

書評一

樹木年輪古気候学の現状と課題

―バレリー・トロエ『年輪で読む世界史』

中 塚 武

書評 バレリー・トロエ『年輪で読む世界史』（築地書館、

二〇二一年）

樹木年輪古気候学の最先端の紹介

本書は樹木年輪古気候学の研究史と最新の研究状況を一般の読者に紹介するための本であり、その最先端を活写したレポート・ジュである。登場する研究者はこの分野の第一人者ばかりで、筆者の女性研究者ならではの視点から多くの学術・社会・政治的課題についても言及している。本書は専門書ではないが紹介されるデータは世界史の研究に実際に利用されており、日本語の類似の解説書がない状況

も考えると、本書は気候変動に興味を持つ日本の世界史研究者にも一読の価値がある。一方で年輪古気候学の同業者の立場から見ると、本書には研究の内実について十分に書き切れていない部分があることも事実である。そこで本書には書かれていないこの分野の課題も含めて、本書の内容を広く歴史研究者の方々に紹介することにした。

本稿では本書の趣旨に沿い、最初に樹木年輪古気候学の概要と方法を紹介してから、本書には書かれていない樹木年輪古気候学の弱点について議論する。そしてその歴史への応用例を紹介して、最後に今後の課題を提案する。

## 年輪年代学の概要―年代決定と気候復元

樹木年輪の研究は「木材の年代決定」と「古気候の復元」という二つの部分からなる。建築古材や遺跡出土材の年単位の年代決定は世界の歴史学や考古学に貢献しており、日本でも奈良文化財研究所<sup>1)</sup>の研究で「法隆寺の建材に火事で全焼したはずの創建当初の木材が使われていること」が分かったことなどを詳しく紹介している。年単位で年代が決められるのは、「年輪幅の経年変動パターンが同じ地域と同じ種類の樹木の間では似ていること」及び「そのパターンを年代既知の木材と年代未知の木材の間で比較することで年代が決められること」に由来しており、その背景には地域の気温や降水量の変動が樹種ごとに木の成長量（年輪幅）を一律に規定するメカニズムがある。特に寒冷地域や乾燥地域では著しく気温が低いか降水量が少ない年には年輪幅が極端に狭くなるので、そうした気候の悪い（年輪幅の狭い）年を目印にして、異なる樹木間で年輪幅の変動パターンを照合することから年輪研究はスタートした。つまり年代決定を可能にする原理が最初から古気候に繋がっていたのである。

年輪幅の変動パターンに着目した近代的な樹木年輪古気候学の研究は、米国南西部のアリゾナで樹木とは何ら関係のない天文台の運営を任されていた天文学者アンドリュ

ー・D・ダグラス氏の数奇な研究遍歴の中で二〇世紀の初頭に偶然始められた。彼は太陽活動の周期性を年輪幅の変動から明らかにすることを考えていたが、そのデータが持つ年代決定のポテンシャルに気が付いた米国南西部の先史考古学者たちとの共同研究によって、アリゾナにおける樹木年輪の研究は急速に発展していった。

一般の人は、樹木年輪の研究には木がたくさん生えている場所が適していると思いがちだが、実際はその反対である。木の成長量、即ち年輪幅は、木が密生している所では隣接する木から不規則な攪乱を受けるので、年輪幅の個体間相関は低くなり気候復元も年代決定も難しい。またそうした場所では一般に樹木の成長が速いので樹齢の大きな個体を得ることは難しい。つまり樹木年輪古気候学の研究は、山地・極域の森林限界や砂漠の縁辺部などの樹木が稀にしか生えていない疎林において最も効率的に行われており、乾燥地のアリゾナでの初期の年輪研究の成功から現在に至るまで、そうした地域の現生木が研究の主な対象となっている。

## 年代決定の方法―あらゆる研究の基礎

年輪の年代は「年代既知の木材」と「年代未知の木材」の間での年輪幅の変動パターンの比較により決定される

が、「年代既知の木材」はどのように入手できるのか。現生木であれば木材の年輪数を樹皮側から順番に数えれば各年輪が何年に形成されたのか直ぐに分かるが、建築古材や遺跡出土材、自然埋没木などの場合、最初はその年輪年代は分からない。

そのような現在とつながっていない過去の木材の年輪でも、同じ地域のより新しい時代の年輪幅のデータと比較すれば、「両者の間に重なっている期間が十分にある」場合は、年代を決定することができる。実際にはまず現生木から始め、徐々に少し古い時代の木材との間で年輪幅の変動パターンを対比して年代を決定しながら、さらに過去へ過去へと年代既知の年輪幅のデータを伸ばしていく。実際は木によつては年輪が形成されない年（欠損輪）があったり年輪様の構造が二つ以上できてしまう年（偽年輪）があったりするるので、年輪年代を決めながら年輪幅のデータベースを過去に延伸するときには、できるだけ多くの樹木個体からデータを得て、欠損輪や偽年輪がある場合には、そのデータを多数決（多対一の評決）で修正する作業も必要になる。こうした一連の作業を「クロスデーティング」と呼び、樹木年輪古気候学のデータが年単位の年代の信頼性を持つこととの前提となっている。こうして作られた「特定の地域の特定の樹種の年輪幅の経年変動パターン」のことを、「標

準年輪曲線」或いは「マスタークロノロジー」と呼び、これが「年代既知の木材」のデータとして「年代未知の木材」と比較される。

#### 気候復元の方法―統計数学を駆使

地域ごと樹種ごとの年輪データ（年輪幅やX線で計測できる年輪密度など）の標準年輪曲線はそのまま古気候の復元にも使われる。しかし「年輪幅や年輪密度の標準年輪曲線から気候を復元する」とは具体的にはどういふことか。標準年輪曲線は寒冷地では気温、乾燥地では降水量の指標になるとしても、一体、何月の気温や降水量と対応するか。冷静に考えると簡単ではない。

樹木年輪古気候学では通常、年輪採取地域の月別気象観測データと標準年輪曲線の直接対比により、「年輪データを気候データに変換する方程式」を作り、それを気象観測データが得られていない時代の年輪データに適用して過去の気候を復元する。方程式は簡単な一次方程式（例えば、「七・八月の平均気温」 $\parallel a \times$ 「年輪最大密度」 $+ b$ 、 $a$ と $b$ は定数）で示され、それは気候データをY軸、年輪データをX軸においたグラフ上でデータの分布を直線近似した回帰直線として得られる。つまり年輪データは必ず気象観測が始まった近代以降までつながっている必要がある。

クロスデーティングは現生木から出発するので、「データが近現代までつながっている」ことはそれほど大きなハードルではないが、「近現代の気象観測データを元に古気候を復元する」という原理が、樹木年輪古気象学の「信頼性」と同時に、後述のような「曖昧性」も生み出すことになる。年輪データを一つだけ用いて古気候を復元する代わりに、多くの場合、復元の統計的精度を高めるために、たく

さんの地域のたくさんの樹種のさまざまな種類（年輪幅や年輪密度など）の年輪データを右辺において、 $Y = a_1 \times X_1 + a_2 \times X_2 + a_3 \times X_3 + \dots + b$ （ここで、 $a_n$ は比例定数、 $X_n$ は年輪データ、 $Y$ は復元される気候データ）という形の多元一次方程式が、気候データとの重回帰分析<sup>3</sup>によって作成される。本書では議論されていないが一般に気候データとの相関（つまり古気候復元の精度）は、方程式の変数である年輪データの種類の多ければ多いほど高くなるが、それは数学的な見かけの関係であることも多い。実際、生物学的な年輪データと物理学的な気候データの間、一次方程式が形成される必然性はなく、これはあくまでも近似であり背後にどのような因果関係があるのかは良く分からない。このように統計数学の一種である重回帰分析を駆使して行われる樹木年輪による古気候復元では、「実在しない数学的な見かけの関係性」によって誤った復元が行われないよ

うに、さまざまな統計学的検定が行われていて、受理された全ての論文では一定水準以上の信頼性が担保されている。しかし、その手続きは複雑であり、しかも気象観測データのある近現代の期間内ではしか検定は行えないので、それが後述のように樹木年輪による古気候復元に一定の曖昧さを付与している。もっとも本書は一般向けの書籍なので、そうした議論は行われていない。

### 書かれていないことー弱点と克服の方法

本書では詳しく書かれていないが、クロスデーティングで年代を決めた多くの個体の年輪データを繋ぎ合わせて標準年輪曲線を作る際には、生の年輪幅のデータをいきなり個体間で平均したりはしない。年輪幅には一般に成長と共に生理学的な理由で年輪幅が徐々に狭くなっていく気候変動とは関係のない「樹齢効果」があるからである。この「樹齢効果」は同じ地域の同じ種類の樹木であれば同じように生じると仮定できるので、さまざまな時代に生まれた同一地域・同一樹種の多数の年輪幅のデータを樹齢に対して並べ直して平均することで、「気候が一定だったら樹齢と共に年輪幅はこんなふうに変わるはず」という曲線を作成することができる。この曲線のことをRCS<sup>3</sup>と呼び、年輪幅の生データからRCSを引いて気候変動だけの効果を残

し、それを改めて年代毎に個体間で平均することで、年代決定にも気候復元にも有効な標準年輪曲線を作ることができ。ただし日本のように木が密生している場所では年輪幅の長期変動に隣接個体からの生態学的攪乱が影響するのでRCSを引いても気候変動の効果だけを残すことはできず、標準年輪曲線を作成する際には樹齢効果や生態学的攪乱の影響を回避するために、年輪幅に含まれる長期成分は全て削除するのが普通である。つまり日本のような地域では年輪幅を使って百年以上の長期の気候変動を復元することは原理的に難しい。

本書に書かれていない樹木年輪古気候学のもう一つの弱点は、「気候変動自体に伴って年輪データと気候の定量的関係性が生物学的に変化する」可能性である。例えば寒冷圏では気温が年輪幅の規定因子になるが、温暖化が進めば気温はやがて樹木の成長を制限しなくなり、代わって降水量のような別の因子が年輪幅を規定する可能性がある。このことをダイバージェンス効果と呼び、北極圏の特定の地域では二〇世紀末からみられるようになってい<sup>5)</sup>る。同じような温暖化に伴う年輪と気候の関係性の変化は、例えば中世温暖期にもあった可能性があるが、先述のように気象観測期間の中だけで年輪データと気候データの関係を回帰分析によって検定するこれまでの研究スタイルでは、過去の

気候変動が観測データの範囲を越えている場合、原理的に対応できないという問題がある。

### IPCCとの緊密な協力―政治的な渦中へ

本書では樹木年輪古気候学の弱点は詳しく紹介されていないが、それには古気候学に対する一連の政治的弾圧が影響している可能性がある。世界中の樹木年輪などの古気候データを統計学的に処理して過去千年間に亘り一年単位で復元された北半球の平均気温の変化が二〇〇一年のIPCCの報告書<sup>6)</sup>に掲載された。そのグラフは二〇世紀の温暖化が前代末聞の急激なものであることを示す「ホッケースティック」のような形をしていたため、温暖化に危惧を抱く多くの人々に積極的に引用されたが、温暖化対策を嫌う業界からの執拗な攻撃に晒されることになった。樹齢効果やダイバージェンス効果は温暖化懐疑論者の格好の攻撃的になるが、長周期の気候変動の検証には、そうした影響とは無縁の樹木年輪以外の古気候データとの比較が有効である。実際に多様な古気候データの統合研究が進む中で「ホッケースティック」は、より複雑な「スパゲッティ」に置き換わっていったが、二〇世紀の温暖化が特異なものであるという事実自体は一貫して確認され続けている。

IPCCに参画した樹木年輪古気候学者は気候モデリン

グ研究者とも連携を深めてきた。特に数十年スケールの気候変動の復元結果は、過去の気候を再現する気候モデルの計算結果とも良く合致して、モデル計算と古気候復元の両者の信頼性を担保するものになっており、温暖化対策と世界史研究の両者にとっても意義深い状況にある。

### 歴史学への示唆―年単位の正確性を元に

こうした樹木年輪気候学の原理と方法、その現代的課題を踏まえて、本書ではさまざまな世界史の事象に対して、樹木年輪による古気候データによる解釈を試みている。ここでは、樹木年輪古気候学の優位性が最も発揮される「年々数十年単位の気候変動」と歴史事象の関係性が縦横に議論されている。まず、近・現代の異常気象の歴史的な意味付けから始まり、一三・一四世紀の中央ユーラシアのモンゴル帝国の興亡の背景にあった気候変動や、六世紀の欧州における古代から中世への転換を促した気候の寒冷化、米国南西部の先住民遺跡の帰趨を決めた一二・一三世紀の大旱魃、カンボジアのアンコール王朝の崩壊をもたらした一四・一五世紀の巨大旱魃等々、これまで小氷期や中世温暖期といった言葉で長期の気候変動の歴史への影響が漠然と議論されていたことと比べて、遙かに解像度の高い気候と社会の関係が指摘されていて、今後の更なる研究の発展

が期待される。

### 新しい展開―歴史への正確な応用のために

本書で扱われているデータは主に年輪の幅と密度であるが、実は今、先述の樹齢効果や生態学的攪乱、ダイバージエンス効果などの生物学的な制約を克服できる新しい年輪データとして、年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比の測定が急速に進んでいる。年輪の酸素同位体比は中・低緯度では夏の降水量や気温の変動を正確に復元でき、樹種の違いを越えた年輪年代決定の指標にもなり、特に広葉樹では年輪幅に見られる生物学的制約が一切ないことが分かっていた<sup>8,9</sup>。一方で針葉樹の年輪酸素同位体比には生態学的攪乱や樹齢効果が影響するが、同じセルロースの水素同位体比を組み合わせることで、そうした効果が消去できることも分かり、年輪セルロースの酸素（水素）同位体比を使えば短周期から長周期まであらゆる時間スケールの気候変動の復元が可能になりつつある<sup>10</sup>。

それゆえ歴史研究に樹木年輪古気候データを活用する際には、酸素同位体比を含むさまざまな種類のデータを参照することが望ましいし、長周期の気候変動を議論する際には樹木年輪以外の低時間解像度の古気候指標と比較していくことも有効である。そうした比較のためのデータは、ア

メリカ大気海洋局NOAAの古気候データサイトからダウンロードできるようになっている。歴史研究者による積極的な活用が望まれる。

## 註

- (1) 奈良文化財研究所編、一九九〇『年輪に歴史を読む―日本における古年輪学の成立』など、日本の年輪年代研究を牽引してきた。
- (2) 回帰直線(単回帰直線)とは、一つの説明変数から一つの目的変数の変動を予測するために、最小二乗法で両者の関係を求めた近似直線(単回帰式という一次方程式)のこと。
- (3) 重回帰分析とは、複数の説明変数から一つの目的変数の変動を予測するためのものであり、単回帰分析と同じく最小二乗法で一次方程式(重回帰式)を求める。
- (4) RCSは'Regional Curve Standardization'の略。詳しくは以下参照。Esper et al., *Tree-Ring Research*, 59, 81-98, 2003.
- (5) D'Arrigo et al., *Global and Planetary Change*, 60, 289-305, 2008.

史苑(第八二卷第二号)

- (9) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), TAR Climate Change 2001: The Scientific Basis (<https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/>)
- (10) PAGES 2k Consortium, *Nature Geoscience*, 12, 643-649, 2019.
- (11) Büntgen et al., *Paleoclimatology and Paleoclimatology*, 34, <https://doi.org/10.1029/2019PA003831> 2020.
- (12) Esper et al., *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB4018, doi:10.1029/2010GB003772, 2010.
- (13) 中塚武、二〇二一『酸素同位体比年輪年代法―先史・古代の暦年と天候を編む』(同成社)。
- (14) <https://www.ncsl.noaa.gov/products/paleoclimatology> (名古屋大学大学院環境学研究科教授)