サハリンの新生代火山活動と背弧拡大テクトニクス

岡 村 聡* 八 幡 正 弘**

Cenozoic Volcanism of Sakhalin and Back-arc Spreading

Satoshi OKAMURA* and Masahiro YAHATA**

Abstract

The Cenozoic volcanic rocks in Sakhalin Island record a tectonic transition from convergence to divergence in connection with the formation of the Japan Basin and the Kuril Basin. The magmatism of this region comprises the following distinct stages of tectono-magmatic evolution: 1) subduction-related calc-alkaline volcanism in the Oligocene along the northeastern edge of Eurasian continent. 2) early Miocene volcanism characterized by island arc tholeiites surrounding the developing back-arc basins. 3) late Miocene to Pliocene volcanism, yielding within-plate geochemical signatures. The temporal geochemical trends over 55 m.y. in volcanic rocks from Sakhalin and nearby Sikhote-Alin suggest that there was a change in magma source from the lithosphere to the depleted asthenosphere as both the Japan Sea and the Okhotsk Sea opening progressed.

The early Miocene volcanism along the western edge of central Hokkaido from Rebun Island to off the coast of Tomakomai is characterized by bimodal volcanic rocks. The lack of correlation between relatively enriched basalts from central Hokkaido and depleted basalts from Sakhalin and Sikhote-Alin suggests that the source of the former basalts does not have a significant contribution from the asthenosphere.

Key words : Sakhalin, back-arc basin, asthenosphere, bimodal volcanism

キーワード : サハリン, 背弧海盆, アセノスフェア, バイモーダル火山活動

I. はじめに

サハリン島はユーラシア大陸北東縁辺部に位置し、後期白亜紀～新生代の火山-深成岩類が分布する地域である。これら火成岩類の起源は、白亜紀に生じたユーラシアプレートに対するイザナギプレートの沈み込み、および新生代後期に生じた2つの背弧海盆(図1)、すなわち日本海とオホ-

ツク海の拡大テクトニクスに密接に関連する。このうち日本海の拡大については、日本列島の地質情報および日本海のODPによって多くの新知見が明らかにされ、背弧海盆形成と火山活動の成因関係についての詳細な検討が行われている(例えば、吉田ほか, 1997)。一方、オホーツク海の拡大に関しては、近接する北海道の火山岩の絶対年代や岩石学的特徴が多数報告されはじめ、例えば後

* 北海道教育大学札幌校

** 北海道立地質研究所

* Sapporo Campus, Hokkaido Education University

** Geological Survey of Hokkaido

図 1 ユーラシア大陸北東縁辺部の位置図。
 波線は深発地震の等深線、黒丸は ODP leg 127, 128 掘削地点。
 MK: マカロフ, TM: トマリ, YS: ユージノサハリンスク。
 Fig. 1 General location of northeastern Eurasian margin.
 Broken line: seismicity contour, Solid circle: ODP leg127, 128 sites.
 MK: Makarov, TM: Tomari, YS: Yuzhno-Sakhalinsk.

藤ほか(1995)は北海道北部の火山岩の年代測定と岩石化学的性質から、14~9Maの火山活動にともない千島海盆が拡大したと考えた。Ikeda(1998)は北海道東部の中新世玄武岩を岩石化学的に検討し、7~9Maの玄武岩が背弧海盆型玄武岩の特徴を示し、その活動が千島海盆の形成に関連したと主張している。竹内(1997)は南サハリンの火山岩の年代測定をもとに、漸新世火山活動が日本海拡大の初期リフティング、前期中新世火山活動が千島海盆の拡大によるアセノスフェアの上昇を示すと主張した。さらにサハリンから北海道にかけて順次火山活動の年代が若くなるのは、千島海盆の拡大が千島弧の南下にともなう右横ず

れ運動のためであると考えた。このように近年、オホーツク海周辺の陸域に関する情報が得られつつある一方で、千島海盆をつくる基盤岩についてはほとんど不明であり、とりわけ千島海盆の形成に関与したとされる背弧域のアセノスフェアの実態は十分解明されているとはいえない。背弧海盆の形成メカニズムやタイミングを明らかにする上で、関連する火山岩の岩石学的検討は急務となっている。

本論では、サハリン、北海道、シホテ・アリンからなるユーラシア大陸北東縁辺部の新生代火山活動の時間空間分布と岩石学的特徴を概観し、次に日本海・オホーツク海の拡大テクトニクスと火

山活動との関連性を検討し、アセノスフェアマントルがこれら背弧海盆の形成に重要な役割を果たしたことを示す。

II. 地質および火成活動の概要

ユーラシア大陸北東縁辺には、先カンブリア紀のヒンガン-ブレヤ地塊・ハンカ地塊を基盤として、その東側に後期古生代～初期中生代のオフィオライト、およびオリストストロームを主とする複合岩体からなるシホテ・アリン-サハリン褶曲帯が広がる（図1）。本褶曲帯の東部では白亜紀後期から古第三紀前半にイザナギプレートがユーラシアプレートに沈み込み、カルクアルカリ質の火山-深成火成活動が生じた。これは背弧海盆をともしない Andean-type の大陸縁辺型活動であったと考えられている（Zonenshain *et al.*, 1990）。その後の始新世から鮮新世初期にかけては、シホテ・アリン周辺では玄武岩～玄武岩質安山岩が噴出し、その広がりには南のナホトカから北端のアムール川河口に至る長さ1500km、幅100kmの範囲におよぶ。この時期の火山活動は高アルミナ玄武岩～アルカリ玄武岩の噴出を主体としており、それ以前の酸性岩類からなる白亜紀火成活動とは対照的である。サハリンから北海道は、古第三紀から新第三紀にかけて日本海盆と千島海盆の拡大、およびそれと密接にともなうオホーツクプレートのユーラシアプレートへの斜め衝突（Kimura, 1994）に支配されており、シホテ・アリン周辺で見られる酸性岩から塩基性岩への火成活動の転換は、これらのテクトニクスの発生時期にはほぼ対応する。

サハリンとシホテ・アリンとはタタール（間宮）海峡トラフによって隔てられるが、南サハリンの西海岸に沿って新生代火山岩類が認められ、シホテ・アリンの火山-深成火成活動帯の東縁部とみなされる。南サハリンに分布する火山岩類は、後期始新世～後期漸新世のアラカイ層、初期中新世のチェホフ層、および中期中新世末～初期鮮新世のマルヤマ層～オルロボ層に大別される（図2, 3）。

アラカイ層火山岩類は、ホルムスクからトマリに至る西海岸に沿って分布し、浅海性砂岩・シル

ト岩にともなう玄武岩、安山岩、デイサイトの火砕岩・溶岩・貫入岩からなる。貫入岩からは30.6, 38.6Ma（Okamura *et al.*, 1998b）、アラカイ層礫岩中の安山岩礫から26～28Ma（竹内, 1997）のK-Ar年代が得られている。チェホフ層火山岩はチェホフからトマリに至る西海岸に分布し、玄武岩～玄武岩質安山岩の火砕岩を主体とし塊状溶岩をともしなう。火砕岩はハイアロクラスタイトやその二次堆積物の産状を示す。最上部の塊状溶岩から16.9MaのK-Ar年代が得られている（Okamura *et al.*, 1998b）。東海岸マカロフ周辺にもチェホフ層火山岩が分布し、貫入岩から21.9Ma、一部同時異相の関係にある下位のネベリスク層溶岩から22.8MaのK-Ar年代が得られている（竹内, 1997）。マカロフ周辺の中央サハリン断層に沿って白亜系・前期中新世のホルムスク層・チェホフ層を貫く多数の貫入岩が認められ、それらの火山岩から21.8～22.1MaのK-Ar年代が得られており、チェホフ層の堆積年代と同時期であったと考えられる（竹内, 1997）。次に中期中新世末～初期鮮新世に活動した火山岩としては、西海岸のラマノン岬に広がるマルヤマ層上部の玄武岩質ハイアロクラスタイトからその上位に重なるオルロボ層の玄武岩、安山岩、デイサイトの盾状火山・溶岩ドームがある。マルヤマ層火山岩からは11.3, 11.8Ma¹⁾、オルロボ層溶岩から4.7MaのK-Ar年代が得られている（Shimazu *et al.*, 1992）。ラマノン岬の北部にあるウグレゴルスクからさらに北方にかけて多数のアルカリ岩質ドレライト～モンゾニ岩・閃長岩が貫入岩床・併盤・岩脈として産する。ドレライトからは9.2MaのK-Ar年代が得られている（Shimazu *et al.*, 1992）。そのほか後期中新世に活動したと考えられる粗面岩質火山岩が南サハリン南西端のクリリオン半島に溶岩・岩頸・岩脈として産する。

III. サハリン～シホテ・アリンの新生代火山岩類の岩石学的性質

アラカイ層、チェホフ層およびマルヤマ層～オルロボ層に代表される火山岩類は、それぞれユニークな岩石化学的性質を有する（表1）。本論では、

図 2 南サハリンの地質概略図。(岡村, 1994)

1. 第四系, 2. 上部中新統～鮮新統, 3. 中新統, 4. 古第三系, 5. 先第三系,
6. デイサイト (鮮新世), 7. 安山岩～玄武岩 (中新世～鮮新世), 8. 粗面安山岩 (後期中新世～鮮新世), 9. 安山岩～玄武岩 (中期中新世), 10. アルカリドレライト～はんれい岩 (後期中新世), 11. はんれい岩～閃緑岩 (中新世), 12. 花崗岩類 (古第三紀).

Fig. 2 Geological map of south Sakhalin. (Okamura, 1994)

1. Quaternary, 2. Upper Miocene～Pliocene, 3. Miocene, 4. Paleogene, 5. pre-Tertiary, 6. dacite (Pliocene), 7. andesite～basalt (Miocene Pliocene), 8. trachyandesite (Late Miocene～Pliocene), 9. andesite～basalt (Middle Miocene), 10. alkali dolerite～gabbro (Late Miocene), 11. gabbro～diiorite (Miocene), 12. granites (Paleogene).

表 1 サハリンのアラカイ層・チェホフ層火山岩の
主成分・微量元素全岩化学組成

Table 1 Major and trace elements data of Arakai
and Chekhov Formations from Sakhalin.

Sample	S-12A	S-17	SA-04	S-11
Locality	Kholmsk	Kholmsk	Chekhov	Chekhov
Age(Ma)	38.7	30.7		16.9
[wt%]				
SiO ₂	54.64	55.32	50.49	47.70
TiO ₂	0.95	1.00	0.71	0.90
Al ₂ O ₃	17.82	18.04	19.21	19.32
FeO*	7.04	6.72	9.23	10.33
MnO	0.10	0.15	0.21	0.20
MgO	6.17	3.74	4.42	5.60
CaO	7.71	9.72	10.81	12.18
Na ₂ O	3.55	3.72	2.53	2.23
K ₂ O	1.05	1.04	0.31	0.65
P ₂ O ₅	0.31	0.32	0.14	0.09
Total	99.34	99.77	98.06	99.21
[ppm]				
Nd	19	15.6	8.7	6
Sm	4.2	3.7	2.4	1.9
Ba	249	245	154	161
Co	39.5	33.2	32.9	37.2
Cr	198	205	23	11
Cu	50.4	50.1	41.3	96.2
Nb	7	8	1	0.2
Ni	134	115	14	7
Rb	20	16	12	9
Sr	765	642	363	349
V	168	194	252	379
Y	21.6	21.9	20.0	17.4
Zn	56	70	81	61
Zr	117	119	39	18

S-12A and S-17: Arakai Formation

SA-04 and S-11: Chekhov Formation

FeO*: total iron as FeO

XRF: X-ray fluorescence (Hokkaido Univ.)

ID: isotope dilution (Okayama Univ.)

Age: Okamura *et al.* (1998b)

Major and trace elements (except Nd and Sm)
were analyzed by XRF, Nd and Sm by isotope
dilution mass spectrometry.

後述するようにこれらの各層火山岩を3つのグループに区分した。まずアラカイ層火山岩（グループ1）は、カルクアルカリ岩系列の玄武岩質安山岩、安山岩、デイサイトからなる。微量元素存在度が示すスパイダー図は、上に凸のパターンを示しNbに弱い負の異常が認められることから、活動的大陸縁辺の沈み込み帯に特徴的な性質（Pearce, 1983）を有する（図4-A）。チェホフ層火山岩（グループ2）は、ソレアイト系列の組成トレンドを示す玄武岩～玄武岩質安山岩である。スパイダー図ではNbの負異常が大きく、その他の微量元素もアラカイ層火山岩に比べ低い存在量を示し（図4-B）、典型的な島弧型低アルカリソレアイトである。一方、マルヤマ層～オルロボ層およびそれと同時期に活動した火山岩類（グループ3）は、高アルカリソレアイトの玄武岩・安山岩、アルカリ岩系列のドレライト・粗面岩からなり、全体に高アルカリ質な火山岩を主体とする。スパイダー図は、前述の2つのグループとは対照的にスムーズな上に凸のパターンを示し、Nbの負異常が認められないプレート内玄武岩の特徴である（図4-A）。

次にSr およびNd 同位体組成に注目すると、アラカイ層火山岩は⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初生値（SrI）が0.7039～0.7041、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 初生値（NdI）が0.51284～0.51286を示し、Bulk Earthに近いエンリッチした組成を示し、チェホフ層火山岩はSrIが0.7036、NdIが0.5129でよりMORBに近いデブリートした組成を示す（Okamura *et al.*, 1998a）。一方マルヤマ層～オルロボ層火山岩ではSrIが0.7038～0.7058でNdIが0.51264～0.51294と広い組成幅を示すが、Bulk Earthとほぼ同程度のエンリッチした組成が主体をなす（Shimazu *et al.*, 1992）。

タタール海峡を挟んでサハリンと近接するシホテ・アリン地域は、サハリンときわめて類似の火山岩が分布する。ここではシホテ・アリンからサハリンに至る新生代火山岩類を、岩石学的性質と活動年代の共通性に着目し以下の3つのグループに区分した（図3）。すなわちアラカイ層に対比されるグループ1火山岩は、シホテ・アリンのクズ

図 4 サハリンの新生代玄武岩類のスパイダー図。

Group 1: アラカイ層, Group 2: チェホフ層, Group 3: 中期中新世～前期鮮新世 (Shimazu *et al.*, 1992), BABB: 日本海 (大和海盆) の基盤岩を構成する背弧海盆玄武岩 (Poulet *et al.*, 1995). MORB 規格化値は Pearce (1983) による。

Fig. 4 Spiderdiagram for Cenozoic basalts from Sakhalin.

Group 1: Arakai Formation, Group 2: Chekhov Formation, Group 3: Middle Miocene~Early Pliocene (Shimazu *et al.*, 1992), BABB: back-arc basin basalt from basement of Japan Sea (Yamato Basin) (Poulet *et al.*, 1995). Normalized MORB values are from Pearce (1983).

ネツォフ層, スボロフ層, およびキジン層の中下部層を含み, その活動年代は 55~24Ma の始新世前期から漸新世後期の範囲を示す。グループ 2 はチェホフ層ステージの火山岩からなり, シホテ・アリンのキジン層上部層に対比され 21~17Ma の前期中新世を示す。グループ 3 はマルヤマ層～オルロボ層に対比される 12~5Ma の中期中新世～前期鮮新世火山岩で, シホテ・アリンのシュファン層, ソブガバン層がそれにあたる。

これらの各グループ火山岩の岩石学的性質はサハリンの火山岩の特徴でほぼ代表されるが, 同位

体組成と微量元素組成比は広い組成幅を示し, 活動年代との強い相関関係を示す (図 5)。すなわち Sr および Nd 同位体組成に注目すると, 約 55Ma に活動を開始したグループ 1 火山岩は Bulk Earth に近いエンリッチした組成から時間の経過とともによりデブリート組成へと変化し, 約 20Ma 頃のグループ 2 が示すもっともデブリートした組成に連続的に変化する。一方約 12Ma 以降のグループ 3 ではふたたびエンリッチで組成幅の広い値へと変化し, グループ 3 火山岩の中では活動年代と同位体組成との相関は見られない。この同位体組成の時間変化は, 各グループ火山岩の Zr/Y 比の変化とも良い相関を示し, グループ 1 からグループ 2 にかけて Zr/Y 比が減少傾向を示し, グループ 3 になるとふたたび高くなりその比の幅が広がる。ここで検討した火山岩は玄武岩～玄武岩質安山岩を対象にしているので, Zr, Y は液相濃集元素として振る舞いこの比がそれぞれの起源物質の性質を反映していると仮定できる。図 5 が示すように, Zr/Y 比の時間変化は Sr, Nd 同位体組成の変化ときわめて強い相関関係がある。つまり, 各グループ火山岩をもたらししたマグマの起源物質は, 55Ma 以降約 20Ma にかけてほぼ連続的にデブリート組成へと変化し, その後エンリッチでしかもより広い組成幅へと変化したことがわかる。

以上から, サハリン～シホテ・アリンの各グループ火山岩は, それぞれ異なる岩石学的性質を示し, 活動年代と密接な相関性をもつことがわかった。マグマの起源物質の組成に注目すると, 約 55Ma から 20Ma に活動した火山岩類に関しては, Bulk Earth に近いよりエンリッチと MORB に近いよりデブリートした 2 つの端成分が存在し, 両者の混合過程がマグマの組成変化に影響を与えていると考えられる。グループ 1 火山岩が示すエンリッチ成分の起源としては, 沈み込む海洋性堆積物, 大陸地殻, エンリッチ組成の大陸下リソスフェアマントルが考えられるが, Okamura *et al.* (1998a) は, グループ 1 火山岩が活動的大陸縁辺玄武岩に類似のスパイダー図 (Pearce, 1983) を示すことから, 沈み込み過程の影響を受けた大陸

図5 サハリン、シホテ・アリンの新生代玄武岩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 Zr/Y 比と活動年代の関係図 (Okamura *et al.*, 1998a).

Fig. 5 Plots of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, and Zr/Y ratios versus age of Cenozoic basaltic rocks from Sakhalin and Sikhote-Alin (Okamura *et al.*, 1998a).

下リソスフェア (マントル+地殻) に由来すると考えている。グループ2玄武岩は、MORBにもっとも近い同位体組成を示し、Okamura *et al.* (1998a) は Pb, Sr, Nd 同位体組成の特徴からインド洋型 MORB 質起源マントルに由来すると主張している。したがってグループ1とグループ2の間の火山岩の組成変化は、大陸下リソスフェア

を起源とするものから、デブリートしたアセノスフェア源のものに変化していったことを示唆している。

グループ2玄武岩は Nb を含む HFS 元素に乏しいが、MORB 組成に比べ Rb, Ba, Sr といった LIL 元素に富む典型的な島弧ソレイトの性質を示す。Pearce and Parkinson (1993) は、このような組成の島弧ソレイトは背弧海盆をもつ島弧火山岩に特徴的な岩石学的性質であり、アセノスフェアマントルから背弧海盆玄武岩マグマを形成した後の溶け残り残存物質の部分溶融によって形成されうること示した。図4-Bにはグループ2玄武岩とともに日本海の玄武岩質基盤岩のうち背弧海盆玄武岩 (Poulet *et al.*, 1995) を表したが、背弧海盆玄武岩に比べグループ2玄武岩が HFS 元素に乏しく、LIL 元素に富む傾向を示す。したがってグループ2玄武岩は、日本海で噴出した背弧海盆玄武岩よりも HFS 元素に乏しい起源物質に由来したことを示唆し、Pearce and Parkinson (1993) の考えと矛盾しない。グループ2玄武岩が背弧海盆玄武岩より LIL 元素に富む原因は、この元素が流体相に可溶性であることから、マントルウエッジ内において沈み込むプレートの脱水による流体相の付加 (Pearce, 1983) を強く受けたためと考えられる。

一方、約 12Ma 以降のグループ3火山岩は、液相濃集元素が示すスパイダー図 (図4-A) から明らかに、それ以前の火山岩とは明瞭に異なるプレート内玄武岩をもたらし起源物質が関与したことを示している。この活動時期は、後述するように日本海・オホーツク海の拡大終了後と考えられる。このようなプレート内玄武岩に類似の火山活動は、シホテ・アリンの西方に位置する中国東北部にも認められ、少なくとも 25Ma 以前の古第三紀に大陸リフト形成にともなって玄武岩が活動している (Zhou *et al.*, 1988; Fan and Hooper, 1991)。Okamura *et al.* (1998a) は、このプレート内玄武岩の岩石学的性質とその活動がユーラシア大陸の内陸部から北東縁部へ時間とともに広がって来ていることから、ユーラシア大陸北東縁で生じた日本海の拡大は、中国東北部の深部マ

図 6 ユーラシア大陸北東縁辺部の第三紀以降のテクトニクスモデル。(Kimura, 1994)
Fig. 6 Tectonic model of northeastern Eurasian margin since Tertiary. (Kimura, 1994)

ントルから上昇するマントル対流に原因があると推定している。

IV. 背弧海盆形成テクトニクスと火山活動の関連

以下には、サハリンを含むユーラシア大陸北東縁のテクトニクス、特に新生代後期に生じた日本海とオホーツク海の形成テクトニクスについて概観し、これらが火山活動とどの様に関連したのかを検討する。古地磁気学的研究によれば、新生代後半のある時期に日本列島は東部シホテ・アリンから離れ東側へ移動した結果、日本海盆と大和海盆を形成した。その時期は西南日本のデータからは約 15Ma の短期間と見積もられ (Otofuji and Matsuda, 1984), 東北日本については 21~18Ma に急激に回転運動したと指摘されている (Hoshi and Takahashi, 1999)。1989 年に行われた日本海の ODP Leg127, 128 の掘削は玄武岩質基盤岩に達し、玄武岩類の Ar-Ar 年代や地磁気縞模様から、日本海盆の海洋地殻を形成した玄武岩の活動年代は 28~18Ma と推定された (Tamaki *et al.*,

1992)。以上を総合すると日本海の拡大は後期漸新世にはすでに開始しており、少なくとも中期中新世の 15Ma には拡大を終了していたと考えられる。

一方、千島海盆の形成については、日本海に比べオホーツク海からの直接的なデータが乏しいが、千島海盆の形状がカムチャッカ半島の先端付近を要として西に開いた半扇形をしていることや、サハリン~北海道の堆積盆や断層運動、古地磁気の特徴などから、ユーラシアプレートに対しオホーツクプレートが衝突し、それにともなう南北性の右横ずれ運動によって古千島弧が南下し生じたと考えられている (図 6)。その形成時期は漸新世~前期中新世 (Kimura and Tamaki, 1986; 福沢, 1989; 小松ほか, 1990) と考えられているが、東部北海道から南サハリンに広がる火成岩類の時間空間分布や岩石学的性質から、中期中新世に顕著な拡大運動が生じたという考えもある (前田, 1986; 後藤ほか, 1995 など)。

以上のように、日本海とオホーツク海の形成はそれぞれ独自に検討されており、両者の関連性に

については十分解明されていないのが現状である。サハリンは日本海とオホーツク海の両者が接している地域であることから、両背弧海盆形成の関連性を検討できる有利な条件にあるといえる。大陸性地殻のリフティングによって形成される海洋性地殻は、それまで大陸下リソスフェアで占められていた場所に深部から湧昇するアセノスフェアに起因することは容易に推定される。すなわち海洋性地殻からなる日本海盆は、ユーラシア大陸縁辺部のリフティングにともなうアセノスフェアの貫入によって形成されたと考えられる。前述のサハリン～シホテ・アリン火山岩類の岩石学的性質の時間変化から、火山岩の起源物質は約 55Ma 以降連続的にエンリッチした組成からデプリートした組成へと変化し、約 20Ma の岩石が MORB に類似のもっともデプリートした組成であることが示された。このことは、デプリート組成をもったアセノスフェアが上昇し、それが部分熔融して約 20Ma のグループ 2 火山岩をもたらしたことを示し、しかも火山岩の起源物質としてのアセノスフェアの関与は 20Ma 頃急激に生じたのではなく、55Ma 以降すでに生じており、時間の経過とともに大陸下リソスフェアからアセノスフェアへとマグマの起源物質が変化していったことを意味する。

オホーツク海については、現在のところ千島海盆の基盤岩の試料は得られていないので、アセノスフェアについての直接的手がかりがない。一方、南サハリンの東海岸に位置するマカロフは千島海盆の北端部の縁に沿う地域であり、グループ 2 の火山岩が分布し、その周辺のサハリン中央断層に沿って多数の貫入岩脈が見られる(図 2)。サハリンを南北方向に切るこのサハリン中央断層は、中新世に右横ずれ運動を起こし日本海・オホーツク海が拡大する時のトランスフォーム断層として活動したと考えられている(Jolivet *et al.*, 1995; 竹内, 1997)。竹内(1997)は、南サハリンのマカロフ付近から北海道北部にかけて新第三紀火成活動域が南下し、この火成活動の初期に千島海盆の縁に沿ってグループ 2 火山岩類が噴出することから、この火山岩類が千島海盆の海洋性地殻の生産に密接に関連し、古千島弧の南下にともなう千島

海盆の拡大をもたらしたアセノスフェアの上昇によるものと主張している。この主張を受け入れるならば、日本海盆と同様、千島海盆の形成にも約 20Ma に噴出したグループ 2 火山岩類が深く関与しており、これがアセノスフェアマントルから供給されたという本論の推定と矛盾しない。

V. 東北本州弧・千島弧のテクトニクスと中央北海道西縁火山活動

北海道側の火山岩については、グループ 2 ステージに対比される例は東部北海道には分布せず、北部～中央北海道西縁部に南北方向に散点的に認められる。これらは玄武岩～ドレライトと流紋岩のバイモーダルな火山活動で特徴づけられ、北から順に、宗谷岬～礼文島(玄武岩～ドレライト, 18.2Ma: Goto and Wada, 1991; 後藤ほか, 1995)、敏音知岳(流紋岩, 17.1Ma: 後藤ほか, 1995)、青山(青山玄武岩: 岡村ほか, 1991)、夕張(滝の上層安山岩, 19～20Ma: 渡辺ほか, 1993)、さらに南端の勇払および苫小牧沖合いの坑井まで追跡可能である(図 7)。このうち勇払周辺の坑井では、玄武岩～玄武岩質安山岩のスコリア凝灰岩や火山角礫岩が層厚 600～700m に達している(大久保ほか, 1999)。苫小牧沖合いの坑井からはデイサイト～流紋岩溶岩が 1000m を越える厚層として確認できる(北海道鉱業振興委員会, 1990)。これらの岩石学的性質は十分検討されてはいないが、玄武岩類についてみると、宗谷岬～礼文島はアルカリ玄武岩(後藤ほか, 1995)、青山玄武岩は高アルカリソレライト(岡村ほか, 1991)、Sr と Nd 同位体組成からは、青山玄武岩および夕張地域の安山岩が Bulk Earth に近いエンリッチ組成を示す。岡村ほか(2000)は、青山玄武岩の分布する樺戸・浜益地域周辺の火山岩類の微量元素と同位体組成の検討から、青山玄武岩を含む 19～7Ma の火山岩類はエンリッチした組成を示し、大陸下リソスフェア起源であると主張している。さらにその後噴出した 7～2Ma の火山岩類はデプリート組成で島弧に特徴的な化学組成を示し、これがアセノスフェア由来であることを示唆している。このように、サハリン～シホテ・アリンと

図 7 北部～中央北海道西縁地域の前期中新世火山岩類の分布。

Na: 基礎試錐「南幌」, Ka: 基礎試錐「軽舞」, Yu: 勇払 SK-1, 南勇払 SK-1, あけぼの Sk-1, 沼ノ端 Sk-1, ToA: 苫小牧沖 A-1, ToC: 苫小牧沖 C-1, Sh: 白老沖-1. 前期中新世滝の上層の等層厚線図および同層中の火山岩類の分布は正谷 (1979) による。

Fig. 7 Distribution of Early Miocene volcanic rocks from western margin of north-central Hokkaido.

Na: MITI (Ministry of International Trade and Industry) 'Nanporo', Ka: MITI 'Karumai', Yu: Yufutsu SK-1, Minamiyufutsu SK-1, Akebono SK-1, and Numanohata SK-1, ToA: Tomakomaioki A-1, ToC: Tomakomaioki C-1, Sh: Shiraioki-1. Isopach map (Masatani, 1979) for Early Miocene Takinoue Formation distributed in western margin of central Hokkaido.

北海道側では前期中新世以降異なる化学組成を示す火山岩類が活動しており、両者が異なるマグマの生成条件下にあったことを示す。

正谷 (1979) は、勇払周辺の多数の石油探鉱を目的にした坑井試料をもとに、前期中新世の滝の上層火山岩が苫小牧から札文島に至る南北方向に連続し、これらが東北本州弧グリーンタフ火成活動域の東縁部 (火山フロント) の北方延長に相当すると考えた。しかしこの時期の火山活動は、東北本州弧の日本海側では大規模であったが、火山フロント側ではきわめて小規模であり (Tsunakawa *et al.*, 1983; 宇都ほか, 1989; 周籐ほか, 1993), 八戸沖の DSDP site 439 (Yanagisawa *et al.*, 1980) や三戸 (21.8Ma: 木村, 1985) などごく少量認められるにすぎない。吉田ほか (1997) は、東北本州弧の新生代火山岩組成の広域変化とマグマの分離深度の推定から、グループ 2 火山岩の噴出時期のマグマ分離深度を示す等温面は背弧側浅所で高温の軸をもつことを示し、背弧海盆拡大と同時に起こった深部物質の湧昇により背弧側マントル浅部で広範な部分溶融が起こり、一方の火山フロント側での火山活動が衰えたと推定している。したがって 21~17Ma の前期中新世火山活動は東北本州弧東縁ではきわめて小規模であるにも関わらず、その北方延長の中央北海道西縁部、とりわけ苫小牧周辺においては無視できない規模であり、正谷 (1979) が主張するような単純な東北本州弧火山フロントの活動とは考えにくい。

当時のテクトニクスをあらためて整理すると、21~17Ma は東北本州弧では日本海の拡大にともなって玄武岩が大量に噴出した時期である。一方、北海道～サハリンのデータは、前述のように日本海の拡大とほぼ同時にオホーツク海の拡大が生じたことを示唆する。木村・楠 (1997) によれば、晩新世に古千島弧をのせたオホーツクプレートがユーラシアプレート東縁部に衝突し、その後サハリンと北海道が右横ずれ断層帯となり、オホーツク海の拡大にともない北海道の東半分は右横ずれ断層帯に沿って南下し、断層帯に沿って中期中新世にプリアパート盆地が形成された (図 6 右)。

中央北海道西縁部に沿う前期中新世火山岩類が、大陸内部の引張テクトニクス場に特徴的な玄武岩と流紋岩のバイモダル火山活動の性質を示すことは、この火山活動が木村・楠の主張する2つのプレート衝突に起因するテクトニクスと何らかの関連性があったと考えられるが、今後より実証的データの蓄積が必要である。

中央北海道西縁部のうち、樺戸-浜益周辺の玄武岩類がよりエンリッチした化学組成を示し、アセノスフェアの直接の影響を受けていないことはすでに紹介した。このことは、これら玄武岩類がサハリン〜シホテ・アリンの約20Ma以前に活動した火山岩類と類似の起源物質に由来し、アセノスフェアの上部に存在したエンリッチした大陸下リソスフェアの部分溶融によって生じたと推定される。グループ2火山岩の起源がサハリン〜シホテ・アリンと中央北海道西縁部で異なる理由は、アセノスフェア湧昇の中心から前者が近かったのに対し後者が離れていたためと考えられるが、今後詳細な検討が必要である。

バイモダル火山活動を特徴づけるもう一方の流紋岩類は、この玄武岩質マグマを熱源にした大陸下リソスフェア上部の地殻物質の溶融によって形成されたと考えられるが、今後の岩石学的裏付けが待たれる。

V. ま と め

サハリン〜シホテ・アリン周辺の新生代火山岩類について検討した結果、それらの岩石学的性質と活動年代から、55~24Maの大陸縁辺型沈み込み帯火山岩(グループ1)、21~17Maの島弧ソレイト(グループ2)、12~5Maのプレート内玄武岩(グループ3)に区分されることが示された。グループ1~グループ2火山岩の岩石学的性質は、活動年代と明瞭な相関関係を示し、時間の経過とともによりエンリッチからよりデプリートした組成へと連続して変化することがわかった。この変化はよりエンリッチした大陸下リソスフェアとMORB組成のアセノスフェアを端成分とする起源物質が混合過程を経てマグマの発生に関与したことを示唆し、グループ2火山岩がアセノスフェ

アの寄与をもっとも強く受けたことを示す。アセノスフェアの上昇によるマグマの発生は、当時進行した日本海とオホーツク海の拡大テクトニクスに密接に関連したことを意味する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、石油資源開発株式会社技術研究所の栗田裕司氏との討論は大変有益であった。木村学氏には本論文を執筆する機会を与えていただいた。本研究の費用の一部は文部省科学研究費(課題番号09640536)を使用した。ここに記して謝意を表します。

注

- 1) Shimazu *et al.* (1992) は18.0Maの火山岩も報告しているが、この年代値については予想より古く、層序対比の推定と矛盾することを指摘している。

文 献

- Fan, Q. and Hooper, P.R. (1991): The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: Petrology and chemical composition. *J. Petrol.*, **32**, 765-810.
- 福沢仁之(1989): Biosiliceous Shaleの時空分布からみた日本海・オホーツク海の形成(予報). 月刊地球, **11**, 284-291.
- Goto, Y. and Wada, K. (1991): The middle Miocene alkali dolerite from Rebun Island, northeastern Japan Sea. *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, **86**, 375-378.
- 後藤芳彦・中川光弘・和田恵治(1995): 北海道北部の中新世火山活動の活動場: K-Ar年代と主成分化学組成からの推定. 岩鉱, **90**, 109-123.
- 北海道鉱業振興委員会(1990): 北海道の石油・天然ガス資源—その探査と開発(昭和52年~63年). 157p.
- Hoshi, H. and Takahashi, M. (1999): Miocene counterclockwise rotation of Northeast Japan: A review and new model. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 3-16.
- Ikeda, Y. (1998): Geochemistry of Miocene back-arc basin basalts from northeast Hokkaido, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **104**, 99-106.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M. (1994): Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22237-22259.
- Kimura, G. (1994): The latest Cretaceous-early Paleogene rapid growth of accretionary complex and exhumation of high pressure series metamorphic rocks in northwestern Pacific margin. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22147-22164.

- 木村 学・楠 香織 (1997): 日高造山運動と島弧会合部のテクトニクス. 地質学論集, 47, 295-305.
- 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.
- 木村勝弘 (1985): 油田地域における基盤の地史的な構造変化の研究. 石油開発技術センター年報 (昭和 59 年度), 16-18.
- 小松正幸・榊原正幸・福沢仁之・豊島剛志 (1990): 千島海盆の拡大と日高変成帯の構造運動. 月刊地球, 12, 501-506.
- 前田仁一郎 (1986): 日高火成活動帯の形成と千島海盆の拡大およびユーラシア・北米プレートの衝突. 地団研専報, 31, 459-473.
- 正谷 清 (1979): 北海道海域の堆積盆の分布と性格. 石油技術協会誌, 44, 254-259.
- 岡村 聡 (1994): サハリンの新生代火山活動. 地質ニュース, 478, 49-56.
- Okamura, S., Arculus, R.J., Martynov, Y., Kagami, H., Yoshida, T. and Kawano, Y. (1998a): 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., Martynov, Y., Furuyama, K. and Nagao, K. (1998b): K-Ar ages of the basaltic rocks from Far East Russia: Constraints on the tectono-magmatism associated with the Japan Sea opening. *The Island Arc*, 7, 271-282.
- 岡村 聡・高橋伸充・斉藤節仁・八幡正弘・加々美寛雄・樺戸団体研究グループ (1991): 北海道樺戸地域から産する中新世ソレライト玄武岩. 地球科学, 45, 399-414.
- 岡村 聡・関根治彦・新井計雄・山元正継・西戸裕嗣・八幡正弘 (2000): 中央北海道, 浜益地域の新生代火山岩類の K-Ar 年代と地球化学. 地質学雑誌, 106, 印刷中.
- 大久保 進・吾妻高志・浜田康史・横井 悟・岡村 聡・秋葉典克 (1999): 勇払油ガス田, あけぼの構造の滝の上層貯留岩について. 石油資源開発技研研究報告, 14, 9-17.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1984): Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70, 373-382.
- Pearce, J.A. (1983): Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. eds.: *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publishing Limited, 230-249.
- Pearce, J.A. and Parkinson, I.J. (1993): Trace element models for mantle melting: Application to volcanic arc petrogenesis. In Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W. and Neary, C.R. eds.: *Magmatic processes and plate tectonics*. Geological Society Special Publication 76, 373-403.
- Poucllet, A., Lee, J.-S., Vidal, P., Cousens, B. and Bellon, H. (1995): Cretaceous to Cenozoic volcanism in South Korea and in the Sea of Japan: Magmatic constraints on the opening of the back-arc basin. In Smellie, J.L. ed.: *Volcanism associated with extension at consuming plate margins*. Geological Society Special Publication, 81, 169-191.
- Shimazu, M., Furuyama, K., Kawano, Y., Okamura, S., Ohira, H. and Yamamoto, G. (1992): K-Ar ages, major and minor element compositions and Sr, Nd isotope ratios of volcanic rocks from the western part of south Sakhalin, USSR. *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, 87, 50-61.
- 周藤賢治・大木淳一・山本和広・渡部直喜 (1993): 陸弧火山活動から島弧火山活動へ—東北日本弧第三紀火山活動の時間変遷—. 地質ニュース, 464, 6-18.
- 竹内 徹 (1997): 南サハリンの第三紀火山岩類の K-Ar 年代とそのテクトニックな意義. 地質学雑誌, 103, 67-79.
- Tamaki, K., Suyehiro K., Allan J., Ingle, C. and Pisciotta, K.A. (1992): Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. *Proc. ODP Scientific Results*, 127/128 (part 2), 1333-1348.
- Tsunakawa, H., Takeuchi, A. and Amano, K. (1983): K-Ar ages of dikes in Northeast Japan. *Geochem. J.*, 17, 269-275.
- 宇都浩三・柴田 賢・内海 茂 (1989): 東北日本新第三紀火山岩の K-Ar 年代—その 1. 宮城県仙台地域三滝層および高館層—. 地質学雑誌, 95, 865-872.
- 渡辺 寧・藤林紀枝・中川 充・加々美寛雄 (1993): 北海道中央部馬追丘陵および夕張炭田地域の中新世前期火山岩類の K-Ar 年代, 層序対比および化学組成. 岩鉱, 88, 295-306.
- Yanagisawa, K., Takigami, Y., Ozima, M. and Kaneoka, I. (1980): ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of boulders drilled at site 439. Leg 57. *Initial Rept. DSDP*, 56/57, 1281-1284.
- 吉田武義・木村純一・大口健志・佐藤比呂志 (1997): 島弧マグマ供給系の構造と進化. 火山, 42, S189-S207.
- Zhou, X.H., Zhu, B.Q., Liu, R.X. and Chen, W.J. (1988): Cenozoic basaltic rocks in Eastern China. In Macdougall, J.D. ed.: *Continental flood basalts*. Kluwer Academic Publishers, 311-330.
- Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I. and Natapov, L.M. (1990): *Geology of the USSR: A Plate-Tectonic Synthesis*. AGU Geodynamics Series 21, Washington, D.C., 242p.

(1999 年 12 月 8 日受付, 2000 年 3 月 8 日受理)