

年輪年代学

末田 達彦

はじめに

どのような学問にしろ、ある程度の体系ができてしまうと、無言の前提、固有の術語等、本質には無関係な夾雑物が増殖し、門外漢には大変わかりにくいものになってくるが、元を正せば、よほどのバカでないかぎり誰でも考えられるような極めて単純な発想と方法論で組立てられているのが常である。

しかし、ここで解説をおおせつかった年輪年代学は、その発想と方法論の単純さにかけて常識の域を脱しているので、日本の知識人の大半にはマユツバものと思われるであろうことはわた

しの体験が教えるところである。幸か不幸か、今日わが国の主流となったこの軽佻浮薄の一大潮流に敢然と棒さす本誌を定期購読されている読者の大半は日本の代表的知識人と察するが、それだけにまず次節「年輪年代学の発想法」の前半分でウソ八百と思われるであろうと懸念する次第である。発想が余りにも素人臭いのは、最初から筆者も認めるところにつき、せめて次節の最後まででは早まった結論をさしひかえていただくようお願いして「はじめに」とさせていただく。

1 年輪年代学の発想法

年輪年代学の基本として、クロスデイトリング(Crossdating)と標準曲線なる二つの概念がある。樹木の年輪の幅は、当該の年輪が形成されたときの生育条件の良否を反映して広くなったり狭くなったりするが、クロスデイトリングとはこの年輪幅の狭広変化のパターンを手掛かりに、異なる二本の樹木にあらわれた年輪に時間的な一致点を見つけることである。もしこうして時間的な重複を確定することが可能ならば、ある程度の重なりはあるが世代の異なる複数の木をつなぐことよって年輪幅の広狭変化の時系列を現在から過去へと溯らせてゆくことができる。

標準曲線とは、このようにして得られた年輪幅変動の複合的な時系列である。標準曲線の作り方の原理を図1に示した。最上段には木材の出所が示されており、右端の現在生きている木から順次左へ古い建物の構造材、モレインの中の埋蔵木、土中の埋蔵木と世代が溯る。第二段および第三段は各木材の横断面にあらわれた年輪とその拡大図で、最下段はこの拡大図から測定した年輪幅を、横軸に取った相對樹齡に対し上下方向にプロットし折線グラフとして結んだものである。各々の年輪断面につきそれぞれ一本ずつ連続した折線グラフが得られるが、それを一年分ずつずらしながら重ね合せてゆくと、どこかで年輪幅変動パターンの一致点が見つかる。このようにクロスデイトリングにより、世代も生育場所も異なる木から得られた年輪を結びつけて、過去数百年、数千年にわたる一本の連続した時系列、すなわち標準曲線とすることができると。

以上、半分ウソのような話でも、年輪年代学の目指すところは標準曲線の作成にあり、いま、ある特定の地域について標準曲線が完成した暁には、当該地域から出土する時代不詳の木片の絶対年代が決定できることがおわかりいただけたことと思う。しかもこの年代は σ を用いて得られるような標準誤差を伴う区間推定ではなく、時間軸

上の一点として確定的に与えられるものである。

標準曲線も、年代不詳の木の年代測定も、その信憑性はすべてクロスデーティングの成否、すなわち樹木異個体の間で年輪幅の広狭変化のパターンが一致するか否かにかかわっている。しかもこのパターンは、所与の対象地域全体にわたって共通のものでなければ意味をなさないが、年輪幅の広狭を左右する様々な環境要因のうち、そのような広域的かつ恒常的な作用を持つのはただ気候要因だけである。

気候以外にも様々な環境要因が樹木の生長を左右するが、その影響はいずれも局所的あるいは短期的なもので、所与の地域内に存在する同樹種の全個体に共通した年輪幅の広狭変化を生ずるようなものではない。例えば、光あるいは水分をめぐる隣接木との競合は、生長を左右する最たる要因であるが、その結果生ずる年輪幅の大小は個体レベルの現象にすぎないし、病虫害等による生長の衰退も、時によっては広域的な場合もあるが、それでもすべての木に起こるといった普遍的なものではないし、当該木の生涯を通じて持続するといった類のものでもない。このように、これら非気候的な環境要因の影響による年輪幅の変化は、樹木個体個体の個別事情に依るところが大きく、クロスデーティングの妨げにはなっ

も助けにはなり得ない。

従ってクロスデーティングの成否は、まずその年輪幅の変動にいかにも多くの気候情報を反映した木を選ぶかにあり、次いでこの年輪幅変動からいかに多くの非気候的情報を除去し、気候情報だけを残すかにある。

2 年輪と気候

植物の生育範囲が気候によって大きく規制されていることは、地球上の気候帯の区分と植生帯の区分がほぼ一対一に近い対応を示すことから明らかである。このように気候がある特定の植物種の分布域を決めているということは、気候が当該種の生長を左右しているということと同義である。すなわち、分布域の外では、気温なり、降水量なり、あるいはその双方なりが不足して当該種が生存し得ないし、分布域の中でも、当該種がcaろうじて生存できる分布の周辺部と、十分な気温と降水量に恵まれた中心部では生長の良否にかなりの差が生じる。

樹木の場合、ある個体が当該種の分布の中心にあるか周辺部にあるかは、単に生長の良否、すなわち年輪幅の大小だけでなく、その他の年輪年代学的な年輪の特性にも大きな違いを生む(図2)。

まず、マージナルな生育条件下にある分布の周辺部では、たとえそれがわ

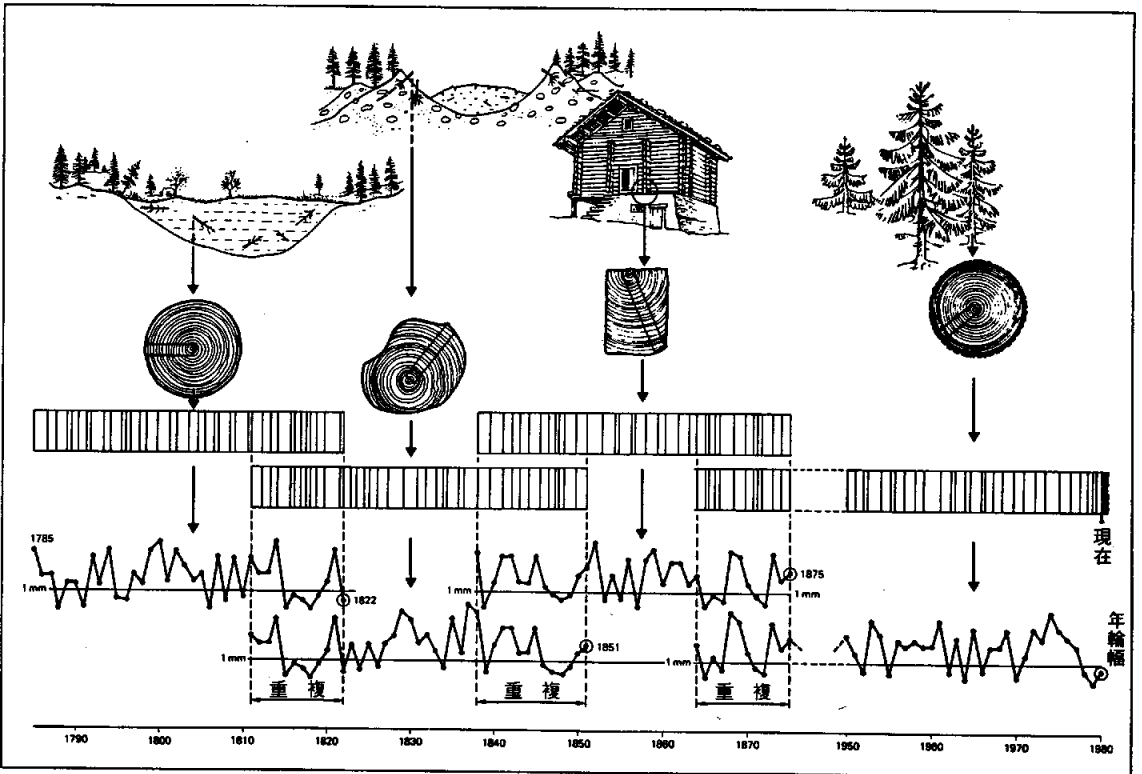


図1 クロスデーティングによる標準曲線の作成 (Lamprecht, 1984による)

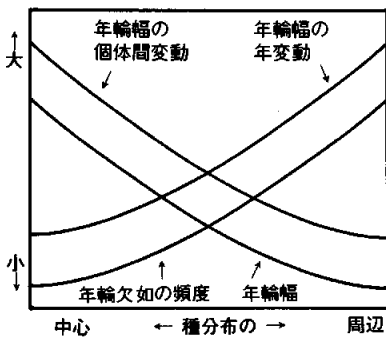


図2 種分布の中心から周辺に至る年輪特性の変化

ずかなものであっても、年々の気候の変動が樹木の生長を大きく左右するので、毎年の年輪幅の変動が激しい。さらに条件の悪い年では、生命を維持するのがやっとで生長が望めない場合も往々にしてあり、これは年輪欠如という形で現れる。他方、分布の中心部では、恵まれた気候条件下にあって年輪欠如などまず起こり得ないし、気温や降水量の年変動も基本的には当該樹種にとつての余剰部分での変動にすぎないので、これによって生長が左右されることもなく、毎年、比較的均一な幅を持った年輪が形成されやすい。

ただし、分布の中心部における気候条件の良さは、そこに生育できる植物の種および個体の数を増加させるので、種間競争および種内競争という植物社会学的な生長変動の要因を強めるが、その変動の時期は個々の樹木によって

異なるため、同一年に形成された年輪についての樹木個体間の変動が大きくなる。分布の周辺部では逆に、このような植物社会学的な競争が弱いので、それに起因する個体間の年輪幅の差は少なく、すべての個体が、よく似た経年変動を示す。

以上のように種分布の周辺部、すなわち気候が植物の生長に対する強い制限要因として働いているところでは、年々の気候の変動を反映して、毎年の年輪に広狭の差が端的に現れ、かつそれが同種の異個体間に広く共通したものであるという、クロスデーティングには極めて好都合な条件がそろっている。

樹木の生長に対し、乾燥が圧倒的な制限要因となっているイタリアにおいて、レオナルド・ダ・ピンチ（一四五二—一五一九）が年輪幅と降水量に、寒冷が制限要因となっているスウェーデンにおいてリンネ（一七〇七—一七七八）が年輪幅と気温に相関を見出したのも、彼等の天才に加え、地理的な必然性も一役買っていると思われるべきであろう。現代的な科学としての年輪年代学では、アメリカ中西部とヨーロッパが最先端にあるが、前者はシェラネバダ山脈のレインシャドウにあって降水量の僅少さが、後者では北欧およびアルプス周辺の低温が、樹木の生長に対する単一的な制限要因として強く効

いていて、年輪年代学には好都合な地理的条件にある。

わが国が年輪年代学の後進国であることにも、地理的、気候的な必然性がある。すなわち、総じて温暖、多湿で植物分布の中心部的な気候条件が卓越したわが国では、広狭変化に富んだ敏感な年輪が形成されにくいというえ、年輪幅の変動には隣接木との競合や人為など非気候要因の影響の比率が高く、気候変動に起因する広域的な変動パターンが抽出しにくい。戦前からある程度の試みがなされているにもかかわらず、あまり明解な結果が得られていないのも、この辺の事情によるところが大きい。

ところが近年になって、わが国でも樹木の生育分布のマージナルなところを選べば、ある程度敏感で気候情報に富んだ年輪が得られそうなのがわかってきた。Sanoらは、北海道・旭岳、本州・蔵王、白山、乗鞍、木曾駒における過去二十余年間のハイマツ頂枝の生長を測定し、その生長変動が山城相互に広域的な相関を持つだけでなく、生長期の気温や日照時間とも相関していることを示した。この結果は、気温の変動がハイマツの生長を左右し、しかも気温の変動には広域的に共通した部分が多いため、広域に散ったハイマツに共通の生長変動が現れたと解すべきであろう。このSanoらの例は、生長

量の尺度として頂枝の伸長量を採用したものが、光谷は年輪幅を用いて、和歌山県高野山、三重県北牟婁郡、長野県木曾郡とこれまた広域に散ったヒノキの生長変動に有意な相関があることを認めている。

3 気候変動の抽出と標準曲線の作製

年輪年代学のサンプルは、当該樹種の北限とか高度限界等なるべく分布のマージナルなところから選ぶのが望ましいことは、前節から明らかであろう。しかしいかにマージナルな場所を選ぼうが、そこから得られた年輪にも気候以外の様々な要因の影響が及んでいることも自明のことである。本節では、いわば事後処理として、年輪幅変動からいかに非気候要因の影響を除去し、それをクロスデーティングの目的にかなったものにするかという方法論を、木曾ヒノキの標準曲線作製という具体例に促して述べたい。

細かく分ければ際限無いが、樹木の年輪形成に影響を与える外的、内的な要因として、

- ① 気候
- ② 傾向変動
- ③ 植物社会学的競争
- ④ 病虫気候害
- ⑤ ランダム変動

が考えられる。このうち同樹種の異個

体間に共通した年輪幅の広狭変動を引き起こす要因は気候であり、年輪幅変動の時系列から、いかに敏感で信頼性の高い標準曲線を得るかは、いかに気候以外の夾雑物の影響を取り除くにかかっている。結論を先に言うなら、上記の要因のうち②、③および④の大部分は除去できるが、④の一部と⑤はそれが不可能で、気候変動とランダム変動の分離は、これら双方を含んだ標準曲線を得たあとの解析に待つより方法はない。

まず傾向変動の除去については生長曲線を用いる。ここで言う傾向変動とは、樹木の生理に由来する内的な生長要因で、例えば樹幹半径とか樹高などの生長で見た時にはいわゆるシグモイド型をした生長曲線として現れてくるものである。ところが、年輪年代学の対象は、毎年の年輪幅の累積値である半径ではなく、年輪幅そのものなので、生長曲線の方も通常用いられているものを時間で微分して生長速度の次元に落としたものを用いる。図3に二五〇年生の木曾ヒノキ三本の年輪幅変動にミッチャーリッヒの生長速度曲線をあてはめたものを示したが、この指数型のスムーズな曲線で表される部分が傾向変動である。傾向変動を除去するために、折線で表された年輪幅変動から傾向変動を差し引くという考え方もあるが、通常は前者を後者で割ってそ

の商を取り、この操作を標準化、この商を年輪幅指数と呼んでいる。ここで引かず割ることのメリットは、その結果生ずる、標準化された時系列の分散が均一化できることにある。

第三の要因としてあげた競争とは、光や水をめぐる隣接木との種内および種間競争で、競合時には生長の漸減として、相手を圧して競合から解放された時には生長の増加として現れる。このような競合とそれからの解放は、生長にともなう樹冠の拡大とともに幾度となく繰り返されるものであり、個々の事情により、頻度、時期、程度、期間などが異なるので、個別に同定することは困難だが、複数のサンプルを取り、これらを平均することにより、かなりの程度までその影響を薄めることができる。

第四番目の要因、病虫気候害は、特定の木にだけ現れる散発的なものと、もつと広域、普遍的に現れるものがある。例えば中部地方帯には一九六〇年の生長に著しい落ち込みを示す樹木個体が多々あるが、これは前年の伊勢湾台風で樹幹を翻弄され、その結果、毛細根を切断されたために生じた生長障害で、広域的に現れる気候害の好例であろう。

これらの病虫気候害が散発、限定的に現れた場合には、その影響を、隣接木との競合等、これまた個別的に現れ

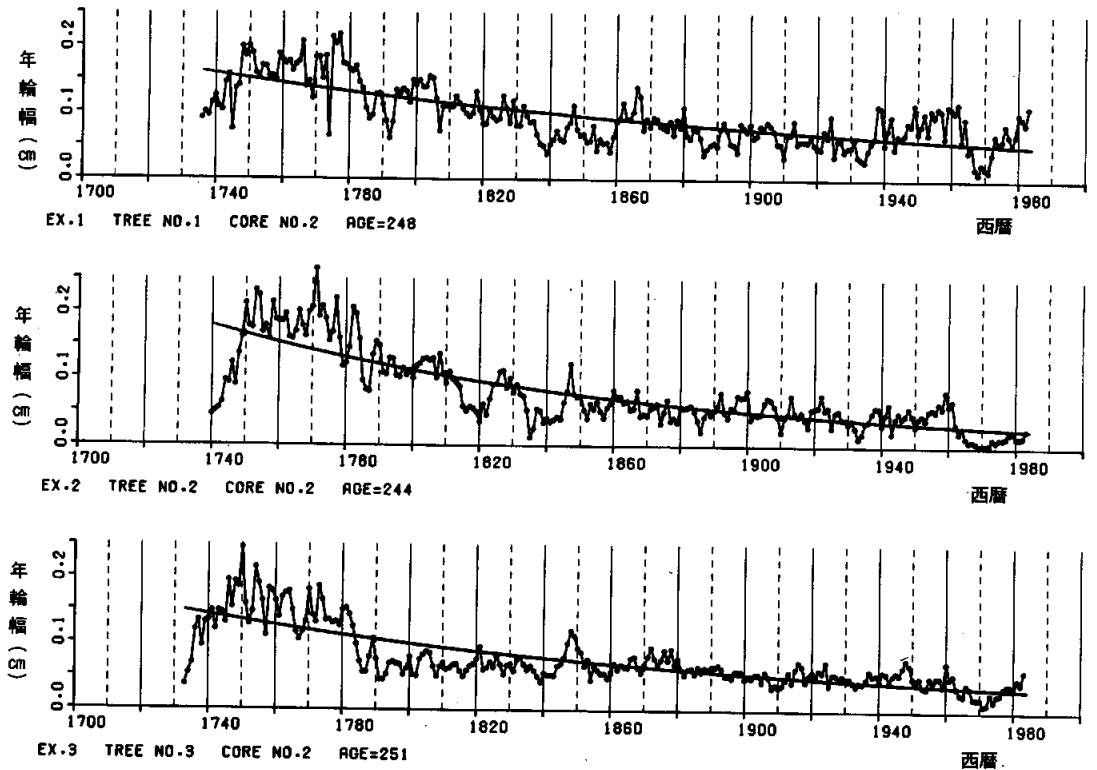


図3 年輪幅の変動(折線)とミッチャーリッヒ生長速度曲線で表された傾向変動

る制限要因によるものと識別するのは困難だが、競争の場合と同様、複数のサンプルの平均を取るにより、特定の木に現れた影響を希釈することが可能である。他方、広域、普遍的に現れた病虫気候害は、同じく広域、普遍的に現れる気候の影響との識別が難しいので、上記伊勢湾台風の例に見るような比較的最近のもの以外、その除去も難しい。

以上、③、④の影響を除去するためには、複数のサンプルを取り、これらを平均するという手段を取る。平均を取るにあたってどの程度のサンプルが必要かは、採集地が当該種の分布の中心部か周辺部かによって大きく異なる。すなわち、元来気候要因の影響が強い周辺部では少なくともよいが、夾雑物の影響が強い中心部では多く取る必要がある。

ちなみに現在、国際的な基準では総計二〇本以上の木のそれぞれにつき、二つ以上の半径方向から得られた計四十本以上の年輪幅時系列を平均したものととなっているが、総じて年輪が敏感でないわが国ではもう少し数を増やした方が無難である。この平均化にあたっては、生の年輪幅実測値を平均するのではなく、個々の年輪幅時系列に生長速度曲線をあてはめ標準化し、年輪幅指数とした後で平均を取る。わざわざこうした迂遠な方法を取る理由は、

前節で述べたように、総じて生長のよい木は気候情報に乏しく、悪い木はそれが豊富だが、年輪幅を生そのまま平均すると、生長の悪い木の代表率が下がり、気候情報の損失を招くからである。

樹齢二五〇年以上の木曾ヒノキをそれぞれ六二本(Plot1)と七六本(Plot2)を平均して得た標準曲線を図4に示した。これらはいずれも、生の年輪幅変動から②傾向変動、③競争の影響、および④病虫気候害の影響が除去され、①気候の影響と⑤ランダム変動だけを残しているはずの標準曲線である。ここで「はず」としたのは、次節で述べる気候の応答関数、伝達関数などの解析が現在進行中で、まだ①と⑤の分離ができていないからである。それでも付知川をはさんで約四km離れたこれら二地点の標準曲線にある程度の相関があつて、共通の気候要因が働いていることは読みとつていただけるものと思う。これら二本の標準曲線の共通性に欠ける変動成分は、それぞれの地点の微気候を反映したものと解釈できる。

4 応用と将来展望

幸か不幸か私の知るかぎり図4は目下のところ長さに関しても処理の質に關してもわが国ではもともとまともな標準曲線の一つである。前述したアリゾナでは紀元前二七〇年までの標準曲線が、またカリフォルニア東部では

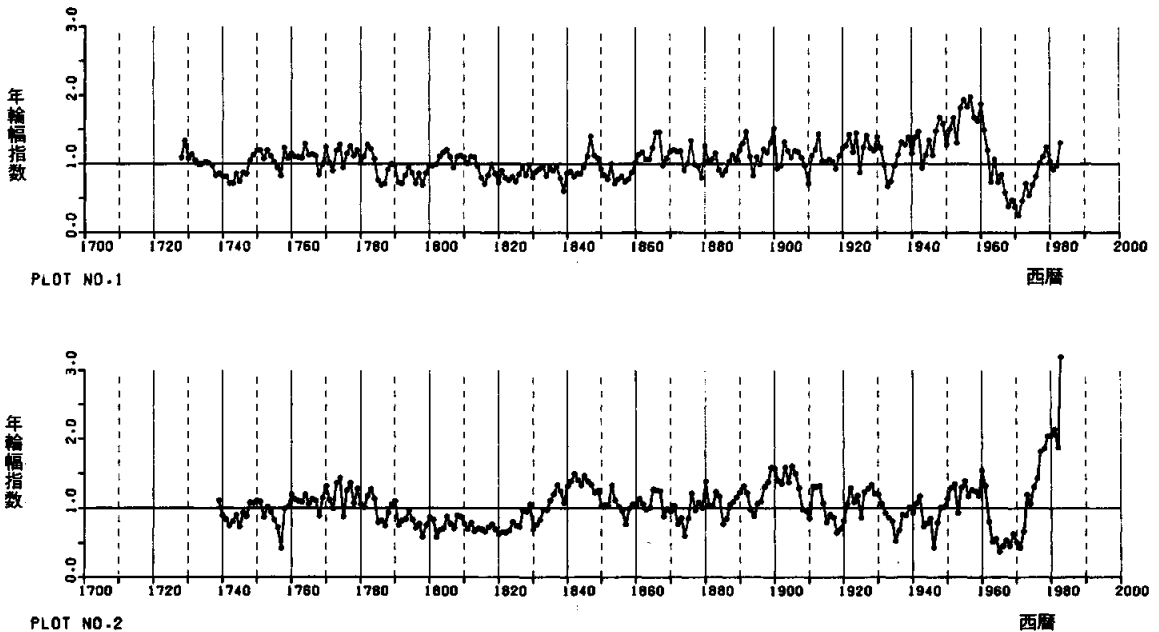


図4 木曾ヒノキ(真木曾国有林)の標準曲線

アリスタータマツ (*Pinus aristata*) を使つて八二〇年前までの標準曲線ができてゐる。アメリカ南西部でかくも長大な標準曲線が作られた背景には、前述の理由に加えて、特にアリスタータマツが長寿で樹齡四〇〇〇年を超えるものもあること、乾燥地ゆゑ数百年前に死んだ個体の保存が良いなどの事情がある。

ヨーロッパでもある程度似た状況にある。ナラを使つて現在から過去一六〇〇年前までに及ぶ標準曲線が完成しているほか、浮いた状態にある(現在とはつながっていない)ものの、ナラ、カラマツ、トウヒを使つた長さ一〇〇〇年前後の標準曲線がいくつかあつて、クロスデーティングでこれらの浮いたものをつなげば八五〇〇年前の過去まで溯ると言われている。ヨーロッパでは氷河のモレーンから出土する木材が使われているのが特徴である。

このように過去数千年にわたる標準曲線が存在することの最大のメリットは、それによつて年代不詳の木片の年代決定ができるという点にある。さきほどのアメリカ南西部の例では、先史時代のアズテックやアプロインディアンの遺跡の年代決定がなされている。日本の標準曲線に興味深いのは、奈良国立文化財研究所が、平城京の遺跡から出土したヒノキ二〇本とコウヤマキ三〇本を用いて作つた長さそれぞれ

六三七年と六一〇年の標準曲線である。これらはいずれも二世紀末から八世紀に至るまでの期間をカバーすると考えられてはいるものの、目下のところ絶対年代のわかつた標準曲線とはつながつておらず、浮いた状態にあつて年代決定には使えない。

年輪年代学のもうひとつ重要な応用として過去の気候の推定がある。すでに述べたように標準曲線は、広域的に作用する気候要因が当該地域内の樹木にまんべんなくその効果を及ぼすことを利用して作られるものゆゑ、気候との関連が強い。北米及びヨーロッパでは、一般的に言つて年輪幅変動の全分散に占める気候変動の寄与率が四〇%程度あると言われている。当然のことながら、標準曲線に占める気候の寄与率は更に高い。

様々な気候要因のうちで、樹木の生長ともっとも密接に関連しているのは気温と降水量である。極端な乾燥地では降水量が、極端な寒冷地では気温が、樹木の生長に対する一元的な制限要因として働くであろうことは想像に難くないが、現実にはそのような単純な事象はまずありえない。図5に木曾ヒノキの標準曲線と共に、年平均気温と年降水量(いずれも岐阜、飯田、高山松本の四測候所の平均)の経年変化を示したが、気温、降水量の双方とも標準曲線とある程度、直接の相関を示し

はするものの、直接の相関だけでは説明できるわけではなく、気象要素相互の複合的作用と年輪形成に作用するまでの時間的な遅れなども当然かわつてゐるものと考えられる。

例えば比較的寒冷要素の強い中部ヨーロッパでも、樹木の生長期が湿潤な年には同期の低温が生長を抑制するものの、生長期が暖かい年には同期の乾燥が生長を抑制するといった具合に、これら二つの気候要因は複合的に作用している。また乾燥要素の強いカリフォルニアのアリスタータマツの例では、

生長期直前の高温がある程度生長に対する障害要因として効くという複合的な作用のほか、主たる要因である降水量も当年の生長期のものでなく前年の生長期のもので圧倒的に強い生長促進作用を持つといった具合に、時間的な遅れが気候と年輪生長の相関を複雑なものにしている。

このような複雑な事象が生ずるのは、樹木に対する有効降水量が、単に降水量そのものだけでなく気温との関連で決まること、気温と降水量の間にもある程度の相関があつて互いに独立した

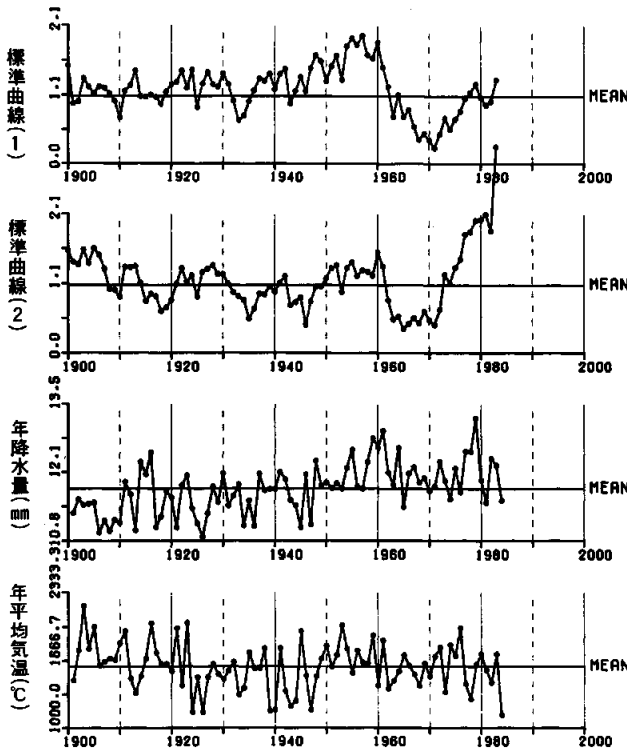


図5 木曾ヒノキの標準曲線と気候変動 (年平均気温と年降水量)

要因ではないこと、また樹木の側にも、前年の生長が良ければ翌年の気候条件が多少わるくてもさほど生長が落ちないといった類の自己回帰的な生長のメカニズムを備えていることなどがあるためである。

これら複雑にからみ合った事象間の根本的な因果関係の解明とは別に、少なくとも標準曲線と気候変動の間に現象面だけの対応をつけることはできる。いずれも基本的には単なる重回帰モデルだが、応答関数を用いれば、気候要因の変動から標準曲線の動きを再現することが、また伝達関数を用いればその逆が可能である。ただし、上にも述べたように、気候要因がめぐりめぐって年輪の生長を規定する根本的なメカニズムがわかっていない以上、果たして伝達関数による気候変動の復元が、キャリブレーションの期間の外でどれほどの有効性と信頼性を保ち得るかは不明である。

おわりに

年輪年代学はまだ構築最中の学問分野で、論理的な整合性のある手段が確立していない面が多分にあるため、ある程度の成果が出ていてもその信頼性に疑問が残る場合が応々にしてある。

その一例としてクロスデーティングの信頼性をあげる。いまクロスデーティングにより、浮いた状態にある標準

曲線の絶対年代を決めたいとすると、通常行われている方法は以下の通りである。まずこの浮いた標準曲線を絶対年代の決まっている絶対標準曲線の現在側、あるいは過去側のどちらか一端にあわせ、重複区間について双方の年輪幅の相関係数を計算するとともに、その相関の有意性の尺度としてスチューデントの t の値を求める。次いで二つの標準曲線の重なりを一年分だけずらせ、再度、相関係数と t の値を計算する。以下このように一年ずつずらしながら他端に至るまで同様の計算を繰り返す。こうして絶対標準曲線の端から端までスワイプして、ただ一カ所で有意な相関が出ればめでたしという次第である。

もちろんこの t 検定自体には方法論上、なんの問題もないが、現実には有意な相関が複数の個所で出た場合にはどう判断するかというもう一次元上の問題がある。またこの問題に関連して、 t 検定の有意水準をどの程度に取ればよいかとか、相関係数の計算をするにあたって必要な重複区間は何年かといった類の新たな問題も生ずる。もちろん最も有意な t の値が出た箇所をもって二本の標準曲線の一致点とする方法もあるにはあるが、これが単なる便法にすぎないことは、例えば九九・九%などという高い有意水準に対しても有意な相関が複数でた場合を想起

すれば明らかである。そして私の少ない経験からしても、実際こういうことは起こり得る。

この種の問題に対して納得のゆく結論を得るには、新たに論理的必然性のある方法論を生み出すか、あるいは場数をこなして経験的に納得し得る基準に達するしかないが、私共が多少とも真面目に年輪年代学に取り組んだのはここ数年来的ことで、まだいずれの水準にも達し得ていない。すなわち、私は既存の研究成果の当否を自ら判断し、当としたものについては自信を持って吹聴できるような立場に達し得ていないし、かといって自ら手掛けた研究でも人様に誇れるほどのおもしろい結論にも達し得ていないという、年輪年代学の解説者としては極めて不適当な立場にある。

このような事情もあって、本稿は私共がやっていることの紹介という観点からも、既存の研究成果の紹介という観点からも大変中途半端なものになってしまい、これを読んでもいただいた方には申し訳なく思っているが、それにもかかわらず本稿を通じて、年輪年代学の根本的な発想法や、年輪幅の生のデータをリファインし標準曲線に仕上げる方法論の健全さを理解いただけたなら幸せである。

本稿のグラフの大半は、本学大学院生の山本雅博君に計算、作図していた

だいた。ここに記して謝辞としたい。最後になつたが、格調高い本誌に寄稿の機会を与えていただいた北大・成瀬廉二先生と本会会長・八木健三先生に慎んで感謝の意を表したい。

(名古屋大学農学部教授)

参考文献

- Fritts, H. C. 1966. Growth-Rings of Trees: Their Correlation with Climate. Science 154: 973-979.
- Fritts, H. C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press, London. xii+567pp.
- Hughes, M. K., P. M. Kelly, J. R. Pilcher and V. C. LaMarche Jr. ed. 1982. Climate from Tree Rings. Cambridge Univ. Press. 223pp.
- Lamprecht, A. M. 1984. Dendroklimatologische Untersuchungen in Südamerika. Berichte, Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen 236:1-77.
- 光谷拓実' 1984' 日本における年輪年代学' 名古屋営林局誌「みどり」36(2): 28-37.
- Sano, Y., T. Matano and A. Ujihara. 1977. Growth of *Pinus pumila* and climate fluctuation in Japan. Nature 266(10):159-161.
- Schneebeil, W. and F. Rütliberger. 1976. 8000 Jahre Walliser Gletschergeschichte. Die Alpen 52:1-152.
- Schweingruber, F. H. 1983. Der Jähring. Paul Haupt, Bern und Stuttgart. 234pp.