

フォッキニアによるインドシナ半島の古気候復元の可能性

佐野雅規^{*1}・Pham Hong Tinh²・末田達彦¹

佐野雅規・Pham Hong Tinh・末田達彦：フォッキニアによるインドシナ半島の古気候復元の可能性 日林誌 89: 144~148, 2007 インドシナ半島の山岳域に自生する針葉樹フォッキニア (*Fokienia hodginsii*) の年輪気候学的な可能性を検証するため、ベトナム北部で40個体の高齢木から年輪コアサンプルを採集した。これを解析した結果、供試木の29個体については年輪の欠損と同一個体内での年輪成長の異方性のため、年輪の絶対年代を完全に決めることはできなかったが、残り11個体については厳密な年代が特定でき、年輪幅の変動も個体間でよく同調していた。これら11個体をもとに構築した標準年輪年代曲線は西暦1444年まで遡り、これまで報告されている東南アジアの標準年輪曲線では最長のものとなった。また、気候データに対する年輪幅の応答を解析したところ、前年雨期と当年雨期前的高温と寡雨がフォッキニアの肥大成長を抑制することがわかった。フォッキニアは、インドシナ半島北部の山岳部に残存しており、分布記載のあるラオスや中国南部のほか、ミャンマーにも分布している可能性が高いので、気候復元の地域的拡大も可能である。
キーワード：気候復元、樹木年輪年代学、年輪幅、ベトナム

Sano, M., Tinh, P.H., and Sweda, T.: **Dendroclimatic Potential of *Fokienia* Trees in the Indochina Peninsula.** J. Jpn. For. Soc. 89: 144~148, 2007 In order to evaluate the dendroclimatological potential of *Fokienia hodginsii* growing in montane forests of the Indochina Peninsula, increment core tree-ring samples were collected from 40 individual trees of *F. hodginsii* from northern Vietnam. Subsequent dendrochronological analysis revealed that ring-width growth was very uneven depending on radial direction with frequent wedging and missing rings. These difficult features hindered the cross-dating of some of the rings in 29 sample trees. However, the remaining 11 trees were not only precisely cross-dated but also revealed significant correlations in ring width among them. The established site chronology based on those 11 trees dates back to AD 1444, resulting in the longest ever made in Southeast Asia. Response analysis of tree-ring width with climate records revealed that hot weather and/or insufficient precipitation during the previous monsoon and current pre-monsoon seasons suppressed radial growth. With isolated but possibly wide natural distribution of *Fokienia* throughout the northern part of the Indochina Peninsula, Laos, southern China and possibly Myanmar, continued effort toward the development of tree-ring network would lead us to reconstruction of the regional climate.

Key words: climate reconstruction, dendrochronology, ring width, Vietnam

I. はじめに

現在の地球温暖化における人為の影響と自然の気候変動を峻別するため、代替データによる古気候の復元が求められているが、年単位の高解像度で成長輪をつくる樹木は最も有力な材料とされており、古文書、サンゴ、氷河など他の代替材料と比べて研究例が多い。しかしながら樹木の年輪による気候復元は北米とヨーロッパに偏在しており、年輪を形成する樹種の少ない熱帯・亜熱帯域での気候復元が特に求められている。

熱帯アジアもこうした気候復元空白域の一つだが、山麓部に亜高山性針葉樹帯が分布するヒマラヤを擁する南アジアでは、これらの針葉樹による過去200~800年の気候復元がいくつか報告されている(たとえば, Cook *et al.*, 2003; Yadav *et al.*, 2004; Sano *et al.*, 2005)。他方、明瞭な亜高山帯を欠く東南アジアでは年輪を形成する樹種がさらに限られるため、気候復元はおろか、その前段階をなす標準年輪

曲線すら数えるほどしかない。たとえば本研究の対象としたインドシナ半島部に限定すると、タイ北部のチーク (*Tectona grandis* L.f.), ケシアマツ (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon), メルクシマツ (*P. merkusii* Jungh. and de Vriese) による研究があるが、得られた年輪幅の時系列は100~200年と短いのが現状である (Pumijumnong *et al.*, 1995; Buckley *et al.*, 1995a, b)。唯一の例外が、高齢の天然チークの消滅直前にかろうじてインドネシア産チークを用いて成された Berlage (1931) の測定で、416年の時系列長がある。その後 D'Arrigo *et al.* (1994) がこれを現在側へ62年延ばし長さ478年とした時系列が、現在東南アジアでは最長のものとなっている。

本研究の対象としたフォッキニア (*Fokienia hodginsii* (Dunn) A. Henry and H.H. Thomas) はヒノキ科の針葉樹で、われわれのこれまでの現地調査により北ベトナムやラオス北部の山岳域(標高1,500~2,000 mの高度帯)にてその老齢木の残存を確認している。なお、円谷 (1995, 1996)

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: msano@agr.ehime-u.ac.jp

¹ 愛媛大学大学院連合農学研究科 (790-8566 松山市榙味3-5-7)

United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama 790-8566, Japan.

² ハノイ教育大学農業生物学部

Faculty of Agro-Biology, Hanoi University of Education, No. 136 Xuan Thuy Rd., Cau Giay Dist., Hanoi, Vietnam.

(2006年7月31日受付; 2006年12月27日受理)

は、フォッキニアに *F. kawaii* と *F. hodginsii* を認めているが、本報ではフォッキニア属は *F. hodginsii* 一種としている Farjon (2001) に従い学名を表記した。フォッキニアは、「ラオスヒノキ」の名称で主に寺社建築材として1990年代にラオスから日本に輸入されていたこともあり(円谷, 1996)、野口ら(1993)がその組織構造や材質を調べているが、これまでに年輪年代学への適用はない。本研究では、ベトナム北部で得たフォッキニアの成長錐コアをもとに、年輪の年代特定と年輪幅の計測を経て標準年輪曲線を構築し、さらに肥大成長を左右する気候要素を明らかにして、古気候復元に向けたフォッキニア年輪の有用性について検証した。

II. 材料と方法

1. 試料採取地と供試木

ベトナム北部 Yen Bai 省の山岳部 (21° 40' N, 104° 06' E; 標高 1,700~2,000 m) にて、常緑広葉樹林内に点在する高齢のフォッキニアから年輪試料を採取した。フォッキニアは主として尾根上に分布し、多くの個体が林冠を突き抜ける超高木となっている。年輪試料は、40本の樹木個体から個体ごとに2本のコアサンプルを成長錐により採取した。あて材を避けなるべく平均的な年輪成長を捉えるため、コアは斜面の傾斜に直交した等高線に沿って2方向から採取することを原則とし、これが困難な場合でも、2本のコアの採取角を180度近くに保つよう努めた。なお、試料木の胸高直径は平均で100 cm、最大で180 cmに達していた。

現地は亜熱帯モンスーンの気候下にあり、1年が雨期と乾期に大別できる。試料採取地の北20 km、標高950 mの Mu Cang Chai 測候所の記録(1985~1999年; 図-1)では、年降水量は1,727 mmで、そのうち73%が5~8月の雨期に集中している。また、気温は年平均が19.1℃、最暖月6月の平均が23.2℃、最寒月12月は13.2℃であるが、約900 m

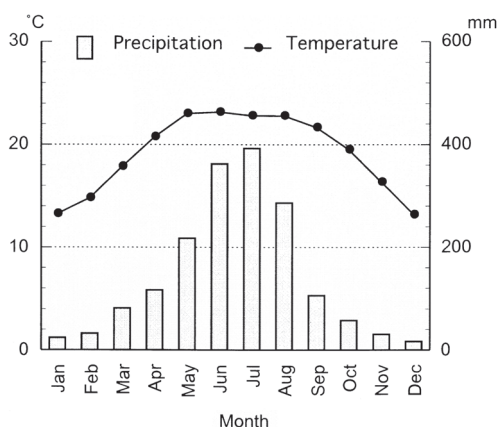


図-1. Mu Cang Chai 測候所の月別気温・降水量 (1985~1999年の平均値)

Monthly mean temperature and total precipitation (1985~1999) at Mu Cang Chai meteorological station (21° 51' N, 104° 05' E; 950 m a.s.l.).

の高度差を勘案すると、試料採取地の気温はこれより5℃ほど低い。

2. クロスデイトイングと標準年輪年代曲線の構築

持ち帰ったコアサンプルを肉眼で観察したところ、通常の年輪のほか偽年輪とおぼしい構造が認められた。そこで仮道管が明瞭に確認できるまで紙ヤスリでコアを研磨し、実体顕微鏡で観察したところ、2種類の構造が認められ、一つは柔細胞の帯、他が偽年輪と判明した。前者は柔細胞が年輪に平行して帯状に集中した軸方向柔細胞で、肉眼では年輪に見紛うこともあるが、顕微鏡下では色は濃い中空ではないので通常の仮道管との違いは明らかである(図-2a)。偽年輪 (false ring) も顕微鏡下で Stokes and Smiley (1968) に従い識別した。すなわち、年輪では前年の晩材から翌年の早材への移行部で仮道管の放射径と壁厚が激変するが、この変化が緩やかで曖昧なものを偽年輪とした。

以上により年輪を確定したうえで、年輪幅の広狭変動をまず個体内で、次いで個体間で比較し、その同調性から年輪の絶対年代を特定するクロスデイトイング (Fritts, 1976) を行った。この年代特定の難易を左右するとともに気候復元の試料としての妥当性を決める年輪幅変動の同調性を、同一個体から得た2本のコア間で調べたところ、40個体中15個体で整合性が悪かったため、その後の解析の対象から外した。次いで残った25個体につき、前後と比較して特徴的に広いあるいは狭い年輪と早晩材を特定したうえで、これらを指標に年輪幅の広狭変動を比較して同一個体内の整合性を確認するとともに年輪の欠損を同定した。すなわち、いずれか一方のコアだけで年輪が欠損している不連続年輪 (wedging ring: Kaennel and Schweingruber, 1995) の存否を明らかにしたうえで、他方のコアで年輪が極度に狭いなど欠損年が確認できた個体については、当該年に幅0の年輪

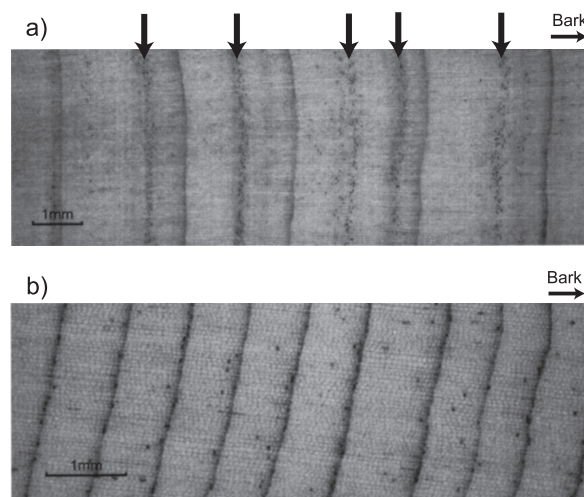


図-2. フォッキニア年輪の特徴
Characteristics of *Fokienia* tree rings.

(a) 年輪と並列する軸方向柔細胞の帯、(b) 狭い晩材。
(a) Bands of resin cells (axial parenchyma) indicated by arrows running parallel to annular rings, (b) Narrow latewood.

を挿入する一方で、欠損年が確認できなかった7個体は、それ以降の解析不能として棄却した。

こうして個体内で年代が照合できた18個体につき、個体間でも同様のクロスデイトイングを行った。すなわち、他個体との比較から年輪幅の同調性の悪い2個体をまず解析の対象から外し、残った16個体につき同一個体の両コアに年輪を欠く欠損輪 (missing ring: Kaennel and Schweingruber, 1995) の存否を明らかにした。この欠損年が特定できた個体には当該年に幅0の年輪を挿入し、できなかった5個体は棄却した。なお、すべてのサンプルに欠損輪がある場合にはこの方法では検出不能である。その可能性もないわけではないが、他に同定のできる手段があるわけでもないので、上記の個体内と個体間双方のクロスデイトイングで可となった11個体を以後の解析に利用した。

さらに年代照合を確実にするため、コアの年輪幅を0.01 mmの精度で測って時系列を作成し、Holmes (1983)の方法によりその相関解析を行った。すなわち、全サンプルの年輪幅を平均した時系列に対して、個々の時系列を前後に1年ずつずらしていったとき、相関が下がることを確認した。年代をずらして相関が上がる場合には、目視観察の年輪年代が間違っている可能性があるため、再び目視観察による照合に戻り、年輪の欠損などが検出できれば修正した。こうして時系列を修正した後、再び相関解析に戻り、疑わしい箇所がなくなるまで目視観察と相関解析を繰り返した。なお、実際の解析ではCOFECHAプログラム (Holmes, 1983) を利用して、30年単位に分割した照合区間ごとに相関を調べ、欠損区間同定の便をはかった。

絶対年代の特定できた22コアの時系列を個体単位で平均して11個体分の年輪幅時系列を算出した。これらの時系列すべてに、加齢に伴う年輪幅の減衰傾向が認められたが、気候変動には関係なしとして標準化処理により除去した。標準化では、年輪幅時系列の形状により負の指数関数または直線を当てはめたうえで、各年の実測値をその関数値で割って指数化した (Fritts, 1976)。なお、当てはめが直線の場合には通常の最小自乗法を、指数関数の場合には非線形の反復最小自乗法を用いた。このように個体ごとの時系列を標準化した後、全個体を平均することで、個体間競争など非気候要因のノイズを希釈して、気候変動の影響を強めた標準年輪年代曲線を構築した。さらに、この標準年輪曲線の周期成分をフーリエ解析 (fast Fourier transform) により明らかにした。

3. 気候に対する年輪成長の応答解析

気候に対する標準年輪曲線の応答解析を行い、年輪幅に影響を及ぼす気候要素とその作用時期を特定した。応答解析には試料採取地近くの気象データを用いるのが理想だが、採取地の北20 kmにあるMu Cang Chai 測候所の記録は15年分と極めて短く解析には不適なので、代わりに北緯15~20°・東経100~105°の範囲の観測値を統合した期間77年 (1922~1998年) のグリッドデータ (HadCRUT2v: Jones *et al.*, 2001; Jones and Moberg, 2003; g55 wld0098.

dat: Hulme, 1992, 1999) を使用した。

応答解析に先立ち、フォッキニアの成長周期に見合った成長年度を決める必要がある。そこで、フォッキニアの肥大成長は気温の下がる10月に停止すると考え、11月から始まり翌年10月に終わる1年をフォッキニアの成長年度として以下の解析を進めた。また、予備解析で月別の気温・降水量と年輪の関係を調べた結果、有意な相関が特定の季節に集中して現れたので、成長年を冬期 (11月~翌年2月)、雨期前 (3~4月)、雨期 (5~8月)、雨期空け (9~10月) の四季に分割した。そうしたうえで、前年の冬期から当年の雨期空け (計8季) までの季節別の気温・降水量と年輪幅の単相関をそれぞれ算出した。

III. 結果と考察

前章でも述べたように、同一個体でも円盤内の方位により成長速度の差異 (異方性) が著しく、個体内における年輪成長の同調性の悪さから、まず供試木の約4割 (15/40個体) を捨てざるを得なかった。その他、不連続年輪の年代を特定できなかった7個体、他個体との年輪幅変動の同調性が極度に悪い2個体、欠損輪の年代を同定できなかった5個体を除くと、これ以降の解析に利用できる供試木は11本になってしまったが、これらは個体間でも変動が良く同調していた。以上から、フォッキニアでは年輪成長の異方性と年輪の欠損が年輪年代学試料としての適否を大きく左右しているが、丹念にこれらの欠陥試料を除けば、気候復元に耐えうる試料を掘り出すことも可能とわかった。ただし、個体あたりの採取コアを4~5本まで増やせば、使える試料の回収率は2倍程度まで改善される可能性はある。

標準年輪曲線の構築に用いた11個体22コアの7488年輪に対して、60本の偽年輪、12本の不連続年輪および2本の欠損輪が認められた。高齢のサンプル木が多かったため、平均年輪幅は1.07 mmと狭かったほか、放射径の小さな仮道管が2, 3列並んだだけの狭い晩材も珍しくなかった (図-2b)。個体間での年輪幅変動の同調性をみるため、11サンプル個体に共通する過去200年 (1805~2004年) につき標準化後の時系列間の相関係数を総当たり (時系列数11, 組み合わせ数55) で求めたところ、その平均は0.33, 標準偏差は0.10を示した。1組200年分のデータで1%水準に対応する相関係数は0.18であり、本試料では1組を除くすべてがこの基準を超えたことから、個体間変動の相関は全体として有意であると結論した。これらの時系列を平均して得られた標準年輪年代曲線を図-3に示す。

この標準年輪曲線の特徴を概観するため行ったフーリエ解析 (FFT) の結果を図-4に示す。年輪幅の変動には37年と73年の卓越周期のほか、弱いながら3, 5, 19年の周期性が検出された。気候変動と同様の周期を持つものとして、Pacific Decadal Oscillation (Mantua *et al.*, 1997) の周期15~25年, 50~70年 (Minobe, 1999, 2000), Southern Oscillation の周期3~6年 (Trenberth, 1976; Chen, 1982) があるが、これらの気候変動がフォッキニアの成長になんらかの影響

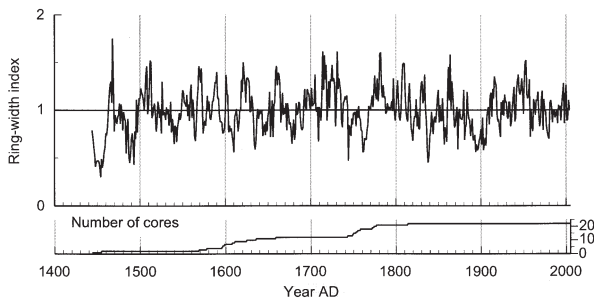


図-3. 年輪幅の標準曲線とサンプル数
Site chronology of ring-width indices with number of sample cores.

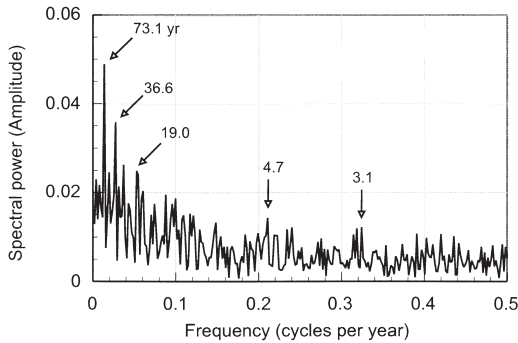


図-4. FFTにより求めた標準年輪曲線のスペクトル
Power spectrum of the site chronology resulting from a FFT (fast Fourier transform) analysis.

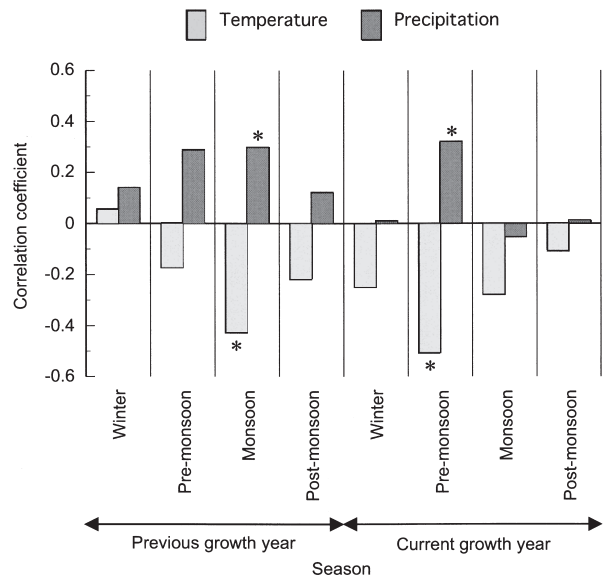


図-5. 季節別の気温・降水量に対するフォッキニア年輪の単相関応答

Response of *Fokienia* ring width to seasonal temperature and precipitation in terms of simple correlation coefficient.

アスタリスクの付いた箇所は1%水準で有意。Winterは11~2月、Pre-monsoonは3~4月、Monsoonは5~8月、Post-monsoonは9~10月に対応。

Asterisks indicate significance at 1% level. Seasons are as follows: Winter, Nov~Feb; Pre-monsoon, Mar~Apr; Monsoon, May~Aug; Post-monsoon, Sep~Oct.

を及ぼしているか否かについてはもう少し立ち入った解析が必要である。

年輪幅と季節別気温・降水量の応答関係を図-5に示した。年輪幅は、前年の雨期(5~8月)と当年の雨期前(3~4月)の気温に対して負の、降水量に対して正の有意な相関($p < 0.01$)を示した。前述のように、試料採取地を含むベトナム北部の気候は亜熱帯モンスーンの影響を強く受け、雨期(5~8月)と乾期(9月~翌年4月)の季節変化を示す。したがって、乾期終盤の3~4月の高温と寡雨は土壌の乾燥を促し、フォッキニアの肥大成長を抑制すると考えられる。また、前年雨期(5~8月)の高温と寡雨もまた成長を抑える方向に働いていることから、成長期前半の光合成産物は当年の直径成長に利用されるが、成長期後半の光合成産物は何らかの形で貯蔵されて翌年の成長に回されているものと推察される。

以上、年輪成長に異方性の高い個体が多いという問題はあるものの、そうでない個体間では年輪成長がよく同調していること、気候の年周性で成長変動に合理的な説明が付くこと、および両者の相関も高いことから、フォッキニアによる古気候の復元は有望と結論した。高温による蒸発散が植物にとっての有効降水量を目減りさせる亜熱帯にあって、樹木が成長期の寡雨と高温による成長抑制を受けてい

るという考えは、植物生理学の一般論にもかなう。

また、本研究で得た遡及期間561年の標準年輪年代曲線は東南アジアでは最長である。さらに、厳密な年代特定が難しかったため標準年輪曲線に含めることはできなかったが、本研究の採取試料には樹齢800年を超える個体もあったので、さらに探索を続ければ樹齢1,000年に及ぶ高齢木が見つかる可能性もある。また遡及期間もさることながら、フォッキニアはラオス北部や中国南部にも生育しているほか、ミャンマー最北部やシャン高原にも分布している可能性が高いので、気候復元の地域的拡大をも図ることができる。気候復元の熱帯・亜熱帯域への拡大が年輪研究の主たる課題となった現在、フォッキニアはインドシナ半島における古気候復元の最も有力な材料である。

本研究は、財団法人アサヒビール学術振興財団助成金および文部科学省科学研究費補助金特別研究員奨励費により実施した。またベトナムでの試料採取には、ハノイ教育大学のMai Sy Tuan氏をはじめ、現地の方々の協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表す。

引用文献

- Berlage, H.P. Jr. (1931) Over het verband tusschen de dikte der jaarringen van djatiboomen (*Tectona grandis* L.f.) en den regenval op Java. *Tectona* 24: 939-953.
- Buckley, B.M., Barbetti, M., and Watanasak, M. (1995a) On the prospect of large-scale spatial reconstruction of climate from tropical Southeast Asian tree rings. *In* Proceedings of the International Workshop on Asian and Pacific Dendrochronology. Ohta, S., Fujii, T., Okada, N., Hughes, M.K., and Eckstein, D. (eds.), Forestry and Forest Products Research Institute Scientific Meeting Report 1, Tsukuba, 76-87.
- Buckley, B.M., Barbetti, M., Watanasak, M., D'Arrigo, R., Boonchirdchoo, S., and Sarutanon, S. (1995b) Dendrochronological investigations in Thailand. *IAWA J.* 16: 393-409.
- Chen, W.Y. (1982) Assessment of Southern Oscillation sea-level pressure indices. *Mon. Wea. Rev.* 110: 800-807.
- Cook, E.R., Krusic, P.J., and Jones, P.D. (2003) Dendroclimatic signals in long tree-ring chronologies from the Himalayas of Nepal. *Int. J. Climatol.* 23: 707-732.
- D'Arrigo, R.D., Jacoby, G.C., and Krusic, P.J. (1994) Progress in dendroclimatic studies in Indonesia. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 5: 349-363.
- Farjon, A. (2001) World checklist and bibliography of conifers. 2nd ed., 309 pp, Bath Press, Bath with copyright to Royal Botanic Gardens, Kew.
- Fritts, H.C. (1976) Tree rings and climate. 567 pp, Academic Press, New York.
- Holmes, R.L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bull.* 43: 69-78.
- Hulme, M. (1992) A 1951-80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. *Clim. Dyn.* 7: 57-72.
- Hulme, M. (1999) 'g55wld0098.dat' (Version 1.0). Available from <http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/datasets/global/> (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich).
- Jones, P.D. and Moberg, A. (2003) Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *J. Clim.* 16: 206-223.
- Jones, P.D., Osborn, T.J., Briffa, K.R., Folland, C.K., Horton, E.B., Alexander, L.V., Parker, D.E., and Rayner, N.A. (2001) Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series. *J. Geophys. Res.* 106: 3371-3380.
- Kaennel, M. and Schweingruber, F.H. (1995) Multilingual glossary of dendrochronology. 467 pp, Paul Haupt Publishers, Berne.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., and Francis, R.C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 76: 1069-1079.
- Minobe, S. (1999) Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.* 26: 855-858.
- Minobe, S. (2000) Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.* 47: 381-408.
- 野口昌巳・今村祐嗣・岡部敏弘・間島重道・李 虹 (1993) いわゆるラオス檜の性質. *木材工業* 48: 179-183.
- Pumijumng, N., Eckstein, D., and Sass, U. (1995) Tree-ring research on *Tectona grandis* in northern Thailand. *IAWA J.* 16: 385-392.
- Sano, M., Furuta, F., Kobayashi, O., and Sweda, T. (2005) Temperature variations since the mid-18th century for western Nepal, as reconstructed from tree-ring width and density of *Abies spectabilis*. *Dendrochronologia* 23: 83-92.
- Stokes, M.A. and Smiley, T.L. (1968) An introduction to tree-ring dating. 73 pp, University of Chicago Press, Chicago.
- Trenberth, K.E. (1976) Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102: 639-653.
- 円谷浩之 (1995) 最近のラオスの森林・林業. *熱帯林業* 32: 13-23.
- 円谷浩之 (1996) いわゆるラオスヒノキについて. *熱帯林業* 37: 2-10.
- Yadav, R.R., Park, W.-K., Singh, J., and Dubey, B. (2004) Do the western Himalayas defy global warming? *Geophys. Res. Lett.* 31: L17201, doi:10.1029/2004GL020201.