

# 樹木年輪を利用した火山噴火の年代決定

—浅間山天明の噴火(1783年)を例にして—

熊谷博之<sup>1</sup>、小田寛貴<sup>2</sup>、中村俊夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学理学部地震火山観測地域センター

<sup>2</sup>名古屋大学理学部化学科

<sup>3</sup>名古屋大学年代測定資料研究センター

## 1 はじめに

過去の火山噴火の気候への影響を評価する上で、また長期的噴火予知の基礎データとして噴火の繰り返し時間を知る上で、第四紀活火山の研究においては噴火の絶対年代を決定することが重要な課題となっている。これまで噴火年代の決定においては古文書の記録が大きな役割を果たしてきた。古文書の記録は時間分解能が高く時間から日のオーダーでの噴火の推移を明らかにすることも可能である。Lamb (1970, 1977) 及び Newhall and Self (1982) は古文書の記録を利用して、噴火の気候への影響を評価した噴火指数を提唱し、西暦 1500 年までの全世界の噴火カタログを作成した。Stothers and Rampino (1983) は地中海地域の噴火について、古文書から紀元前 1500 年の噴火を含む西暦 630 年以前の古い噴火に関する記述を調査し、その噴火規模を推定した。また早川 (in press) は、噴出したマグマの質量に基づいた独自の噴火指標を用いて、日本の噴火について古文書の記録による噴火年代に基づき過去 2000 年にわたる噴火カタログを作成した。古文書の記録は極めて価値が高いが、遡れる年代に限界があり、さらに古くなるほど記録が曖昧となり信頼性が悪くなる。また比較的新しい年代においても、人口の密集した地域から離れた地域の噴火では記録が残りにくいという問題がある。

古文書の記録がない噴火の年代決定には、放射性元素による年代測定法が利用されてきた。第四紀活火山研究においては放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) による年代測定が有効である (Libby, 1955)。 $^{14}\text{C}$  の測定には、従来のガス比例係数数管法に加え、1970 年代後半からは液体シンチレーションカウンターや加速質量分析計 (AMS) による測定が普及し始め、より古い年代についてより微量の試料で測定が可能となった。AMS はこれらの測定器の中で測定可能な年代の上限が最も大きく、過去約 6 万年までの年代決定が可能となっている (例えば中村・中井, 1988)。Simkin and Siebert (1993) は、 $^{14}\text{C}$  年代測定による噴火年代決定を含む過去およそ 8000 年にわたる全世界の噴火をまとめている。Beget and Kienle (1992) は古文書の記録がないアラスカの Mt. St. Augustine において、火山堆積物中の木片等の  $^{14}\text{C}$  年代測定から、過去 2000 年にわたって 150-200 年のサイクルで噴火が周期的に起こったこと、さらに AMS 年代測定から火山活動は少なくとも過去 4 万年以上にわたっていたことを明らかにした。日本では降下テフラの層序に基づいた噴火の編年 (テフロクロノロジー) が盛んに行われてきており (例えば町田・新井, 1992)、降下物に含まれるあるいは直上下の木片や泥炭等を利用して  $^{14}\text{C}$  年代測定はテフラの年代決定に利用さ

れてきた。しかしながら一般に放射性元素による年代測定は時間分解能が悪く、さらに古くなるほど誤差が大きくなるという問題点がある。

一方近年、年輪年代学的手法が火山噴火の年代決定に利用されつつある。年輪を利用すれば、時間分解能を落とすことなく、古文書に記録のない噴火についても一年という高い分解能で年代決定することが可能である。その先駆的研究は Yamaguchi(1983) によりなされた。彼は一連の研究 (Yamaguchi, 1983, 1985; Yamaguchi et al., 1990) の中で、火山灰の影響により成長を阻害されたと推定される異常に狭い年輪により、Mt. St. Helens の噴火年代を推定している。Yadav (1990) はカムチャッカにおける年輪記録中の異常に狭い年輪とカムチャッカにおける主要な噴火とに対応があることを報告している。日本においては年輪年代学の発展が遅れていたが、最近 Sweda and Takeda(in press) により年輪年代学的年代決定を行う上で必要となる標準年輪曲線が、木曾ヒノキのサンプルをもとに作成された (図-1)。この標準曲線は御岳山南山麓の木曾地域を中心に採集された木曾ヒノキをクロスデートし、最低 20 サンプル以上の年輪幅の測定値の平均により得られたものであり、年輪曲線作成における国際基準をクリアした日本では唯一年輪標準曲線である。この標準年輪曲線が作成されたことにより、過去 800 年については日本においても年輪年代学的年代決定の可能性が開けた。

古文書の記録のない噴火の年代決定を行っていく上で、 $^{14}\text{C}$ 年代測定や年輪年代学的手法を利用していくことは不可欠であり、そこではより高い時間分解能でより古い噴火の年代決定が今後の課題であると言えよう。本研究では、浅間山天明の噴火 (1783) の堆積物中から見つかった埋没樹木を用いて、古文書の記録とは独立に噴火年代を高い時間分解能で推定することを試みる。その目的は、日本ではじめて得られた標準年輪曲線を利用した年輪年代学的噴火年代決定と、本研究で新たに提唱する年輪の $^{14}\text{C}$ 年代変動を利用した年代決定を試み、それらの有効性を検証することで、古文書に記録のない噴火の年代決定を行う手法を確立することにある。

## 2 年輪年代学的年代決定

本研究では浅間山の天明の噴火 (1783年) を対象とした。その理由としては木曾地域に比較的近い火山であることから年輪年代学的年代決定に適していると予想されること、また手法の有効性の検証という意味からは古文書によりその噴火活動の詳細が解っている噴火が適当であると考えたからである。浅間山の天明の噴火の活動推移は、Aramaki(1956) により古文書の記録に基づき詳しく調べられている。天明の噴火は 1783 年 5 月 9 日に始まり小規模な噴火を繰り返した後、噴火はクライマックスに達し 8 月 4 日に吾妻火砕流が北斜面に流出した。流出面積は  $20\text{km}^2$  に達した。その翌日 8 月 5 日に鎌原岩なだれが発生した。鎌原岩なだれは高温の火砕流ではなく、山体崩壊をともなった比較的低温の岩屑流であり、その堆積物は浅間山北麓の鎌原村、芦生田村を埋めたのをはじめ、吾妻川を堰止め土石流を生じ吾妻川下流地域にまで大きな被害を巻き起こした。鎌原岩なだれの直後に鬼押し出し溶岩が流出し、噴火活動は終息した (図-2)。

解析に用いた樹木サンプルは、群馬県吾妻郡嬭恋村芦生田地区の 1992 年の道路工事の際に天明の噴火の鎌原岩なだれの堆積物中から出土した樹木の樹幹部分 (直径 60cm, 全長 5m) である。このサンプル以外にもいくつかの天明の噴火の際に埋没したと思われる樹木を吾妻火砕流堆積物中から、また鎌原岩なだれで埋まった鎌原村の発掘の際に発見されたものを入手したが、保存状態が悪いあるいは年輪年代学的手法には適さない根株の部分などであり解析に用

いることはできなかった。

樹木サンプルはチェーンソーで円盤状に切り出し、一か月ほど自然乾燥させた後スラブ状に切り出し、表面をベルトグラインダーで#600まで研磨し年輪を読み取った。このサンプルは樹皮を残しており、最外側の年輪は最終形成年輪であることが分かった。出土した状況からみて、この樹木は鎌原岩なだれの際に巻き込まれ死んだものであると考えられるので、最終形成年輪は噴火の年を表していることになる。よって問題は年輪年代学的にその最終形成年輪を噴火の年つまり1783年と決定できるかどうかである。

年輪幅は測定顕微鏡で精度 $5\mu$ で連続して読み取った。その測定結果を図-3に示す。成長トレンドはABIC最小化法(Akaike, 1980; Noro, 1989)で推定した。年輪年代学の標準的手法に従い、年輪幅を成長トレンドで割ることにより無次元化した年輪指数を計算した(Fritts, 1976; Schweingruber, 1988)。この年輪変動と木曾ヒノキ標準年輪曲線とをクロスデートすることで、その最終形成年輪の年代を推定することになる。本研究ではまず移動相関により両者の相関を調べた。指数化した年輪曲線と木曾ヒノキ標準年輪曲線との相互相関を調べた結果が図-4である。図-4 aの縦軸はサンプルの年輪曲線と木曾ヒノキ標準年輪曲線との相互相関係数から計算した $t$ -値を、横軸には $t$ -値を計算した位置に対応するサンプルの最終形成年輪の年代を西暦で示してある( $t$ -値が大きい程相関が高いことを表す)。水平線は $t$ -検定による98.5%の信頼率を、縦の矢印は1783年を示す。図-4 bは1783年付近を拡大したものである。

図-4からわかるように、最終形成年輪が1783年に対応する位置は相関が比較的高く、樹木はこの年に死んだ事を示唆している。しかしながら1300年代、1500年代にも1783年よりも高い相関を示す位置があり、この樹木が死んだ年は一意に決まっていないうことを示している。相関が高い年が複数回現れる理由としては、木曾地域と浅間山での気候変動の違いあるいは偶然的な一致といったことが考えられる。標準曲線との相互相関において複数の候補が現れるという問題は年輪年代学において指摘されており、その場合より確実なクロスデートのためには、極端に年輪幅が狭いあるいは広いといった特徴的な年輪(Key Year)を視覚的に相互に比較することが必要である(Fritts, 1976; Pilcher, 1990; Jacoby et al., 1992)。Sweda and Takeda (in press)はこの標準曲線におけるkey yearを報告しているが、今回のサンプルでは総年輪数が71と比較的少ないこと、またこの標準曲線では1650年から1750年にかけてkey yearがないといったことにより目視によるクロスデートもできなかった。

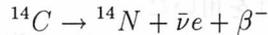
このクロスデATINGにおける問題は、より年輪数の多いサンプルを複数解析することにより解決できると考えられるが、今回の浅間山の野外調査では気候応答のよい樹幹部分のサンプルを複数採集することはできなかった。この困難性は他の火山に適用する場合にも大いに生じ得ると考えられる。また標準年輪曲線は気候地域ごとに作る必要があり標準曲線が適用できる範囲には限界がある。今回の結果で噴火の年に標準曲線との相関が飛び抜けて高くなかったことは、浅間山においてすでにその限界に近いことを示しているとも考えられる。さらに木曾ヒノキ標準曲線は年代決定の範囲が今のところ過去800年に限られており、古文書の記録よりも古い噴火の年代決定を行う上では不十分という問題もある。

これら年輪年代学的手法での問題点を解決するために、さらに本研究では $^{14}\text{C}$ 年代測定法を利用することによる年代決定を試みる。 $^{14}\text{C}$ 年代測定は数万年という過去までの年代測定が比較的信頼性高くできるという利点を持つが、従来の $^{14}\text{C}$ 年代測定では年代値の誤差が大きく、高い時間分解能での解析には適さなかった。本研究では年輪の $^{14}\text{C}$ 年代変動を利用した新たな年代測定法を用いることにより、 $^{14}\text{C}$ 測定による年代決定においても時間分解能があげられる

ことを示す。

### 3 年輪の $^{14}\text{C}$ 年代変動を利用した年代決定

$^{14}\text{C}$ は銀河宇宙線によって地球大気上層で生成され、直ちに酸化されて $\text{CO}_2$ となり、大気中に拡散し樹木中に炭酸同化作用により取り込まれる。固定された $^{14}\text{C}$ は半減期 5730 年 (Lederer, et al., 1967) で $^{14}\text{N}$ にベータ崩壊し減少する；



この $^{14}\text{C}$ の減少の割合から年代を推定する方法が $^{14}\text{C}$ 年代測定法である。 $^{14}\text{C}$ 年代 (conventional radiocarbon age) は以下の条件に基づいて計算される (Stuiver and Polach, 1977)；

1. 過去において $^{14}\text{C}$ の濃度は一定とする
2. NBS 蓚酸をスタンダードとして用いる
3. 半減期としては 5568 年 (Libby 半減期) を用いる
4. 同位体効果の補正には $\delta^{13}\text{C} = -25\text{per mil}$  を用いる
5. 西暦 1950 年を基準とし、年代は year BP で与える (現在は西暦 1950 年とする)

$^{14}\text{C}$ の大気中の濃度はしかしながら過去において地球磁場あるいは太陽磁場の影響を受け、宇宙線の入射量つまり $^{14}\text{C}$ の生成量が一定ではなかったために、 $^{14}\text{C}$ 年代と暦年代 (calendar year) とは一致しない。 $^{14}\text{C}$ 年代を暦年代にもどすには補正曲線 (calibration curve) が用いられる (図-5; Stuiver and Becker, 1993)。補正曲線は、年輪年代学的に年代決定された暦年代の分かっている樹木年輪の $^{14}\text{C}$ 年代を測定することによって得られる。図-5の補正曲線は10年輪ごとの $^{14}\text{C}$ 年代の測定結果であり、年代値は10年分の中点で示してある。

従来の $^{14}\text{C}$ 年代測定法においてはサンプルの $^{14}\text{C}$ 年代を測定し、その値を補正曲線にあてはめ暦年代決定を行ってきた。その例を図-5に示す。 $^{14}\text{C}$ 年代の測定値の誤差の上限と下限値で水平線を引き、補正曲線からその上限と下限の間に対応する暦年代を読みとる。測定誤差としては通常1標準誤差を用いる。図-5の例のように補正曲線のうねりが大きいところでは年代の不確定性は極端に大きくなるのが分かる。しかしながら Atwater et al. (1991) は、地殻変動によって埋まった樹木の根株の $^{14}\text{C}$ 年代測定において、根株の外側の年輪と中心の年輪とでの $^{14}\text{C}$ 年代値の違いを利用することで、年代値の誤差を小さくできることを示している。本研究では Atwater et al. (1991) の手法をさらに拡張し、年輪を利用して $^{14}\text{C}$ 年代変動の経年変化をサンプルから抽出し、補正曲線との変動パターンの一致を探ることにより暦年代を決定するという手法により、年代値の不確定性を小さくすることを試みる。

年輪年代学的手法に用いたディスク状の樹木サンプルを、さらに放射方向に一方向短冊状に切り出し (木口面で幅 1cm 以下まさ目面で厚さ 3cm ほど)、数年輪ごとに切り落としブロック状にした。それらを蒸留水で 3-4 時間煮込み、一昼夜おいたのちマイクロームで板目面方向から一年輪分を厚さおよそ 20 $\mu\text{m}$  でスライスし、最終形成年輪から 20 年輪ごとにとりだした。Stuiver et al. (1984) を修正した手法により木部から $\alpha$ -セルロースを抽出した。その手法は

酸 (HCl)、アルカリ処理 (NaOH) による脂質の除去、NaClO<sub>2</sub>によるリグニンの除去、NaOH によるαセルロースの抽出に基づいている。さらに Kitagawa et al. (1993) の手法に従い、抽出したαセルロースを CO<sub>2</sub>ガス化したのち、水素と鉄により還元しグラファイト化した。<sup>14</sup>Cの測定は名古屋大学年代測定資料研究センターに設置されたタンデトロン加速器質量分析計 (TAMS) を用いて行った。タンデトロン加速器質量分析では<sup>14</sup>C原子自身を直接検出し、<sup>14</sup>Cと同重の分子イオン (<sup>12</sup>CH<sub>2</sub>, <sup>12</sup>CD, <sup>13</sup>CH) を加速器を用いて取り除いているので極微量の<sup>14</sup>Cを測定することが可能となっている。TAMS による<sup>14</sup>C測定手法は Nakai et al. (1984) および Nakamura et al., (1987) に従った。なおスタンダードには新シュウ酸 (Stuiver, 1983) を用いた。<sup>δ<sup>13</sup>C</sup>の測定は年代試料測定センターの質量分析計を用いた。

Stuiver and Polach (1977) および Stuiver (1983) の定義に従い<sup>14</sup>C年代は以下の式から求めた；

$$t = -8033 \ln Asn/Aon$$

Asn は<sup>13</sup>Cの分別作用の補正をしたサンプルの<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C (ここでは個数比で定義する。もともとの定義であるβ線のカウンtrateとしてもまったく同じ結果となる) である；

$$Asn = As(1 - 2(25 + \delta^{13}Cs)/1000)$$

ここで As はサンプルの<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>Cの測定値、<sup>δ<sup>13</sup>C<sub>s</sub></sup> は PDB (Belemnite 化石) に対するサンプルの<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比の測定値である。この式はより正確な  $Asn = As \cdot 0.975^2 / (1 + \delta^{13}C/1000)^2$  の近似式である。一方 Aon はもともと<sup>13</sup>Cの補正をしたシュウ酸スタンダードの<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>Cの 0.95 倍で定義されていたが (Stuiver and Polach, 1977)、1982 年の国際会議で新シュウ酸の使用に関する合意が得られた (Stuiver, 1983)。それによれば Aon は次式で定義される；

$$Aon = X Anox(1 - 2(25 + \delta^{13}Cnox)/1000)$$

$$X = \frac{0.95(0.981^2(1 + \delta^{13}Cnox/1000)^2 Aox}{(0.975^2(1 + \delta^{13}Cox/1000)^2 Anox}$$

ここで添字 Anox、Aox はそれぞれ新シュウ酸、シュウ酸の<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>Cをあらわす。Mann(1983) によれば

$$Anox/Aox = 1.2933 \pm 0.0004$$

であり<sup>δ<sup>13</sup>C<sub>nox</sub></sup>の平均値は-17.8 per mil、<sup>δ<sup>13</sup>C<sub>ox</sub></sup>の平均値は-19.3 per mil である。もしも<sup>δ<sup>13</sup>C<sub>nox</sub></sup> - <sup>δ<sup>13</sup>C<sub>ox</sub></sup> が 1.5 per mil で一定であるとすると X=0.7459 となる。

以上の議論は<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>Cに基づいているが、TAMS の<sup>14</sup>C測定では<sup>14</sup>C/<sup>13</sup>Cが測定値となる。そこで本研究では質量分析計による<sup>δ<sup>13</sup>C</sup>の測定値を用いて

$$^{14}C/^{12}C = (^{14}C/^{13}C)(1 + \delta^{13}C/1000)(^{13}C/^{12}C)_{PDB}$$

により<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>Cに変換した。よって<sup>14</sup>C年代、t は

$$t = -8033 \ln Asn/Aon = -8033 \ln gR$$

ここで

$$g = \frac{(1 + \delta^{13}Cs/1000)(1 - 2(25 + \delta^{13}Cs)/1000)}{(1 + \delta^{13}Cnox/1000)(1 - 2(25 + \delta^{13}Cnox)/1000)X}$$

$$R = ({}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C})_s / ({}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C})_{nox}$$

により得られる。ここで  $({}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C})_s$  がサンプルの測定値、 $({}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C})_{nox}$  がスタンダード（新シュウ酸）の測定値である。誤差、 $\delta t$  は

$$\delta t = 8033 \delta R / R$$

である。ここで  $\delta R$  は計測値誤差（1 標準偏差）である。

サンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代とその誤差の測定結果を表-1 に示す。なお年代値の計算においては  ${}^{14}\text{C}$  と  ${}^{13}\text{C}$  のカウント数の積算値を用いた。年輪数に対してこれらの  ${}^{14}\text{C}$  年代と誤差をプロットしたのが図-6 である。本測定においては 5 から 6 per mil の測定誤差を達成した。これに要した測定時間は 1 ターゲットにつき 12 時間以上であり、年代測定資料研究センターで行われている通常の測定（約 3 時間）にくらべ 3 倍から 4 倍の時間を必要とした。

表-1 あるいは図-6 からわかるように、年輪数が大きいほどつまり暦年代が新しいほど  ${}^{14}\text{C}$  年代が古いという関係が得られた。このサンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代の経年変化と補正曲線 (Stuiver and Becker, 1993) との変動パターンとの一致具合を調べたのが図-7 である。サンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代変動を補正曲線上でずらしながら両者の残差二乗和を順番に計算し、最終形成年輪の対応する年代に対してプロットしたものである。補正曲線上でずらす区間としては、サンプルの最外側の年輪の  ${}^{14}\text{C}$  年代測定値の 2 標準偏差におさまる暦年代、この場合は西暦 1655 年以降 1945 年まで、とした。残差二乗和はサンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代と補正曲線の  ${}^{14}\text{C}$  年代値との差の二乗和を測定値の標準偏差で重みをつけたものである。また変動パターンの一致具合を見るために、サンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代値は各残差二乗和を計算する際に、その区間の補正曲線の平均値と一致するように全体にオフセットを許している。また図-7 での黒丸はオフセットさせた状態でサンプルの  ${}^{14}\text{C}$  年代の測定誤差内（1 標準偏差）に補正曲線の変動が収まっている年代、白丸はそれから外れる年代を表している。また矢印は 1783 年である。

図-7 から分かるように 1750 年から 1800 年にかけてと 1920 年から 1945 年で残差二乗和が小さく、そのなかでも 1783 年を含む  $1785 \pm 5$  年と 1945 年で残差が小さく、これらの年代で樹木が死んだ可能性が高いことを  ${}^{14}\text{C}$  年代測定は示している。残差二乗和が最も小さい 1945 年とその次に小さい 1785 年の区間について両者の関係を示したのが図-8 である。ここで波線がオリジナルの  ${}^{14}\text{C}$  年代測定値であり、実線がオフセットさせた場合である。変動パターンは比較的よく合っているがオフセットは  ${}^{14}\text{C}$  年代で 1945 年は 7 2 年、1785 年の区間は 112 年である。

## 4 議論

年輪を利用した  ${}^{14}\text{C}$  年代測定法は、この樹木の死んだ年代についてかなりの制約を与えている。1945  $\pm$  5 年の方がパターンの一致度は良くなってしまうが、1783 年を含む  $1785 \pm 5$  年の区間はその次に一致度がよく、これらの年代に噴火が起こった可能性が高いことを  ${}^{14}\text{C}$  年代測定は示している。この埋没木が火山堆積物中に完全に埋まっていたという野外観察を加味すれば、この樹木が 1945 年という最近に死んだものではないことは明らかであり、1785 年の区間の可能性が高いと言えるだろう。一方年輪年代学的手法による年代決定において複数の年代値の候補となっていたが、この  ${}^{14}\text{C}$  年代測定の結果とを組み合わせることにより年代決定が可能となった。図-9 に  ${}^{14}\text{C}$  年代測定による結果と年輪年代学的手法によ

る結果をまとめた。図-9 aで陰をつけた $^{14}\text{C}$ による年代値としてはサンプルの測定誤差内に補正曲線の変動が収まっている年代(図-7での黒丸)をとった。さらに図-9 bではパターンの一致度が良かった1785±5年についてはさらに陰を濃くした。この結果から1300年代と1500年代のピークは明らかに見かけのものであり、この樹木が死んだ年代つまり噴火の起こった年代としては双方もとの推定値が重なっている1783年がもっとも可能性が高いといえるであろう。明らかにこれは古文書の記録と一致しており、埋没樹木の年輪を用いた手法が噴火年代の高い時間分解能での決定に有効であることを示す結果である。

本手法の特徴としては年輪年代学的手法だけでなく、 $^{14}\text{C}$ 年代測定法と組み合わせることにより、噴火の年代を信頼性高く、高い時間分解能で決定できることを示したことにある。特に $^{14}\text{C}$ 年代測定において、年輪の $^{14}\text{C}$ 年代変動を利用することにより、年代の不確定性を従来の手法に比べ大きく軽減できることを示したことが大きな特徴としてあげられる。従来の $^{14}\text{C}$ 年代測定手法に従えば、最終形成年輪の $^{14}\text{C}$ 年代値のみから暦年代を推定することになるが、その場合ではほぼ1675から1945年すべての区間が年代値として得られることになる。またAtwater et al. (1991)の手法の場合では、ほぼ図-7に示した黒丸の区間が年代値として得られるが、その区間の中でどの年代がもっともらしいかということについて判断することは難しい。また本手法では $^{14}\text{C}$ 年代変動のパターンに着目しているため、 $^{14}\text{C}$ 年代値の絶対値に全体としてオフセットがある場合にもバイアスなく年代決定できるという利点がある。本研究においても1785±5年の区間で100年を越えるオフセットが見られた。またアメリカワシントン州オリンピック半島の樹木年輪の $^{14}\text{C}$ 値とアリゾナ州ツーソンの樹木の測定値とでも、系統的なオフセット(年代値にしておよそ20年)が報告されている(Jirikowic and Kalin, 1993)。従来の手法ではこのようなオフセットがあったとしても、そのまま年代値に換算されるため、系統的な誤差を生じる原因となり得る。さらに $^{14}\text{C}$ 年代測定での最大の利点は補正曲線がグローバルに使うことができることである。これは $^{14}\text{C}$ が比較的均一に大気中に拡散していることによるものである。先に述べたように火山堆積物中から根株のサンプルを複数採集したにも関わらず、それらは年輪年代学的解析に利用できなかったが、そのようなサンプルに対しても $^{14}\text{C}$ 年代測定では十分適用可能であり、サンプル確保に関しての制約を減らすことができると考えられる。よってこの年輪を利用した $^{14}\text{C}$ 年代測定法より、年輪年代学的年代決定ができないサンプルあるいは標準年輪曲線が利用できない地域でも、従来の手法に比べ高い時間分解能での噴火決定が可能であろう。

本研究の結果をまとめると、樹木年輪から噴火年代の決定に関して次のような考察ができる。まず年輪年代学的手法では一年という高い時間分解能での年代決定が可能であるが、年輪数の少ないサンプルにおいては相関の高い年が複数現れることにより一意に年代決定することが困難な場合がある。一方年輪を利用することにより $^{14}\text{C}$ 年代測定においても従来の手法にくらべ格段に年代値の不確定性を小さくできることがわかった。 $^{14}\text{C}$ 年代測定による年代決定はグローバルに適用できまたその年代の範囲も広い。また樹幹部分だけでなく根株あるいは樹根についても $^{14}\text{C}$ 年代測定法は適用可能であり、サンプル確保に関する制約が少ない。よって年輪年代学的決定ができないサンプルあるいは標準曲線が利用できない地域においても年輪を利用した $^{14}\text{C}$ 年代測定法により、噴火年代を従来の手法に比べ高い時間分解能で決定することが可能である。また標準曲線が使える場合は $^{14}\text{C}$ 年代測定法と組み合わせることにより、年輪数が少ないサンプルの場合にも年代決定の信頼性と分解能をあげることが可能である。

本研究では火山堆積物中の埋没樹木の年輪を利用することによりその噴火年代を高い時

間分解能で決定できることを示した。これらの手法を古文書の記録がない噴火への適用することにより、過去の噴火活動の変遷を組み立てるうえで従来の手法に比べ格段の分解能での解析が可能であろう。またこれらの手法は火山噴火に限ったものでなく、地震にともなう土石流などのイベントの年代決定に一般的に適用可能であろう。

## 謝辞

本研究で用いた埋没樹木は群馬県吾妻郡嬭恋村芦生田の小池茂治氏に提供して頂いた。また嬭恋村歴史民俗資料館の松島栄治氏、および嬭恋村三原の下屋正一氏には埋没樹木の情報を提供して頂いた。名古屋大学農学部末田達彦博士には木曾ヒノキ標準年輪曲線のコードデータを提供して頂き年輪解析に関してご指導頂いた。名古屋大学年代測定資料研究センターの池田晃子および太田友子両女史にはサンプルの準備の際にお世話になった。名古屋大学理学部地震火山観測センターの山岡耕春博士と岐阜大学教育学部の川上紳一博士には浅間山の調査でお世話になり、また研究を進める上で有益な助言を頂いた。東京大学地震研究所の深尾良夫教授には本研究を始める段階でご指導頂いた。これらの方々には深く感謝します。本研究は文部省科学研究費（特別研究員奨励費、課題番号0273）を利用した。

## References

- Akaike H., Likelihood and the Bayes procedure, In: J. M. Bernardo, M. H. DeGroot, D. V. Lindley and A. F. M. Smith (Editors), *Bayesian Statistics*, pp.143-166, University Press, Valencia, Spain, 1980.
- Aramaki S., The 1783 activity of Asama Volcano, part 1, *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, 27, 189-229, 1956.
- 荒牧重雄, 浅間山: 浅間火山の活動史、噴出物調査および Disaster Map と災害評価. 文部省科学研究費自然災害特別研究報告書「噴火災害の特質と Hazard Map の作製およびそれによる噴火災害の予測の研究」(代表者 下鶴大輔), pp. 50-82, 1981.
- Atwater B. F., M. Stuiver, and D. K. Yamaguchi, Radiocarbon test of earthquake magnitude at the Cascadia subduction zone, *Nature*, 353, 156-158, 1991.
- Beget J. E., and J. Kienle, Cyclic formation of debris avalanches at Mount St Augustine volcano, *Nature*, 356, 701-704, 1992.
- Fritts H. C., *Tree rings and climate*, 567 pp, Academic Press, London, 1976.
- 早川由紀夫, 日本の2000年噴火カタログ, 群馬大学教育学部紀要, 42, , in press.
- Jacoby G. C., P. L. Williams, and B. M. Buckley, Tree ring correlation between prehistoric landslides and abrupt tectonic events in Seattle, Washington, *Science*, 258, 1621-1623, 1992.
- Jirikowic J. L., and R. M. Kalin, A possible paleoclimatic ENSO indicator in the spatial variation of annal tree-ring  $^{14}C$ , *Geophys. Res. Lett.*, 20, 439-442, 1993.
- Kitagawa H., T. Masuzawa, T. Nakamura, and E. Matsumoto, A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS  $^{14}C$  measurements, *Radiocarbon*, 35, 295-300, 1993.
- Lamb H. H., Volcanic dust in the atmosphere; with a chronology and assessment of its meteorological significance, *Phil. Trans. R. Soc.*, A226, 425-533, 1970.

- Lamb H. H., Supplementary volcanic dust veil assessments, *Climate Monitor*, 6, 57-67, 1977.
- Libby W. F., Radiocarbon dating, 175 pp, Chicago Press, 1955.
- 町田洋・新井房夫, 火山灰アトラス, 276 pp, 東京大学出版会, 1992.
- Mann W. B., An international reference material for radiocarbon dating, *Radiocarbon*, 25, , 1983.
- 中村俊夫・中井信之, 放射炭素年代測定法の基礎—加速器質量分析法に重点をおいて—, 地質学論集, 29, 83-106, 1988.
- Newhall C. G., and S. Self, The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of the explosive magnitude for historical volcanism, *J. Geophys. Res.*, 87, 1231-1238, 1982.
- 野呂春文, ABIC を評価基準に用いた一次元データのトレンド推定, 情報地質, 14B, 1-10, 1989.
- Pilcher J. R., Sample preparation, cross-dating, and measurement, in *Methods of dendrochronology, applications in the environmental sciences*, edited by E. R. Cook and L. A. Kairiukstis, pp.40-51, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.
- Schweingruber F. H., Tree rings: Basics and applications of dendrochronology, 276 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, 1988.
- Stothers R. B., M. R. Rampino, Volcanic eruptions in the Mediterranean before A.D. 630 from written and archaeological sources, *J. Geophys. Res.*, 88, 6357-6371, 1983.
- Stuiver M., International agreements and the use of the new oxalic acid standard, *Radiocarbon*, 25, 793-795, 1983.
- Stuiver M., and H. A. Polach, Reporting of  $^{14}\text{C}$  data, *Radiocarbon*, 19, 355-363, 1977.
- Stuiver M., R. L. Burk, and P. D. Quay,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in tree rings and the transfer of biospheric carbon to the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 89, 11731-11748, 1984.
- Stuiver M., and B. Becker, High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scal, AD 1950-6000 BC, *Radiocarbon*, 35, 35-65, 1993.
- Sweda T., and S. Takeda, Construction of a 800-year-long Chamaecyparis dendrochronology for central Japan, , dendrochronologia, in press.
- Yadav R. R., Dendroindications of recent volcanic eruptions in Kamchatka, Russia, *Quaternary Research*, 38, 260-264, 1992.
- Yamaguchi D. K., New tree-ring dates for recent eruptions of Mount St. Helens, *Quaternary Research*, 20, 246-250, 1983.
- Yamaguchi D. K., Tree-ring evidence for a two-year interval between recent prehistoric explosive eruptions of Mount St. Helens, *Geology*, 13, 554-557, 1985.
- Yamaguchi D. K., R. P. Hoblitt, and D. B. Lawrence, A new tree-ring date for the "floating island" lava flow, Mount St. Helens, Washington, *Bull Volcanol*, 52, 545-550, 1990.

表-1 埋没樹木の  $\delta^{13}\text{C}$  と  $^{14}\text{C}$  年代の測定結果

Target Number	Ring Number	$\delta^{13}\text{C}$ (per mil)	$^{14}\text{C}$ Age (Yr BP)
001	71	-22.97	135 ± 47
021	51	-22.17	65 ± 49
041	31	-20.50	26 ± 40
061	21	-21.72	14 ± 42

Ring Numberは樹木の中心から数えた（図-3 参照）。

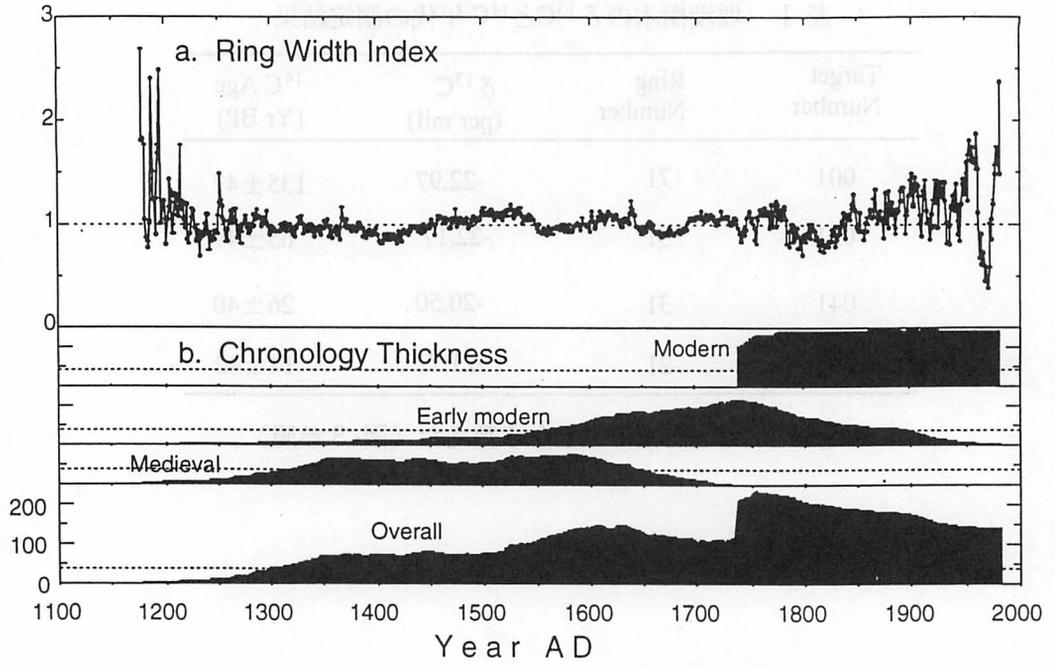


図-1 木曾ヒノキ標準年輪曲線 (a) と用いたサンプルの数 (b) (Sweda and Takeda, in press)。点線が標準曲線の国際基準を表す。

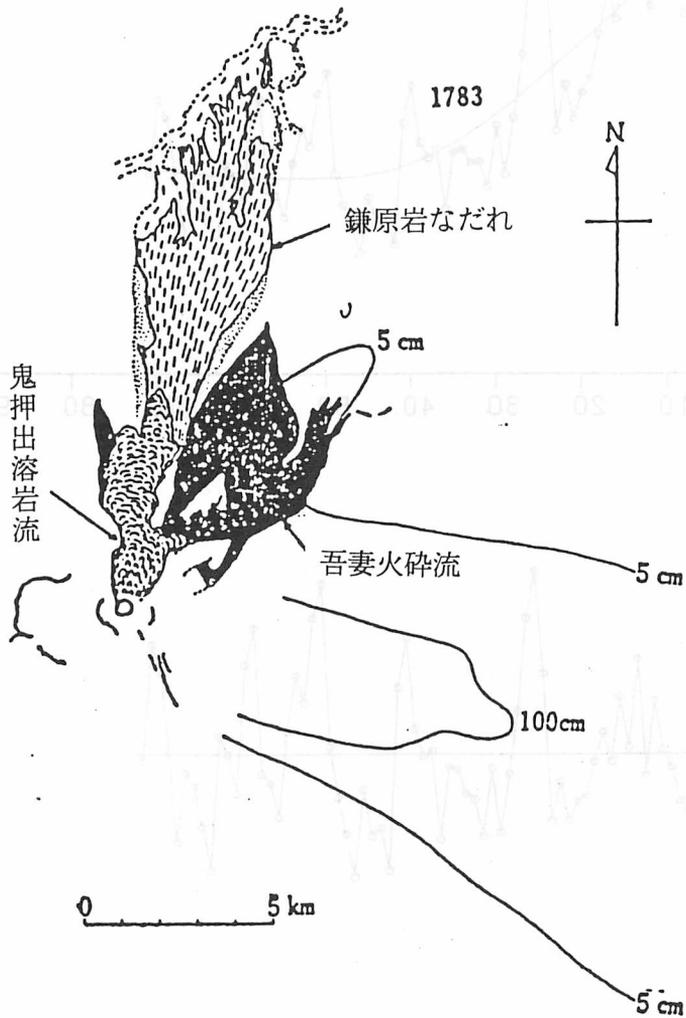


図-2 浅間山天明の噴火(1783年)での吾妻火砕流、鎌原岩なだれ、鬼押出溶岩の分布。等厚線は降下軽石堆積物の分布を表す(荒牧, 1981による)。

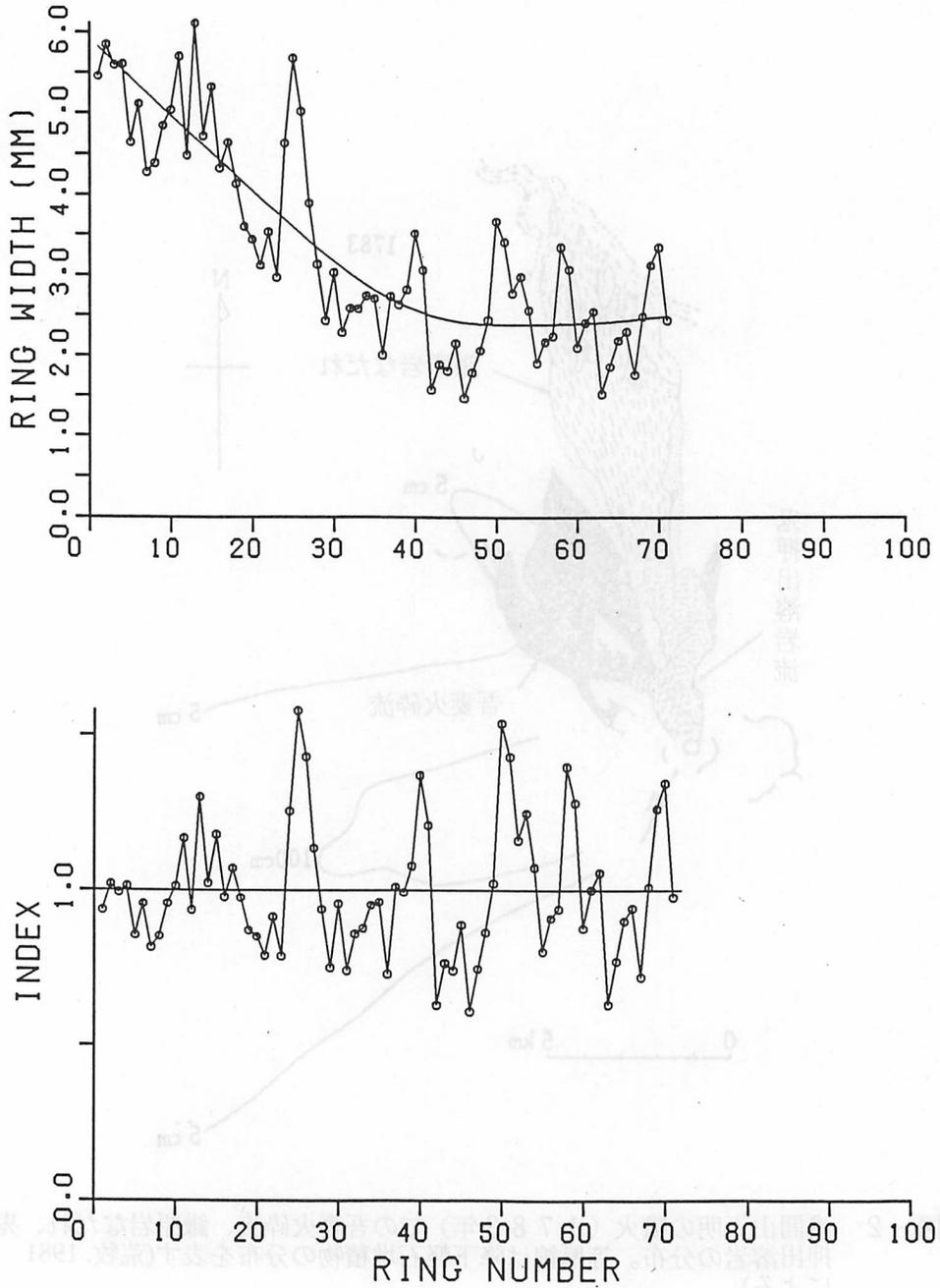
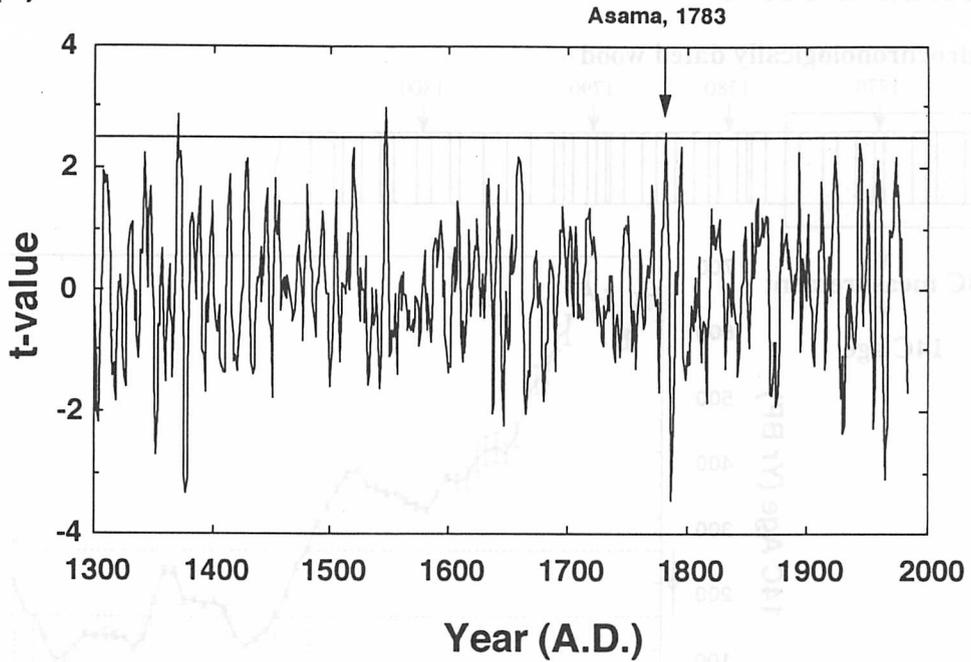


図-3 埋没樹木の年輪幅の測定値と年輪指数。トレンドはABIC最小化法 (Akaike, 1980;野呂, 1989)により求めた。

(a)



(b)

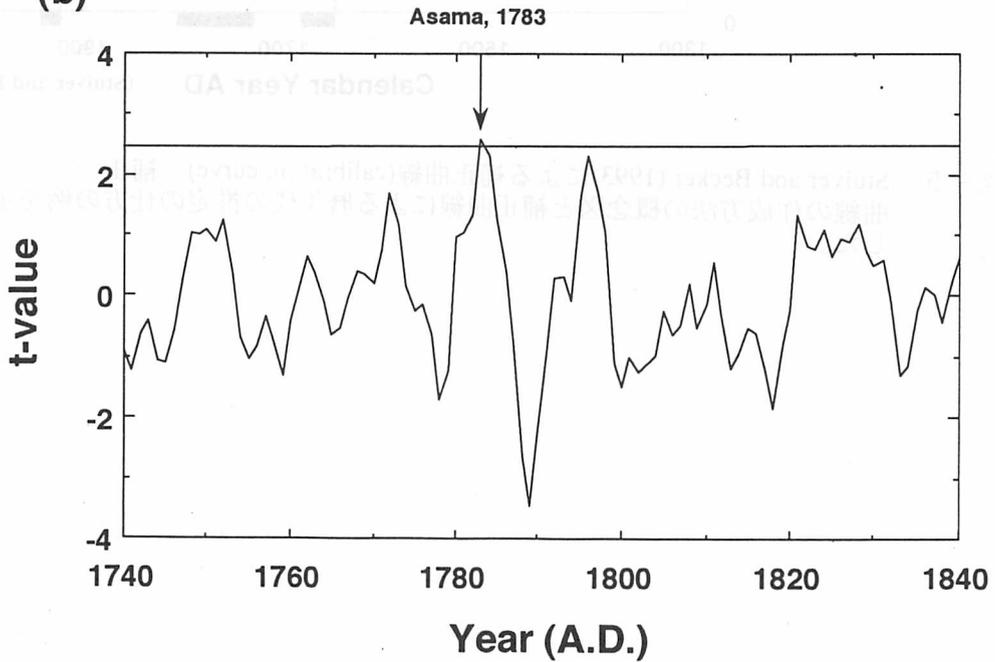


図-4 木曾ヒノキ標準年輪曲線と埋没樹木の年輪曲線との相関(a)。t-値が大きいほど両者の相関が高いことを表す。(b)は1740から1840年の拡大図。

# Calibration Curve

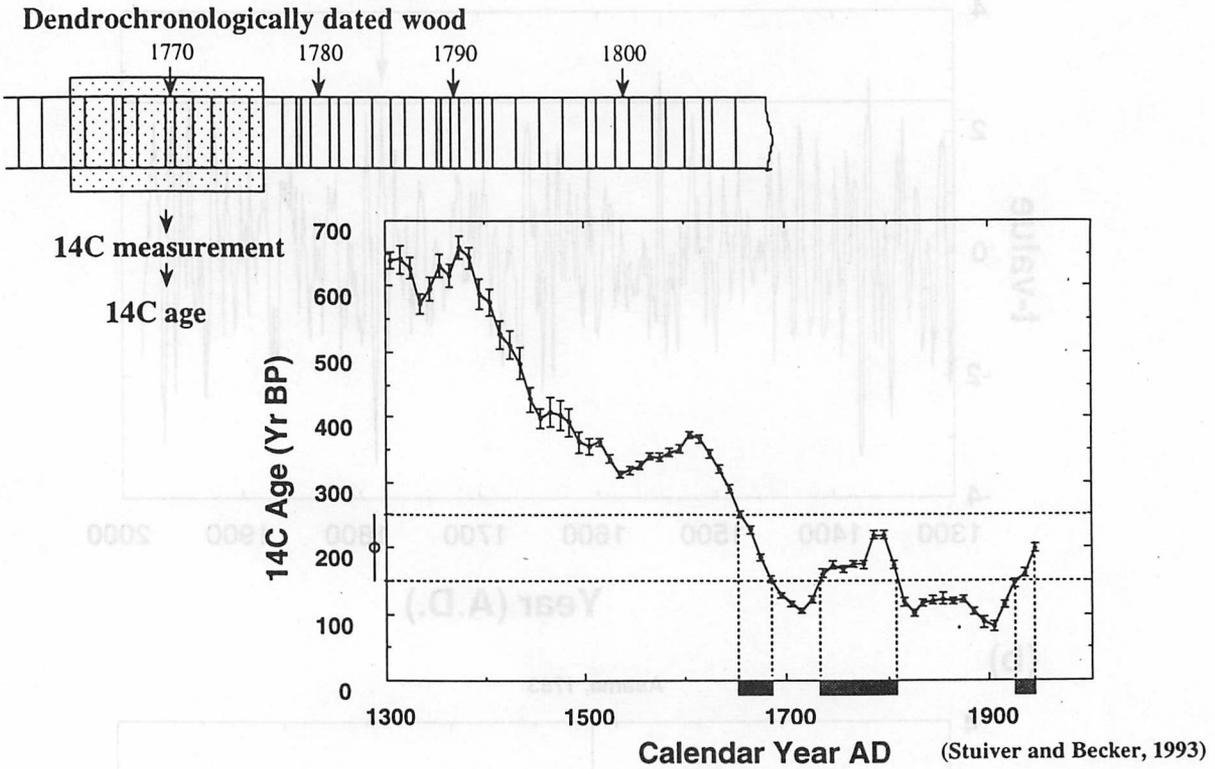


図-5 Stuiver and Becker (1993)による補正曲線(calibration curve)。補正曲線の作成方法の概念図と補正曲線による暦年代の推定の仕方の例を示した。

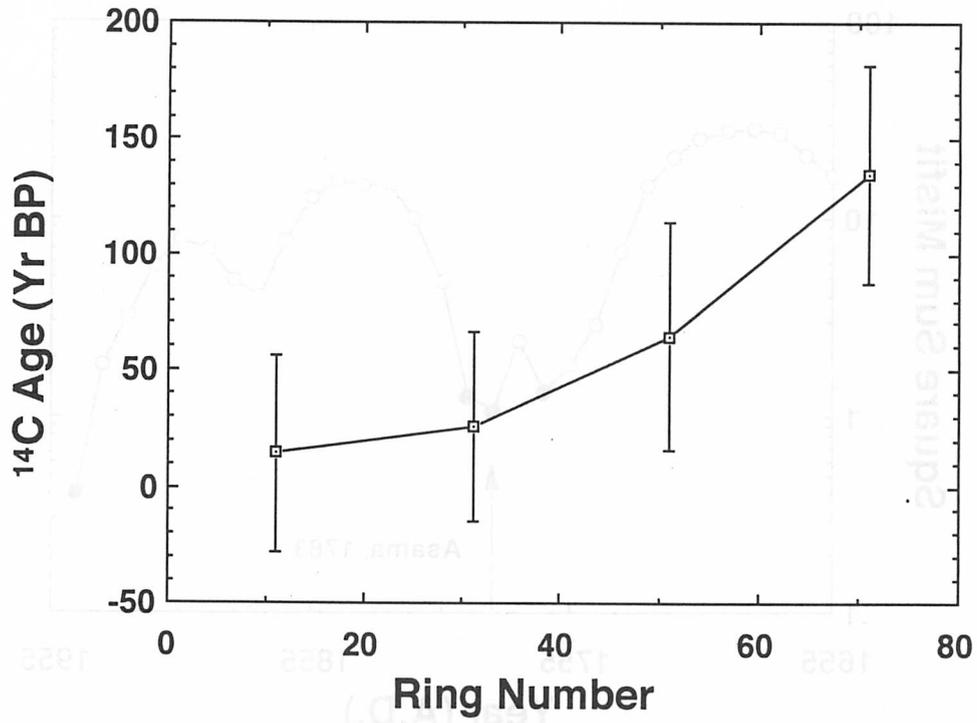


図-6 埋没樹木の<sup>14</sup>C年代。年輪数は図-3のそれと対応している。

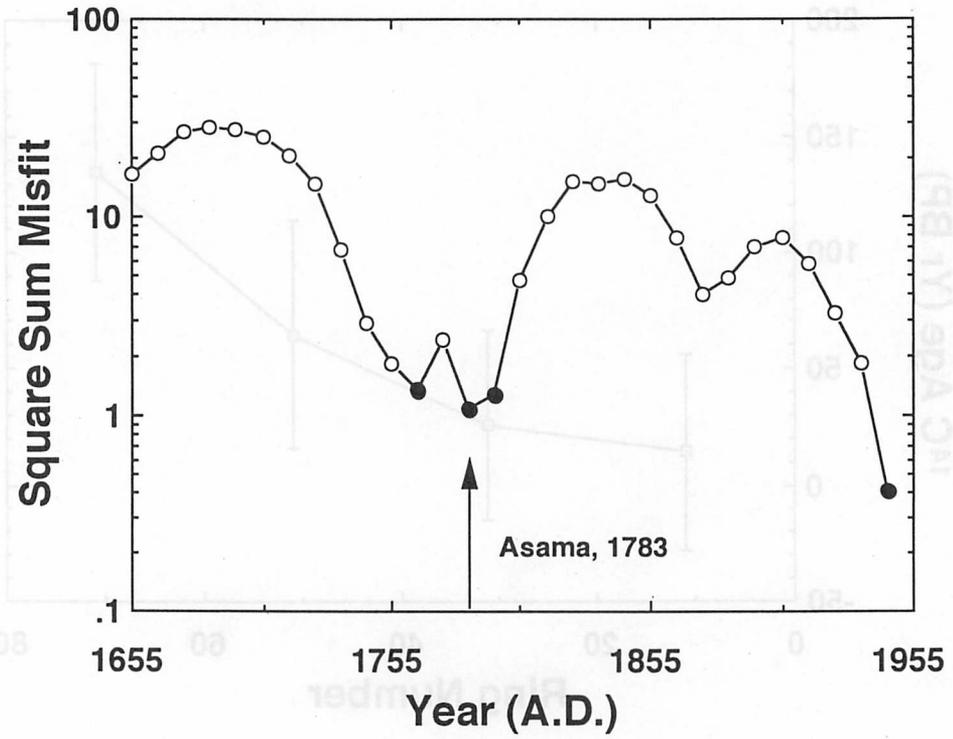


図-7 サンプルの14C年代変動と補正曲線との変動パターンとの残差二乗和。黒丸はサンプルの14C年代の測定誤差内（1標準偏差）に補正曲線の変動がおさまっている年代、白丸はそれから外れる年代を表す。

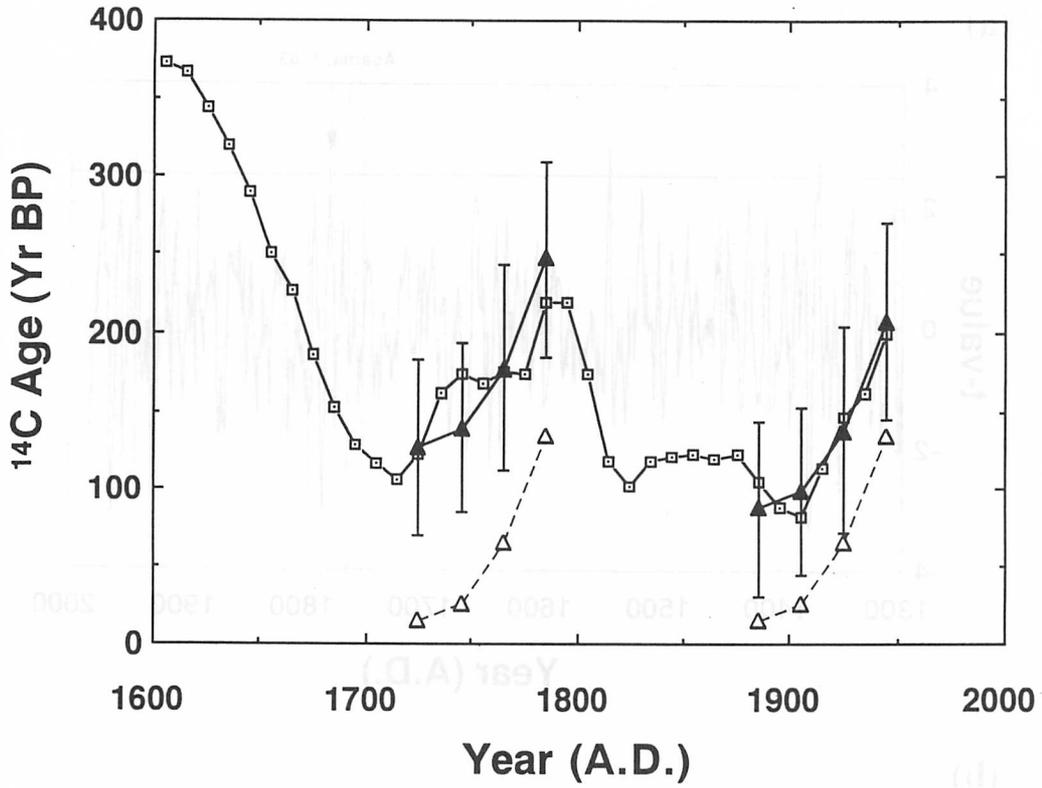


図-8 サンプルの $^{14}\text{C}$ 年代変動と補正曲線との関係。点線はオリジナルの測定値、実線は補正曲線に最もあうようにオフセットさせた場合を表す。



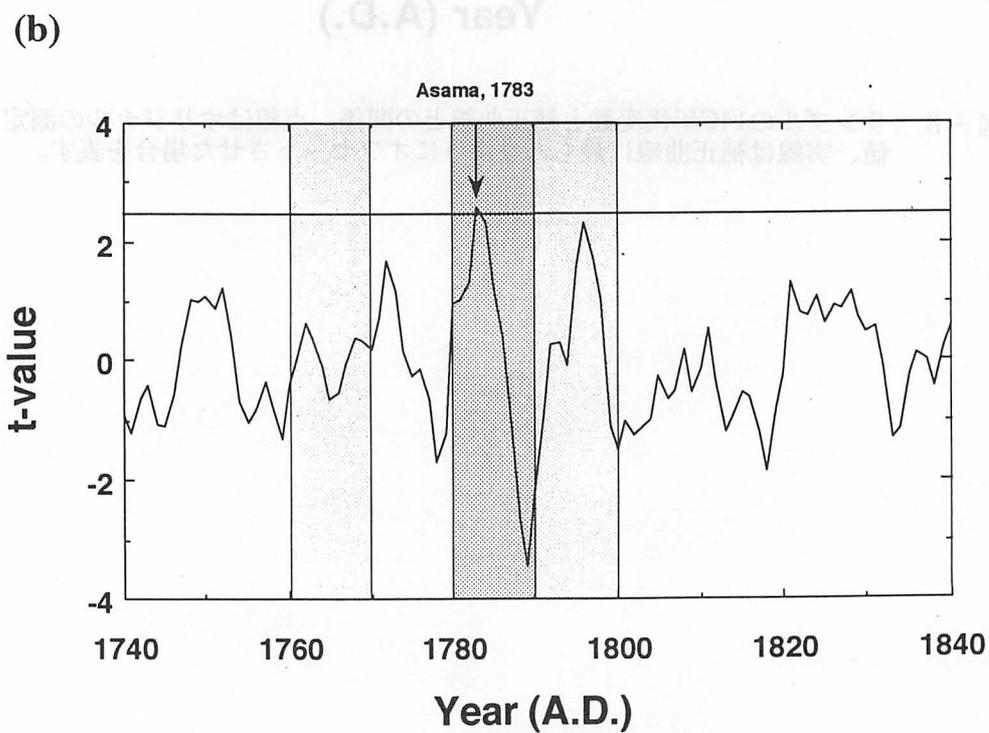
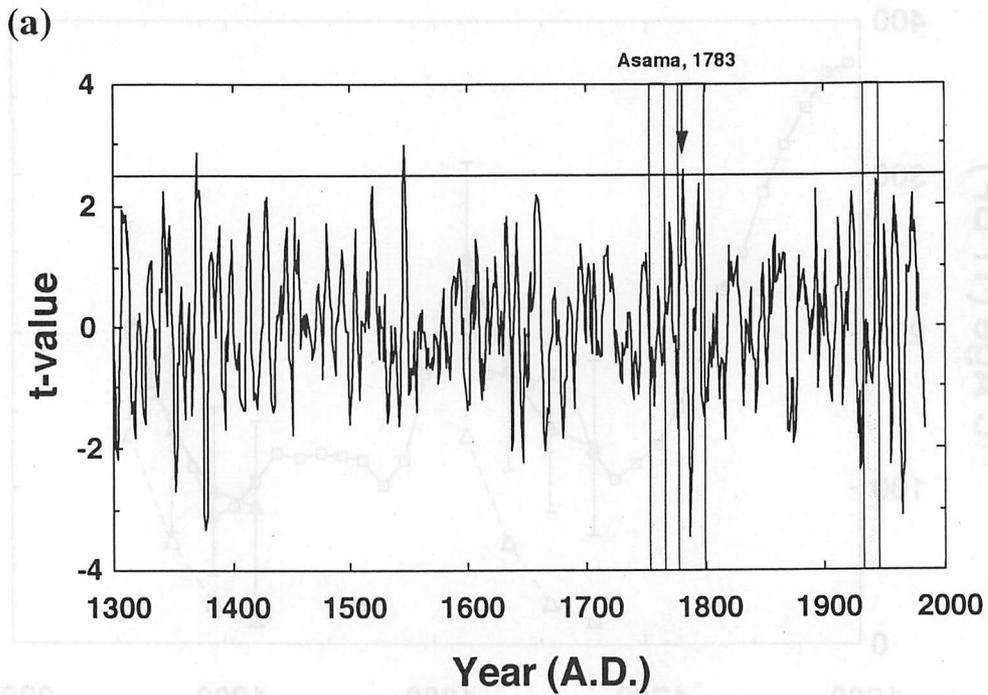


図-9 年輪年代学的手法による結果と $^{14}\text{C}$ 年代測定による結果との比較。

# High Resolution Dating of an Eruption Event by Using Tree Rings of Fossil Wood

– A case study on the 1783-eruption, Asama volcano–

Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, Hiroataka Oda<sup>2</sup>, Toshio Nakamura<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research Center for Seismology and Volcanology, Nagoya University

<sup>2</sup> Department of Chemistry, Nagoya University

<sup>3</sup> Dating and Materials Research Center, Nagoya University

A fossil wood, which was found in volcanic sediments of the 1783-eruption of Asama volcano, central Japan, was used to test the usefulness of tree-ring records for high resolution dating of an eruption event. The dendrochronological dating was first applied by using the *Chamaecyparis* master chronology (Sweda and Takeda, in press). Moderately high correlation was found at the position of 1783 AD as tree death. However since there were more than one highly correlating positions in the cross correlation function, we found difficulty to date the tree death uniquely. The <sup>14</sup>C dating was then applied. We extracted <sup>14</sup>C age variation within the fossil wood, and then searched the matching position between this <sup>14</sup>C age variation and the calibration curve of Stuiver and Becker (1993). Uncertainty of the calendar year of death of the fossil wood was greatly reduced by this procedure compared with the conventional method. Comparison between the results of dendrochronological dating and of <sup>14</sup>C dating suggested that the death of the fossil wood occurred in 1783 AD, a date consistent with document records, indicating the usefulness of tree-ring records for high resolution dating of an eruption event.