



Title	樹木年輪による古気候復元の方法と世界の研究動向
Author(s)	小林, 修; Kobayashi, Osamu
Description	1章 10年～100年スケールの気候変動の観測, 気候復元とモニタリング
Citation	低温科学, 65, 43-48
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/20453">https://hdl.handle.net/2115/20453</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	KOBAYASI.pdf





# 樹木年輪による古気候復元の方法と世界の研究動向

小林 修 愛媛大学

樹木年輪による気候復元は、高い時間分解能と適用範囲の広域性を特徴とする。樹木年輪気候学は、これまで多くの課題を克服しながら、現在も年輪データ時系列を過去に伸ばすことや解析対象地域を広げることとあわせて、気候に敏感に応答する年輪指標の解析が進められ、成果をあげている。本報告では、樹木年輪気候学が持ち合わせる長所と短所について整理するとともに、特に環オホーツク地域の樹木年輪気候学についての課題を提示し、同地域の古気候復元の可能性について述べる。

## 1. はじめに

樹木の年輪には、それを形成した個体に影響を与えた様々な環境の変遷が記録されている。樹木の年輪幅の変動に生育環境の変遷が反映されていることは、古くから世界各地の林業家、大工職人（日本においては宮大工）の間では、知られていたであろうことは想像されるが、それを学問的に体系づけ、今日の樹木年輪年代学の礎を築いたのは、アメリカの天文学者 A. E. Douglass である<sup>1)</sup>。Douglass が、アリゾナ乾燥域に生育する樹木の切り株に刻まれた年輪幅の経年変動が、その地域の降水量と高い相関があることに気づき、樹木年輪年代学 (dendrochronology) として体系的に研究を始めたのは 1900 年代初頭である。その後約 100 年が経過し、樹木年輪年代学は木造遺跡などの年代特定を行う樹木年輪考古学 (dendroarchaeology)、森林動態の把握や森林生態を分析する樹木年輪生態学 (dendroecology)、そして樹木の年輪から古気候を復元する樹木年輪気候学 (dendroclimatology) など様々な分野に応用され、歴史や自然現象の解明に一躍を担ってきた<sup>2)</sup>。特に、地球規模の気候変動を解析する上では、その年単位の時間的分解能と地球の森林分布と対応する空間分布の広さという利点を生かし、樹木年輪気候学が果たす役割は大きい。

樹木年輪気候学の科学史については、Hughes により網羅的にまとめられている<sup>3)</sup>。樹木年輪気候学が国際舞台に躍り出たのは、1974 に開催された The First International Workshop on Dendroclimatology においてである。この会議を主催した Harold C. Fritts は、1976 年にのちに樹木年輪気候学を学ぶ上で欠かせない学術書となる *Tree Rings and Climate*<sup>4)</sup> を出版し、気候復元に必要な試験地の選び方、計測データの基本統計量の分析、そして年輪データの気候応答解析と気候復元モデルの構築について体系的に解説した。解析手法の確立とあわせて、解析地域もこの頃から広がりを見せ、1970 年代後半

には、アリゾナに代表される乾燥域から北半球の亜寒帯地域や温帯地域、そして南半球に及ぶようになった<sup>5)</sup>。その後 1980 年代に入ると、年輪幅の情報に加えて、主として木材の材質特性の評価に使われることが多かった木材密度が年輪気候学に適用されはじめた<sup>6,7,8,9)</sup>。時期をほぼ同じくして、木材中に含まれる同位体を気候の指標として利用する研究も始まった。ロシアや南アメリカをはじめ、日本を含む中国アジア地域から樹木年輪気候学上の成果が数多く国際的に報告されるようになったのも 1980 年代に入ってからである<sup>3)</sup>。前述の 20 年の間に、樹木年輪データの共有化を促し、より広域的な解析に道を開くことになる国際樹木年輪データベース ITRDB (International Tree-Ring Database; <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>) が発足し、現在では世界 2000ヶ所以上のサイトの年輪情報が蓄積されている。このデータベースに蓄積されたデータは、現在地球規模の気候復元解析にも利用されている<sup>10,11,12)</sup>。

日本における樹木年輪年代学は、気候変動に関する研究にはじまる。20 世紀初頭には、豊凶の記録と樹木年輪幅の変動との相関を取り上げた研究をはじめ<sup>13,14)</sup>、1900 年代半ばには降水量や太陽黒点との関係について着目した研究を見ることができる<sup>15,16,17)</sup>。その後、日本のように温暖湿潤で地形が複雑な地理環境において樹木年輪年代学は適用しにくいという考えが出され<sup>18)</sup>、日本における年輪気候学研究は一度低迷するが、アメリカや西欧諸国で成功した樹木年輪気候学的手法を適用して 1980 年代に再び研究事例が多く見られるようになる<sup>19,20,21,22)</sup>。日本において、樹木年輪年代学に携わる研究者が集まる樹木年輪研究会が最初の報告書を出したのも 1988 年であった。以後、日本においても樹木年輪幅や木材密度から気候復元を行う樹木年輪気候学に関する研究が継続的に行われてきている<sup>23,24,25,26,27,28,29)</sup>。

樹木年輪気候学は、解析手法において多くの問題を克服しながら、現在においても年輪データの時系列を過去

に伸ばすことと解析対象地域を広げることとをあわせて、気候に敏感に応答する年輪指標の解析が進められ、成果をあげている。しかし、未解決の問題が存在することも確かである。ここでは、樹木年輪気候学が持ち合わせる長所と短所について整理するとともに、特に環オホーツク地域の樹木年輪気候学についての課題を提示し、同地域の古気候復元の可能性について述べる。

## 2. 樹木年輪による気候復元

### 2.1 気候復元モデルに使用する年輪データの処理

樹木年輪を気候復元に用いる際の長所と短所として以下の項目が挙げられる<sup>3)</sup>。

(長所)

- ・高い精度で、年輪から得られた情報の年代を特定することができる。
- ・共通基準により解析された樹木年輪時系列が広範囲にわたって構築されている。
- ・地理的に広範囲にわたって年輪の年変動パターンを構築することができる。
- ・線形回帰による気候復元モデルによって統計的に有意な気候の復元ができる。

(短所)

- ・樹木年輪時系列は気候変動をある特定の季節ないし月についてのみ断片的にしか代替することができない。
- ・年輪による気候復元は、同じ気候因子が過去から現在にわたって変わることなく同様に樹木年輪の形成に影響を与えているとの仮定に基づき行われている。
- ・標準化と呼ばれる手法により、年輪時系列から気候による変動を抽出する際に、多くの場合、時系列に含まれる中長期の周期成分が取り除かれる傾向にある。

上記に述べた長所と短所は、樹木生理を反映した特性と樹木年輪年代学が発展する過程で開発されてきた解析手法に起因する。原則的に一年にひとつ形成される樹木年輪をデータとして用いる樹木年輪年代学の最大の利点は、その年代特定の精度にある。樹木年輪が、放射性炭素同位体を用いた年代特定に不可欠な暦年校正に用いられるのもこのためである。ただし、年代の特定に耐えうる年輪時系列を得るには、同じ環境に生育する個体群の中からできる限り多くの個体から年輪試料を採取すること、そしてその個体群の中で年輪時系列のパターンを相互に照合することで、年輪が正常に形成されないために

発生する欠損輪や偽年輪を検出し、時系列の年代を修正する作業が必要不可欠である。この作業をクロスデーティング (crossdating) とよび、その基礎となる手法は A. E. Douglass により開発された<sup>30)</sup>。クロスデーティングの国際的な共通する条件として、一個体から2方向ずつ、そして環境を同じにする林分 (個体群) から最低20個体以上の計40試料以上を用いることが一般的となっている。クロスデーティング作業は、主に年輪幅の変動を棒グラフに記録したスケルトンプロットを比較する方法、あるいは年輪幅の折れ線グラフを照合することにより行う方法が用いられる<sup>31)</sup>。さらに、目視によるクロスデーティングに加えて、現在は COFECHA に代表される統計処理ソフトウェアを使用して時系列の個体内および個体間の相関を分析することにより、統計的に年輪時系列の質を確証する方法がとられている<sup>32)</sup>。日本をはじめ、温暖湿潤な気候帯において統計的に耐えうる年輪時系列の質を確保するためには、より多くの試料を必要とするのが一般的である。

樹木年輪幅の経年変動には、樹木の生育に影響を与え、いくつかの因子が複合的に作用した結果が反映されている。これを、樹木年輪年代学では概念的に以下の式(1)で表現される1次の合成関数として考える<sup>33)</sup>。

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (1)$$

$R_t$ : t年に観測される年輪幅

$A_t$ : 個体の樹齢および直径に由来する成長傾向

$C_t$ : 気候に由来する環境因子のシグナル

$D1_t$ : 個体の極周辺のローカルな攪乱の影響による変動

$D2_t$ : 個体群に共通する攪乱の影響による変動

$E_t$ : 既述の影響では説明されない因子による変動

樹木年輪気候学においては、樹木年輪時系列から気候因子の影響により形成された変動成分をできるだけ高い濃度で抽出したい。このため、気候因子以外の変動成分を取り除くために計測値に標準化 (standardization) と呼ばれる処理を行う。標準化では、計測値に近似曲線を回帰し、年輪形成年ごとに計測値と近似値との比もしくは差を算出する。既存の研究では、近似する曲線として主として式(1)の  $A_t$  に代表される成長傾向を取り除くのに有効な指数曲線<sup>31)</sup> ないし、個体特有の周期成分減らし他の個体と共通する周期成分を残して抽出するハイパスフィルターであるスプライン曲線を近似することが多い<sup>34)</sup>。この作業の際には、標準化後の時系列の個体間の相関が高くなること、また SN 比などを解析しながら試行錯誤で最適な近似曲線を決定する。実際には、ARSTAN

と呼ばれる樹木年輪の標準化に特化したプログラムを利用することが多い<sup>34)</sup>。この標準化作業において、個体群に共通する気候因子を抽出できる反面、中長期の周期成分をも取り除く傾向がある。また、残存する周期成分も試料の時系列の長さに規定されるため、個体群の中で異なる年数の時系列が混在したりする場合にも、周期成分の情報が攪乱される場合がある<sup>35,36)</sup>。このため、樹木年輪による気候復元は、多くの場合、気候変動の中長期の周期成分の復元が困難なことが多い。Mannらは、気候復元の際に樹木年輪の長所を生かしながら、他の歴史記録や長期気象観測記録そしてアイスコアやサンゴなど他の代替データとを組み合わせることで樹木年輪の短所をカバーして気候復元を行っている<sup>12)</sup>。

## 2.2 気候復元モデルの構築

樹木年輪時系列は、必ずしも解析者が求めたいとする気候を代替するとは限らない。樹木年輪時系列は、その個体の生育環境と樹種の生理特性などにより気候因子に対する応答パターンが異なる。一般的に、森林限界に代表される生育環境のマージンにあたる場所に生育する樹木は、その成長の制限因子（例えば気温など）に対する感受性が強い傾向にある<sup>4)</sup>。このために、試料採取サイトを選択するときには、そのサイトの生育環境を十分に観察した上で、そこに育つ樹種とその生理特性を把握し、樹木成長の制限因子を予測する作業が必要不可欠となる<sup>37)</sup>。

樹木の気候応答を解析する方法として、樹木年輪データを被説明変数、月別の気温および降水量などの気候因子を説明変数とする重回帰分析を行うレスポンスファンクション解析が有効である<sup>4)</sup>。このとき樹木年輪気候学では、説明因子として気候因子の主成分得点を用いることが多い。主成分得点を用いることにより、重回帰分析における説明変数の多重共線性の問題を排除することができる。被説明変数として用いる樹木年輪時系列の種類には、樹木の年輪構造を反映する年輪幅や木材密度および細胞寸法と<sup>38)</sup>、年輪に含まれる同位体比などがあり、それぞれ樹種特性を反映する形で気候に対する応答に特性がある。一般的に、年輪幅は気温ないし降水量の双方に応答するとともに、生育地の土壤環境などの地域特異性を反映する傾向にある<sup>27,39)</sup>。一方、木材密度とりわけ年輪内の最大密度は気温に対して強い応答と示すとともに、地域特異性によらずに広範囲に共通する気候応答を示す<sup>27,39)</sup>。広葉樹の年輪を構成する道管の直径なども、気温および降水量と強い相関を示す<sup>40,41,42)</sup>。多くの場合、樹木年輪時系列は年輪形成年の気候に対する応答に留まらず、形成年以前の気候にも応答を示すことが多い。これ

は前年からの、糖を貯蔵と新芽の形成などを反映している結果であると考えられている<sup>4)</sup>。年輪に含まれる炭素、酸素、水素の同位対比による気候応答の解析は近年、年輪から分離する試料の細分化が可能になったことにより、時間分解能がめざましく向上している<sup>43,44,45,46)</sup>。年輪同位対比は、気温や土壤水分に強い相関を示す気孔コンダクタンスと光合成速度とのバランスを反映して記録している<sup>47)</sup>。年輪幅や木材密度などの年輪構造が示す気候応答よりも相関が高くなる傾向がある。また、個体間の相関も強く、個体群に共通する気候応答を解析するのに適していると考えられる。

レスポンスファンクションにより、樹木年輪時系列の気候応答特性を解析した後、今度はレスポンスファンクションとは逆に、被説明変数に気候をとり、説明変数に樹木年輪時系列をとる重回帰式を構築する。これが、トランスファーファンクションと呼ばれる気候復元モデルとなる<sup>4)</sup>。気候復元モデルが統計的に有意かどうかは、重回帰分析に使用する年数を半分に分け、一方の側で構築したトランスファーファンクションを使用して他方の側の推測値を算出し、実測値との差を検定することで判断する。統計的な判定には、一般的に最低でも約100年の気象観測データと樹木年輪時系列がオーバーラップする期間が必要とされる。したがって、気象観測データが不足する地域では、客観データなどで代替してで切りうる限り統計年数を長く確保することが必要となる。

現在のところ、多くの樹木年輪気候学的研究ではこの線形帰帰によるレスポンスファンクション解析およびトランスファーファンクション解析に依存しているが、ニューロネットワークに基づく非線形多変量解析を適用している解析例もある<sup>48)</sup>。

## 3. 樹木年輪気候学の今後の課題

### ——特に環オホーツク地域において——

環オホーツク地域において、地域に生育する樹種と地理的環境を鑑みて樹木年輪による気候復元は大きな可能性を秘めている。北海道では、*Picea glehnii* (F. Schmidt) Mast. (アカエゾマツ)、*Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim. (ヤチダモ)、*Quercus dentata* Thunb. (カシワ) が気候の復元に適用できることがわかっている<sup>27,28,29,49,50)</sup>。国際樹木年輪データベース (ITRDB) には、ロシア北東部から採取された樹木年輪時系列が多数登録されており、年輪気候学的研究に使用されている<sup>51,52,53,54,55)</sup>。同地域に関して国際樹木年輪データベースには、以下の樹種についてそれぞれ200年から1000年の

年輪幅および木材密度時系列が登録されている。

*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. var. *gmelinii*  
400~500 年  
*Larix sibirica* Ledeb. 200~1000 年  
*Picea obovata* Ledeb. 200~300 年  
*Pinus sylvestris* L. 200~300 年  
*Pinus sibirica* Du Tour 300~400 年

樹木年輪による気候復元を目的とした場合、*L. gmelinii* および *L. sibirica* の 2 種が時系列の長さから判断したときに有用であると考えられ、おおむね 500 年にわたる気候を復元することができるかと期待される。

ヨーロッパからシベリア地域をそして北アメリカの高緯度地域を広くカバーする木材密度時系列のネットワークを活用した気候復元は、樹木年輪気候学の長所を生かした研究に位置づけられる<sup>52)</sup>。高緯度地域では、気温が樹木成長の制限因子として働いている傾向が強く、今後この地域の気温の動向を推測する上でも重要な成果を得ることのできる地域であることに間違いはない。一方、木材密度ネットワークを使用した解析からは、北半球の高緯度地域において 1900 年代半ば以降、木材密度と夏期気温の時系列の中に含まれる 10 年以上の中長周期の変動がお互いに乖離してきていることが示されている<sup>10,56)</sup>。この知見は、今後環オホーツク地域の樹木年輪気候学的研究を進める上で注目すべき現象のひとつであろう。また、気候復元に必要な気候観測データの不足を客観データなどで補うことも必要である。環オホーツク地域では年輪以外にもアイスコアや土壌堆積物など気候代替データがいくつか存在する。したがって、この地域では代替データどうしをお互いに検証した上で、代替データ長所を組み合わせ、短所を克服することができる条件が備わっており今後の気候復元解析の進展が期待される。

## 参考文献

- 1) G. E. Webb, *Tree rings and telescopes. The scientific career of A.E. Douglass*, University of Arizona Press, Tucson (1983).
- 2) M. Kaennel, F. H. Schweingruber, *Multilingual glossary of dendrochronology*, Paul Haupt Berne, Berne (1995).
- 3) M. K. Hughes, *Dendrochronologia* **20** (2002) p.95.
- 4) H. C. Fritts, *Tree rings and climate*, Academic Press, New York (1976).
- 5) M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher, V. C. J. LaMarche, Eds., *Climate from tree rings*, Cambridge University Press, Cambridge (1982).
- 6) H. Polge, *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts* **20** (1963) p.530.
- 7) H. Polge, *Wood Science and Technology* **12** (1978) p.187.
- 8) F. H. Schweingruber, H. C. Fritts, O. U. Bräker, L. G. Drew, E. Schär, *Tree-ring Bulletin* **38** (1978) p. 61.
- 9) F. H. Schweingruber, *Tree Rings: Basics and applications of dendrochronology*, D. Reidel Publishing, Dordrecht (1987).
- 10) K. R. Briffa *et al.*, *Nature* **391** (1998) p.678.
- 11) K. R. Briffa, P. D. Jones, F. H. Schweingruber, T. J. Osborn, *Nature* **393** (1998) p.450.
- 12) M. E. Mann, R. S. Bradley, M. K. Hughes, *Nature* **392** (1998) p.779.
- 13) 山澤金五郎, *気象集誌* **7** (1929) p.186.
- 14) 志田順, *科学知識* **15** (1935) p.10.
- 15) 山本武夫, *天文と気象* **15** (1949) p.12.
- 16) M. Outi, *Bull. Kyoto Gakugei Univ. Ser. B No. 19* (1961) p.41.
- 17) M. Outi, *Bull. Kyoto Gakugei Univ. Ser. B, No. 20* (1962) p.25.
- 18) 有光教一, 樋口隆康, Eds., *先史の世界*, 第 1 巻, 人文書院, 京都 (1965).
- 19) 福岡義隆, *地理* **27** (1982) p.70.
- 20) 武市伸幸, *日本林学会誌* **65** (1983) p.179.
- 21) 野田真人, 東村武信, 東村隆子, *考古学と自然科学* **16** (1983) p.17.
- 22) 武市伸幸, *東北地理* **40** (1988) p.181.
- 23) 安江恒, 船田良, 野田真人, 深沢和三, *北海道大学農学部演習林研究報告* **50** (1994) p.243.
- 24) 野田真人, *北海道大学農学部演習林研究報告* **53** (1996) p.97.
- 25) T. Sweda, *Terrestr. Atmosph. Ocean. Sci.* **5** (1994) p.431.
- 26) K. Yasue, R. Funada, K. Fukazawa, J. Ohtani, paper presented at the *IGBP-PAGES/PEPII Symposium on Palaeoclimate and Environmental Variability in Austral-Asian Transect during the Past 2000 Years*, Nagoya, Japan (1995).
- 27) K. Yasue, R. Funada, K. Fukazawa, J. Ohtani,

- Can. J. For. Res.* **27** (1997) p.1962.
- 28) N. Davi, R. D'Arrigo, G. Jacoby, B. Buckley, O. Kobayashi, *Climatic Change* **52** (2002) p.201.
- 29) R. D. D'Arrigo *et al.*, *Can. J. For. Res.* **27** (1997) p. 613.
- 30) A. E. Douglass, *J. For.* **39** (1941) p.825.
- 31) M. A. Stokes, T. L. Smiley, *An introduction to tree-ring dating*, The University of Chicago Press, Chicago (1968).
- 32) R. L. Holmes, *Tree-Ring Bull.* **43** (1983) p.69.
- 33) E. R. Cook, L. A. Kairiukstis, Eds., *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands (1990).
- 34) E. R. Cook, K. Peters, *Tree-Ring Bull.* **41** (1981) p. 45.
- 35) E. R. Cook, K. R. Briffa, D. M. Meko, D. A. Graybill, G. Funkhouser, *The Holocene* **5** (1995) p. 229.
- 36) P. R. Sheppard, R. L. Holmes, L. J. Graumlich, *Tree-Ring Bull.* **54** (1997) p.1.
- 37) F. H. Schweingruber, *Trees and wood in dendrochronology*. T. E. Timell, Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg (1993).
- 38) R. Wimmer, *Dendrochronologia* **20** (2002) p.21.
- 39) K. Yasue, R. Funada, O. Kobayashi, J. Ohtani, *Trees* **14** (2000) p.223.
- 40) D. Eckstein, *New Phytologist* **163** (2004) p.1.
- 41) U. Saß, D. Eckstein, *Trees* **9** (1995) p.247.
- 42) P. Fonti, I. García-González, *New Phytologist* **163** (2004) p.77.
- 43) T. Nakatsuka *et al.*, *Geochemical J.* **38** (2004) p.77.
- 44) A. Kagawa, A. Sugimoto, T. C. Maximov, *New Phytologist* **171** (2006) p.793.
- 45) A. Kagawa, A. Sugimoto, T. C. Maximov, *Plant, Cell and Env.* **29** (2006) p.1571.
- 46) A. Kagawa, A. Sugimoto, K. Yamashita, H. Abe, *Plant, Cell and Env.* **28** (2005) p.906.
- 47) D. McCarroll, N. J. Loader, *Quaternary Sci. Rev.* **23** (2004) p.771.
- 48) J. Guiot, C. Goeury, *Dendrochronologia* **14** (1996) p. 295.
- 49) O. Kobayashi, R. Funada, K. Yasue, J. Ohtani, *Ann. Sci. For.* **55** (1998) p.277.
- 50) K. Yasue, R. Funada, T. Kondo, O. Kobayashi, K. Fukazawa, *Can. J. For. Res.* **26** (1996) p.2052.
- 51) M. Gostev, G. Wiles, R. D'Arrigo, G. Jacoby, *Can. J. For. Res.* **26** (1996) p.2048.
- 52) K. R. Briffa *et al.*, *J. Geophysical Res.* **106** (2001) p. 2929.
- 53) E. A. Vaganov, M. K. Hughes, A. V. Kirilyanov, F. H. Schweingruber, P. P. Silkin, *Nature* **400** (1999) p. 149.
- 54) I. P. Panyushkina, D. V. Ovtchinnikov, M. F. Adamenkoc, *Tree-Ring Research* **61** (2005) p.33.
- 55) R. R. Yadav, T. T. Bitvinskis, *Dendrochronologia* **9** (1991) p.115.
- 56) K. R. Briffa *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **353** (1998) p.65.

(2006年12月9日 改訂受付)

---

## Climate reconstructions from tree rings: Current state and methodology

Osamu Kobayashi  
The University Forest, Faculty of Agriculture, Ehime University

abstract:

Tree rings possess high potential to reconstruct past climate in both temporal and spatial scale compared to any other climate proxies. During the past 100 years, developments in dendroclimatology enhanced our understanding in past climate in many parts of the world. Dendroclimatology has been applied to various tree species growing in different site conditions. Ring width, density, wood anatomical features and isotopes derived from tree rings are now used as climate proxies. In this report, the current state of dendroclimatology and the strengths and weaknesses are explained. The potential of dendroclimatological research within the pan-Okhotsk region is discussed.

## 小林 修

〒790-8566 愛媛県松山市樽味 3-5-7  
愛媛大学 農学部附属演習林

Tel/Fax: 089-946-9913

e-mail: osamuk@agr.ehime-u.ac.jp

URL: <http://homepage3.nifty.com/ecotalk/osa-lab.htm>