丹沢-大磯地域に分布する火山岩類の K-Ar 年代と 南部フォッサマグナ地域における鮮新世火山フロントの西方移動

K-Ar ages of volcanic rocks in the Tanzawa-Oiso area, central Japan: Implication for westward migration of the Pliocene volcanic front in the southern Fossa Magna region

森 慎一 (Shin'ichi MORI) *

山下 浩之 (Hiroyuki YAMASHITA) **

有馬 眞 (Makoto ARIMA) ***

藤岡換太郎 (Kantaro FUJIOKA) ****

We determined K-Ar ages of the late Miocene to Pliocene andesitic to basaltic dykes and lavas distributed in the Tanzawa-Oiso area in the southern Fossa Magna region, central Japan. Our data indicate two distinct periods of volcanic activity in this region; one took place during the middle Miocene (about 15 Ma) and another during the late Miocene to Pliocene (7.5–4.2 Ma). Combined the present results with the age data reported previously from volcanic rocks in the southern Fossa Magna region, the present study suggests that the volcanic front in this region during 8 to 4 Ma was located at about 40 km east of the present-day volcanic front. The volcanic front began to migrate westward to the present-day location at about 4 Ma. The westward migration of volcanic front was probably associated with an abrupt change of lateral motion of the Philippine Sea Plate from north-northwestward to northwestward occurred between 4 and 2 Ma.

Keywords: K-Ar age, Tanzawa-Oiso area, Volcanic rock, Miocene, Pliocene, Tectonics, Volcanic front migration

I. はじめに

伊豆-小笠原弧の火成活動は、四国海盆の拡大終結を待たずに約 17 Ma に再開され (例えば, Taylor, 1992 ; 森田ら, 1999), 16–15 Ma に伊豆-小笠原弧北端と本州弧との衝突が開始された (例えば, Takahashi and Saito, 1997)。その後, 伊豆-小笠原弧の衝突が継続した事により, 巨摩, 御坂, 丹沢, および伊豆の各ブロックが次々に本州弧に付加した (天野, 1986; Soh, 1986; Koyama, 1990; Amano, 1991 ; 青池, 1999 ; 青池ら, 2001 など)。このうち丹沢ブロックでは, 13–7 Ma にかけて丹沢西部から同東部

へ, 沈み込み境界が衝突境界へ移行していったとされている (青池, 1999)。

伊豆衝突帯 (Taira *et al.*, 1989) の一画を占める丹沢山地から大磯丘陵にわたる地域 (以降, 丹沢-大磯地域と称する) は, 現在の火山フロントの東方に位置している。ここには新第三系の厚い火山砕屑物および溶岩類を貫いて, 苦鉄質から珪長質に至る火山岩相ないし半深成岩相の多数の貫入岩類が小規模ながら分布している (例えば, 見上, 1955; Mikami, 1962 ; 千葉, 1986; Ito, 1986)。これら貫入岩類の年代については, 丹沢山地の北部や西部で石田 (1989), 有馬ら (1990), 山下 (1997), 今永・山下 (1999)

doi: 10.2465/gkk.111024

(平成 23 年 10 月 24 日受付, 平成 24 年 3 月 15 日受理, 平成 24 年 5 月 30 日早期公開)

* 平塚市博物館, 〒254-0041 神奈川県平塚市浅間町 12-41

** 神奈川県立生命の星・地球博物館, 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 499

*** 横浜国立大学環境情報研究院, 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

**** (独) 海洋研究開発機構横浜研究所, 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

* Hiratsuka City Museum, 12-41 Sengen, Hiratsuka, Kanagawa 254-0041, Japan E-mail: mori-s@city.hiratsuka.kanagawa.jp

** Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan E-mail: yama@nh.kanagawa-museum.jp

*** Yokohama National University, Graduate School of Environment and Information Sciences, 79-1 Tokiwadai, Hodogaya Yokohama, Kanagawa 240-8501, Japan E-mail: arima@ed.ynu.ac.jp

**** Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showa, Kanazawa Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan E-mail: fujiokak@jamstec.go.jp

が、大磯丘陵西部で Ito(1986)、今永・山下(1999)がその一部を報告しているにすぎず、活動期の詳細は不明であった。

丹沢-大磯地域の新第三系火山活動の時空間分布を明らかにすることは、丹沢山地およびその周辺地域の火成活動史や、南部フォッサマグナ地域の火山活動史を理解する上で必要であるだけでなく、火成作用と密接に関連する沈み込みプレートの運動像復元にとっても重要な課題である。例えば、佐藤(2004, 2005)は関東平野北部の火山フロントの東方に位置する荒船山の火山岩の K-Ar 年代と本宿カルデラの火山活動史における意義について議論し、妙義-荒船-佐久地域の火成活動が 3 ± 1 Ma に終息し、火山活動場が西方に移動して、ハヶ岳連峰で 1.3 Ma 頃から活動をはじめるといった時間的、空間的な不連続を認めた。さらに、この火山フロントの後退時期が南関東に起こった広域隆起で形成された、黒滝不整合の形成時期にあたることから、島弧会合部における関東-中部地方の火山活動の変遷と前弧盆の発達史が、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの運動の変化に関わることを指摘している。本稿では、丹沢-大磯地域の新第三系から得られた火山岩類(岩脈および溶岩類)についての K-Ar 年代測定結果を示すとともに、南部フォッサマグナ地域から従来報告されている火山岩類の年代データと合わせて、鮮新世における火山フロントの移動について議論し、かつ、フィリピン海プレートの沈み込みとの関係について論じる。

II. 丹沢-大磯地域の新第三紀火成岩類の概要と年代

1. 丹沢山地

丹沢山地を構成する丹沢層群は、苦鉄質から珪長質の厚い海成火砕岩類からなり、一部に玄武岩ないし安山岩溶岩を挟む(例えば、有馬ら, 1999; 青池, 1999)。これらの火砕岩や火山岩は、伊豆-小笠原弧の火山岩同様、玄武岩～安山岩とデイサイト～流紋岩のバイモーダルな火成活動で特徴づけられる(有馬ら, 1999)。玄武岩～安山岩は、大部分が低 K ソレライト系列からなるが、一部にカルクアルカリ系列も認められる(有馬ら, 1999)。これらの丹沢層群は、玄武岩、安山岩、デイサイト、流紋岩とその半深成岩相からなる 600 以上の小規模な岩脈に貫かれている(Mikami, 1962)。このうち、貫入年代が明らかなのは以下の岩体である。

丹沢山地西部の地蔵平侵入岩体(松田, 1966)は石英斑岩～角閃石安山岩からなる小規模な岩体で、 $3.2\text{--}2.3$ Ma の K-Ar 年代が得られている(今永・山下, 1999)。また、この岩体の南部に東西方向に延びる含ザクロ石流紋岩岩脈(細川谷流紋岩と称す)は 2.45 ± 0.09 Ma(有馬ら, 1990; 山下, 1997)、さらにその流紋岩を貫く岩脈は 1.25 ± 0.13 Ma と K-Ar 年代が測定されている(今永・山下, 1999)。丹沢山地北部の鶴ヶ鳥屋貫入岩体は、デイサイト～石英閃緑ひん岩～トータル岩からなり、10.3 Ma および 9.4 Ma

の K-Ar 年代が得られている(石田, 1989)。このほかには、丹沢層群中の小規模貫入岩についての年代測定値は知られていない。

一方、丹沢山地中央部には丹沢層群を貫いて丹沢深成岩体が東西約 25 km、南北約 7 km にわたり分布する(Fig. 1)。丹沢深成岩体はトータル岩体とハンレイ岩体とから構成され、複数の岩型に区分されている(滝田, 1974, 1980; 川手, 1997; Kawate and Arima, 1998)。この深成岩体の K-Ar 年代は数多く測定され、 $11.1\text{--}4.0$ Ma(河野・植田, 1966; 佐藤ら, 1986; Sato, 1991; 佐藤ら, 1990; Saito *et al.*, 1991)に及ぶが、7 Ma 頃が主体と考えられてきた(Saito, 1993)。しかし最近、Tani *et al.* (2010)はジルコンの SHRIMP U-Pb 年代測定を行い、丹沢深成岩体の大部分が、丹沢ブロックの本州弧への衝突後、 $5\text{--}4$ Ma の火成活動によって形成されたことを明らかにした。

2. 大磯丘陵

丹沢山地の南東に位置する大磯丘陵には、厚い第四系が分布するが、丘陵の南部と西部および北部には丹沢山地と同質の火山砕屑物からなる新第三系が断片的に分布する(千葉, 1986; 蟹江ら, 1999)。大磯丘陵の新第三系火成岩類には、平塚市湘南平地域の高麗山層群中のカンラン石玄武岩(木村・藤岡, 1981)、大磯町鷹取山地域の谷戸層中の安山岩溶岩、小田原市剣沢地域の剣沢層中の安山岩(Ito, 1986)、大井町篠窪地域の篠窪火砕岩中の安山岩(今永・杉山, 1994)が認められる(Fig. 1)。

湘南平地域の玄武岩は、葉山-嶺岡帯の火成岩類と密接な関係があるものと考えられていることから(木村・藤岡, 1981; 倉沢・石川, 1985; 小出ら, 2002)、10 Ma 以前の形成年代と推定されるので、本論では言及しない。鷹取山地域の安山岩溶岩は新第三系の谷戸層(石黒, 1974)に狹在する。Ito(1986)は輝石安山岩とそのハイアロクラスタイトを認め、鷹取山地域に火山体を推定している。最近の微化石年代や凝灰岩中のジルコンのフィッシュン・トラック年代から、谷戸層の堆積年代は CN 9-10($8.6\text{--}4.8$ Ma)にあたると考えられる(矢野, 1986; 小田原ら, 2009; 石浜ら, 2010)。

剣沢地域の剣沢層は、大磯丘陵の西部に小規模に分布する火砕岩を主とする地層である(矢野, 1986; Ito, 1986)。剣沢地域には、ハイアロクラスタイトや水中火砕流堆積物の存在から、火山体が存在したと推定されている(Ito, 1986)。Ito(1986)は剣沢層下部の安山岩角礫の K-Ar 年代が 10.4 Ma であること、剣沢層上部のナノ化石年代が CN 9($8.6\text{--}5.6$ Ma)であることを報告している。篠窪地域の篠窪火砕岩は、大磯丘陵の北西部に断片的に露出する弱変質した安山岩質凝灰角礫岩で、同質の溶岩を挟む(千葉, 1986)。この火砕岩中の安山岩については、 2.21 ± 0.52 Ma, 2.45 ± 0.56 Ma(今永・山下, 1999)の K-Ar 年代(全岩)が得られている。

本研究では、大磯丘陵東南部に分布する鷹取山地域の谷

Fig. 1. Geological map of the Tanzawa-Oiso area showing main lithological formations and sample locations (modified after Chiba, 1986; Honma, 1991; Kanagawa Prefectural Board of Education, 1980; Kuno, 1972; Matsuda, 1966; Shimazu *et al.*, 1971; Tsuya, 1968 and Yamanashi Geological Map Editing Committee, 1970). Abbreviations: (a) EUR, Eurasian plate; NAM, North American plate; PAC, Pacific plate; PHS, Philippine Sea plate; VF, volcanic front. (b) DD, Daidoiwa dolerite; JZ, Jizodaira intrusive rocks; HD, Hosokawadani garnet-bearing rhyolite; HT, Hinate andesite; HZ, Hatazawa Volcano; KGC, Kofu Granitic Complex; MSTL, Makime-Susugaya tectonic line; NM, Nakamagawa conglomerate; SN, Shinokubo pyroclastic rocks; TATL, Tonoki-Aikawa tectonic line; TG, Takagawayama andesite; TR, Turugatoayama intrusive rocks; TP, Tanzawa Plutonic Complex; TW, Tsurugizawa Formation; YR, Yaguradake quartz diorite.

戸層中の安山岩溶岩の K-Ar 年代を測定した。

III. 年代測定試料の岩石学的記載

K-Ar 年代測定を目的として、丹沢-大磯地域に分布する新第三系溶岩および貫入岩の調査を行い、測定を行うのに適当であると判断した試料 11 点について、岩石薄片観察、全岩化学分析を行った。試料の採取位置および詳細は Table 1, Figures 1, 2 の通りである。また、試料の全岩化学組成分析値を Table 2 に示す。全岩化学分析は神奈川県立生命の星・地球博物館の蛍光 X 線分析装置(島津製作所製 XRF-1500)を用いて、小出ら(2000)の分析方法にしたかった。

1. 丹沢山地

- (1) 試料番号 1: 神奈川県清川村宮ヶ瀬産、単斜輝石斜方輝石玄武岩質安山岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-1159)

本試料は清川村宮ヶ瀬土山峠北の川弟川林道沿い(現在

は宮ヶ瀬湖畔)の黒灰色の玄武岩質安山岩岩脈から採取した。本岩脈は早戸亜層群寺家層の泥岩ないし凝灰質砂岩を N20°E 方向に貫き、貫入方向に平行した板状節理が発達する。斑晶は斜長石(1.5-1 mm)、斜方輝石(1.5-1 mm)、単斜輝石(2-1 mm)に富む。石基は斜長石(0.1-0.05 mm)、斜方輝石(0.05-0.03 mm)、不透明鉱物などからなり、間粒状(intergranular)組織を示す。

- (2) 試料番号 2: 神奈川県清川村宮ヶ瀬布川産、角閃石安山岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-4937)

本試料は清川村中津川上流部、布川出会上流の中津川沿いにみられる青灰色の角閃石安山岩岩脈を採取した。大山亜層群唐沢川層布川火山角礫岩層のデブライトを貫き、N70°W 走向に延びる。斑晶は角閃石(最大 7 mm、平均 2-1 mm)、斜長石(2-1 mm)からなり、まれに石英(0.8 mm 以下)を含む。斑晶量は少ない。石基は斜長石(0.2-0.1 mm)とガラスおよび不透明鉱物からなり、流理構造を有し、ハイアロオフィチック(hyalophitic)組織を呈する。

Table 1. Sample locations and rock types used for K-Ar dating

Sp. No.	Registration No.*	Rock	Locality		Formation	Dyke		
			Latitude (N)	Longitude (E)		Strike	Dip	Width
1	6R-1159	Cpx Opx Andesite dyke	35°30'45.06"	139°14'32.13"	Jike Fm., Hayato Sg.,	N20E	67E	4m
2	6R-4937	Hb Andesite dyke	35°29'5.83"	139°12'41.17"	Nunokawa volcanic breccia, Karasawagawa Fm., Oyama Sg.	N70W	70S	1.5m
3	6R-6206	Basalt dyke	35°27'33.67"	139°12'12.70"	Nunokawa volcanic breccia, Karasawagawa Fm., Oyama Sg.	N80E	50N	0.7m
4	6R-1134	Hb rhyolite dyke	35°26'32.36"	139°10'22.01"	Hontanikawa Fm., Oyama Sg., Tanzawa Gp.	N25W	50W	25m
5	6R-3554	Dolerite dyke	35°25'0.81"	139°9'3.55"	Kanshichi volcanic breccia, Shijuhasse Fm., Togatake Sg.	N70E	50N	20m
6	6R-3660	aphanitic Basalt dyke	35°26'6.49"	139°8'1.07"	Yadorikizawa Fm., Togatake Sg., Tanzawa Gp.	N55W	80N	0.25m
7	6R-2139	Cpx Andesite dyke	35°29'40.90"	139°5'44.26"	Yadorikizawa Fm., Togatake Sg., Tanzawa Gp.	N70E	60S	1.5m
8	6R-2924	Cpx Andesite dyke	35°29'19.55"	139°4'4.22"	Azegamaru pluton, Tanzawa Plutonic Complex	N25W	55W	2-3m
9	6R-2973	Cpx Andesite dyke	35°29'11.09"	139°4'29.32"	Azegamaru pluton, Tanzawa Plutonic Complex	N50E	80N	0.25m
10	6R-6732	Opx Cpx Andesite lava	35°19'21.53"	139°16'36.32"	Yato Fm.	—	—	—
11	6R-7359	aphanitic Andesite lava	35°19'37.56"	139°16'19.41"	Yato Fm.	—	—	—

Cpx, clinoproxene; Opx, orthopyroxene; Hb, hornblende; GP, Group; Sg, Subgroup; Fm, Formation. Latitude and longitude based on World Geodetic System (JGD, 2000).

*Hiratsuka city Museum registration No.

(3) 試料番号3：神奈川県秦野市丹沢寺山産，玄武岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-6206)

本試料は札掛西方の布川支流境沢(タライゴヤ沢)沿いの黒色の玄武岩岩脈を採取した。大山亜層群唐沢川層布川火山角礫岩層の火山礫凝灰岩を東西性走向に貫き，明瞭な周辺急冷相をもつ。この付近には東西性走向の玄武岩岩脈が4本認められる。本脈岩は，斑晶として斜長石(2-0.8 mm)，単斜輝石(0.8-0.5 mm)を少量含み，まれにカンラン石(0.3 mm)を伴う。石基は斜長石(0.3-0.15 mm)，単斜輝石(0.03-0.02 mm)，不透明鉱物からなり，填間状(intersertal)組織を示す。

(4) 試料番号4：神奈川県秦野市戸川本谷沢産，角閃石流紋岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-1134)

本試料は秦野市水無川最上流の本谷沢 F6 下流 20 m の支谷にある，厚さ 25 m ほどの青灰色の角閃石流紋岩岩脈中央部を採取した。本脈脈は大山亜層群本谷川層の火山礫凝灰岩ないし粗粒凝灰岩を貫く。流理構造が顕著で，周辺急冷相が認められる。角閃石は最大 8 mm に達するが，平均的には 2-1 mm 程度である。鏡下では斜長石および角閃

石斑晶は変質を受けている。石基は石英(0.1-0.05 mm)に富み，微晶質(microcrystalline)組織を呈する。

(5) 試料番号5：神奈川県秦野市三廻部産，ドレライト岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-3554)

本試料は秦野市上秦野林道沿いに露出する2本の平行したドレライト岩脈の内，南側の岩脈から採取した。本脈脈は塔ヶ岳亜層群四十八瀬川層勘七火山角礫岩層に属する火山角礫岩を N70°E 方向に貫き，約 20 m の層厚を有する。おもに斜長石(2-1 mm)，単斜輝石(3-1 mm)からなり，不透明鉱物を少量含む。オフィティック(ophitic)組織を呈する。

(6) 試料番号6：神奈川県松田町寄寄沢産，無斑晶質玄武岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-3660)

本試料は松田町中津川上流寄沢上流の露頭から採取した。塔ヶ岳亜層群寄沢層中の火山角礫岩を貫く黒色の無斑晶質玄武岩岩脈で，周辺急冷相を伴う。斑晶はきわめて少なく，斜長石(0.4 mm)がわずかに認められる。石基は斜長石(0.1-0.05 mm)とガラスからなり，填間状(intersertal)組織を示す。

Fig. 2. Topographic maps (1 : 25,000) showing detailed sample locations (contour interval 10 m). Numbers refer sample numbers given in Table 1 and Figure 1. (a) Basaltic andesite dyke at Miyagase (sample 1). (b) Hornblende andesite dyke at Nunokawa (sample 2). (c) Basaltic dyke at Tanzawa-Terayama (sample 3). (d) Hornblende rhyolite dyke at Hontanizawa (sample 4). (e) Delerite dyke at Mikurube (sample 5). (f) Aphanitic basalt dyke at Yadorikizawa (sample 6). (g) Clinopyroxene andesite dyke at Aone (sample 7). (h) Clinopyroxene basaltic andesite dyke at Inugoeji (sample 8) and clinopyroxene basalt dyke at Yokizawa (sample 9). (i) Orthopyroxene-clinopyroxene andesite lava at Ikusawa (sample 10) and aphanitic andesite lava at Ikusawa (sample 11). Base maps published by the Geospatial Information Authority of Japan are after: (a), Aonohara; (b), (c), (d) and (f), Oyama; (e), Hadano; (g) and (h), Nakagawa; (i), Hiratsuka.

Table 2. Whole-rock major element chemistry of dykes and lavas in the Tanzawa-Oiso area

Sp. No.	Registration No.*	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
1	6R-1159	53.25	0.84	18.71	10.14	0.18	3.37	9.41	2.86	0.39	0.13	99.27
2	6R-4937	55.64	0.46	19.08	9.08	0.22	3.56	7.90	3.21	0.72	0.07	99.95
3	6R-6206	48.81	0.85	17.96	10.59	0.20	8.39	11.26	2.14	0.06	0.18	100.44
4	6R-1134	73.56	0.16	14.65	1.54	0.10	0.68	4.03	2.39	1.67	0.10	98.88
5	6R-3554	52.03	0.87	17.11	10.04	0.17	6.55	10.07	2.75	0.66	0.15	100.40
6	6R-3660	51.51	0.90	16.41	9.89	0.24	9.97	7.42	3.91	0.37	0.11	100.73
7	6R-2139	55.98	0.56	18.52	8.57	0.16	4.12	8.30	2.90	0.38	0.06	99.55
8	6R-2924	53.67	0.79	15.97	9.71	0.14	7.08	9.10	2.39	1.19	0.09	100.14
9	6R-2973	52.79	0.96	18.70	10.35	0.17	4.74	8.73	3.21	0.27	0.12	100.05
10	6R-6732	61.82	0.62	17.17	6.05	0.12	2.11	6.87	3.68	0.58	0.09	99.11
11	6R-7359	59.78	0.96	16.07	8.48	0.24	2.55	6.60	4.05	0.45	0.29	99.47

*Hiratsuka city Museum registration No.

(7) 試料番号 7: 神奈川県相模原市緑区青根神ノ川産, 単斜輝石安山岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-2139)

本試料は旧津久井町神ノ川林道沿いの露頭から採取した。暗灰色の単斜輝石安山岩岩脈で, 塔ヶ岳亜層群寄沢層中の火山礫凝灰岩を N70°E 方向に貫く。東方 30 m ほどに同方向の角閃石安山岩岩脈も認められる。斑晶は斜長石 (1.5–0.5 mm), 単斜輝石 (1.5–0.5 mm) からなる。単斜輝石はやや変質している。石基は斜長石 (0.1–0.05 mm), 単斜輝石 (0.05 mm 以下), 不透明鉱物からなり, ハイプロオフィチック (hyaloophitic) 組織を示す。

(8) 試料番号 8: 神奈川県山北町中川犬越路林道産, 単斜輝石玄武岩質安山岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-2924)

本試料は山北町犬越路林道沿いの露頭から採取した。畦ヶ丸型トーナル岩を貫く青灰色の単斜輝石玄武岩質安山岩岩脈である。本岩脈は犬越路から簗沢東方にかけて北北東–南南西へ走る犬越路断層沿いに延びる。斑晶として斜長石 (2–1 mm), 単斜輝石 (1–0.5 mm) に富む。石基は斜長石 (0.3–0.2 mm), 単斜輝石 (0.1–0.05 mm) にきわめて富み, 毛せん状 (pilotaxitic) 組織を示す。

(9) 試料番号 9: 神奈川県山北町中川用木沢産, 単斜輝石玄武岩岩脈(平塚市博物館標本登録番号 6R-2973)

本試料は山北町用木沢中流の露頭から採取した。畦ヶ丸型トーナル岩を貫く灰色の色調を有する緻密な単斜輝石玄武岩岩脈で, 周辺急冷相を伴う。斑晶はやや少なく, 斜長石 (2–0.5 mm), 単斜輝石 (2–0.5 mm) の他, まれに石英を伴う。石基は, 斜長石 (0.1–0.05 mm), 単斜輝石 (0.05 mm 程度) からなり, 毛せん状 (pilotaxitic) 組織を示す。

丹沢深成岩体には苦鉄質な同時性岩脈 (syn-plutonic dyke) が報告されており (高橋ら, 2004), 上記のトーナル岩を貫く岩脈類 (試料 No. 8 および No. 9) が同時性岩脈である可能性がある。高橋ら (2004) によれば, これら同時性岩脈は火炎状縁組織など捕獲時に高温液体であった急冷縁組織を示し, しばしばトーナル岩と漸移的な岩相を呈すなどの特徴を有する。さらに, これら同時性岩脈は高アルミナ玄武岩の特徴を示す。しかし, 上記の岩脈類 (試料 No. 8 および No. 9) はそうした特徴を示さず, 直線的に延びた明瞭な周辺急冷相を持ち, 本研究で分析した他の岩脈類と同様, ソレライト系領域にプロットされ (Fig. 3), 岩質からして同時性岩脈とは明確に区別される。

2. 大磯丘陵

(1) 試料番号 10: 神奈川県大磯町生沢谷戸産, 斜方輝石単斜輝石安山岩 (平塚市博物館標本登録番号 6R-6732)

本試料は大磯町生沢の谷戸川沿いに露出する新第三系鷹取山礫岩層中の円礫から採取した。鷹取山礫岩層中には, 複輝石安山岩ないし輝石ひん岩の巨礫が多量に認められ,

とくにその基底部に数 m 大の安山岩巨礫を含む。これらの溶岩の供給源として, 平塚市上吉沢, 山の神~山入の不動川支谷に分布する新第三系谷戸層上部に, 層厚 25 m ほどの複輝石安山岩の溶岩を確認した。谷戸層中の溶岩は変質しているため, 礫岩層中の安山岩礫を年代測定用試料とした。本試料は輝石斑晶に富む黒灰色の複輝石安山岩である。斑晶として単斜輝石 (2–1 mm), 斜方輝石 (1.5–1 mm), 斜長石 (3–1 mm) を多量に含む。石基は針状の斜長石 (0.2–0.05 mm), 石英 (0.03–0.02 mm), 不透明鉱物などからなり, 毛せん状 (pilotaxitic) 組織を示す。

(2) 試料番号 11: 神奈川県大磯町生沢産, 無斑晶質安山岩溶岩 (平塚市博物館標本登録番号 6R-7359)

本試料は大磯町鷹取山西の谷戸川本流, 石合橋際の谷戸層に属する溶岩から採取した。谷戸層下部には層厚 2–3 m の 6 枚の無斑晶質安山岩溶岩が認められ, ハイプロクラスタイトに移化する。この露頭には層厚 2 m ほどの無斑晶質安山岩溶岩が 4 枚認められる。本試料は下位から 3 枚目の溶岩である。斑晶はほとんどなく, わずかに斜長石 (0.8–0.5 mm) を含む程度である。石基は針状の斜長石 (0.2–0.1 mm) が流状に配列し, 填間状 (intersertal) 組織を呈する。

IV. K-Ar 年代測定

1. 測定方法

K-Ar 年代測定は蒜山地質年代学研究所で行った。K-Ar 年代測定用には全岩試料 (石基) が用いられた。K の定量には炎光分光法を用いたが, 試料 No. 3 および No. 7 については, K 含有量が定量可能な最小値 (0.2 wt%) 未満であったので, Itaya *et al.* (1996) による極低ブランク法を用いた。アルゴン同位体比の測定は, 岡山理科大学自然科学研究所のアルゴン専用質量分析計 (装置名: HIRU, Itaya *et al.*, 1991) が用いられ, ^{38}Ar をトレーサー (スパイク) として同位体希釈法で測定した。年代計算にあたっては, 壊変常数として $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} / \text{year}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} / \text{year}$, および自然界における ^{40}K の存在比 $[^{40}\text{K}] / [\text{K}] = 1.167 \times 10^{-4}$ が用いられた。分析方法や年代および誤差計算方法の詳細については, 長尾ら (1984), 長尾・板谷 (1988), Itaya *et al.* (1991, 1996), 八木 (2006) を参照されたい。

2. 測定結果とその考察

K-Ar 年代測定の分析結果を Table 3 に示す。この測定結果から, 今年代測定した 11 点の試料は, (1) 16.5 Ma および 13.6 Ma を示す丹沢層群中の岩脈と, (2) 7.5–4.2 Ma を示す丹沢層群ないし丹沢深成岩体中の岩脈および大磯丘陵第三系の溶岩の 2 つに大別される。

(1) 16.5 Ma および 13.6 Ma の丹沢層群中の岩脈

試料 No. 3 ($16.5 \pm 5.1 \text{ Ma}$) および No. 7 ($13.6 \pm 2.3 \text{ Ma}$) の 2 試料である。これらは大山亜層群および塔ヶ岳層群の玄武岩ないし安山岩岩脈で, K 含有量が 0.2 wt% 未満と少ないため年代値の誤差が大きい。

Fig. 3. AFM and FeO^*/MgO versus SiO_2 diagrams for post late Miocene volcanic rocks in the southern Fossa Magna region. The boundary between tholeiitic (TH) and calcalkalic (CA) series in AFM diagram is after Irvine and Baragar (1971) and that in FeO^*/MgO versus SiO_2 diagram is after Miyashiro (1974). Abbreviations and data sources: AG, dykes and lavas of Ashigara Gp. (Imanaga, 1999; Miyagi and Kanai, 2002); AR, Mt. Arafune (Motojuku caldera) (Sato, 2005, 2007); ER, Enrei volcanic rocks (Tejima and Kawachi, 1994; Yamagishi *et al.*, 1999; Nakai *et al.*, 2000; Mukai *et al.*, 2009; Nishiki *et al.*, 2009); HK, Hakone Volcano (Takahashi *et al.*, 2006; Nagai and Takahashi, 2007; Yamashita *et al.*, 2008); KD, Kyoto dyke swarm (Ishida, 1983); KG, Kogarasuyama granodiorite (Kanamaru and Takahashi, 2008); KJ, Kurofujii Volcano (Mimura *et al.*, 1984); KN, Konaruyama volcanic rocks (Mimura *et al.*, 1984; Kanamaru and Takahashi, 2008); MG, Mizugamori volcanic rocks (Mimura *et al.*, 1984); SK, Pliocene volcanic rocks of Saku area (Yoshizawa and Kawachi, 1995; Tomono *et al.*, 1997; Sato, 2010); TP, Tanzawa Plutonic Complex (Kawate, 1997; Kawate and Arima, 1998; Takahashi *et al.*, 2004); TZ, Tanzawa and Aikawa Gp. (Shimazu and Kusuda, 1980); YB, Yabashira volcanic rocks (Takahashi and Nishiki, 2006); YG, Yatsugatake Volcano (Ota and Arima, 1988; Nishiki *et al.*, 2009); YT, Yato Fm. and Takatoriyama Fm. (Yamashita and Ishihama, 2012).

青池ら(1997)は、丹沢層群凝灰岩中に含まれるナノ化石により、試料 No. 3 および試料 No. 7 の貫入母岩である大山亜層群唐沢川層および塔ヶ岳亜層群寄沢層の堆積年代をそれぞれ 16 Ma と 14 Ma と報告している。今回得られた K-Ar 年代は誤差範囲が大きい、これら貫入母岩の堆積年代推定値と整合的である。塔ヶ岳亜層群および大山亜層群には、溶岩が挟在することが認められている(青池ら, 1997; 青池, 1999)。また、丹沢層群の火山岩と火砕岩の大部分は低 K ソレライト系列に属することが知られてい

る(Kawate, 1997; 青池, 1999)。今回、分析した岩脈類(試料 No. 3 および No. 7)は低 K ソレライト系列の特徴を示し(Fig. 4)、貫入母岩中に挟在する溶岩類と同様の化学的特徴を呈することから(Fig. 3)、これらの岩脈類も丹沢層群を形成した火山体(以後、丹沢火山体と称す)の活動により形成されたものと思われる。

(2) 7.5–4.2 Ma の丹沢山地の岩脈および大磯丘陵第三系の溶岩

試料 No. 1–2, No. 4–6, および No. 8–11 の 9 試料であ

Table 3. K-Ar age data for the late Miocene to Pliocene basaltic to andesitic dykes and lavas in the Tanzawa–Oiso area

Sp. No.	Registration No.*	K (wt%)	⁴⁰ Ar-rad. (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	K-Ar age (Ma)	Non Rad. ⁴⁰ Ar (%)
1	6R-1159	0.433 ± 0.022	12.57 ± 0.26	7.46 ± 0.40	44.2
2	6R-4937	0.555 ± 0.011	10.09 ± 0.87	4.68 ± 0.41	83.8
3	6R-6206	0.054 ± 0.003	3.46 ± 1.05	16.5 ± 5.1	95.1
4	6R-1134	1.255 ± 0.025	25.90 ± 1.46	5.31 ± 0.32	76.4
5	6R-3554	0.694 ± 0.014	14.21 ± 0.59	5.27 ± 0.24	69.1
6	6R-3660	0.333 ± 0.017	6.25 ± 0.54	4.83 ± 0.48	83.8
7	6R-2139	0.090 ± 0.090	4.77 ± 0.77	13.6 ± 2.3	90.8
8	6R-2924	0.904 ± 0.018	14.81 ± 0.43	4.22 ± 0.15	58.9
9	6R-2973	0.224 ± 0.011	4.65 ± 0.36	5.34 ± 0.49	77.7
10	6R-6732	0.594 ± 0.012	11.57 ± 0.45	5.01 ± 0.22	67.1
11	6R-7359	0.305 ± 0.015	6.96 ± 0.32	5.87 ± 0.40	71.4

*Hiratsuka city Museum registration No.

Fig. 4. K₂O–SiO₂ diagram for post late Miocene volcanic rocks distribute in the southern Fossa Magna. Solid squares: studied rocks younger than 7 Ma. Solid circles: studied rocks older than 11 Ma. Numbers refer sample numbers given in Table 1. Abbreviations for other igneous rocks: AG, Ashigara Group (Imanaga, 1999); FJ, Fuji and Kofuji Volcano (Takahashi *et al.*, 2003); HD, Hosokawadani garnet-bearing rhyolite (Yamashita, 1997); HK, Hakone Volcano (Nagai and Takahashi, 2007); JZ, Jizodaira intrusive rocks (Yamashita, 1997); TP, Tanzawa Plutonic Complex (Takita, 1980; Kawate and Arima, 1998; Takahashi *et al.*, 2004); YW, Yugawara Volcano (Hakamata *et al.*, 2005).

る。丹沢層群を貫く岩脈である試料 No. 1, 2, 4, 5, 6 は、7.46–4.68 Ma の K-Ar 年代値を示した。これらの岩脈は、丹沢層群最下部の塔ヶ岳亜層群寄沢層から、最上部の早戸亜層群寺家層に至る各層準を貫くもので、かつ、地域的にも秦野市三廻部から相模原市津久井町神ノ川に至る丹沢山地東半部全域にわたるものである。これらの岩脈の K-Ar 年代値は、試料 No. 1 を除き、母岩の丹沢層群の年代値 (17–13 Ma : 青池ら, 1997) とは明確に区別される。試料 No. 1 は、トラフ充填堆積物である早戸亜層群寺家層中の岩脈である点で重要である。これらの測定結果から、丹沢層群中の岩脈には、丹沢火山体の火成活動とは異なる、後

期中新世から鮮新世に貫入したものが数多く存在することが明らかとなった。

試料 No. 8 および No. 9 は丹沢深成岩体 (畦ヶ丸型) を貫く岩脈で、5.34–4.22 Ma の K-Ar 年代値を示す。この年代値は上述した丹沢層群を貫く岩脈の年代と同時期である。母岩である畦ヶ丸型岩体について Tani *et al.* (2010) が 4.3–4.0 Ma というジルコンの SHRIMP U–Pb 年代を報告しており、試料 No. 9 の 5.34 ± 0.49 Ma の値はやや古いように見うけられる。いずれにしても、丹沢深成岩体の貫入時期と丹沢層群中の岩脈の貫入時期とがほぼ同時期であることは、きわめて興味深い。

試料 No. 10 および No. 11 は大磯丘陵の新第三系谷戸層中の安山岩溶岩である。試料 No. 10 は鷹取山礫岩層中の輝石安山岩巨礫であるが、谷戸層上部の同質の安山岩溶岩から供給されたものと考えられる。試料 No. 11 は谷戸層下部に挟まれる無斑晶質玄武岩質安山岩溶岩である。これらの谷戸層中の溶岩は 5.87 Ma および 5.01 Ma の K-Ar 年代値を示す。これらの年代値は、谷戸層の石灰質ナノ化石年代 (CN 9–10: 8.6–4.8 Ma : 矢野, 1986 ; 小田原ら, 2009 ; 石浜ら, 2010) ときわめて調和的であり、上述した丹沢層群中の 7.5–4.2 Ma の岩脈と同時期である。

V. 考 察

1. 丹沢山地での後期中新世以降の火成活動

丹沢層群の火山岩・火砕岩は伊豆–小笠原弧上の火山体として形成され、その後、本州弧に付加したもので、異地性衝突ブロックに含まれる (天野, 1986; Soh, 1986; Koyama, 1990; Amano, 1991)。17–8 Ma に及ぶ丹沢層群の堆積時期のなかで、玄武岩から安山岩質溶岩の広範囲な活動が認められるのは、17–13 Ma の丹沢層群下部の塔ヶ岳亜層群と中部の大山亜層群である (青池ら, 1997 ; 青池, 1999)。今回得られた 16.5 Ma (試料 3) および 13.6 Ma (試料 7) の K-Ar 年代を有する岩脈は、AFM 図および FeO*/MgO–SiO₂ 図 (Fig. 3) で、丹沢層群の溶岩と同様の領域にプロットされることから、これら溶岩の供給岩脈である可

能性がある。丹沢層群上部の煤ヶ谷亜層群は 13–11 Ma に堆積したものとされ、煤ヶ谷亜層群最下部(大沢層)で珪長質火砕流堆積物が卓越するものの、大部分が厚い火砕タービダイトのみからなる(青池, 1999)。11–8 Ma の地層は丹沢山地ではほとんど欠落し、火砕タービダイトのみからなる煤ヶ谷亜層群谷太郎層の一部に残されているだけである(青池, 1999)。したがって、11–8 Ma には、丹沢東部地域では火成活動が一端、衰退したようにみえる。

8 Ma 以降、丹沢層群最上部の早戸亜層群寺家層(泥岩)、落合層(礫岩)がトラフ充填堆積物として堆積する(青池, 1999)。丹沢-大磯地域は、現在の火山フロントより東方に位置している。これら地域に分布する火山岩類から今回得られた 7.46–4.22 Ma の年代値は、貫入母岩である丹沢ブロックが本州弧に衝突後、これら地域で新たな火成活動が起こったことを示唆している。この時期の火成活動は、本州弧との衝突境界である丹沢山地北部の藤野木-愛川構造線に沿っても、高川山安山岩(Ishida, 1970)、大洞岩粗粒玄武岩(本間, 1976)などの貫入岩体、日向安山岩層の溶岩(本間, 1991)、仲間川巨礫岩層の安山岩巨礫(本間, 1984)など、いくつかの地域に認められる(Fig. 1)。これら衝突境界域の火山岩類は、以下の諸点から、上述した丹沢東半部でみられる後期中新世から鮮新世にかけての火成活動とはほぼ同時期のものである。その根拠として、(a)いずれも西桂層群岩殿山礫岩層ないし下位の島田泥岩層堆積期に活動したものとされること(本間, 1976, 1984, 1991)、(b)日向安山岩層は島田泥岩層と指交すること(青池, 1999)、(c)島田泥岩層からは CN 9(8.6–5.6 Ma)のナノ化石年代が得られていること(岡田, 1987)、(d)岩殿山礫岩層は微化石年代学的、層序学的、堆積学的見地から 7–5.5 Ma と考えられること(青池, 1999)があげられる。

このように、今回得られた K-Ar 法による年代測定値と、丹沢-大磯地域ですでに報告されている火成岩類の放射年代、その上下層準にある堆積岩の層序学的年代および微化石年代とが調和的であることから、丹沢-大磯地域の火成活動は伊豆-小笠原弧上での 17–11 Ma の活動の後、3 m.y. ほどの休止期を挟んで、丹沢ブロック衝突期の 8–4 Ma にかけて再開されたと考えられる。

ところで、丹沢山地中央部に広く分布する丹沢深成岩体の主体部は、ジルコンの SHRIMP U-Pb 年代測定により 5–4 Ma であることが、最近明らかにされた(Tani *et al.*, 2010)。したがって、丹沢深成岩体主体部のマグマ形成年代と、今回得られた岩脈の年代値(7.46–4.22 Ma)とはほぼ同時期である。Tani *et al.* (2010)によれば、丹沢深成岩体を形成したマグマは丹沢ブロックの本州弧への衝突に伴う衝突同時性(syn-collisional)火成活動によって形成され、伊豆-小笠原弧の島弧火成活動とは異なる成因によるものとされている。Tamura *et al.* (2010)は伊豆-小笠原弧の始新世-漸新世の火山岩と、衝突帯の深成岩体の化学組成を比較し、両者が類似した組成をもつことから、伊豆-小笠

原弧の漸新世の中部地殻が再融解しダイアピルとなって地表に出現し、衝突帯の深成岩類を形成したと結論づけた。これらの深成岩体は急速な隆起、冷却を経験しており(Tani *et al.*, 2010)、同一マグマ起源の浅所貫入岩体が存在している可能性がある。そこで、丹沢深成岩体と本岩脈群の化学分析値を比較した。本岩脈類は、AFM 図と $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 図においてフソレイト系列の領域にプロットされ、丹沢-富士地域の丹沢・愛川層群の火山岩類(島津・楠田, 1980)、谷戸層および鷹取山層の火山岩類(山下・石浜, 2012)、足柄層群の溶岩および岩脈(Imanaga, 1999; 宮城・金井, 2002)とも同様のトレンドを有する(Figs. 3a, 3b)。さらに、本岩脈群は、現在の火山フロントに位置する箱根火山岩類(高橋ら, 2006; 長井・高橋, 2007; 山下ら, 2008)とも同様のトレンドを有する(Figs. 3a, 3b)。本岩脈類、丹沢・愛川層群火山岩、箱根火山岩類は SiO_2 の増加につれて FeO^*/MgO 比が増加する(Fig. 3b)。一方、丹沢深成岩体のほとんどの岩石(川手, 1997; Kawate and Arima, 1998; 高橋ら, 2004)や小島山花崗閃緑岩(金丸・高橋, 2008)は SiO_2 が増加しても FeO^*/MgO 比がほとんど増加しないカルクアルカリ系列トレンドを示し(Figs. 3c, 3d)、本岩脈群と明瞭に区別される。したがって、本研究の岩脈類は丹沢深成岩体の浅所貫入岩相ではなく、丹沢・愛川層群の火成岩類と同様、伊豆-小笠原弧の島弧火成活動による火山フロントを構成するものと考えられる。ただし、試料 No. 4 の角閃石流紋岩だけは本岩脈類のトレンドからはずれ(Figs. 3a, 3b)、丹沢深成岩体のような衝突同時性火成活動(syn-collisional magmatism)(Tani *et al.*, 2010)による浅所貫入岩相か、あるいは東伊豆単成火山群のような島弧の花崗岩質地殻の部分溶融(Hamuro, 1985; 宮島, 1990; 鈴木, 2000; Tamura and Tatsumi, 2002)により形成された可能性を否定できない。

3 Ma 以降になると、火成活動は丹沢東部では衰退し、丹沢西部から足柄地域へと西方に移動した。この時期の火成活動として、地蔵平侵入岩体(石英斑岩、角閃ひん岩, 3.2–2.3 Ma : 今永・山下, 1999)、細川谷流紋岩(2.5–2.3 Ma : 有馬ら, 1990; 山下, 1997)、篠窪火砕岩類(安山岩, 2.5–2.2 Ma : 今永・山下, 1999)、矢倉岳石英閃緑岩体(1.2–1.1 Ma : 倉沢ら, 1989)、畑沢火山(角閃石安山岩, 1.3–0.9 Ma : 今永・山下, 1999)、足柄層群火山岩(角閃石デイサイト~輝石安山岩の溶岩と岩脈, 2.0–0.6 Ma : 今永・山下, 1999)が、あげられる。

2. 後期中新世以降の火山フロントの位置

太平洋プレート(PAC)の沈み込みによって形成される現在の火山フロントは、伊豆大島から、箱根を通り、八ヶ岳へと続く N35°W 方向にはしている。これに対して、南部フォッサマグナ地域における後期中新世以降の火山岩類は現在の火山フロントより東側の広い地域に認められる。佐藤(2004, 2005)は荒船-佐久地域の鮮新世火山岩類の分布から、現在の火山フロントである八ヶ岳より東方に

Fig. 5. Stratigraphic positions and radiometric ages of Neogene volcanic and plutonic rocks in southern Fossa Magna regions. Calcareous nannofossil stratigraphic zonations after Okada and Bukry (1980) and Berggren *et al.* (1995a, 1995b). Abbreviations: cg, conglomerate; Fm, Formation; Gp, Group; PA, pyroxene andesite; QD, quartzdiorite, Sg, Subgroup; V, volcano; VR, volcanic rocks. Numbers in parentheses refer radiometric ages (Ma) after: ^{A1)}Arima *et al.*, 1990; ^{F1)}Fujii and Yui, 1985; ^{H1)}Honma, 1991; ^{I1)}Imanaga and Yamashita, 1999; ^{I2)}Ishida, 1989; ^{I3)}Ishihama *et al.*, 2010; ^{I4)}Ito, 1986; ^{K1)}Kaneoka, 1969; ^{K2)}Kaneoka and Suzuki, 1970; ^{K3)}Kaneoka *et al.*, 1979; ^{K4)}Kaneoka *et al.*, 1980; ^{K5)}Kaneoka *et al.*, 1993a; ^{K6)}Kaneoka *et al.*, 1993b; ^{K7)}Kawachi, 1998; ^{K8)}Kurasawa *et al.*, 1989; ^{M1)}Machida, 1977; ^{M2)}Mannen *et al.*, 2003; ^{M3)}Matsumoto *et al.*, 1999; ^{M4)}Matsumoto *et al.*, 2007; ^{M5)}Mimura *et al.*, 1994; ^{M6)}Momose *et al.*, 1966; ^{M7)}Mukai and Kosaka, 2008; ^{N1)}Nagai *et al.*, 2007; ^{N2)}Nagai and Takahashi, 2008; ^{N3)}Nishiki *et al.*, 2007; ^{N4)}Nishiki *et al.*, 2009; ^{N5)}Nomura and Ebihara, 1988; ^{N6)}Nomura and Kosaka, 1987; ^{O1)}Odawara *et al.*, 2009; ^{O2)}Oikawa *et al.*, 2004; ^{O3)}Oikawa and Nishiki, 2005; ^{O4)}Ozawa and Horiuchi, 2005; ^{S1)}Saito *et al.*, 2004; ^{S2)}Saito *et al.*, 2007a, 2007b; ^{S3)}Sato, 2002; ^{S4)}Sato, 2004; ^{S5)}Sato, 2005; ^{S6)}Shibata *et al.*, 1984; ^{S7)}Sugiyama *et al.*, 2010; ^{T1)}Takagi and Koyama, 1992; ^{T2)}Takahashi and Nishiki, 2006; ^{T3)}Takahashi and Saito, 1997; ^{T4)}Tani *et al.*, 2010; ^{U1)}Utsumi *et al.*, 1998; ^{Y1)}Yamashita, 1997; ^{Y2)}Yano, 1986; ^{Y3)}Yanagisawa *et al.*, 2005; ^{Y4)}Yui, 1993.

鮮新世火山フロントが存在したことを提唱し、鮮新世から更新世にかけて火山フロントが西方へ移動したと論じている。さらに、佐藤・由井(2008)は荒船地域から丹沢深成岩体東縁を結ぶ鮮新世火山フロントの位置を推定している。

本研究では、後期中新世以降の火山フロントの位置をさらに検討するため、南部フォッサマグナ地域の火成岩類の層序を、本研究で得られた年代値と先行研究で報告された層序と年代値から整理した。後期中新世以降の火成活動が集中して認められる丹沢-大磯地域に富士-箱根地域を加えた「丹沢-富士地域」、「峡東-甲府地域」、および荒船-佐久地域にハヶ岳地域を加えた「荒船-ハヶ岳地域」の3地域に分けて示した(Fig. 5)。Figure 6には、南部フォッサマグナ地域の10 Ma以降の火成岩類の時空間分布を、これら3地域に区分して示した。ここでは、丹沢ブロックと本

州弧の衝突に伴う衝突同時性火成活動(syn-collisional magmatism)により形成されたと推定されている丹沢深成岩体(Tani *et al.*, 2010)と、他の深成岩体(甲府花崗岩体、小島花崗閃緑岩、秩父深成岩体、矢倉岳石英閃緑岩体)を除いてプロットした。

丹沢-大磯地域の新第三紀火山岩類は、小規模な貫入岩および溶岩として数多く認められ、第四紀火山フロントより40 kmほど東方まで分布している(Fig. 6)。これらの火山岩類からは、今回、7.5-4.2 MaのK-Ar年代が得られ、後期中新世から鮮新世にかけての活発な火成活動が示唆される。峡東-甲府地域の峡東岩脈群(石田, 1983)、小檜山火山岩類(三村ら, 1984; 金丸・高橋, 2008)、水ヶ森火山岩類(三村ら, 1984)も丹沢-大磯地域の本岩脈類と同様のソレライト系列トレンドを示すが、現在の火山フロントに

Fig. 6. Spatial and temporal distribution of post late Miocene igneous rocks in the southern Fossa Magna region. Geological map is modified after Geological Survey of Japan (2010). Pacific plate slab depth after Noguchi (1998). Philippine Sea plate slab depth after Nakajima *et al.* (2009). Sample numbers (1–11) of this study are given next to symbols. Data sources are listed in Figure 5 caption. Additional data are; Committee for Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan, 2000; Hirata, 1999; Ishii and Araki, 1989; Ishizuka, 2006; Kin *et al.*, 2007; Kaneoka *et al.*, 1970; Kawano and Ueda, 1966; Koshimizu and Yamagishi, 1987; Mimura *et al.*, 1984; Nakada *et al.*, 2007; Nomura and Ebihara, 1991; Okada *et al.*, 1990; Shibata *et al.*, 1976; Tsunakawa *et al.*, 1983. Abbreviations: AR, Mt. Arafune (Motojuku Caldera); AT, Ashitaka Volcano; CB, Chichibu Pluton; ER, Enrei volcanic rocks; HK, Hakone Volcano; ISTL, Itoigawa–Shizuoka tectonic line; KD, Kyoto Dyke Swarm; KGC, Kofu Granitic Complex; KJ, Kurofujii Volcano; KN, Konarayama volcanic rocks; MG, Mizugamori volcanic rocks; TATL, Tonoki–Aikawa tectonic line; TP, Tanzawa Plutonic Complex; YB, Yabashira Volcano; YW, Yugawara Volcano.

位置する第四紀黒富士火山岩類はカルクアルカリ系列トレンドを示し、異なった領域にプロットされる(Figs. 3e, 3f)。「荒船-ハヶ岳地域」の鮮新世火山岩類(吉沢・河内, 1995; 友野ら, 1997; 佐藤, 2010)と本宿カルデラ(佐藤, 2005, 2007)は、現在の火山フロントに位置するハヶ岳火山の活動に先立つ第四紀火山岩類である塩嶺火山岩類(手島・河内, 1994; 山岸ら, 1999; 中井ら, 2000; 向井ら, 2009; 西来ら, 2009), 八柱火山岩類(高橋・西来, 2006), ハヶ岳火山(太田・有馬, 1988; 西来ら, 2009)と同様な領域にプロットされる(Figs. 3g, 3h)。

今年年代測定した試料を含む丹沢-富士地域の火山岩類は、前述したように、いずれも伊豆-小笠原弧の火山岩の化学的特徴であるソレライト系列を示し(Figs. 3a, 3b), K_2O-SiO_2 ダイアグラム(Fig. 4)上では大部分が低カリウム系列に入ることから、伊豆-小笠原弧の火山フロントを構成する火成岩類であることが示唆される。一方、峡東-甲府地域および荒船-佐久地域の後期中新世~鮮新世火山岩類はソレライト系列とカルクアルカリ系列が共存するが、これらの特徴は現在の黒富士-ハヶ岳地域の火山フロント火山岩類と類似した化学的特徴を示し、伊豆-小笠原弧から本州弧地殻上に延長した火山フロントを構成する火成岩類であることが示唆される。

上記の特性と空間分布をもとに、本研究では丹沢-大磯, 峡東, 荒船-佐久地域を結ぶ鮮新世の火山岩類の東縁を鮮新世火山フロントと推測した(Fig. 6)。Figure 6 から明らかなように、鮮新世火山フロントの位置は8-4 Maの間、ほとんど変化がなく、現在の火山フロントとはほぼ並行して東方へ40 km シフトし、本宿カルデラ東方から丹沢衝突境界付近へ南南東方向に延びていたと推測される。この鮮新世火山フロントは、佐藤・由井(2008)が示したものと、(a)現在の火山フロントに平行であること、(b)丹沢地域で丹沢深成岩体東縁ではなく、丹沢層群分布域の東縁を通ることの二点で異なっている。約4 Ma以降、火山フロントは西方に移動し、1 Maには現在の火山フロントの東側10 kmほどに位置していたと推測される(Fig. 6)。ハヶ岳地域では、東側に位置する八柱火山群(80 万年前以前)から、西側のハヶ岳火山群(50 万年前以降)の活動に明瞭に西方移動している(西来ら, 2007)。これらから、南部フォッサマグナ地域では、及川・石塚(2011)が伊豆半島東部で示唆したような火山フロントの東進の要素は見あたらない。

鮮新世火山フロントの移動速度を評価するため、現在の火山フロントからの距離と火成岩年代との関係を検討した(Fig. 7)。丹沢-富士地域および峡東-甲府地域では、いずれも4-3 Maに、荒船-ハヶ岳地域では約2 Maに、火山フロントの移動が時間的、空間的に不連続となっていることが明瞭に認められる。火山活動の休止期は、丹沢-富士地域では4.0-3.2 Ma, 峡東-甲府地域では4.3-2.9 Maであるが、荒船-ハヶ岳地域ではやや遅れて2.2-1.6 Maである

Fig. 7. Age versus distance plots of post late Miocene igneous rocks in the southern Fossa Magana region. An age (Ma) for a given rock plots against a distance (km) from its locality to the present-day volcanic front. Age data-sources are listed in Figures 5 and 6 captions. Solid circles represent the present data.

(Fig. 5, Fig. 7)。火山フロントは、8-4 Maにはほぼ同位置にあるが、4-2 Maの火山活動休止期を挟んで、西方へ移動した。なお、佐藤(2005)は、荒船・佐久地域からハヶ岳地域への火山フロントの移動の時期を 3 ± 1 Maとしている。

火山活動場の移動は、丹沢-富士地域では丹沢東部から丹沢西部へ、峡東-甲府地域では峡東地域から甲府地域へ、荒船-ハヶ岳地域では荒船-佐久地域からハヶ岳地域へと起こった(Fig. 5, Fig. 7)。火山活動場の西方への移動距離は丹沢-富士地域、峡東-甲府地域で10-15 kmにおよぶ。よって、ここでは4-2 Maの火山活動休止期を境に起こった火山活動場の急激な移動を鮮新世火山フロントの

ジャンプと呼ぶ。火山活動の再開後、火山フロントはさらに次第に西方へ移動して現在の火山フロントの位置に達した。

火山フロントのジャンプは、広域テクトニクスの変化にともなって発生する事が指摘されている(例えば、吉田ら, 2005)。テクトニスの議論には応力場や古地磁気のデータが不可欠である。丹沢深成岩体の石英中のヒールドマイクロクラックから求めた $\sigma_H \max$ はほぼ N-S(佐藤・高木, 2010)であり、深成岩体中の孔径歪みを用いた応力解放法では NNE-SSW とされる(地質調査所, 1981)。一方、丹沢深成岩体の同時性岩脈からは E-W 圧縮が推定されている(金丸・高橋, 2005)。丹沢山地の丹沢層群分布域では、全体的には南北性の岩脈が卓越するが、秦野から山北にかけての神縄断層に近い丹沢山地南部では東西性の岩脈が卓越する傾向にある(Mikami, 1962)。峡東-甲府地域の峡東岩脈群や水ヶ森火山岩類の単成火山群では NNW-SSE 方向が卓越し(三村ら, 1984)、荒船地域の本宿カルデラでは NNE-SSW 方向に貫入岩体が配列する(佐藤, 2004)。したがって、これらの岩脈類の卓越方向から、4 Ma 以前の応力場は全体的には NS 性の圧縮場が卓越していたものと推定されるが、岩脈類の形成年代の多くは明らかになっていない。一方で、1 Ma 以降の富士火山・箱根火山・東伊豆単成火山群では NW-SE 方向の応力場であることが明らかになっている(例えば、中村, 1969)。こうした応力場の変化はフィリピン海プレート(PHS)の運動方向の転換と深いつながりがあり(例えば、森ら, 2010; 下記)、火山フロントの西進とも密接な関係があるものと考えられるが、年代と応力場の変遷についてはさらなる検討が必要である。

3. 火山フロントの移動の原因—フィリピン海プレートの運動方向の転換—

鮮新世火山フロントがジャンプした 4-2 Ma は、フィリピン海プレート(PHS)の運動方向の転換期である。PHS のユーラシアプレート(EUR)に対する相対運動方向の転換時期について、瀬野ら(1988)、Seno(1989)は、プレート運動の原動力(スラブ引張力と抵抗力)の計算から、南海トラフにおいて 4-2 Ma に PHS が北北西進から北西西進へ変化したことを示した。

一方、相模トラフでの PHS の沈み込みは 3 Ma 以降に活動的となった事が地質学的証拠から指摘されている(Soh *et al.*, 1998; 徳山ら, 1999)。房総沖海溝三重点では、地形解析と音波探査記録から 1.5 Ma に(Seno, 1985; 瀬野・小川, 1989)、伊豆-小笠原弧北部では、背弧リフトの形成時期から 3-2 Ma に(西村・湯浅, 1991; 徳山ら, 1999)、富士川地域では応力場の変化から 2.5 Ma に(青池, 1999) PHS の運動方向が北北西進から北西進へ転換したと推定されている。丹沢地域では 3 Ma に隆起が開始され(貝塚, 1987)、2.5 Ma にプレート境界が丹沢山地北縁の藤野木-愛川構造線から伊豆半島北縁の神縄断層へジャンプした(青池, 1999)。房総半島では、伊豆弧前弧の浮揚性

沈み込みが PHS の運動方向の転換で弱まったことにより(本多・瀬野, 1988)、三浦層群と上総層群を境する黒滝不整合(3 Ma: 高橋, 2006)が形成されたとされている。

また、日本海東縁は 3 Ma 以降に短縮変形を生じ(例えば Sato, 1994)、この時期は新生プレート境界の発生時期と考えられている(中村, 1983; 小林, 1983)。これに関連した東北日本のユーラシアプレートからの分離(北米プレートへの転換)は、0.5 Ma と考えられている(瀬野・小川, 1989)。

以上のテクトニックイベントは、いずれも PHS の EUR に対する相対運動方向の変化をとまなうと考えられており、推定される転換時期が研究対象地域によって微妙に異なるものの、全体的にみると PHS の進行方向は 4 Ma 以前が北北西方向、4-2 Ma が移行期で、2 Ma 以降、北西方向へと変化したとまとめられる。したがって、鮮新世火山フロントの西方ジャンプとそれに伴うフロントの西進の開始は、PHS の運動方向の転換を反映したのと考えられる。火山フロントのジャンプおよび西進開始が北側の荒船-八ヶ岳地域で遅いのは PHS のプレートの衝突境界から離れるにしたがい波及時期が遅れることを示すと思われる。

4. 火山フロントの移動とプレートの沈み込み

火山フロントの移動とプレートの沈み込みとの関係には、(a)プレートの沈み込む海溝位置が固定している場合、(b)スラブの勾配が一定し海溝位置が移動する場合、(c)火山フロントも海溝も固定している場合の3通りのモデルが考えられる(Fig. 8)。A モデルは、スラブの勾配が 4-2 Ma 以降緩くなったことを示し、B モデルは、海溝位置が 4-2 Ma 以降に西進したことになる。C モデルでは現在と同様の火山フロント付近で誕生した火山自体が PHS の北西進により北方ないし西方に回転、移動したこととなる。以下にこの3つのモデルについて検討する。

これらのモデルを制約する条件として、(1)東北日本弧の火山フロントが 8 Ma 以降、現火山フロントと変わらないこと(周藤, 2009)、(2)一方で、伊豆-小笠原弧の鮮新世火山フロントが南部フォッサマグナ地域で現火山フロントより東方 40 km に存在していたこと、(3)丹沢-大磯地域では現地性のトラフ充填堆積物中に原位置(*in situ*)での火成活動が認められること、(4)火山フロントの移動開始時期に上述したように PHS の運動方向の転換が起こったらしいこと、があげられる。

A モデルは、これらの条件をすべて満足し、4-2 Ma に PHS の運動方向が北西進へ転換したことにより、沈み込む PHS スラブと PAC スラブとの接触域(長谷川ら, 2010)へかかる応力が減少して PAC のスラブ角度が浅くなったと考えることができる。Toda *et al.* (2008)は、3 次元地震データから、関東盆地の下 35-40 km の深さに、幅 100 km、厚さ 25 km の太平洋スラブの断片「関東フラグメント」を見だし、それが 200-300 万年前に日本海溝で

Fig. 8. Volcanic front migration models associated with the Pacific plate (PAC) subduction. Model A, a trench fixed model; model B, a trench transfer model; model C, a volcano rotation or extrusion model; VF, volcanic front.

沈み込んだ2列の交差した海山列の衝突によって形成されたものであることを示唆した。関東フラグメントは、フォッサマグナ地域での伊豆-小笠原弧と東北日本弧の火山フロントの屈曲に極めて調和した位置に存在する。このモデルに基づくと、関東フラグメントがPACスラブの弯曲を促し、それに伴い火山フロントの屈曲が増進されたと解釈される。すなわち、浮揚性の関東フラグメントの存在により、PACスラブはAモデルのようにスラブ勾配が緩くなり、より弯曲が進行することとなり、同時に火山フロントが西進することとなる。関東フラグメントがマンテルウェッジでのマグマ上昇を抑えていることも(Toda *et al.*, 2008), より深い深度(西方)でのマグマ発生を助長しているとも考えられる。

Bモデルは房総沖海溝三重点の移動で説明できる。房総沖海溝三重点の不安定さはPHSとEURあるいはNAMとのプレート相対運動に基づいて、McKenzie and Morgan (1969)の指摘以来、数多く議論されてきた(例えば, Seno,

Fig. 9. Volcanic front migration model (model B) associated with the migration of the Boso triple junction (modified after Niitsuma, 1996). S1 and S2, PAC slab depth at 110 km; T1 and T2, trench positions; TJ1 and TJ2, triple junction; VF1 and VF2, volcanic front. Abbreviations: EUR, Eurasian plate; NAM, North American plate; PAC, Pacific plate; PHS, Philippine Sea plate. AR, Arafune (Motojuku caldera); FJ, Fuji; HK, Hakone; IO, Izu-Oshima; KD, Kyoto dyke swarm; KN, Konarayama volcanic rocks; KJ, Kurofujii; SK, Saku Pliocene intrusive rocks; TZ, Tanzawa; YG, Yatsugatake. Solid triangles, Quaternary volcanoes; open triangles, late Miocene-Pliocene volcanoes.

1985; 瀬野・小川, 1989; Niitsuma, 1996)。Seno(1985), 瀬野・小川(1989)は房総沖海溝三重点の地形解析と音波探査記録から海溝三重点が1.5–0.5 Maの間に西北西へ30 km移動したと推論した。Niitsuma(1996)の海溝三重点進化モデルや高橋(2004a, 2004b, 2006)の東北日本弧西進説も、PHSが北西進することに伴って伊豆-小笠原海溝も西進すると考え、それに伴ってフォッサマグナ地域の火山フロントも移動することとなる。

これらの従来の見解をふまえ、Figure 9にこの仮説に基づくモデルを掲げる。鮮新世火山フロントに位置する佐久-荒船地域の火山岩類(吉沢・河内, 1995; 友野ら, 1997; 佐藤, 2005, 2007, 2010)は、第四紀火山である八ヶ岳火山(太田・有馬, 1988; 西来ら, 2009)と同様、 K_2O-SiO_2 ダイアグラムではMedium-KないしHigh-Kにプロットされることから、Low-Kに属する東北日本や伊豆弧の火山岩類における火山フロント下のスラブ上面深度(110 km程度: 巽, 1989)より深いことが予想される。し

たがって、8-4 Ma の火山フロントは PHS スラブの沈み込みを考慮しないとしても、すでにある程度屈曲していたものと考えられる (Fig. 9a)。この時期のプレート境界は葉山-嶺岡帯から丹沢北縁の藤野木-愛川構造線にあった。4 Ma 以降、PHS が運動方向を北西進へ転換したことにより、房総沖海溝三重点が移動し、プレート境界が相模トラフ-神縄断層-駿河トラフへジャンプし、会合部で構造侵食 (tectonic erosion) が起きたと考えることができる (Fig. 9b)、火山フロントはフォッサマグナ地域では従来以上に屈曲することとなる。

ところで、伊豆-小笠原弧北部では、(1)火山フロント東側の前弧域には新黒瀬堆 (西村・湯浅, 1991) を除いて中新世-鮮新世の火山活動の証拠がなく、(2)中新世-鮮新世の火山活動が 100 km 以上の幅を有するのに対して、第四紀の火山活動が約 40 km 以内の幅に限定されており、その要因の一つとして PAC の沈み込み角度が大きくなった可能性が考えられており (Ishizuka *et al.*, 2006)、さらに (3) GPS データの検討から、伊豆弧の前弧が PAC の運動方向と独立して、伊豆弧の背弧リフトの拡大により東方に移動していることが示唆されている (Nishimura, 2011)。PHS スラブは伊豆-小笠原弧に沈み込む PAC スラブに影響を及ぼさないと考えられる。したがって、南部フォッサマグナ地域での A モデルでの PAC のスラブ角度の変化、および B モデルでの海溝と火山フロントの移動は、島弧会合部での特殊性を反映した地域的なものと推測される。

C モデルでは PHS の北進ないし北西進による丹沢、伊豆ブロックの付加に伴う火山体の回転ないし東方への移動を考える。後期中新世にはフォッサマグナ地域の屈曲構造 (関東シンタクシス) はすでに形成されていた (Takahashi and Nomura, 1989)。よって、このモデルでは伊豆ブロックの衝突による回転、移動が考えられる。丹沢東部-大磯地域の古地磁気測定では、伊豆ブロックの衝突による 20-55° の時計回りの構造回転が報告されている (Yoshida, *et al.*, 1984; 小山・天野, 1984, 1985; 小山ら, 1986; 太田ら, 1986; Koyama and Kitazato, 1989)。

C モデルの成因として、ヒマラヤの衝突によるチベット高原での大規模な extrusion モデル (Tapponnier *et al.*, 1982; Peltzer and Tapponnier, 1988) のように、伊豆ブロックの衝突により丹沢-大磯地域全体が東方への押し出し (extrusion) モデルも考えられる。PHS の移動量は、PHS の NAM に対する運動速度を 2.7 cm/y (Seno *et al.*, 1993)、伊豆ブロックの衝突を 1 Ma として計算すると、100 万年間で 27 km となる。この PHS の移動量は衝突した伊豆ブロック内部での地殻変動、衝突された丹沢-大磯地域での地殻変動、中部日本の圧縮や隆起などの総和で消費される (松田, 1984)。伊豆ブロックの衝突による構造回転や、丹沢-大磯地域全体の東方への押し出し (extrusion) はこうした変動の一部であるかもしれない。しかし、実際の水平方向の移動量は酒匂川付近で数 km 以上と見積もら

れている (松田, 1984)。また、本調査地域には、丹沢-大磯地域全体が東方への押し出し (extrusion) を示唆する 40 km にわたる大規模な横ずれ断層は認められていない。さらに、丹沢深成岩体も 3-2 Ma に貫入した地蔵平侵入岩体も、いずれも 10° の時計回り回転しか被っておらず (Takahashi and Nomura, 1989; 金丸・高橋, 2005)、秩父深成岩体および本宿カルデラにおける古地磁気方位の測定結果でも、回転を受けた痕跡が認められない (Ueno and Tonouchi, 1987; Takahashi and Nomura, 1989)。40 km に及ぶ火山フロントの移動を、丹沢-大磯地域全体の構造回転や、東方への押し出し (extrusion) モデルで説明するのは困難に思われる。よって、C モデルは成立しないであろう。

以上の議論から、フォッサマグナ地域の鮮新世火山フロントは一時的に東方へ移動したのではなく、火山活動そのものが西方へ後退した A もしくは B モデルが適当である。両モデルの複合的な効果の可能性も考えられるが、本論では A, B 両モデルの可能性を示唆するにとどめておく。

VI. ま と め

伊豆-小笠原弧の衝突付加体を伴う南部フォッサマグナ地域には、伊豆-小笠原弧の火山フロントの東方に位置する荒船地域から丹沢-大磯地域にかけて、後期中新世-鮮新世火成岩類が小規模ながら分布している。本論文では、丹沢-大磯地域に分布する火山岩類 11 試料の K-Ar 年代を求め、すでに報告されている火成岩の年代と合わせ、南部フォッサマグナ地域における後期中新世-鮮新世火成岩類の時空間分布を検討した。丹沢-大磯地域の火山岩類 (貫入岩、溶岩) は中期中新世の 15 Ma 前後と、後期中新世から鮮新世の 7.5-4.2 Ma の 2 つの活動期に区分される。前者は伊豆-小笠原弧の丹沢火山体の火成活動を、後者は丹沢火山体の火成活動終了後、丹沢ブロックが本州弧に衝突する時期の火成活動を示す。伊豆-小笠原弧北端部での火山岩類の時空間分布から、太平洋プレートの沈み込みにより形成された火山フロントは、4 Ma 頃まで、現在の火山フロントの東方 40 km にあたる丹沢東部に位置し、それ以降、西方へジャンプし、現在の火山フロントへ次第に移動したことが示唆された。火山フロントの西方への移動は、フィリピン海プレートの運動方向が北北進から北西進へ変化したことと密接な関わりがあるものと推定される。

謝 辞 査読者の青池寛博士 (海洋研究開発機構)、匿名の査読者、および編集委員である木村純一博士 (海洋研究開発機構) には本論を改善するにあたりたいへん有益なご指摘をいただいた。榊原山地質年代学研究所八木公史氏には K-Ar 年代測定にあたりお世話になった。神奈川県立生命の星・地球博物館の平田大二氏には草稿を読んでいただき、多くの有益なご助言をいただいた。資試料の整理、分析、図面化などでは平塚地質調査会の家入真理子氏、吉村國見氏、芹沢宣子氏、目黒常雄氏らにお世話になった。こ

れらの方々に深謝する。

引用文献

- 天野一男(1986): 多重衝突帯としての南部フォッサマグナ. 月刊地球, **8**, 581-585.
- Amano, K. (1991): Multiple collision tectonics of the South Fossa Magna in Central Japan. *Modern Geology*, **15**, 315-329.
- 青池 寛(1999): 伊豆衝突帯の構造発達. 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), **9**, 111-151.
- 青池 寛, 門田真人, 末包鉄郎, 相川弘二, 松島義章, 川手新一, 山下浩之, 梅沢俊一, 今永 勇(1997): 丹沢山地ならびに周辺域の地質. 丹沢大山自然環境総合調査報告書, **24-63**, 神奈川県環境部.
- 青池 寛, 徐 垣, 徳山英一, 平 朝彦(2001): 伊豆衝突帯テクトニクスと物質循環. プレート沈み込み帯における物質循環一付加体の役割一, 月刊地球, 号外 **32**, 181-190.
- 有馬 眞, 青池 寛, 川手新一(1999): 丹沢山地の構造発達史. 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), **9**, 57-77.
- 有馬 眞, 末包鉄郎, 門田真人, 加藤英樹, 山下浩之(1990): 丹沢山地で発見されたざくろ石を含む流紋岩. 神奈川地学, **70/71**, 1-6.
- Berggren, W.A., Hilgen, F.J., Langereis, C.G., Kent, D.V., Obradovich, J.D., Raffi, I., Raymo, M.E. and Shackleton, N.J. (1995a): Late Neogene chronology: New perspectives in high-resolution stratigraphy. *Bull. Geol. Soc. Amer.* **107**, 1272-1287.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Swisher, C.C., III and Aubry, M.-P. (1995b): A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation* (Berggren, W.A., Kent, D. V., Aubry, M.-P. and Hardenbol, J. Eds.). SEPM Special Publication. (Soc. Sediment. Geol.), **54**, 129-212.
- 千葉達朗(1986): 大磯丘陵. 日本の地質 **3** 関東地方(日本の地質『関東地方』編集委員会編). 91-94, 共立出版.
- 地質調査所(1981): 丹沢山地における応力解放法による現場応力測定(2). 地震予知連絡会会報, **25**, 72-76.
- 第四紀火山カタログ委員会編(2000): 「日本の第四紀火山カタログ」. 2000/02/22, 日本語 WEB バージョン, 日本火山学会.
- 藤井敏嗣, 由井将雄(1985): 愛鷹火山の岩石学的特徴. 月刊地球, **7**, 622-627.
- 袴田和夫, 杉山茂夫, 今永 勇, 萬年一剛, 大木靖衛(2005): 箱根火山の K-Ar 年代. 火山, **50**, 285-299.
- Hamuro, K. (1985): Petrology of the Higashi-Izu Monogenic Volcano Group. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **60**, 335-400.
- 長谷川昭, 中島淳一, 内田直希, 弘瀬冬樹, 北佐枝子, 松澤 暢(2010): 日本列島のスラブの三次元構造と地震活動. 地学雑誌, **119**, 190-204.
- 平田由紀子(1999): 箱根火山の発達史. 伊豆・小笠原弧の研究—伊豆・小笠原弧のテクトニクスと火成活動, 神奈川県立博物館調査研究報告, **9**, 153-178.
- 本多 了, 瀬野徹三(1988): 黒滝不整合と上総トラフ出現の地学的意味—浮揚性沈み込みの停止に伴う陸側プレートの unbending による解釈—. 月刊地球, **10**, 624-629.
- 本間岳史(1976): 丹沢山地北縁の地質構造. 地質学論集, **13**, 279-297.
- 本間岳史(1984): 丹沢山地北縁におけるグリーンタフ造山末期の造構運動とモラッセ相. 埼玉県立自然史博物館研究報告, **2**, 27-46.
- 本間岳史(1991): 関東山地南縁における中〜後期中新世の造構運動と火成活動. 地団研専報, **38**, 27-37.
- Imanaga, I. (1999): Stratigraphy and Tectonics of the Ashigara Group in the Izu Collision Zone, Central Japan. *Bull. Kanagawa Prefectural Museum, Natural Science*, **28**, 73-106.
- 今永 勇, 杉山茂夫(1994): 大磯丘陵の篠窪火砕岩について. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), **23**, 87-90.
- 今永 勇, 山下浩之(1999): 足柄・丹沢・大磯・三浦半島に分布する新生代火成活動の K-Ar 年代. 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), **9**, 179-188.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971): A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, **8**, 523-548.
- Ishida, T. (1970): Stratigraphy of the Nishikatsura Group in the vicinity of Ohata, Tsuru City—geologic study of the southern Fossa Magna, Central Japan (2nd Report)—. *Mem. Fac. Lib. Arts & Educ. Yamanashi Univ.*, **21**, 219-223.
- 石田 高(1983): 山梨県, 峡東岩脈群の岩石の化学組成. 山梨大学教育学部研究報告, 第 2 分冊(自然科学系), **34**, 106-113.
- 石田 高(1989): 南部フォッサマグナ北縁部の新第三紀鶴ヶ鳥屋山貫入岩体—関東山地と御坂山地の衝突テクトニクス—. 山梨大学教育学部研究報告, 第 2 分冊(自然科学系), **40**, 62-70.
- 石黒 進(1974): 大磯丘陵東南部の地質. 神奈川県温泉研究所報告, **5**, 141-148.
- 石浜佐栄子, 平田大二, 小田原啓, 檀原 徹, 岩野英樹(2010): 大磯丘陵に分布する新第三系谷戸層のフィッシュン・トラック年代. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS023-P03.
- 石井 醇, 荒木 暁(1989): 王冠層. 東京学芸大学紀要, 第 4 部門, 数学・自然科学, **41**, 183-190.
- 石塚 治(2006): 伊豆半島における火山活動の時空変遷とその鉱床形成との関連. 資源地質学会年会講演会講演要旨集, **56**, 65.
- Ishizuka, O., Taylor, R.N., Milton, J.A., Nesbitt, R.W., Yuasa, M. and Sakamoto, I. (2006): Variation in the mantle sources of the northern Izu arc with time and space—Constraints from high-precision Pb isotopes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **156**, 266-290.
- Itaya, T., Doi, M. and Ohira, T. (1996): Very low potassium analysis by flame photometry using ultra low blank chemical lines: an application of K-Ar method to ophiolites. *Geochem. J.*, **30**, 31-39.
- Itaya, T., Nagao, K., Inoue, K., Honjou, Y., Okada, T. and Ogata, A. (1991): Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Mineral. J.*, **15**, 203-221.
- Ito, M. (1986): Neogene depositional history in Oiso Hill: development of Okinoyama Bank Chain on landward slope of Sagami Trough, Central Honshu, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **92**, 47-64.
- 貝塚爽平(1987): 関東の第四紀地殻変動. 地学雑誌, **96**, 223-240.
- 神奈川県教育委員会(1980): 神奈川県 5 万分の 1 地質図.
- 金丸龍夫, 高橋正樹(2005): 帯磁率異方性からみた丹沢トータル岩体の貫入・定置機構. 地質雑誌, **111**, 458-475.
- 金丸龍夫, 高橋正樹(2008): 東山梨火山深成複合岩体の全岩主化学組成. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 第 2 部地球システム科学, **43**, 155-165.
- Kaneoka, I. (1969): The use of obsidian for K-Ar dating. *Mass. Spectr.*, **17**, 514-521.
- 兼岡一郎, 石田 高, 長尾敬介(1993a): 甲府盆地東部の岩脈群(峡東岩脈群)の活動時期—K-Ar 年代測定に基づいた推定—. 火山, **38**, 57-61.
- Kaneoka, I., Isshiki, N. and Zashu, S. (1970): K-Ar ages of the Izu-Bonin Islands. *Geochem. J.*, **4**, 53-60.

- 兼岡一郎, 河内晋平, 長尾敬介(1993b): ハヶ岳東方地域の第三紀及び第四紀火山の活動時期—K-Ar 年代測定からの推定—. 日本火山学会1993年秋季大会講演予稿集, **2**, 76.
- Kaneoka, I., Matsubayashi, O., Zashu, S. and Aramaki, S. (1979): K-Ar ages of late Tertiary volcanic rocks in the Asama area. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **85**, 547-549.
- Kaneoka, I., Mehnert, H., Zashu, S. and Kawachi, S. (1980): Pleistocene volcanic activities in the Fossa Magna region, central Japan —K-Ar age studies of the Yatsugatake volcanic chain. *Geochem. J.*, **14**, 249-257.
- Kaneoka, I. and Suzuki, M. (1970): K-Ar and fission track ages of some obsidians from Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **76**, 309-313.
- 蟹江康光, 平田大二, 今永 勇(1999): 大磯丘陵と相模湾, 沖ノ山堆列の地質と微化石年代. 神奈川県立博物館調査研究報告, **9**, 95-110.
- 河内晋平(1998): ハヶ岳およびその周辺の火山岩と軽井沢町八風山溶岩の K-Ar 年代. 信州大学教育学部紀要, **93**, 149-160.
- 河野義礼, 植田良夫(1966): 本邦産火成岩の K-Ar dating (IV) —東北日本の花崗岩類—. 岩鉱, **56**, 41-55.
- 川手新一(1997): 丹沢山地ならびに周辺域の地質, **6**, 深成岩体. 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 45-52, 神奈川県環境部.
- Kawate, S. (1997): Geological models of the oceanic island arc system: an example of the Tanzawa Mountainland, Cretal Japan. Ph. D. thesis, Tohoku University, Sendai, Japan.
- Kawate, S. and Arima, M. (1998): Petrogenesis of the Tanzawa plutonic complex, central Japan: Exposed felsic middle crust of the Izu-Bonin-Mariana arc. *Island Arc*, **7**, 342-358.
- 木村政昭, 藤岡換太郎(1981): 神奈川県大磯丘陵で発見された枕状溶岩. 地質雑, **87**, 837-840.
- 金 容義, 新井田清信, 坂本 泉, 東 豊土(2007): 佐野川複合岩体に貫入する安山岩岩脈より採取された, レルゾライトのゼノリス. 日本地球惑星科学連合2007年大会予稿集, K130-017.
- 小林洋二(1983): プレート“沈み込み”の始まり. 月刊地球, **5**, 510-514.
- 小出良幸, 山下浩之, 平田大二, 菅井美里, 中村裕子, 前田信, 小嶋 結(2002): 神奈川県大磯丘陵に産する火山岩の岩石学的特徴. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), **31**, 9-18.
- 小出良幸, 山下浩之, 川手新一, 平田大二(2000): 蛍光 X 線分析装置による岩石主要元素の分析精度の検証. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), **29**, 107-125.
- 興水達司, 山岸猪久馬(1987): 北部フォッサ・マグナ新第三紀貫入岩類のフィッシュン・トラック年代. 地質雑, **93**, 773-776.
- Koyama, A. (1990): Tectonic evolution of the northern Koma Mountains, southern Fossa Magna, Central Japan. *J. Geosci. Osaka City Univ.*, **33**, 1-47.
- 小山真人, 天野一男(1984): 神奈川県西部・足柄層群の古地磁気. 日本地球電気磁気学会講演会講演予稿集, **76**, 142.
- 小山真人, 天野一男(1985): 神奈川県西部・足柄層群の古地磁気 2. 日本地球電気磁気学会講演会講演予稿集, **77**, 216.
- Koyama, M. and Kitazato, H. (1989): Paleomagnetic evidence for Pleistocene clockwise rotation in the Oiso Hills: A possible record of interaction between the Philippine Sea Plate and northeast Japan. In *Deep Structure and Past Kinematics of Accreted Terranes* (Hillhouse, J.W. Ed.). *Geophys. Monogr.*, **50**, 249-265.
- 小山真人, 北里 洋, 矢野 享(1986): 古地磁気から見た大磯丘陵の構造運動. 月刊地球, **8**, 620-625.
- 久野 久(1972): 5 万分の 1 箱根火山地質図および同説明書. pp. 52, 大久保書店.
- 倉沢 一, 今永 勇, 松本哲一, 柴田 賢(1989): 更新統足柄層群に貫入する矢倉岳石英閃緑岩体の K-Ar 年代と化学組成ならびに Sr 同位体比. 地質雑, **95**, 331-334.
- 倉沢 一, 石川秀雄(1985): 南関東第三紀火山岩類の化学組成とストロンチウム同位体比. 岩鉱, **80**, 437-450.
- 町田 洋(1977): 火山灰は語る—火山と平野の自然史. pp. 324, 蒼樹書房, 東京.
- 萬年一剛, 堀内誠示, 田口公則, 山下浩之, 平田大二, 川手新一, 蛭子貞二, 谷口英嗣(2003): 箱根地域・早川凝灰角礫岩から得られた微化石年代とその意義. 地質雑, **109**, 661-664.
- 松田時彦(1966): 地蔵平付近の地質, とくに進入岩類について. 神奈川県温泉研究所報告, **4**, 21-30.
- 松田時彦(1984): 南部フォッサマグナの弯曲構造と伊豆の衝突. 第四紀研究, **23**, 151-154.
- 松本哲一, 太田 靖, 星住英夫, 高橋 浩, 西岡芳晴, 三宅康幸, 角田謙朗, 清水正明(2007): 日本列島における年代末詳岩石の K-Ar 年代測定—地質図幅作成地域の火山岩・深成岩(平成 17 年度分)—. 地質調査研究報告, **58**, 33-43.
- 松本哲一, 宇都浩三, 水野清秀(1999): 蓼科山地域に分布する北ハヶ岳火山岩類の K-Ar 年代. 日本火山学会 1999 年秋季大会講演予稿集, **2**, 20.
- McKenzie, D.P. and Morgan, W.J. (1969): Evolution of triple junction. *Nature*, **224**, 125-133.
- 見上敬三(1955): 丹沢東縁部の地質. 横浜国大理科紀要, Sec. II, **4**, 41-64.
- Mikami, K. (1962): Geological and petrographical studies on the Tanzawa Mountainland. Part II. *Sci. Repts. Yokohama Nat. Univ.*, Sec. II, **9**, 59-108.
- 三村弘二, 加藤祐三, 片田正人(1984): 5 万分の 1 地質図幅御岳昇仙峡. 地域地質研究報告, pp. 61, 地質調査所.
- 三村弘二, 柴田 賢, 内海 茂(1994): 黒富士火山と甲府盆地北方に分布する火山岩類の火山活動と K-Ar 年代. 岩鉱, **89**, 15-20.
- 宮城晴耕, 金井克明(2002): 足柄層群に産出する低カリ質火山岩類と南部フォッサマグナ地域の火山岩の K₂O 分帯について. 地球科学, **56**, 165-177.
- 宮島 宏(1990): 東伊豆単成火山群の岩石学—捕獲結晶の意義と噴出物の時空的变化—. 岩鉱, **85**, 315-336.
- Miyashiro, A. (1974): Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. J. Sci.*, **274**, 321-355.
- Momose, K., Kobayashi, K., Yamada, T., Ozima, M. and Kaneoka, I. (1966): Radiometric age of lava flows of the Enrei formations in central Japan (1). *J. Fac. Sci. Shinshu Univ.*, **1**, 93-96.
- 森 慎一, 藤岡換太郎, 有馬 眞(2010): 相模トラフ北部の海底地形と断層系の形成—5 系統の断層発達史—. 地学雑, **119**, 585-614.
- 森田澄人, 石塚 治, Hochstaedter Alfred, 石井輝秋, 山本富士夫, 徳山英一, 平 朝彦(1999): 北部伊豆・小笠原弧の火山および構造の発達史. 月刊地球号外, **23**, 79-88.
- 向井理史, 小坂共栄(2008): 長野県美ヶ原高原東方から見出した安山岩溶岩の K-Ar 年代. 地球科学, **62**, 287-291.
- 向井理史, 三宅康幸, 小坂共栄(2009): 中部日本, 美ヶ原高原とその周辺地域における後期鮮新世-前期更新世の火山活動史. 地質雑, **115**, 400-422.
- 長井雅史, 杉原重夫, 壇原 徹(2007): 塩嶺累層, 和田峠-霧ヶ峰地域の火山層序とフィッシュン・トラック年代. 日本地質学会第 114 年学術大会講演要旨, 287.
- 長井雅史, 高橋正樹(2007): 箱根火山外輪山噴出物の全岩主化学組成. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **42**, 71-95.
- 長井雅史, 高橋正樹(2008): 箱根火山の地質と形成史. 神奈川県

- 立博物館調査研究報告(自然科学), **13**, 25-42.
- 長尾敬介, 板谷徹丸(1988): K-Ar 法による年代測定. 地質学論集, **29**, 5-21.
- 長尾敬介, 西戸裕嗣, 板谷徹丸, 緒方惟一(1984): K-Ar 法による年代測定. 岡山理科大学蒜山研究報告, **9**, 19-38.
- 中田節也, 吉本充宏, 藤井敏嗣(2007): 先富士火山群. 富士火山, 69-77, 山梨県環境科学研究所.
- 中井光一, 内山 慶, 山田 大, 河内晋平(2000): 霧ヶ峰火山, 池のくるみ-車山-虫倉の地質, 岩石, 活断層. 志賀自然教育研究施設研究業績, **37**, 23-35.
- Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A. (2009): Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity. *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi: 10.1029/2008JB006101.
- 中村一明(1969): 広域応力場を反映した火山体の構造—側火山の配列方向—. 火山, 第2集, **14**, 8-20.
- 中村一明(1983): 日本海東縁新生海溝の可能性. 東京大学地震研究所彙報, **58**, 711-722.
- Niitsuma, N. (1996): The trench-trench-trench type triple junction and tectonic evolution of Japan. *Geosci. Rep. Shizuoka Univ.*, **23**, 1-8.
- 西来邦章, 松本哲一, 宇都浩三, 高橋 康, 三宅康幸(2007): 中部日本, ハヶ岳地域の火山活動期の再検討. 地質雑, **113**, 193-211.
- 西来邦章, 及川輝樹, 太田 靖, 松本哲一, 宇都浩三, 三宅康幸(2009): 長野県大門峠地域に分布する流紋岩質溶岩ドームの K-Ar 年代: 諏訪-ハヶ岳火山地域の流紋岩類の活動時期について. 火山, **54**, 61-71.
- 西村 昭, 湯浅真人(1991): 伊豆・小笠原弧のスミスリフト—海洋性島弧における背弧リフトの形成の一例—. 地球科学, **45**, 333-344.
- Nishimura, T. (2011): Back-arc spreading of the northern Izu-Ogasawara (Bonin) Islands arc clarified by GPS data. *Tectonophysics*, **512**, 60-67.
- 野口伸一(1998): 関東地域の地震活動・発震機構・火山フロントとフィリピン海および太平洋プレートの沈み込み. 東京大学地震研究所彙報, **73**, 73-103.
- 野村 哲, 海老原充(1988): 群馬県西部新生代火山岩類の K-Ar 年代と古地磁気. 群馬大学教養部紀要, **22**, 65-78.
- 野村 哲, 海老原充(1991): 群馬・長野県境附近に分布する新生代火山岩類の K-Ar 年代と地史学的考察. 群馬大学教養部紀要, **25**, 109-117.
- 野村 哲, 小坂共栄(1987): 群馬県南西部の新第三系の地質構造発達史. 群馬大学教養部紀要, **21**, 51-68.
- 小田原 啓, 林 広樹, 山下浩之(2009): 神奈川県二宮町海沢海岸の谷戸層の微化石年代. 神奈川県温泉地学研究所報告, **41**, 47-50.
- Oikawa, T. and Nishiki, K. (2005): K-Ar ages of the lavas from Kirigamine Volcano, Central Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **50**, 143-148.
- 及川輝樹, 西来邦章, 名取克裕(2004): 諏訪湖周辺の塩嶺火山岩類の年代—塩嶺層における火成活動(その2)—. 日本火山学会 2004 年秋季大会講演予稿集, 156.
- 岡田尚武(1987): 南部フォッサマグナの海成層に関する石灰質ナンノ化石の生層序と古環境. 化石, **43**, 5-8.
- Okada, H. and Bukry, D. (1980): Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation. (Bukry, 1973, 1975). *Marine Micropaleontology*, **5**, 321-325.
- 岡田利典, 光畑 徹, 板谷徹丸(1990): 伊豆大島火山の K-Ar 年代. 蒜山研究所研究報告, **16**, 67-78.
- 太田 宏, 有馬 眞(1988): 南ハヶ岳, 真教寺山溶岩および横浜下部溶岩の岩石学的特徴と北ハヶ岳火山噴出物との比較. 横浜国立大学教育学部野外教育実習施設研究報告, **6**, 7-18.
- 太田英将, 石黒 均, 岩橋 悟, 新妻信明(1986): 丹沢山地東部の地質. 静岡大学地球科学研究報告, **12**, 153-189.
- 小沢 清, 堀内誠示(2005): 神奈川県中・東部地域の温泉井および露頭地質試料の石灰質ナンノ化石分析結果. 神奈川県温泉地学研究所報告, **37**, 65-74.
- Peltzer, G., Tapponnier, P. (1988): Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: an experimental approach. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15085-15117.
- Saito, K. (1993): ^{40}Ar - ^{39}Ar studies on some Tanzawa tonalite samples. *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 261-272.
- Saito, K., Otomo, I. and Takai, T. (1991): K-Ar dating of the Tanzawa tonalitic body and some restrictions on the collision tectonics in the South Fossa Magna, Central Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, **43**, 921-935.
- Saito, S., Arima, M. and Nakajima, T. (2007a): Hybridization of a shallow 'I-type' granitoid pluton and its host migmatite by magma-chamber wall collapse: the Tokuwa pluton, central Japan. *J. Petrology*, **48**, 79-111.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T. and Kimura, J.-I. (2004): Petrogenesis of Ashigawa and Tonogi granitic intrusions, southern part of the Miocene Kofu Granitic Complex, central Japan: M-type granite in the Izu arc collision zone. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **99**, 104-117.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Misawa, K. and Kimura, J.-I. (2007b): Formation of distinct granitic magma batches by partial melting of hybrid lower crust in the Izu Arc collision Zone, Central Japan. *J. Petrology*, **48**, 1761-1791.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2010): 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース 2010 年 2 月 1 日版. 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Sato, H. (1994): The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22261-22274.
- Sato, K. (1991): Miocene granitoid magmatism at the island-arc junction, Central Japan. *Modern Geology*, **15**, 367-399.
- 佐藤興平(2002): 群馬県南牧村砥沢の金鉱山跡調査報告(続)—砥沢岩体の K-Ar 年代と南牧周辺地域の新生代火成活動史—. 群馬県立自然史博物館研究報告, **6**, 59-74.
- 佐藤興平(2004): 妙義-荒船-佐久地域の火山岩類の K-Ar 年代と火山フロントの後退. 群馬県立自然史博物館研究報告, **8**, 109-118.
- 佐藤興平(2005): 荒船山の火山岩の K-Ar 年代と本宿カルデラの火山活動史における意義. 群馬県立自然史博物館研究報告, **9**, 11-27.
- 佐藤興平(2007): 荒船溶岩の K-Ar 年代と兜岩動植物化石群の時代. 群馬県立自然史博物館研究報告, **11**, 53-61.
- 佐藤興平(2010): 群馬県南西部南牧川流域の貫入岩体—化学組成の予察的検討—. 群馬県立自然史博物館研究報告, **14**, 59-70.
- 佐藤興平, 柴田 賢, 内海 茂(1986): 南部フォッサマグナ丹沢トータル岩質岩体の K-Ar 年代の再検討. 鉱山地質, **36**, 64-65.
- 佐藤興平, 鈴木正男, 柴田 賢(1990): アバタイトのフィッシュン・トラック年代からみた丹沢岩体の冷却史と丹沢山地の变成作用. 地質雑, **96**, 69-72.
- 佐藤興平, 由井俊三(2008): 関東山地北西縁に産する八千穂岩脈群の K-Ar 年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, **12**, 45-54.

- 佐藤隆恒, 高木秀雄(2010): 丹沢トータル岩体における石英中のマイクロクラックから推定された古応力場の変遷と伊豆弧の衝突. 地質雑, **116**, 309-320.
- Seno, T. (1985): Age of subducting lithosphere and backarc basin formation in the western Pacific since the middle Tertiary. In Formation of active ocean margins (Nasu, N., Yueda, S., Kushiro, I., Kobayashi, K. and Kagami, H. Eds.). 469-481, Terra Sci. Publ. Co., Tokyo.
- Seno, T. (1989): Philippine Sea plate kinematics. *Modern Geology*, **14**, 87-97.
- 瀬野徹三, 小川勇二郎(1989): 房総沖海溝三重点—その発達史. 火山とプレートテクトニクス, 285-291, 東京大学出版会, 東京.
- 瀬野徹三, 関口渉次, 吉田明夫(1988): フィリピン海プレートの運動の 4 Ma までの復元—2 Ma 頃に運動は変化したか?—. 月刊地球, **10**, 646-654.
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A.E. (1993): A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *J. Geophys. Res.*, **98**, 17941-17948.
- 柴田 賢, 青木正博, 河内晋平, 山崎哲良, 小林哲夫(1976): 長野県和田村第三紀石英閃緑岩中のペグマタイトと K-Ar 年代. 地調月報, **27**, 509-517.
- 柴田 賢, 加藤祐三, 三村弘二(1984): 甲府市北部の花崗岩類とその関連岩の K-Ar 年代. 地調月報, **35**, 19-24.
- 島津光夫, 楠田 隆(1980): 丹沢山地の新第三紀火山岩. 地質雑, **86**, 593-612.
- 島津光夫, 田淵章敬, 楠田 隆(1971): 丹沢山地東北部の地質構造—丹沢山地の地質学的岩石学的研究その 1—. 地質雑, **77**, 77-89.
- 周藤賢治(2009): 東北日本弧—日本海の拡大とマグマの生成. pp. 228, 共立出版.
- Soh, W. (1986): Reconstruction of Fujikawa trough in Mio-Pliocene age and its geotectonic implication. *Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ.*, Ser., Geol. Min., **52**, 1-68.
- Soh, W., Nakayama, K. and Kimura, T. (1998): Arc-arc collision in the Izu collision zone, central Japan, deduced from the Ashigara Basin and adjacent Tanzawa Mountains. *Island Arc*, **7**, 330-341.
- 鈴木由希(2000): 東伊豆半成火山群における珪長質マグマの成因. 火山, **45**, 149-171.
- 杉山雄一, 水野清秀, 狩野謙一, 村松 武, 松田時彦, 石塚治, 及川輝樹, 高田 亮, 荒井晃作, 岡村行信, 実松健造, 高橋正明, 尾山洋一, 駒沢正夫(2010): 静岡及び御前崎(第 2 版). 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Taira, A., Tokuyama, H. and Soh, W. (1989): Accretion tectonics and evolution of Japan. In The evolution of the Pacific Ocean margins (Ben-Avraham, Z. Ed.). 100-123, Oxford University Press, New York.
- 高木圭介, 小山真人(1992): 伊豆半島の第四紀火山の層序と年代. 日本火山学会 1992 年秋季大会講演予稿集, 160.
- 高橋雅紀(2004a): 日本列島の E-W 短縮テクトニクスの原因とその開始時期. 日本地震学会 2004 年秋季大会講演予稿集, 68.
- 高橋雅紀(2004b): 地質学的制約による 3 Ma 以前のフィリピン海プレートの運動と TTT 三重会合点の安定性. 日本地震学会 2004 年秋季大会講演予稿集, 177.
- 高橋雅紀(2006): フィリピン海プレートが支配する日本列島のテクトニクス. 地学雑, **115**, 116-123.
- Takahashi, M. and Nomura, S. (1989): Paleomagnetism of the Chichibu Quartz Diorite—Constraints on the time of lateral bending of the Kanto Syntaxis. *J. Geomag. Geoelectr.*, **41**, 479-489.
- Takahashi, M. and Saito, K. (1997): Miocene intra-arc bending at an arc-arc collision zone, Central Japan. *Island Arc*, **6**, 168-182.
- 高橋正樹, 金丸龍夫, 二平 聡(2004): 丹沢トータル岩体の全岩化学組成—分析値 171 個の総括—. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **39**, 259-284.
- 高橋正樹, 小見波正修, 根本靖彦, 長谷川有希絵, 永井 匡, 田中英正, 西 直人, 安井真也(2003): 富士火山噴出物の全岩化学組成—分析データ 847 個の総括—. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **38**, 117-166.
- 高橋正樹, 内藤昌平, 中村直子, 長井雅史(2006): 箱根火山前期・後期中央火口丘噴出物の全岩化学組成. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 第 2 部地球システム科学, **41**, 151-186.
- 高橋 康, 西来邦章(2006): 中部日本, 北八ヶ岳火山北麓に分布する前期更新世火山岩類の火山層序—北八ヶ岳—塩嶺地域における大規模マグマ活動について—. 地質雑, **112**, 549-567.
- 滝田良基(1974): 丹沢トータル岩複合岩体の岩石記載と岩体形成史. 地質雑, **80**, 505-523.
- 滝田良基(1980): 丹沢山地の斑れい岩質岩類の岩石学的研究—特にトータル岩との成因的關係について—. 地質雑, **86**, 369-387.
- Tamura, Y., Ishizuka, O., Aoike, K., Kawate, S., Kawabata, H., Chang, Q., Saito, S., Tatsumi, Y., Arima, M., Takahashi, M., Kanamaru, T., Kodaira, S. and Fiske, R.S. (2010): Missing Oligocene crust of the Izu-Bonin arc: Consumed or rejuvenated during collision? *J. Petrol.*, **51**, 823-846.
- Tamura, Y. and Tatsumi, Y. (2002): Remelting of an andesitic crust as a possible origin for rhyolitic magma in oceanic arcs: an example from the Izu-Bonin arc. *J. Petrology*, **43**, 1029-1047.
- Tani, K., Dunkley, D.J., Kimura, J.-I., Wysoczanski, R.J., Yamada, K. and Tatsumi, Y. (2010): Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology*, **38**, 215-218.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R., Cobbold, P. (1982): Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, **10**, 410-415.
- 巽 好幸(1989): 沈み込み帯における火山活動 I—プレートの沈み込みとマグマの発生—. 科学, **59**, 471-479.
- Taylor, B. (1992): Rifting and the volcanic-tectonic evolution of the Izu-Bonin-Mariana Arc. In Proc. ODP, Scientific Results (Taylor, B., Fujioka, K. et al. Eds.). College Station, TX, **126**, 627-651.
- 手島秀一, 河内晋平(1994): 和田峠東方・鷹山火山岩類の地質と岩石. 志賀自然教育研究施設研究業績, **31**, 1-8.
- Toda, S., Stein, R.S., Kirby, S.H. and Bozkurt, S.B. (2008): A slab fragment wedged under Tokyo and its tectonic and seismic implications. *Nature Geoscience*, **1**, 771-776.
- 徳山英一, 森田澄人, 徐 垣, 芦寿一朗, 倉本真一(1999): 伊豆・小笠原弧北域および伊豆衝突帯の構造発達史. 地質ニュース, **543**, 15-23, 実業公報社.
- 友野裕一, 曾我部綾, 荻須友子, 河内晋平(1997): 関東山地北西縁部の鮮新世火山岩類. 志賀自然教育研究施設研究業績, **34**, 1-9.
- Tsunakawa, H., Takeuchi, A. and Amano, K. (1983): K-Ar ages of dikes in Northeast Japan. *Geochem. J.*, **17**, 269-275.
- 津屋弘達(1968): 富士火山地質図(1: 50,000). 地質調査所.
- Ueno, H. and Tonouchi, S. (1987): Paleomagnetic evidence for the timing of formation of the Chichibu pyrometamorphic deposits, Japan. *Econ. Geol.*, **82**, 1723-1731.
- 内海 茂, 中野 俊, 宇都浩三(1998): 20 万分の 1 地質図幅「長野」地域の年代未詳岩石の K-Ar 年代. 地調月報, **49**, 189-193.

- 八木公史(2006): K-Ar 年代測定のための鉱物分離マニュアル. 地質技術, 創刊準備号(蒜山地質年代学研究所創立 10 周年記念特集), 19-25.
- 山梨県地質図編纂委員会(1970): 山梨県地質誌(10 万分の 1 山梨県地質図幅および同説明書). pp. 240, 山梨県.
- 山下浩之(1997): 丹沢山地ならびに周辺域の地質. 7. 丹沢山地の流紋岩ならびに石英斑岩. 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 53-56, 神奈川県環境部.
- 山下浩之, 石浜佐栄子(2012): 大磯丘陵新第三系における火山岩および火山岩礫の岩石学的特徴. 神奈川県博調査研報(自然), 14, 145-162.
- 山下浩之, 笠間友博, 神奈川県立生命の星地球博物館地学ボランティア(2008): 箱根火山の噴出物および基盤岩類の全岩化学組成データベース. 神奈川県博調査研報(自然), 13, 211-218.
- 山岸貴美子, 青山朋美, 河内晋平(1999): 茅野市八子ヶ峰の地質と岩石. 志賀自然教育研究施設研究業績, 36, 1-11.
- 柳沢幸夫, 渡辺真人, 高橋雅紀, 田中裕一郎, 木村克己, 林 広樹(2005): 大深度ボーリング試料による地質年代調査. 大都市大震災軽減化特別プロジェクト I: 地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成 16 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局・東京大学地震研究所・京都大学防災研究所・防災科学技術研究所, 338-358.
- 矢野 享(1986): 大磯丘陵南部地域の層序とその地質年代および堆積環境. 静岡大学地球科学研究報告, 12, 191-208.
- Yoshida, S., Shibuya, H., Torii, M. and Sasajima, S. (1984): Post-Miocene clockwise rotation of the Miura Peninsula and its adjacent area. *J. Geomag. Geoelectr.*, 36, 579-584.
- 吉田武義, 中島淳一, 長谷川昭, 佐藤比呂志, 長橋良隆, 木村純一, 田中明子, Prima, O.D.A., 大口健志(2005): 後期新生代, 東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造. 第四紀研究, 44, 195-216.
- 吉沢真紀夫, 河内晋平(1995): 佐久市・臼田町東方の鮮新世水落観音溶岩と spiracles. 滋賀自然教育研究施設研究業績, 32, 1-7.
- 由井将雄(1993): 愛鷹火山の地形発達史—特異なテクトニクス場に位置する火山の成長. 駿台史学, 87, 67-93.