

# 熱帯産樹木から気候や自然事象を読みとる

太田 貞明

## はじめに

19世紀なかばに起こった産業革命以降、今日まで科学技術のめざましい進歩とこれを支える経済活動の活発化、維持によって、われわれが当たり前と思っている“便利で快適”な生活を享受している。この間には膨大な量のエネルギー消費をともなっており、地球温暖化への影響が最も大きいといわれている二酸化炭素の放出にいたっては、前世紀中ごろに比べてその濃度は20%も増加し、平均気温で0.5°C程度上昇させているといわれている。

IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) のコア・プログラムの一つとして PAGES (Past Global Changes) プロジェクトが実施されている。PAGESは“未来を解く鍵は過去にある”との考えに立っており、アジアでも1993年4月、1995年11月にアジアモンスーン地域の高精度気候復元に関する国際ワークショップが台北、名古屋で相次いで開催され、1998年にはタイ(チェンマイ)で開催されることになっている。世界各国で推進されている本プロジェクトの研究対象は、両極を結ぶ北アメリカ・南アメリカ、シベリア・オーストラリア、ヨーロッパ・アフリカの大きく3つのゾーンに区分されており、陸上や海洋の堆積物、群体珊瑚、極地の氷床コア、樹木の年輪等の分析、さらに古文書の記録等による高精度気候変動の復元と予測をターゲットとしている。今回、ここでとりあげる樹木の年輪(成長輪)から得られる情報の高精度抽出には、PAGESのなかでも広大なアジアモンスーン地域が含まれているだけに、重要な位置づけとして全球的視野に立った研究の推進が求められている。

---

OHTA, Sadaaki : High Resolution of Dendro-Analysis on the Environment and Climate from Tropical Trees

森林総合研究所

## 1. 記録がない昔の気候がどうしてわかるのか

### 1) 最近の樹木年輪研究

年輪研究といえば、光合成の最終生産物である樹木木部の解析に限定されてきた感がある。しかも年輪の幅が指標とされてきた。しかし、最近は年輪の中身を密度（硬さ）として定量的に求める方法が確立されており、樹木年輪から得られる情報抽出量（対話の濃さ）も飛躍的に増大し、樹木年輪から年単位、季節レベルで解析できるようになり、環境研究に果たす期待、役割が大きくなっている。これも測定機器、周辺機器のめざましい進歩によるところは大きい。測定技術の飛躍的進歩は、樹木の年輪研究ばかりでなく、10年、100年あるいはそれ以上のレベルでしか解析できなかった氷床コア（雪水コア）、表面海水温度を知る手段としての群体珊瑚、湖沼等堆積物なども「年輪」として、年単位、さらに季節で気候に係わる情報が得られるようになりつつある。このように、樹木年輪をはじめとする氷床コア年輪、群体珊瑚年輪、湖沼等堆積物などは、計器による気象観測に代わる気象など過去の記録を詰め込んだタイムカプセルとして代替データ（プロキシーデータ）と呼ばれている。さらに、中国や日本のように歴史記録が残っている国では、歴史文書から月、日レベルでの科学的解析ができるため、これもプロキシーデータとして注目されている。

樹木の年輪を学問分野としての位置づけは、アメリカの天文学者 A.E. DOUGLASS の研究に端を発するが、最近では樹木の年輪を対象とする研究分野も気候、地質、生態、水文、考古、歴史など多くの学問分野からなり、主としてグローバルな視点から高精度な環境変動の解析を目指している。

環境研究の重要性の認識とともに、研究対象地域も半乾燥地域や乾燥地域から、最近は寒帯、温帯、亜熱帯、さらには熱帯地域に生育する樹木の年輪（あるいは成長輪）へと多様化・広域化してきた。同時に飛躍的に進歩した研究手法、解析手法も樹木年輪研究への適用がなされ、樹木年輪の分析法として確立してきた。例えば、広域での環境変化を樹木から高精度で抽出するには、従来から用いられてきた年輪幅の広さや狭さの他に、画像解析による細胞の形態解析や木材の密度変化の違いを加味した解析、さらには木部中の安定同位体による新しい分析手法もとりいれられ、その手法の確立がなされ、また、確立されつつある。早材部から晩材部への移行を含め、1年間の成長過程を密度（硬さ）に差があることに着目して、X線フィルムに写しだされた各年輪内の濃淡をデンシトメータで濃度曲線を連続的に求め、密度値として置き換えて定量化

する方法（X線・デンシトメトリ）も確立された。

樹木年輪を用いて気温や降水量など環境との関係を解析するときに、年輪の中身から抽出された情報のなかから、どの指標が何時の季節の影響をくみ取るのに適した指標となり得るのかを十分に認識する必要がある。年輪構造から得られる指標を大きく分けると、幅に関係する指標（年輪幅、早材の幅、晩材の幅、早材から晩材に移行する幅など）、密度（硬さ）に関係する指標（年輪内の最小密度、最大密度、これら両者の差、早材の密度、晩材の密度、平均密度、早材から晩材へ移行する密度値など）さらに、それぞれの季節で起こる年輪内の密度パターンや特異な値を示す年輪内の位置などになろう。これら指標のなかには前年の環境に強く左右される要因が複雑に絡んでくるものも多い。特に降雨量が時期や期間が年によって大きく異なる熱帯産樹種の解析では、樹種によって環境感受性も異なるので、今後さらに明らかにすべき課題が多い。熱帯に生育する樹木は年輪が不明瞭なのが普通である。しかし、雨季と乾季の周期がはっきりしている熱帯季節林では開花、結実、さらに樹種によっては落葉する樹種もあるので、熱帯樹種でも明らかに年輪（成長輪）が形成されていることもしばしばある。このような樹種を試験対象に選び、詳細な木部形成過程や新しい分析技術を駆使して過去の気候、特に降雨量を推定する研究が進みつつある。

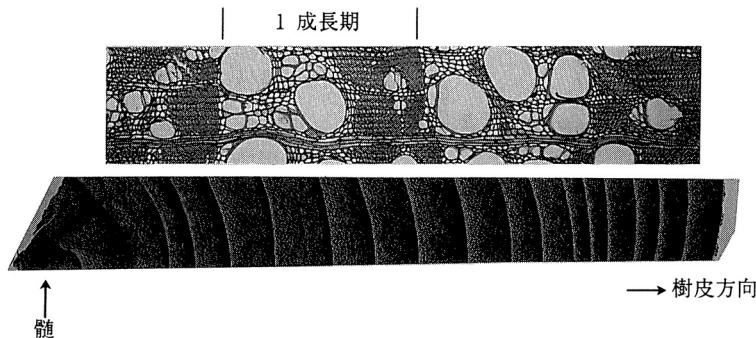
## 2) 热帯地域に生育する樹木から降雨量を推定するには

熱帯における降雨の季節性、降雨の変動性については、I.J. JACKSON<sup>1)</sup>が読みやすい。熱帯地域における降雨は、その期間の長さ、量、さらにはおとずれ方がさまざまである。熱帯アジアにも、雨季と乾季が比較的明確で年周期で現れる地域がある。熱帯樹木による過去の気象推定は、年間を通じてあまり差のない気温よりも、降水量の推定に焦点があてられる。したがって、先ず熱帯季節林に育成した樹木が研究対象となっている。

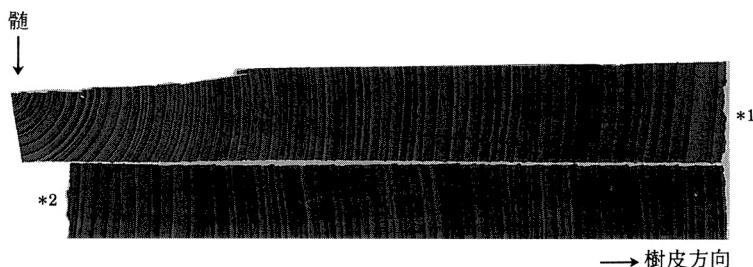
熱帯季節林（雨緑林）に生育する樹木は「成長輪」が認められ、これがほぼ1成長期（もっとも全ての樹種で明瞭に認められるわけではない）に相当する。成長輪が認められやすい樹種が降水量など気候要素を推定するための研究対象とされるのは当然の発想である。それではどのような樹種が対象として適当であるか？ 広葉樹ではクマツヅラ科のチーク (*Tectona grandis*)、スンカイ (*Peronema canescens*)、ターミナリア (*Terminalia spp.*)、針葉樹ではフッケンヒバ属（ヒノキ科）のラオスヒノキ（フッケンヒバ、*Fokienia hodginsii*）、ケシアマツ (*Pinus kesiya*)、メルクシマツ (*P. merkusii*) などが代表選手とい

える。特に、チークやラオスヒノキは300~500年、あるいはそれ以上の高樹齢の樹が今でも残っているので、降水量など気候復元によせられる期待は大きい。写真1はインドネシアの中央カリマンタン（ボルネオ島）で生育したスンカイとラオスに生育したフッケンヒバの樹幹横断図のX線写真（陽画）である。スンカイについては成長輪の光学顕微鏡写真を併示した。スンカイはまるで日本のミズナラを、フッケンヒバはヒノキを思わせるほど明瞭な年輪（成長輪）を形成している<sup>2)</sup>。

このような樹種では、熱帯に生育した樹木の年輪解析から気象や火山爆発などの自然事象、さらには熱帯地域の降水量に影響を与えるといわれているエルニーニョの発生周期（ENSO）などに係わる情報を抽出できるため、環境復元



**写真 1-A** カリマンタン産スンカイ（クマツヅラ科）の X 線写真（陽画）と成長輪の顕微鏡写真〔ミズナラのように孔圈道管（大型の円型）がよく発達している〕



**写真 1-B** ラオスヒノキ（フッケンヒバ属）の X 線写真（陽画）  
日本産のヒノキによく似た年輪構成を示すことがわかる。  
(\*1 と \*2 が続く)

**写真 1** 热帯季節林に生育した樹木の成長輪（太田）

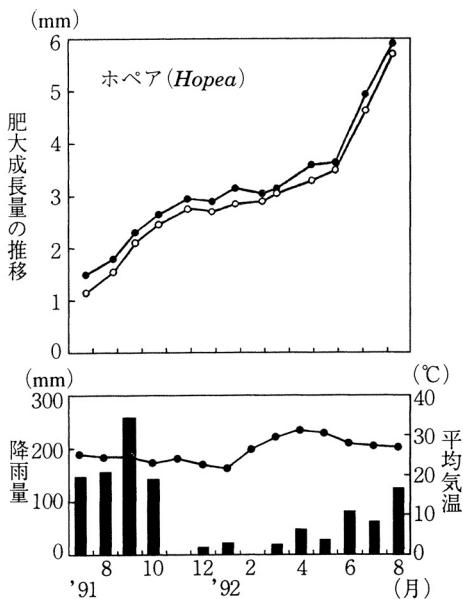


図1 ホペア (*Hopea*) の1991～1992年の月ごとの成長量の推移と降雨量、気温との関係  
(野渕<sup>3)</sup>)

カッターナイフやピンで形成層に傷を付けるマーキング法である。雨季に盛んに成長し、乾季にはその速度が鈍化することは見当はつく。しかし、樹木の成長輪から降水量、自然事象などを高精度に情報抽出するためには、肥大成長の開始、旺盛な時期、鈍化する時期など木部形成と季節変化との関連を確認することは重要な研究である。こういった視点から、各国の研究者は季節成長についての確認、地域特性の把握研究が、特に熱帯産材種を対象にして精力的に実施、継続されている。例えば、野渕<sup>3)</sup>はタイ産のホペア (*Hopea odorata*) ほか数樹種の幹にピンで毎月マーキングをして季節成長量を詳細に調べている。ホペアの降雨量と肥大成長(木部形成)経過との関係は図1に示すように、6月から11月の雨季に成長が加速され、乾季では鈍化することを明らかにしている。

## 2. 热帯アジアの降雨量復元をめざす

熱帯アジアに生育する樹種の年輪による降雨量などの復元に欧米諸国が躍起になっている。それだけ、研究対象として魅力があり、重要視していることのあらわれであろう。過去の気候や降水量の推定が、どのようにやられているか

にとって大きな手がかりとなる。さらに、これら一連の成果を通じて、熱帯降雨林まで拡大した環境変遷の把握に発展させることが期待されている。

### 3) 热帯季節林での肥大成長はどのような経過をたどるか

熱帯雨緑林といわれるよう に、乾季には落葉する樹種も多いことでもわかるように、雨季と乾季、いいかえると降雨の量と降りかたに対応して樹木の肥大成長の速度に差が生じる。季節成長を調べるために、最もよく用いられているのがデンドロメータ(成長バンド)を幹に巻きつける方法である。この他によく用いられるのが、鋭利な

について、温帯地域に生育する樹木を例にして解説しよう。まず、実測気象データが出発点となる。日本では、明治8年東京に気象台が開設されたのに続いて、各地に開設されたので70年～100年間の気象データがある。実測された気温、降水量などの気象データと年輪幅や年輪内の最大密度などについて統計処理を行い、関与する諸要因や推定精度を求め、過去の気温や降水量を復元する手順となる。図2、図3にヒノキについてどの程度の精度で復元できるかを示す。

このような手順によって、R. D'ARRIGO and G. JACOBY<sup>4)</sup>は、図4に示すように西部ジャワに生育したチークの年輪幅による乾季（6月～10月）の降雨量の復元を過去100年間にわたって行っている。太田ら<sup>2)</sup>も中央カリマンタン産のスンカイやラオス産のフッケンヒバを用いて成長に関与する降雨量との関係解析を成長量、成長輪のパターンや密度解析を指標として進めており、降雨量の復元やエルニーニョ発生周期、影響などについても成果を期待したい（図5、図6）。

### 3. 热帯降雨林の情報抽出に威力を發揮する新手法

#### 1) 新しい技術開発と環境変動把握のためのパラメータ

雨季と乾季がはっきりしない熱帯降雨林では、樹木の成長輪は現われにくい。それでは、環境変動の把握はお手上げであるかといえば、可能性は極めて

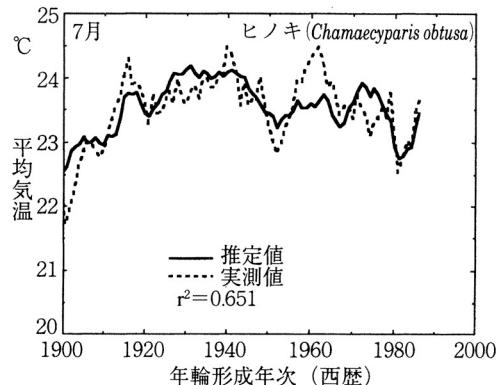


図2 気温の実測値と推定値との関係（太田<sup>2)</sup>）

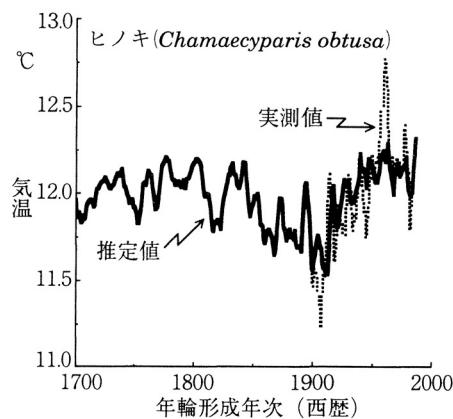


図3 気温の実測値（点線）を基にそれ以前の気象データのない期間の気温の推定（実線）（太田<sup>2)</sup>）

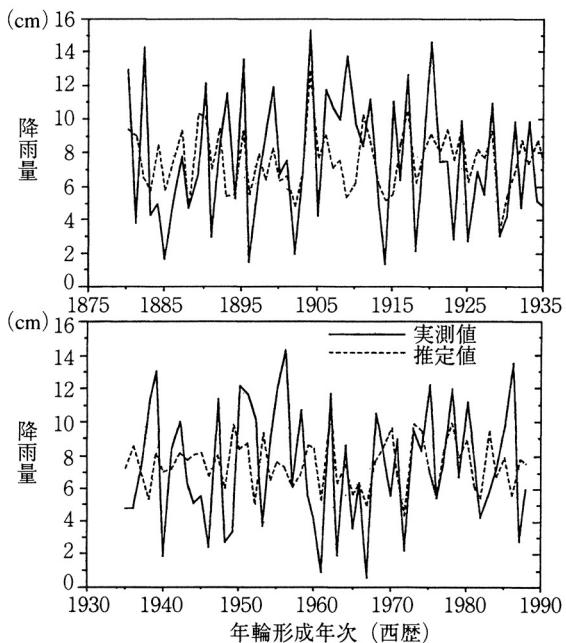


図 4 ジャワ島産チークの成長輪から6月～10月の降雨量の推定(D'ARRIGO ら<sup>4)</sup>)

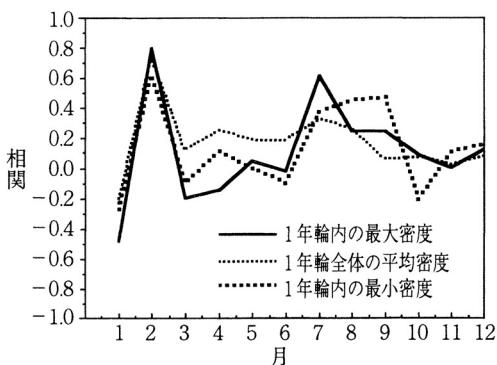


図 5 月平均降雨量と1年輪(成長輪)内の密度値との相関関係(太田<sup>2)</sup>)

高い。困難として最後に残されていた熱帯降雨林さえも、今やアプローチされはじめた。細胞の大きさや形態の他にも木部中に含まれる微量な元素、放射性元素などの量や比の分析から過去の気象やできごとを調べる研究も進んでおり、樹木を用いた新しい指標による気候等の環境復元の成果が実りつつある。例えば、樹木は木部の形成過程で大気中から放射性炭素を同化作用により、 $^{14}\text{CO}_2$  の形で取り入れて  $^{14}\text{C}$  として固定する。地球には高速の粒子「宇宙線」や太陽からの粒子「太陽風」が絶えず宇宙から地球に降り注いでおり、これらが大気に飛び込むと  $^{14}\text{C}$  が生じる。一方、地球には磁場があり、これが宇宙からの粒子を遮るバリヤー(障壁)の役割を果たしている。そこで、地球の磁場の強さが変動してバリヤーの厚さが変わったり、太陽活動の盛衰で太陽風の状態が変化すると、大気に飛び込む粒子の数、つまり  $^{14}\text{C}$  の量が変化する。樹木の木部中の同化物質中の元素濃度に反映されていることに着目した研究がある。また、人為インパクトといえる核実験により大気中に  $^{90}\text{Sr}$  や  $^{137}\text{Cs}$  が放出、拡散される。樹木に取り込

まれたイオンの種類によっては、年輪中を自由に移動する元素と移動しにくい元素がある。 $^{137}\text{Cs}$ のように木部中を移動する放射性核種からは、過去の情報を得ることはできない。一方、 $^{90}\text{Sr}$ は年輪を構成する細胞壁に蓄積、固定されるので、木部中に固定される放射性核種の蓄積パターンを調べることにより、核実験がもたらした生態系への影響を地球的規模でとらえることができる。 $^{90}\text{Sr}$ は1954年に行われた最初の大規模な核実験以降、1962年～1963年に最大となっていることが熱帯降雨林に生育した樹木でも明確に残されている。

## 2) 新しいパラメータによる高精度分析にむけて

熱帯地域の環境復元で最近注目されている新しい手法のひとつに、成長輪や木部中の安定同位体比の変化をパラメータとして過去の気候を知ろうとする技術の確立と評価に関する研究が盛んになっている。この方法は、年輪が明瞭な温帯や寒帯に生育する樹木を対象に応用されたが、年輪の明確でない熱帯降雨林への適用が注目を集めている。

年輪や木部中の安定同位体比と気温の実測値との関係は $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ともに実測値の変化と密接に連動している。樹木の年輪から形成年代を確認できる性質を利用して、木材を構成する細胞壁の主成分であるセルロースに含まれる酸素の同位体比( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )を高精度の質量分析器を用いて過去の気温や降水量の推定ができる、これをいわゆる“生物サーモメータ”と呼ばれている。この方法は精度も $\pm 0.15^\circ\text{C}$ で推定できる高分解能をもっている。

年輪中の安定同位体による環境の変遷把握に関する研究は、試料の前処理の煩雑さや測定機器が高価であること等の関係もあり、日本産の樹木を対象とした研究成果に乏しいが、極めて有効な解析手段であることはいうまでもなく、この方面的研究に積極的に取り組み、分析法の確立をはじめ、問題点を明らかにする必要がある。安定同位体分析法は、不可能に近かった熱帯降雨林の樹木

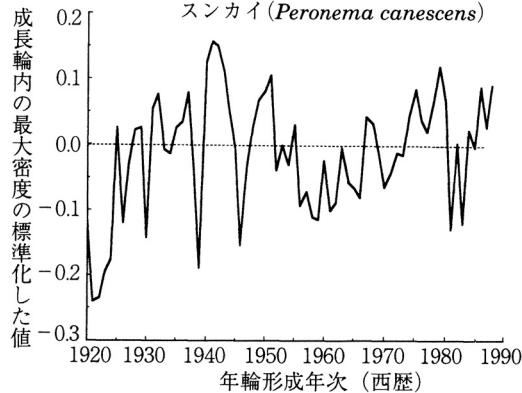


図 6 各成長輪内の最大密度の標準化値の経年変化  
エルニーニョ発生による降雨量の減少との対  
比がみられる。(太田<sup>2)</sup>)

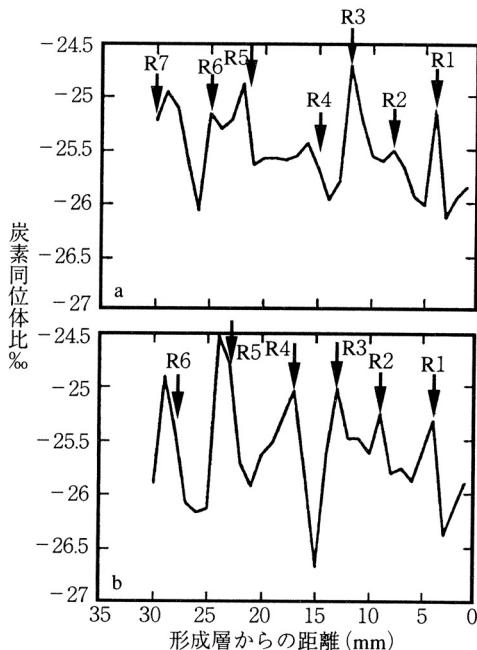


図 7 アフリカマホガニー材の炭素同位体比  
a, b は異なる 2 方向の測定結果で、図中の R<sub>1</sub>～R<sub>7</sub> は互いに同一の成長輪の位置と対応している。(岡田<sup>5</sup>)

長期間と成長休止期の間の情報抽出が主体となっているのに反して、より長い期間の環境（気候等）変化が把握できることになる可能性があることからも期待されている。このような科学的分析法の樹木への適用と技術の確立、特に熱帯地域での環境情報の高精度抽出が望まれており、今後、推進すべき研究課題となろう。

### おわりに

グローバルな環境変動を解明するためには、世界中の各地域別に環境変化の実際とそのシステムを把握することが重要となる。環境変化、とりわけ地球温暖化の主役を演じると考えられる種々の温室効果ガスが地球の表面気温や生態系にどのような影響を生ぜしめるのか？ 気候はじめ、森林生態系がこれまでの 100 年、1000 年間、さらにさかのぼってどう変わってきたか？ その限界

から得られる情報の高精度抽出、有効性が高められ、他の解析結果との比較や検証等、グローバルな環境予測が可能となる点からも期待できる。岡田<sup>5</sup>はナイジェリア（サバンナ地帯）のアフリカマホガニー (*Khaya senegalensis*) に、わずかに成長輪らしく見える層状の木部について安定同位体である <sup>13</sup>C と <sup>12</sup>C の比（デルタ <sup>13</sup>C、単位はパーミル）を形成層から髓に向かって詳細に調べた結果、樹幹横断面に認められる層状の部分で同位体比がピークを示す（比の値が大きくなる）ことから、層状の部分の間がほぼ 1 年間の成長量（成長輪界）を示しているとしている（図 7）。この手法による熱帯降雨林の樹木解析からは、寒帯や温帯では、成

は？これらを明らかにすることによって、子孫により良き地球環境を引き継ぐことができるか、そのためにはどの様な努力をなすべきであるのか。少なくとも、今から50年あるいは100年後のグローバルな気候変動を把握し、その成果を人類に及ぼす影響の予測へと進展させなければならない。そこで樹木年輪研究に求められる出口は、人間が地球と最も深い関わりをもちはじめた過去1000年～2000年の情報の収集とそれらの検証を行い、さらに情報の高精度、高度化したデータベースを構築することによって、気候変動と地球自身の変動システムとの関係を明らかにして、高精度での気候復元、近い将来の諸環境を予測することである。このような観点から、樹木年輪情報は、環境変動の解析にとってきわめて重要な研究対象として位置づけられている。同時に樹木年輪以外の氷床コアをはじめとする各種プロキシデータとの特性把握、相互評価に基づいた総合化したデータベースの構築等の知的基盤研究の推進・整備が強く望まれる。

〔参考文献〕 1) JACKSON, I.J.: 热帯を知る/21世紀の地球環境—内嶋善兵衛監訳, 丸善, pp. 51-106, 1991. 2) 太田貞明・大林宏也 : La Possibilité d'interdatation au Center de L'ile Kalimantan et L'influence du Climat sur la Structure des Accroissements Annuelle des Arbre de Sungkai, IUFRO, Div. 5, Nancy, France, 1992. 3) 野渕 正 : FFPRI—Science Meeting Report No. 1, Tree Rings— From the Past to the Future—Proceedings of the International Workshop on Asian/Pacific Dendrochronology, pp. 31-34, 1995. 4) D'ARRIGO, R. and G. JACOBY : On the need to rescue teak wood from Southeast Asia for dendroclimatic study, PAGES, Vol. 2, No. 3, 1994. 5) 岡田直紀 : 西アフリカサバンナの生態環境と農村の再生, 広瀬昌平ら編著, 農林統計協会, pp. 275-283, 1997.

---