

箱根火山の地質と形成史：最近の研究レビュー

Geology and Eruptive History of Hakone Volcano, Central Japan: Reviewing Two Decades of Progress

山口珠美¹⁾・山下浩之²⁾・萬年一剛³⁾・小林 淳⁴⁾

Tamami YAMAGUCHI¹⁾ Hiroyuki YAMASHITA²⁾, Kazutaka MANNEN¹⁾ & Makoto KOBAYASHI¹⁾

Abstract. Hakone volcano is the only active volcano in Kanagawa prefecture. This volcano has been studied by many researchers over long years. The fundamental view of the eruptive history of Hakone volcano was established by Professor Kuno in the middle of the 20th century. However, since the end of the 20th century, owing to newly held geological investigations and a number of K-Ar datings, the classical view has been revised. The classical view assumed a single large stratovolcano before the caldera formation but recent studies showed a complex of multiple medium to small sized stratovolcanoes formed the pre-caldera edifice. Until decades ago, K-Ar dating was not available for Hakone volcano due to its low-K rock chemistry; however, recent studies compiled the edifice forming history obtained by the improved K-Ar datings. The caldera of Hakone volcano is considered to have been formed by coalescence of several small sized calderas by the recent studies rather than collapse of entire topographical caldera of the present caused by a series of large eruptions as assumed in the classical studies. Based on these recent revisions, the eruptive history of Hakone volcano was subdivided into the following five stages. Stage-1: Several stratovolcanoes combined to create an edifice, which formed present caldera rim of Hakone volcano (0.4 to 0.24 Ma). Stage-2: Several small sized calderas (< 3 km in diameter) were formed by repeated large-scale pyroclastic flows and pumice fall eruption and coalescence of the calderas formed large topographic caldera (~11 km) (0.23 to 0.13 Ma). Stage-3: Older central cones, consisting of thick lava flows, and lava domes of andesitic to dacitic composition formed inside the caldera (0.13 to 0.08 Ma). Stage-4: Repeated explosive eruptions caused pumice falls and flows and formed a caldera complex again (0.08 to 0.05 Ma). Stage-5: Younger central cones consisting of small stratovolcanoes and lava domes were formed in the caldera. (0.05 Ma>). Collapse of Mt. Kamiyama, which is one of the Younger central cones, created Owakudani, which is known for fumarole and hot springs, and Lake Ashi around 3,500 years ago. Soon after the collapse, the newest edifice Mt. Kanmutrigatake was formed inside the amphitheater formed by the collapse. Here we listed all the edifice-forming eruptive products identified by the recent studies. We also take a brief look at the deposits formed by the latest phreatic eruptions (< 3 ka), which is critically important for disaster mitigation measures of the volcano.

Key words: Hakone volcano, eruptive history, geology, caldera, research history

1. はじめに

箱根火山は、神奈川県西部にある県内唯一の活火山である。これまでに多くの研究者によって、箱根火山の研究がなされてきた。研究の始まりは明治時代に遡る。和田 維

四郎及び小藤 文次郎により岩石学的研究が行われ（Wada, 1882; Koto, 1884）、鈴木 敏により地質図説明書が発行された（鈴木, 1884）。昭和初期 1930 年の北伊豆地震の発生後、久野 久は、箱根火山の詳細な地質学的・岩石学的研究を行い、箱根火山について、巨大な円錐形の成層火山が 2 回のカルデラ陥没と山体形成により、現在の直径約 11 km のカルデラをもつ火山地形となったと考えた（久野, 1952）。

しかし 20 世紀終盤以降の研究で、久野の提唱した発達史への修正が図られたほか新たな知見が明らかになった。その要点は以下のとおりである。①箱根火山のカルデラ形成前に生じた火山体は巨大な円錐形の成層火山ではなく複数の中～小型成層火山の集合体である（平田, 1994; 高橋ほか, 2006 など）。②テフラ層序の研究や K-Ar 法に

¹⁾ 箱根ジオミュージアム
Hakone Geomuseum
1251 Sengokuhara, Hakone, Kanagawa 250-0631, Japan
山口珠美 : geo-museum@town.hakone.kanagawa.jp

²⁾ 神奈川県立生命の星・地球博物館
Kanagawa Prefectural Museum of Natural History

³⁾ 神奈川県温泉地学研究所
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

⁴⁾ 静岡県富士山世界遺産センター
Mt. Fuji World Heritage Centre, Shizuoka

よる溶岩の年代測定が進み、箱根火山の発達史に数値年代が与えられた（例えば、町田，1977；袴田，1988；平田，1999；高橋ほか，1999）③箱根火山の活動の始まりについて、久野は前期～中期更新世と考えたが、町田（1977）はテフラの研究から約50万年前、及川・石塚（2011）は約40～30万年前の年代値を報告した。④新期カルデラ・古期カルデラともに大規模な爆発的噴火によって形成されたカルデラで（町田，1977）、現在の地形的カルデラが全域で陥没したのではなく、直径3 km以下の小規模カルデラが連結した複合的なカルデラと考えられるようになった（高橋ほか，2006；萬年，2008）。⑤頂上が平坦な浅間山・鷹巣山・屏風山等はカルデラ内を埋積した単一の楯状火山ではなく溶岩ドームや溶岩流の集合体である（高橋ほか，2006）。⑥久野は外輪山と前期中央火口丘がソレアイト系列、後期中央火口丘はカルクアルカリ系列と考えたが（久野，1952；Kuno，1968）、前期中央火口丘以前にもカルクアルカリ系列の岩石が出現することを示した（長井・高橋，2008）。

このような修正をふまえ、久野の箱根火山の発達史に対して、日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）及び長井・高橋（2008）は新しい形成史を提唱した。また、小林（2008）は中央火口丘群の噴火史とカルデラ内の地形発達過程を示した。

本報告では、久野の提唱した箱根火山の発達史と6つの修正点をまとめるとともに、最新の箱根火山の形成史について紹介する。さらに防災上特に重要と考えられる箱根火山の最新の水蒸気噴火堆積物について6章で詳しく報告する。

2. 箱根火山の地形

2-1. 箱根火山の位置とプレートテクトニクス

箱根火山は伊豆・小笠原弧の最北端部に位置し、近傍にはフィリピン海プレート、北アメリカプレート及びユーラシアプレートの3つのプレートが接する世界でも珍しいプレート3重会合点が存在する（加藤ほか，1985）。箱根火山はフィリピン海プレート上にあり、このフィリピン海プレートが、箱根の東～北～西でユーラシアプレート及び北アメリカプレートの下に沈み込んでいる（Seno *et al.*, 1993）。

2-2. 箱根のカルデラ地形

箱根火山は、カルデラの大きさが南北約11 km、東西約8 km、裾野の広がり南北約26 km、東西約20 km（長井・高橋，2008）で、神奈川県湯河原町・真鶴町・小田原市・南足柄市・山北町さらには静岡県小山町・御殿場市・裾野市・三島市・函南町・熱海市にまたがる。

カルデラの輪郭をなす外輪山は、東の塔ノ峰（566 m）から反時計回りに、明星ヶ岳（924 m）・明神ヶ岳（1169 m）・矢倉沢峠（867 m）・金時山（1212 m）・乙女峠（1005 m）・丸岳（1156 m）・長尾峠（911 m）・湖尻峠（850 m）・三国山（1102 m）・山伏峠（1035 m）・箱根峠（850 m）・鞍掛山（1004 m）・大観山（1012 m）・白銀山（993 m）と環状につながる（図1）。外輪山最高峰である金時山の標高は、以前は1,213 mとされていたが、国土地理院の測量方法の見直しによって、2014年4月に1,212 mに変更された。外輪山は、内側（カ

ルデラ側）が急峻で、外側が緩やかな斜面になっている。

外輪山の南東斜面には、星ヶ山（814 m）、幕山（626 m）、城山（563 m）、真鶴半島があり、南側には、岩戸山（734 m）、十国峠（日金山；771 m）がある。

カルデラ内に発達する中央火口丘は、東部に山頂部が比較的平坦な、浅間山（801 m）、鷹巣山（834 m）、屏風山（948 m）が半円をえがくように並んでおり、これらは前期中央火口丘と呼ばれている（高橋ほか，2006）。中央部には箱根火山最高峰の神山（1438 m）をはじめ、駒ヶ岳（1356 m）、陣笠山（1207 m）、台ヶ岳（1044 m）、小塚山（859 m）、上二子山（1099 m）、下二子山（1065 m）、冠ヶ岳（1409 m）がある。これらは、お椀を伏せたような地形をしている共通点があるが、後期中央火口丘と呼ばれている（高橋ほか，2006）（図2A, B）。

カルデラの西側には南北に細長い形の芦ノ湖があり、最大水深44 m、周囲長約21 kmである。カルデラからは、早川と須雲川の2つの河川が流出している。早川は仙石原を、須雲川は大観山の北西麓を水源とし、箱根湯本で合流して相模湾に流れ込んでいる。早川は全長約21 km、須雲川は全長約15 kmであり、これらは千切の谷とも歌われる深い谷を形成している。

3. 箱根火山の基盤

箱根火山の基盤岩は伊豆・小笠原弧で形成された海底火山の噴出物が主体となるが、外輪山北側斜面では、伊豆地塊と本州弧の間に堆積したトラフ充填堆積物の足柄層群が分布する（日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会，2007）。箱根火山で、箱根峠～芦之湯～蛇骨川を結んだ線の東側では伊豆・小笠原弧系の基盤である早川凝灰角礫岩が認められ、外輪山の西側斜面のボーリングでは足柄層群が認められているが、カルデラ内の大半では所属不明の火山岩類が厚く堆積しており、基盤岩は今のところ不明である（萬年，2014a）。本章では、伊豆・小笠原弧の基盤岩として早川凝灰角礫岩と須雲川安山岩類を紹介する。なお、従来の研究（例えば Kuno，1950；久野，1952 など）では、箱根火山の基盤岩として、湯ヶ島層群が分布すると考えられていたが、湯河原地域で湯ヶ島層群とされていたものは、湯河原火山の一部とされた（及川・石塚，2011）。そのため、現在の解釈では湯ヶ島層群は箱根地域の地表に露出せず、その分布は、萬年ほか（2002）による小田原市根府川の大深度温泉井の下部や、山下ほか（2006）による湯河原町宮下の大深度温泉井の下部にとどまる。このため今回は、湯ヶ島層群の記述は割愛する。なお、足柄層群に関する詳細は今永（1999）を、新知見を加えた概略は田口ほか（2021）を参照されたい。

3-1. 早川凝灰角礫岩

早川凝灰角礫岩は、早川及び須雲川の谷底に見られる。早川沿いでは箱根湯本から宮ノ下にかけては連続的に分布するが、宮ノ下の北西部で強羅潜在カルデラ（萬年，2014a）により分布が途絶える。須雲川沿いでは箱根湯本から畑宿にかけて分布するが、後述の須雲川安山岩類に覆われるか、断層関係あるいは指交関係にあり、複雑である（久野，1952）。早川凝灰角礫岩の年代は、含まれる

微化石から約 4.2 Ma (萬年ほか, 2003)、ジルコンのフィッシュントラック年代から 5.2 ± 0.7 Ma (柳沢ほか, 2005) が報告されている。

久野 (1952) によると、緑灰色の凝灰角礫岩や火山礫凝灰岩をはじめ、灰白色のデイサイト質軽石凝灰岩や少量の頁岩・火山円礫岩を含み、層厚は現在見られる部分だけで約 300 m に達する。萬年ほか (2003) はボーリングによる見かけの層厚を約 620 m と報告し、岩相や構成する岩石、含まれる化石群集の解析から早川凝灰角礫岩は、デ

イサイト～安山岩質の海底火山噴出物が陸棚外縁部～斜面上部 (水深 200 ～ 400 m 前後) に再堆積したタービダイトを主体とするとしている。玄武岩質から安山岩質の火山岩礫の全岩化学分析値及び記載岩石学的データは、山下ほか (2008) を参照されたい。なお、灰白色のデイサイト質軽石凝灰岩は箱根湯本において“湯本白石”^{しらいし}と呼ばれる石材で採石されていた (図 2D)。この石材が使われている建築物は現存しており、湯本の福住旅館はその代表例である。また、箱根湯本駅裏にある“白石地蔵”は灰白色のデ

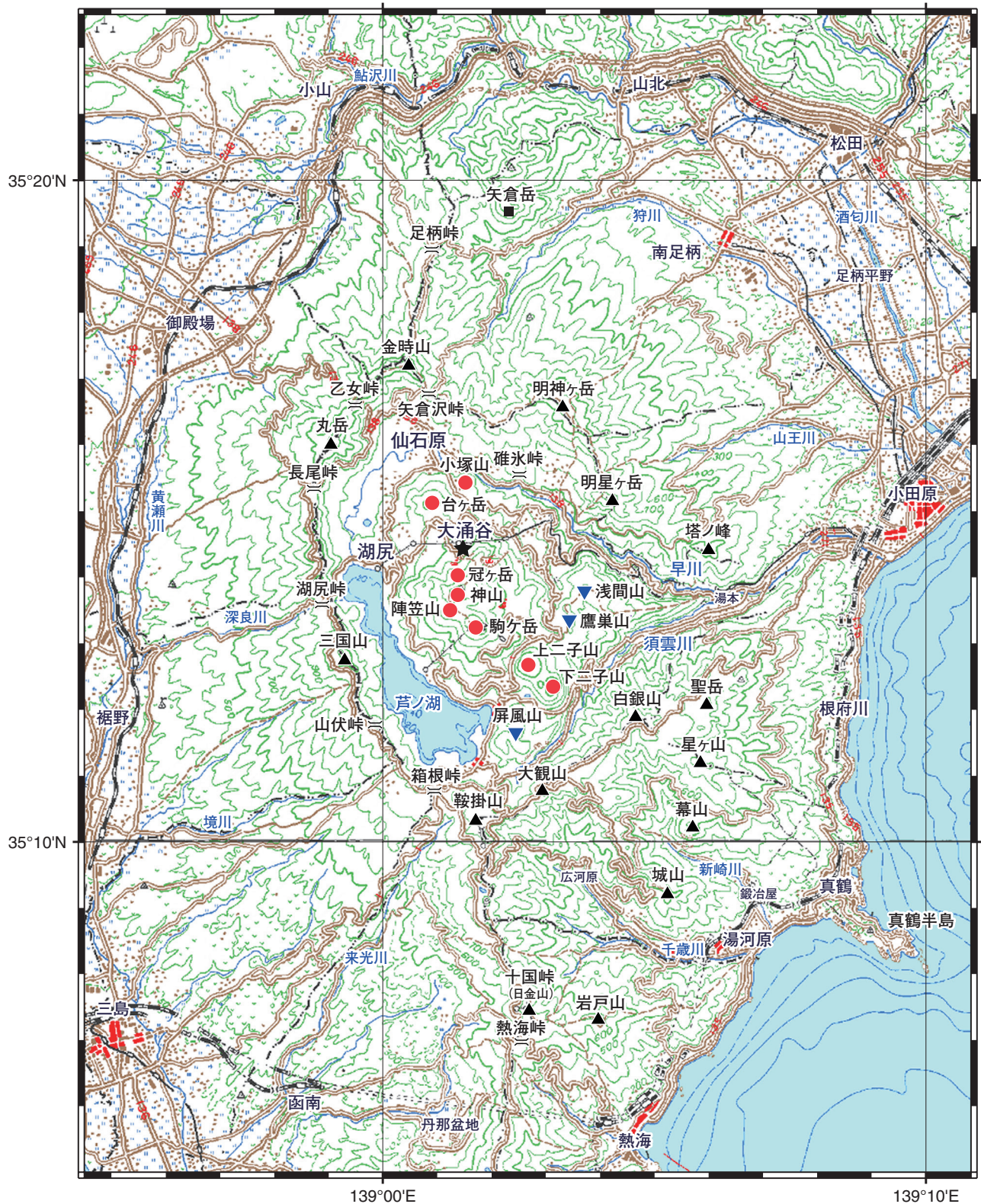


図 1. 箱根火山地形図。新井田 (2008) を改変。▲: 外輪山, ▼: 前期中央火口丘, ●: 後期中央火口丘。

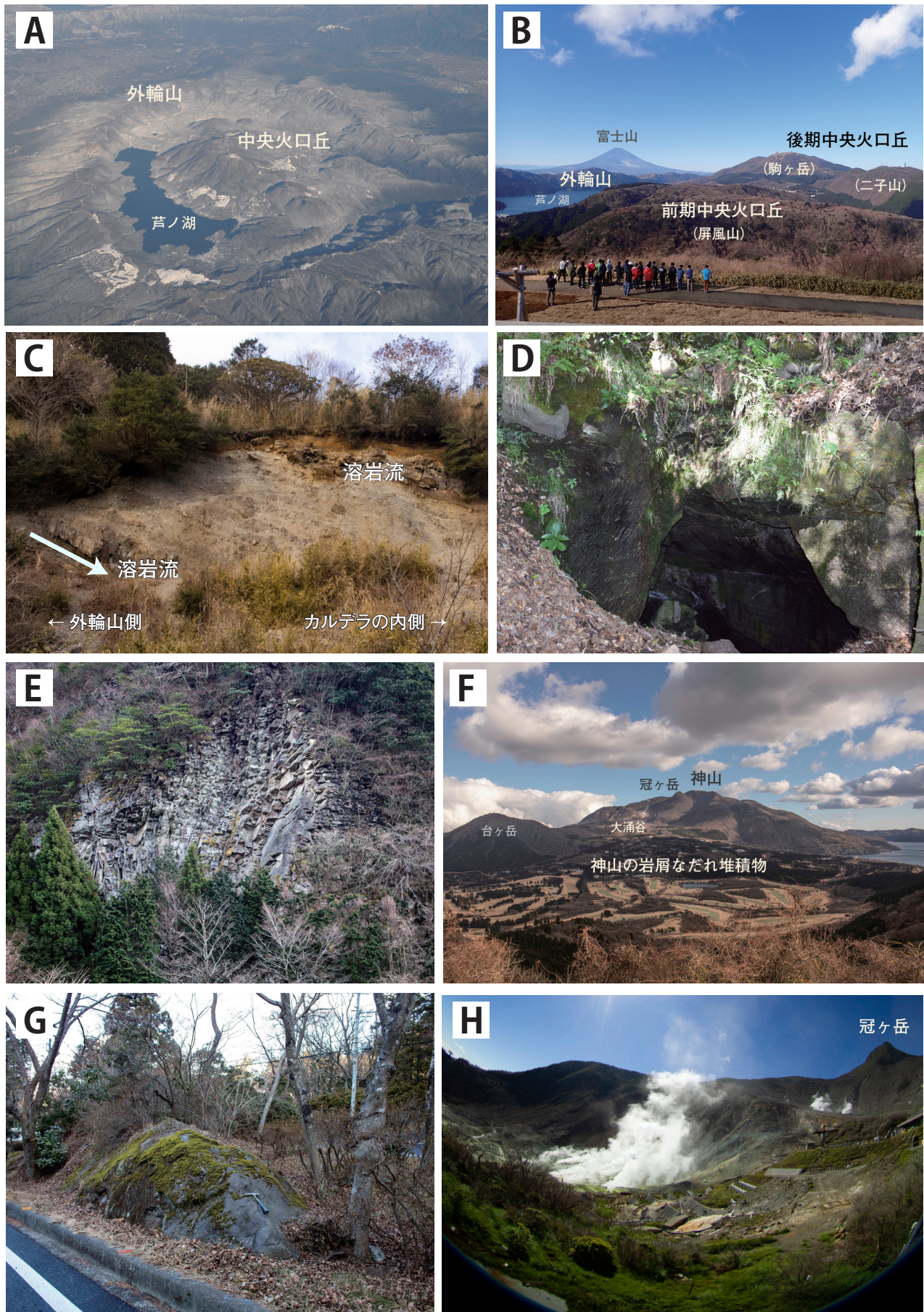


図 2. 箱根火山の代表的な景観. A: 箱根の全景 (第 2 回箱根ジオパークフォトコンテスト 最優秀賞作品「壮大な箱根カルデラ」に一部追記). B: 大観山からの眺望. C: 長尾峠の露頭. D: 早川凝灰角礫岩層からなる湯本白石の採掘跡 (箱根町湯本). E: 屏風山溶岩の露頭. F: 長尾峠からの眺望図. G: 神山の山体崩壊に伴う流れ山. H: 2016 年の大涌谷.

イサイト質軽石凝灰岩の崖に彫られた磨崖仏^{まがいぶつ}である。湯本駅裏の早川凝灰角礫岩からは、カルカロドン・メガロドン (*Carcharodon megalodon*) の歯の化石が報告されている (平林, 1898)。須雲川の上流域では、古くから伊豆半島の白浜層群に産するものと共通する貝化石の産出が報告されている (例えば、大塚, 1934)。この貝化石は、熱帯要素となる化石を含むことから白浜型化石群と呼ばれる (鎮西・松島, 1987)。早川凝灰角礫岩から産出する貝化石も白浜型化石群である (田口, 2008)。

3-2. 須雲川安山岩類

須雲川安山岩類は、箱根町畑宿～湯本間の須雲川本流及び支流に見られ、灰色から褐色の凝灰角礫岩や火山角礫岩と暗褐色ガラス質の溶岩からなる (久野, 1972)。化石が含まれないため年代は不明であるが、早川凝灰角礫岩が堆積した後に引き続いて海中で堆積したと考えられていた (久野, 1952)。須雲川安山岩類は“安山岩類”と称しているが、全岩化学分析の結果、大部分は二酸化ケイ素含有量が 55 wt.% を下回る玄武岩ないし玄武岩質安山岩であるとする報告がされている (山下ほか, 2008)。全岩化学組成の比較では、須雲川安山岩類の化学組成が箱根火山初期の溶岩類の化学組成と類似することから、須雲川安山岩類が箱根火山の活動の直前であった可能性も示唆される (山下ほか, 2008)。

4. 箱根火山の研究

箱根火山は、久野 久の提唱した形成史が長い間広く知られてきたが、近年、これを修正した新しい形成史モデルが提唱されるようになった。本章では、久野の発達史とその修正点を紹介する。なお箱根火山の発達史について、平田 (1999) が研究史の優れたレビューを行なっている。

4-1. 久野の提唱した発達史

久野は一連の研究により、その発達史を 2 回のカルデラ陥没とそれに引き続く侵食期によって隔てられた次の 3 つの活動期に分けて説明した (久野, 1952) (図 3)。

【第 1 期】古期外輪山と第一期カルデラ (古期カルデラ) の形成および侵食 (図 3A, B, C)

はじめに、現在の神山付近を中心とする巨大な円錐形の成層火山を形成した。玄武岩質の凝灰集塊岩や溶岩の噴出にはじまり (OS1)、続いて主にかんらん石輝石安山岩～輝石安山岩溶岩と多量の火山砕屑岩とを繰り返し噴出した (OS2)。これらの溶岩を古期外輪山溶岩と呼ぶ。この活動期の中頃に、北西～南東方向に走る金時山～幕山構造線に沿って変動が起こり、北西部に成層火山の金時山を、南東部に溶岩ドームの幕山 (OS3) を形成した (図 3A)。さらにこの活動の最後には、火山体の西北斜面に数個の側火山を形成した。活動を終えた後、火山体の中央が階段状に陥没し、南北 11 km、東西 7 km の卵形のカルデラ (古期カルデラ) が誕生し、この結果、最初の外輪山 (古期外輪山) ができた (図 3B)。引き続き侵食作用によってカルデラが拡大した (図 3C)。

【第 2 期】新期外輪山と第二期カルデラ (新期カルデラ) の形成と侵食 (図 3D, E)

この活動期のはじめに、流動性のある溶岩が流出し、カルデラの中に緩い傾斜をもつ一種の楕状火山を作った (図 3D)。溶岩は全体で約 300 m の厚さに達した。これらの溶岩を新期外輪山溶岩 (YS) と呼ぶ。その後、莫大な量の軽石流 (P) が中央火口から流出し、火山体の山麓に広範囲にわたって緩い傾斜の扇状地形あるいは段丘状地形をつくった。その直後、楕状火山の西側が陥没し、新しいカルデラ (新期カルデラ) が誕生した。このカルデラの範囲は古期カルデラと大体一致しているが、東部の浅間山・鷹巣山・屏風山は残され、外輪山 (新期外輪山) となった。引き続き侵食作用で新期外輪山の東部が侵食され、そこに早川及び須雲川が深く刻み込まれた (図 3E)。

【第 3 期】中央火口丘と芦ノ湖の形成 (図 3F, G)

この活動期のはじめに、爆発的な噴火によって軽石が噴出し、山体の東部及び南東部に堆積した (CC1)。引き続き、カルデラ内の金時山～幕山構造線上に、台ヶ岳・小塚山・神山・1325 m の峰・駒ヶ岳・上二子山・下二子山の 7 個の中央火口丘を形成した (図 3F)。この活動の最後に、神山の北西斜面で爆発が起こり、山体の北西部が吹き飛ばされ、山崩れを生じた。崩壊の堆積物は、神山の北西山麓に堆積し、その一部が河川をせき止めて芦ノ湖を形成した (図 3G)。

4-2. 久野以降の研究による修正点

前節の久野による箱根火山の発達史の説明はわかりやすく、日本の第四紀火山発達史の典型とされた。しかしその後研究が進み、これらの火山発達史について次のような修正がなされてきた。

【1】富士山のような一つの成層火山ではなかった

久野 (1952) は、古期外輪山形成期の箱根火山は富士山のような円錐形の一つの大型成層火山であったと考えた。しかし加藤 (1984) は、古期外輪山溶岩と一括されていた外輪山北部地域について、岩相及び構造から、火口の異なる 2 つ以上の独立した成層火山からなることを示唆した。また平田 (1994) は、溶岩流の分布、流動方向、岩石記載学的特徴、年代から、古期外輪山の中でも南東部は外輪山の他の部分よりも若い単独の成層火山と考えた (白銀山溶岩類)。

長井・高橋 (1996) は、長尾峠と仙石原の間のカルデラ壁にあるこれまで断層運動で逆傾斜したと考えられていた露頭 (通称: 長尾峠の露頭 (図 2C)) について溶岩の古地磁気測定を行い、ほとんど変動を受けず元の傾斜を保存しており、北西側の古期外輪山側に噴出中心を持つ、小型成層火山の一部である可能性が高いことを示した。これらは長井・高橋 (2012) に露頭スケッチとともに紹介されている。なお長尾峠の露頭は、現在箱根ジオパークのジオサイトとなっており、見学も可能である (図 2C)。その後、高橋ほか (1999) は、箱根火山の形成史と広域テクトニクス場について報告し、古期外輪山が一つ

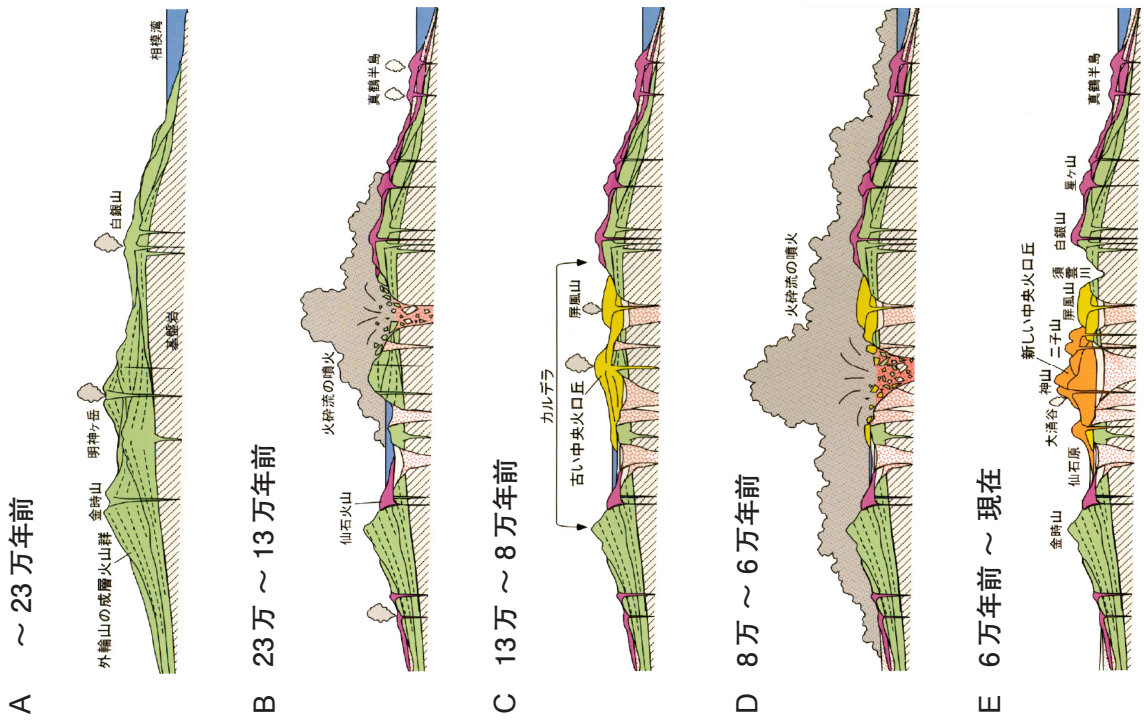


図 5. 箱根火山の形成史 (日本地質学会 (2007) 長井雅史氏作図を改変).

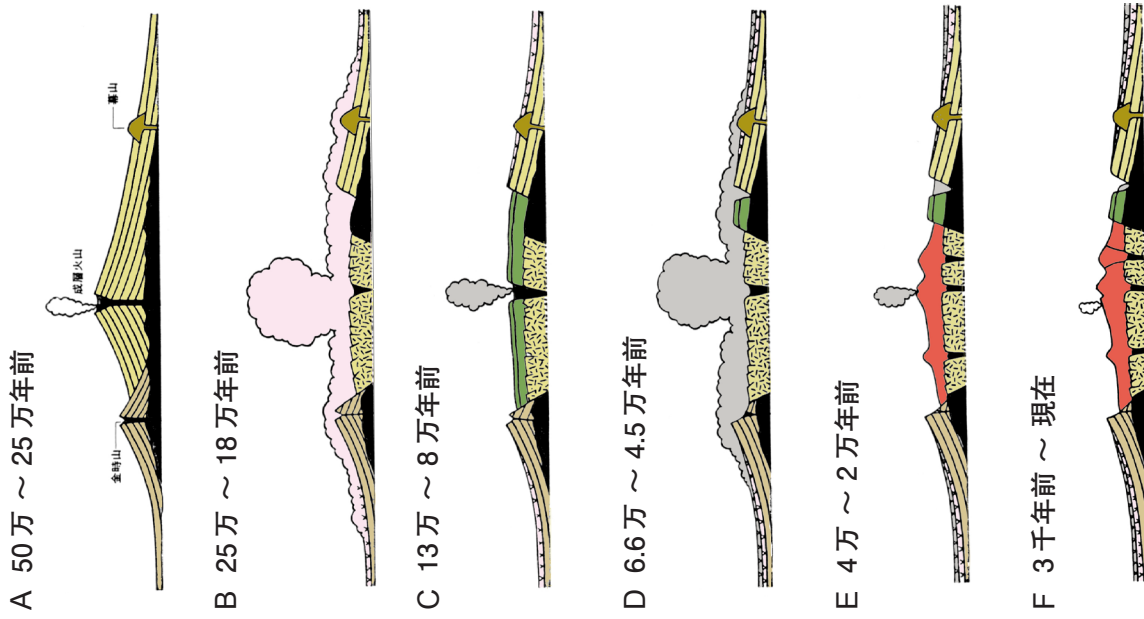


図 4. 箱根火山の発達史 (久野 (1952) を町田が改変, 相模原市地形地質調査会 (1986) を改変).

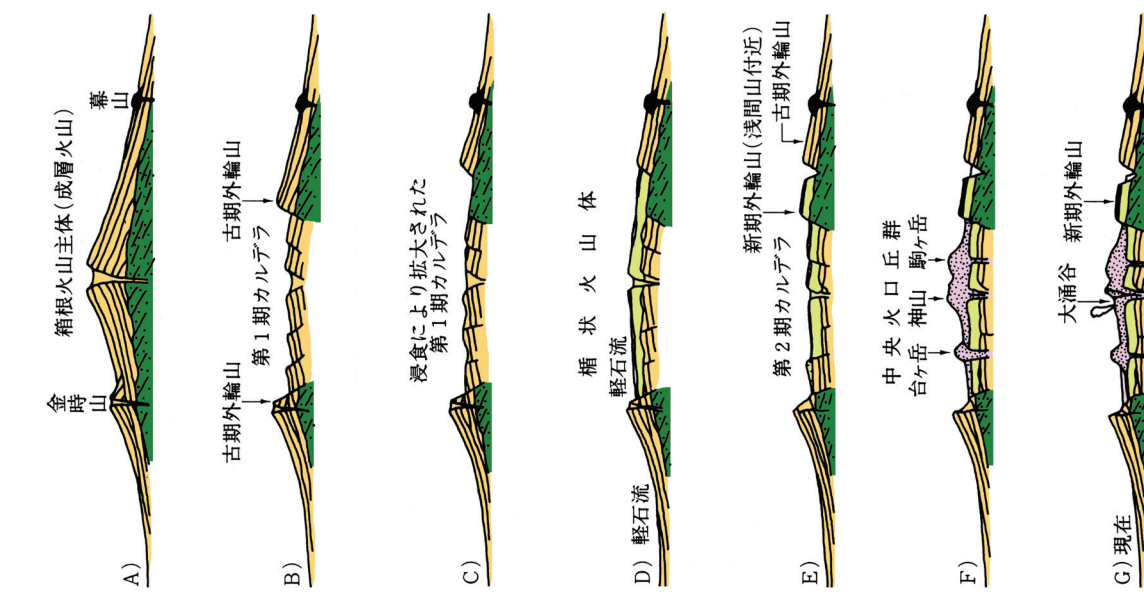


図 3. 箱根火山の発達史 (久野 (1952) を改変).

の大きな成層火山ではなく、複数の中小規模の火山の集合体からなることを報告した。日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）では、古期外輪山が複数の中小規模の成層火山と単成火山の集合体であるとする地質図と形成史を示した。

【2】形成史の年代が明らかになった （テフラ層序と数値年代の導入）

Kuno（1950）の段階では、年代測定法がほとんど無かったため、箱根火山の発達史は相対年代で編まれていた。しかしテフラ層序との対比や溶岩の K-Ar 年代測定が可能になり、発達史に数値年代が導入された。箱根火山から東へ約 20 km に位置する大磯丘陵には、上空の偏西風の影響で、箱根火山起源のテフラが厚く堆積している。これら大磯丘陵のテフラについては、町田ほか（1974）、上杉（1976）、関東第四紀研究会（1987）等によって詳細な層序が明らかとなった。また町田（1977）は、テフラの容積と年代をもとにテフラからみた箱根火山の活動史を示し、箱根火山では、ときには 10 km³ 以上に達する大噴火が起こり、箱根火山の活動の始まりが約 50 万年前であることを示した。そして相模原市地形地質調査会（1986）では、箱根火山の発達史を報告した（図 4）。これによると古期外輪山の形成が 50 ～ 25 万年前（図 4A）、爆発的な大噴火がくり返されることでできる古期カルデラの形成が 25 ～ 18 万年前（図 4B）、新期外輪山の形成が 13 ～ 8 万年前（図 4C）、新期カルデラの形成が 6.6 ～ 4.5 万年前（図 4D）、中央火口丘の形成が 4 ～ 2 万年前（図 4E）、神山の崩壊と芦ノ湖の形成が約 3000 年前（図 4F）となる。

米澤ほか（1980）及び箱根団体研究グループ（1992）等は、箱根火山の南東部において溶岩をテフラ層序の中に正確に位置づける研究を行った。また平田（1999）は K-Ar 年代に基づいた箱根火山の発達史を示した。さらに町田・新井（2003）、町田（2008）は、箱根火山起源のテフラと酸素同位体ステージ（MIS : Marine Isotope Stage）との関係について触れた。これによると外輪山の形成期は、MIS 13（Kb-Ks の上位、約 50 万年前）～ MIS 9、カルデラ形成期が MIS 8 ～ MIS 6、前期中央火口丘が MIS 5 ～ MIS 4、後期中央火口丘が MIS 3 ～ MIS 1 となる。

高橋ほか（1999）は、テフラ層序をもとに溶岩の侵食の程度や被覆関係等を考慮して形成史を推定し、その後、後述の日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）及び長井・高橋（2008）に新しい形成史としてまとめた。また、小林（1999）及び、後述の小林（2008）は、広域テフラ等を用いたテフラ層序と火砕流堆積物に含まれる炭化木片の ¹⁴C 年代から、爆発的噴火期～後期中央火口丘期にかけての噴火史と地形発達史を明らかにした。

【3】箱根火山の活動はいつ始まったのか

（天昭山溶岩と湯河原火山）

久野（1952）は、箱根火山初期の噴出物である古期外輪山溶岩（OSi）の噴出は、前期から中期更新世に始まったと考えた。また、湯河原町付近で噴出した天昭山玄武岩類について、古期外輪山溶岩との間に著しい時間的間

隙があると考え、箱根火山起源とはせず、噴出年代を鮮新世と考えた。さらに湯河原火山についても、古期外輪山溶岩との間に著しい時間的間隙を示す証拠はないとしつつも、箱根火山とは別の火山体と考えた。

平田（1994）は、岩相・岩石記載学的特徴と K-Ar 年代値から、箱根火山初期の火山噴出物（OSi）と天昭山玄武岩類とは同一ステージの噴出物と考え、箱根火山の活動開始時期について、これまで考えられていた約 50 万年前ではなく約 65 万年前とした。しかしその後の年代測定では同様の年代値を得られていない。また平田（1994）は溶岩流の分布、方向、岩石記載学的特徴、年代値からみて、湯河原火山は箱根火山との区別が難しく同一ステージに活動をしていたと考えた。高橋ほか（1999）も、湯河原火山が箱根火山の外輪山の他の山体と同時期の活動とみなした方がよいことを指摘した。及川・石塚（2011）は、久野（1952）の天昭山玄武岩類と湯河原火山噴出物を合わせたものを城山溶岩類と定義し、石塚（2006）、石塚・及川（2008）で城山溶岩類について 40 万～30 万年前の年代値を得たことを報告した。このことから現在では、箱根火山の活動の始まりを約 40 万年前とする考えが主流となっている。

ただし先に紹介したテフラの研究から火山活動の始まりを考えると約 50 万年前となる。箱根火山の活動がいつ始まったかについては、定義により異なる（萬年、2014b）。

【4】カルデラはどのようにしてできたのか

高橋ほか（1999）は、テフラの研究の成果をもとに、カルデラ形成に関連したと考えられる大規模噴火は 25 万年前から 16 万年前までの間の 10 万年間に 5 回ほどあり、従来古期カルデラとよばれていたものは 1 回の巨大噴火で生じたものではなく、平均 2 万年に 1 回ほどの割合で生じたやや大規模な噴火の結果形成された、ダイアトリーム様式の濁川タイプ（じょうご型カルデラ）のような小規模カルデラが連結した複合的なものであったと推定した。

萬年ほか（2006b）、萬年（2008）、萬年（2014a）は、カルデラ内において低重力異常域が少なくとも 4 つあること、またそうした領域のうち 2 つで温泉ボーリングコアから湖成層と下位の火山礫凝灰岩がセットになった堆積物（濁川型カルデラと呼ばれる小型カルデラの一般的な堆積物）が特徴的に検出されることを指摘し、地形的なカルデラの中に最大で直径 3km ほどの陥没構造が複数あると考えた。そして、強羅付近を中心とする潜在的なカルデラ構造を「強羅潜在カルデラ」と名付けた。強羅潜在カルデラは 2 段階の陥没が認められ、それぞれの陥没時期は、20 ～ 23 万年前（MIS 7）と 7 ～ 6 万年前（MIS 4）とされた（萬年、2014a）。これらはいずれも軽石流を頻繁に噴出した時期に当たり、強羅潜在カルデラが軽石流を噴出するような大規模噴火に伴って形成された構造であることを示唆した（萬年、2014a）。

【5】山体を再分類した

久野（1952）は、平坦な山頂部を有する浅間山・鷹巣

山・屏風山等について、古期カルデラ内の凹地をみたした緩い傾斜をもつ楯状火山が、軽石流の流出によりその西側が陥没し新期カルデラができることで残された東部にあたると考え、浅間山・鷹巣山・屏風山等を新期外輪山とした。そして新期外輪山の岩石について、久野（1952）は後述のピジョン輝石質岩系の分化が進んだ時期の安山岩及びデイサイトとし、紫蘇輝石質岩系の安山岩である中央火口丘とは異なるとした。ところが、高橋ほか（1999）は、新期外輪山溶岩の全岩化学組成を詳細に調べ、新期外輪山の安山岩は中央火口丘の安山岩と化学組成が類似していることを示し、新期外輪山溶岩の K_2O 含有量が HK-TP・TPH に近い値を示すことから、新期カルデラ形成期末期の比較的短時間に、新期外輪山溶岩が相次いで噴出した可能性が高いと考えた。また新期外輪山溶岩には複数の噴出中心が推定され、火砕流の流出をとまなう小型の溶岩ドーム・厚い溶岩流の集合体である可能性が高く、さらに新期外輪山のカルデラ壁がカルデラ壁であるかどうか疑わしいとした。その後、高橋ほか（2006）は新期外輪山はそれぞれ噴出中心を持つ小型の溶岩ドームや厚い溶岩流からなるとし、詳細な岩石記載と全岩化学組成を報告した。さらに高橋ほか（2006）は新期外輪山という名称は新期カルデラの形成が前提となっているが、箱根火山の場合、地形的な新期カルデラの存在は古期カルデラに比べて必ずしも明瞭ではないとして、古期外輪山・新期外輪山・中央火口丘をそれぞれ、外輪山・前期中央火口丘・後期中央火口丘に改めることを提案し山体を再分類した。なお、萬年（2008）では、新期外輪山のカルデラ壁とされてきた浅間山及び鷹巣山の西側斜面は断層を反映しているとした。

【6】箱根火山の岩石にはどのような特徴があるのか

久野（1952）は詳細な岩石記載を行い、箱根の火山岩を大きく2種類に分類した。古期及び新期外輪山溶岩は、石基中の輝石にピジョン輝石が単斜輝石のみを含むピジョン輝石質岩系であり、中央火口丘の溶岩は、石基中の輝石に紫蘇輝石等の直方輝石を含む紫蘇輝石質岩系であるとした。さらに前者は玄武岩からの結晶分化作用で生じたのに対し、後者は玄武岩質マグマが混成作用を受けたことで生じると考えた。その後、ピジョン輝石質岩系は鉄が濃集する分化トレンドをもつソレアイト系列に、紫蘇輝石質岩系は鉄が濃集しない分化トレンドをもつカルクアルカリ系列と対応づけた（Kuno, 1968）。すなわち、古期及び新期外輪山溶岩はピジョン輝石質岩系（ソレアイト系列）で、中央火口丘の溶岩は紫蘇輝石質岩系（カルクアルカリ系列）であるとした。また久野（1952）は、火山岩が玄武岩から流紋岩にまでわたること、中でも輝石安山岩が最も一般的な岩石であること、他の地域の火山岩と相違する点として、角閃石斑晶を有する岩石が稀なこと、石基にピジョン輝石を有する岩石が石基に紫蘇輝石を含む岩石に比べて多いこと等の特徴を挙げた。角閃石斑晶は稀であるが、天昭山玄武岩類に伴うデイサイト（B2d）（湯河原町北方）中に斑晶として産する（久野, 1952）。なお及川・石塚（2011）は、久野の B2d のデイサイトの一部について、湯河原火山の活動終了後に流出し

た小規模な流紋岩溶岩と考え、新崎川流紋岩として報告し、角閃石斑晶が含まれることを示した。また久野（1952）はピジョン輝石について、石基鉱物としては極めて普通であるが、極めて稀に斑晶として、箱根峠北の箱根火山古期外輪山溶岩の安山岩中に確認されることを示した。

高橋ほか（2006）、長井・高橋（2007）は、900 個余りの箱根の溶岩について全岩化学組成を詳細に検討し、カルクアルカリ系列は箱根火山の外輪山と中央火口丘の全てのステージで出現すること、箱根火山では全岩 K_2O 量の時間変化の方がより明瞭であることを明らかにした。

石井（2011）は、中央火口丘の小塚山と下二子山の溶岩について、輝石温度計を用いてその晶出温度について斑晶の中心部は約 970-980℃であるのに対し、斑晶の縁部や石基については約 950℃から 1050℃以上までという幅広い値をとること、石基ガラス中に晶出温度 1050℃以上のピジョン輝石結晶を確認したことを示した。さらにマグマの定量的温度変化を見積もり、それをマグマの含水量の定性的変化で説明し、中央火口丘溶岩のマグマ成因モデルを提案した。また石井（2013）は、箱根峠産斑晶ピジョン輝石含有安山岩について、斑晶ピジョン輝石の晶出温度を 1070℃と見積もった。

5. 箱根火山の地質と形成史

久野（1952）の箱根火山の発達史に対して、先に紹介した修正点をふまえ、日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）及び長井・高橋（2008）は箱根火山の発達史を5つのステージに分類した。図5～7で、長井・高橋（2008）の形成史を紹介するとともに、以下に、主として長井・高橋（2008）、日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）による形成史のステージ区分に準じて箱根火山を構成する噴出物を列挙する。なお、本文中に使われている「火山体」及び「溶岩グループ」の定義は、長井・高橋（2008）によって以下のように示されている。「一定の岩相、岩質、層位、分布をする噴出物の集合を『溶岩グループ』とし、地形的に明瞭な山体をもち、地層の傾斜や火口付近の堆積物等から噴火中心が推定可能な成層火山体については『火山体』と呼称する」。

【ステージ1】箱根火山外輪山形成期（～約23万年前：図5A）

ステージ1は現在の箱根の外輪山の山体部分を形成する活動である。ステージ1は岩石の SiO_2 量比や活動様式の違い等により、ステージ1-1からステージ1-3に細分できる。

【ステージ1-1】初期の陸上火山活動（～約35万年前）

最も古い活動は、天昭山溶岩グループ・畑宿溶岩グループ等からなる玄武岩質の比較的大規模な成層火山の形成である。その後、北部では狩川溶岩グループ・大唐沢溶岩グループ・荻野溶岩グループ、南部では湯河原火山体等の成層火山を形成した。

日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会（2007）及び長井・高橋（2008）に従って、同時期の各火山体及び溶岩グループについて、定義、分布、岩相、層

序関係、テフラとの対比、年代、噴出中心（推定される噴出中心）等の詳細を整理した。なお、テフラ名については、上杉（1976）、関東第四紀研究会（1987）、町田ほか（1974）及び町田・新井（1992）に従った。

●天昭山溶岩グループ（長井・高橋, 2008）

[定義] 天昭山玄武岩類 B2b、B2d (Kuno, 1938a; 1938b) の大部分と新崎川溶岩グループ（長井・高橋, 2007; 久野, 1938b) の O9 にほぼ相当）からなる。城山溶岩類 Sy (及川・石塚, 2011) の一部

[分布] 湯河原町広河原周辺

[岩相] 玄武岩質の薄い溶岩と凝灰角礫岩及び火山角礫岩の互層。安山岩～デイサイトも少量含まれる。成層火山を構成（長井・高橋, 2008）

[年代] 約 0.4 ~ 0.3 Ma (及川・石塚, 2011)。平田 (1999) は約 0.65 ~ 0.50 Ma としたが、その後の年代測定で同様の年代は得られていない

●畑宿溶岩グループ（長井・高橋, 2008）

[定義] 南東部の OS1 (Kuno, 1938a; 1938b) に相当

[分布] 須雲川右岸、聖岳の南東側（一部）、塔之沢の早川左岸（少量）

[岩相] 玄武岩質の凝灰角礫岩及び火山角礫岩を主体とし、薄い溶岩を伴う。成層火山を構成（長井・高橋, 2008）

[年代] 平田 (1999) に従い約 0.65 Ma と考えられているが（長井・高橋, 2008）、数値年代の測定報告はない

●狩川溶岩グループ（長井・高橋, 2008）（図 8A）

[定義] 火打石岳火山体（長井・高橋, 2007）を改称。北東部の OS1 (Kuno, 1938a) の大部分に相当。OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 駿河小山から足柄峠にかけての稜線の東側、矢倉沢から火打石岳にかけての狩川沿い、矢倉沢峠～碓氷峠及び宮城野～塔ノ沢にかけてのカルデラ壁下部

[岩相] 玄武岩～玄武岩質安山岩の凝灰角礫岩及び火山角礫岩と薄い溶岩、降下スコリア層の互層。成層火山を構成（長井・高橋, 2008）

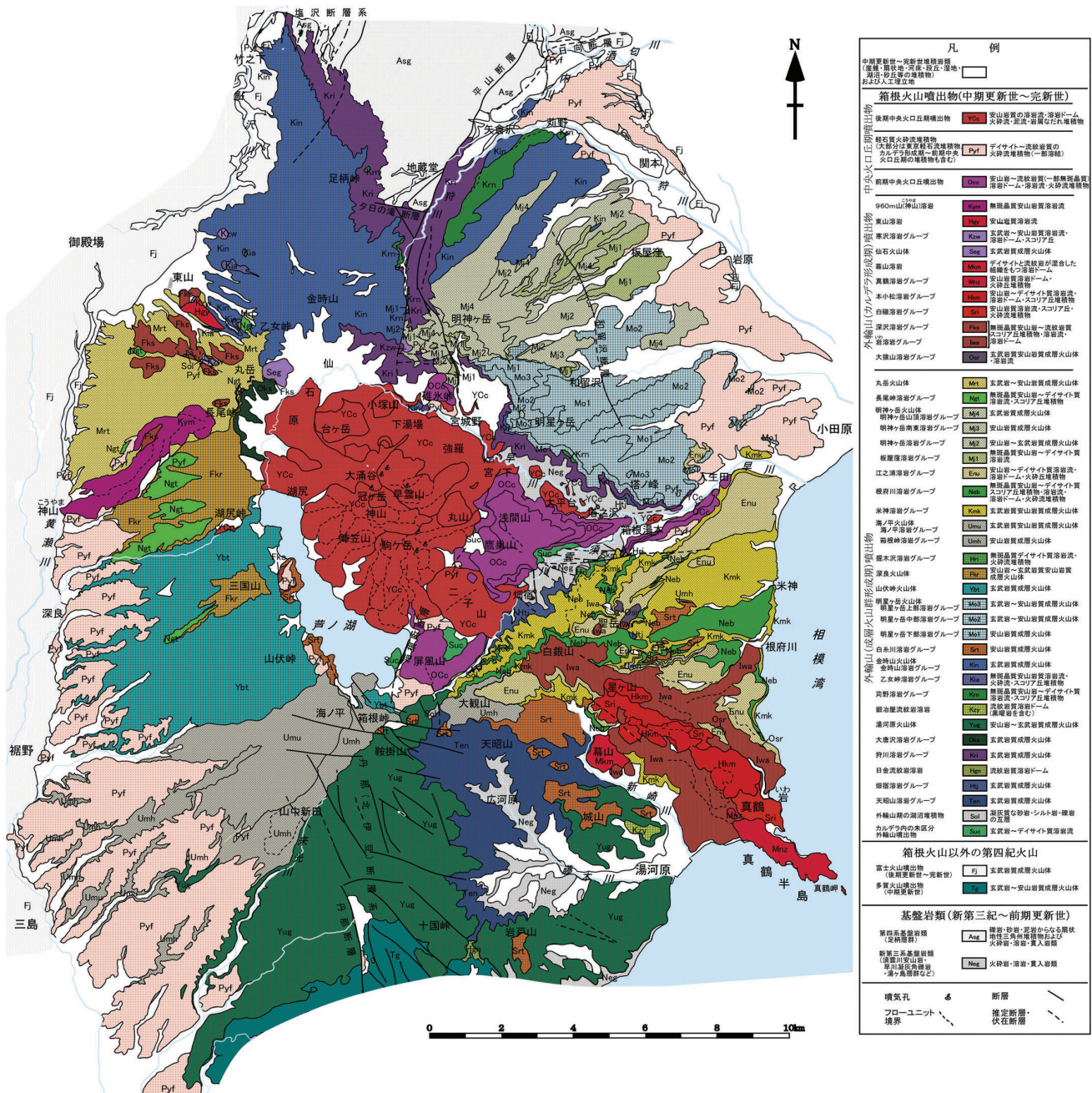
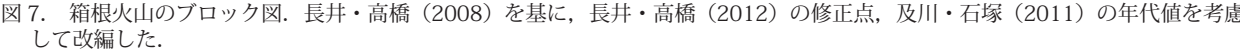


図 6. 箱根火山の地質図（日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007 を改変）。



[層序関係] 畑宿溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)
 [テフラとの対比] TII-9 (TE-5) を挟在 (長井・高橋, 2012)。
 TII-9 (TE-5) を覆う (狩野ほか, 1988)。柄沢ローム層の
 KR-28 を狭在する (上杉ほか, 1985)
 [年代] テフラの対比から約 0.5 ~ 0.35 Ma (長井・高橋, 2008)
 [噴出中心] 火打石岳の南~南西方の碓氷峠付近 (長井・高橋,
 2008)

おおからさわ
 ●大唐沢溶岩グループ (長井・高橋, 2008)

[定義] OS1 (Kuno, 1938a) の一部
 [分布] 外輪山北西側のカルデラ壁下部
 [岩相] 玄武岩質の薄い溶岩とスコリア質の火山弾を含む凝灰
 角礫岩、火山角礫岩の互層。成層火山を構成 (長井・高橋,
 2008)
 [年代] 岩石の類似から狩川溶岩グループと同時期 (約 0.5 ~ 0.35
 Ma) (長井・高橋, 2008)

かりの
 ●苅野溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 8B)
 [定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部。狩川溶岩グループ (長井・高橋,
 2007) の一部を改称
 [分布] 足柄峠~狩川周辺、早川沿い
 [岩相] 無斑晶質安山岩の溶岩、アゲルチネートが点在。複数の
 スコリア丘や溶岩流からなる単成火山群を形成 (長井・高橋,
 2008)
 [層序関係] 狩川溶岩グループの比較的上部の層準 (長井・高橋,
 2008)
 [年代] 0.26 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)。約 0.27 Ma 以前 (長井・
 高橋, 2008)

ゆがわら
 ●湯河原火山体 (長井・高橋, 2008)
 [定義] 湯河原火山 YV1、YV2 (Kuno, 1938a; 1938b) に相当。久
 野は湯河原火山と呼称し、箱根火山より前に形成された別
 個の成層火山と考えたが、最近の年代測定により箱根外輪
 山形成期の噴出物であることが判明した。なお、及川・石
 塚 (2011) は箱根火山群のひとつである湯河原火山噴出物と
 し、不動滝溶岩類と城山溶岩類に区分している。不動滝溶
 岩類は久野により湯河原地域で湯ヶ島層群とされてきた部
 分に、城山溶岩類は久野の湯河原火山に相当する。
 [分布] 湯河原付近
 [岩相] 玄武岩~安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩、火山角礫岩の互
 層。成層火山を構成 (長井・高橋, 2008)
 [層序関係] 天昭山溶岩グループを覆う。白糸川溶岩グループ、
 一部は鍛冶屋流紋岩に覆われる (長井・高橋, 2008)
 [年代] 0.38 ± 0.02 Ma, 0.26 ± 0.03 Ma, 0.23 ± 0.04 Ma (ともに
 袴田ほか, 2005)。約 0.4 ~ 0.3 Ma (及川・石塚, 2011)。約 0.4
 ~ 0.35 Ma (長井・高橋, 2008)
 [噴出中心] 広河原付近 (久野, 1952)、鞍掛山周辺 (長井・高橋,
 2008)、湯河原町温泉場付近、同時に外輪山の鞍掛山付近や藤
 木川上流などにも存在した可能性もあり (及川・石塚, 2011)

[ステージ 1-2] 玄武岩~安山岩質成層火山群の形成
 (約 35 万~約 27 万年前)

玄武岩質の成層火山に加えて安山岩質の中規模な成層火
 山が形成されるようになった。この時期に活動した火山体
 は、金時山火山体・明星ヶ岳火山体・白糸川溶岩グループ・
 山伏峠火山体・深良火山体・堀木沢溶岩グループ・鍛冶屋

流紋岩等である。

きんとき
 ●金時山火山体 (長井・高橋, 2008)
 [定義] OS4 (Kuno, 1938a) に相当、OS2 (Kuno, 1938a) の一部。金
 時山溶岩グループと乙女峠溶岩グループからなる
 [分布] (金時山溶岩グループ) 金時山を中心として、乙女峠~
 火打石岳のカルデラ縁とその北~西側の斜面。(乙女峠溶岩
 グループ) 金時山西山腹の金時山溶岩グループの上部層準
 [岩相] (金時山溶岩グループ) 玄武岩質の溶岩と凝灰角礫岩・
 火山角礫岩の互層。(乙女峠溶岩グループ) 無斑晶質安山岩
 の溶岩、スコリア質火山角礫岩、粗粒降下スコリア層、凝
 灰角礫岩、同質の岩脈 (ともに長井・高橋, 2008)
 [噴出中心] 金時山南方の貫入岩体付近 (Kuno, 1938a)
 [年代] 0.20 ± 0.02 Ma (袴田ほか, 2005: 山頂付近の岩脈)。約 0.35
 ~ 0.3 Ma (長井・高橋, 2008)

みょうじょう
 ●明星ヶ岳火山体 (長井・高橋, 2008) (図 8C)
 [定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部
 [分布] 明星ヶ岳から塔ノ峰にかけてのカルデラ縁の稜線と東側
 の山腹
 [岩相] (下部) 厚い安山岩質溶岩主体 (中部) 安山岩~玄武岩
 質の溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩の互層 (上部) 薄い玄
 武岩~安山岩質溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩の互層。侵
 食の進んだ成層火山を構成 (長井・高橋, 2008)
 [層序関係] 狩川溶岩グループ、金時山溶岩グループ、苅野溶岩
 グループの一部を覆う (長井・高橋, 2008)
 [年代] 下部が白糸川溶岩グループと対比可能な安山岩で構成さ
 れていることから約 0.3 Ma (長井・高橋, 2008)
 [噴出中心] カルデラ内、上部の噴出中心の一部は明星ヶ岳西方
 の宮城野付近の可能性あり (長井・高橋, 2008)

しらいとがわ
 ●白糸川溶岩グループ (長井・高橋, 2008)
 [定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O12 (Kuno, 1938b) にほぼ
 相当、O14 (Kuno, 1938b) の一部、城山溶岩類 Sy (及川・
 石塚, 2011) の一部
 [分布] 根府川西方の白糸川周辺、新崎川から大観山にかけての
 中腹の斜面、孫助山や岩戸山の山頂部、芦ノ湖西岸のカル
 デラ壁の下部
 [岩相] 苦鉄質斑晶に富む厚い安山岩質の溶岩を主体 (長井・高
 橋, 2008)
 [層序関係] 天昭山溶岩グループ、湯河原火山体を覆う (長井・
 高橋, 2008)
 [年代] 0.34 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005: 孫助山の山頂部)、 0.32 ± 0.02
 Ma (袴田ほか, 2005)。約 0.33 ~ 0.3 Ma (長井・高橋, 2008)

やまぶしとうげ
 ●山伏峠火山体 (長井・高橋, 2008)
 [定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部
 [分布] 湖尻から海ノ平にかけてのカルデラ縁とその西側斜面
 [岩相] 玄武岩質の溶岩と凝灰角礫岩の互層。成層火山を構成 (長
 井・高橋, 2008)
 [層序関係] 白糸川溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)
 [年代] 約 0.3 ~ 0.27 Ma (長井・高橋, 2008)
 [噴出中心] 芦ノ湖付近 (長井・高橋, 2008)

ふから
 ●深良火山体 (長井・高橋, 2008)
 [定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 湖尻峠と長尾峠の間のカルデラ縁及びその西方斜面と三
国山の山頂部
[岩相] 玄武岩質安山岩～安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩・火山角
礫岩の互層 (長井・高橋, 2008)
[年代] 約 0.3 ～ 0.27 Ma (長井・高橋, 2008)
[噴出中心] 山伏峠火山体よりも北寄りの湖尻東方付近 (長井・
高橋, 2008)

ほりきざわ
●堀木沢溶岩グループ (長井・高橋, 2008)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O1 (Kuno, 1938b) の一部
[分布] ニノ戸沢～猿沢間
[岩相] 安山岩～デイサイト質の厚い溶岩と凝灰角礫岩・火山角
礫岩の互層 (長井・高橋, 2008)
[層序関係] 須雲川安山岩類、狩川グループの溶岩や凝灰角礫岩
を覆う (長井・高橋, 2008)
[年代] 層序関係より約 0.3 Ma (長井・高橋, 2008)

かじや
●鍛冶屋流紋岩溶岩 (長井・高橋, 2008)
[定義] D5 (Kuno, 1938a; 1938b) に相当。鍛冶屋流紋岩 Ka (及川・
石塚, 2011) に相当
[分布] 湯河原駅北西の鍛冶屋と城堀の間
[岩相] 黒曜岩を含む流紋岩質の溶岩ドームを形成 (日本地質学
会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007)
[層序関係] 湯河原火山噴出物を覆う (及川・石塚, 2011)
[年代] 約 0.3 Ma (及川・石塚, 2011)。0.39 Ma (鈴木, 1970 :
※ 較正 FT 年代は得られていない)

**[ステージ 1-3] 安山岩質成層火山群・独立単成火山群の形成 (約
27 万～約 23 万年前)**
安山岩質の成層火山が主体となり、単成火山の活動も見られ
るようになる。この時期に活動した火山は、丸岳火山体・長尾
峠溶岩グループ・明神ヶ岳火山体・米神溶岩グループ・根府川
溶岩グループ・江之浦溶岩グループ・海ノ平火山体等である。

まるたけ
●丸岳火山体 (長井・高橋, 2008)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部
[分布] 丸岳と長尾峠の間の山頂部と西方斜面
[岩相] 安山岩～玄武岩質の薄い溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩
の互層。下部は安山岩、上部は玄武岩が卓越。成層火山を
構成 (長井・高橋, 2008)
[層序関係] 金時山火山体を覆う、深沢及び寒沢溶岩グループに
覆われる (長井・高橋, 2008)
[年代] 層序関係より約 0.27 ～ 0.23 Ma (長井・高橋, 2008)
[噴出中心] 丸岳の南東 (長井・高橋, 2008)

ながおとげ
●長尾峠溶岩グループ (長井・高橋, 2008)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部
[分布] 湖尻峠と長尾峠の間の西方中腹斜面、三国山の西方中腹
斜面
[岩相] 無斑晶質安山岩～デイサイトの溶岩やスコリア質火山角
礫岩、アグルチネート。複数のスコリア丘や溶岩流からな
る単成火山群を形成 (長井・高橋, 2008)
[層序関係] 丸岳火山体に狭し、深良火山体を覆う。深沢及び
寒沢溶岩グループに覆われる (長井・高橋, 2008)
[年代] 層序関係より約 0.27 ～ 0.23 Ma (長井・高橋, 2008)

みょうじん
●明神ヶ岳火山体 (長井・高橋, 2008) (図 8D)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部
[分布] 金時山火山体と明星ヶ岳火山体に刻まれた谷
[岩相] 玄武岩～安山岩質の薄い溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩・
降下スコリア層の互層を主体。(下部) 安山岩 (中部) 玄武
岩や苦鉄質鉱物斑晶に富む安山岩 (上部) 玄武岩。成層火
山を構成 (長井・高橋, 2008)
[層序関係] 下部～中部に、板屋窪溶岩グループ (斑晶の乏しい
安山岩～デイサイト質溶岩や粗粒降下スコリア層) を挟在。
金時山火山体、明星ヶ岳火山体を侵食間隙をはさんで覆う
(長井・高橋, 2008)
[年代] 層序関係より約 0.27 ～ 0.23 Ma (長井・高橋, 2008)
[噴出中心] 明神ヶ岳山頂付近 (長井・高橋, 2008)

こめかみ
●米神溶岩グループ (長井・高橋, 2008)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O1 (Kuno, 1938b) の一部、
O10 (Kuno, 1938b) の一部
[分布] 白銀山周辺
[岩相] 玄武岩質安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩 (長
井・高橋, 2008)。
[層序関係] 白糸川溶岩グループ、堀木沢溶岩グループを覆う。
根府川溶岩グループを狭在する (長井・高橋, 2008)
[年代] 層序関係より約 0.3 ～ 0.25 Ma (長井・高橋, 2008)
[噴出中心] (下部) 須雲川の北側 (上部) 聖岳付近から白銀山
にかけて。複数の噴出中心が分布している (長井・高橋,
2008)

ねぶかわ
●根府川溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 8E)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O11 (Kuno, 1938b) に相当、
O18 (Kuno, 1938b) の一部
[分布] 白銀山周辺
[岩相] 無斑晶質安山岩～デイサイト質の溶岩や火山弾を含む火
山角礫岩層、アグルチネート、降下スコリア層、同質の岩脈。
複数のスコリア丘や溶岩流からなる単成火山群を形成 (長
井・高橋, 2008)
[層序関係] 米神溶岩グループに挟在する (長井・高橋, 2008)。
[テフラとの対比] 根府川溶岩は、雑色ローム層上部 (TII-41,
TII-42 等) に挟まれる (安野ほか, 1998; 長井ほか, 2006)
[年代] テフラの対比から約 0.3 ～ 0.25 Ma (長井・高橋, 2008)

えのうら
●江之浦溶岩グループ (長井・高橋, 2008)
[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O14 及び O18 (Kuno, 1938b)
の一部
[分布] 江之浦から新島にかけての海岸、長坂山から星ヶ山にか
けての尾根の中下部、白糸川上流部、ホオズキ沢周辺上部
[岩相] 厚い安山岩～デイサイト質の溶岩、カリフラワー状の火
山弾を含むスコリア質凝灰角礫岩・火山角礫岩。上部の方
が珪長質な傾向がある (長井ほか, 2006)
[層序関係] 米神溶岩グループ、根府川溶岩グループを覆う (長
井・高橋, 2008)。
[テフラとの対比] 下部の溶岩が藤沢ローム層期の Tlu-25 (TCl-
4) に覆われる (長井ほか, 2006)。上部の溶岩が早田ローム
層期の Tm-3 (TCu-2)、ページュタフ I (Ata-Th; 町田・新井,
1992) 等に覆われる (米澤ほか, 1996)
[年代] 0.21 ± 0.02 Ma (伊藤, 2000: 上部の溶岩)。テフラの対比、
K-Ar 年代から約 0.25 ～ 0.23 Ma (長井・高橋, 2008)

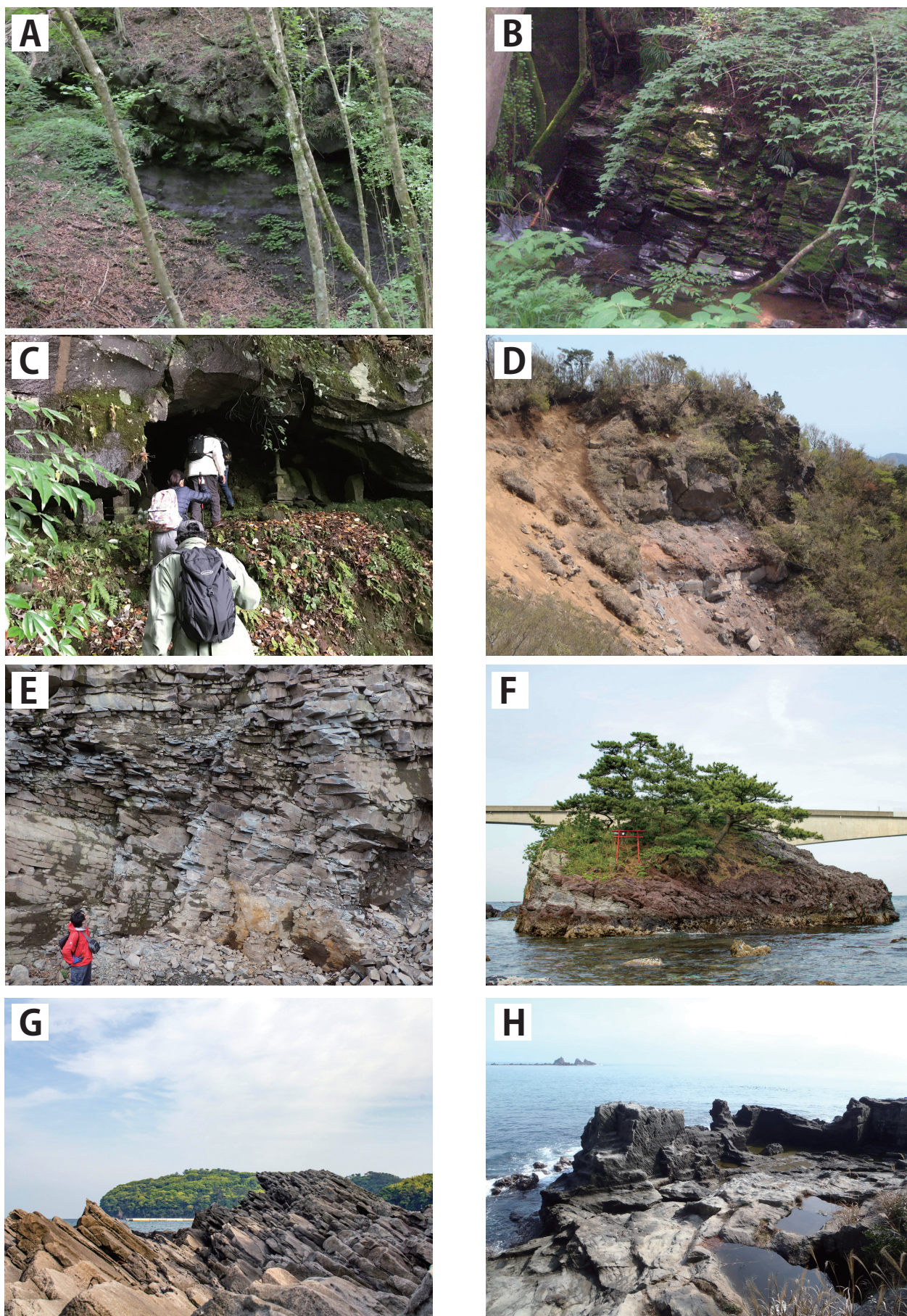


図 8. 外輪山地域の露頭. A: 内川の上流の狩川溶岩グループの露頭（南足柄市矢倉沢）. B: 板状節理が発達した荻野溶岩グループの露頭（南足柄市荻野）. C: 明星ヶ岳火山体の露頭（箱根町塔ノ沢）. D: 成層構造が発達する明神ヶ岳山頂付近（箱根町宮城野）. E: 板状節理が発達した根府川溶岩グループの露頭（小田原市米神）. F: 岩溶岩グループの露頭（真鶴町岩）. G: 板状節理が発達した白磯溶岩グループの露頭（真鶴町真鶴）. H: 真鶴溶岩グループの露頭（新小松石採石場跡；真鶴町真鶴）.

うみのたいら

●海ノ平火山体 (長井・高橋, 2008)

[定義] 海ノ平溶岩グループと箱根峠溶岩グループからなる。OS2 (Kuno, 1938a) の一部。O1 及び O14 の一部、O13 に相当 (ともに Kuno, 1938b)。箱根峠溶岩グループは海ノ平溶岩類 Ud (及川・石塚, 2011) に相当

[分布] 海ノ平や大観山の斜面、白銀山地域 (一部)

[岩相] (下部) 苦鉄質鉱物斑晶に富む安山岩 (上部) 玄武岩質のやや厚い溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩。成層火山を構成 (長井・高橋, 2008)。ピジョン輝石斑晶が認められる (久野, 1952)。

[層序関係] 苦鉄質鉱物斑晶に富む安山岩質溶岩は、南東側の白銀山地域に流下し、米神溶岩グループに挟在する (長井・高橋, 2008)

[年代] 層序関係より約 0.27 Ma (長井・高橋, 2008)

[噴出中心] 芦ノ湖南部付近 (長井・高橋, 2008)

【ステージ2】カルデラおよび独立単成火山群形成期 (約 23 万～約 13 万年前 : 図 5B)

箱根火山群の中央部で、大規模な火砕流や降下軽石の噴出が繰り返されることで複数の小型のカルデラが形成され、古期カルデラと言われる現在の箱根カルデラの原型をかたち作った可能性がある。箱根火山から北東へ約 20km 離れた大磯丘陵ではこの時期の大規模な降下テフラや軽石質火砕流堆積物が認められる (町田, 1971; 町田ほか, 1974; 上杉, 1976)。

外輪山の北西および南東麓では、玄武岩質からデイサイト質の比較的小規模な単成火山群を形成した。この時期に活動した単成火山には、大猿山溶岩グループ・岩溶岩グループ・白磯溶岩グループ・本小松溶岩グループ・真鶴溶岩グループ・幕山溶岩・深沢溶岩グループ・寒沢溶岩グループ・東山溶岩・神山溶岩等がある。また、カルデラ内には玄武岩質成層火山の仙石火山体を形成した。

おおさるやま

●大猿山溶岩グループ (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 聖岳付近、真鶴町の大猿山や新島海岸等に点在

[岩相] 薄い玄武岩～安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩の互層、玄武岩質～安山岩質溶岩、小型の成層火山や単成火山からなる火山群を形成 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 江之浦溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)

[年代] 層序関係より約 0.23 Ma (長井・高橋, 2008)

いわ

●岩溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 8F)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O18 (Kuno, 1938b) 無斑晶質安山岩の大部分、岩溶岩類 Iw (及川・石塚, 2011) に相当

[分布] 岩海岸、吉浜海岸から白銀山にかけて

[岩相] 無斑晶質安山岩～デイサイト質のアグルチネート、スコリア質火山角礫岩、降下スコリア層。スコリア丘からなる単成火山群を形成 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 大猿山溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)。

本小松溶岩及び真鶴岬溶岩に覆われる (及川・石塚, 2011)

[テフラとの対比] 早田ローム層 (Tm-15 (TB-5)、Tm-17 (TB-6) 等) を挟在 (米澤ほか, 1980; 長井ほか, 2006)

[年代] テフラの対比より約 0.22 ～ 0.18 Ma (長井・高橋, 2008)

しらいそ

●白磯溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 8G)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O17 及び O18 (Kuno, 1938b) の一部。白磯溶岩類 Sr (及川・石塚, 2011) に相当

[分布] 真鶴町の白磯海岸から星ヶ山にかけて

[岩相] 数枚の安山岩質溶岩やスコリア質火山角礫岩、アグルチネート、降下スコリア、凝灰角礫岩 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 岩溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008) 真鶴岬溶岩に覆われる (及川・石塚, 2011)

[年代] 層序関係より約 0.18 ～ 0.15 Ma (長井・高橋, 2008)

ほんこまつ

●本小松溶岩グループ (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O18 及び O20 (Kuno, 1938b) の一部。本小松溶岩類 Hk (及川・石塚, 2011) に相当

[分布] 真鶴駅から星ヶ山にかけての尾根部

[岩相] デイサイト～流紋岩質の厚い溶岩、アグルチネート、同質の岩脈 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 白磯溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)。岩溶岩類を覆う (及川・石塚, 2011)

[テフラとの対比] 七国峠ローム層 (Tm-41、Tm-44(TAI-2)、Tm-45 火砕流等) (箱根団体研究グループ, 1992) に覆われる (長井・高橋, 2008)

[年代] 0.20 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)。テフラの対比より約 0.18 ～ 0.15 Ma (長井・高橋, 2008)

まなづる

●真鶴溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 8H)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、O17 (Kuno, 1938b) の一部。真鶴岬溶岩 Mm (及川・石塚, 2011) に相当

[分布] 真鶴半島

[岩相] 安山岩質溶岩ドーム、火砕丘堆積物 (日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007)。単成火山群を形成 (長井・高橋, 2008)。真鶴岬溶岩は厚い一枚の安山岩質溶岩からなるが、北西 - 南東方向に配列した火口から同時に流出した溶岩ドーム群の形態をしている (箱根団体研究グループ, 1992)。しかし及川・石塚 (2011) は真鶴岬溶岩について複数の流動単位に区分できる証拠は見つかっていないとしている

[層序関係] 本小松溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)。岩溶岩類、白磯溶岩類を覆う (及川・石塚, 2011)

[テフラとの対比] 土屋ローム層の Tu-18(TAu-4) 等を覆い、Tu-29、SB-O(TAu-12) 等に覆われる (町田ほか, 1974; 米澤ほか, 1980; 箱根団体研究グループ, 1992; 長井・高橋, 2008)

[年代] 0.15 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)。テフラの対比、K-Ar 年代より約 0.15 ～ 0.14 Ma (長井・高橋, 2008)

まくやま

●幕山溶岩 (長井・高橋, 2008) (図 9A)

[定義] OS3 (Kuno, 1938a; 1938b) に相当

[分布] 幕山

[岩相] デイサイト質部分と流紋岩質部分が縞模様を作る溶岩ドーム。流紋岩質部分は石英斑晶に富む (長井・高橋, 2008)

[テフラとの対比] 流紋岩質部分が、土屋ローム期上部の降下テフラの一部と類似する (長井・高橋, 2008)

[年代] 0.14 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)。テフラの対比、K-Ar 年代より約 0.15 ～ 0.14 Ma (長井・高橋, 2008)

にいぎがわ

●新崎川流紋岩 (及川・石塚, 2011)

[定義] 天昭山玄武岩類のデイサイト B2d (Kuno, 1938a; 1938b) の一部に相当。天昭山溶岩グループ (長井・高橋, 2008) の一部に相当

[分布] 湯河原町鍛冶屋北西、幕山対岸の新崎川沿い 240 m 付近から 280 m にかけて

[岩相] 小規模な流紋岩溶岩、2 mm 以下の角閃石斑晶が認められる (及川・石塚, 2011)。

[層序関係] 湯河原火山噴出物の凝灰角礫岩に貫入する (石塚・及川, 2011)

[年代] 0.2 ± 0.1 Ma (及川ほか, 2010)、 0.15 ± 0.05 Ma (及川・石塚, 2011)。放射年代値より $0.15 \sim 0.05$ Ma。新崎川対岸の幕山溶岩と同時期 (ともに及川・石塚, 2011)

しろちょうば

●白丁場溶岩 (新称) (図 9B, 9C, 9D, 9E)

[定義] Kuno (1938b) の O12 の一部、白糸川溶岩グループの一部で、後述の城山の東麓付近にのみ分布。白糸川溶岩グループと同じく、外輪山形成期では少ないカルケアルカリ岩系に属するが、 SiO_2 含有量が高い (山下・笠間, 2015)。白色の基質に黒色輝石の輝石が特徴的で一見花崗岩のように見える。そのため、白丁場石、または白石、相州みかげ石と呼ばれる石材として採掘された (大蔵省臨時議院建築局, 1921)。岩相や地球化学的特徴が白糸川溶岩グループと異なるため、今回別区分とした

[分布] 湯河原町鍛冶屋北西、城山の東麓付近の標高 150 m から 240 m 付近にかけて

[岩相] 直方輝石・単斜輝石デイサイトで、新鮮な状態では灰色であるが、風化すると白色になる (山下・笠間, 2015)

[層序関係] 湯河原火山噴出物を覆う (日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007)

[年代] 溶岩の地球化学的特徴が、幕山溶岩のデイサイト部分や本小松溶岩と類似すること、また分布も極めて近いことから、白糸川溶岩グループの一部ではなく、カルデラ形成期の噴出物であると推定されている (山下・笠間, 2015)

ふかさわ

●深沢溶岩グループ (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、OS5 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 三国山東方や丸岳東方のカルデラ壁。丸岳西方のスコリア丘火山 (袴田, 1991)、御殿場市 東山採石場の安山岩質アグルチネート (袴田, 1990)、574m 標高点や 1094m 三角点の溶岩ドーム (Kuno, 1938a: OS5 の一部)

[岩相] 無斑晶質安山岩～流紋岩質のアグルチネート、スコリア質火山角礫岩、降下スコリア層、溶岩、凝灰角礫岩、同質の岩脈

[層序関係] 丸岳火山体を覆う (長井・高橋, 2008)

[テフラとの対比] TB-9 (Im-21) を挟む (袴田, 1991)

[年代] 0.26 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005: 丸岳西スコリア丘)。層相、岩質、テフラの対比より約 $0.22 \sim 0.18$ Ma (長井・高橋, 2008)

かんざわ

●寒沢溶岩グループ (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部、OS5 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 東山の採石場の玄武岩質火砕丘、558m 山の溶岩ドーム (Kuno, 1938a: OS5 の一部)

[岩相] 玄武岩や MgO に富む安山岩質の溶岩や火山弾を含むスコリア質火山角礫岩。単成火山群を形成 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 一部、深沢溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)

[年代] 層序関係より約 $0.18 \sim 0.13$ Ma (長井・高橋, 2008)

ひがしやま

●東山溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 東山採石場

[岩相] 厚い安山岩質溶岩

[層序関係] 深沢及び寒沢溶岩グループを覆う (長井・高橋, 2008)

[噴出中心] 中腹の 800m 付近 (長井・高橋, 2008)

こうやま

●神山溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] OS5 (Kuno, 1938a) の一部、OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 長尾峠西方の海拔 960 m の山体から西麓の神山にかけて

[岩相] MgO に富む無斑晶質安山岩の溶岩ドーム、比較的に明瞭な溶岩地形をもつ厚い溶岩流 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 深沢溶岩グループの一部を覆う (長井・高橋, 2008)

せんごく

●仙石火山体 (長井・高橋, 2008)

[定義] OS2 (Kuno, 1938a) の一部

[分布] 丸岳東方のカルデラ壁

[岩相] カルデラ内へ傾斜する薄い玄武岩溶岩と凝灰角礫岩・火山角礫岩の互層。小規模な成層火山を構成 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 大唐沢溶岩グループをアバットする (長井・高橋, 2008)

[年代] 層序関係より約 $0.18 \sim 0.13$ Ma (長井・高橋, 2008)

【ステージ3】前期中央火口丘形成期

(約 13 万～約 8 万年前: 図 5C)

これまで火山活動の大部分は外輪山の山腹でおきていたが、13 万年前以降、火山活動はカルデラの内部に限られるようになり、前期中央火口丘を形成した。

前期中央火口丘の活動は、流紋岩質の真鶴降下軽石と畑宿溶岩の噴出に始まる。この時期のマグマの性質は箱根火山の形成史の中でも特徴的で、安山岩質のほかに、デイサイト質もしくは流紋岩質の溶岩が大量に見られる。デイサイト質もしくは流紋岩質の溶岩には、畑宿溶岩・畑宿火砕流堆積物・鷹巣山溶岩・碓氷峠下部溶岩・宮ノ下溶岩・碓氷峠上部溶岩・鷹巣山山頂溶岩ドーム・弁天山溶岩・二子山下部溶岩・屏風山溶岩等がある。安山岩質の溶岩には、湯場溶岩・湯本茶屋溶岩・浅間山溶岩グループがある。

この時期には、溶岩の流出とともに爆発的なプリニー式噴火も比較的頻繁に起こり、吉沢ローム層等の大量のデイサイト質降下テフラを大磯丘陵や伊豆半島北部にもたらした (町田, 1971; 小山ほか, 1995 等)。

はたじゆく

●畑宿溶岩・畑宿火砕流堆積物 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS2 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 畑宿付近

[岩相] 無斑晶質直方輝石単斜輝石含有デイサイトの溶岩 (層厚 100m)・無斑晶質流紋岩の火砕流堆積物 (高橋ほか, 2006)

[テフラとの対比] 真鶴軽石層 (MnP) に覆われる (長井・高橋, 2008)。MnP は下末吉埋没土壌期の T_{Au}-12(SB-0) に対比される (町田ほか, 1974)

[年代] 約 0.13 Ma (長井・高橋, 2008)

たかのすやま

●鷹巣山溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS1 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 畑宿から鷹巣山付近

[岩相] 数枚以上の斑状直方輝石含有単斜輝石デイサイトの溶岩、層厚 100 ~ 120 m、凝灰角礫岩 (高橋ほか, 2006; 長井・高橋, 2008)

[層序関係] 真鶴軽石層 (MnP)、TAu-12 (SB-0) を覆う (長井・高橋, 2008)

うすいとうげ

●碓氷峠下部溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部。碓氷峠溶岩 1 (高橋ほか, 2006) に相当

[分布] 碓氷峠付近

[岩相] 斑状直方輝石単斜輝石デイサイトの溶岩流、層厚 20 m (高橋ほか, 2006)

[年代] 鷹巣山溶岩と組成的に類似することから同時期とする (長井・高橋, 2008)

みやのした

●宮ノ下溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS5 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 浅間山周辺、箱根湯本から入生田付近にかけての段丘状地形の最上部

[岩相] 厚い無斑晶質直方輝石単斜輝石含有デイサイトの溶岩流、層厚 100 ~ 200 m (高橋ほか, 2006)

[層序関係] 鷹巣山溶岩を覆う (長井・高橋, 2008)

うすいとうげ

●碓氷峠上部溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部。碓氷峠溶岩 2 (高橋ほか, 2006) に相当

[分布] 碓氷峠付近

[岩相] 厚い無斑晶質直方輝石単斜輝石含有デイサイトの溶岩流、層厚 170m (高橋ほか, 2006)

[年代] 0.12 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)。宮ノ下溶岩と化学組成的に類似することから同時期とする (長井・高橋, 2008)

たかのすやま

●鷹巣山山頂溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS1 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 鷹巣山山頂部

[岩相] 斑状かんらん石直方輝石含有単斜輝石流紋岩の溶岩ドーム・火砕流堆積物 (高橋ほか, 2006)

べんてんやま

●弁天山溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] CC7 (Kuno, 1938a; 1938b) の一部。芦之湯 880m 山溶岩 (高橋ほか, 2006) に相当

[分布] 芦之湯東方

[岩相] 黒曜石を伴う厚いデイサイトの溶岩流 (長井・高橋, 2008)

ふたごやま

●二子山下部溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部。YS5 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 二子山の北東下部付近

[岩相] 無斑晶質直方輝石単斜輝石含有デイサイトの溶岩 (長井・高橋, 2008)

[層序関係] 浅間山溶岩を覆う (長井・高橋, 2008)

びょうぶやま

●屏風山溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部。YS5 (Kuno, 1938b) に相当

[分布] 屏風山から甘酒茶屋付近にかけて

[岩相] 無斑晶質直方輝石単斜輝石含有デイサイトの厚い一枚の溶岩からなる台地状の山体 (図 2E)、層厚 150 m (高橋ほか, 2006; 長井・高橋, 2008)

[層序関係] 浅間山溶岩を覆う (長井・高橋, 2008)

[年代] 0.08 ± 0.01 Ma (袴田ほか, 2005)

[噴出中心] 屏風山山頂付近

ゆもとちやま

●湯本茶屋溶岩 (長井・高橋, 2008) (図 9F)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS3 (Kuno, 1938b) の一部

[分布] 箱根湯本周辺から早川に沿って入生田付近まで

[岩相] 斑晶に乏しい直方輝石単斜輝石含有安山岩の溶岩、層厚 70 m (高橋ほか, 2006)

[層序関係] 湯場溶岩を覆う (長井・高橋, 2008)

ゆば

●湯場溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS3 (Kuno, 1938b) の一部。

[分布] 箱根湯本周辺から早川に沿って入生田付近まで

[岩相] 厚い斑状かんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩、層厚 150 m (高橋ほか, 2006)

[層序関係] 湯本茶屋溶岩に覆われる (長井・高橋, 2008)

せんげんやま

●浅間山溶岩グループ (長井・高橋, 2008) (図 9G)

[定義] YS (Kuno, 1938a) の一部、YS5 (Kuno, 1938b) の一部、YS4 (Kuno, 1938b) に相当

[分布] 浅間山付近

[岩相] 斑状かんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩流、層厚 200 ~ 300 m (高橋ほか, 2006)

[層序関係] 弁天山溶岩を覆う

[噴出中心] 地形から鷹巣山西方と浅間山周辺の 2 つ以上の噴出中心がある (長井・高橋, 2008)

【ステージ 4】爆発的噴火期 (約 8 万 ~ 約 5 万年前: 図 5D)

この時期の噴出物は爆発的な噴火による降下軽石および軽石流の堆積物がほとんどである。組成は流紋岩質から安山岩質で、小原台テフラ (Hk-OP)、安針テフラ (Hk-AP)、三浦テフラ (Hk-MP)、東京テフラ (Hk-TP)、三色旗テフラ (Hk-SP)、中央火口丘テフラ群 (Hk-CC1 ~ CC7) 等が認識されており、多くは、箱根火山の東方 (大磯丘陵から三浦半島にかけての南関東地域) に広く分布する (町田, 1971; 町田ほか, 1974 等)。しかし、箱根火山の南方から南西方に分布する降下テフラもあり、箱根 Da-5 テフラ、Hk-CC4 等は同地域における指標テフラである (小林・小山, 1996)。また、同時期の噴出物のうち、Hk-OP、Hk-MP 及び Hk-TP 噴火は火砕流を伴っており、中でも、Hk-TP に伴う火砕流 (Hk-TPfi) は、神奈川県ほぼ全域を覆うほか、伊豆半島北部や愛鷹山の南麓をとおり富士川付近にまで達する大規模なものであったとされ (山崎ほか, 1992)、萬年 (2008) は、この噴火で強羅潜在カルデラの一部が完成されたと考えている。

この時期に形成された山体は見出されていないが、小林 (1999) は Hk-CC1 ~ 7 の給源となった仮想的な山体を先神山と呼称し、その山体崩壊堆積物が後述する早川泥

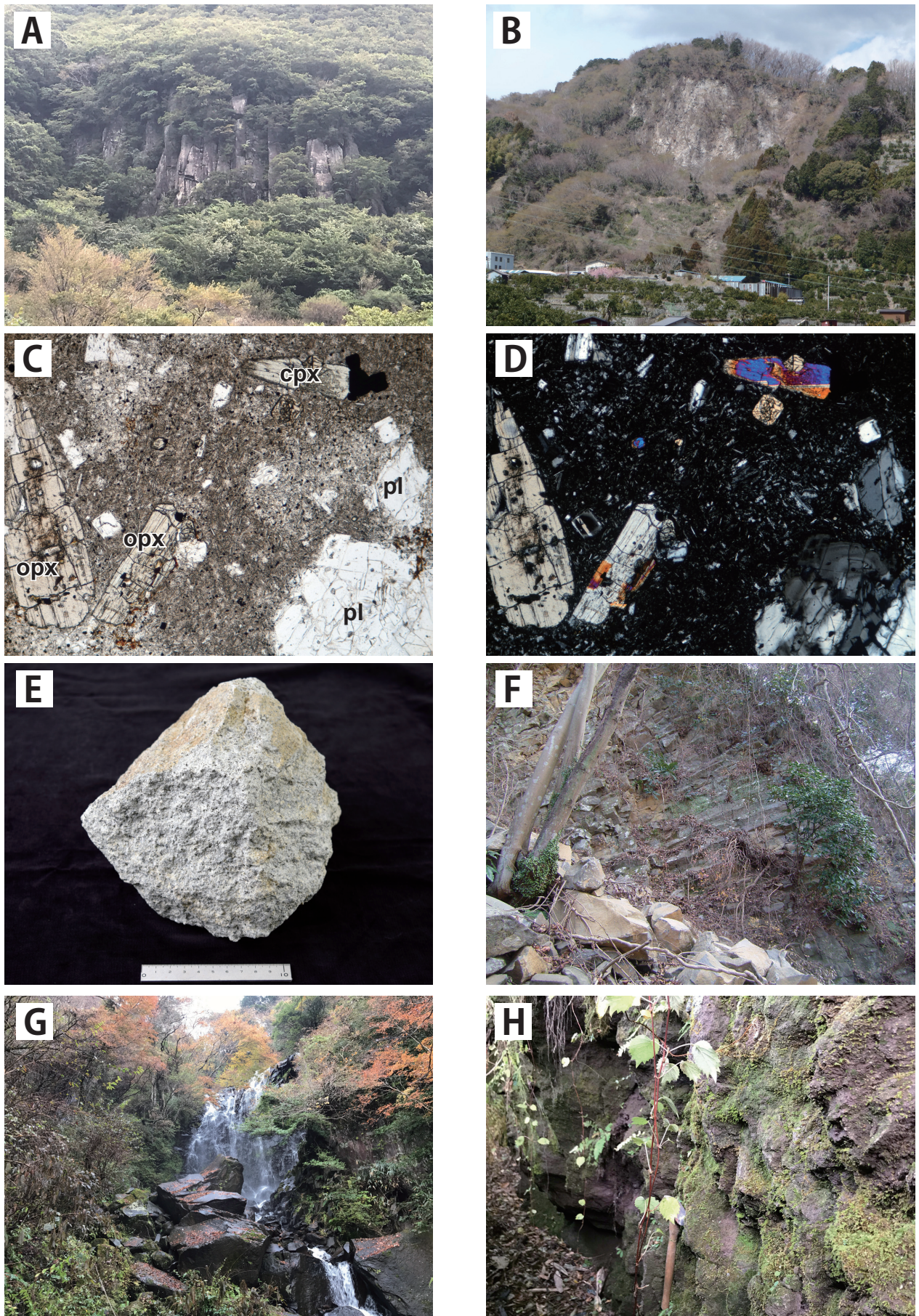


図9. 箱根火山の露頭と薄片写真. A: 柱状節理が見られる幕山溶岩の露頭(湯河原町吉浜). B: 白丁場溶岩の露頭(白丁場石採石場跡; 湯河原町鍛冶屋). C: 白丁場溶岩の偏光顕微鏡写真(開放ポーラー). D: 白丁場溶岩の偏光顕微鏡写真(直交ポーラー). pl: 斜長石, cpx: 単斜輝石, opx: 直方輝石, スケールは横が約 28 mm. E: 白丁場溶岩(KPM-NL 41595). F: 柱状節理が発達した湯本茶屋溶岩(小田原市入生田). G: 浅間山溶岩からなる飛龍の滝(箱根町畑宿). H: 神山溶岩グループの湖尻溶岩の露頭(箱根町元箱根).

流堆積物（小林, 1999; Kuno, 1950）と考えた。早川泥流堆積物中には溶岩片が含まれているため、溶岩を含む山体が形成された可能性は高い。こうした溶岩片は、記載岩石学的にも化学組成的にも後期中央火口丘形成期の噴出物とほとんど見分けがつかない（萬年, 2014a）。

【ステージ5】後期中央火口丘形成期

（約5万年前以降：図5E）

1) 後期中央火口丘群の地質及び噴火史

5万年前以降、比較的穏やかな火山活動を繰り返し、後期中央火口丘を形成した。後期中央火口の下限は、先神山の崩壊堆積物と考えられる早川泥流堆積物である。後期中央火口丘噴出物は、組成の変化に乏しいかんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩または直方輝石単斜輝石安山岩である。噴出中心は、北東側の形成年代がやや古い台ヶ岳－丸山火山列と、南東側のより新しい神山－二子山火山列の2列をなす。台ヶ岳、小塚山、丸山、二子山は地形的には典型的な溶岩ドームであるが、二子山に関しては活動時期が少なくとも3回あったことが知られている（笠間ほか, 2010）。一方、早雲山、神山、駒ヶ岳は溶岩ドームと溶岩流の集合体からなる小型の成層火山である。なお、以下にステージ5の数値年代は、放射性炭素年代測定法とテフラの層位関係に基づくものである。放射性炭素年代測定法で得られる年代には、炭素の半減期から計算される放射性炭素年代（ ^{14}C BP）と、炭素14の生成量が年代によって変化することを考慮した暦年代較正を行った年代（較正年代；cal ka BP）がある。従来の報告には ^{14}C BP表記のものが多く、この節で示す年代は、次節に詳述した方法で求めた較正年代に基づく。

はやかわでいりゅう

●早川泥流堆積物（小林, 1999）

【定義】Kuno (1950) のCC2に相当（小林, 1999）

【分布】宮城野～大平台など早川沿いで段丘状地形を形成

【岩相】シルトや細砂などの細粒物質を基質とし、安山岩円～亜円礫が混在する

【年代】約50 cal ka BP

【台ヶ岳－丸山火山列】

だいがたけ

●台ヶ岳溶岩（長井・高橋, 2008）

【定義】CC3（Kuno, 1938a）に相当

【分布】台ヶ岳周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】約50 cal ka BP

こづかやま

●小塚山溶岩（長井・高橋, 2008）

【定義】CC4（Kuno, 1938a）に相当

【分布】小塚山周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】約50 cal ka BP

まるやま

●丸山溶岩（長井・高橋, 2008）

【定義】CC5（Kuno, 1938a; Kuno, 1938b）の一部

【分布】丸山周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】不明

そうんざん

●早雲山溶岩グループ（長井・高橋, 2008）

【定義】CC5（Kuno, 1938a）の一部。古期神山（小林, 2008）の一部に相当。早雲山溶岩ドーム、上湯場溶岩、南長尾溶岩、小涌谷溶岩（ともに高橋ほか, 2006）に相当。

【分布】早雲山周辺

【岩相】斑状かんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩流、溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】約49 cal ka BP以降に活動

こまがたけ

●駒ヶ岳溶岩グループ（長井・高橋, 2008）

【定義】CC7（Kuno, 1938a; Kuno, 1938b）の一部。芦之湯溶岩ドーム群（小林, 2008）に相当。笛塚溶岩、湯ノ花溶岩、芦之湯溶岩ドーム、国際村溶岩、蛸川溶岩、駒ヶ岳西溶岩ドーム、元箱根溶岩、箱根神社溶岩、駒ヶ岳山頂溶岩ドーム、駒ヶ岳南西溶岩（ともに高橋ほか, 2006）に相当

【分布】駒ヶ岳、芦之湯、元箱根周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩（一部かんらん石あり）の溶岩流、溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】約31 cal ka BPから約22 cal ka BP（約18 ka: 町田（1971）をもとに推定）にかけて

【神山－二子山系列】

かみやま

●神山溶岩グループ（長井・高橋, 2008）（図9H）

【定義】CC5（Kuno, 1938a）の一部、CC6（Kuno, 1938a）に相当。新期神山（小林, 2008）の一部に相当。樹木園溶岩、防ヶ沢溶岩、神山南溶岩ドーム、陣笠山溶岩、湖尻溶岩、神山北溶岩ドーム、神山山頂溶岩ドーム、箱根園溶岩、姥子溶岩ドーム（ともに高橋ほか, 2006）に相当

【分布】神山、陣笠山周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩（一部かんらん石あり）の溶岩流、溶岩ドームを形成（高橋ほか, 2006）

【年代】約49 cal ka BP（Hk-Km1）から約8 cal ka BP（Hk-Km5）にかけて活動

ふたごやま

●二子山溶岩（長井・高橋, 2008）

【定義】CC8（Kuno, 1938a; 1938b）に相当、CC7（Kuno, 1938a; 1938b）の一部

【分布】二子山周辺

【岩相】斑状直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩ドームを形成、火砕流堆積物（高橋ほか, 2006；日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007）

【年代】約5.5 cal ka BP（約5 ka: 町田, 1971; 木原生物学研究所, 1974; 袴田・伊藤, 1996等）

約25 cal ka BP（約20 ka: 二子山山崎火砕流（笠間ほか, 2010）; 約18 ka: 町田, 1971; 袴田・杉山, 1994）

かみやまがんせつ

●神山岩屑なだれ堆積物（長井・高橋, 2008）

【定義】CC9（Kuno, 1938a）に相当

【分布】神山の北西

【岩相】安山岩質の岩屑（熱水変質岩片を含む）からなる岩屑なだれ堆積物（日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007）（図2F）

【年代】約3.5 cal ka BP（3.1ka: 大木・袴田, 1975）

かんむりがたけ

●冠ヶ岳溶岩 (長井・高橋, 2008)

[定義] CC5 (Kuno, 1938a) の一部。

[分布] 冠ヶ岳周辺

[岩相] 斑状かんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩の溶岩ドーム (高橋ほか, 2006; 日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007)

[年代] 約 3.5 cal ka BP (2.9ka: 大木・袴田, 1975)

2) HK-TP 以降の箱根カルデラ内の地形発達史

小林 (2008) は、主に HK-TP 以降の火砕堆積物の層序と層相を記載するとともに、広域テフラとの層位関係並びに火砕流堆積物に含まれる炭化木片の ^{14}C 年代等を利用して同時期の噴火史を明らかにした。このうち、年代推定の基軸となる主要テフラの年代について、HK-TP は 66 cal ka BP (青木ほか, 2008)、含雲母グリース状テフラ (Gr) は 49 cal ka (三瓶池田テフラ: 石村ほか, 2010)、始良 Tn テフラ (AT) は約 30 cal ka BP (V.C. Smith *et al.*, 2013)、鬼界アカホヤテフラ (K-Ah) は約 7.3 cal ka BP (D. McLean *et al.*, 2018)、カワゴ平テフラ (Kg) は約 3.2 cal ka BP (D. McLean *et al.*, 2018)) を用いた。

さらに小林 (2008) は、噴火堆積物の産状から推定される噴火様式の変遷に加え、早川沿いに分布する河成段丘の成因・形成年代、仙石原・芦ノ湖地域で実施されたボーリング資料 (神奈川県小田原土木事務所, 1977; 環境庁・神奈川県・箱根仙石原湿原環境調査団, 1978; 山崎ほか, 1992) から推定される地質状況に基づき、箱根カルデラ内の地形発達史を検討した (図 10)。

なお、小林 (2008) では、同位体補正済みの ^{14}C 年代値をもとに上に示した手続きで噴火史を構築した。しかし、最近では暦年較正をした表記が一般的であることから、本論では既報告の ^{14}C 年代値を OxCal 4.4 (https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_about.html) で較正した暦年値を用いて以下の様に地形発達史を再編集した。用いた較正曲線データは IntCal20 (Reimer *et al.*, 2020) である。

(a) 先神山の形成と爆発的噴火に伴う降下テフラの噴出 (約 6.5 万～約 5 万年前: 図 10a)

箱根東京テフラ (HK-TP, TPfl) の噴出後、休止期をさみ、溶岩流や火砕流、降下軽石、火山灰の噴出を伴う火山活動によって、小型の成層火山である先神山を形成した (約 65 cal ka BP)。先神山の爆発的噴火によって、HK-SP や HK-CC1 ～ CC4 などの降下テフラが堆積した (約 59 cal ka BP ～ 約 53 cal ka BP)。なお、この時期には、爆発的噴火期を通じて形成された湖水域 (袴田, 1986) が先神山周辺に存在していたと考えられる。

(b) 先神山の崩壊と早川泥流の流下 (約 5 万年前: 図 10b)

HK-CC6 と HK-CC7 の降下テフラ堆積物には、それ以前の噴火に比べて類質岩片の巨礫を多く含むことから、これらの噴火の際には、火口が大きく拡大し、山体の一部が崩壊した可能性も考えられる。早川沿いには、この時期に形成された河成段丘 (宮ノ下、大平台を形成) が分布しており、その崩壊物の一部が泥流 (早川泥流) となって早川を埋めたてたと考えられる (約 50 cal ka BP)。

(c) 古期神山の活動開始、仙石原湖の形成 (約 4.9 万年前: 図 10c)

先神山が崩壊した後、比較的粘性の大きな溶岩流とそれに伴って火砕流 (HK-Km1、HK-Km2; 約 49 cal ka BP、約 48 cal ka BP) が噴出することによって、古期神山が急速に成長した。この活動に先立って、同じ台ヶ岳・鷹巣山火山列 (長井・高橋 (2008) の台ヶ岳―丸山火山列に相当) に属する台ヶ岳と小塚山の各溶岩ドームが噴出した。HK-Km1 は小塚山付近で早川をせき止め、その上流側に新たに仙石原湖を形成した。

(d) 駒ヶ岳の活動開始とその周辺の活動 (約 3.5 万～約 3.1 万年前: 図 10d)

それまでの台ヶ岳―丸山火山列の活動から神山―二子山火山列に活動の中心が移動し、駒ヶ岳の活動が始まった (約 31 cal ka BP)。駒ヶ岳の活動では、現在の山麓部を構成する粘性の大きな溶岩流とそれに伴う火砕流が噴出した。この活動との関連性は不明だが、この時期には仙石原湖の水位低下が進み、湖水域が縮小し始めたと考えられる。

(e) 新期神山の活動開始、駒ヶ岳の活動 (約 2.6 万～約 2.2 万年前: 図 10e)

現在の神山を中心とする新期神山の活動が開始した。一連の噴火では粘性の大きな溶岩とそれに伴って火砕流の噴出を繰り返し、特に約 26 cal ka BP (HK-Km3) の噴火 (陣笠山溶岩流) では、火砕流が神山の北方～西方にかけて広く流下し、仙石原を厚く覆うとともに、一部は箱根カルデラ西縁を乗り越えて外輪山の西斜面を流下した。この噴火によって、仙石原湖は上流側の先芦ノ湖と分断され、湖水域はさらに縮小したと考えられる。また、駒ヶ岳では、山頂を構成する溶岩ドームが噴出した。この時期には、現在の二子山の前身となる活動が始まっていた可能性があり、それに伴う火砕流 (箱根二子山山崎火砕流; 約 25 cal ka BP) が須雲川を流下した (笠間ほか, 2010)。

(f) 新期神山の活動継続、二子山の活動 (約 8 千～約 5.5 千年前: 図 10f)

神山山頂部で噴出した火砕流 (HK-Km5; 約 8 cal ka BP) は、神山の北方～西方に向かって流下し、前述の HK-Km3 と同様、箱根カルデラ西縁を乗り越えて外輪山の西斜面を流下し、山麓の市街地近くにまで達した。また、現在の二子山溶岩ドームの噴火では、それに伴う火砕流 (HK-Ft; 約 5.5 cal ka BP) が須雲川を流下し、箱根湯本付近にまで達している。この時期には、仙石原湖は湿原化 (古仙石原湿原) していた。先芦ノ湖の上流側では湖水域が拡大した。

(g) 神山の山体崩壊、芦ノ湖の形成 (約 3.5 千年前: 図 10g)

神山の北西斜面で発生した山体崩壊に伴う岩屑なだれ (HK-Kmd.a.; 約 3.5 cal ka BP) が、仙石原付近に厚く堆積し、現在の芦ノ湖を形成した。

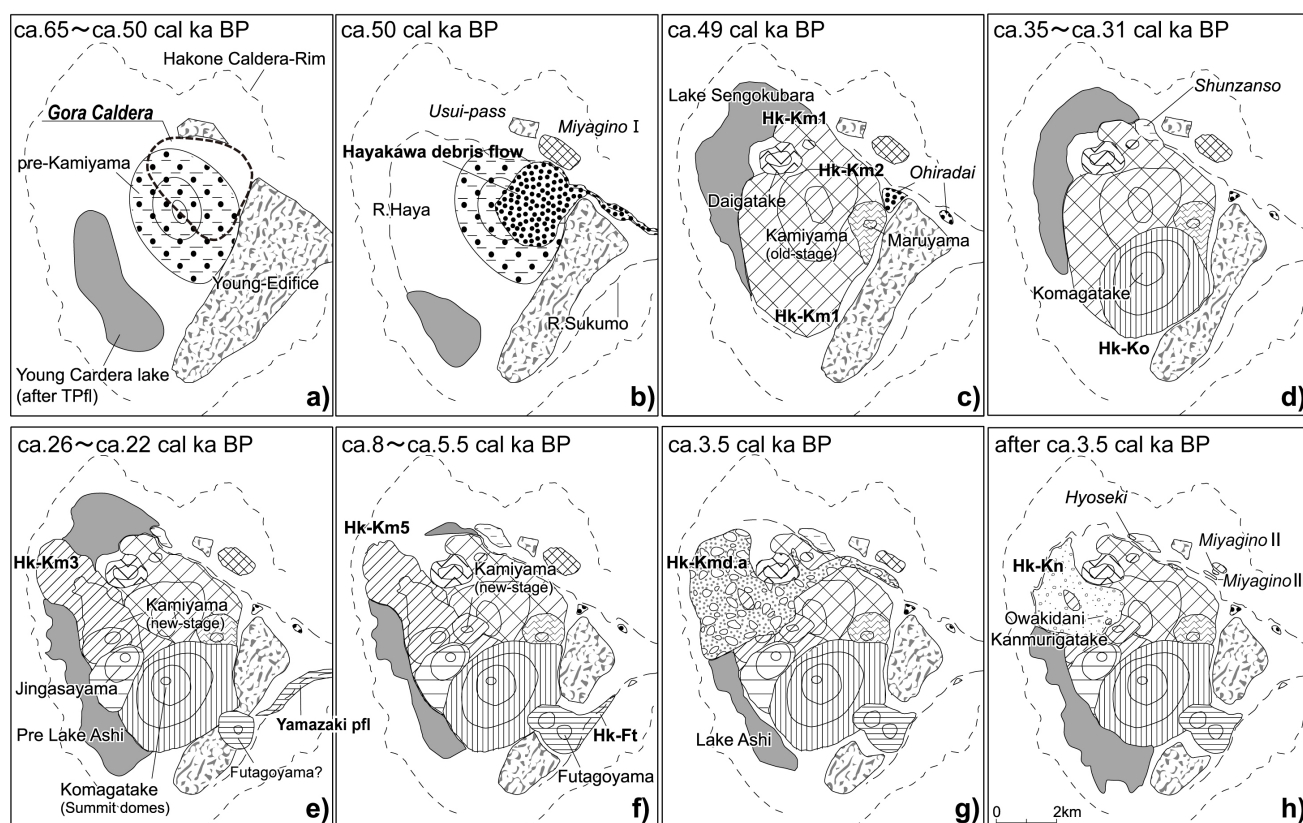


図 10. 箱根カルデラ内の地形発達史. 小林 (2008) を一部改変.

(h) 大涌谷周辺の活動 (約 3.5 千年前: 図 10h)

神山の山体崩壊でできた馬蹄形火口内に冠ヶ岳溶岩ドームを形成し、それに伴い火砕流 (Hk-Kn; 約 3.5 cal ka BP) を北西方向に流下した (図 2G,H)。岩屑なだれ堆積物の堰き止めにより、芦ノ湖の湖水域は拡大したが、仙石原は完全に乾陸化した。

6. 箱根火山の水蒸気噴火堆積物

6-1. 水蒸気噴火堆積物の発見

箱根火山の最新の山体である後期中央火口丘の地形をみると、粘性の大きなマグマ特有の溶岩ドームや溶岩流の流下に伴う微地形を容易に認識できる。一方、当時はあまり注目されなかったが、神山山頂から早雲山にかけて火口状の地形が多く存在することが古くから知られており、水蒸気噴火の火口ではないかという推定がされてきた (大木・袴田, 1975; 袴田, 1993)。しかし、箱根火山では歴史時代の噴火記録がないこともあり、その成因に対する地質学的に詳細な検討は進まず、上杉ほか (1992) によって、神山周辺に「熱水変質を受けた泥層」の存在を記載された程度であった。

ところが、2000 年に噴気異常を伴う火山活動の活発化があり、水蒸気噴火発生の可能性が真剣に懸念されるようになった。これを受けて箱根町は箱根火山の火山防災マップを作成することになった。著者の一人である小林は、前述したように、爆発的噴火期から後期中央火口丘期にかけてのテフラ層序を明らかにし、それを用いたカルデラ内の地形発達史研究を進めていたが (小林・小山, 1996; 小林ほか, 1997; 小林, 1999)、大涌谷から神山・駒ヶ

岳頂部にかけての調査をあらたに開始し、水蒸気噴火堆積物を発見することに成功した (小林ほか, 2002; 小林ほか, 2006)。

6-2. 水蒸気噴火堆積物の年代

小林ほか (2006) は、大涌谷周辺で発見した水蒸気噴火堆積物の記載と編年をまとめ、これらの堆積物を「箱根大涌谷テフラ群 (Hk-Ow 群)」と総称した。Hk-Ow 群は、古い方から Hk-Ow1 から Hk-Ow5 の 5 回の噴火イベントによる堆積物からなり、Hk-Ow1 と Hk-Ow2 は、神山山頂付近で噴出した降下火山灰とその二次移動による土石流堆積物で構成され、Hk-Ow3 ~ 5 は、現在の噴気地帯のみで確認できる降下火山灰からなる。これらの年代については、 ^{14}C 年代や富士火山起源の降下スコリア層との層位関係に加え、当時、富士山麓や伊豆半島で存在が確認されていた、伊豆諸島神津島火山の天上山テフラ (AD838) 起源の火山ガラスを、Hk-Ow 群が挟まる風化火山灰土中にも認め (Kobayashi et al., 2007)、また、その含有量の鉛直変化に基づき、神津島天上山テフラの降灰層準を Hk-Ow3 直下にあると推定した。これらの結果より、Hk-Ow1 は約 3 cal ka BP、Hk-Ow2 は約 2 cal ka BP、Hk-Ow3 ~ 5 は 1044 cal AD ~ 1271 cal AD の較正暦年に基づき 12 世紀後半 ~ 13 世紀の噴火年代を推定した。

その後、大涌谷から神山に登る登山道脇に露出する火砕サージ堆積物 (図 11 の地点 216 に分布) について構成物の解析を実施した結果、この火砕サージ堆積物には茶色と無色透明の 2 種類の新鮮な火山ガラスが含まれることがわかった (土屋ほか, 2017)。茶色のものはすでに萬

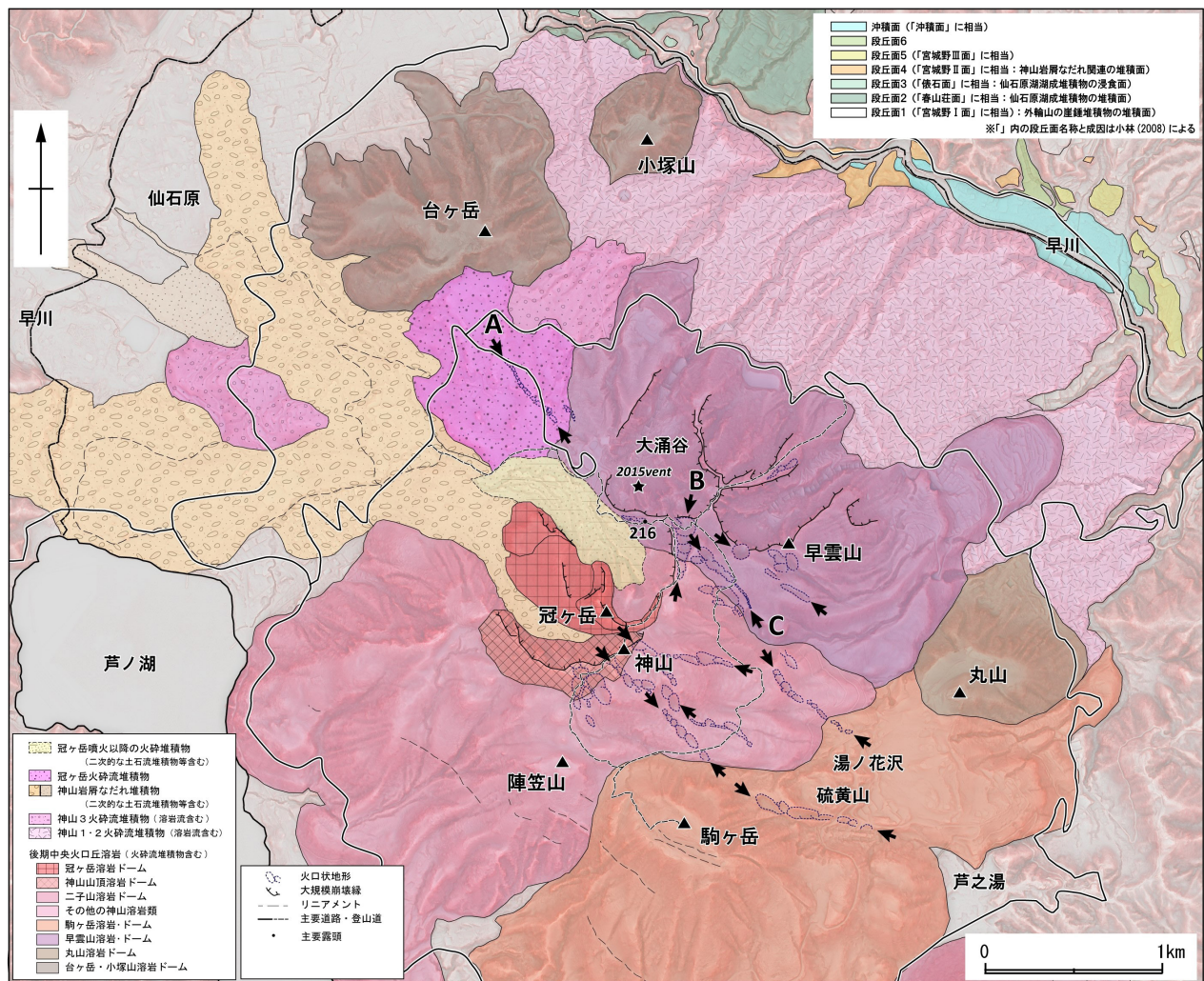


図 11. 神山・大涌谷周辺の火山地形分類図 (小林 (2019) を一部改変). 赤色立体図は神奈川県から提供を受けた LP データから得られた 1mDEM をもとに作成した. その作成手法は, アジア航測 (株) の赤色立体図作成手法 (特許 3670274, 特許 4272146) を使用した. この赤色立体図上に地質区分を記載・着色した.

年ほか (2006a) でその存在と本質物質である可能性が指摘されていたが, EPMA による火山ガラスの化学分析より, 箱根火山起源ではなく富士火山からもたらされたものと推定された。しかし, その起源となった噴出物までは絞り込めなかった。一方, 無色透明のものは, 神津島天上山テフラもしくは新島向山テフラ (AD886) のいずれれに対比されることが明らかになった。その結果, この火砕サージをもたらしした噴火の年代が問題となった。

小林ほか (2006) は, この火砕サージ堆積物を神山北西斜面に Hk-Ow2 に対応する土石流堆積物が広く分布する地質状況並びに火砕サージ堆積物の色調等から Hk-Ow2 に対比していた。しかし, この火砕サージ堆積物中に, 9 世紀に噴出した火山ガラスが含まれることは, 火砕サージ堆積物の対比及び年代推定に誤りがあることを示すものであった。土屋ほか (2017) は, 上下の層位関係がわかる露頭から Hk-Ow2 を採取し, この中にはいずれの火山ガラスも含まれないことを確認した。小林もその後の調査で, 火砕サージ堆積物直下の腐植質風化火山灰土の年代測定を行い 1016 ~ 1155 cal AD を得た (Kobayashi *et al.*, 2020)。これらの年代及び構成物の証拠から火砕サージの年代は約 2 cal ka BP (Hk-Ow2) ではなく, 9 世紀以

降 (11 ~ 12 世紀頃) の Hk-Ow3 ~ 5 の噴火に対比される可能性が高くなり, この結果, 小林ほか (2006) の見解が修正される結果となった。

6-3. 水蒸気噴火の火口と現在の活動との関係

～適切な防災計画の立案に向けた水蒸気噴火調査の重要性～

大木・袴田 (1975) や袴田 (1993) では, その存在が指摘されただけの火口地形であったが, 小林ほか (2006) は, 航空写真の立体視解析によって後期中央火口丘上に連続する北北西-南南東に伸びる 3 条ほどの火口列を図示した。現在は測量及び解析技術の発展により, 航空レーザー測量データから得られた高精度数値標高モデルとそれをもとに作成した赤色立体地図から詳細な地形解析が可能になり, 個々の火口地形やその連続性を比較的容易に認識できるようになった (図 11: 小林ほか, 2019)。この結果, 後期中央火口丘上の火口地形は, 神山及び大涌谷・早雲山から駒ヶ岳にかけて地域に連続性のよい数条の北西-南東方向に火口列として分布し, 特に, 神山山頂から北東に伸びる稜線沿いに火口地形が密集することが分かった。また, 不明瞭ではあるが, 大涌谷園地の北方にも, 北西-南東方向に伸びる火口列が分布するこ

とが分かった。

これまでの地質調査では、大涌谷から神山北東稜線にかけての地域を中心に噴火堆積物を確認している。一方で、神山山頂から駒ヶ岳山頂に連なる登山道沿いでは Hk-Ow 群に関連する噴火堆積物を確認できない。このことは、後期中央火口丘上の火口列のうち、少なくとも南西縁の火口列では顕著な水蒸気噴火は発生していないことを示している。しかし、神山山頂・早雲山から現在も噴気活動が認められる湯ノ花沢に至る火口列周辺は、地層の露出が悪いことから、最近の水蒸気噴火の有無を判断することができない。

しかし、最近の活動活発時の地震等の観測事例をみると、後期中央火口丘上の火口列のうち北東縁を構成する火口列がより活動的であることが分かる。特に 2015 年噴火の際、大涌谷園地北方の火口列（小林ほか（2019）の A 火口列）は、噴火前の 5 月初旬に活発化した群発地震の震源域に一致する。また、大涌谷と早雲山の間の火口列（同 B 火口列）は、噴火時に貫入したと見られるクラックの直上にある（Doke et al., 2018; Honda et al., 2018）。これらのことは、過去の噴火で形成されたクラックが、現在も熱水の通り道として機能していることを示す。つまり、2015 年噴火では火口が大涌谷のみで開口したが（Mannen et al., 2018）、クラックの貫入が大規模であれば、長さ数百メートルにわたって複数の火口が同時に開口する可能性があることを示している。実際、2015 年噴火は噴出量が数百立方メートルと小規模であったが、近年の御嶽山（2014 年）や本白根山（草津白根；2018 年）の水蒸気噴火は噴出量が数十万立方メートルと大規模で、長さ百メートルを超える火口列が形成された。

水蒸気噴火の規模が何に支配されているのかはよくわからない。しかし、箱根火山では後期中央火口丘の山体形成後の噴火活動の痕跡として明瞭な火口列が残されている。これらの成因や形成時期を明らかにすることが、地質学的なアプローチとして、箱根火山の適切な防災計画の立案に繋がっていくものとして、継続的に調査・研究を進めていくことが重要である。

7. まとめ

箱根火山では、久野の研究以降も数多くの研究がなされ、新しい形成史も提唱されてきた。今後も多くの研究者が関わり、箱根火山のより詳細な形成史が明らかになり、地下のマグマ供給システムの解明がなされ、さらにはこれらの研究が今後の箱根火山の防災計画にも役立っていくことを期待する。

謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所の長井雅史特別研究員には、箱根火山の地質と形成史を記述するにあたり助言をいただくとともに、一連の図を提供いただいた。箱根ジオミュージアム 学芸担当の笠間友博氏には、本論文をまとめるにあたり、構成や特にテフラの記載に関してご指導いただいた。神山・大涌谷周辺の赤色立体図はアジア航測（株）の千葉達朗氏に作成頂いた。以上の皆様に心から感謝いたします。

引用文献

- 青木かおり・入野智久・大場忠道, 2008. 鹿島沖海底コア MD01-2421 の後期更新世テフラ層序. 第四紀研究, **47**: 391-407.
- 鎮西清高・松島義章, 1987. 南部フォッサマグナ地域の新第三紀化石群. 化石, (43): 15-17.
- Doke, R., M. Harada, K. Mannen, K. Itadera & J. Takenaka, 2018. InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, **70**(1), doi:10.1186/s40623-018-0834-4.
- 袴田和夫, 1986. 箱根新期カルデラの段階的陥没に関する若干の資料. 大涌谷自然科学館調査研究報告, (6): 1-7.
- 袴田和夫, 1988. ガイドブック 1 箱根火山. 47pp. 大涌谷自然科学館.
- 袴田和夫, 1990. 箱根のスコリア丘火山について（予報）. 大涌谷自然科学館調査研究報告, (9): 1-6.
- 袴田和夫, 1991. 箱根古期外輪山丸岳西方の地質と年代. 大涌谷自然科学館調査研究報告, (10): 13-19.
- 袴田和夫, 1993. 箱根火山探訪. 189pp. 神奈川新聞社.
- 袴田和夫・伊藤 潤, 1996. 箱根二子山火砕流の ^{14}C 年代. 大涌谷自然科学館調査研究報告, (13): 21-24.
- 袴田和夫・杉山茂夫, 1994. 箱根町湯本茶屋で出現した信濃屋火砕流と ^{14}C 年代. 神奈川自然誌資料, (16): 51-52.
- 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** (5): 285-299.
- 箱根団体研究グループ, 1992. 箱根火山南東麓の地質（その 1）— 真鶴半島周辺のテフラと溶岩—. 関東の四紀, (17): 35-43.
- Honda, R., Y. Yukutake, Y. Morita, S. Sakai, K. Itadera & K. Kokubo, 2018. Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model. *Earth, Planets and Space*, **70** (1), doi:10.1186/s40623-018-0887-4.
- 平林 武, 1898. 箱根熱海両火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, (16): 1-78.
- 平田由紀子, 1994. 箱根火山の形成発達史. 日本火山学会講演予稿集 1994 年度秋季大会, p.146.
- 平田由紀子, 1999. 箱根火山の発達史. 神奈川県立博物館調査研究報告（自然科学）, (9): 153-178.
- 今永 勇, 1999. 足柄層群の構造. 神奈川県立博物館調査研究報告（自然科学）, (9): 41-56.
- 石井輝秋, 2011. ソレライト質マグマに由来する箱根火山のカルケアルカリ岩—輝石温度計によるマグマの温度解析—. 深田地質研究所年報, (12): 45-60.
- 石井輝秋, 2013. 箱根火山産輝石安山岩（ピジョン輝石安山岩）の成因. 深田地質研究所年報, (12): 45-60.
- 石村大輔・加藤茂弘・岡田篤正・竹村恵二, 2010. 三方湖東岸のボーリングコアに記録された三方断層帯の活動に伴う後期更新世の沈降イベント. 地学雑誌, **119**: 775-793.
- 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), p.65.
- 石塚 治・及川輝樹, 2008. 伊豆半島及び周辺地域の火山活動史. 日本火山学会講演予稿集, p.114.
- 伊藤順一, 2000. 箱根火山南東麓の古期外輪山溶岩の K-Ar 年代. 地質調査所月報, **51**(9): 417-420.
- 神奈川県小田原土木事務所, 1977. 昭和 51 年度芦ノ湖周辺公共下水道事業（特定保全公共下水道）環境調査資料集. 172pp.
- 環境庁・神奈川県・箱根仙石原湿原環境調査団, 1978. 昭和 52 年度特殊植物等保全事業「箱根仙石原湿原環境調査」報告書. 63pp.

- 狩野謙一・染野 誠・上杉 陽・伊藤谷生, 1988. 足柄地域北西部における中期更新世以降の断層活動—プレート活動力学境界表層部での変形過程の例—. 静岡大学地球科学研究報告, **14**: 57-83.
- 笠間友博・山下浩之・萬年一剛・奥野 充・中村俊夫, 2010. 複数回の噴火で形成された箱根火山二子山溶岩ドーム. 地質学雑誌, **116** (4): 229-232.
- 関東第四紀研究会, 1987. 大磯丘陵の層序と構造. 関東の四紀, (13): 3-46.
- 加藤 茂・長井俊夫・玉木 操・近藤 忠・富安義昭・加藤 剛・宗田幸次・浅田 昭, 1985. 相模トラフ東部から海溝三重点までの海底地形. 水路部研究報告, (20): 1-24.
- 加藤 隆, 1984. 箱根古期外輪山北部の地質及び岩石. 火山, **29**(4): 334.
- 木原生物学研究所, 1974. 箱根 地域国有林の取扱いに関する基礎調査. 東京営林局.
- 小林 淳, 1999. 箱根火山の最近 5 万年間のテフラ層序と噴火史. 第四紀研究, **38**(4): 327-343.
- 小林 淳, 2008. 箱根火山中央火口丘群の噴火史とカルデラ内の地形発達史—噴火活動と密接な関連を有する地形—. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然科学), (13): 43-60.
- Kobayashi, M., K. Mannen, T. Yamaguchi & M. Nagai, 2020. Phreatic eruption history at the latest stage (since ca. 3ka) of Hakone Volcano. *International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption*.
- 小林 淳・小山真人, 1996. 箱根火山西麓～南東麓地域のテフラ層序と噴火史. 地学雑誌, **105** (4): 431-447.
- 小林 淳・奥野 充・中村俊夫, 1997. 箱根古期外輪山西斜面に分布する中央火口丘起源の火砕流堆積物の ^{14}C 年代. 火山, **42** (5): 355-358.
- Kobayashi, M., A. Takada & S. Nakano, 2007. Eruptive history of Fuji Volcano from AD 700 to AD 1,000 using stratigraphic correlation of the Kozushima-Tenjosan Tephra. *Bulletin of Geological Survey, Japan*, **57** (11/12): 409-430.
- 小林 淳・萬年一剛・奥野 充・袴田和夫, 2002. 箱根火山大涌谷周辺で発見した最新期の水蒸気爆発に伴う堆積物. 日本火山学会講演予稿集, **2**, p.94.
- 小林 淳・萬年一剛・奥野充・中村俊夫・袴田和夫, 2006. 箱根火山大涌谷テフラ群: 最新マグマ噴火後の水蒸気爆発堆積物. 火山, **51** (4): 245-256.
- 小林 淳・萬年一剛・長井雅史・山口珠美, 2019. 箱根火山神山・大涌谷周辺の火口列とその火山防災上の意味. 日本火山学会講演要旨集 2019 年度秋季大会, p.88.
- Koto, B., 1884. Studies of some Japanese rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, (40): 431.
- 小山真人・早川由紀夫・新井房夫, 1995. 東伊豆単成火山地域の噴火史 2: 主として 32 ka 以前の火山について. 火山, **40**(3): 191-209.
- Kuno, H., 1938a. Geologic map of Hakone Volcano and adjacent areas.
- Kuno, H., 1938b. Geologic map of the eastern part of Hakone Volcano.
- Kuno, H., 1950. Geology of Hakone Volcano and adjacent areas, Part I. *Journal of Faculty of science University of Tokyo, sec. II*, (7): 257-279.
- 久野 久, 1952. 7 万 5 千分の 1 地質図幅「熱海」及び同説明書. 141 pp.
- Kuno, H., 1968. Origin of andesite and its bearing on the Island arc structure. *Bulletin of Volcanology*, **32**: 141-176.
- 久野 久原著・箱根火山地質図再版委員会編, 1972. 箱根火山地質図説明書. 52pp. 大久保書店, 東京.
- 町田 洋, 1971. 南関東のテフロクロノロジー (I) —下末吉期以降のテフラの起源及び層序と年代について—. 第四紀研究, **10** (1): 1-20.
- 町田 洋, 1977. 火山灰は語る—火山と平野の自然史—. 324pp. 蒼樹書房.
- 町田 洋, 2008. 大磯丘陵から下総台地までの第四系. 日本地質学会編, 日本地方地質誌 3 関東地方, pp. 299-315. 朝倉書店, 東京.
- 町田 洋・新井房夫, 1992. 火山灰アトラス. 276pp. 東京大学出版会, 東京.
- 町田 洋・新井房夫, 2003. 新編 火山灰アトラス—日本列島とその周辺. 336pp. 東京大学出版会, 東京.
- 町田 洋・新井房夫・村田明美・袴田和夫, 1974. 南関東における第四紀中期のテフラの対比とそれに基づく編年. 地学雑誌, **83**(5): 302-338.
- 萬年一剛, 2008. 箱根カルデラ—地質構造・成因・現在の火山活動における役割—. 神奈川博調査研究報告 (自然科学), (13): 61-76.
- 萬年一剛, 2014a. 箱根火山群, 強羅付近の後カルデラ地質発達史. 地質学雑誌, **120** (4): 117-136.
- 萬年一剛, 2014b. 箱根火山はいつ生まれたか. 神奈川県温泉地学研究所観測だより, (64): 2014.
- 萬年一剛・堀内誠二・田口公則・山下浩之・平田大二・川手新一・蛸子貞二・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. 地質学雑誌, **109** (11): 661-664.
- 萬年一剛・小林 淳・奥野 充・笠間友博・山下浩之・袴田和夫・中村俊夫, 2006a. 箱根火山の噴火史—最近の知見に基づく再検討—. 月刊地球, **28** (6): 355-362.
- 萬年一剛・水野清秀・伊藤順一・山下浩之, 2006b. 箱根・強羅付近地下の地質構造—とくに湖成堆積物の分布とその堆積環境—. 神奈川県温泉地学研究所報告, **38**: 11-26.
- 萬年一剛・山下浩之・平田大二・田口公則・川手新一・谷口英嗣・蛸子貞二, 2002. 小田原市根府川で掘削された深さ 1500 m の温泉井の地質. 神奈川県温泉地学研究所報告, **33**: 11-24.
- Mannen, K., Y. Yukutake, G. Kikugawa, M. Harada, K. Itadera & J. Takenaka, 2018. Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan - geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis. *Earth, Planets and Space*, **70**, 68, doi:10.1186/s40623-018-0844-2.
- McLean, D., P. G. Albert, T. Nakagawa, T. Suzuki, R. A. Staff, K. Yamada, I. Kitaba, T. Haraguchi, J. Kitagawa, SG14 Project Members & V. C. Smith, 2018. Integrating the Holocene tephrostratigraphy for East Asia using a high-resolution cryptotephra study from Lake Suigetsu (SG14 core), central Japan. *Quaternary Science Reviews*, **183**: 36-58.
- 長井雅史・高橋正樹, 1996. 箱根火山古期外輪山北西地域の地質. 日本火山学会講演予稿集 1996 年秋季大会, p.20.
- 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.
- 長井雅史・高橋正樹, 2012. 箱根ジオパーク構想で保存すべき箱根外輪山の重要露頭. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **47**: 287-339.
- 長井雅史・高橋正樹・箱根団体研究グループ, 2006. 箱根火山南東麓の地質 (その 4) —溶岩類の全岩化学組成と層序—. 関東の四紀, (27): 3-29.
- 日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007. 1. 箱根火山. 日本地質学会.
- 日本地質学会編, 2007. 箱根火山たんけんマップ—今, 生きている火山—. 国立公園地質リーフレットたんけんシリーズ

- ズ. 日本地質学会.
- 及川輝樹・石塚 治, 2011. 熱海地域の地質地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 及川輝樹・石塚 治・岩野英樹・檀原 徹, 2010. 伊豆半島北東部の珪長質火山活動の年代. 地質調査研究報告, **61**: 5-6.
- 大木靖衛・袴田和夫, 1975. 箱根芦ノ湖誕生のなぞをさぐる. 国土と教育, **30**: 2-9.
- 大蔵省臨時議院建築局, 1921. 本邦産建築石材. 38+281pp. 重松養二, 東京.
- 大塚弥之助, 1934. 身延山北麓の化石と早川層灰岩の貝化石. 地質学雑誌, **41**: 562-568.
- Reimer, P. J., E. Bard, A. Bayliss, J. W. Beck, P. G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C. E. Buck, H. Cheng, R. L. Edwards, M. Friedrich, P. M. Grootes, T. P. Guilderson, H. Haflidason, I. Hajdas, C. Hatté, T. J. Heaton, D. L. Hoffmann, A. G. Hogg, K. A. Hughen, K. F. Kaiser, B. Kromer, S. W. Manning, M. Niu, R. W. Reimer, D. A. Richards, E. M. Scott, J. R. Southon, R. A. Staff, C. S. M. Turney & J. Plicht, 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, **62**: 725-757.
- 相模原市地形地質調査会, 1986. 相模原の地形・地質: 調査報告書第 3 報. 96pp. 相模原市地形・地質調査会.
- Seno, T., S. Stein & A. Gripp, 1993. A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *Journal of Geophysical Research*, **98**(B10): 17941-17948.
- Smith, V.C., R. A. Staff, S. P.E. Blockley, C. Bronk Ramsey, T. Nakagawa, D. F. Mark, K. Takemura, T. Danhara & Suigetsu 2006 Project Members, 2013. Identification and correlation of visible tephra in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quaternary Science Reviews*, **67**: 121-137.
- 鈴木正男, 1970. フィッショントラック法による黒曜石の噴出年代とウラン濃度の測定 (第 II 報) —本州中部, 伊豆諸島産の黒曜石について—. 第四紀研究, **9**(1): 1-6.
- 鈴木 敏, 1884. 横浜図幅地質説明書. 地質図説明書 (東部其四) 甲府・上総・横浜・富士・伊豆・静岡 (附図: 地質断面図及び化石表). 77pp.
- 田口公則, 2008. 早川凝灰角礫岩産の軟体動物化石. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然科学), (13): 157-160.
- 田口公則・山下浩之・石浜佐栄子, 2021. 足柄地域の地質: フィリピン海プレートの北縁、伊豆衝突帯の現場. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然科学), (16): 35-48.
- 高橋正樹・長井雅史・内藤昌平・中村直子, 1999. 箱根火山の形成史と広域テクトニクス場. 月刊地球, **21**: 437-445.
- 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, **41**: 151-186.
- 土屋美穂・萬年一剛・小林 淳・福岡孝昭, 2017. 箱根火山大涌谷テフラ群から見つかった 2 種類の火山ガラス—その給源火山と年代への制約—. 火山, **62**: 23-30.
- 上杉 陽, 1976. 大磯丘陵のテフラ. 関東の四紀, (3): 28-38.
- 上杉 陽・米沢 洋・宮地直道・千葉達朗・肥田木 守・細田一仁・米沢まどか・由井将雄, 1992. 富士系火山泥流のテフラ層序. 関東の四紀, (17): 3-33.
- 上杉 陽・伊藤谷生・歌田 実・染野 誠・澤田臣啓, 1985. 大磯丘陵雑色〜古怒田間に露出した衝上断層. 関東の四紀, (11): 3-15.
- 安野 信・稲垣 進・上杉 陽・鶴浦武久・菊池隆男・佐藤善博・長井雅史・則 茂雄・満岡 孝・由井将雄・米澤 宏・箱根団体研究グループ, 1998. 箱根火山南東麓 (根府川〜真鶴) のテフラと溶岩. 日本第四紀学会講演要旨集, (28), pp.82-83.
- Wada, T., 1882. Notes on Fujiyama. *Transactions of the Seismological Society of Japan*, (4): 31-37.
- 山下浩之・笠間友博, 2015. 神奈川県湯河原町に産する通称“白丁場石”の岩石学的特徴. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), (44): 1-10.
- 山下浩之・萬年一剛・石塚 治・川手新一・平田大二・蛭子貞二・谷口英嗣, 2006. 神奈川県湯河原町宮下で掘削されたボーリングコアの岩相記載と地質学的意義. 神奈川県温泉地学研究所報告, **38**: 1-10.
- 山下浩之・萬年一剛・川手新一・笠間友博・平田大二・蛭子貞二・谷口英嗣, 2008. 箱根火山基盤岩類の再検討. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然科学), (13): 135-156.
- 山崎晴雄・下川浩一・水野清秀・井内美郎, 1992. 断層の活動史に関する研究. 科学技術振興調査費「マグニチュード 7 級の内地地震の予知に関する研究」成果報告書, pp.98-111. 科学技術庁研究開発局.
- 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, pp.338-358. 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.
- 米澤 宏・森 慎一・山口伸弥, 1980. 火山灰層位学からみた箱根古期外輪山溶岩 (その 1) —真鶴半島周辺のテフラと溶岩—. 関東の四紀, (7): 23-37.
- 米澤 宏・稲垣 進・上杉 陽・鶴浦武久・則 茂雄・満岡 孝・安野 信・由井将雄・箱根団体研究グループ, 1996. 箱根火山東麓の箱根古期外輪山溶岩を覆う中期更新世テフラ. 日本第四紀学会編, 第四紀露頭集—日本のテフラ—, p.209. 日本第四紀学会.