

東・東南アジア地域のカルデラの形状

—G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 5/7—

宝田 晋治
Shinji Takarada

地質調査総合センター活断層・火山研究部門
Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST

Takarada, S. (2019) Shape of calderas in East and Southeast Asia: Data of G-EVER Asia-Pacific Region Earthquake and Volcanic Hazards Information System 5/7. Open-File Report of the Geological Survey of Japan, AIST, no. 685, p. 1-33.

Abstract

東・東南アジア地域に分布するカルデラの形状を GIS データとして取りまとめた。ここでは、トバ、白頭山、タンボラ、リンジャニ・サマラス、タール、阿蘇、始良、鬼界、阿多、洞爺、支笏、阿寒、屈斜路、クラカタウ、バツール、ピナツボ、ラバウル、ロングアイランド、ダカタウア、ウィトリ、ビリーミッチェル、ウルルン、十和田、濁川、摩周、萌消の 26 のカルデラについて取りまとめている。

The shape of calderas in East and Southeast Asia are compiled and GIS data are provided. They are 26 caldera data obtained from volcanoes such as Toba, Changbaishan, Tambora, Rinjani-Samalas, Taal, Aso, Aira, Kikai, Ata, Toya, Shikot, Akan, Kutcharo, Krakatau, Batur, Pinatubo, Rabaul, Long Island, Dakataua, Wiroti, Billy Michel, Ulleung, Towada, Nigorikawa, Mashu and Moekeshi.

1. はじめに

カルデラ形成を伴う巨大・大規模噴火では、数 \sim 100 km³以上の火砕物が一気に地表に噴出し、火砕流や降下テフラとなって広範囲に広がり、噴出源から数 10 \sim 1000 km 以上離れた地域に影響を与えることが多い。こうした巨大・大規模噴火をもたらすカルデラの位置や形状は、今後の大規模カルデラ噴火の影響範囲を予測する上でも重要である。産総研地質調査総合センターでは、2016 年に東・東南アジア地域の大規模な地震、火山噴火による分布域などを取りまとめ、1000 万分の 1 東アジア地域地震火山災害情報図として出版した (Takarada et al., 2016)。その中では、VEI (火山爆発指数; Newhall and Self, 1982) 6 以上 (10 km³ 以上) の 16 のカルデラの位置を示した。そこでは 1000 万分の 1 の小縮尺であることから、トバ以外のカルデラの形状は円で示していた。本研究資料集では、東・東南アジア地域において、スミソニアン Volcanoes of the world 第 3 版 (Siebert et al., 2010) に示されている完新世及び更新世の巨大・大規模火山噴火の内、120 ka 以降の VEI7 以上の噴火、及び 15.5 ka 以降の VEI6 の噴火で形成された 26 のカルデラを取り上

げた (表 1). ここでは, トバ (VEI=8), 白頭山, タンボラ, リンジャニ・サマラス, タール, 阿蘇, 始良, 鬼界, 阿多, 洞爺, 支笏, 阿寒, 屈斜路 (VEI=7), クラカタウ, バツール, ピナツボ, ラバウル, ロングアイランド, ダカタウア, ウィトリ, ビリーミッチェル, ウルルン, 十和田, 濁川, 摩周, 萌消 (VEI=6) のカルデラを対象に, 地形的なカルデラ縁の形状をトレースし, GIS データを作成した. ただし, Volcanoes of the world 第 3 版には含まれていないが, その後の研究により噴火や降下テフラの分布の詳細が明らかとなった, リンジャニ・サマラス 1257 年噴火 (Vidal et al., 2015, 2016; Lavigne et al., 2013) を, ここでは新たに追加している. 東・東南アジア地域には, 他にもカルデラ地形が認められるが, 噴火年代や噴出量の体積, 火砕流の分布などの詳しい地質調査が進んでいるカルデラがあまりないのが現状である. GIS データは, カルデラの分布・形状の表示等に利用して頂ければ幸いである. 各火山の位置を, 図 1, 2, 3 に示す. なお, 本データは, 2019 年 7 月下旬より, G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム (<http://ccop-geoinfo.org/G-EVER/>) 上で閲覧・ダウンロードが可能になる予定である.

表 1. 東・東南アジア地域の 120 ka 以降の VEI7 以上の噴火, 及び 15.5ka 以降の VEI6 の噴火で形成されたカルデラのリスト (Siebert et al., 2010 に基づく). ○: 本研究資料集で取り上げた噴火. VEI は最新知見に基づき修正されている.

Table 1. List of calderas formed due to VEI7 to 8 eruptions after 120 ka and VEI6 eruptions after 15.5 ka in East and Southeast Asia (after Siebert et al., 2010). Open circle: described in this open-file report. VEI is updated based on the latest information.

| No | Caldera | Event | Age | VEI | Region | Description |
|----|--|---------------------------------|-------------|-----|---|-------------|
| 1 | Toba | Toba 74ka eruption | 74 ka | 8 | Sumatra, Indonesia | ○ |
| 2 | Changbaishan (Baitoushan, Baegdu, Tianchi) | Changbai 946AD eruption | 946 AD | 7 | Ryganggang North Korea and Jilin, China | ○ |
| 3 | Tambora | Tambora 1815AD eruption | 1815 AD | 7 | Sumbawa, Indonesia | ○ |
| 4 | Rinjani-Samalas | Rinjani-Samalas 1257AD eruption | 1257 AD | 7 | Lombok, Indonesia | ○ |
| 5 | Taal | Taal 5.4ka eruption | 5.4 ka | 7 | Luzon, Philippine | ○ |
| 6 | Aso | Aso-4 eruption | 89 ka | 7 | Kyushu, Japan | ○ |
| 7 | Aira | Aira-Ito eruption | 30 cal ka | 7 | Kyushu, Japan | ○ |
| 8 | Kikai | Kikai-Koya eruption | 7.3 cal ka | 7 | Kyushu, Japan | ○ |
| 9 | Ata | Ata eruption | 108 ka | 7 | Kyushu, Japan | ○ |
| 10 | Toya | Toya eruption | 106 ka | 7 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 11 | Shikotsu | Shikotsu 46ka eruption | 46 cal ka | 7 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 12 | Akan | Akan 1 eruption | 120 ka | 7 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 13 | Kutcharo | Kutcharo I eruption | 40 cal ka | 7 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 14 | Krakatau | Krakatau 1883AD eruption | 1883 AD | 6 | Sunda Strait, Indonesia | ○ |
| 15 | Batur | Batur 20ka eruption | 20 ka | 6 | Bali, Indonesia | ○ |
| 16 | Pinatubo | Pinatubo 1991AD eruption | 1991 AD | 6 | Luzon, Philippine | ○ |
| 17 | Rabaul | Rabaul 7c eruption | 681-684 AD | 6 | New Britain Island, Papua New Guinea | ○ |
| 18 | Long Island | Long Island 1660AD eruption | 1660 AD | 6 | Vitiaz Strait, Papua New Guinea | ○ |
| 19 | Dakataua | Dakataua 1.4ka eruption | 1.4 ka | 6 | New Britain Island, Papua New Guinea | ○ |
| 20 | Witori | Witori-Kimbe 2 eruption | 3.3 ka | 6 | New Britain Island, Papua New Guinea | ○ |
| 21 | Billy Mitchell | Billy Mitchell 1580AD eruption | 1580 AD | 6 | Bougainville Island, Papua New Guinea | ○ |
| 22 | Ulleung | Ulleung-Oki eruption | 10.2 cal ka | 6 | Eastward offshore of Korea | ○ |
| 23 | Towada | Towada-Hachinohe eruption | 15.5 cal ka | 6 | Tohoku, Japan | ○ |
| 24 | Nigorikawa | Nigorikawa 14.6ka eruption | 14.6 cal ka | 6 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 25 | Mashu | Mashu 7ka eruption | 7.5 cal ka | 6 | Hokkaido, Japan | ○ |
| 26 | Moekeshi | Moekeshi 11ka eruption | 11 cal ka | 6 | Iturup Island, Japan | ○ |

2. 手法

東・東南アジア地域の 120 ka 以降の VEI7 以上の噴火, 及び 15.5 ka 以降の VEI6 の噴火で形成された 26 のカルデラについて, 文献調査を行い, カルデラ縁の形状を GIS データとしてとりまとめた. 基本的には文献や地質図に掲載されているカルデラ縁をトレースしている. 作業に当たっては, これらを参照しつつ, ArcGIS のベースマップの地形陰影を使い, 地形的なカルデラ縁をトレースした. 解像度は, 文献や地質図の解像度によるため, 多くの場合, 1000 万分の 1~10 万分の 1 程度の精度である. それ以上の精度での検討には, 別途他の詳細な図をご利用いただきたい. カルデラの一部が侵食などで失われている場合は, その部分は表現していない.

年代値は、文献情報に基づき、可能な限り最新の値とその根拠を示した。複数の年代値がある場合は、それらのいくつかを示し、妥当な代表値を示した。歴史時代の噴火は西暦で、それ以外の噴火は ka で示した。暦年較正による年代値が文献で示されている場合は、”cal ka”等で表記した。また、歴史時代の噴火で、具体的な噴火年が特定されていない場合は、範囲を示した。体積は、見かけの体積 (km³) を示した。

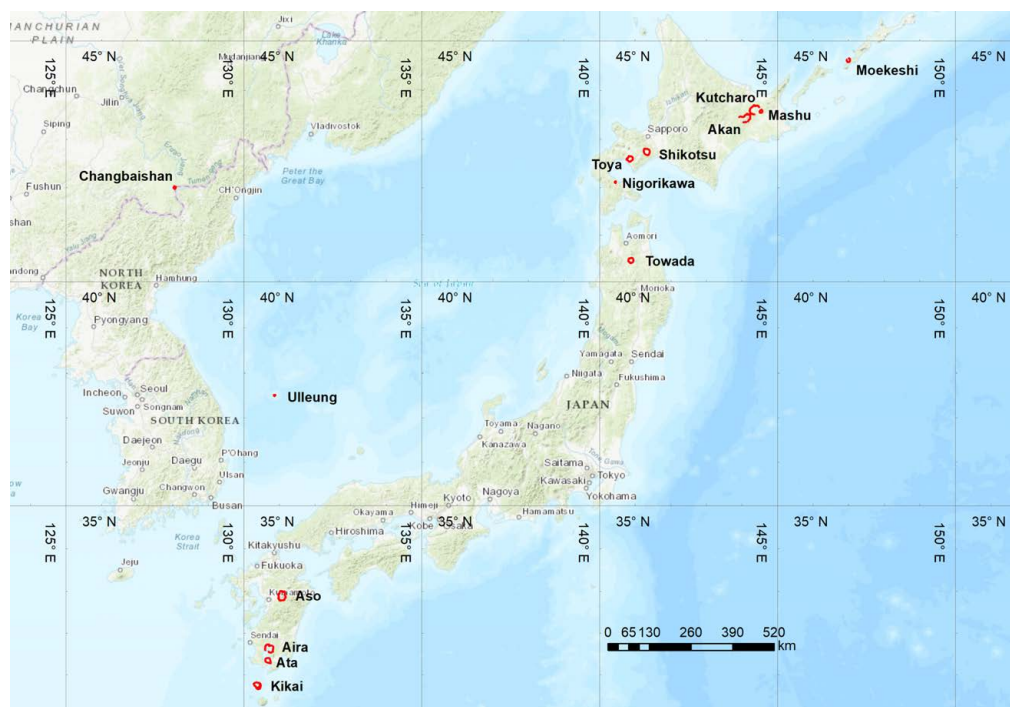


図 1. カルデラ縁を示した各火山の位置図（日本周辺地域）。赤いラインはカルデラ縁の概形を示す（以下同様）。地形図は ESRI 社の ArcGIS のベースマップを利用（以下同様）。

Fig. 1. Distribution of volcanoes in this report (Japan and surroundings area). Red line indicates the location of caldera rim (same on the following figures). Base map provided by the ESRI ArcGIS software is used (same on the following figures).



図 2. カルデラ縁を示した各火山の位置図（フィリピン、インドネシア周辺地域）。

Fig. 2. Distribution of volcanoes in this report (Indonesia and Philippines area).



図 3. カルデラ縁を示した各火山の位置図 (パプアニューギニア周辺地域).
Fig. 3. Distribution of volcanoes in this report (Papua New Guinea area).

3. 各カルデラの概要

3-1. トバ (VEI=8)

インドネシアスマトラ島のトバ火山では、約 74 ka に Youngest Toba Tuff (YTT) 火砕流、約 0.50 Ma に Middle Toba Tuff (MTT) 火砕流、約 0.84 Ma に Oldest Toba Tuff (OTT) が発生し、これらの大規模噴火により 100 km × 35 km のカルデラが形成されている (Knight et al., 1986; Chesner and Rose, 1991; Acharyya and Basu, 1993; Mark et al., 2017; Storey et al., 2012). 火砕流堆積物は、カルデラ周辺に広く分布している (Aldiss et al., 1983; Clark et al., 1982; Cameron et al., 1981, 1982; Aspdén et al., 1982). 約 74 ka の大規模噴火による降下テフラは北西方向に



図 4. トバカルデラ縁の形状
Fig. 4. Shape of the Toba caldera rim.

広がり、スマトラ島北西部、ベンガル湾、インド洋北部、インド大陸周辺部に広く分布している (Acharyya and Basu, 1993; Ninkovich et al., 1978). YTT の総噴出量は、 $2,800 \text{ km}^3$ (VEI=8), MTT の総噴出量は、約 60 km^3 (VEI=6), OTT の総噴出量は、約 500 km^3 (VEI=7) と見積もられている (Rose and Chesner, 1987; Chesner and Rose, 1991; Knight et al., 1986). トバカルデラ縁の形状は、Chesner and Rose (1991) やインドネシアの 25 万分の 1 地質図 (Aldiss et al., 1983; Clark et al., 1982; Cameron et al., 1981, 1982; Aspden et al., 1982) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 4).

3-2. 白頭山 (VEI=7)

中国、北朝鮮国境の白頭山 (Changbaishan, Baitoushan, Baegdu, Taichi) 火山では、西暦 946 年 (Oppenheimer et al., 2017) の噴火で火砕流が発生し、 $8.5 \text{ km} \times 7.5 \text{ km}$ のカルデラが山頂部に形成されている (Machida et al., 1990; Horn and Schminke, 2000; Wei et al., 2013; 宮本ほか, 2004). カルデラ形成時の火砕流堆積物は、火山体周辺に分布している. この噴火による降下テフラは、白頭山-苦小牧テフラ (B-Tm) として、東方に広がり、北日本地域や日本海周辺域に広く分布している (町田ほか, 1990; 町田・新井, 2003). 噴出量は、約 100 km^3 (VEI=7; Wei et al., 2013; Horn and Schminke, 2000) と見積もられている. 白頭山の地形的なカルデラ縁の形状は、Wei et al. (2013) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 5).

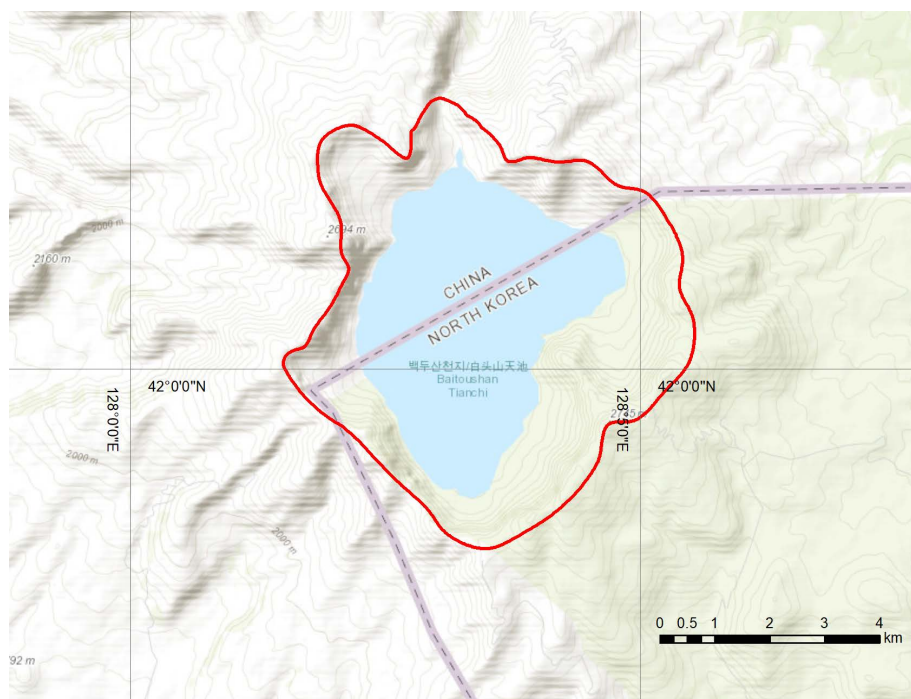


図 5. 白頭山カルデラ縁の形状
Fig. 5. Shape of the Changbaishan caldera rim.

3-3. タンボラ (VEI=7)

インドネシアスンバワ島のタンボラ火山では、西暦 1815 年の噴火で火砕流が発生し、 $7.4 \text{ km} \times 6.8 \text{ km}$ のカルデラが形成されている (Self et al., 1984; Sigurdsson and Carey, 1989). この噴火による火砕流堆積物は、山体周辺に広く分布している. 噴火に伴う降下テフラは、西方、北方、東方に広く分布している (Self et al., 1984; Sigurdsson and Carey, 1989). この噴火の噴出量は約 110 km^3 と見積もられている (VEI=7; Self et al., 2004; Kandlbauer and Sparks, 2014). 地形的なタンボ

ラカルデラ縁の形状は, Sigurdsson and Carey (1989) と Self et al. (1984) を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した(図 6)。

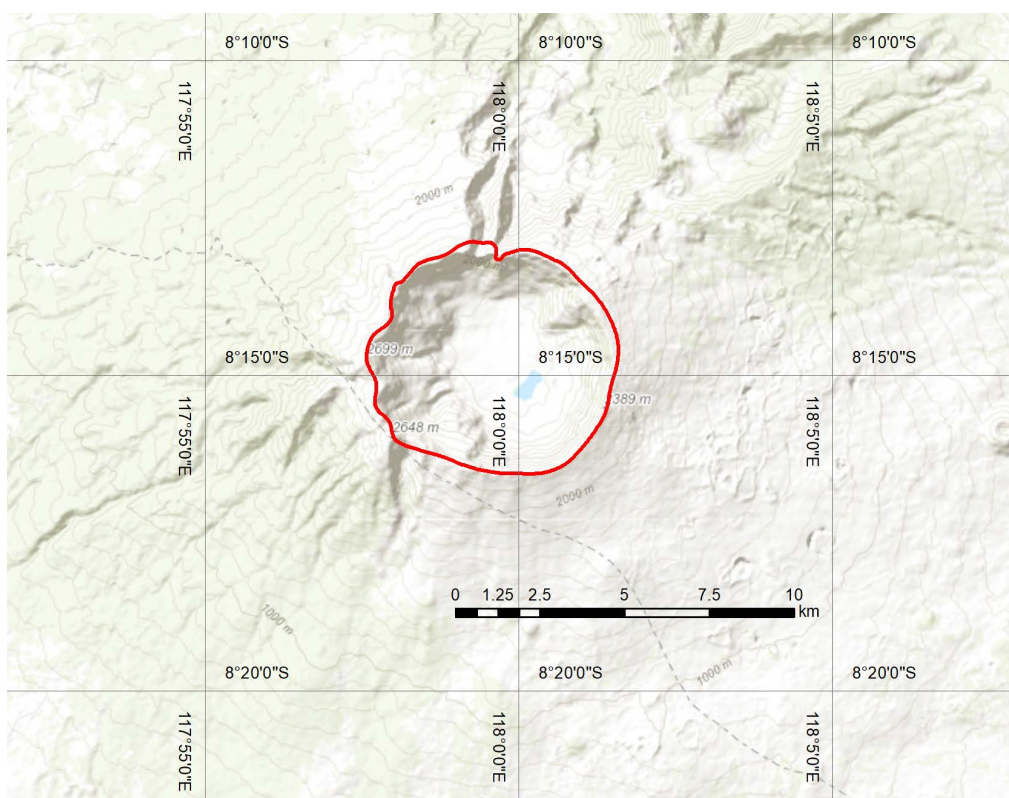


図 6. タンボラカルデラ縁
Fig. 6. Shape of the Tambora caldera rim.

3-4. リンジャニ・サマラス (VEI=7)

インドネシアロンボク島のリンジャニ・サマラス火山では, 西暦 1257 年の噴火で火砕流が発生し, 山頂部に, 8.5 km × 5.0 km のカルデラが形成されている. 火砕流は火山体周辺に分布し, 噴火に伴う降下テフラが西方に広く分布している (Vidal et al., 2015, 2016; Lavigne et al., 2013; Métrich et al., 2017; Hiden et al., 2017; Mutaquin et al., 2019). この噴火による地球規模の気温低下により, 大勢の犠牲者がでている (Guillet et al., 2017; Stoffel et al., 2015; Gennaretti et al., 2014). この噴火の噴出量は, 約 100 km³ (40 km³ DRE) 以上と見積もられている (VEI=7; Lavigne et al., 2013). アイスコアの対比や ¹⁴C 年代値により, 噴火年代は, 西暦 1257 年とされている (Oppenheimer, 2003; Lavigne et al., 2013). 地形的なリンジャニ・サマラスカルデラ縁の形状は, Vidal et al. (2015), Lavigne et al. (2013) を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した(図 7)。

3-5. タール (VEI=7)

フィリピンソン島のタール火山では, 約 27,000 年前と約 5,400 年前 (5,380±170 yBP) に火砕流が発生し, 現在では 31 km × 28 km のカルデラが形成されている (Torres et al., 1995). 火砕流堆積物はカルデラ周辺に分布している. 西暦 1572 年以降 33 回の噴火が記録されており, 1754 年の噴火が比較的規模の大きい噴火であった (Torres et al., 1995). 1965-1977 年の噴火では, マグマ水蒸気噴火により, ベースサージが発生している (Moore, 1967; Waters and Fisher, 1971). タールカルデラでは, GPS 観測, 電磁気探査など多くの探査が行われている (Lowry et al.,

2001; Bartel et al., 2002; Galgana et al., 2014; Zlotnicki et al., 2009; You et al., 2013). 地形的なタールカルデラ縁の形状は, Torres et al. (1995), Lowry et al. (2001) を参照し, ArcGIS 上のベクタースマップ地形図上で編集し作成した (図 8).

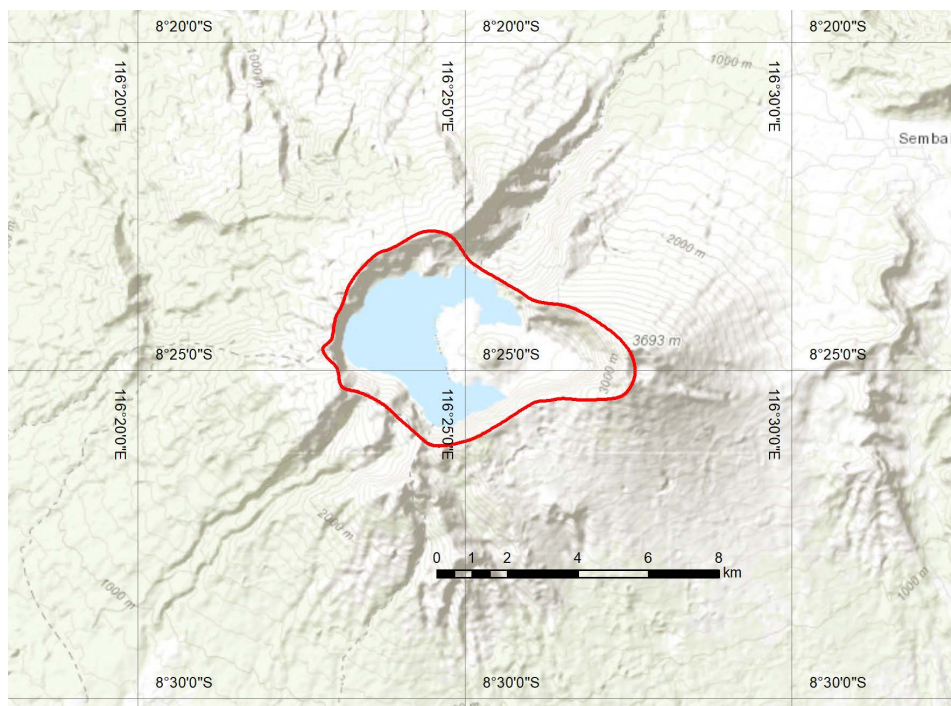


図 7. リンジャニ・サマラスカルデラ縁の形状
Fig. 7. Shape of the Tambora caldera rim.



図 8. タールカルデラ縁の形状
Fig. 8. Shape of the Taal caldera rim.

3-6. 阿蘇 (VEI=7)

九州北部の阿蘇火山では、約 89 ka に阿蘇 4 (Aso-4) 火砕流、約 123 ka に阿蘇 3 (Aso-3) 火砕流、約 141 ka に阿蘇 2 (Aso-2) 火砕流、約 266 ka に阿蘇 1 (Aso-1) 火砕流が発生し、これら 4 回の大規模噴火により、現在では 28 km × 22 km のカルデラが形成されている (小野ほか, 1977; 松本ほか, 1991; 松本, 1996). カルデラ北部のいくつかの湾曲した部分は、カルデラ形成時の地すべり等で、地形的に拡大した可能性がある. 約 89 ka の阿蘇 4 火砕流は、最大で給源から 160km 以上の距離まで火砕流が到達し、九州北部と山口西部地域に渡り、広く火砕流堆積物が分布している (小野・渡辺, 1985; 町田・新井, 2003; 宝田・星住, 2016). 阿蘇 4 噴火に伴う降下テフラは、広く日本や周辺海域に分布しており、日本全域の鍵層となっている (町田ほか, 1985; Aoki, 2008; 町田・新井, 2003). 阿蘇 4 噴火の噴出量は全体で 600 km³ 以上、阿蘇 3 噴火の噴出量は 150 km³ 以上 (VEI=7; 町田・新井, 2003), 阿蘇 2 噴火の噴出量は 25 km³ 以上 (VEI=6; 渡辺, 2001), 阿蘇 1 噴火の噴出量は 30 km³ 以上 (VEI=6; 渡辺, 2001) と見積もられている. 地形的な阿蘇カルデラ縁の形状は、20 万分の 1 地質図幅「熊本」 (星住ほか, 2004), 「大分 (第 2 版)」 (星住ほか, 2015), 阿蘇火山地質図 (小野・渡辺, 1985) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 9). 西側のカルデラ縁は、侵食により失われている. 東側は根子岳の存在により地形的に高くなっており、カルデラ縁が不明瞭になっている可能性がある.

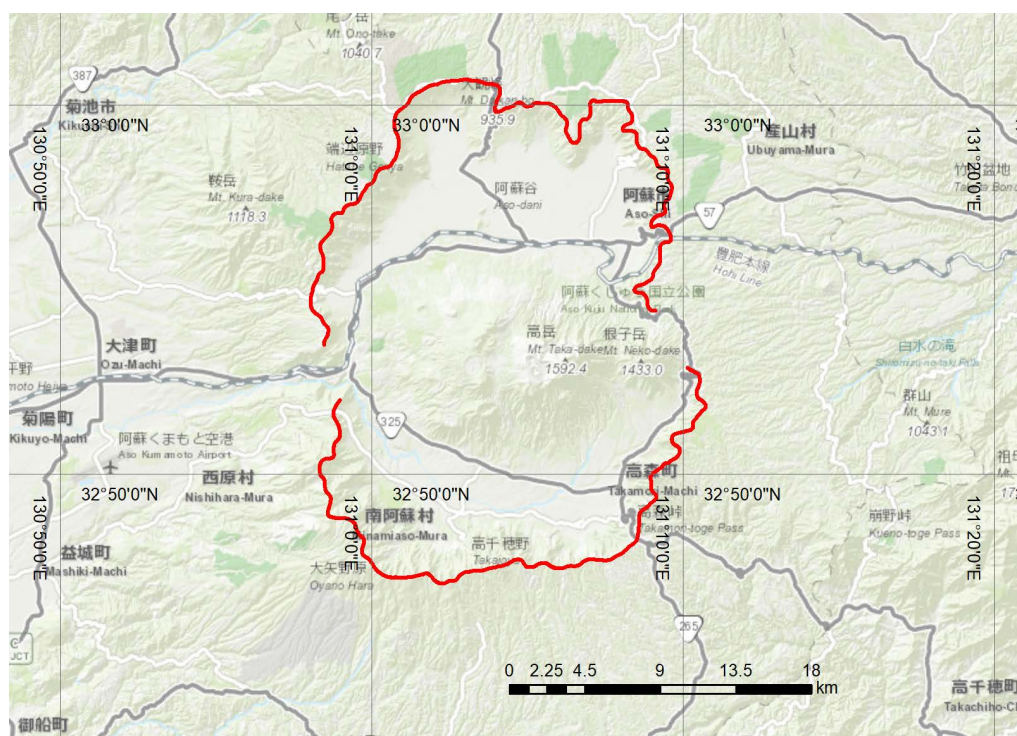


図 9. 阿蘇カルデラ縁の形状
Fig. 9. Shape of the Aso caldera rim.

3-7. 始良 (VEI=7)

九州南部の始良火山では、約 30 cal ka (Smith et al., 2013) に大隅降下軽石、妻屋火砕流、入戸火砕流が発生し、27 km × 21 km のカルデラが形成された (Aramaki, 1984). この噴火により、九州南部地域に広く入戸火砕流堆積物が分布している (横山, 1970; Aramaki, 1984; 町田・新井, 2003; 長岡ほか, 2001). 噴火に伴う降下テフラ (始良 Tn テフラ) は、本州以南や周辺海域に広くに分布しており、国内のよい鍵層となっている (町田・新井, 2003; 長岡ほか, 2001; Smith et al., 2013; 河合・三宅, 1999). この噴火の噴出量は、全体で 450 km³ 以上と見積もられている (VEI=7; 町田・新井, 2003). 最近では、火砕流堆積物の分布・層厚のより詳細な復元により、火砕

流堆積物だけで、500～600 km³（宝田ほか，2017）という推定値が得られている．地形的な始良カルデラ縁の形状は、20 万分の 1 地質図幅「鹿児島」（宇都ほか，1997）を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した（図 10）．カルデラの南西部は桜島に覆われているため、ここでは表現していない．



図 10. 始良カルデラ縁の形状
Fig. 10. Shape of the Aira caldera rim.

3-8. 鬼界（VEI=7）

九州南方海域の鬼界火山では、約 95 ka に長瀬火砕流、約 7.3 cal ka（福沢，1995；Smith et al. 2013）に幸屋（竹島）火砕流（Maeno and Taniguchi, 2007, 2009；町田・新井，2003）が発生しており（Nagaoka, 1988a；長岡，1988b；小野ほか，1982；Maeno and Taniguchi, 2007, 2009；宇井，1973；町田・新井，2003），現在では 23 km × 16 km 及び 16 km × 13 km の重なった 2 つのカルデラがみられる（図 11；川辺ほか，2004；斎藤ほか，2007）．カルデラの北東端に竹島が、北西端に薩摩硫黄島がある．幸屋火砕流堆積物は、九州南部、種子島、屋久島、竹島、薩摩硫黄島等に分布している（Maeno and Taniguchi, 2007, 2009；宇井，1973；Ui et al., 1989；下司，2009；町田・新井，2003）．約 7.3 cal ka の噴火に伴う降下テフラ（鬼界-アカホヤテフラ）は、西日本・中部地域や周辺海域に広く分布している（町田・新井，1978, 2003）．この噴火の噴出量は、幸屋火砕流堆積物が 30-40 km³（Maeno and Taniguchi, 2007），鬼界-アカホヤテフラが約 100 km³ 以上（町田・新井，1978, 2003），全体で 130～140 km³ 以上と見積もられている（VEI=7）．Tatsumi et al. (2018) は、全体の噴出量を DRE で 500 km³ としている．95 ka の噴火の噴出量は、全体で 150 km³ 以上と見積もられている（町田・新井，2003）．Tatsumi et al. (2018) は、潜水船や音波探査、ドレッジによる調査で、カルデラの中央部に 32 km³ の巨大流紋岩ドームが存在することを示した．地形的な鬼界カルデラ縁の形状は、Tatsumi et al. (2018) の音波探査データ，20 万分の 1 地質図幅「開聞岳及び黒島の一部」（川辺ほか，2004）や「屋久島」（斎藤ほか，2007）を参照し、編集の上作成した（図 11）．2 重カルデラのうち、内側のカルデラ壁の方が比較的好く地形が保存されている（Tatsumi et al., 2018）こと

から、外側のカルデラは、95 ka の長瀬火砕流を伴う噴火で、内側のカルデラは、7.3 cal ka の幸屋火砕流を伴う噴火で形成された可能性が考えられる。

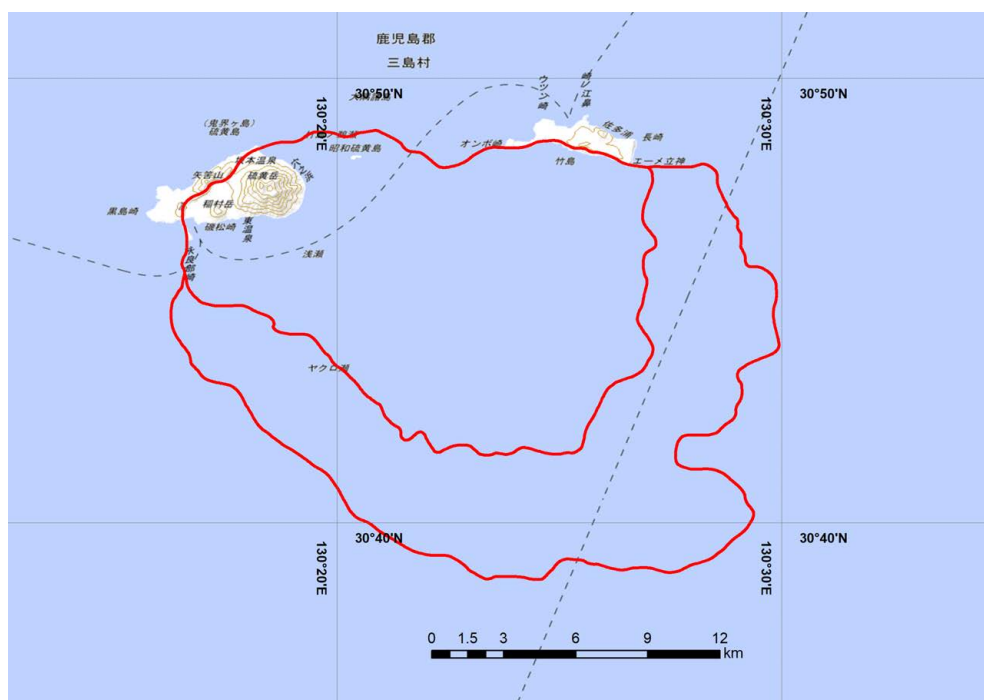


図 11. 鬼界カルデラ縁の形状. 地形図は地理院地図 WMTS 版を利用.

Fig. 11. Shape of the Kikai caldera rim. The Geospatial Information Authority of Japan (GSI) Tile Map is used as base map.

3-9. 阿多 (VEI=7)

九州南部の阿多火山では、約 108 ka (松本・宇井, 1997) に阿多火砕流が発生し、20 km × 16 km のカルデラが形成された (宇井ほか, 1983). 阿多火砕流堆積物は、広く九州南部地域に分布している (Aramaki and Ui, 1966; 荒牧・宇井, 1965; Suzuki and Ui, 1983; 町田・新井, 2003). 噴火に伴う降下テフラ (阿多テフラ) は、西日本や周辺海域に広く分布している (Nagaoka, 1988; 町田・新井, 2003). この噴火の噴出量は、全体で 250~300 km³ 以上と見積もられている (VEI=7; 町田・新井, 2003). カルデラの位置については、より南部の地形的なカルデラであるという説 (Matsumoto, 1943) もあったが、阿多火砕流の流動方向や構造探査などから、北側のカルデラが給源であると考えられている (宇井ほか, 1983; 早坂, 1982; 川辺ほか, 2004). 地形的な阿多カルデラ縁の形状は、重力異常や構造探査結果を基に描かれた宇井ほか (1983), 早坂 (1982) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 12).

3-10. 洞爺 (VEI=7)

北海道南西部の洞爺火山では、約 106 ka (白井, 1997; Matsu'ura, 2014) に洞爺火砕流が発生し、19 km × 17 km のカルデラが形成された (Goto et al., 2018). 洞爺火砕流堆積物は、カルデラ周辺地域に広く分布している (Goto et al., 2018; 町田・新井, 2003; 石田ほか, 1980, 1983, 1991). 噴火に伴う降下テフラ (洞爺テフラ; Toya) は、北海道全域、東北地方北部に広く分布している (町田ほか, 1987; 町田・新井, 2003). この噴火の噴出量は、火砕流堆積物が 20 km³ 以上ないし 36.8 km³ 以上、降下テフラが 150km³ 以上と見積もられている (VEI=7; 石川ほか, 1969; 町田ほか, 1987; Goto et al., 2018). 最近では、火砕流堆積物の分布・層厚のより詳細な復元により、火砕流堆積物だけで、80～160 km³ (宝田ほか, 2018) という推定値が得られている. 最近で

は, Goto and Danhara (2018) が, CSAMT 法 (信号源制御地磁気電流法) による浅所の構造探査を行っている. 洞爺カルデラ縁の形状は, Goto et al. (2018), Goto and Danhara (2018), 20 万分の 1 地質図幅「室蘭」(石田ほか, 1983)を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 13).

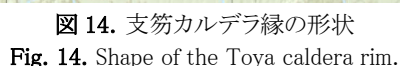


図 12. 阿多カルデラ縁の形状
Fig. 12. Shape of the Ata caldera rim.



図 13. 洞爺カルデラ縁の形状
Fig. 13. Shape of the Toya caldera rim.

北海道南西部の支笏火山では、約 46 cal ka (Uesawa et al., 2016) に支笏火砕流が発生し、22 km × 18 km のカルデラが形成された (中川ほか, 2018). 支笏火砕流堆積物は、周辺地域に広く分布している (中川ほか, 2018; 山縣, 1994; 町田・新井, 2003; 石田ほか, 1980, 1991; 佐藤ほか, 1972). 噴火に伴う降下テフラ (支笏第 1 テフラ; Spfa-1) は、北海道及び周辺海域に広く分布している (山縣, 1994; 町田・新井, 2003). この噴火の噴出量は、全体で約 300 km³と見積もられている (VEI=7; Machida 1999; 町田・新井, 2003). 最近、より詳細な火砕流堆積物の分布見積りにより、火砕流堆積物の体積は 150 km³、降下テフラの体積は 200~240 km³という推定結果が得られている (山元, 2016). 支笏カルデラ縁の形状は、中川ほか (2018) や 20 万分の 1 地質図幅「札幌」(石田ほか, 1980)を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 14). 南部~南東部のカルデラ縁は、樽前山により覆われており不明瞭であるが、推定の上示している。



北海道東部の阿寒火山では、合計 17 回の大規模噴火が発生し、39 km × 19 km のカルデラが形成された（長谷川・中川, 2007）. これらの噴火による阿寒火砕堆積物（Ak1～17）は、北海道東部地域に広く分布している（長谷川・中川, 2007; 長谷川ほか, 2008, 2011）. 噴火に伴う降下テフラも、北海道中部・東部に広く分布している（奥村, 1991; Machida, 1999; 町田・新井, 2003）. 各噴出物の噴出量（DRE 換算値）は、Ak1 が 7.4 km³, Ak2 が 56.3 km³, Ak3 が 2.6 km³, Ak4 が 20.8 km³, Ak5 が 2.5 km³, Ak6 が 0.9 km³, Ak7 が 14.0 km³, Ak10 が 8.4 km³, Ak12 が 2.4 km³, Ak13 が 17.3 km³, Ak14 が 2.9 km³, Ak15 が 1.9 km³, Ak16 が 5.7 km³, Ak17 が 8.5 km³ と見積もられている（長谷川ほか, 2011）. 噴火年代は、Ak3 から 0.51±0.06 Ma（長谷川ほか, 2008）, Ak6 から 0.76±0.24 Ma（石井, 2009）, Ak14 から 1.3±0.4 Ma（松井・松澤, 1985; テフラ群に挟まれる十勝火砕流起源の HR-5 の年代）及び 1.46±0.13 Ma（佐川ほか, 1984; テフラ群に挟まれる十勝火砕流起源の HR-6 の年代）の K-Ar 年代値が得られている. 阿寒カルデラ縁の形状は、長谷川・中川（2007）, 長谷川ほか（2011）を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した（図 15）. 西側や南側のカルデラ縁は不明瞭である. 侵食で失われたのか、何度も大規模噴

火が起こったために複雑な形状になっているのか、西側は元々陥没しなかったのか、詳細は不明である。

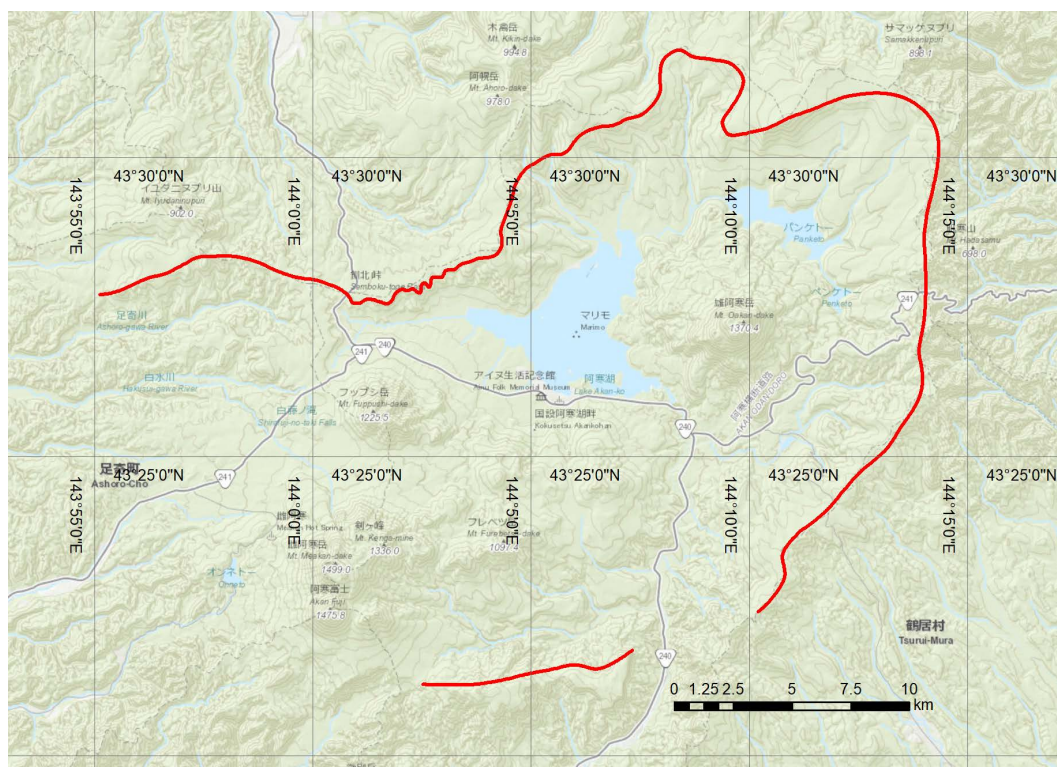


図 15. 阿寒カルデラ縁の形状
Fig. 15. Shape of the Akan caldera rim.

3-13. 屈斜路 (VEI=7)

北海道東部の屈斜路火山では、屈斜路火砕流 I (Kp I; 約 40 cal ka; 山元ほか, 2010), 屈斜路火砕流 II/III (Kp II/III; 約 90 ka), 屈斜路火砕流 IV (Kp IV; 約 120 ka), 屈斜路火砕流 V (Kp V), 屈斜路火砕流 VI (Kp VI), 屈斜路火砕流 VII (Kp VII), 屈斜路火砕流 VIII (Kp VIII; 210 ± 180 ka), 古梅火砕流 (FWT; 400 ± 100 ka) が発生し, $32 \text{ km} \times 27 \text{ km}$ のカルデラが形成された (勝井・佐藤, 1963; Hasegawa et al. 2012, 2016). これらの火砕流堆積物は、北海道東部地域に広く分布している (勝井・佐藤, 1963; Hasegawa et al. 2012, 2016; 町田・新井, 2003; 佐藤ほか, 1970, 1971, 1976; 佐藤・三梨, 1970; 山口, 1970; 佐藤・山口, 1984). 特に, Kp I 噴火に伴う降下テフラ (屈斜路庶路テフラ; Kc-Sr) や Kp IV に伴う降下テフラ (屈斜路羽幌テフラ; Kc-Hb) は、北海道東部及び東方の海域に広く分布している (奥村, 1991; Machida, 1999; 町田・新井, 2003). Kp I 噴火の噴出量は、全体で 100 km^3 (町田・新井, 2003), 120 km^3 (Hasegawa et al., 2016) と見積もられている (VEI=7). Kp II 噴火は全体で 25 km^3 , Kp IV 噴火は 175 km^3 , Kp V 噴火は 38 km^3 , Kp VI 噴火は 75 km^3 , Kp VII 噴火は 13 km^3 , Kp VIII 噴火は 38 km^3 , FWT 噴火は 50 km^3 と見積もられている (Hasegawa et al., 2016). 最近、火砕流堆積物の分布・層厚の詳細な復元により、Kp I 火砕流堆積物だけで $95 \sim 180 \text{ km}^3$, Kp IV 火砕流堆積物だけで $320 \sim 660 \text{ km}^3$ の推定値が得られている (宝田ほか, 2018). 屈斜路カルデラ縁の形状は、Hasegawa et al. (2012, 2016), 20 万分の 1 地質図幅「斜里」(佐藤ほか, 1970) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 16). 南東側のカルデラ縁は摩周火山噴出物に覆われており、その位置は不明瞭であるため示していない。

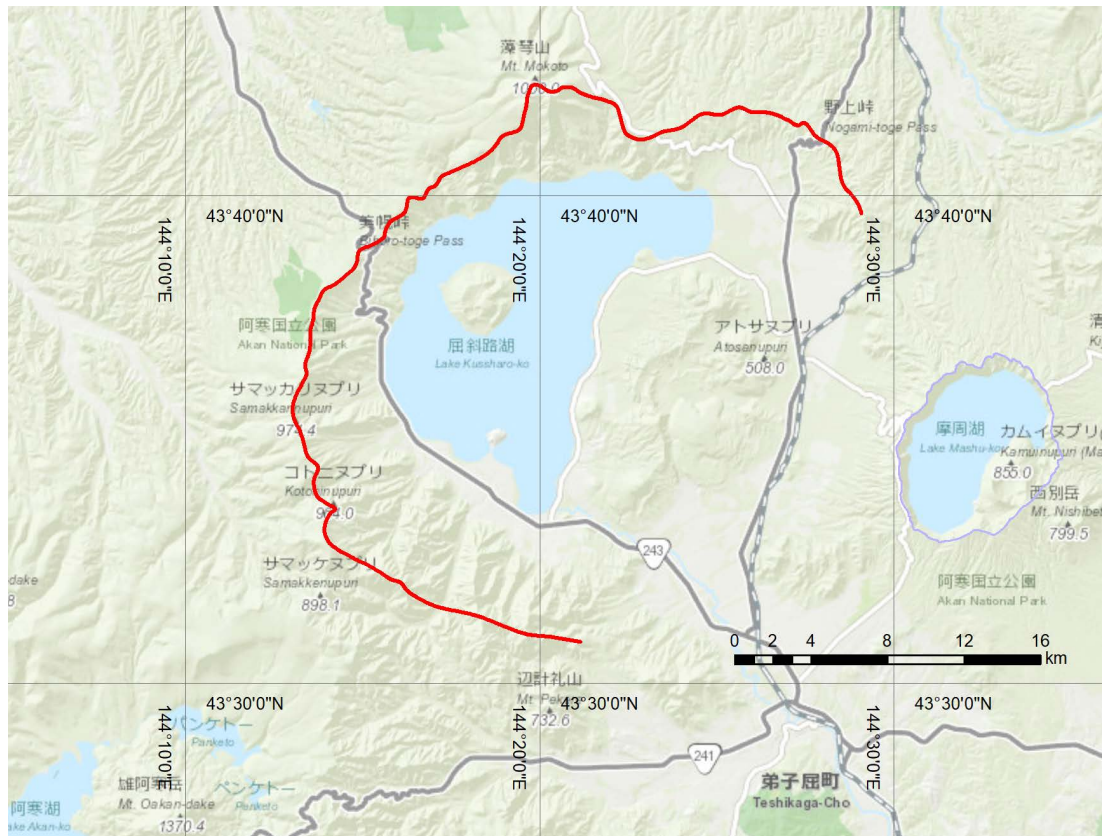


図 16. 屈斜路カルデラ縁の形状
Fig. 16. Shape of the Kutcharo caldera rim.

3-14. クラカタウ (VEI=6)

インドネシアのスンダ海峡に位置するクラカタウ火山では、西暦 1883 年の噴火で火砕流が発生し、7.8 km × 4 km のカルデラが形成された (Verbeek, 1884, 1885; Self, 1992; Self and Rampino, 1981). 火砕流は、島嶼部や対岸のスマトラ島やジャワ島の海岸沿いに到達している (Verbeek, 1884, 1885; Simkin and Fiske, 1983; Francis, 1985; Carey et al., 1996). 噴火に伴う降下テフラは、北西、南西方向に広がり、スマトラ島南東部やジャワ島西部などに広く分布している (Verbeek, 1885; Fiske and Simkin, 1983). この噴火では、火砕流により 2,000 人、降下テフラにより 34,417 人、合計約 36,417 人が犠牲となっている (Takarada et al., 2016; Siebert et al., 2010). 2018 年 12 月 22 日の噴火では、アナクラカタウの南西部が崩壊し、津波の発生により 370 人以上の犠牲者が出ている. 1883 年噴火の噴出量は、18 km³ (Verbeek, 1884, 1885), 18~21 km³ (Self and Rampino, 1981) と見積もられている (VEI=6). 1883 年噴火によるクラカタウカルデラ縁の形状は、海底地形図を参考に描かれた Self (1992), Self and Rampino (1981) を参照し、ArcGIS 上のベクタースマップ地形図上で編集し作成した (図 17).

3-15. バツール (VEI=6)

インドネシアバリ島のバツール火山では、約 29 ka にデイサイト質の Ubud 火砕流、約 20 ka に安山岩～デイサイト質の Gunungkawi 火砕流が発生し、12 km × 10 km のカルデラが形成された (Reubi and Nicholls, 2004, 2005; Sutawidjaja, 2009; Sutawidjaja et al., 2015; Wheller and Varne, 1986). 約 29 ka の噴火による Ubud 火砕流堆積物の体積は、約 84 km³ (Sutawidjaja, 2009), 約 20 ka の噴火による Gunungkawi 火砕流堆積物の体積は、約 19 km³ (Sutawidjaja et al., 2015) と推定されている. このカルデラでは、約 5.5 ka に Blingakang 火砕流が発生している (Sutawidjaja, 2009).

バツールカルデラ縁の形状は, Reubi and Nicholls (2004, 2005), Sutawidjaja et al. (2015)を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 18)。

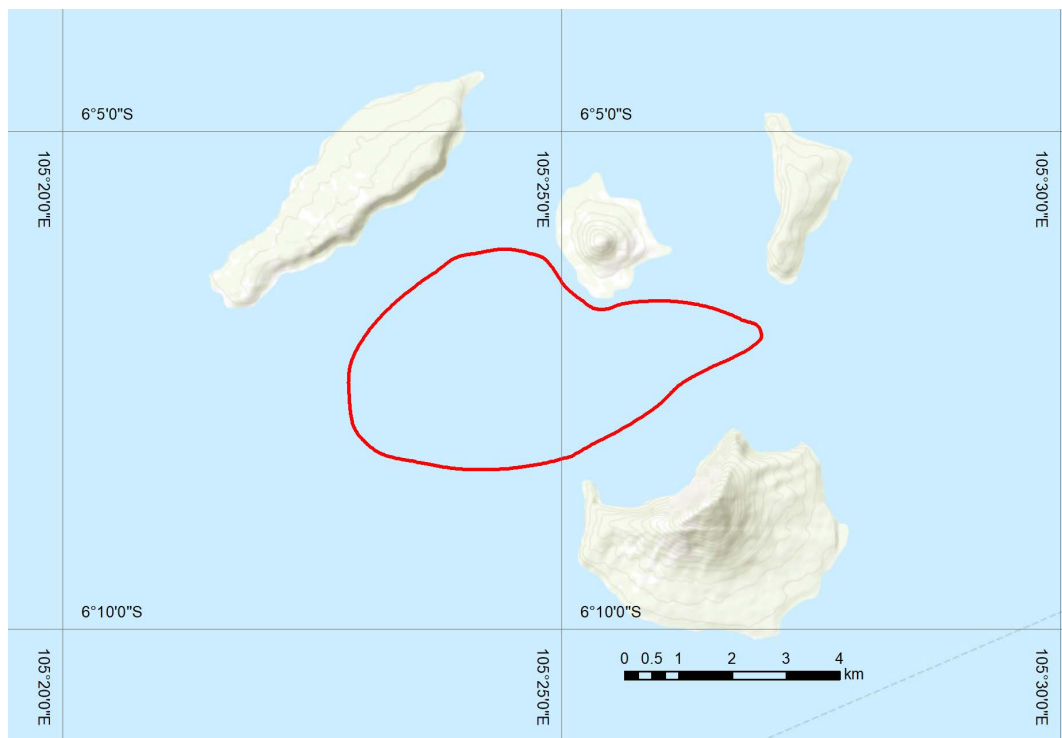


図 17. クラカタウカルデラ縁の形状
Fig. 17. Shape of the Krakatau caldera rim.

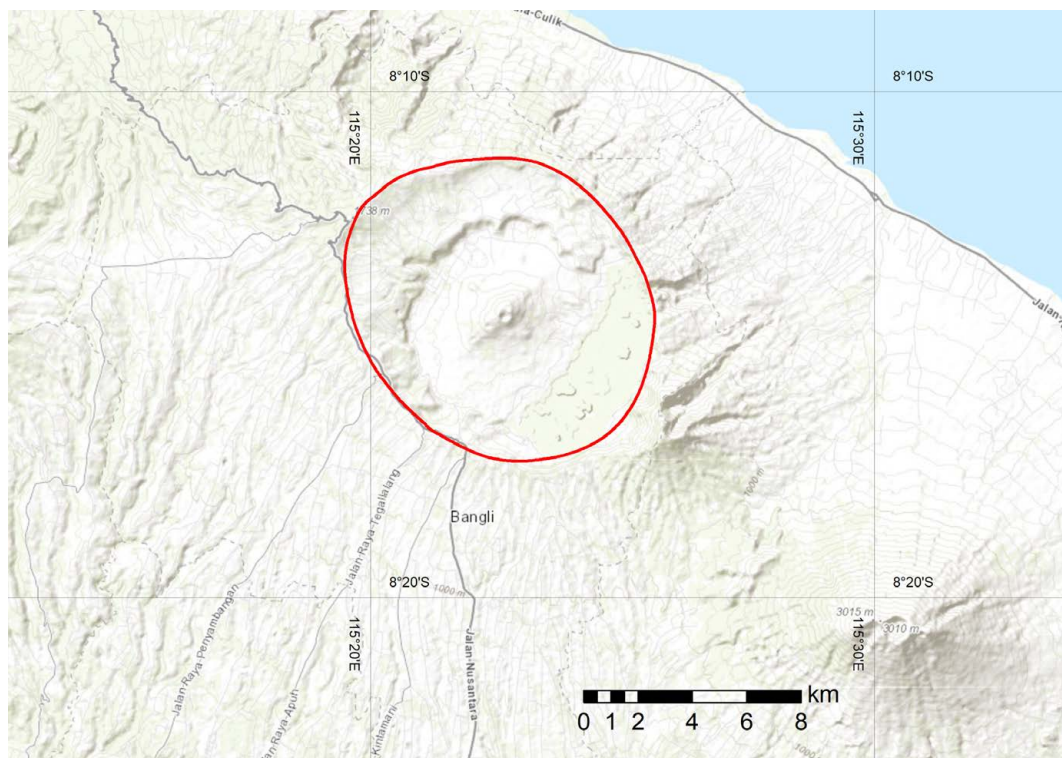


図 18. バツールカルデラ縁の形状
Fig. 18. Shape of the Batur caldera rim.

3-16. ピナツボ (VEI=6)

フィリピンルソン島のピナツボ火山では、西暦 1991 年 6 月 15 日の噴火で火砕流が発生し、山頂部に、3.0 km × 2.6 km のカルデラが形成された (Wolfe and Hoblitt, 1996; Catane et al. 2005). 火砕流堆積物は、火山体周辺に広く分布している (Scott et al., 1996; Torres et al., 1996). また、ピナツボ火山では、約 81 ka にもカルデラ形成を伴う噴火が発生している (Ku et al., 2008). 噴火に伴う降下テフラがルソン島中央部や周辺海域に広く分布している (Wolfe and Hoblitt, 1996; Paladio-Melosantos et al., 1996; Koyaguchi and Tokuno, 1993; Koyaguchi, 1996). この噴火の噴出量は、火砕流堆積物が $5.5 \pm 0.5 \text{ km}^3$ (Scott et al., 1996), 降下テフラが $3.4 \sim 4.8 \text{ km}^3$ (Paladio-Melosantos et al., 1996), $4.4 \sim 25 \text{ km}^3$ (Koyaguchi et al, 1996) と見積もられており、全体では $>10 \text{ km}^3$ であったと考えられる (VEI=6). ピナツボカルデラ縁の形状は、Wolfe and Hoblitt (1996), Scott et al. (1996), Torres et al. (1996) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 19).

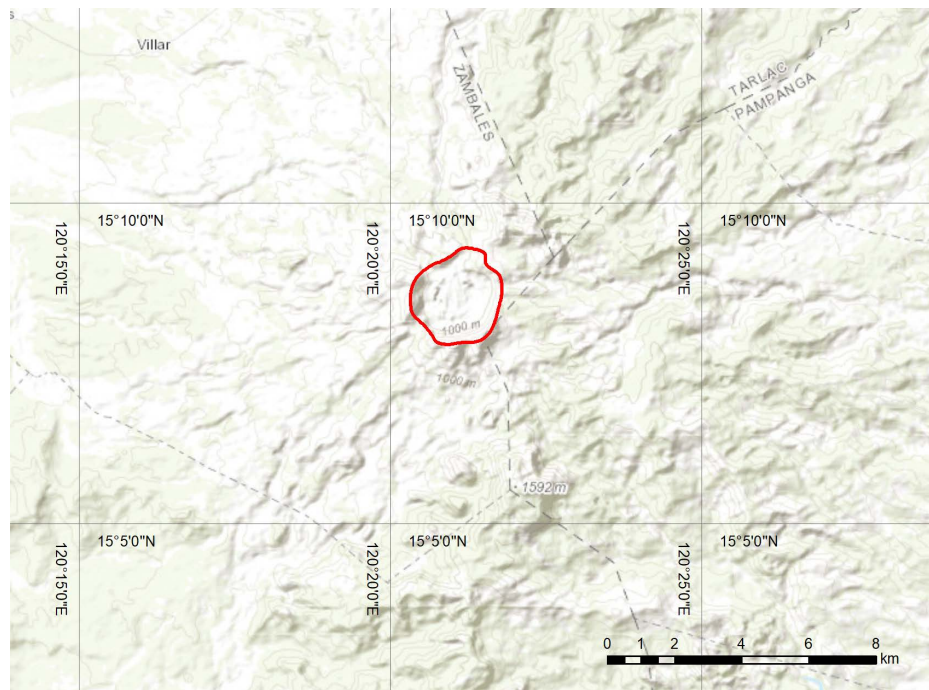


図 19. ピナツボカルデラ縁の形状
Fig. 19. Shape of the Pinatubo caldera rim.

3-17. ラバウル (VEI=6)

パプアニューギニアのニューブリテン島に位置するラバウル火山では、西暦 681～684 年頃の噴火でラバウル火砕流が発生し、15 km × 10 km のカルデラが形成された (McKee et al., 2015). 火砕流堆積物は、火山周辺に分布している (Heming, 1974; Nairn et al., 1995; McKee et al., 1985; Walker et al., 1981). 噴火に伴う降下テフラは、ニューブリテン島北部に広く分布している (Walker, 1981). この噴火の噴出量は、 11 km^3 以上 (Walker et al., 1981) と見積もられている (VEI=6). ラバウルカルデラ縁の形状は、Nairn et al. (1995); McKee et al. (1985); Heming (1974); Walker et al. (1981) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 20).

3-18. ロングアイランド (VEI=6)

パプアニューギニアのニューギニア島東方沖のロングアイランド火山では、西暦 1660 年頃 (1651-1671 年) に火砕流が発生し、山頂部に、13 km × 10 km のカルデラが形成された (Blong

et al., 2017). 噴火に伴う降下テフラ (Tabito テフラ) が西南西方向に広がり、ニューギニア島東部に分布している (Blong et al., 2017; Pain et al., 1981). この噴火の噴出量は、全体で 10 km^3 以上と見積もられている (VEI=6; Blong et al., 2017). ロングアイランドカルデラ縁の形状は、Pain et al. (1981) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 21).

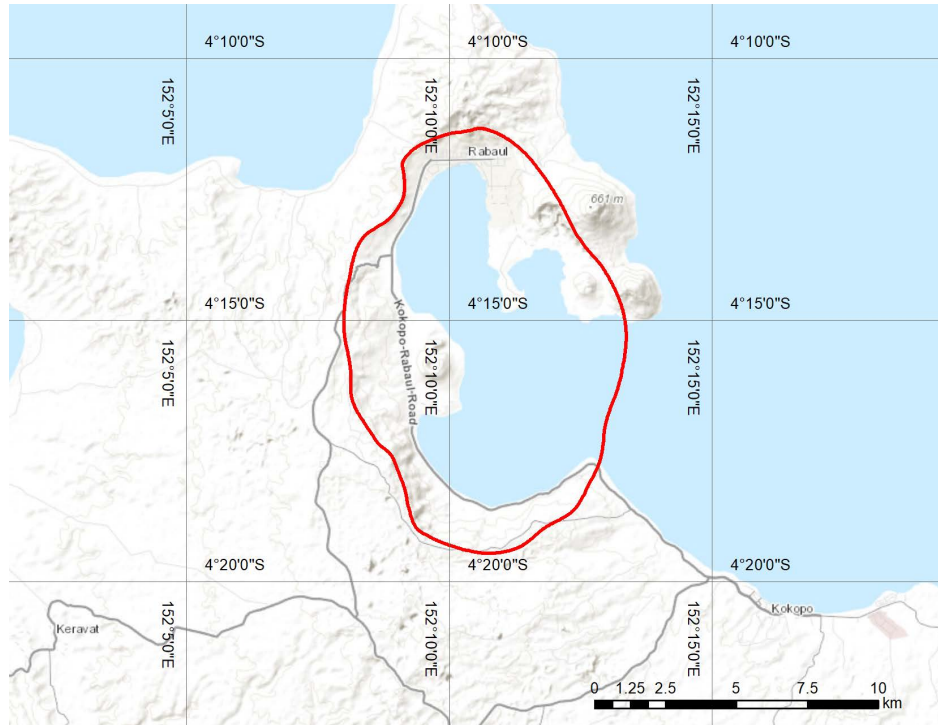


図 20. ラバウルカルデラ縁の形状
Fig. 20. Shape of the Pinatubo caldera rim.

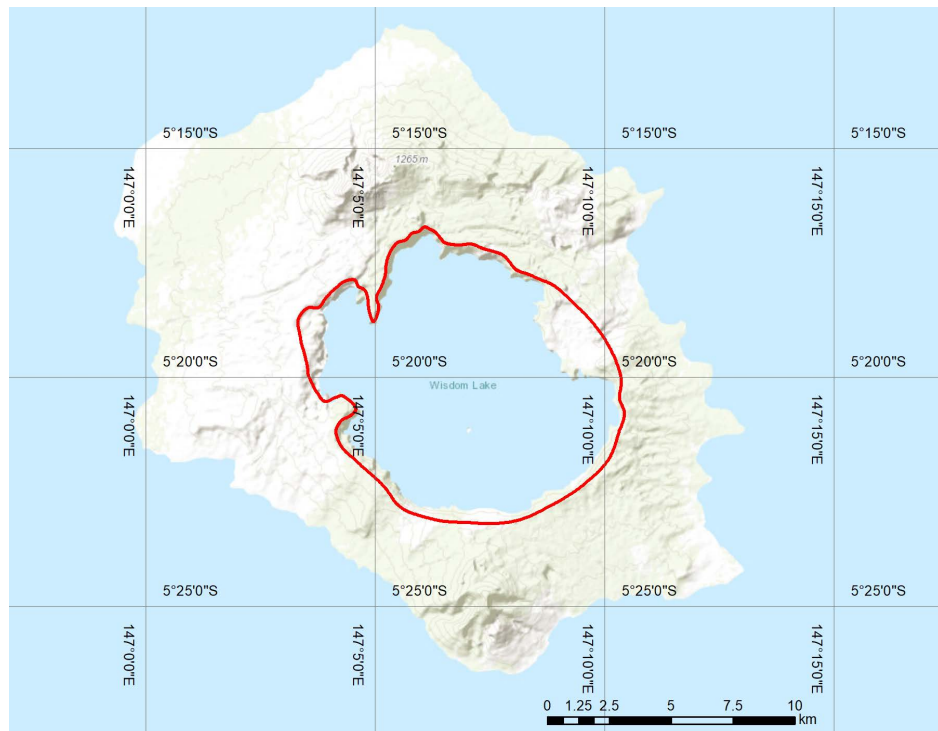


図 21. ロングアイランドカルデラ縁の形状
Fig. 21. Shape of the Long Island caldera rim.

3-19. ダカタウア (VEI=6)

パプアニューギニアのニューブリテン島の Willaumez 半島北端のダカタウア火山では、約 1.4 ka に火砕流が発生し、12 km × 9 km のカルデラが形成されている (McKee et al., 2011; Machida et al., 1996). 噴火に伴う降下テフラ (ダカタウアテフラ; Dk) が、ニューブリテン島中央部からビスマルク海域に分布している (Machida et al., 1996; McKee et al., 2011). この噴火の噴出量は、全体で約 10 km³ と見積もられている (VEI=6; Machida et al., 1996). 噴火年代は、1,383±28 yBP の ¹⁴C 年代値が得られており、暦年補正值で、西暦 635~670 年頃と考えられる (McKee et al., 2011). ダカタウアカルデラは、約 1,270~1,350 yBP に大規模な山体崩壊を起こしており、北東の海底域に約 75km³ の岩屑なだれ堆積物が分布している (Silver et al., 2009; Newhall and Dzurisin, 1988; Neall et al., 2008). ダカタウアカルデラ縁の形状は、McKee et al. (2011), Machida et al. (1996) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 22).

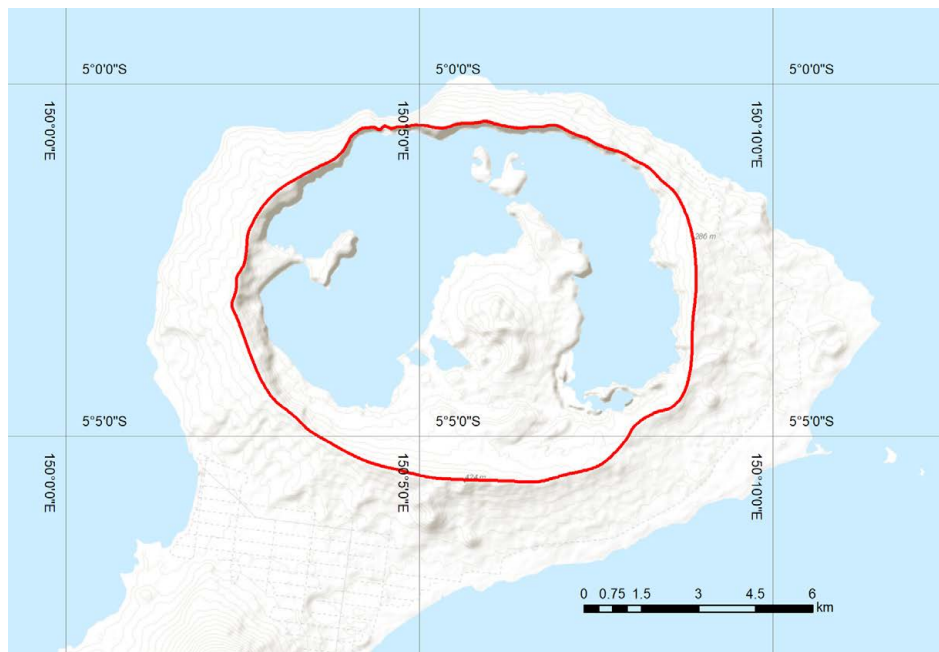


図 22. ダカタウアカルデラ縁の形状
Fig. 22. Shape of the Dakataua caldera rim.

3-20. ウィトリ (VEI=6)

パプアニューギニアニューブリテン島中央部のウィトリ (パゴ) 火山では、約 3.3 ka に火砕流が発生し、8.8 km × 6.2 km のカルデラが形成されている (Machida et al., 1996; McKee et al., 2011). 噴火に伴う降下テフラ (ウィトリキンベ 2 テフラ; W-K2) が火山周辺域や西部に広がり、ニューブリテン島中央部から西部に分布している (Machida et al., 1996; McKee et al., 2011). この噴火の噴出量は、全体で約 30 km³ と見積もられている (VEI=6; Machida et al., 1996). ウィトリカルデラでは、さらに、ウィトリキンベ 1 (W-K1; 約 5.6 ka; 10 km³), ウィトリキンベ 3 (W-K3; 約 1.8 ka; 6~10 km³), ウィトリキンベ 4 (W-K4; 約 1.3 ka; 6~10 km³), ウィトリガリロ (W-G; 約 1.2 ka; 20 km³), ウィトリホスキンス 1 (W-H3; 約 0.5 ka; 2 km³), ウィトリホスキンス 4 (W-H4; 約 0.4 ka; 2 km³), ウィトリホスキンス 5 (W-H5; 約 0.25 ka; 2 km³), ウィトリホスキンス 5 (W-H5; 約 0.15 ka; 2 km³) の噴火による降下テフラが確認されている (McKee et al., 2011; Machida et al., 1996). ウィトリカルデラ縁の形状は、McKee et al. (2011), Bleeker and Parfitt (1974) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 23). 南部のカルデラ縁は、不明瞭で

あるが、侵食により失われたのか、中央部のパゴ火山の噴出物で覆われているのか、もともと非対称に陥没したのかは不明である。

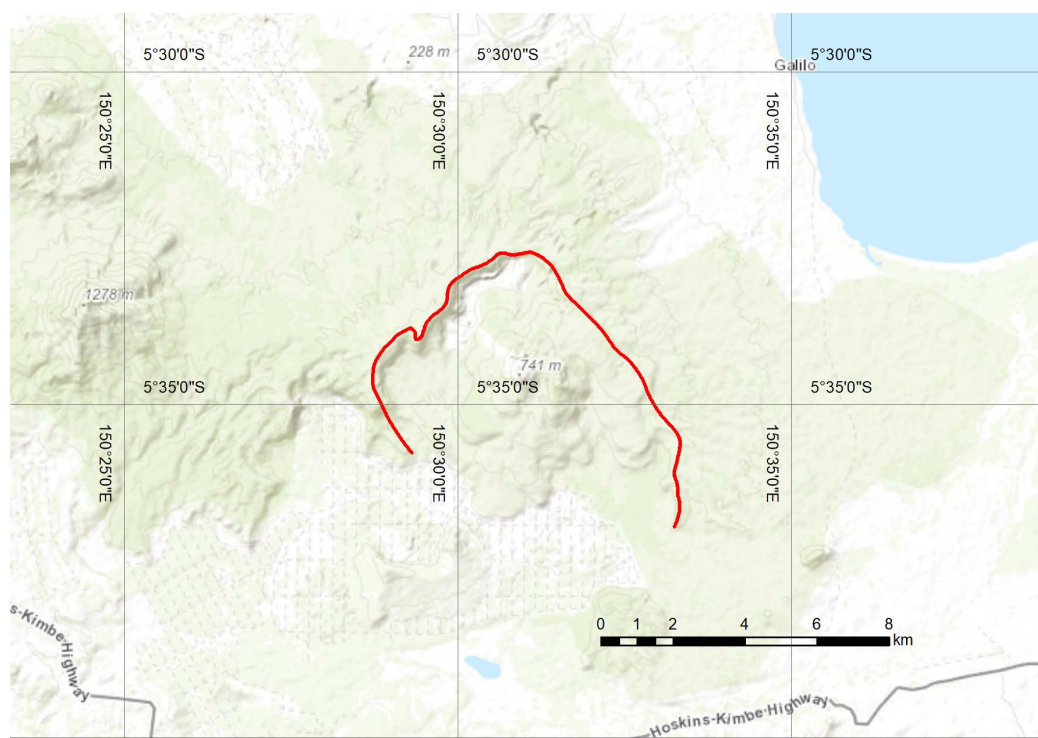


図 23. ウィトリカルデラ縁の形状
Fig. 23. Shape of the Witori caldera rim.

3-21. ビリーミッチェル (VEI=6)

パプアニューギニアブーゲンビル島のビリーミッチェル火山では、西暦 1580 年に火砕流が発生し、山頂部に $3.0 \text{ km} \times 2.1 \text{ km}$ のカルデラが形成された (Wadge et al., 2018). 噴火に伴う降下テフラがブーゲンビル島及び周辺海域に分布している. この噴火の噴出量は、全体で約 13.5 km^3 と見積もられている (VEI=6; Wadge et al., 2018). 噴火年代は、 $370 \pm 19 \text{ ka}$ の ^{14}C 年代値が得られている (Rogerson et al., 1989). この噴火による降下テフラは、グリーンランドでも見つかり、(White et al., 1997; Zielinski et al., 1994), 全地球的な気温低下を起こしたと考えられている (Briffa et al., 1998; Hantemirov et al., 2004). また、 $937 \pm 19 \text{ ka}$ にも、 7 km^3 の噴火が発生している. ビリーミッチェルカルデラ縁の形状は、Wadge et al. (2018) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 24).

3-22. ウルルン (VEI=6)

韓国東方沖のウルルン火山では、約 10 cal ka の噴火で火砕流が発生し、山頂部に $4.4 \text{ km} \times 4.0 \text{ km}$ のカルデラが形成された (町田ほか, 1984). 噴火に伴うアルカリ岩質の降下テフラ (ウルルン-隠岐テフラ; U-Oki) は、日本海や近畿、中部地方に分布している (町田・新井, 2003; 町田ほか, 1984; Machida and Arai, 1983; Lim et al., 2014; Machida, 1999; 新井ほか, 1981; Park et al. 2007). 本噴火の噴出量は、全体で約 10 km^3 以上と見積もられている (VEI=6; 町田・新井, 2003). ウルルン火山では、ウルルン-大和 (U-Ym), ウルルン-第 7 (U-7), ウルルン-第 6 (U-6), ウルルン-第 5 (U-5), ウルルン-第 4 (U-4), ウルルン-第 3 (U-3), ウルルン-第 1 (U-1) の噴火が発生している. 特に、ウルルン-大和は広域に分布している. 噴火年代は、水月湖の年縞同定、年縞計数等から、 $10,177\text{--}10,255 \text{ cal BP}$ (Smith et al., 2013) と考えられている. ウルルンカルデ

ラ縁の形状は, 町田ほか (1984), 町田・新井 (2003) を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 25). カルデラの北縁の一部は, 侵食により失われている.

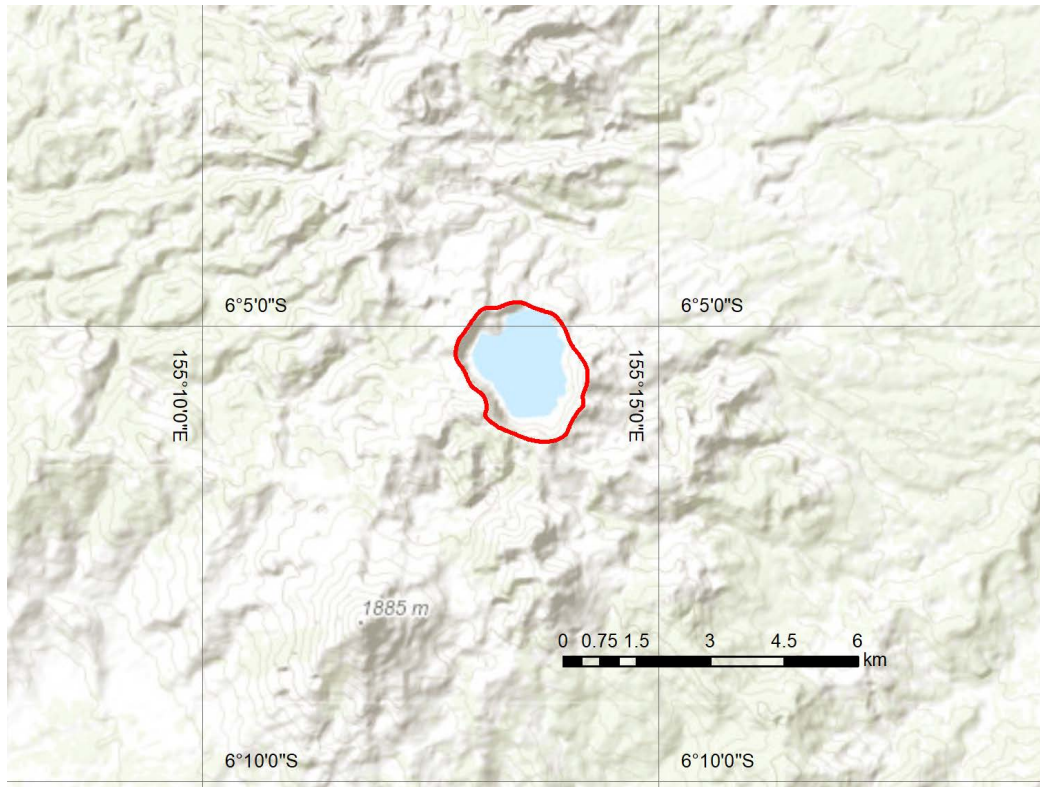


図 24. ビリーミッセルカルデラ縁の形状
Fig. 24. Shape of the Billey Michel caldera rim.

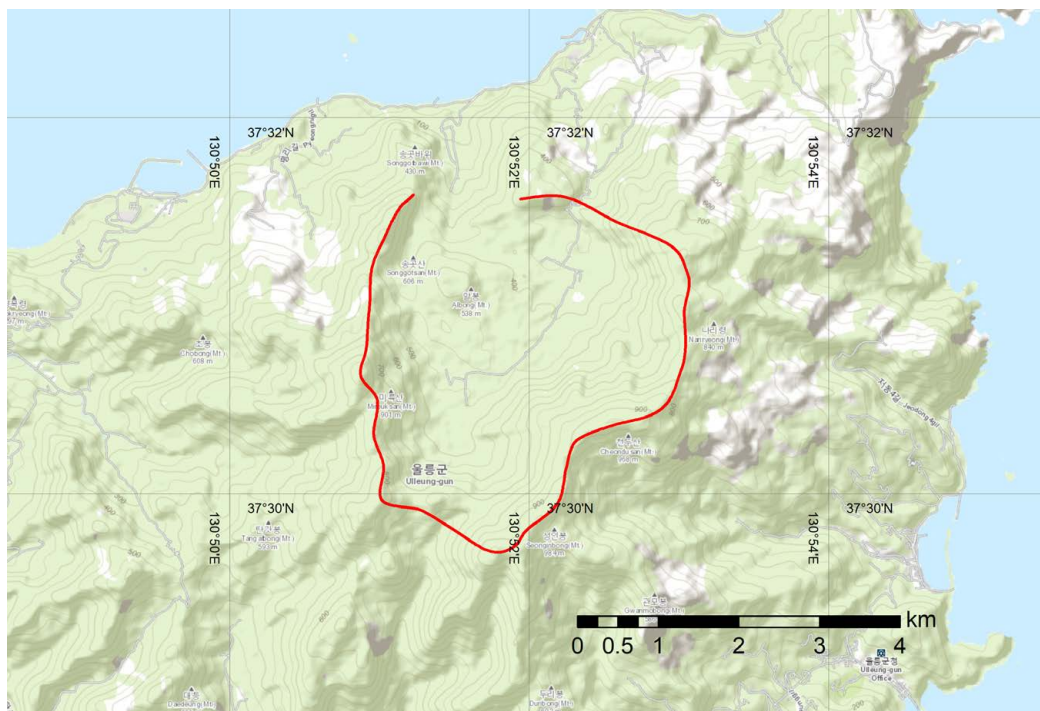


図 25. ウルンカルデラ縁の形状
Fig. 25. Shape of the Ulleung caldera rim.

3-23. 十和田 (VEI=6)

東北地方北部の十和田火山では、約 75 ka に奥瀬火砕流、約 32 cal ka に大不動火砕流、約 15.5 cal ka (Horiuchi et al., 2007) に十和田八戸火砕流が発生し、17 km × 15 km のカルデラが形成された (早川, 1983; Hayakawa, 1985; 町田・新井, 2003; 工藤, 2005). これらの火砕流堆積物は火山体周辺に広く分布している. 噴火に伴う降下テフラが東北北部地域に広く分布している (早川, 1983; Hayakawa, 1985; 町田・新井, 2003; 工藤, 2005). この十和田八戸噴火の噴出量は、全体で 56 km³ (Hayakawa, 1985) と見積もられている (VEI=6). 最近では、火砕流堆積物の分布・層厚のより詳細な復元により、火砕流堆積物だけで、27~56 km³ (DRE 換算で 13~27 km³; 宝田ほか, 2017) という推定値が得られている. 十和田カルデラ縁の形状は、村岡ほか (1991), 宝田・村岡 (2004), 工藤 (2005) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 26). 南東部のカルデラ縁は、15.5 cal ka の十和田-八戸噴火で形成された火口湖の決壊により発生した大規模なラハールイベントで侵食され、失われたと考えられている (Kataoka, 2011).

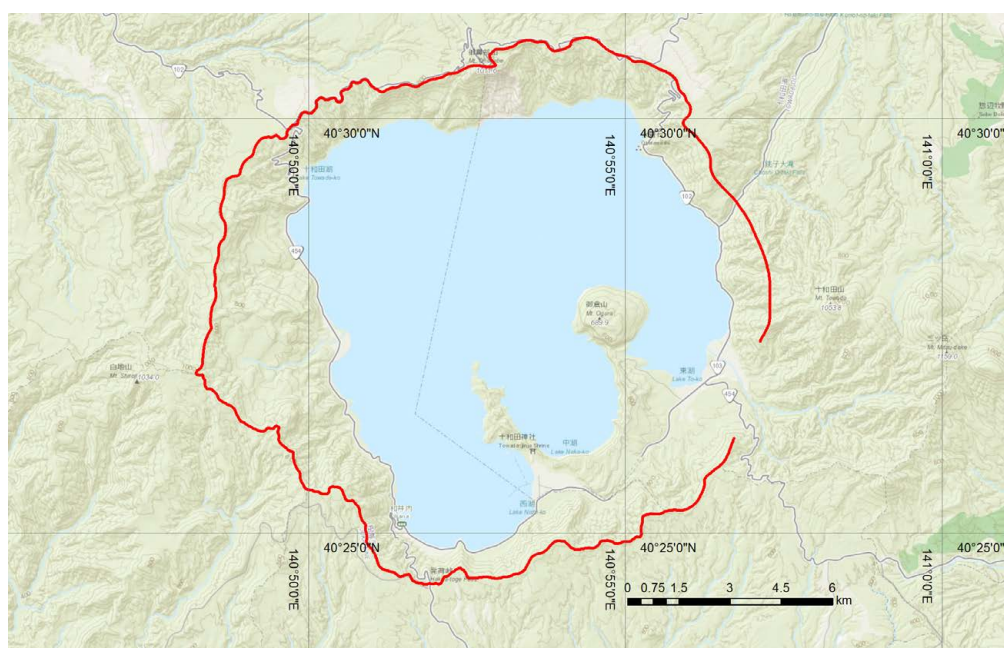


図 26. 十和田カルデラ縁の形状

Fig. 26. Shape of the Towada caldera rim.

3-24. 濁川 (VEI=6)

北海道南西部の濁川火山では、約 14.6 cal ka に濁川火砕流が発生し、6 km × 4.5 km のカルデラが形成された (黒墨・土井, 2003; 柳井ほか, 1992; 安藤, 1983). 火砕流堆積物は火山体周辺に分布しており、下位には、火砕サージ堆積物や降下堆積物がみられる (柳井ほか, 1992; 名越, 1994). 噴火に伴う降下テフラが東方向に広く分布している (黒墨・土井, 2003; 青木・大串, 2006; 町田・新井, 2003). この噴火の噴出量は、柳井ほか (1992) は、降下テフラの体積が 8.7 km³, 陸上部分の火砕流堆積物が 2.2km³, 合計約 10.9 km³ と見積もっている. 海底に流入した火砕流堆積物の噴出量は不明であるが、総噴出量は、10~15 km³ 程度であると考えられる (VEI=6). 多数のボーリング調査などから、濁川カルデラは、地下では、地表に向かって開く多角形のじょうご型を示し、地表では直径 3 km の五角形で、海拔-1,000m 以深では、直径 0.7 km で垂直のカルデラ壁を持つことが明らかになっている (黒墨・土井, 2003). また、基盤岩の約 70 vol% 以上が本質物質と共にカルデラ外に放出され、30 vol% 以下がカルデラ内にフォールバックし、カルデラから噴出した本質物質量は約 4 km³ (DRE) 以上と推定されている (黒墨・土井, 2003). 噴火年代は、

^{14}C 年代値として, $12,090 \pm 190$ yBP と $12,270 \pm 190$ yBP の値が得られている (柳井ほか, 1992). 下北半島沖の海底コア中の濁川テフラ層の上下の浮遊性有孔虫の ^{14}C 年代値から, 14.6 cal ka の値が報告されている (青木・大串, 2006). 濁川カルデラ縁の形状は, 黒墨・土井 (2003), 安藤 (1983) を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 27). カルデラ縁の北東部と南部は, 侵食により失われている.

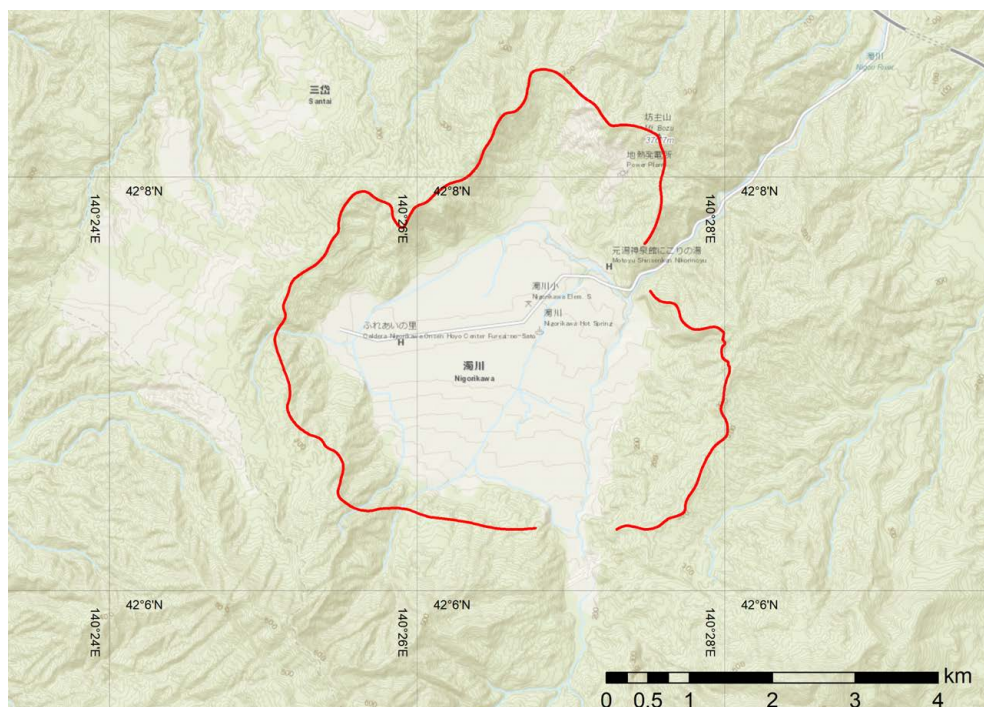


図 27. 濁川カルデラ縁の形状
Fig. 27. Shape of the Nigorikawa caldera rim.

3-25. 摩周 (VEI=6)

北海道東部の摩周火山では, 約 7.5 cal ka に, 摩周降下火山灰 j (Ma-j; 0.7 km^3), 摩周降下軽石 i (Ma-i; 4.0 km^3), 摩周降下軽石 h (Ma-h; 1.0 km^3), 摩周降下軽石 g (Ma-g; 3.2 km^3), 摩周火砕流 (Ma-f; 9.7 km^3) を噴出し, 山頂部に摩周カルデラ ($10 \text{ km} \times 7.5 \text{ km}$) が形成された (岸本ほか, 2009; 勝井・佐藤, 1963; Katsui et al., 1975). また, カルデラ形成前には, 約 14 cal ka に火砕流を伴う摩周火砕噴火 l (Ma-l; 6.6 km^3), 約 12 cal ka には摩周降下火山灰 k (Ma-k) が発生している (岸本ほか, 2009; 勝井・佐藤, 1963). 摩周火山では, 屈斜路火砕流 I (約 40 cal ka) のあと, Ma-l の噴火までに, 上部中春別テフラ r (Nu-r; 14 km^3), 上部中春別テフラ p (Nu-p; 7.4 km^3), 上部中春別テフラ n (Nu-n; 6.4 km^3), 茶内テフラ a (Ch-a; 5.4 km^3) など合計 40 回以上の噴火があった (長谷川ほか, 2009). 摩周カルデラ形成後は, 約 5.5 cal ka に摩周火砕堆積物 e (Ma-e; 0.27 km^3), 摩周降下火山灰 e' (Ma-e'; 0.01 km^3), 約 4.0 cal ka に摩周火砕堆積物 d (Ma-d; 0.32 km^3), 約 $1.6 \sim 1.8$ cal ka に摩周降下火山灰 c (Ma-c; 0.50 km^3), 約 0.9 cal ka に摩周降下火砕堆積物 b (Ma-b; 4.6 km^3) の中央火口丘形成期の噴火があった (岸本ほか, 2009). 摩周カルデラ縁の形状は, Katsui et al. (1975) を参照し, ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した (図 28).

3-26. 萌消 (VEI=6)

北方四島択捉島の萌消 (L'vinaya Past) 火山では, 約 11 cal ka に火砕流が発生し, $12 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ のカルデラが形成されている (図 26; 中川ほか, 2013; Smirnov et al., 2017; Gorshkov,

1970; Bazanova et al., 2016). この噴火に伴う降下テフラが北東方向に広がり、択捉島に分布している (中川ほか, 2013). この噴火の噴出量は、全体で $70\sim 80\text{ km}^3$ と見積もられている (VEI=6;

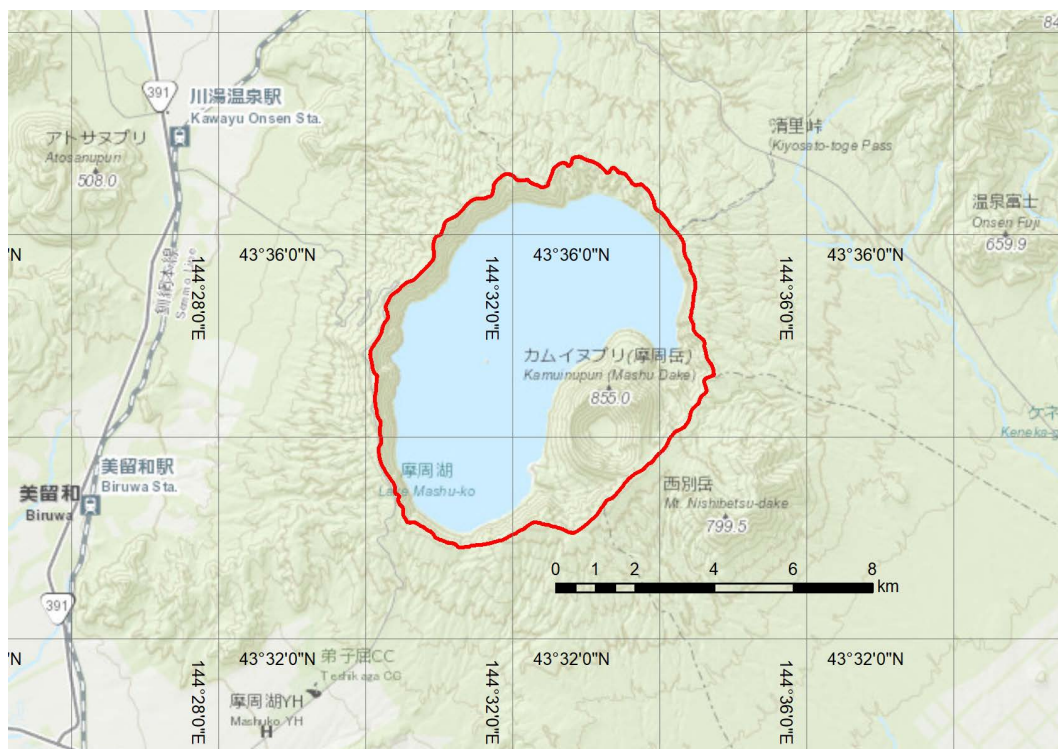


図 28. 摩周カルデラ縁の形状
Fig. 28. Shape of the Mashu caldera rim.

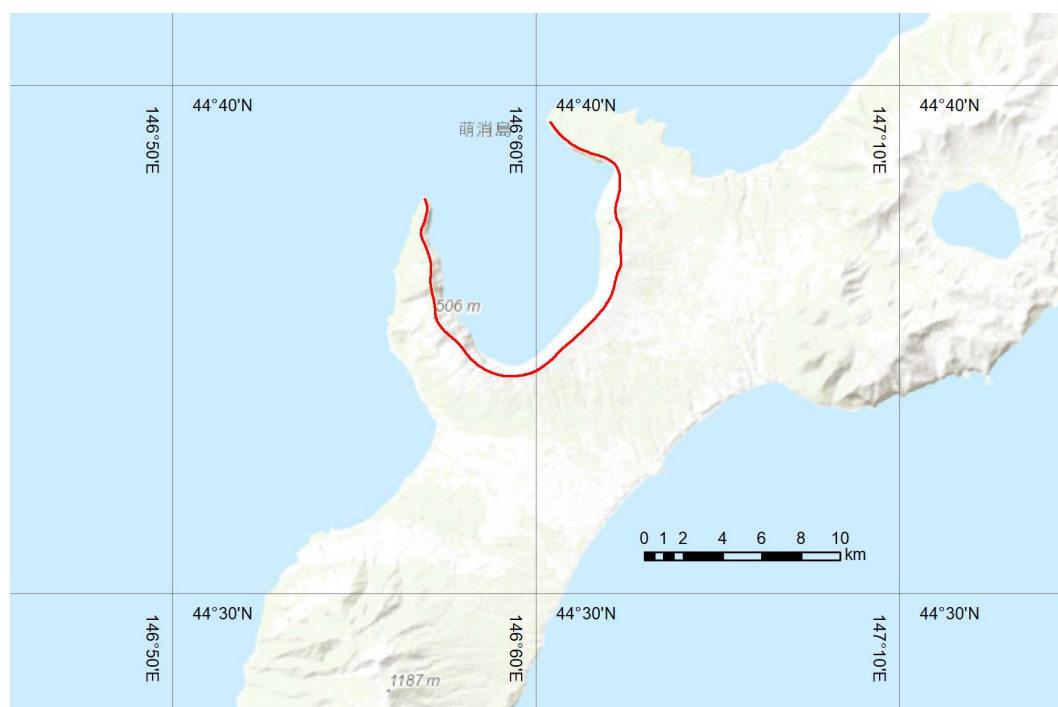


図 29. 萌消カルデラ縁の形状
Fig. 29. Shape of the Moekeshi caldera rim.

Smirnov et al., 2017). 噴火年代は、直下の土壌の ^{14}C 年代測定から、10,210 cal BP, 11,970 cal BP の年代値が得られており（中川ほか, 2013）、約 11 cal ka と考えられる。一方、Smirnov et al. (2017) は、12,300 年前と 13,000 年前に少なくとも 2 回の噴火があったとしている。萌消カルデラ縁の形状は、Smirnov et al. (2017), Gorshkov (1970) を参照し、ArcGIS 上のベースマップ地形図上で編集し作成した（図 29）。カルデラ縁の北西部は海中に没している。噴火時にマグマ水蒸気噴火等があったのか、一部マール状の地形になっているのか、詳細は不明である。

4. GIS データ

本研究資料集には、火山ごとのカルデラの形状・分布の GIS データが登録されている。GIS データには、別添のエクセル表に示した各火山の詳細情報（カルデラ名、イベント名、噴火年代、VEI, GIS 表示用の情報、地域、カルデラに関する文献情報、年代の文献情報、噴出量の文献情報）が、英語と日本語で埋め込まれている。カルデラに関する文献情報では、カルデラの形状をトレースする際に参考にした文献の他、そのカルデラ火山の地質や噴火履歴、研究内容などの文献が示されている。GIS ソフト上で各ラインの情報表示を行うことで、各火砕流堆積物の詳細情報を表示することができる。日本語の文字コードは UTF-8 を使用している。座標系は WGS1984 (EPSG 4326) を与えている。拡張子ごとの各ファイルの内容を表 2 に示した。GIS データとエクセル表中の R, G, B は、カルデラの RGB 値（赤色）を示している。

表 2. 拡張子とファイル内容
Table 2. Explanation of file extensions

| 拡張子 | 説明 |
|------|------------------------------|
| .shp | カルデラ分布図の本体となるファイル |
| .shx | カルデラ分布図に関するインデックス情報を格納するファイル |
| .prj | 座標系情報を格納するファイル |
| .qpj | |
| .dbf | カルデラの属性情報を格納するテーブルファイル |
| .cpg | 文字コードの識別コードページ指定ファイル |

5. 引用・免責事項

本 GIS データを出版物や Web サイト等で利用される場合は、適切な引用をお願いします。引用例やライセンス、免責事項については以下を参照してください。

引用例：宝田晋治（2019）東・東南アジア地域の大規模カルデラの形状 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 5/7-。産総研地質調査総合センター研究資料集. no. 685. 産総研地質調査総合センター, p. 1-33.

ライセンス：政府標準利用規約（第 2.0 版）(<https://www.gsj.jp/license/>) が適用されます。

免責：産業技術総合研究所地質調査総合センターは、本データの利用によって生じたいかなる損害にも責任を負いかねます。あくまでも、利用者の自己責任においてご利用下さい。

連絡先：産業技術総合研究所活断層・火山研究部門 宝田晋治 (s-takarada@aist.go.jp)

謝辞

東・東南アジア地域のカルデラの形状と分布のデータは、アジア太平洋地域地震火山噴火リスクマネジメント (G-EVER) プロジェクト活動の一環で作成されたものです。本原稿は産総研活断層・火山研究部門の川邊禎久氏の査読により大きく改善されました。記して感謝申し上げます。

文献

- Acharyya, S.K. and Basu, P.K. (1993) Toba ash on the Indian subcontinent and its implications for correlation of late Pleistocene alluvium. *Quaternary Res.*, 40, 10-19.
- Aldiss, D.T., Whandoyo, R., Ghazali, S.A. and Kusyono (1983) Geologic Map of the Sidikalang and (part of) Sinabang Quadrangles, Sumatra. 1:250,000, 0518-0618, Integrated Geological Survey of Northern Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia. 1 sheet.
- 安藤重幸 (1983) ボーリング結果からみた濁川カルデラの構造. 月刊地球, 5, 116-121.
- Aoki, K. (2008) Revised age and distribution of ca. 87ka Aso-4 tephra based on new evidence from the northwest Pacific Ocean. *Quaternary International*. 178, 100-118.
- 青木かおり・大串健一 (2006) 下北半島沖海底コア MD01-2409 中に介在する濁川テフラ. 第四紀研究, 45, 257-260.
- Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira Caldera, Southern Kyushu, ~22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, 89, B10, 8485-8501.
- 荒牧重雄・宇井忠英 (1965) 阿多火砕流と阿多カルデラ. 地質雑, 72, 337-349.
- 新井房夫・大場忠道・北里 洋・堀部純男・町田 洋 (1981) 後期第四紀における日本海の古環境-テフクロロジー, 有孔虫群集解析, 酸素同位体比法による-. 第四紀研究, 20, 209-230.
- Aramaki, S. and Ui, T. (1966) The Aira and Ata pyroclastic flows and related caldera and depressions in southern Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, 29, 29-47.
- Aspden, J.A., Kartawa, W., Aldiss, D.T., Djunuddin, A., Diatma, D., Clarke, M.C.G., Whandoyo, R. and Harahap, H. (1982) Geologic Map of the Padangsidempuan and Sibbolga Quadrangles, Sumatra. 1:250,000, 0167-0717, Integrated Geological Survey of Northern Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia. 1 sheet.
- Bartel, B.A., Hamburger, M.W., Meertens, C.M., Lowry A.R. and Corpuz, E. (2003) Dynamics of active magmatic and hydrothermal systems at Taal Volcano, Philippines, from continuous GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 108, 2475, doi:10.1029/2002JB002194
- Bleeker, P. and Parfitt, R.L. (1974) Volcanic ash and its clay mineralogy at Cape Hoskins, New Britain, Papua New Guinea. *Geoderma*, 11, 123-135.
- Blong, R., Wagner, T. and Golson, J. (2017) Volcanic Ash at Kuk. In Golson J, ed. *Ten Thousand Years of Cultivation at Kuk Swamp in the Highlands of Papua New Guinea*. ANU press. 117-131.
- Briffa, K.R., Jones, P.D., Schweingruber, F.H. and Osborn, T.J. (1988) Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 393, 450-455.
- Cameron, N.R., Aspden, J.A., Miswar, and Syah, H.H. (1981) Geologic Map of the Tebingtinggi Quadrangles, Sumatra. 1:250,000, 0719, Integrated Geological Survey

- of Northern Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia. 1 sheet.
- Cameron, N.R., Aspden, J.A., Bridge, D.McC., Djunuddin, A., Ghazali, S.A., Hrahap, H., Hariwidjaja, Johari, S., Kartawa, W., Keats, W., Ngabito, H., Rock, N.M.S. and Whandoyo, R. (1982) Geologic Map of the Medan Quadrangles, Sumatra. 1:250,000, 0619, Integrated Geological Survey of Northern Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia. 1 sheet.
- Carey, S., Sigurdsson, H., Mandeville, C. and Bronto, S. (1996) Pyroclastic flows and surges over water: an example from the 1883 Krakatau eruption. *Bull. Volcanol.*, 57, 493-511.
- Catane, S.G., Taniguchi, H., Goto, A., Givero, A.P. and Mandanas, A.A. (2005) *Explosive Volcanism in the Philippines*. CNEAS Monograph Series 18, 146p. Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University.
- Chesner, C.A. and Rose, W.I. (1991) Stratigraphy of the Toba Tuffs and the evolution of the Toba Caldera complex, Sumatra, Indonesia. *Bull. Volcanol.*, 53, 343-356.
- Clark, M.C.G., Ghazali, S.A., Harahap, H., Kusyono and Stephenson, B. (1982) Geologic Map of the Pematangsiantar Quadrangles, Sumatra. 1:250,000, 0718, Integrated Geological Survey of Northern Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia. 1 sheet.
- Francis, P.W. (1985) The origin of the 1883 Krakatau Tsunamis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 25, 349-363.
- 福沢仁之 (1995) 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物. 第四紀研究, 34, 135-149.
- Galgana, G.A., Newman, A.V., Hamburger, M.W. and Solidum, R.U. (2014) Geodetic observations and modeling of time-varying deformation at Taal Volcano, Philippines. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 271, 11-23.
- Gennaretti, F., Arseneault, D., Nicault, A., Perreault, L. and Bégin, Y. (2014) Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America. PNAS, doi: 10.1073/pnas.1324220111
- 下司信夫 (2009) 屋久島を覆った約 7300 年前の幸屋火砕流堆積物の流動・堆積機構. 地学雑誌, 118, 1254-1260.
- Goto, Y. and Danhara, T. Subsurface Structure of Toya Caldera, Hokkaido, Japan, as Inferred from CSAMT Resistivity Survey. *J. Geography*, 127, 139-156.
- Goto, Y., Suzuki, K., Shinya, T., Yamauchi, A., Miyoshi, M., Danhara, T. and Tomiya, A. (2018) Stratigraphy and lithofacies of the Toya ignimbrite in southwestern Hokkaido, Japan: insights into the caldera-forming eruption at Toya Caldera. *Jour. Geography*, 127, 191-227.
- Guillet, S., Corona, C., Stoffel, M., Khodri, M., Lavigne, F., Ortega, P., Eckert, N., Sielenou, P.D., Daux, V., Churakova O.V., Davi, N., Edouard, J-L., Zhang, Y., Luckman, B.H., Myglan, V.S., Guiot, J., Beniston, M., Masson-Delmotte, V. and Oppenheimer, C. (2017) Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO2875.
- Hantemirov, R.M., Gorlanova, L.A. and Shiyatov, S.G. (2004) Extreme temperature events in summer in northwest Siberia since AD 742 inferred from tree rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, 155-164.
- 長谷川健・中川光弘 (2007) 北海道東部, 阿寒カルデラ周辺の前—中期更新世火砕堆積物の層序. 地質雑, 113, 53-72.
- 長谷川健・石井英一・中川光弘 (2008) 北海道東部阿寒火砕堆積物中に挟在する複数の広域火山灰層と北海道中央部に分布する大規模火砕流堆積物との対比. 地質雑, 114, 366-381.
- 長谷川健・岸本博志・中川光弘・伊藤順一・山元孝広 (2009) 北海道東部, 根釧原野および斜里平野における約 3 万 5 千~1 万 2 千年前のテフラ層序と後屈斜路カルデラ火山の噴火史. 地質雑, 115, 369-390.
- 長谷川健・中川光弘・伊藤順一・山元孝広 (2011) 北海道東部, 釧路地域に分布する第四系の年代: 高分解能テフラ層序に基づく対比と編年. 地質雑, 117, 686-699.
- Hasegawa, T., Nakagawa, M. and Kishimoto, H. (2012) The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 107, 39-43.

- Hasegawa, T., Matsumoto, A. and Nakagawa, M. (2016) Evolution of the 120 ka caldera-forming eruption of Kutcharo volcano, eastern Hokkaido, Japan: Geologic and petrologic evidence for multiple vent systems and rapid generation of pyroclastic flow. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 321, 58-72.
- 早川由紀夫 (1983) 火山豆石として降下堆積した十和田火山八戸火山灰. 火山, 28, 25-40.
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada Volcano. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 60, 507-592.
- 早坂洋三 (1982) 地溝性陥没現象としての鹿児島湾. 九州の基盤と陥没構造報告. 1, 76-78.
- Heming, R.F. (1974) Geology and Petrology of Rabaul Caldera, Papua New Guinea. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 85, 1253-1264.
- Hide, H., Brotopuspito, K.S., Hadmoko, D.S., Lavigne, F., Airaksinen, K.B., Mutaqin, B.W., Hananto, N.D., Handayani, L., Sudrajat, Y. and Suryanto, W. (2017) The isopach mapping of volcanic deposits of Mount Smalas 1257 AD based on the values of resistivity and physical properties. *Geosciences*, 7, 67; doi:10.3390/geosciences7030067
- Horiuchi, K., Sonoda, S., Matsuzaki, H. and Ohyama, M. (2007) Radiocarbon analysis of tree rings from a 15.5-cal kyr BP pyroclastically buried forest: a pilot study. *Radiocarbon*, 49, 1123-1132.
- Horn, S. and Schminke, H.-U. (2000) Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bull. Volcanol.*, 61, 537-555.
- 星住英夫・尾崎正紀・宮崎一博・松浦浩久・利光誠一・宇都浩三・内海 茂・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (2004) 20 万分の 1 地質図幅「熊本」. 産総研地質調査総合センター.
- 星住英夫・斎藤 眞・水野清秀・宮崎一博・利光誠一・松本哲一・大野哲二・宮川歩夢 (2015) 20 万分の 1 地質図幅「大分 (第 2 版)」. 産総研地質調査総合センター.
- 石井英一 (2009) 北海道中軸部における後期更新世～前期更新世の大規模珪長質噴火に関する研究. 北海道大学大学院理学研究院博士論文, 111p.
- 石川俊夫・勝井義雄・大場与志男・佐藤博之 (1969) 北海道のカルデラについての 2・3 の問題. 火山, 14, 97-108.
- 石田正夫・曾屋龍典・須田芳朗 (1980) 20 万分の 1 地質図幅「札幌」. 産総研地質調査総合センター.
- 石田正夫・久保和也・広島俊男 (1983) 20 万分の 1 地質図幅「室蘭」. 産総研地質調査総合センター.
- 石田正夫・三村弘二・広島俊男 (1991) 20 万分の 1 地質図幅「岩内 (第 2 版)」. 産総研地質調査総合センター.
- Kataoka, K. (2011) Geomorphic and sedimentary evidence of a gigantic outburst flood from Towada caldera after the 15 ka Towada-Hachinohe ignimbrite eruption, northeast Japan. *Geomorphology*, 125, 11-26.
- 勝井義雄・佐藤博之 (1963) 藻琴山地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 42p.
- Katsui, Y., Ando, S. and Inaba, K. (1975) Formation and Magmatic evolution of Mashu Volcano, East Hokkaido, Japan. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, IV, 16, 533-552.
- 河合百合・三宅康幸 (1999) 始良 Tn テフラの粒度・鉱物組成—広域テフラの地域的変異の一例—. 地質雑, 105, 597-608.
- 川辺禎久・阪口圭一・斎藤 眞・駒澤正夫・山崎俊嗣 (2004) 20 万分の 1 地質図幅「開聞岳及び黒島の一部」. 産総研地質調査総合センター.
- 岸本博志・長谷川健・中川光弘・和田恵治 (2009) 最近約 1 万 4 千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式. 火山, 54, 15-36.
- Knight, M.D., Walker, G.P.L., Ellwood, B.B. and Diehl, J.F. (1986) Stratigraphy, Paleomagnetism, and magnetic fabric of the Toba Tuffs: constraints on the sources and eruptive styles. *Jour. Geophys. Res.*, 91, B10, 10355-10382.
- Koyaguchi, T. (1996) Volume estimation of tephra-fall deposits from the June 15, 1991, eruption of Mount Pinatubo by theoretical and geological methods. In: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (eds.) Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press, 583-600.
- 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 32ka 以前の噴火について. 火山, 40, 191-209,

- Koyaguchi, T. and Tokuno, M. (1993) Origin of the giant eruption cloud of Pinatubo, June 15, 1991. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 55, 85-96.
- Ku, Y-P, Chen, C-H, Newhall, C.G., Song, S-R., Yang, T.F., Iizuka, Y. and McGeehin, J. (2008) Determining an age for the Inararo Tuff eruption of Mt. Pinatubo, based on correlation with a distal ash layer in core MD97-2142, South China Sea. *Quaternary International*, 178, 138-145.
- 工藤 崇 (2005) 十和田地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 79p.
- 黒墨秀行・土井宣夫 (2003) 濁川カルデラの内部構造. 火山, 48, 259-274.
- Lavigne, F., Degeai, J-P., Komorowski, J-C., Guillet, S., Robert, V., Lahitte, P., Oppenheimer, C., Stoffel, M., Vidal, C.M., Surono, Pratomo, I., Wassmer, P., Hajdas, I., Hadmoko, D.S. and Belizal, E. (2013) Source of the great A.D. 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia. *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1307520110.
- Lim, C., Kim, S. and Lee, C. (2014) Geochemical fingerprint of the primary magma composition in the marine tephra originated from the Baegdusan and Ulleung volcanoes. *J. Asian Earth Sciences*, 95, 266-273.
- Lowry, A.R., Hamburger, M.W., Meertens, C.M. and Ramos, E.G. (2001) GPS monitoring of crustal deformation at Taal Volcano, Philippines. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 105, 35-47.
- Machida, H. (1999) Quaternary widespread tephra catalog in and around Japan: recent progress. *The Quaternary Res.*, 38, 194-201.
- 町田 洋・新井房夫 (1978) 南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ -アカホヤ火山灰. 第四紀研究, 17, 143-163.
- 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-. 東京大学出版会. 336p.
- 町田 洋・新井房夫・李 柄高・森脇 広・古田 俊夫 (1984) 韓国鬱陵島のテフラ. 地学雑誌, 93, 1-14.
- 町田 洋・新井房夫・百瀬 貢 (1985) 阿蘇 4 火山灰 -分布の広域性と後期更新世指標層としての意義-. 火山, 30, 49-70.
- 町田 洋・新井房夫・宮内崇裕・奥村晃史 (1987) 北日本を広くおおむ洞爺火山灰. 第四紀研究, 26, 129-145.
- Machida, H., Moriwaki, H. and Zhao, D. (1990) The recent major eruption of Changbai volcano and its environment effects. *Geographic reports of Tokyo Metropolitan University*, 25, 1-20.
- Machida, H., Blong, R.J., Specht, J., Moriwaki, H., Torrence, R., Hayakawa, Y., Talai, B., Lolok, D. and Pain, C.F. (1996) Holocene explosive eruptions of Witori and Dakataua Caldera volcanoes in west New Britain, Papua New Guinea. *Quaternary International*, 34-36, 65-78.
- Maeno, F. and Taniguchi, H. (2007) Spatiotemporal evolution of a marine caldera-forming eruption, generating a low-aspect ratio pyroclastic flow, 7.3 ka, Kikai caldera, Japan: Implication from near-vent eruptive deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 212-238.
- Maeno, F. and Taniguchi, H. (2009) Sedimentation and welding processes of dilute pyroclastic density currents and fallout during a large-scale eruption, Kikai caldera, Japan. *Sedimentary Geology*, 220, 227-242.
- Mark, D.F., Renne, P.R., Dymock, R.C., Smith, C., Simon, J.I., Morgan, L.E., Staff, R.A., Ellis, B.S. and Pearce, N.J.G. (2017) High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Pleistocene tuffs and temporal anchoring of the Matuyama-Brunhes boundary. *Quaternary Geochronology*, 39, 1-23.
- 松井 愈・松澤逸巳 (1985) 十勝平野の構造発達史-帯広盆地と幕別台地の分化. 第四紀研究, 23, 233-244.
- Matsumoto, T. (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, 19, 59p.
- 松本哲一 (1996) 若い火山岩の K-Ar 年代測定-初生比補正とその応用例-. 地質ニュース, 501, 12-17.
- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定-火山層序との整合性と火砕流試料への適応-. 日本火山学会講演予稿集, 73.
- 松本哲一・宇井忠英 (1997) 阿多火砕流堆積物の K-Ar 年代. 火山, 42, 223-225.

- Matsu'ura, T., Furusawa, A., Shimogama, K., Goto, N. and Komatsubara, J. (2014) Late Quaternary tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy of deep-sea sequences (Chikyu C9001C cores) as tools for marine terrace chronology in NE Japan. *Quaternary Geochronology*, 23, 63-79.
- McKee, C.O., Johnson, R.W., Lowenstein, P.L., Riley S.J., Blong, R.J., De Saint Ours, P. and Talai, B. (1985) Rabaul caldera, Papua New Guinea: Volcanic hazards, surveillance, and eruption contingency planning. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 23, 195-237.
- McKee, C.O., Neall, V.E. and Torrence, R. (2011) A remarkable pulse of large-scale volcanism on New Britain Island, Papua New Guinea. *Bull. Volcanol.*, 73, 27-37.
- McKee C.O., Baillie, M.G. and Reimer, P.J. (2015) A revised age of AD 667-699 for the latest major eruption at Rabaul. *Bull. Volcanol.*, doi: 10.1007/s00445-015-0954-7
- Métrich N., Vidal, C.M., Komorowski, J.-C., Pratomo, I., Michel, A., Kartadinata, N., Prambada, O., Rachmat, H. and Surono (2017) New Insights into Magma Differentiation and Storage in Holocene Crustal Reservoirs of the Lesser Sunda Arc: the Rinjani-Samalas Volcanic Complex (Lombok, Indonesia). *J. Petrology*, 58, 2257-2284.
- 宮本 毅・中川光弘・田中勇三・吉田まき枝 (2004) 白頭山 10 世紀噴火の噴火推移. 東北アジア研究センター叢書, 16, 15-43.
- Moore, J.G. (1967) Base surge in recent volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.*, 30, 337-363.
- 村岡洋文・山口 靖・長谷紘和 (1991) 八甲田地熱地域で見出されたカルデラ群. 地質調査所報告, 275, 97-111.
- Mutaqin, B.W., Lavigne, F., Sudrajat, Y., Handayani, L., Lahitte, P., Virmoux, C., Hiden, Hadmoko, D.S., Komorowski, J.C., Hananto, N.D., Wassmer, P., Hartono and Baillot-Airaksnen, K. (2019) Landscape evolution on the eastern part of Lombok (Indonesia) related to the 1257 CE eruption of the Samalas Volcano. *Geomorphology*, 327, 338-350.
- Nagaoka, S. (1988a) The late Quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan Univ.*, 23, 49-122.
- 長岡信治 (1988b) 最終間氷期に起きた鬼界カルデラの珪長質火砕流噴火と火砕サージの形成. 地学雑誌, 97, 32-44.
- 長岡信治・奥野 充・新井房夫 (2001) 10 万～3 万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史. 地質雑, 107, 432-450.
- 名越幸生 (1994) 濁川カルデラの火砕流堆積物. 日本火山学会 1994 年秋季大会講演要旨, 137.
- Nairn, I.A., McKee, C.O., Talai, B. and Wood, C.P. (1995) Geology and eruptive history of the Rabaul Caldera area, Papua New Guinea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 69, 255-284.
- 中川光弘・宮坂瑞穂・富島千晴・松本亜希子・長谷龍一 (2018) 支笏湖南方域の火口近傍堆積物層序からみた 46ka 支笏カルデラ形成噴火推移. 地学雑誌, 127, 247-271.
- Neall, V.E., Wallace, R.C. and Torrence, R. (2008) The volcanic environment for 40,000 years of human occupation on the Willaumez Isthmus, West New Britain, Papua New Guinea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 176, 330-343.
- Newhall, C.G. and Dzurisin, D. (1988) Historical unrest at large calderas of the world. U.S. Geological Survey Bull., 1855, 1108p.
- Newhall, C.G. and Self S. (1982) The volcanic explosive index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, 87, 1231-1238.
- Ninkovich, D., Shackleton, N.J., Abdel-Monem, A.A., Obradovich, J.D. and Izett, G. (1978) K-Ar age of the late Pleistocene eruption of Toba, north Sumatra. *Nature*, 276, 574-577.
- 奥村晃史 (1991) 北海道地方の第四紀テフラ研究. 第四紀研究, 50, 379-390.
- 小野晃司・松本征夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和 (1977) 竹田地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 145p.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図. 産総研地質調査総合センター.

- Oppenheimer, C. (2003) Ice core and paleoclimatic evidence for the timing and nature of the great mid-13th century volcanic eruption. *Int. J. Climatology*, 23, 417-426.
- Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galvan, J.D., Stoffel, M., Guillet, S., Corona, C., Sigl, M., Cosmo, N.D., Hajdas, I., Pan, B., Breuker, R., Schneider, L., Esper, J., Fei, J., Hammond, J.O.S., and Büntgen, U. (2017) Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946CE. *Quaternary Science Review*, 158, 164-171.
- Pain, C.F., Blong, R.J. and McKee, C.O. (1981) Pyroclastic deposits and eruptive sequences of Long Island. In *Cooke-Ravine Volume of Volcanological Papers* (ed. R.W. Johnson) *Geol. Surv. Papua New Guinea Mem.*, 10: 101-113.
- Paladio-Melosantos, M.L.O., Solidum, R.U., Scott, W.E., Quiambao, R.B., Umbal, J.V., Rodolfo, K.S., Tubaianosa, B.S., Delos Reyes, P.J., Alonso, R.A. and Ruelo, H.B. (1996) Tephra falls of the 1991 eruptions of Mount Pinatubo. In: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (eds.) Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press, 513-535.
- Park, M-H., Kim, J-H. and Kil, Y-W. (2007) Identification of the late Quaternary tephra layers in the Ulleung Basin of the East Sea using geochemical and statistical methods. *Marine Geology*, 244, 196-208.
- Reubi, O. and Nicholls, I.A. (2004) Variability in eruptive dynamics associated with caldera collapse: an example from two successive eruptions at Batur volcanic field, Bali, Indonesia. *Bull. Volcanol.*, 66, 134-148.
- Reubi, O. and Nicholls, I.A. (2005) Structure and dynamics of a silicic magmatic system associated with caldera-forming eruptions at Batur volcanic field, Bali, Indonesia. *Jour. Petrol.*, 46, 1367-1391.
- Rogerson, R.J., Hilyard, D.B., Finlayson, E.J., Johnson, R.W. and McKee, C.O. (1989) The geology and mineral resources of Bougainville and Buka islands, Papua New Guinea. Geological survey of Papua New Guinea, Memoir 16, 217.
- Rose, W.I. and Chesner, C.A. (1987) Dispersal of ash in the great Toba eruption, 75 ka. *Geology*, 15, 913-917.
- 斎藤 眞・小笠原正継・長森英明・下司信夫・駒澤正夫 (2007) 20 万分の 1 地質図幅「屋久島」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・三梨 昂 (1970) 20 万分の 1 地質図幅「網走」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・松田武雄・杉山友紀・須田芳朗 (1970) 20 万分の 1 地質図幅「斜里」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・山口昇一・松田武雄・須田芳朗 (1971) 20 万分の 1 地質図幅「標津」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・山口昇一・曾屋龍典・松田武雄・須田芳朗 (1972) 20 万分の 1 地質図幅「釧路」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・山口昇一・須田芳朗・北島真理子 (1976) 20 万分の 1 地質図幅「斜里」. 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤博之・山口昇一 (1984) 20 万分の 1 地質図幅「紋別」. 産総研地質調査総合センター.
- Scott, W.E., Hoblitt, R.P., Torres, R.C., Self, S., Martinez, M.L. and Nillos, T. (1996) Pyroclastic flows of the June 15, 1991, climactic eruption of Mount Pinatubo. In: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (eds.) Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press, 545-570.
- Self, S. (1992) Krakatau revised: The course of events and interpretation of the 1883 eruption. *GeoJournal*, 28, 109-121.
- Self, S. and Rampino, M.R. (1981) The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, 294, 699-704.
- Self, S., Rampino, M.R., Newton, M.S. and Wolff, J.A. (1984) Volcanological study of the great Tambora eruption of 1815. *Geology*, 12, 659-663.
- Self, S., Gertisser, R., Thordarson, T., Rampino, M.R. and Wolff, J.A. (2004) Magma volume, volatile emissions, and stratospheric aerosols from the 1815 eruption of Tambora. *Geophys. Res. Letters*, doi: 10.1029/2004GL020925.
- Siebert, L., Simkin, T., Kimberly, P. (2010) *Volcanoes of the World, third edition*, University of California Press, 551p.

- Sigurdsson, H. and Carey, S. (1989) Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Bull. Volcanol.*, 51, 243-270.
- Silver, E., Day, S., Ward, S., Hoffmann, G., Llanes, P., Driscoll, N., Appelgate, B. and Saunders, S. (2009) Volcano collapse and tsunami generation in the Bismarck Volcanic Arc, Papua New Guinea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 186, 210-222.
- Simkin, T. and Fiske, R.S. (1983) *Krakatau 1883 -The volcanic eruption and its effects-*. Smithsonian Institution Press., 464p.
- 白井正明・多田隆治・藤岡換太郎 (1997) ODP 日本海試料との対比に基づく男鹿半島安田海岸更新世中-後期テフラの同定と年代. 第四紀研究, 36, 183-196.
- Smith, V.C., Staff, R.A., Blockley, S.P.E., Ramsey, C.B., Nakagawa, T., Mark, D.F., Takemura, K., Danhara, T. and Suigetsu 2006 Project Members (2013) Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150ka. *Quaternary Science Reviews*, 67, 121-137.
- Stoffel, M., Khodri, M., Corona, C., Guillet, S., Paulain, V., Bekki, S., Guiot, J., Luckman, B.H., Oppenheimer, C., Lebas, N., Beniston M. and Masson-Delmotte, V. (2015) Estimates of volcanic-induced cooling in the northern hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGE02526.
- Storey, M., Roberts, R. and Saidin, M. (2012) Astronomically calibrated $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age for the Toba supereruption and global synchronization of late Quaternary records. *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1208178109.
- Sutawidjaja, I.S. (2009) Ignimbrite analysis of Batur Caldera, Bali, based on ^{14}C dating. *Jour. Geologi Indonesia*, 4, 189-202.
- Sutawidjaja, I.S., Rosana, M.F., Watanabe, K. (2015) Magma chamber model of Batur Caldera, Bali, Indonesia: compositional variation of two facies, large-volume decitic ignimbrites. *Indonesian Jour of Geoscience*, 2, 111-124.
- Suzuki, K. and Ui, T. (1983) Factors governing the flow lineation of a large-scale pyroclastic flow - an example in the Ata pyroclastic flow deposit, Japan. *Bull. Volcanol.*, 46, 71-81.
- 宝田晋治・村岡洋文 (2004) 八甲田山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 86p.
- 宝田晋治・星住英夫 (2016) 阿蘇 4 大規模火砕流の分布・体積と火砕流の流動堆積機構. Proceedings of the International Meeting on Eruption History and Informatics, 2016-1, 21-25.
- Takarada, S., Ishikawa, Y., Maruyama, T., Yoshimi, M., Matsumoto, D., Furukawa, R., Teraoka, Y., Bandibas, J.C., Kuwahara, Y., Azuma, T., Takada, A., Okumura, K., Koizumi, N., Tsukuda, E., Solidum, R.U., Daag, A.S., Cahulogan, M., Hidayati, S., Andreastuti, S., Li, X., Nguyen, H.P., Lin, C-H. (2016) Eastern Asia Earthquake and Volcanic Hazards Information Map. Geological Survey of Japan, AIST.
- 宝田晋治・工藤 崇・下司信夫・星住英夫 (2017) 入戸・八戸・阿蘇 4 火砕流堆積物の分布と噴出量の見積り. JpGU-AGU Joint Meeting 講演要旨.
- 宝田晋治・宮城磯治・東宮昭彦 (2018) 洞爺及び屈斜路火砕流の分布と噴出量推定. 日本火山学会 2018 年秋季大会講演要旨集. 116.
- Tatsumi, Y., Suzuki-Kamata, K., Matsuno, T., Ichihara, H., Seama, N., Kiyosugi, K., Nakaoka, R., Nakahigashi, K., Takizawa, H., Hayashi, K., Chiba, T., Shimizu, S., Sano, M., Iwamaru, H., Morizumi, H., Sugioka, H. and Yamamoto, Y. (2018) Giant rhyolite lava dome formation after 7.3 ka supereruption at Kikai caldera, SW Japan, Scientific Reports, 8, 2753, doi:10.1038/s41598-018-21066-w.
- Torres, R.C., Self, S., Punongbayan, R.S. (1995) Attention focuses on Taal: Decade volcano of the Philippines. EOS, 76, 241-248.
- Torres, R.C., Self, S. and Martinez, M.L. (1996) Secondary pyroclastic flows from the June 15, 1991, ignimbrite of Mount Pinatubo. In: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (eds.) Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press, 665-678.

- Uesawa, S., Nakagawa, M. and Umetsu, A. (2016) Explosive eruptive activity and temporal magmatic changes at Yotei Volcano during the last 50,000 years, southwest Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 325, 27-44.
- 宇井忠英 (1973) 幸屋火砕流一極めて薄く広がり堆積した火砕流の発見. 火山, 18, 153-168.
- 宇井忠英・鈴木桂子・阪口圭一・徳永桂子 (1983) 中・南部鹿児島湾周辺のカルデラと火砕流. 月刊地球, 5, no. 2, 110-115.
- Ui T., Suzuki-Kamata, K., Matsusue, R., Fujita, K., Metsugi, H. and Araki, M. (1989) Flow behavior of large-scale pyroclastic flows - evidence obtained from petrofabric analysis. *Bull. Volcanol.*, 51, 115-122.
- 宇都浩三・阪口圭一・寺岡易司・奥村公男・駒沢正夫 (1997) 20 万分の 1 地質図幅「鹿児島」. 産総研地質調査総合センター.
- Verbeek, R.D.M. (1884) The Krakatoa eruption. *Nature*, 30, 10-15.
- Verbeek, R.D.M. (1885) *Krakatau*. Batavia: Landsdrukkerij, 495p.
- Vidal, C.M., Komorowski, J.C., Métrich, N., Pratomo, I., Kartadinata, N., Prambada, O., Michel A., Carazzo, G., Lavigne, F., Rodysill, J., Fontijn, K. and Surono (2015) Dynamics of the major plinian eruption of Samalas in 1257 A.D. (Lombok, Indonesia). *Bull. Volcanol.*, 77, doi:10.1007/s00445-015-0960-9
- Vidal, C.M., Métrich, N., Komorowski, J.C., Pratomo, I., Michel A., Kartadinata, N., Robert, V. and Lavigne, F. (2016) The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia): the single greatest stratospheric gas release of the Common Era. *Nature Scientific Reports*, 6:34868, doi: 10.1038/srep34868
- Wadge, G., McCormick Kilbride, B.T., Mdmonds, M. and Johnson, R.W. (2018) Persistent growth of a young andesite lava cone: Bagana volcano, Papua New Guinea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 356, 204-315.
- Walker, G.P.L., Heming, R.F., Sprod, T.J. and Walker, H.R. (1981) Latest major eruptions of Rabaul volcano. In Cooke-Ravian Volume of Volcanological Papers, R.W. Johnson, eds., *Geological Survey of Papua New Guinea Memoir*, 10, 181-193.
- 渡辺一徳 (2001) 阿蘇火山の生い立ちー地質が語る大地の鼓動ー. 一の宮町史 自然と文化 阿蘇選書 7, 一の宮町, 241p.
- Waters, A.C. and Fisher, R.V. (1971) Base surges and their deposits: Capelinhos and Taal volcanoes. *J. Geophys. Res.*, 76, 5596-5614.
- Wei, H. and Liu, G. and Gill, J. (2013) Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions. *Bull. Volcanol.*, doi:10.1007/s00445-013-0706-5.
- Wheller, G.E. and Varne, R. (1986) Genesis of dacitic magmatism at Batur volcano, Bali, Indonesia: implications for the origins of stratovolcano calderas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 28, 363-378.
- White, D.E., White, W.C., Steig, E.J. and Barlow, L.K. (1997) Reconstructing annual and seasonal climatic responses from volcanic events since A.D. 1270 as recorded in the deuterium signal from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core. *J. Geophys. Res.*, 102, 19683-19694.
- Wolfe, E.W. and Hoblitt, R.P. (1996) Overview of the Eruptions. In: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (eds.) Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press, 3-20.
- 山縣耕太郎 (1994) 支笏およびクッタラ火山のテフロクロノロジー. 地学雑誌, 103, 268-285.
- 山口昇一 (1970) 20 万分の 1 地質図幅「北見」. 産総研地質調査総合センター.
- 山元孝広・伊藤順一・中川光弘・長谷川健・岸本博志 (2010) 北海道東部, 屈斜路・摩周カルデラ噴出物の放射炭素年代. 地質調査研究報告, 61, 161-170.
- 山元孝広 (2016) 支笏カルデラ形成噴火のマグマ体積. 地質調査総合センター研究資料集, no. 632, 1-51.
- 柳井清治・鴈澤好博・古森康晴 (1992) 最終氷期末期に噴出した濁川テフラの層序と分布. 地質雑, 98, 125-136.
- 横山勝三 (1970) 始良カルデラ北方の入戸火砕流堆積物とその地形. 地理学評論. 43, 464-482.

- You, S.-H., Gung, Y., Lin C.-H., Konstantinou, K.I., Chang, T.-M., Chang, E.T.Y. and Solidum R.U. (2013) A preliminary seismic study of Taal volcano, Luzon island, Philippines. *J. Asian Earth Sciences*, 65, 100-106.
- Zielinski, G.A., Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twickler, M.S., Morrison, M., Messe D.A., Gow, A.J. and Alley, R.B. (1994) Record of Volcanism Since 7000 B.C. from the GISP2 Greenland Ice Core and Implications for the Volcano-Climate System. *Science*, 264, 948-952.
- Zlotnicki, J., Sasai, Y., Toutain, J.P., Villacorte, E.U., Bernard, A., Sabit, J.P., Gordon Jr, J.M., Corpuz, E.G., Harada, M., Punongbayan, J.T., Hase, H. and Nagano, T. (2009) Combined electromagnetic, geochemical and and thermal surveys of Taal volcano (Philippines) during the period 2005-2006. *Bull. Volcanol.*, 71, 29-47.