

## 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図

工藤 崇<sup>1,\*</sup>

KUDO Takashi (2023) Cumulative volume step-diagram for eruptive magmas of Towada Volcano. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (3), p. 133-153, 10 figs, 3 tables.

**Abstract:** The cumulative volume step-diagram for eruptive magmas of Towada Volcano was prepared. The eruptive volume and age data were compiled from previous studies, and the deficiencies were supplemented in this report. Specifically, each eruptive volume and age of the distal tephros from the pre-caldera to the early caldera-forming stage was estimated using the author's original stratigraphic data and the isopach maps by previous research. This report shows the dataset for the cumulative volume step-diagram for eruptive magmas of Towada Volcano and describes the precautions to be paid when using this dataset and the future tasks for improving this diagram.

**Keywords:** Towada Volcano, cumulative volume step-diagram for eruptive magmas, eruptive history, eruptive volume, eruptive age

### 要 旨

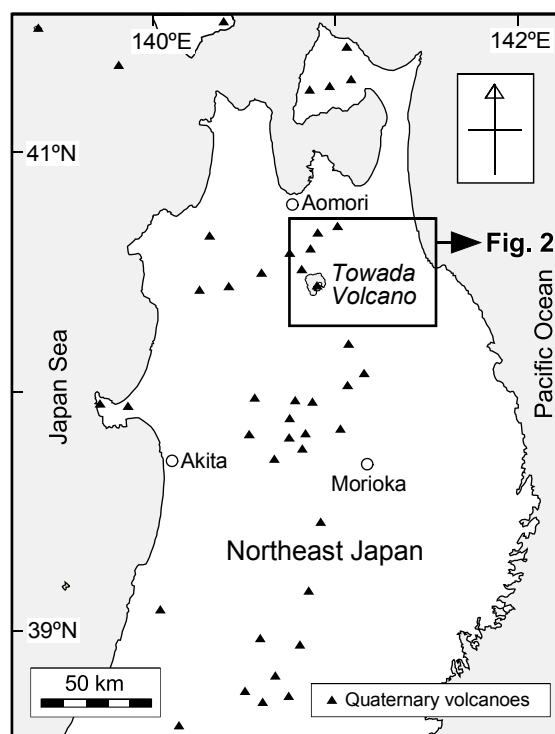
十和田火山の積算マグマ噴出量階段図を作成した。噴出量及び年代データについては、先行研究をコンパイルするとともに、不足する部分は本報告により補った。具体的には、先カルデラ期～カルデラ形成期初期の給源遠方テフラについて、筆者による層序データと先行研究による等層厚線図を用いて年代と噴出量を見積もった。本報告では、十和田火山の階段図とその根拠となるデータを提示し、この階段図を利用する際の注意事項と今後の課題について述べる。

### 1. はじめに

積算マグマ噴出量階段図(以下では「階段図」と略する)は、噴火の発生頻度と規模の関係、それらの時代変遷を示した図であり、火山活動の特徴や履歴を評価する際の有用なツールである。そのため、階段図は国内外の様々な火山において作成され、火山活動史や火山活動モデルの議論に活用されている(例えば、Wadge, 1982; Hayakawa, 1985; 小山・吉田, 1994; Hildreth *et al.*, 2003; Bacon and Lanphere, 2006; 岸本ほか, 2009; 山元, 2015; Uesawa *et al.*, 2016; Yamamoto *et al.*, 2018, 2021)。また、階段図は長期的な噴火活動予測のための基礎資料としても利用されることもあり、原子力発電所の火山影響評価ガイド(原子力規制委員会, 2013)においても、発電所に影響を及ぼすような噴火が発生する可能性につい

て、階段図を用いて評価することが推奨されている。

十和田火山は、東北日本弧北部に位置し(第1図)、直



第1図 十和田火山と調査地域の位置図。

Fig. 1 Location map of Towada Volcano. The study area is marked by the black rectangle.

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

\* Corresponding author: KUDO, T., Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: kudo-taka@aist.go.jp

径約11 kmのカルデラを有する活火山である。十和田火山は、日本列島において近年火山活動が活発な桜島火山、阿蘇火山、浅間火山などと比較すると、最近1万年間の噴火頻度が数百年～数千年に1回と低頻度である。しかしながら、一旦噴火を起こすとその規模がVEI (Volcanic Explosivity Index) (Newhall and Self, 1982) = 4～5と比較的大きい傾向があることから、将来起こり得る噴火が警戒されており、気象庁により常時観測火山に指定され、ハザードマップも作成されている(十和田火山防災協議会, 2018)。また、より古く遡ると36 kaと15.7 kaにVEI = 6、噴出量18～20 km<sup>3</sup> (DRE: dense rock equivalent)の大規模カルデラ形成噴火が発生しており、これらの噴火では青森県の大半～秋田県北部～岩手県北部の広大な地域に火砕流が流下・堆積している(例えば、Hayakawa, 1985)。

十和田火山の階段図はHayakawa (1985)によって初めて示された。Hayakawa (1985)は、十和田火山噴出物の詳細な層序を構築し、本火山のカルデラ形成期以降の階段図を示した。その後、この階段図の改訂版が小山・吉田(1994)の論文中において示された。これは早川由紀夫氏の未公表データを用いて改訂されたもので、特にカルデラ形成期前半の噴火年代が大きく変更されている。しかし、小山・吉田(1994)ではその根拠は示されていない。その後、本報告筆者の工藤が十和田火山の研究を開始し、徐々に新たな知見が蓄積されてきた(例えば、工藤, 2005, 2008, 2010a, b; 工藤・佐々木, 2007)。その過程で工藤ほか(2011)は、先カルデラ期も加えた十和田火山全期の階段図を示した。しかし、工藤ほか(2011)は学会講演要旨であったため、階段図のデータセット及び採用されたデータの詳細な根拠は示されていない。その後、山元(2015)は、既存研究報告のコンパイルデータに基づき、日本の主要第四紀火山の階段図を作成し、その中で十和田火山の階段図を示した。しかし、そこで示されたデータの大半は、「工藤ほか(2011)の階段図から読み取ったデータ」とされている。その後、さらに改訂された階段図がYamamoto *et al.* (2018)の論文中で示されたものの、筆者の未公表データが多く用いられており、詳細なデータは未提示のままとなっている。

このような状況のため、筆者の元には様々な研究者、民間企業、官公庁などから、最新版の階段図とその根拠となるデータの公表を希望する声が寄せられている。さらに、十和田火山については工藤ほか(2011)以降にも長期に渡って筆者による調査・研究が継続中であり、さらに新たな知見が得られつつある(例えば、工藤・小林, 2013; 工藤, 2016, 2018a, b, 2022; 工藤ほか, 2019)。そこで、これらの研究成果を現時点で一旦総括し、現段階での十和田火山の階段図とその根拠となるデータセットを公表しておくことは、今後の十和田火山の更なる学術的調査・研究のためにも、他の研究者が使えるように

しておくためにも意義があると考えられる。本報告では、十和田火山の階段図とその根拠となるデータを提示し、階段図を利用する際の注意事項と今後の課題について述べる。

## 2. 十和田火山の活動史概要

十和田火山の活動史は、Hayakawa (1985)、中川ほか(1986)、松山・大池(1986)、工藤ほか(2019)などによりまとめられている。以下では、主にHayakawa (1985)と工藤ほか(2019)に基づき、十和田火山の活動史概要を示す。

十和田火山の活動は0.22 Ma以降に開始されたと考えられている(工藤, 2016; 工藤ほか, 2019)。十和田火山の活動以前の0.6～0.22 Maには、約40万年間の火山活動休止期が存在したと推定されており、この火山活動休止期以降の活動が十和田火山の活動と定義される(工藤, 2018b)。十和田火山の活動は、先カルデラ期(220～61 ka)、カルデラ形成期(61～15.7 ka)、後カルデラ期(15.7 ka～現在)の3つの活動期に区分される(Hayakawa, 1985; 工藤ほか, 2019)。各活動期の年代は、Horiuchi *et al.* (2007) (較正プログラムCALIB 8.2 (Stuiver *et al.*, 2022)で暦年較正し直した値)、工藤(2016)、Ito *et al.* (2017)による。この活動期区分は、比較的規模の大きな火砕流噴火が複数回発生してカルデラを形成した時期を「カルデラ形成期」として、それ以前の時期を「先カルデラ期」、それ以降の時期を「後カルデラ期」として位置付けた考え方によるものである。十和田火山の個々の噴火イベントについては、噴火休止期を示す土壤層を境として、「噴火エピソード」毎に区分され、上位からA, B, Cの順にアルファベットを用いて命名・整理されている(Hayakawa, 1985)。ただし、このアルファベットを用いた区分は、溶岩のみの噴火や一部の火砕噴火(特に先カルデラ期の噴火)においてエピソード名が未設定であり、アルファベットが付与されていない噴火も多数存在するため注意が必要である。

先カルデラ期は、十和田カルデラ内に噴出中心が存在したと推定され、度重なる噴火により多数の溶岩・火砕物がもたらされ、成層火山体を形成した時期である(Hayakawa, 1985; 工藤ほか, 2019)。先カルデラ期噴出物は、玄武岩質安山岩～流紋岩の多数の溶岩、降下火砕堆積物、火砕流堆積物、火砕サージ堆積物からなり、貫入岩を伴う(工藤ほか, 2019)。

カルデラ形成期は、先カルデラ期に比較して、より規模の大きな火砕流噴火が複数回発生し、直径約11 kmの十和田カルデラを形成した時期である(Hayakawa, 1985)。カルデラ形成期の噴出物は、安山岩～流紋岩の火砕流堆積物、火砕サージ堆積物及び降下火砕堆積物からなる(工藤ほか, 2019)。カルデラ形成期に発生した噴火のうち、噴火エピソードN(主に大不動火砕流堆積物を形成)と噴

火エピソードL（主に八戸火砕流堆積物を形成）が特に大規模であり、それぞれの噴火エピソードによる噴出量は見かけで40 km<sup>3</sup>を超える（Hayakawa, 1985）。カルデラ形成期においては、大規模な火砕流噴火が繰り返し起こることによって、カルデラの陥没が段階的に進み、八戸降下テフラ及び八戸火砕流堆積物の噴火（噴火エピソードL）によって、現在の十和田カルデラの原形が形成されたと考えられている（Hayakawa, 1985）。

後カルデラ期は、十和田カルデラ形成以後の時期として位置付けられる（Hayakawa, 1985）。後カルデラ期の噴出物は、玄武岩質安山岩～流紋岩の降下火砕堆積物、火砕サージ堆積物、火砕流堆積物及び溶岩からなる（Hayakawa, 1985；工藤ほか, 2019）。これらは、十和田カルデラ内で活動を開始した小規模な成層火山（五色岩火山）の活動とその山腹での側噴火による噴出物からなる（Hayakawa, 1985；工藤ほか, 2019）。五色岩火山の頂部は直径2.8 kmの中湖カルデラの陥没により失われている。中湖カルデラの形成時期は、噴火エピソードCあるいはAの可能性が高いが、確定していない（工藤ほか, 2019）。最新の噴火は西暦915年に発生した噴火エピソードAである（Hayakawa, 1985；早川・小山, 1998；広井ほか, 2015）。この時の噴火では、爆発的噴火により降下火砕堆積物と火砕サージ堆積物が堆積した後、十和田湖の周囲に火砕流が流れ下り、毛馬内火砕流堆積物を形成した（広井ほか, 2015）。

### 3. 階段図の作成方法と反映した噴出物の範囲

#### 3.1 作成方法

階段図の作成には、既存研究報告をコンパイルしたデータ及び本報告によるオリジナルデータを用いた。階段図を作成するためには、噴出物毎に年代と噴出量のデータが揃っている必要がある。また、より良い階段図とするためには、詳細な地質調査により過去の火山噴出物の分布・層序を可能な限り詳細に把握し、なるべく取りこぼしなく過去の噴火イベントを網羅的に把握する必要がある。しかしながら、十和田火山の先カルデラ期～カルデラ形成期初期のテフラに関しては、既存研究報告による火山噴出物の層序・層厚・分布・年代等に関するデータが不十分であり、全ての噴出物について年代・噴出量データが揃っている状況にはない。そこで、これらに関しては本報告にて見積もりを実施した。見積もり方法の詳細については、次章以降にて説明を行う。

データのコンパイルにあたっては、論文及び報告書に掲載されたものを採用し、学会講演要旨に掲載されたものは根拠が十分に示されていないため不採用とした。そのため、筆者による最近の学会講演要旨で示されたデータ（例えば、工藤, 2017, 2018c）は採用していない。これらに関しては、現在、論文として公表する準備を進めており、公表された後にデータを追加し、改めて階段図

の改訂を行う予定である。

年代データの採用にあたっては、優先度を「<sup>14</sup>C年代＞海洋コアの酸素同位体層序年代＞OSL年代と古土壌層の厚さにより求めた年代＞古土壌層の厚さにより求めた層序年代」とした。一部のテフラではフィッシュントラック年代が報告されているが（桑原, 2007；工藤・小林, 2013）、これらは誤差が数万年を越えるため不採用とした。「OSL年代と古土壌層の厚さにより求めた年代」は、Ito *et al.* (2017)により報告されたものであるが、本報告では誤差が5千年以下であり、かつ広域テフラ（次章以降で示す「年代基準テフラ」）の酸素同位体層序年代と矛盾しないものを採用した。複数の<sup>14</sup>C年代が報告されている場合には、基本的には最新の研究成果によるものを採用したが、年代の比較・評価が行われ、妥当な年代値が提示されている場合（例えば、工藤・佐々木, 2007；工藤, 2008；工藤ほか, 2019）はそれらを採用した。また、後カルデラ期の噴火エピソードCについては、最新の研究成果による<sup>14</sup>C年代ではなく、高精度な解析が進められている水月湖（福井県）の湖底コア層序で示された年代データ（McLean *et al.*, 2018）を採用した。<sup>14</sup>C年代に関しては暦年較正を行った年代値を用いた。測定結果の暦年較正には、IntCal20 データセット（Reimer *et al.*, 2020）、較正プログラムCALIB 8.2（Stuiver *et al.*, 2020）を用いた。

降下テフラの噴出量については、結晶法（Walker, 1980）あるいは結晶法による結果から導かれたHayakawa (1985)の経験式 $V = 12.2TS$ （ $V$ : 降下テフラの体積,  $T$ : 層厚,  $S$ : 等層厚線が囲む面積）により見積もられたものを採用した。噴出量のDRE換算体積については、岩石密度を2.5 g/cm<sup>3</sup>とし、それぞれの文献で示されている堆積物密度を用いて求めた。

#### 3.2 階段図に反映した噴出物

現段階では一部でデータが不足しているため、十和田火山の全噴出物を反映した階段図を作成することは不可能である。以下では、階段図に反映した噴出物の範囲について、活動期毎に説明を行う。

後カルデラ期の噴出物については、これまでの研究報告によって、ほぼ全ての噴出物が把握されており、噴出物毎の年代と噴出量のデータがほぼ網羅されている（町田ほか, 1981；Hayakawa, 1985；早川・小山, 1998；久利・栗田, 2003；工藤・佐々木, 2007；工藤, 2008, 2010a；McLean *et al.*, 2018）。唯一の例外は御門石溶岩（谷口, 1972；工藤ほか, 2019）である。御門石溶岩については、噴出量が0.013 km<sup>3</sup>と見積もられているものの、年代は全岩化学組成の特徴から11.7～2.7 kaの間のいずれかの時期と推定されているに過ぎない（工藤, 2010b）。そのため、後カルデラ期に関しては御門石溶岩抜きで階段図を作成した。なお、後カルデラ期の噴出物層序に関しては、Hayakawa (1985)と工藤(2010a)で御倉山溶岩（河

野, 1939; 井上・蜂屋, 1962)の層位に見解の相違があるが, 本報告では工藤(2010a)の見解に従った。

既報による後カルデラ期の噴出量(Hayakawa, 1985; 久利・栗田, 2003; 工藤, 2010a)は, いずれも一部を除いて噴火当時の初生的な噴出量として見積もられたものである。そのため, 各々の噴出量に対して, 中湖カルデラ陥没による欠損量を逐一復元して追加する必要はない。ただし, 御倉山溶岩(溶岩ドーム)については, 現存する部分から求められた体積値( $0.23 \text{ km}^3$ ; Hayakawa, 1985)となっている。本溶岩は中湖カルデラの陥没によって一部が欠損しているため(工藤, 2010a), その量を評価する必要がある。御倉山溶岩の体積については, 工藤ほか(2019)の地質図を用い, 崩壊した部分の溶岩ドームの形状が円弧上の外形を成していたと仮定して欠損部分も含めて見積もると, 見かけの体積で $0.26 \text{ km}^3$ となる(欠損部分は $0.01 \text{ km}^3$ )。御倉山溶岩の岩石密度は $2.1 \text{ g/cm}^3$ (Hayakawa, 1985)なので, 岩石密度を $2.5 \text{ g/cm}^3$ と仮定すると, 御倉山溶岩の噴出量は $0.22 \text{ km}^3$  DREと算出される。この値はHayakawa (1985)による見積もり値:  $0.19 \text{ km}^3$  DREとさほど変わらないが, 本報告では $0.22 \text{ km}^3$ を御倉山溶岩の噴出量として採用する。

カルデラ形成期の噴出物は, 少なくともカルデラ縁より外側で見ついている噴出物については, Hayakawa (1985), Horiuchi *et al.* (2005), 小岩ほか(2007), Ito *et al.* (2017), 工藤(2022)を基にしたコンパイルデータと本報告のオリジナルデータ(次章以降で示す)により, 噴出物毎の年代と噴出量データを完備することが可能である。本報告ではこれらを階段図に反映した。なお最近, カルデラ形成期において, 少なくとも3回の小規模ブルカノ式噴火が発生したことが報告されているが(工藤, 2018c), 学会講演要旨によるデータのため, 今回の階段図には反映しない。これらの噴出量はそれぞれ $0.09 \text{ km}^3$  (DRE)以下であることから(工藤, 2018c), 階段図の形状には大きな影響を与えないと判断される。

先カルデラ期の噴出物は, 給源近傍相と遠方相で噴出物層序の精度やデータの完備度合いの状況が異なる。給源遠方相については, 十和田火山の東山麓に分布するテフラ層序がほぼ確立しており(例えば, 大池・中川, 1979; Hayakawa, 1985; 松山・大池, 1986; 中川ほか, 1986), 噴出物の大部分は既に把握されている。ただし, 東方以外に飛散したテフラがあるとすれば, 把握できていないものがある可能性は否定できない。ただし, そのようなテフラは偏西風が卓越する気象的条件から考えると少数と考えられる。一方, 先カルデラ期の給源近傍相としては, 溶岩及び火砕岩が認められており, それらの分布の外形や大まかな層序は明らかにされている(工藤ほか, 2019)。しかし, 膨大な枚数の噴出物が存在するため, 噴出物1枚毎の詳細な層序・対比については不明な点が多く, 遠方相との対比も十分には明らかになって

いない(例えば, 工藤, 2018a)。年代・噴出量のデータも不足しており, 現段階ではこれらを階段図に反映することは困難である。そこで本報告では, 先カルデラ期の階段図については, 給源遠方相のテフラのみで作成した。十和田火山東山麓に分布する遠方テフラについては, 既存研究報告では層序がほぼ確立しているものの, 年代・噴出量データがほとんど示されていない。しかし, 大部分のテフラについては, 等層厚線図が既に示されており(中川ほか, 1986), これを利用することによって噴出量の見積もりが可能である。また, 年代決定された広域テフラとの層序関係も明確なため, 不整合のない連続層序を露頭で確認することにより, 間に挟まれる古土壌層の厚さから年代を見積もることが可能である。

#### 4. 十和田火山東方における 先カルデラ期～カルデラ形成期テフラ

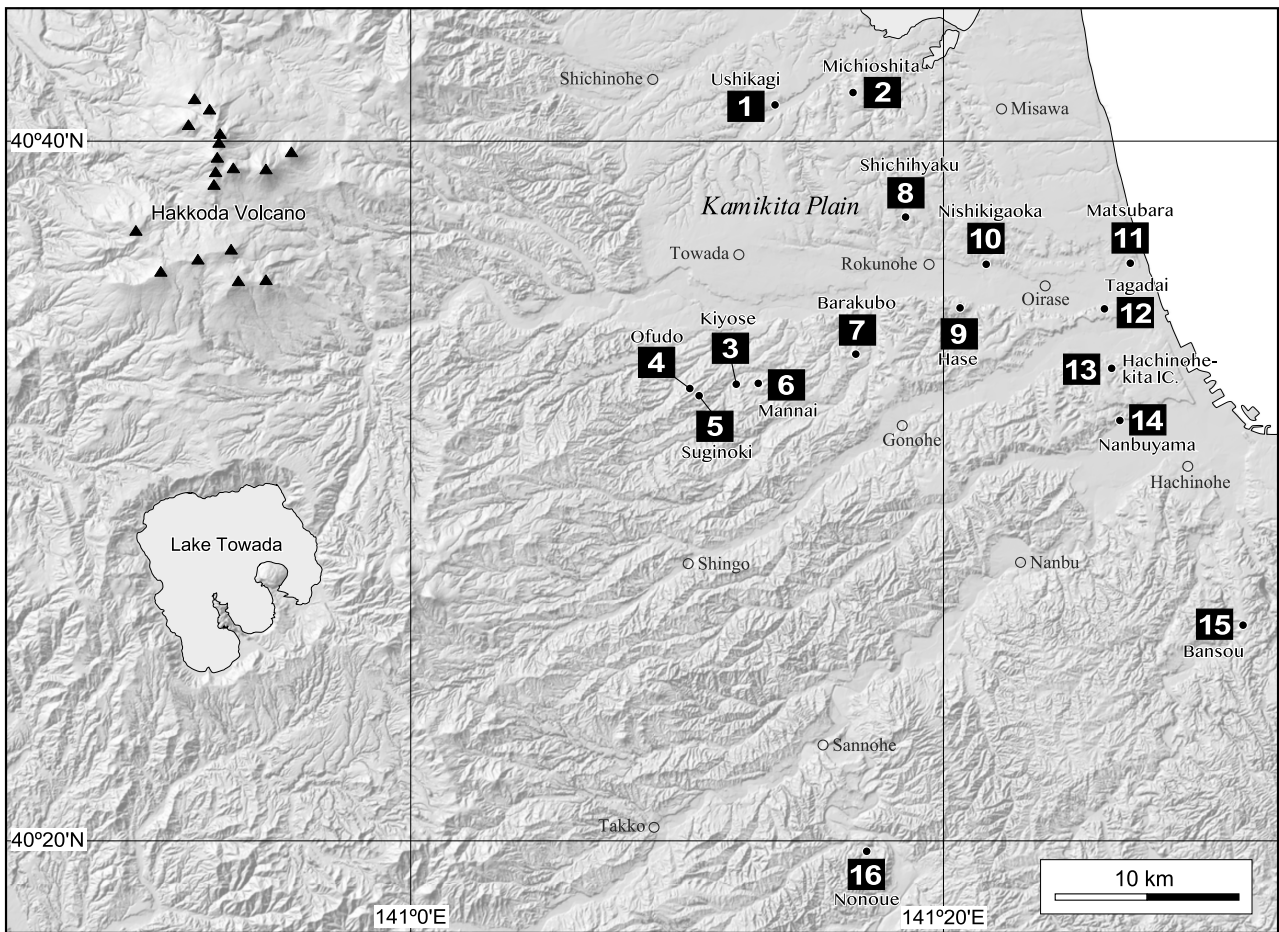
前章で述べたように, 給源遠方相の先カルデラ期～カルデラ形成期初期のテフラについては, 一部を除いて年代と噴出量のデータが完備できていない。そこで本報告では, 筆者のオリジナルな層序データと中川ほか(1986)の等層厚線図を用いて, 各テフラの年代と噴出量を見積もった。以下では, これらのテフラ層序の概要と一部のテフラの取り扱い方針について説明を行う。

十和田火山の先カルデラ期～カルデラ形成期のテフラは, 十和田火山東方の上北平野(第2図)を中心に広く分布する。上北平野周辺で認められるテフラについて, 第2図に柱状図作成地点を, 第3図及び第4図に柱状図を, 第1表にテフラの名称・記号・命名定義文献・給源火山の情報一覧を示す。柱状図の作成地点には位置的にやや偏りがあるが(第2図), これは青森県五戸町より南方において露出が顕著に悪くなることに起因している。ただ, 位置的な偏りはあるものの, 大部分の既知テフラについては, 露頭で確認することができている(第3図; 第4図)。上北平野周辺に分布するテフラは, 大池・中川(1979), 岩崎(1983), Hayakawa (1985), 松山・大池(1986), 中川ほか(1986), 大和(2005)により層序がほぼ確立しており, それらの層相及び含まれる鉱物の種類から, 比較的容易に対比することが可能である(第3図; 第4図)。

十和田火山を起源とするテフラは, 八甲田火山起源とされるWPより上位の層準で出現することが知られている(岩崎, 1983; 松山・大池, 1986; 工藤, 2005)。これまで知られている限りでは十和田火山の最古のテフラはNPであり, NP以上の大半のテフラが十和田火山起源とされている(松山・大池, 1986; 工藤, 2005)。しかし, 一部で給源が不明なものがあるため, どこまでを十和田火山のテフラとして扱うか検討が必要である。以下では, WPよりも上位のテフラのうち, 既存研究報告により給源火山が示されていないもの, 給源火山に再検討が必要なもの, 複数の給源火山が想定されるもの, また,



十和田火山の積算マグマ噴出量階段図（工藤）



第2図 露頭の位置図. 本区域の位置を第1図に示す. 基図に地理院地図を使用.

Fig. 2 Locality of outcrops. The location of this area is shown in Fig. 1. Base map is from GSI Map.

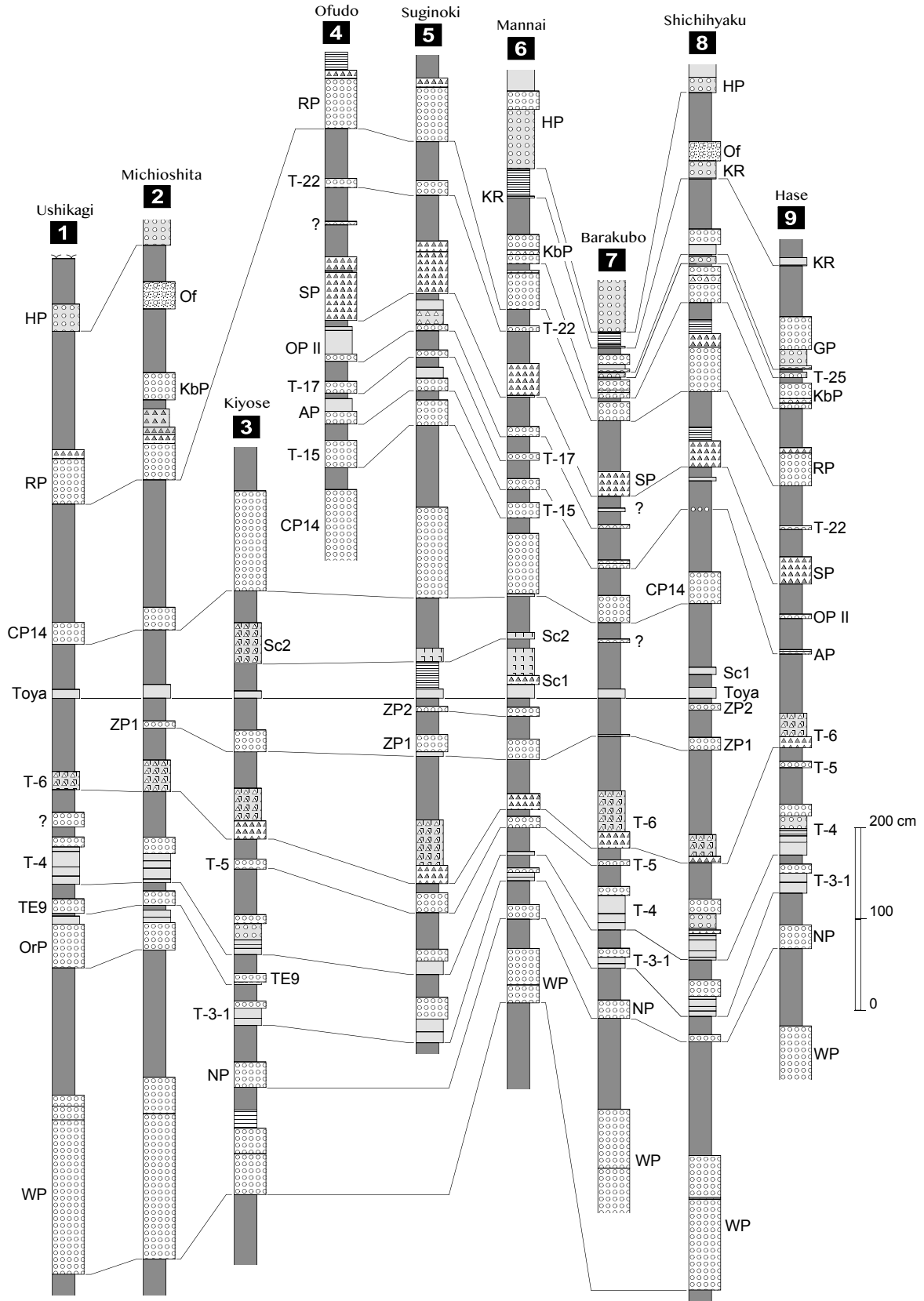
テフラの存在自体が確認できなかったものを対象に、下位から順に本報告での取り扱いについて説明を行う。

**TE7**：岩崎(1983)により命名されたテフラである。既存研究報告では給源火山は示されていない。岩崎(1983)は、TE7が五戸町付近に分布し、大池・中川(1979)のT-3に相当するとしている。筆者による調査では、五戸町の南東、青森県八戸市伴蔵(地点15)においてTE7を確認している(第4図)。T-3の項でも詳述するが、T-3は等層厚線図で分布軸が3本認められ(第5図)、少なくとも3枚のテフラを一括したものである可能性が高い(工藤ほか, 2004)。T-3のうち、五戸町付近に分布するのは最も南側に分布軸を持つものであることから、これがTE7に相当すると思われる(第5図)。この等層厚線図の分布軸が十和田火山を向いていることから(第5図)、TE7を十和田火山起源のテフラとして扱う。

**T-3**：大池・中川(1979)により命名されたテフラである。T-3の等層厚線図(中川ほか, 1986)によれば、T-3には北東、東北東、東方の少なくとも3本の分布軸が認められ

る(第5図)。したがって、T-3は少なくとも3枚のテフラを一括したものである可能性が高い(工藤ほか, 2004)。前述のように、東方に向く最も南側の分布軸は、岩崎(1983)のTE7に相当すると思われる(第5図)。残りの北東、東北東の分布軸を示すテフラを、本報告では仮にT-3-2(北東分布軸)、T-3-1(東北東分布軸)と呼ぶことにする(第5図)。このうちT-3-1については、青森県十和田市～六戸町の地点3, 5, 6, 7, 8, 9で確認している(第3図)。T-3-1はその分布軸の向きから十和田火山起源と判断される(第5図)。一方、T-3-2については、筆者のこれまでの調査では露頭で存在を確認できていない。T-3-2は分布軸が八甲田火山の方向を向いていることから(第5図)、八甲田火山起源の可能性が指摘されている(工藤ほか, 2004)。したがって、T-3-2については今回の階段図では不採用とする。

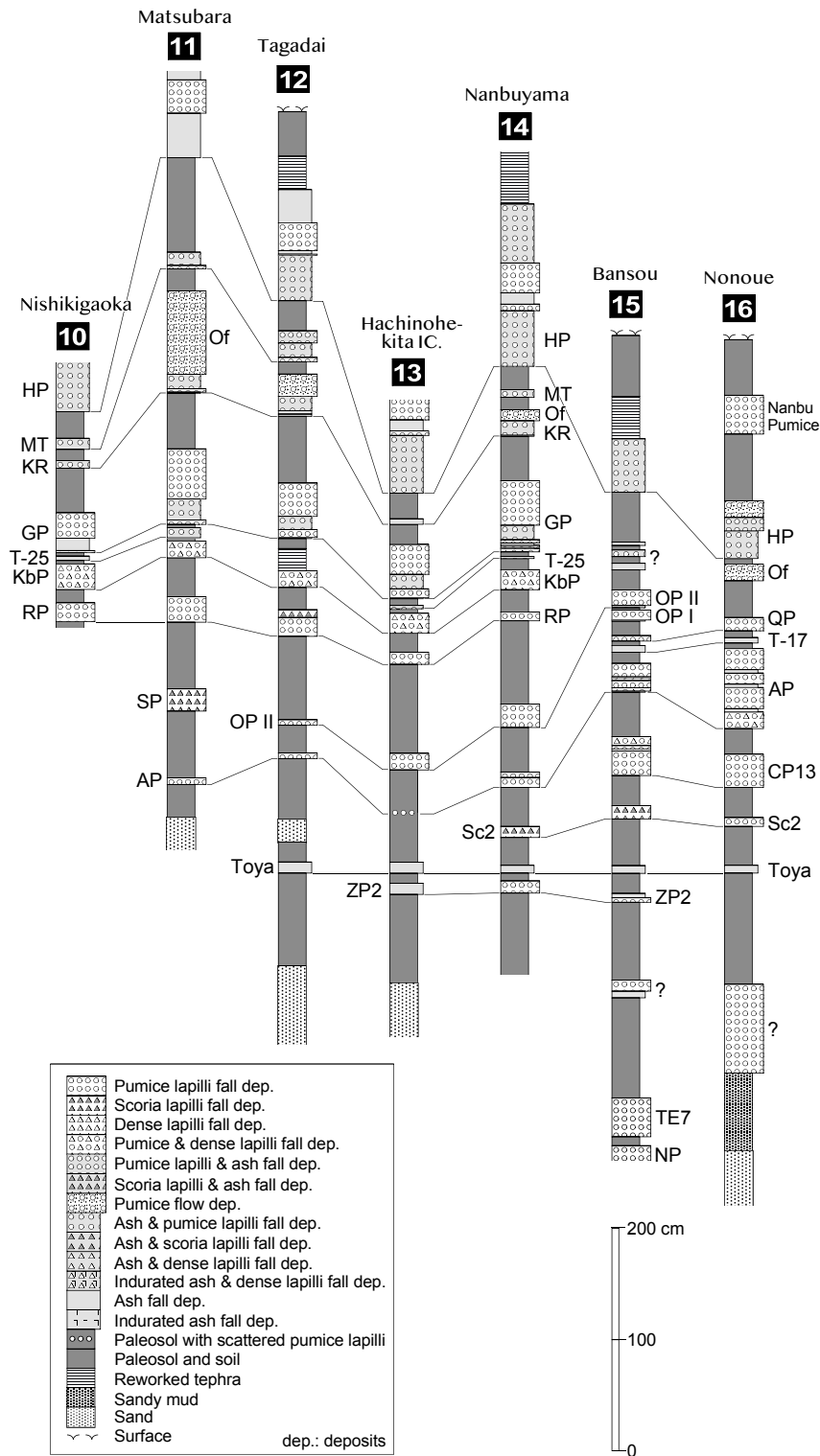
**OrP**：東北地方第四紀研究グループ(1969)により命名されたテフラである。筆者による調査では、青森県十和田市～東北町の地点1, 2で確認しているほか(第4図)、



第3図 十和田火山東麓における先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの地質柱状図(その1)。各露頭の位置を第2図に示す。

Fig. 3 Stratigraphic columnar sections of the tephra from pre-caldera and caldera-forming stages at the eastern foot of Towada Volcano (part 1). Locality of each section is shown in Fig. 2.

十和田火山の積算マグマ噴出量階段図（工藤）



第4図 十和田火山東麓における先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの地質柱状図(その2). 各露頭の位置を第2図に示す.

Fig. 4 Stratigraphic columnar sections of the tephra from pre-caldera and caldera-forming stages at the eastern foot of Towada Volcano (part 2). Locality of each section is shown in Fig. 2.

第1表 テフラの名称・記号・命名文献・給源火山の情報一覧

Table 1 List of tephra names, tephra symbols, reference for tephra name and definition, and information on source volcanoes

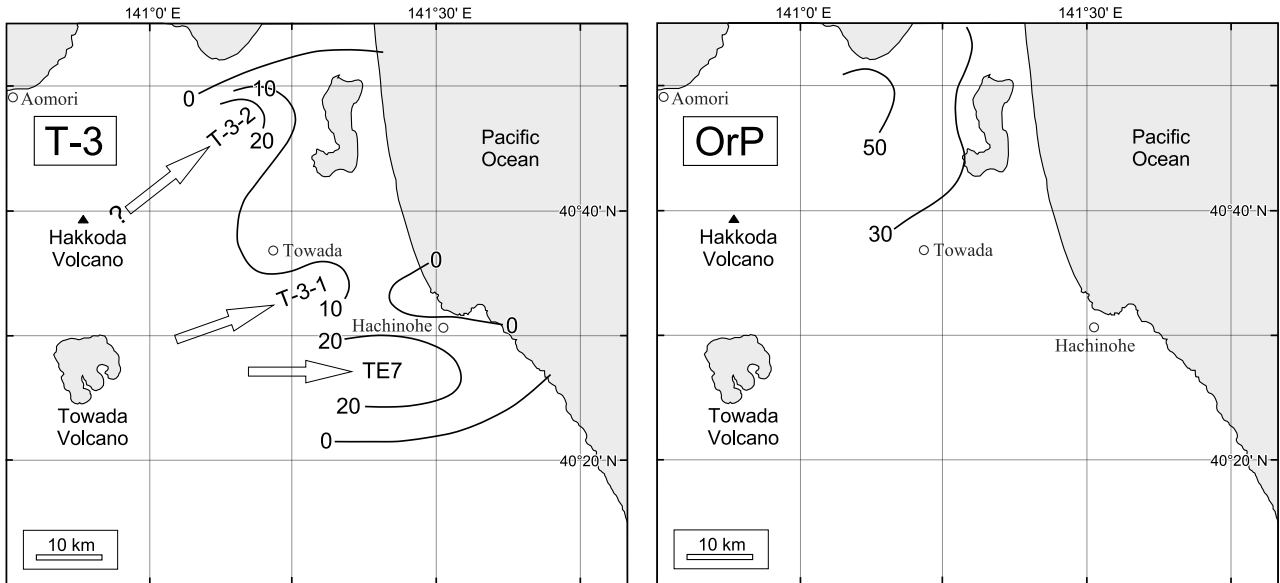
Symbol	Tephra name (in English)	Tephra name (in Japanese)	Reference for tephra name and definition	Source volcano	Reference for source volcano
HP	Hachinohe Fallout Tephra	八戸降下テフラ	Oike <i>et al.</i> (1959); Tuzino <i>et al.</i> (2018)	Towada	Oike <i>et al.</i> (1966)
MT	Maita Tephra	米田テフラ	Hayakawa (1985)	Towada	Hayakawa (1985)
Of	Ofudo Pyroclastic Flow Deposits	大不動火砕流堆積物	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969); Hayakawa (1993)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1972)
KR	Kirida Tephra	切田テフラ	Hayakawa (1985)	Towada	Hayakawa (1985)
GP	Goudou Tephra	合同テフラ	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969)	Towada	Hayakawa (1985) Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
T-25	T-25 Tephra	T-25テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
KbP	Kibidango Tephra	キビダンゴテフラ	Oike <i>et al.</i> (1970); Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Hayakawa (1985) Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
RP	Red Pumice Tephra	レッドバミス (赤色) テフラ	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969); Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Hayakawa (1985) Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
T-22	T-22 Tephra	T-22テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
SP	SP Tephra	SPテフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
OP II	Okoshi II Tephra	オコシIIテフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
OP I	Okoshi I Tephra	オコシIテフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
QP	QP Tephra	QPテフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
T-17	T-17 Tephra	T-17テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
AP	Aosuji Tephra	青スジテフラ	Oike <i>et al.</i> (1970); Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
T-15	T-15 Tephra	T-15テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
CP14	Castella 14 Tephra	カステラ14テフラ	Oike <i>et al.</i> (1970); Oike and Nakagawa (1979); Yamato (2005)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
CP13	Castella 13 Tephra	カステラ13テフラ	Oike <i>et al.</i> (1970); Oike and Nakagawa (1979); Yamato (2005)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
Sc2	Sc2 Tephra	Sc2テフラ	Oike <i>et al.</i> (1970)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
Sc1	Sc1 Tephra	Sc1テフラ	Oike <i>et al.</i> (1970)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
Toya	Toya Ash	洞爺火山灰	Machida <i>et al.</i> (1987)	Toya	Machida <i>et al.</i> (1987)
ZP2	Zarame 2 Tephra	ザラメ2テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
ZP1	Zarame 1 Tephra	ザラメ1テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
T-6	T-6 Tephra	T-6テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Kudo (2005)
T-5	T-5 Tephra	T-5テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Kudo (2005)
T-4	T-4 Tephra	T-4テフラ	Oike and Nakagawa (1979)	Towada	Kudo (2005)
TE9	TE9 Tephra	TE9テフラ	Iwasaki (1983)	Towada	This study
OrP	Orange Tephra	オレンジテフラ	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969)	Towada	Kudo <i>et al.</i> (2004)
T-3-1	T-3-1 Tephra	T-3-1テフラ	Oike and Nakagawa (1979); This study	Towada	This study
TE7	TE7 Tephra	TE7テフラ	Iwasaki (1983)	Towada	This study
NP	Nukamiso Tephra	ヌカミソテフラ	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969)	Towada	Matsuyama and Oike (1986); Nakagawa <i>et al.</i> (1986)
WP	Shirobeta (Katchi) Tephra	白ベタ (甲地) テフラ	Tohoku Region Quaternary Research Group (1969)	Hakkoda	Matsuyama and Oike (1986); Nakagawa <i>et al.</i> (1986)

第2図のより北方の地域数地点でも存在を確認している。中川ほか(1986)と松山・大池(1986)は、OrPが上北平野北部に分布し、北東方向に分布軸を持つことから(第5図)、OrPの給源を八甲田火山と考えた。しかし、改めて等厚線図を見直すと、分布軸の延長上には八甲田火山と十和田火山があり、給源位置はどちらでも説明可能である(第5図)。OrPは普通角閃石を非常に多く含むことで特徴づけられる(東北地方第四紀研究グループ, 1969;

岩崎, 1983)。工藤ほか(2004)は、八甲田火山の山体構成物が普通角閃石斑晶を含まないこと、近接する時代の十和田火山起源のテフラが普通角閃石斑晶を多く含む傾向があることから、OrPが十和田火山起源である可能性を指摘した。本報告では同様の理由により、OrPを十和田火山起源のテフラとして扱う。

TE9: 岩崎(1983)により命名されたテフラである。既存研究報告では給源火山は示されていない。岩崎(1983)

十和田火山の積算マグマ噴出量階段図（工藤）



第5図 中川ほか(1986)によるT-3及びOrPの等層厚線図。数字はテフラの層厚(cm)。八甲田火山の位置は最高峰の大岳の位置で代表させた。

Fig. 5 Isopach maps for the T-3 and OrP by Nakagawa *et al.* (1986). Numerals show the thickness of tephra in centimeters. The location of Hakkoda Volcano is represented by the location of its highest peak, Mt. Odake.

は、TE9が青森県東北町乙供～七戸町～十和田市付近に分布すると記載している。筆者による調査では十和田市～東北町の地点1, 2, 3で確認した(第4図)。等層厚線図が示されていないため、分布軸から給源火山を判断することはできない。本報告ではTE9が普通角閃石を含むことから、OrPと同様の理由により、TE9を十和田火山起源として扱う。

**T-7**：大池・中川(1979)により命名されたテフラである。松山・大池(1986)によれば「青灰色ラピリ・発泡状態の良くない黄色・濃橙褐色浮石の混合した固いレンガ様火山灰」とされ、中川ほか(1986)では等層厚線図も示されている。しかし、筆者のこれまでの調査では、本テフラの分布範囲とされている地域において複数の露頭を観察しているものの、その存在をまだ確認できていない。等層厚線図(中川ほか, 1986)からは、八甲田火山起源とも十和田火山起源とも取れる分布を示す。いずれにしろ、情報が不足しているため今回の階段図には不採用とする。

**T-13**：大池・中川(1979)により命名されたテフラである。松山・大池(1986)によれば「粘土質中粒浮石」とされ、中川ほか(1986)では等層厚線図も示されている。しかし、筆者のこれまでの調査では、本テフラの分布範囲とされている地域において複数の露頭を観察しているものの、その存在をまだ確認できていない。等層厚線図からは十和田火山起源と判断される。T-13については不明な点が多く、大和(1989)により「T-13?」と示されたテフラが大和(2005)ではCP13と示されていることから、T-13とCP13は同一のテフラである可能性もあるが、説明が

なく詳細を確認できない。いずれにしろ、T-13が露頭で確認できていないこと、今回の階段図ではCP13を露頭で確認しこれを採用していることから、T-13については不採用とする。

**高館a火山灰流凝灰岩**：中川ほか(1972)により命名された火砕流堆積物である。松山・大池(1986)によれば、SP直上層準にある「火山灰流凝灰岩」であり、青森県十和田市～七戸町の砂土路川や七戸川下流域に分布するとされている。しかし、筆者はこれまでにこれらの場所を対象に何度か探索を行っているものの、噴火エピソードQの奥瀬火砕流堆積物(大池・中川, 1979)の構成物質を母材とした土石流あるいは河川成堆積物の存在は確認しているが、相当する火砕流堆積物の存在を確認するには至っていない。本テフラについては不明な点が多いことから、今回は不採用とする。

5. 先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの年代見積もり

先カルデラ期～カルデラ形成期初期のテフラの年代を、年代基準とするテフラとテフラ間に挟まれる古土壌層の厚さから見積もった。この手法は、「レスクロノメトリー」とも呼ばれ(早川, 1991, 1995)、古土壌層の堆積速度を一定と仮定して年代が求められる。そのため、年代基準とするテフラの年代確度とそれらの挿入密度が高いほど、より確度の高い年代が求められる。年代基準としたテフラは以下の通りである。

### 5.1 年代基準テフラ

**WP**：東北地方第四紀研究グループ(1969)により命名されたテフラであり、八甲田火山を給源とする(松山・大池, 1986; 中川ほか, 1986)。多くの露頭で確認され(第3図), 層厚も厚く層相も特徴的なため, 良好な鍵テフラである。十和田火山起源のテフラはWPよりも上位層準で出現する(岩崎, 1983; 松山・大池, 1986; 工藤, 2005)。WPの年代は, 八戸沖の海洋コアC90001Cでの酸素同位体層序から210~205 kaと見積もられている(Matsu'ura *et al.*, 2017)。本報告ではこれを採用し, WPの年代を210 kaとした。

**Toya**：北海道の洞爺火山を給源とする広域テフラである(町田ほか, 1987)。多くの露頭で出現する良好な鍵テフラである(第3図; 第4図)。Toyaの年代は, 酸素同位体層序より約106 ka, あるいは $109 \pm ca.3$  kaが妥当と考えられている(東宮・宮城, 2020)。本報告ではこの主張も踏まえた上で, 先述したWPの年代として海洋コアC90001Cでの酸素同位体層序年代を採用していること, 同じくC90001Cの酸素同位体層序においてToyaの年代が106 kaと見積もられていること(Matsu'ura *et al.*, 2014)から, Toyaの年代を106 kaとした。

**AP**：大池ほか(1970)により命名されたテフラであり, 十和田火山を給源とする(中川ほか, 1986)。多くの露頭で出現する良好な鍵テフラである(第3図; 第4図)。本テフラ自体は既存研究報告により年代決定されていない。町田ほか(1985)は, 上北平野においてAPの直上, T-17の直下に阿蘇4火山灰(Aso-4)が存在することを示した。筆者による調査ではAso-4は確認できなかったが(第3図; 第4図), T-17とAPの間の厚さ5~20 cmの土壤層中にクリプトテフラとして存在する可能性がある。Aso-4の年代は, 海洋コアの酸素同位体層序より約87 kaと見積もられている(Aoki, 2008)。本報告では, APがAso-4下位の近い層準に存在すること(町田ほか, 1985)から, APの年代を88 kaとし, これを年代基準テフラとして用いる。

**RP**：東北地方第四紀研究グループ(1969)により命名されたテフラであり, 十和田火山を給源とする(Hayakawa, 1985; 中川ほか, 1986)。多くの露頭で出現する良好な鍵テフラである(第3図; 第4図)。Ito *et al.* (2017)は, RP上下層準の古土壤層中の石英粒子についてOSL年代測定を行い, 年代値と古土壤層の厚さから, RPの年代として $61 \pm 4$  kaを示した。この年代はRPの最も妥当な年代とされていることから(工藤ほか, 2019), 本報告ではRPの年代を61 kaとした。

**KbP**：大池ほか(1970)により命名されたテフラであり, 十和田火山を給源とする(Hayakawa, 1985; 中川ほか, 1986)。多くの露頭で出現する良好な鍵テフラである(第3図; 第4図)。Ito *et al.* (2017)は, KbP上下層準の古土壤層中の石英粒子についてOSL年代測定を行い, 年代値と古土壤層の厚さから, KbPの年代として $58 \pm 4$  kaを示し

た。この年代値を採用し, 本報告ではKbPの年代を58 kaとした。

**KR及びOf**：KR(切田テフラ: Hayakawa, 1985)とOf(大不動火砕流堆積物: 東北地方第四紀研究グループ, 1969; 早川, 1993)は, 十和田火山の噴火エピソードN(Hayakawa, 1985)による噴出物である。十和田火山の周囲に広く分布し, 多くの露頭で出現する良好な鍵テフラである(第3図; 第4図)。噴火エピソードNの噴出物については多数の $^{14}\text{C}$ 年代が報告されているが(例えば, 工藤ほか, 2019), 本報告では本噴出物の年代として, 最新の $^{14}\text{C}$ 年代値である小岩ほか(2007)による $31,930 \pm 210$  BPを採用する。この年代値について暦年較正すると $36,069 \sim 36,482$  cal BP ( $1\sigma$ )となる。このことから, KR及びOfの年代を36 kaとする。

### 5.2 年代の算出

各テフラの年代を, 直近の年代基準テフラに上下を挟まれ, その間に不整合のない連続層相が確認できる露頭を対象として算出した。複数の露頭で年代を算出できる場合は, それらの平均値をもって各テフラの年代とした。露頭毎の層厚データ, 露頭毎に算出された年代, 年代の平均値を第2表に示す。ただし, 一部のテフラ(TE-7, QP, OP1)については, 直近の年代基準テフラに上下を挟まれる関係を露頭単位で確認できなかったため, この方法では年代を求めることができない。また, 平均年代値を求めたものの, 上下のテフラと年代が逆転するテフラ(OrP, CP13)が一部で認められる。以下では, これらのテフラについての対処を示す。

**TE-7**：本テフラについては, 地点15の1地点で確認している。地点15では下位の年代基準テフラが認められないため(第4図), 年代を算出できない。そこで本テフラの年代を, NPの平均年代値(184 ka: 第2表)を基準とし, 地点15でのNPと本テフラ間の古土壤層の厚さ(9 cm: 第4図)とWP-Toya間の平均堆積速度(2.5 cm/1000年: 第2表)を用いて算出した。算出された年代は180 kaである。

**OrP**：本テフラの平均年代値は155 kaと算出される(第2表)。しかしこの年代は上位のTE9(161 ka), T-4(158 ka)の年代と矛盾する。そこで, 本テフラの年代を, T-4の平均年代値(158 ka: 第2表)を基準とし, 地点1でのT-4と本テフラ間の古土壤層の厚さ(19 cm: 第3図)とWP-Toya間の平均堆積速度(2.5 cm/1000年: 第2表)を用いて算出した。算出された年代は166 kaである。

**CP13**：本テフラの平均年代値は94 kaと算出される(第2表)。しかしこの年代は上位のCP14(95 ka)の年代と矛盾する。CP13はCP14の下位層準にあるが(大和, 2005), 筆者による調査では両者を同じ露頭で確認できていないため, これが年代に矛盾が生じた原因と考えられる。そこで, 本テフラの年代を, CP14の平均年代値(95 ka: 第2表)を基準とし, CP14とCP13の間の古土壤層の厚さ(5





cm程度：大和，2005）とToya-AP間の平均堆積速度（5.5 cm/1000年：第2表）を用いて算出した。算出された年代は96 kaである。

**QP**：本テフラについては、地点15及び16の2地点で確認しているが、上位側で直近する年代基準テフラ（RP）との関係を把握できないため（第4図）、年代を算出できない。そこで、本テフラの年代を、APの年代値（88 ka）を基準とし、地点15でのAPと本テフラの間の古土壌層の厚さ（14 cm：第4図）とAP-RP間の平均堆積速度（4.5 cm/1000年：第2表）を用いて算出した。算出された年代は85 kaである。

**OP1**：本テフラについては、地点15の1地点で確認しているが、上位側で直近する年代基準テフラ（RP）との関係を把握できないため（第5図）、年代を算出できない。そこで、本テフラの年代を、APの年代値（88 ka）を基準とし、地点15でのAPと本テフラの間の古土壌層の厚さ（27 cm：第4図）とAP-RP間の平均堆積速度（4.5 cm/1000年：第2表）を用いて算出した。算出された年代は82 kaである。

## 6. 先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの噴出量見積もり

先カルデラ期～カルデラ形成期初期のテフラについて、中川ほか（1986）の等層厚線図を用いて噴出量を見積もった。見積もりにはHayakawa（1985）の経験式（前述）を用いた。この方法を用いた理由は、既存研究報告が主にこの方法により噴出量を見積もっていること（Hayakawa, 1985；久利・栗田，2003；工藤，2010a）、等層厚線が1本でも噴出量を求めることが可能であることによる。ただし、噴出量を求める際には等層厚線図が閉じている必要がある。しかし、中川ほか（1986）の等層厚線図は給源側で閉じていない。そこで、十和田湖付近を給源と仮定して等層厚線図を補間し、これを用いて噴出量を求めた。また、中川ほか（1986）の等層厚線図には、各露頭の層厚データが記されていない。そのため本報告では、筆者によるフィールド調査の状況から見て、最も精度良く描けていると推定される等層厚線を選んで噴出量の見積もりに用いた。噴出量のDRE換算体積については、岩石密度を2.5 g/cm<sup>3</sup>とし、堆積物密度を1.0 g/cm<sup>3</sup>として求めた。補間した等層厚線図を第6図、第7図、第8図及び第9図に示す。等層厚線の情報及び見積もった噴出量、その他の噴出物のコンパイルデータと合わせて第3表に示す。なお、KbPとRPについては、Hayakawa（1985）も等層厚線図を描いており、噴出量を見積もっている。しかし、層厚を確認した地点が少ないことから、より確認地点が多いと推定される中川ほか（1986）の等層厚線図を用いて噴出量を見積もった。また、TE9については等層厚線図が示されておらず、筆者による確認地点も3ヶ所しかないため（第3図）、現時点では噴出量の見積もりが

不可能である。以下に、特殊な事例としてCP（CP14及びCP13）に関する補足説明を行う。

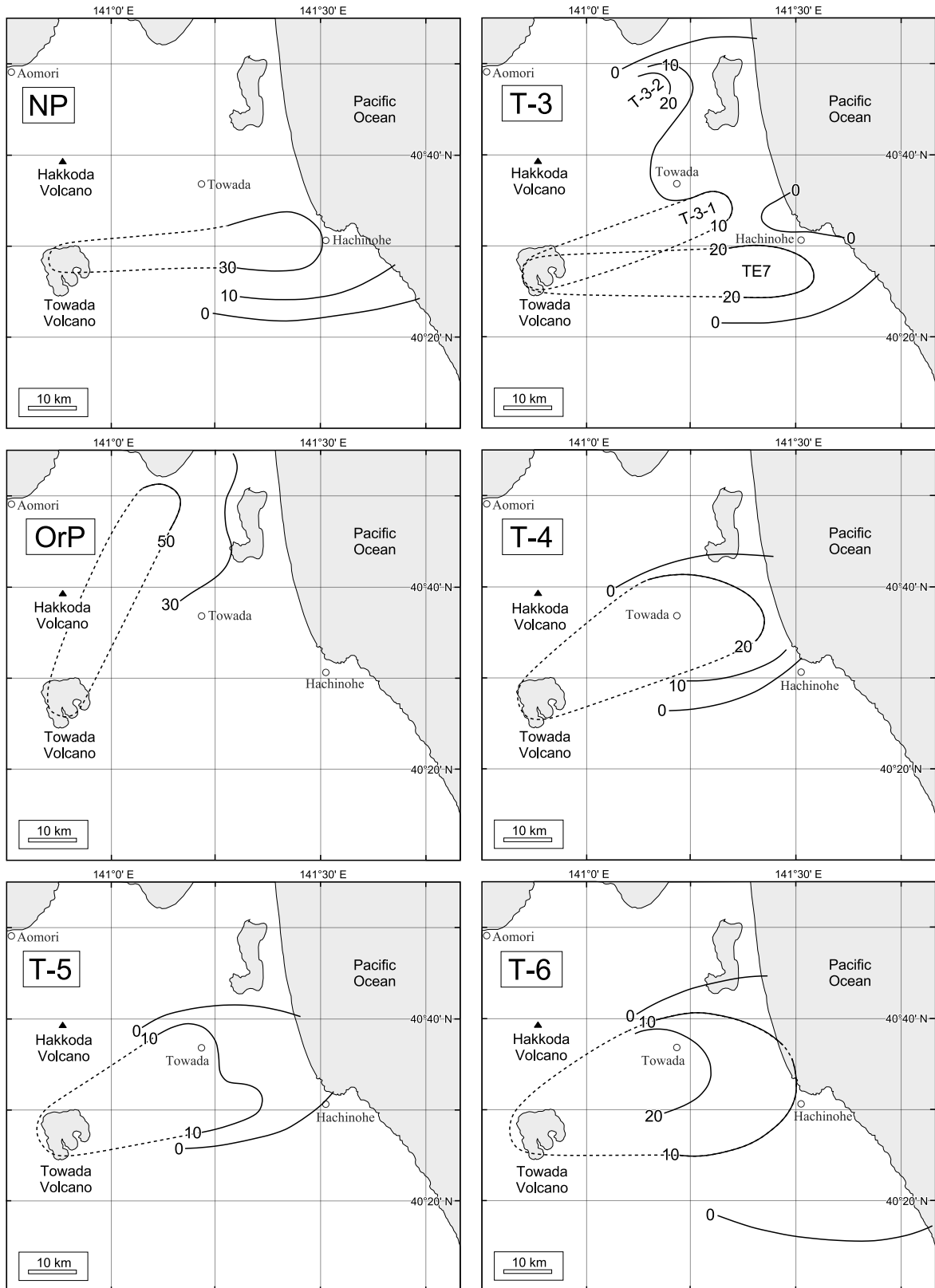
**CP**：本テフラは、大池ほか（1970）により命名され、中川ほか（1986）により等層厚線図が示された。その後、大和（2005）は、CPが古土壌層を境として2枚に細分されることを示し、上位側をCP14、下位側をCP13と命名した。CP14は上北平野の北部、CP13は上北平野の南部に分布し、筆者による調査でも多くの露頭で確認されている（第3図；第4図）。中川ほか（1986）によるCPの等層厚線図によれば、不明瞭ながら分布軸を2本確認することができ（第7図）、それぞれがCP14とCP13に相当する可能性がある。しかし、両者が重なっている部分も多いと推定され、分布軸の違いもやや不明瞭である。そこで、CP14とCP13の噴出量は、単純計算によりそれぞれCPの等層厚線から求めた噴出量の半量とした。

## 7. 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図

十和田火山の階段図を第10図に、階段図のデータセットを第3表に示す。本報告では階段図の作成方法、データセット及び作成結果のみを示すこととし、階段図から読み取れる特徴の記載や階段図を用いた考察については別稿に譲る。なお第10図において、後カルデラ期初期の二ノ倉スコリア及び中山崎溶岩の噴出時期（15.7～11.7 ka）は、階段ではなくスロープとして表現してある。その理由は、この時期が断続的かつ頻繁に噴火が発生していた時期であり（例えば、Hayakawa, 1985）、個々の噴火の年代と噴出量を詳細に把握することが困難なことによる。以下では、この階段図を利用する際の注意事項と今後の課題について述べる。

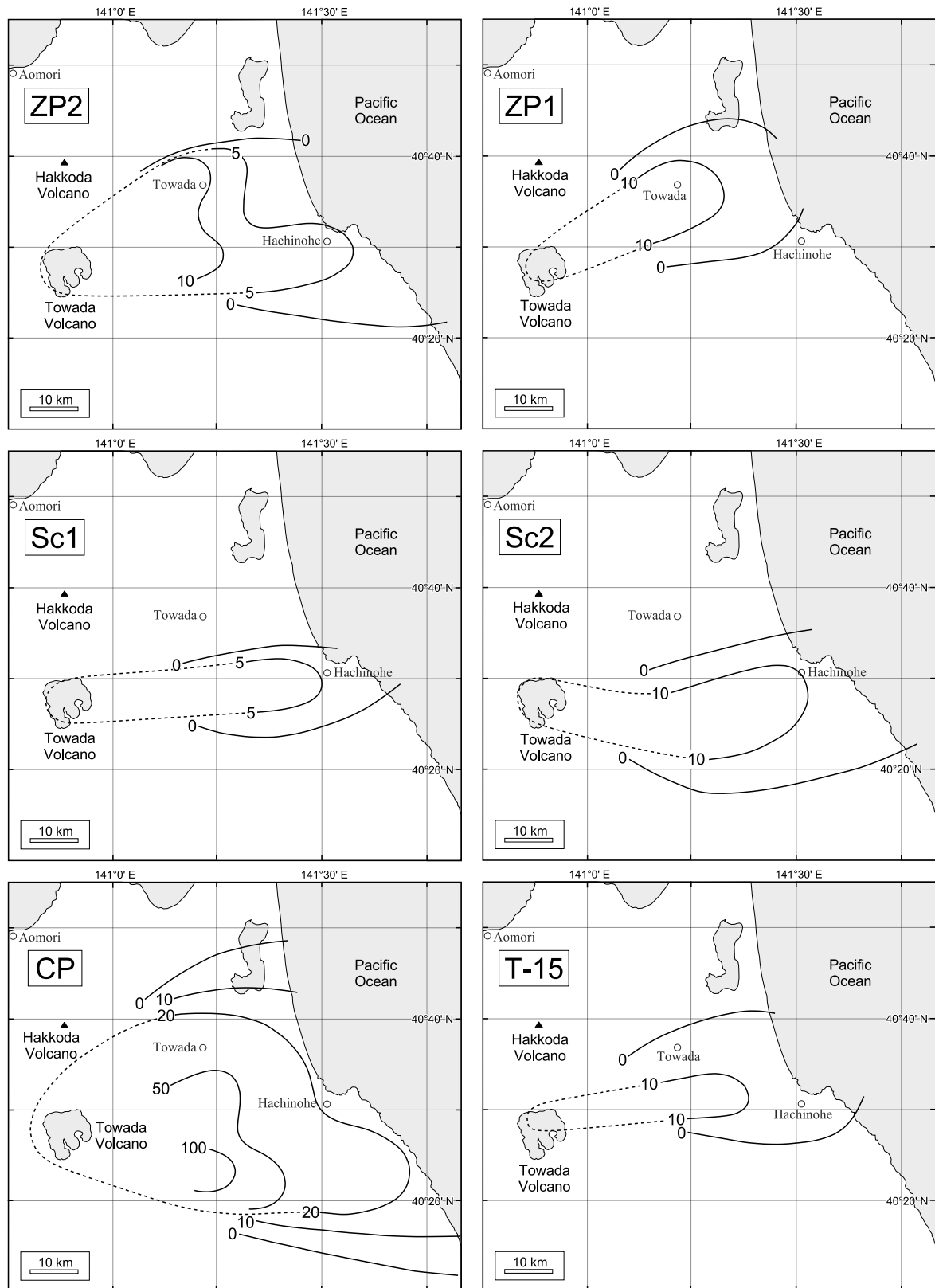
注意事項としてまず挙げるべき点は、階段図の基となる年代と噴出量データは、それ相応の誤差を伴うことである。古文書に記録された歴史時代の噴火であれば、その古文書の記録が真正であるならば、その年代の誤差は考慮しなくても良い。一方、地質記録のみで確認される噴火の場合、その年代は見積もり手法によって相応の誤差を伴うことになる。例えば放射年代の場合は、<sup>14</sup>C年代では数十年～数百年、OSL年代では数千年以上の測定誤差を伴う。さらに、実際には野外調査においても不確実性（例えば、年代測定試料としての妥当性や採取時のコンタミ等）が生じうる。そのため噴火年代の真の誤差を評価することは難しい。本報告では、十和田火山の先カルデラ期～カルデラ形成期初期のテフラについて、年代基準テフラとテフラ間に挟まれる古土壌層の厚さから年代を見積もった（第2表）。これらの年代は、年代基準テフラ自体の年代誤差、露頭毎の古土壌層の層厚のばらつき、また、古土壌層の堆積速度が一定である保証がないことを考慮に入れると、絶対値としては数百年～数千年、場合によってはそれ以上の誤差が想定される。噴出量の誤差についても厳密な評価は難しい。野外調査での層厚

十和田火山の積算マグマ噴出量階段図 (工藤)



第6図 十和田火山起源テフラの等層厚線図(その1). 実線の等層厚線は中川ほか(1986)による. 破線の等層厚線は本研究により補間したもの. 数字はテフラの層厚(cm). 八甲田火山の位置は最高峰の大岳の位置で代表させた.

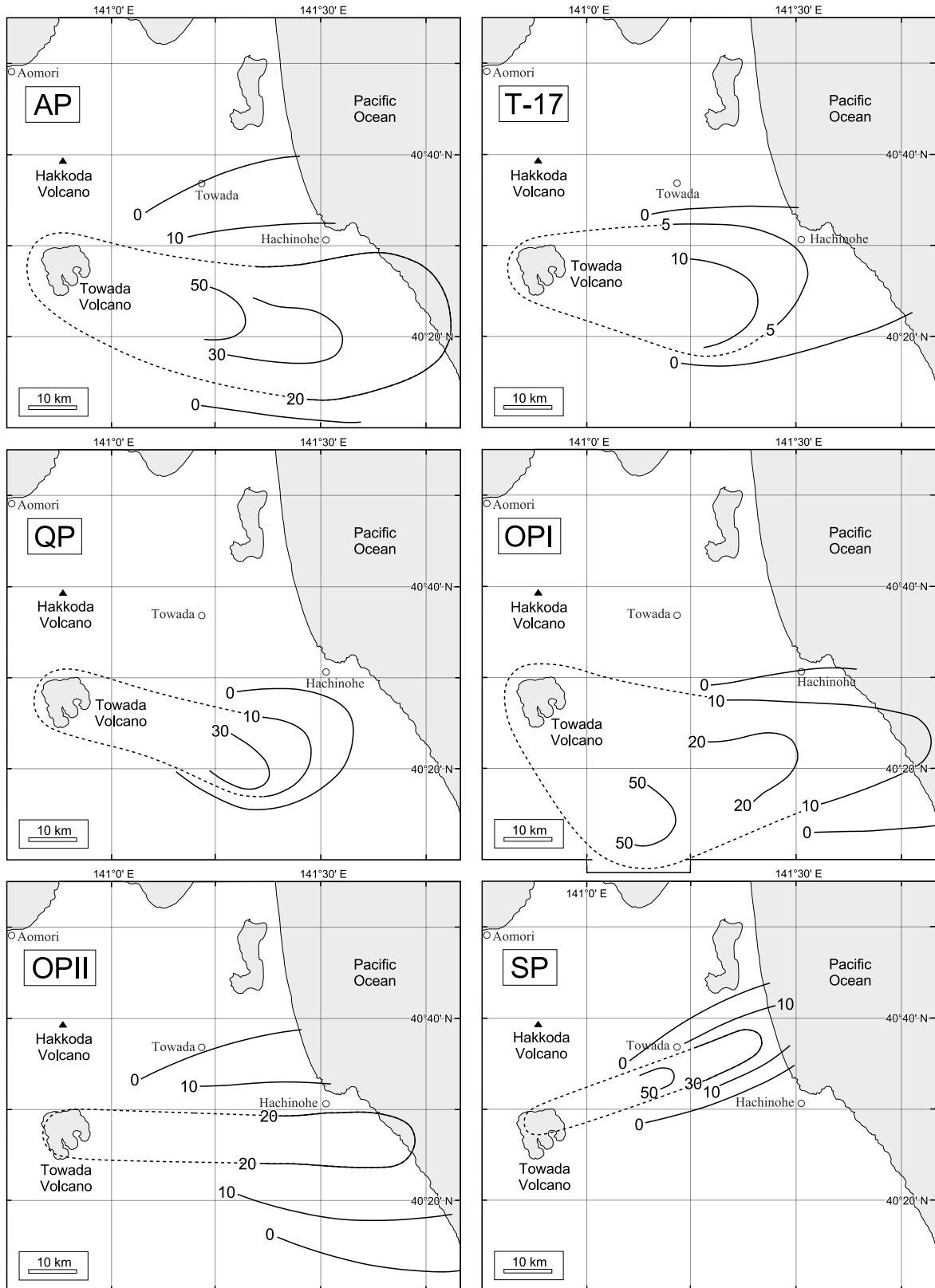
Fig. 6 Isopach maps for tephros from Towada Volcano (part 1). The solid isopach lines are from Nakagawa *et al.* (1986). The dashed isopach lines are interpolated by this study. Numerals show the thickness of tephra in centimeters. The location of Hakkoda Volcano is represented by the location of its highest peak, Mt. Odake.



第7図 十和田火山起源テフラの等層厚線図(その2)。実線の等層厚線は中川ほか(1986)による。破線の等層厚線は本研究により補間したもの。数字はテフラの層厚(cm)。八甲田火山の位置は最高峰の大岳の位置で代表させた。

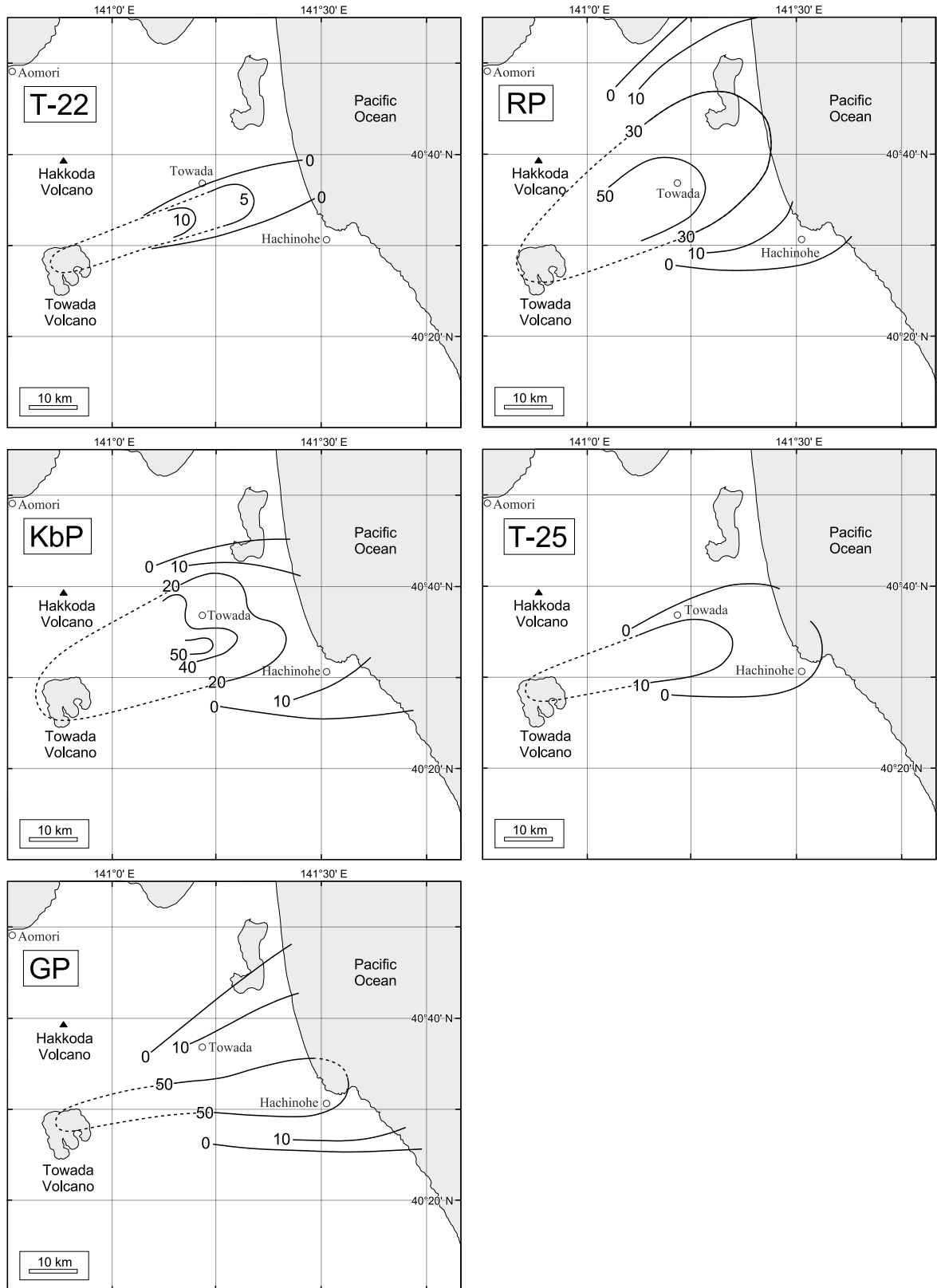
Fig. 7 Isopach maps for tephra from Towada Volcano (part 2). The solid isopach lines are from Nakagawa *et al.* (1986). The dashed isopach lines are interpolated by this study. Numerals show the thickness of tephra in centimeters. The location of Hakkoda Volcano is represented by the location of its highest peak, Mt. Odake.

十和田火山の積算マグマ噴出量階段図 (工藤)



第8図 十和田火山起源テフラの等層厚線図(その3). 実線の等層厚線は中川ほか(1986)による. 破線の等層厚線は本研究により補間したもの. 数字はテフラの層厚(cm). 八甲田火山の位置は最高峰の大岳の位置で代表させた.

Fig. 8 Isopach maps for tephra from Towada Volcano (part 3). The solid isopach lines are from Nakagawa *et al.* (1986). The dashed isopach lines are interpolated by this study. Numerals show the thickness of tephra in centimeters. The location of Hakkoda Volcano is represented by the location of its highest peak, Mt. Odake.



第9図 十和田火山起源テフラの等層厚線図(その4)。実線の等層厚線は中川ほか(1986)による。破線の等層厚線は本研究により補間したもの。数字はテフラの層厚(cm)。八甲田火山の位置は最高峰の大岳の位置で代表させた。

Fig. 9 Isopach maps for tephra from Towada Volcano (part 4). The solid isopach lines are from Nakagawa *et al.* (1986). The dashed isopach lines are interpolated by this study. Numerals show the thickness of tephra in centimeters. The location of Hakkoda Volcano is represented by the location of its highest peak, Mt. Otake.



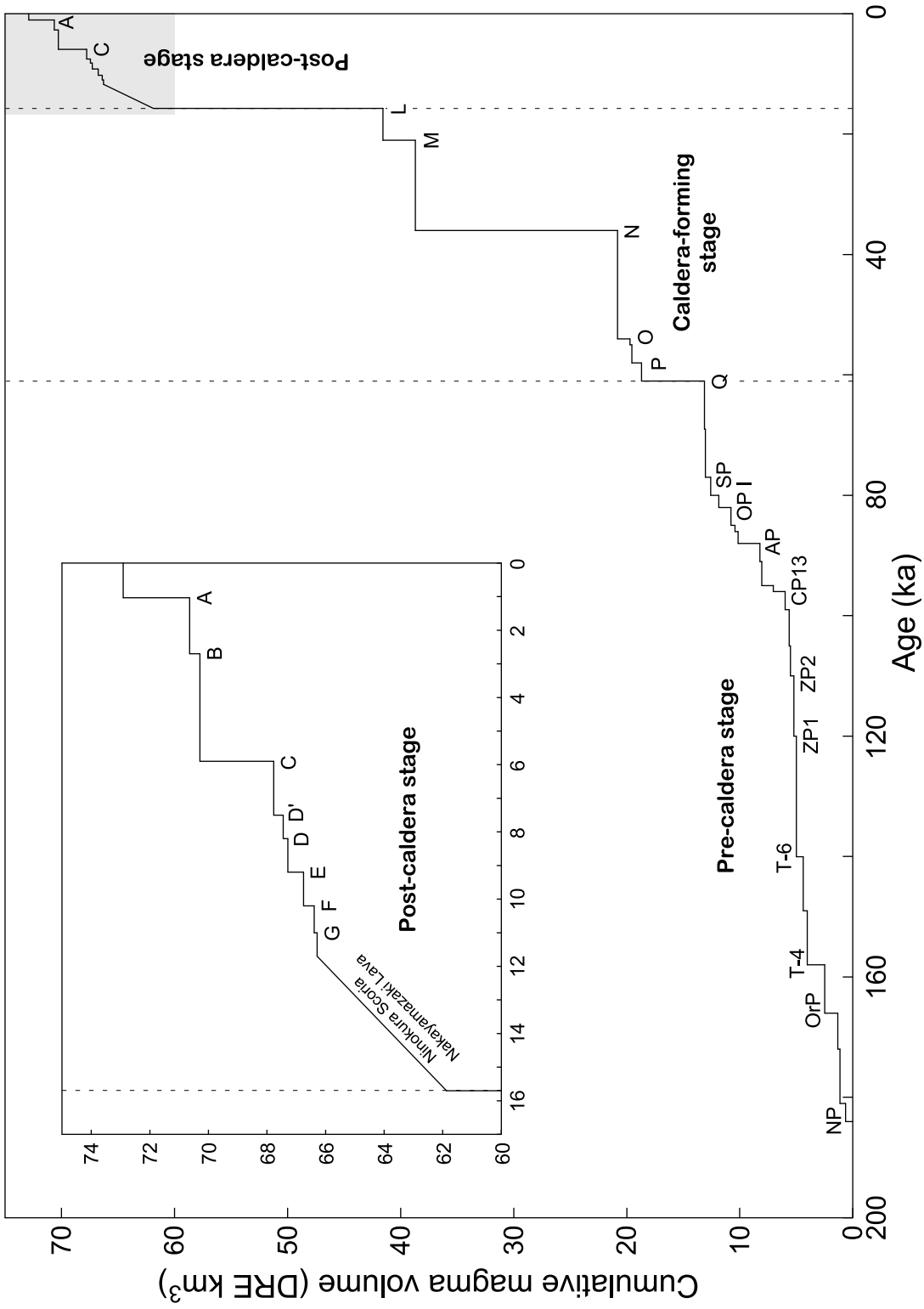
十和田火山の積算マグマ噴出量階段図 (工藤)

第3表 十和田火山噴出物の噴出量と年代の一覧表

Table 3 List of eruptive volume and age of the eruptive products from Towada Volcano

Stage	Eruptive episode	Tephra name (or tephra symbol**)	Volume (km <sup>3</sup> , DRE)	Total volume (km <sup>3</sup> , DRE)	Reference	Used isopach (cm)	Area (km <sup>2</sup> )	remark	Age (ka)	Method	Reference	Used radiometric age	Source volcano
Post-caldera stage	A	Kemanai PFD.	1.8	2.27	Hayakawa (1985)				1.035	AD	Machida <i>et al.</i> (1981)		Towada
		Oyu3 P.	0.04		Hayakawa (1985)						Hayakawa & Koyama (1998)		
		Oyu2 A.	0.21		Hayakawa (1985)								
		Oyu1 P.	0.21		Hayakawa (1985)								
	B	Sobe A.	0.32	0.35	Hayakawa (1985)				2.7	14C	Kudo & Sasaki (2007)	2,550 ± 20 BP	Towada
		Mayogatai P.	0.04		Hayakawa (1985)								
	C	Utarube A.	0.59	2.52	Hayakawa (1985)				5.9	14C	McLean <i>et al.</i> (2018)	5986-5899 cal BP	Towada
		Kanegasawa P.	0.32		Hayakawa (1985)								
		Chuseri P.	1.60		Hayakawa (1985)								
	D'	Ogurayama L.	0.22	0.32	This study				7.5	14C	Kudo & Sasaki (2007)	6,670 ± 25 BP	Towada
		Herai A.	0.10		Kudo (2010a)								
	D	Nakanosawa A.	0.08	0.16	Kudo (2010a)				8.2	14C	Kudo & Sasaki (2007)	7,420 ± 25 BP	Towada
		Oguni P.	0.08		Hayakawa (1985)								
	E	Kaimori A.	0.15	0.54	Hayakawa (1985)				9.2	14C	Kudo (2008)	8,110 ± 30 BP	Towada
	Nambu P.	0.39		Hayakawa (1985)						Hayakawa (1985)	8,370 ± 170 BP		
F	Kabayama A.	0.14	0.36	Hayakawa (1985)				10.2	ST	Kudo (2008)		Towada	
	Natsuzaka S.	0.23		Hayakawa (1985)									
G	Shingo P.	0.10	0.10	Hayakawa (1985)				11	14C	Kudo (2008)	9,970 ± 35 BP 9,330 ± 35 BP	Towada	
H-K	Ninokura S.	1.82	4.42	Kuri & Kurita (2003)				15.7-11.7	ST	Kudo (2008)		Towada	
	Nakayamazaki L.	2.60		Hayakawa (1985)				15.7-11.7	ST	Kudo (2008)		Towada	
Caldera-forming stage	L	Hachinohe PFD.	16.0	20.3	Hayakawa (1985)				15.7	14C	Horiuchi <i>et al.</i> (2007)	13,133 ± 33 BP	Towada
		HP6	0.65		Hayakawa (1985)								
		HP5	0.93		Hayakawa (1985)								
		HP4	0.34		Hayakawa (1985)								
		HP3	0.16		Hayakawa (1985)								
		HP2	0.08		Hayakawa (1985)								
		HP1	2.18		Hayakawa (1985)								
	M	Kumoi PFD.	0.3	2.82	Kudo (2022)				21	14C	Kudo (2022)	17,390 ± 60 BP	Towada
		Karatamazawa P.	0.3		Kudo (2022)								
		Maiba 2 A.	2.2		Hayakawa (1985)								
		Maiba 1 P.	0.02		Hayakawa (1985)								
	N	Ofudo PFD.	16.0	17.9	Hayakawa (1985)				36	14C	Koiva <i>et al.</i> (2007)	31,930 ± 210 BP	Towada
		Kirida 4 A.	1.66		Hayakawa (1985)								
		Kirida 3 P.	0.17		Hayakawa (1985)								
		Kirida 2 A.	0.02		Hayakawa (1985)								
		Kirida 1 A.	0.02		Hayakawa (1985)								
	O	GP	1.10	1.10	This study*	50	449		54	ST	This study		Towada
		T-25	0.18	0.18	This study*	10	369		55	ST	This study		Towada
	P	KbP	0.84	0.84	This study*	20	857		58	OSL	Ito <i>et al.</i> (2017)	58 ± 4 ka	Towada
	Q	Okuse PFD.	4.0	5.58	Hayakawa (1985)				61	OSL	Ito <i>et al.</i> (2017)	61 ± 4 ka	Towada
		RP	1.58		This study*	30	1079						
	T-22		0.06	0.06	This study*	5	264		69	ST	This study		Towada
R	SP	0.48	0.48	This study*	30	329		77	ST	This study		Towada	
S	OP II	0.72	0.72	This study*	20	740		80	ST	This study		Towada	
	OP I	1.06	1.06	This study*	10	2176		82	ST	This study		Towada	
	QP	0.37	0.37	This study*	10	766		85	ST	This study		Towada	
T	T-17	0.29	0.29	This study*	5	1193		86	ST	This study		Towada	
	Aso-4							87	OIS	Aoki (2008)		Aso	
U	AP	1.92	1.92	This study*	20	1968		88	ST	This study		Towada	
	T-15	0.15	0.15	This study*	10	312		91	ST	This study		Towada	
V	CP14	1.04	1.04	This study*	20	2130	(1)	95	ST	This study		Towada	
	CP13	1.04	1.04	This study*	20	2130	(1)	96	ST	This study		Towada	
	Sc2	0.35	0.35	This study*	10	723		99	ST	This study		Towada	
	Sc1	0.13	0.13	This study*	5	521		105	ST	This study		Towada	
Pre-caldera stage		Toya							106	OIS	Matsu'ura <i>et al.</i> (2014) Tomiya & Miyagi (2020)		Toya
		ZP2	0.29	0.29	This study*	5	1177		110	ST	This study		Towada
	X	ZP1	0.23	0.23	This study*	10	473		120	ST	This study		Towada
		T-6	0.61	0.61	This study*	10	1254		140	ST	This study		Towada
		T-5	0.34	0.34	This study*	10	701		149	ST	This study		Towada
		T-4	1.56	1.56	This study*	40	798		158	ST	This study		Towada
		TE9							161	ST	This study		Towada
		OrP	1.16	1.16	This study*	50	474		166	ST	This study		Towada
		T-3-1	0.17	0.17	This study*	10	343		172	ST	This study		Towada
		TE7	0.50	0.50	This study*	20	513		180	ST	This study		Towada
		NP	0.64	0.64	This study*	30	439		184	ST	This study		Towada
		WP							210	OIS	Matsu'ura <i>et al.</i> (2017)		Hakkoda

\*Volume estimated by the method of Hayakawa (1985) using isopachs by Nakagawa *et al.* (1986). \*\*See Table 1. (1) Half of the volume of CP tephra. Abbreviations: A., Ash; P., Pumice; S., Scoria; L., Lava; PFD., Pyroclastic Flow Deposits; AD, ancient documents; 14C, radiocarbon dating; ST, stratigraphy; OIS, oxygen isotope stratigraphy; OSL, optically stimulated luminescence age and stratigraphy.



第10図 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図. 各噴火イベントの噴出量と年代を第3表に示す.  
 Fig. 10 Cumulative volume step-diagram for eruptive magmas of Towada Volcano. The eruptive volume and age of each eruption event is listed in Table 3.

データ取得時に生じる不確実性(例えば、堆積物が堆積当初の層厚を保持しているか等)に加え、見積もり手法によっても噴出量に差が生じる。降下テフラについては、手法によって噴出量が桁で変わってくる場合も報告されている(例えば、Bonadonna and Houghton, 2005)。そのため、噴出量を絶対値として扱う場合には特に注意が必要である。本報告の場合、同じ手法で統一していることから、手法による差は考慮しなくて良いものの、Hayakawa (1985)の手法では用いる等層厚線によって噴出量変動するという不確実性が生じる。また、既報による火砕流堆積物の体積が概算的な算出値であることも念頭に置くべきである。以上のことから、少なくとも十和田火山の階段図の場合、年代と噴出量にはそれ相応の誤差が想定される。そのため、小山・吉田(1994)のような詳細な議論は慎重に行うべきであろう。一方、詳細な層序により噴火の順番が明確であること、降下テフラの噴出量見積もり手法が統一されていることから、1つの火山の中で活動様式の長期的な時代変遷を評価する材料として利用することは問題ないと考えられる。

また、本報告で示した階段図は、十和田火山の全噴出物が反映されたものではない点でも注意を要する。後カルデラ期については、御門石溶岩(噴出量0.013 km<sup>3</sup>)を除いて全ての噴出物が反映されており、ほぼ全ての噴出物が反映されたものとして扱って差し支えない。カルデラ形成期に関しては、現在の十和田カルデラ縁より外側に分布する噴出物はほぼ網羅されている。しかし、カルデラ(直径約11 km)の陥没により給源付近の噴出物が失われているため、この中に限定して存在した火山体やカルデラ縁より内側に分布が限られるような小規模テフラについては、存在そのものが確認できないため階段図に反映することが不可能である。先カルデラ期については、遠方に分布するテフラのみが反映されており、給源近傍で産する溶岩と火砕物は反映されていない。そのため、相当量の噴出物が未反映な状況である。実際に、先カルデラ期の給源近傍相と遠方相を同じ層準で比較すると、近傍相の方でテフラの枚数が増えることが示されており(工藤, 2018a)、相当数のテフラが階段図に未反映な状況になっていると考えられる。かつて、工藤ほか(2011)は、階段図のデータを利用して噴火発生頻度とその時間変化に関する議論を行ったが、ある程度以下の規模の噴火については把握できていない公算が高いことから、このような議論は慎重に行う必要がある。

目下の課題としては、先カルデラ期の給源近傍相を今後どの程度階段図に反映できるかが挙げられる。概算的な値ではあるが、梅田ほか(1999)によると、先カルデラ期の給源近傍相に相当する部分は10.3 km<sup>3</sup> (DRE)と見積もられている。現段階の階段図では合計72.9 km<sup>3</sup> (DRE)の噴出物が反映されており(第8図)、これにさらに10 km<sup>3</sup>程度の噴出物が加算されることになる。この加

算される部分が、先カルデラ期に満遍なく加算されるのか、それとも特定の時期に偏って加算されるのか、それ次第によって階段図の形状が大きく変わる可能性がある。今後、先カルデラ期の給源近傍相について、詳細な層序を構築するとともに、遠方テフラとの対比を行い、なるべく多くの年代指標を把握した上で、噴出物の年代と量を見積もり、階段図に反映させる作業が必要である。また、一部の噴出物では噴出量の再検討自体も必要である。一例として、噴火エピソードQの奥瀬火砕流堆積物(大池・中川, 1979)が挙げられる。奥瀬火砕流堆積物の噴出量はHayakawa (1985)により見積もられた。しかし最近、工藤ほか(2019)により奥瀬火砕流堆積物の分布が大幅に改訂され、より広域に厚く分布することが判明した。そのため、本堆積物の噴出量については再見積もりが必須の課題となっている。いずれにしろ、本報告で示した階段図は、調査研究途上の段階のものであり、以上のような注意事項を踏まえた上で利用されるべきである。

**謝辞：**編集担当の宮城磯治氏には本報告の査読修正対応においてお世話になった。査読者の及川輝樹氏には、本報告を改善する上で有益なコメントをいただいた。関係各位に深く感謝申し上げる。

## 文 献

- Aoki, K. (2008) Revised age and distribution of ca. 87 ka Aso-4 tephra based on new evidence from the northwest Pacific Ocean. *Quaternary International*, **178**, 100–118.
- Bacon, C. R. and Lanphere, M. A. (2006) Eruptive history and geochronology of Mount Mazama and the Crater Lake region, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, **118**, 1331–1359.
- Bonadonna, C. and Houghton, B. F. (2005) Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, **67**, 441–465.
- 原子力規制委員会(2013) 原子力発電所の火山影響評価ガイド。原子力規制委員会。 <https://www.nsr.go.jp/data/000069143.pdf> (閲覧日：2022年1月14日)
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **60**, 507–592.
- 早川由紀夫(1991) テフラとレスからみた火山の噴火と噴火史。第四紀研究, **30**, 391–398.
- 早川由紀夫(1993) 火山の地質巡検案内2：十和田湖。群馬大学教育学部紀要 自然科学編, **41**, 53–78.
- 早川由紀夫(1995) 日本に広く分布するローム層とその成因。火山, **40**, 177–190.
- 早川由紀夫・小山真人(1998) 日本海をはさんで10世紀に相次いで起こった二つの大噴火の年月日—十和田湖と白頭山—。火山, **43**, 403–407.

- Hildreth, W., Lanphere, M. A. and Fierstein, J. (2003) Geochronology and eruptive history of the Katmai volcanic cluster, Alaska Peninsula. *Volcanology and Geothermal Research*, **214**, 63–114.
- 広井良美・宮本 毅・田中倫久(2015)十和田火山平安噴火(噴火エピソードA)の噴出物層序及び噴火推移の再検討. *火山*, **60**, 187–209.
- 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.
- 井上 武・蜂屋可典(1962)十和田湖地形・地質調査報告. 青森県水産商工課, 12p.
- Ito, K., Tamura, T., Kudo, T. and Tsukamoto, S. (2017) Optically stimulated luminescence dating of Late Pleistocene tephric loess intercalated with Towada tephra layers in northeastern Japan. *Quaternary International*, **456**, 154–162.
- 岩崎孝明(1983)青森県東部の火山灰. 駒沢大学大学院地理学研究, **13**, 33–39.
- 岸本博志・長谷川 健・中川光弘・和田恵治(2009)最近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.
- 河野義礼(1939)十和田火山噴出物の化学的研究. *岩鉱*, **22**, 224–239.
- 小岩直人・柴 正敏・葛西優貴(2007)青森県屏風山砂丘地帯, 館岡層中の十和田大不動テフラのAMS<sup>14</sup>C年代. *第四紀研究*, **46**, 437–441.
- 小山真人・吉田 浩(1994)噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場. *火山*, **39**, 177–190
- 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.
- 工藤 崇(2008)十和田火山, 噴火エピソードE及びG噴出物の放射性炭素年代. *火山*, **53**, 193–199.
- 工藤 崇(2010a)十和田火山, 御倉山溶岩ドームの形成時期と噴火推移. *火山*, **55**, 89–107.
- 工藤 崇(2010b)十和田火山, 御門石溶岩ドームの形成時期に関する考察. *地質調査研究報告*, **61**, 477–484.
- 工藤 崇(2016)十和田火山, 先カルデラ期溶岩のK–Ar年代. *地質調査研究報告*, **67**, 209–215.
- 工藤 崇(2017)十和田火山, 先カルデラ期後期の火砕流堆積物. 日本地質学会第124年学術大会講演要旨, 56.
- 工藤 崇(2018a)十和田火山先カルデラ期噴出物に挟まれる洞爺火山灰. *地質調査研究報告*, **69**, 31–36.
- 工藤 崇(2018b)十和田湖周辺地域における前期～中期更新世火山活動史. *地質調査研究報告*, **69**, 165–200.
- 工藤 崇(2018c)十和田火山カルデラ形成期に発生した小規模ブルカノ式噴火. 日本火山学会講演予稿集2018年度秋季大会, 21.
- 工藤 崇(2022)十和田火山, 噴火エピソードMの噴出物層序と噴火推移. *地質学雑誌*, **128**, 109–127.
- 工藤 崇・佐々木寿(2007)十和田火山後カルデラ期噴出物の高精度噴火史編年. *地学雑誌*, **116**, 653–663.
- 工藤 崇・小林 淳(2013)十和田火山, 先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの放射年代測定. *地質調査研究報告*, **64**, 305–311.
- 工藤 崇・宝田晋治・佐々木 実(2004)東北日本, 北八甲田火山群の地質と火山発達史. *地質学雑誌*, **110**, 271–289
- 工藤 崇・小林 淳・山元孝広・岡島靖司・水上啓治(2011)十和田火山における噴火活動様式の時代変遷と長期的予測. 日本第四紀学会講演要旨集, **41**, 82–83.
- 工藤 崇・内野隆之・濱崎聡志(2019)十和田湖地域の地質. 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, 192p.
- 久利美和・栗田 敬(2003)十和田火山二の倉スコリア群の層序区分の再検討. *火山*, **48**, 249–258.
- 桑原拓一郎(2007)青森県上北平野に分布する白ベタテフラ(WP)のジルコン・フィッシュン・トラック年代. *第四紀研究*, **46**, 433–436.
- 町田 洋・新井房夫・森脇 広(1981)日本海を渡ってきたテフラ. *科学*, **51**, 562–569.
- 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示標層としての意義—. *火山*, **30**, 49–70.
- 町田 洋・新井房夫・宮内崇裕・奥村晃史(1987)北日本を広く覆う洞爺火山灰. *第四紀研究*, **26**, 129–145.
- 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.
- Matsu'ura, T., Kimura, J-I., Chang, Q. and Komatsubara, J. (2017) Using tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy to re-evaluate and improve the Middle Pleistocene age model for marine sequences in northeast Japan. *Quaternary Geochronology*, **40**, 129–145.
- 松山 力・大池昭二(1986)十和田火山噴出物と火山活動. 十和田科学博物館, no. 4, 1–64.
- McLean, D., Albert, P. G., Nakagawa, T., Suzuki, T., Staff, R. A., Yamada, K., Kitaba, I., Haraguchi, T., Kitagawa, J., SG14 Project Members and Smith, V. C. (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.
- 中川久夫・中馬教允・石田琢二・松山 力・七崎 修・井出慶司・大池昭二・高橋 一(1972)十和田火山発達史概要. 岩井淳一教授退官記念論文集, 7–18.
- 中川久夫・松山 力・大池昭二(1986)十和田火山噴出物の分布と性状. 東北農政局計画部, 48p.
- Newhall, C. G. and Self, S. (1982) The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 1231–1238.
- 大池昭二・中川久夫(1979)三戸地域広域農業開発基本調査「地形並びに表層地質調査報告書」. 東北農政局計画部. 103p.
- 大池昭二・七崎 修・松山 力・松山 洋(1959)青森ロームの問題点. 青森地学, no. 1, 3–9.
- 大池昭二・松山 力・七崎 修(1970)八戸平原地区地質調査報告書. 東北農政局計画部, 1–50.
- 谷口宏充(1972)十和田火山の岩石学的研究. 岩鉱, **67**, 128–138.
- 東北地方第四紀研究グループ(1969)東北地方における第四紀海水準変化. 地団研専報, no. 15, 37–83.
- 辻野 匠・工藤 崇・中江 訓・近藤玲介・西岡芳晴・植木岳雪(2018)一戸地域の地質. 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, 161p.
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., Palmer, J. G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Turney, C. S. M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S. M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A. and Talamo, S. (2020) The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, **62**, 725–757.
- Stuiver, M., Reimer, P. J. and Reimer, R. W. (2022) CALIB 8.2 [WWW program]. <http://calib.org/calib/> (閲覧日: 2022年1月14日).
- 東宮昭彦・宮城磯治(2020)洞爺噴火の年代値. 火山, **65**, 13–18.
- 十和田火山防災協議会(2018)十和田火山災害想定影響範囲図. [https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/bosaikikikanri/files/towada\\_HM.H30.1.pdf](https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/bosaikikikanri/files/towada_HM.H30.1.pdf)
- 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. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **325**, 27–44.
- 梅田浩司・林 信太郎・伴 雅雄・佐々木 実・大場 司・赤石和幸(1999)東北日本, 火山フロント付近の2.0 Ma以降の火山活動とテクトニクスの推移. 火山, **44**, 233–249.
- Wadge, G. (1982) Steady state volcanism: Evidence from eruption histories of polygenetic volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 4035–4049.
- Walker, G. P. L. (1980) The Taupo Pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **8**, 69–494.
- 山元孝広(2015)日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査総合センター研究資料集, no. 613.
- Yamamoto, T., Kudo, T. and Isizuka, O. (2018) Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth, Planets and Space*, 70:65. doi:10.1186/s40623-018-0849-x
- Yamamoto, T., Nakano, S. and Ishizuka, Y. (2021) Temporal variations of magma composition, eruption style and rate at Fuji Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 73:169, doi:10.1186/s40623-021-01505-1
- 大和伸友(1989)五戸川流域の地形面. 駒沢大学大学院地理学研究, no. 19, 1–18.
- 大和伸友(2005)第1章第2節 第四紀の地質と地形. 新編八戸市史 別編 自然編. 八戸市, 48–66.

( 受付: 2022年6月1日; 受理: 2023年4月14日 )

