学理学部卒, 02年 新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了

(理学博士), 02年 海洋技術開発センター(現海洋研究開発機構), 14年から現職。研究内容: 北陸地方の中新世火成岩の岩石学的・地球化学的研究。本研究では文献調査, 原稿執筆を担当。E-mail: toshirot@geo.sc.niigata-u.ac.jp

(要 旨)

山田来樹・高橋俊郎, 2021, 北陸地方における日本海拡大期火成活動の時空変遷: 漸新世~中期中新世火山岩類の層序, 年代, 岩石学的特徴. 地質雑, **127**, 507–525. (Yamada, R. and Takahashi, T., 2021, Temporal and spatial changes of magmatism related to the Japan Sea opening in the Hokuriku region, central Japan: stratigraphy, chronology and petrology of Oligocene to middle Miocene volcanic rocks. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 507–525.)

日本海拡大時には北陸地方を含む環日本海地域で活発な火成活動が起きた。日本海拡大期に北陸地方で起きた最初の火成活動は, 33 Ma 頃の能登半島での安山岩質マグマの活動である。能登半島での安山岩質火成活動は, デイサイト質マグマの活動を挟んで前期中新世にも発生した。一方で後期漸新世~前期中新世には, 北陸地方の広範囲で月長石を含む流紋岩質火砕流が噴出した。その後, 多様な化学組成をもつ玄武岩~安山岩が前期中新世に北陸地方の全域で大量に噴出した。この火成活動に続いて前期~中期中新世には大量の流紋岩が噴出し, 北陸地方は急速な沈降を開始した。この日本海拡大に関連した活発な火成活動は, 西南日本弧の時計回り回転の終了にあたる 16 Ma 頃に急速に減退した。これら火成岩類を形成したマグマは, 日本海拡大時にアセノスフェア貫入の影響を受けたマントルウェッジや沈み込むスラブ, 大陸地殻が溶融することによって生成されたと考えられている。