

樹木年輪年代学的手法による樹木の気候応答の解析

2013 年

桃井 尊央

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	既往の研究	4
1.2.1	樹木年輪年代的研究について	4
1.2.2	樹木の気候応答の解明を目的とした場合の問題点	6
1.3	本論文の構成	11
第 2 章	樹木年輪情報の収集と樹木年輪クロノロジーの構築	14
2.1	樹木年輪情報の収集	14
2.1.1	はじめに	14
2.1.2	方法	15
2.1.3	結果と考察	30
2.1.4	結論	36
2.2	樹木年輪クロノロジーの構築	37
2.2.1	はじめに	37
2.2.2	標準化の概念と方法	37
2.2.3	結果と考察	40
2.2.4	結論	50
2.3	まとめ	51
第 3 章	樹木年輪情報の基礎情報の把握	52
3.1	樹木年輪変数と年輪構造や組織構造との関係	52
3.1.1	はじめに	52
3.1.2	方法	53

3.1.3	結果と考察	60
3.1.4	結論	75
3.2	木部形成の季節変化	76
3.2.1	はじめに.....	76
3.2.2	方法	77
3.2.3	結果と考察	81
3.2.4	結論	95
3.3	樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間，樹種間）	96
3.3.1	はじめに.....	96
3.3.2	方法	96
3.3.3	結果と考察	97
3.3.4	結論	110
3.4	まとめ.....	111
第 4 章	樹木年輪－気候関係の解析 I（樹木年輪情報の検討）	112
4.1	樹種間の比較	112
4.1.1	はじめに.....	112
4.1.2	方法	112
4.1.3	結果と考察	114
4.1.4	結論	125
4.2	針葉樹 5 樹種における樹木年輪指数間の比較	126
4.2.1	はじめに.....	126
4.2.2	方法	126
4.2.3	結果と考察	127
4.2.4	結論	142

4.3	広葉樹 2 樹種における樹木年輪変数間の比較	144
4.3.1	はじめに.....	144
4.3.2	方法	144
4.3.3	結果と考察	145
4.3.4	結論	150
4.4	まとめ	152
第 5 章	樹木年輪－気候関係の解析 II（気候情報の検討）	153
5.1	供試樹木の生育地と気象観測地との距離	153
5.1.1	はじめに.....	153
5.1.2	方法	153
5.1.3	結果および考察	159
5.1.4	結論	173
5.2	開花日推定法の導入	174
5.2.1	はじめに.....	174
5.2.2	方法	176
5.2.3	結果および考察	181
5.2.4	結論	198
5.3	まとめ	199
第 6 章	樹木年輪－気候関係の解析 III（解析方法の検討）	200
6.1	統計期間の検討	200
6.1.1	はじめに.....	200
6.1.2	方法	200
6.1.3	結果および考察	201

6.1.4	結論	208
6.2	相関分析における回帰線のあてはめ	209
6.2.1	はじめに.....	209
6.2.2	方法	209
6.2.3	結果および考察	209
6.2.4	結論	215
6.3	まとめ.....	216
第 7 章	総括	217
謝辞	222
文献	223

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

樹木は、極地や高山、砂漠など極端な気象条件の立地を除き、地球上に広くその生育地を分布させている（酒井ら 1983；寺島ら 2004；福岡ら 2010）。また、そのような地域に多様な樹種が、その根や幹、葉、花など器官の形態や機能を多様に適応させ生育している。つまり、各器官は生育環境に適応して様々な機能を保持しているといえる。

そのような器官の中で樹体の幹（樹幹）は、根によって取り入れられた水や、葉でつくられた同化産物の通導を行っているほか、樹冠を支え、同化産物を一時的に貯蔵する役割を担っている（久保 2011）。そのような役割を担う樹幹は、最外層から内側に向かって、外樹皮、内樹皮（師部）、形成層、木部があり、中心には髄がある。この内樹皮と木部の間にある形成層は分裂組織であり、この組織が放射方向や円周方向に細胞を増やし樹幹を肥大させる肥大成長（radial growth）の源となっている。この肥大成長によって形成された木部は、季節変化が明らかな地域に生育している樹木において、横断面で環状の層として認められる成長輪を形成する。成長輪の形成は、形成層の季節的な活動の変化によって生じる。温帯地域では通常、春に形成層の活動がはじまり、新しい木部の細胞が形成層から内側に堆積していく。形成層の活動が最盛期に達した後、夏から秋にかけて、その活動は鈍化し、やがて休止する。そのため、季節変化が明瞭ではない一部の熱帯を除き、1年に1つの成長輪（growth ring）、すなわち年輪（annual ring）が樹幹内に形成される。

このような木部や年輪の形成は様々な要因に影響を受ける。つまり、木部形成は遺伝（個体差や樹種）や樹齢などによる樹体内部の因子と気象や生物害、攪乱などの樹体外部の因子の影響を受ける。樹体内部の因子は樹体の活動を全体的に制御している。一方、樹体外部の因子は木部形成が行われる形成層の活

動だけではなく、その原料となる同化産物を生産する葉や水分や無機塩類を吸収する根での作用にも影響を及ぼす。その影響が組織構造や年輪構造に反映され、さらには木材の物理的ならびに力学的諸性質に影響を及ぼしているといえる。そして、このような生育環境に対する成長応答に関する情報が樹木年輪 (tree-ring) から得られる情報 (樹木年輪情報) には含まれていると考えられる。したがって、樹木の生物としての能力を知るためにも、木材を生産するための林木を育成するためにも、また生産された木材を材料や原料として利用するためにも、樹木の生育環境に対する成長応答 (growth response) を把握することは意義があると考えられる。

このような樹木年輪情報は、生育環境が共通となるような一定地域内に生育する樹木であり、かつ、同一樹種であれば、個体間に共通した経年変動を含んでいる。このことから、個体特有の経年変動を減衰させれば (除去できれば)、一定地域内に生育する個体間で共通した樹木年輪情報の経年変動を構築できる。また、この樹木年輪情報は 1 年単位の時間的分解能があり、各年輪の形成年が特定できれば、時間的、空間的、さらには他分野にその情報を展開することができる。このような、樹木年輪情報の特徴を適用した樹木年輪年代学 (dendrochronology) の手法は、考古学や気候学など様々な分野の研究において応用されている (Schwieingruber 1988 ; Cook 1990 ; 深沢 1990)。

この手法を応用した気候学の分野では樹木年輪気候学 (dendroclimatology) と呼ばれ (小林 2006)、その分野では将来の気候を推測するために、過去の気候復元の研究が行われている (Hughes 2002 ; 藤原 2005 ; 野田 2006)。また、その基礎または前段階として行われる「樹木年輪情報と気候情報との関係 (tree-ring/climate relationships : 以下、樹木年輪－気候関係)」の解析では、木部形成に関する「樹木の気候に対する成長応答 (以下、樹木の気候応答)」の情報を得ることができる (安江ら 1994 ; Takahashi *et al.* 2005 ; 澤内ら 2007 ; 黄ら

2000)。つまり、木部形成に関連する樹木の気候応答について、肥大成長の観測や形成層活動の観察など生物季節を直接記録する手法とは異なる視点からのアプローチができる。

一方で、樹木年輪年代学的手法は年輪形成や木部形成に関わる様々な生物学的な現象をブラックボックスとみなし (Eckstein 1998)、そこからの出力である樹木年輪情報を様々な事象と関連付けられる。しかし、樹木年輪気候学では将来における気候変動の予測を行うために必要な過去の気候変動の代替資料として樹木年輪情報を用いるため、精度の良い気候変動を復元するための有効な樹木年輪情報を検索することが生物学的な（樹木の気候応答などの）問題よりも重要視されている。また、樹木年輪－気候関係の解析では、相関関係を明らかにすることができるが、因果関係を明らかにすることはできないという問題点もある。このようなこともあり、数十個体から得られた数十年分の樹木年輪情報と数十年間蓄積された気候情報を用いているのにもかかわらず樹木年輪－気候関係の解析結果は、樹木の生物学的な研究において未だ十分な信頼性を得ることができていないのが現状であると考ええる。

以上の背景から、本研究では樹木年輪年代学的手法を用いて樹木の気候応答を明らかにすることを目的とした。そして、樹木年輪－気候関係を解析する際には、生物学的な視点を取り入れて検討することにした。

1.2 既往の研究

1.2.1 樹木年輪年代的研究について

a) 樹木年輪年代学研究の歴史的変遷と現在における意義

樹木年輪年代学や樹木年輪気候学について、Schweingruber (1988, 1993) や Cook (1990), Speer (2010) がまとめている。また、Hughes (2002) や藤原 (2005), 小林 (2006), 野田 (2006) が近年の状況も含めて報告している。

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、古くから世界各地において知られていただろうが、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 Douglass である (Webb 1983 ; Cook et al. 1990 ; 小林 2006) とされている。太陽黒点と地球環境の関係について研究していた Douglass は、環境変動サイクルを表すものとして樹木年輪に着目し、アリゾナに生育する樹木の年輪幅が降水量の変化の影響を受けて変動していることを見出した。年輪幅が生育環境の影響を受けること、距離がやや離れた場所に生育する樹木の年輪幅でも同じように変動することを出発点にその後の樹木年輪研究がはじまった (藤原 2005)。

その後、樹木年輪情報の測定方法や解析方法が開発され、関連分野も拡大し、考古学・河川の流動・湖沼の水位変化・洪水などの水文学的現象の研究 (樹木年輪水文学) や地すべりなどの地形変動過程の年代決定に関する研究 (樹木年輪地形変動学, 氷河・地殻変動・山火事などの年代決定) など、さまざまな分野で樹木年輪年代学の手法が用いられている。

その他の分野との関連として樹木年輪年代学は年代学と生態学に大別され、生態学的な研究は樹木年輪生態学 (Dendroecology) と呼ばれる (Kaennel 1995)。さらにその樹木年輪生態学の一分野に、樹木年輪気候学 (Dendroclimatology) がある。樹木年輪気候学的研究の主な目的として気候復元があるが、近年問題となっている温暖化傾向や異常気象など地球規模の気候変動を解析する上で、1

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樹木年輪の利点を生かせるため、樹木年輪気候学が果たす役割は大きく（小林 2006）、今後においても重要な研究課題であると考えられる。また、気候復元の基礎または前段階として行う樹木年輪－気候関係の解析では、木部形成に関する樹木の気候応答の研究（安江ら 1994；Takahashi 2005；澤内ら 2007；黄ら 2000）も行なわれている。

b) 日本における樹木年輪年代学的研究

日本における樹木年輪年代学の初期における歴史的変遷について伊藤（1982）や奈良文化財研究所（1990）の報告が詳しい。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（志田 1935）をはじめ、飢饉との関係について着目した研究も行われた（奈良文化財研究所 1990；野田 1996）。

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く、樹木年輪を用いた気候復元が難しいという考えが示された（Arakawa 1960）。

これら初期の研究は、Douglass が設立したアリゾナ大学年輪研究所（Laboratory of Tree-Ring Research at the University of Arizona）の研究とは別に、国内で独自に行われてきたものであるが、隣接する樹木からの被圧・開放などに起因する時系列変動を除去する標準化の方法が用いられていなかったため、気候が関与する年輪幅の変動成分が十分に抽出されないまま解析が行われている点や、単木あるいは数本の供試樹木のみを用いて解析が行われており、個体数が十分でなかったなどの問題点が指摘されている（奈良国立文化財研究所 1990；野田 1996）。

日本において体系化された樹木年輪年代学的な解析手法であるクロスデーティングや標準化、また、軟 X 線デンシトメトリが樹木年輪変数の測定方法とし

て用いられるようになったのは 1980 年代以降になるとされる（藤原 2005）。その後、現在に至るまで年輪幅や材密度を用いた樹木年輪気候学に関する研究（安江ら 1994；野田 1996；Sueda 1994；Yasue et al. 1996；Yasue et al. 1997；Fujiwara et al. 1999；庄 2001；澤内ら 2007；Takahashi et al. 2012）が継続的に行われてきている。しかしながら、報告数はまだ少なく日本国内における樹木年輪－気候関係における傾向は把握できていない。

また、近年においては炭素や酸素、水素の同位体を樹木年輪変数として用いた研究（Kagawa et al 2006；中塚 2006）も行われている。

樹木年輪年代学の研究で用いられる用語は、“Multilingual Glossary of Dendrochronology”（Kaennel et al. 1990）において英語、ドイツ語など計 7 カ国語で整理されている。しかし、日本語においては樹木年輪年代学で用いられる用語が統一されていない。Dendrochronology は、年輪年代学と呼ばれることが多いが、年輪（annual ring）はサンゴや貝など他の生物にも見られ、特にサンゴの年輪は、樹木の年輪と同様に気候復元に用いられている（茅根 2007；渡邊 2002a, 2002b, 2002c）。そのため、本論文では Dendrochronology を樹木年輪年代学と呼ぶこととした。

1.2.2 樹木の気候応答の解明を目的とした場合の問題点

a) 樹木年輪気候学的研究で対象とされる地域や樹種

樹木年輪気候学の研究では、主目的である気候に関する情報を得るために、研究対象には特徴がある。それは、1) 研究対象地域として、特に高緯度地域や高山地域、乾燥地域などが対象とされていること（Cook et al. 1990；Yasue et al. 1997；Fujiwara et al. 1999；Takahashi et al. 2012）が挙げられる。このような地域は特徴的な生育環境であるため、木部形成に影響を及ぼす気候の要因を限定しやすいという利点がある。しかし、特異な生育環境であるために樹木の気候応

答も特異なものとなっている可能性がある。また、そのような地域において、2) 高樹齢の限られた樹種を対象とすることが挙げられる。長期間にわたる気候に関する情報を効率よく得られるという利点がある。しかし、研究対象となる樹種数が少なく樹種間の比較ができなくなってしまう、樹木の気候応答についての樹種特性を検討する機会を失っている可能性がある。樹種間で樹木の気候応答を比較した報告 (Graumlich 1992 ; Fujiwara et al. 1999 ; Xiong et al. 2000 ; Tardif et al. 2001 ; Watson et al. 2002 ; Takahashi et al. 2012) はあるが、それらの多くは広範囲から樹木年輪情報や気候情報を収集しているものや樹種数がわずかなものである。樹木の気候応答について生育環境が共通となるような一定地域内に生育する樹種間の共通点や相違点は、未解明な部分が多いといえる。一方で、樹木年輪－気候関係を複数樹種間で比較した報告では、針葉樹と広葉樹に関わらず、樹木年輪指数と気候変数との間には有意な相関関係が複数樹種で共通して認められたこと (Watson et al. 2002) や、その相関関係が近縁種では類似していたこと (Graumlich 1992) が報告されており、また、樹種による樹木年輪－気候関係の特徴と木部形成を行っている時期との関連性が考察されている (Fujiwara et al. 1999)。

b) 樹木年輪気候学的研究で対象とされる樹木年輪変数

軟 X デンシトメトリによって得られる複数の樹木年輪変数の中で、針葉樹においては年輪幅と年輪内最大密度が頻繁に用いられている (Schweingruber et al. 1978 ; Yasue et al. 1997 ; Fujiwara et al. 1999 ; Takahashi et al. 2011)。これは針葉樹の年輪内最大密度が夏の気候変数との間に高い相関係数を示すためである。軟 X 線デンシトメトリを用いて針葉樹における複数の樹木年輪変数を得て樹木年輪－気候関係を検討した報告 (Conkey 1979 ; 斉藤 1989 ; 野堀 1994 ; Chen 2010 ; Chen 2012) では、異なる樹木年輪変数ごとに構築された指数は有意な相

関を示す気候変数に共通点と相違点があることが確認されている。しかしながら、それら複数の樹木年輪変数間を関連付けて考察した報告（安江ら 1994）は少ない。安江ら（1994）の報告では、早材密度や年輪内最小密度が 6 月の気温と有意な相関関係が認められたのに対して、晩材密度や年輪内最大密度では 7 月の気温と有意な相関係数が認められている。つまり、早材と晩材で区切った場合の幅や材密度、年輪内最大密度、年輪内最小密度が代表する 1 年輪内での位置は異なるため、その位置、つまり形成時期による違いが各樹木年輪変数には記録されている可能性があると考えられる。

広葉樹の環孔材の樹種について、年輪幅を孔圏幅と孔圏外幅とに分けて樹木年輪－気候関係を検討した報告（安江 2001 ; Lebourgeois 2004）はあるが、材密度に関する樹木年輪変数を用いて樹木年輪－気候関係を検討した報告（涌井ら 2010 ; 眞山ら 2011, 2013）は少ない。

c) 樹木年輪指数の基礎情報

軟 X 線デンシトメトリによって得られる樹木年輪指数の基礎情報として、第 1 に樹木年輪変数と組織構造や年輪構造との関係、第 2 に木部形成の季節変化、第 3 に構築した樹木年輪クロノロジー間の関係（樹種間、樹木年輪指数間）を明らかにしておくことが樹木年輪－気候関係の解析結果を考察するために有効となる。

まず、樹木年輪変数と組織構造や年輪構造との関係について、樹木年輪変数は、当然のことながら木部細胞の放射方向に並んだ数や放射径、細胞壁厚、構成細胞の配列や構成要素率などに基づいている。そのため樹木年輪変数と組織構造や年輪構造との関係、さらには組織構造を樹木年輪変数として樹木年輪－気候関係を検討した報告がある（Wimmer et al. 2000 ; Yasue et al. 2000 ; Wang et al. 2002 ; Silkin et al. 2003）。その中で、Yasue ら（2000）は北海道のアカエゾマ

ツを供試樹木として年輪内最大密度と組織構造との関係について検討し、年輪内最大密度は年輪最終部の細胞に起因していることを明らかにした。このことは多くの針葉樹においても同様であると考えられる。一方、広葉樹は組織構造が複雑であるため、組織構造と材密度との関係を検討した報告（深沢ら 1972；船田ら 1995）はあるが、多くの樹種については明らかとなっていない。また、材密度と組織構造や年輪構造とを関連付けて樹木年輪－気候関係の解析結果を検討した報告は見当たらない。

次に、木部形成の季節変化については、樹木の観察や形成層を含む試料の観察などから、おおよそ明らかにされている（島地 1979；今川ら 1970, 1972a, 1972b, 1976, 1985；安江ら 1994；Oribe et al. 2001；Begum et al. 2008, 2012）。しかしながら、木部形成の季節変化は樹種や生育地によって異なると報告されている（小見山 1987；和田ら 2011）。そのため樹木年輪－気候関係の解析に用いた供試樹木の生育地において木部形成の季節変化を明らかにしておくことが樹木年輪－気候関係の解析結果をより詳細に考察するために重要となると考えられる。しかしながら、供試樹木の生育地において、木部形成の季節変化を把握した上で樹木年輪－気候関係を考察した報告（安江ら 1994）は少ない。

d) 供試樹木の生育地と気象観測地との距離

樹木年輪気候学的研究では、樹木の成長に気候の影響が明らかに現れるとされる高山地域や乾燥地域などや、広範囲の地域、人為的な影響が少ない地域を対象とするが、そのような地域に気象観測所が設置されていることはほとんどないため、供試樹木の生育地と気象観測地との距離が離れている報告がほとんどであり、両者の距離が近い報告（Chen 2010）は少ない。また、年輪幅の変動は広範囲な地域において同調性があることがわかっているが、同一樹種であっても、個体間の生育地が離れるほど同調性が低くなることも分かっている（光

谷 1987a, 1987b ; 野田 1996)。さらに、このような年輪幅の変動には同調性があるという特徴を生かして産地判別を試みた藤原ら (2011) は、より産地に近い気候変数との間に高い相関係数が認められる確率が高いと報告している。

このようなことから樹木年輪－気候関係においても、どの程度まで離れた位置の気象観測地で観測された気象資料まで利用が可能なのかを明らかにしておくことが必要である。また、逆に供試樹木の生育地と気象観測地との距離を近くにするものの効果を明らかにする必要もある。

e) 気候変数への開花日推定法の導入

樹木年輪－気候関係に用いる気候変数として、主に月別の平均気温や降水量が用いられる。これら気候変数の経年変動の代替となるような経年変動を、樹木年輪の変動を基に構築することが樹木年輪気候学の目的であるため、気候変数そのものに検討を加えた報告 (藤原 2001) は少ない。

一方で、ソメイヨシノやスギなど樹木の開花日や開芽日、結実日などを推定する研究 (小元ら 1989 ; 青野ら 1990a, 1990b, 2003 ; 川島ら 1993 ; 金指ら 2002 ; 藤本 2007) では、開花日などの経年変動と同調する変動を、気候情報を基に推定モデルを構築している。この推定モデルが、樹木年輪気候学的手法に当てはめると気候変数にあたる。そして、推定モデル (気候変数) の検討の際には、用いる気象要素やその積算方法、またその積算する期間を検討する。積算方法には、積算温量法や有効積算温量法、温度変換日数法など多数あり (小元ら 1989 ; 青野ら 1990a, 1990b, 2003 ; 川島ら 1993 ; 金指ら 2002 ; 清野 2005 ; 藤本 2007)、これらは有効な温度や湿度に対する特性、またそれらが係る有効な期間など植物生理学的な考えに基づいて検討され、精度よく開花日などが推定されている。このような手法を樹木年輪年代学的手法に導入して樹木年輪－気候関係を明らかにした報告は見当たらない。

f) 解析手法

樹木年輪－気候関係に用いる解析方法としては、単相関分析やレスポンスファンクション解析 (Cook et al. 1990 ; 安江ら 1994) などが用いられる。多くの場合、単相関分析が用いられるが、信頼性のより高い結果を得るためには統計期間をできるだけ長くとることが重要となる。一方で、その統計期間内で樹木年輪－気候関係が一定の関係にあるかを明らかにしておく必要もある。この樹木年輪－気候関係の変動性を検討する方法として移動相関法が用いられている (Biondi 1997 ; Carrer et al. 2006 ; Filippo et al. 2007 ; Reynolds-Henne et al. 2007 ; Gea-Izoquierdo et al. 2009 ; Carrer et al. 2010 ; Carrer 2011)。しかしながら、日本においてはその検討を行った報告は見当たらない。

また、樹木年輪－気候関係の解析に用いる単相関分析は、樹木年輪情報と気候情報との関係が 1 次関数の回帰線で表現できる場合に有効であるが、それ以外の場合には評価できない。一般に、生物の活動は気温条件や水分条件などに対して曲線部を持った関係であることが多いが、樹木年輪－気候関係の解析にそのような回帰線をあてはめて検討した報告は見当たらない。

1.3 本論文の構成

本研究では、樹木年輪年代学的手法を用いて木部形成に関わる樹木の気候応答を明らかにすることを目的とした。

まず第 1.1 節で本研究の背景と目的について述べた。そして第 1.2 節では、本研究で用いる樹木年輪年代学的手法を樹木の生物学的な現象、特に木部形成に関わる樹木の気候応答の解明に応用する際に生じる問題や検討が不十分な点について既往の研究を整理した。

第 2 章では、樹木年輪情報の収集と樹木年輪クロノロジーの構築を行った。

樹木年輪－気候関係を解析するにあたって、まずは年輪幅や年輪内平均密度などの樹木年輪変数の時系列から生育地や樹種、樹木年輪変数を代表する時系列である樹木年輪クロノロジーを構築する必要がある。そのため、**第 2.1 節**では樹木年輪情報の収集を行った。供試樹種の選択を行い、軟 X 線デンシトメトリを用いて樹木年輪変数の測定を行った。さらに年輪幅測定値における経年変動の傾向を明らかにした。続いて、**第 2.2 節**では気候による影響と考えられる個体間に共通した樹木年輪の経年変動を抽出するための「標準化平滑関数の検討」を行い、樹木年輪クロノロジーを構築した。そして、**第 2.3 節**で**第 2 章**をまとめた。

第 3 章では、「樹木年輪情報の基礎情報」を得るために、まず、**第 3.1 節**では「樹木年輪変数と木材組織や年輪構造との関係」を明らかにした。次に、**第 3.2 節**では、定期的に採取した形成層付近の試料から新生木部細胞の分裂状態や分裂数を観察することで「木部形成の季節変化」について明らかにした。**第 3.3 節**では構築した樹木年輪クロノロジー間の比較することで、「樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間、樹種間）」を明らかにした。そして、**第 3.4 節**で**第 3 章**をまとめた。

第 4 章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「樹木年輪情報」に着目した。まず、**第 4.1 節**では、その「樹木年輪情報」の種類として「樹種」に着目し、供試樹木として選択した針葉樹 5 樹種と広葉樹 2 樹種について、樹木年輪－気候関係を解析し、その関係について 7 樹種間の比較を行った。**第 4.2 節**では、「樹木年輪指数」に着目し、針葉樹 5 樹種における 9 種類の樹木年輪変数ごとに構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。**第 4.3 節**では、**第 4.2 節**に続き、広葉樹 2 樹種における 9 種類の樹木年輪変数から構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。そして、**第 4.4 節**で**第 4 章**をまとめた。

第 5 章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「気候情報」に着目した。ま

ず、**第 5.1 節**では、その「気候情報」の中で、「供試樹木の生育地から気象観測地までの距離」に着目し、供試樹樹種の生育地である奥多摩と、奥多摩以外の気象観測地で得られた気候変数とを用いて、奥多摩の樹木年輪情報との樹木年輪－気候関係を検討した。**第 5.2 節**では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる気候情報として「開花日推定法の導入」を検討した。そして、**第 5.3 節**で、**5 章**をまとめた。

第 6 章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「解析方法」に着目した。**第 6.1 節**では、その「解析方法」の中で「統計期間」に着目し、樹木年輪－気候関係について異なる統計期間ごとに解析し、その関係の経年変動を検討した。**第 6.2 節**では「相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目し、樹木年輪－気候関係について 1 次関数の回帰線に 2 次関数の回帰線を併せて検討した。そして、**第 6.3 節**で、**6 章**をまとめた。

最後に、**第 7 章**で本研究を総括した。

第2章 樹木年輪情報の収集と樹木年輪クロノロジーの構築

2.1 樹木年輪情報の収集

2.1.1 はじめに

樹木の気候応答を明らかにするために行なう樹木年輪－気候関係の解析によって得られた結果の信頼性を向上させるためには、樹木年輪情報の量（個体数、時系列長）を増やし、質（樹種、樹木年輪変数）を向上させ、さらにそれら情報間の関連性を明らかにすることが有効であると考えた。つまり、生育環境が共通となるような一定地域から樹木年輪情報を得て、さらに気候情報をも得る必要があると考えた。

また、樹木年輪情報としては、比較的容易に測定可能なため年輪幅が多用されている。一方で、年輪幅以外に軟 X 線デンシトメトリによって得られる年輪内最大密度などの 1 年輪内の材密度に関する樹木年輪変数も気候変動を反映する重要な指標として樹木年輪気候学的研究に用いられている（安江ら 1994; 野掘ら 1994 ; Fujiwara et al. 1999）。材密度に関する樹木年輪変数の中で、針葉樹においては年輪内最大密度が頻繁に用いられている（Schweingruber et al. 1978 ; Yasue et al. 1997 ; Fujiwara et al. 1999）。これは針葉樹の年輪内最大密度指数が夏の気候変数との間に高い相関係数を示すためである。一方で、その他の材密度に関する樹木年輪変数あまり用いられていない（斉藤 1989 ; 安江ら 1994）。安江ら（1994）の報告では、複数の樹木年輪変数がそれぞれ異なる気候変数との間に有意な相関関係が認められた。つまり、得られる限りの樹木年輪変数を研究対象とすることが良いと考えた。

また、樹木年輪年代学的研究では各個体から得られた樹木年輪の経年変動から複数個体間に共通する経年変動である樹木年輪クロノロジーを構築する。そのため、各個体特有である樹木年輪の経年変動は樹木年輪クロノロジーの構築時に除去され、測定値自体の経年変動は確認されないことが多い。しかしなが

ら、構築された樹木年輪クロノロジーがどのような測定値を基にしているのかを明らかにしておく必要があると考えた。

そこで本節では、生育環境が共通となるような一定地域として東京農業大学奥多摩演習林を選択し、供試樹種の選択を行った。そして、樹木年輪情報の測定には軟 X 線デンシトメトリを用いて、複数種類の樹木年輪変数を得た。さらに、樹種ごとに年輪幅実測値の経年変動について、その傾向を明らかにした。

2.1.2 方法

a) 研究対象地域

研究地域として東京農業大学奥多摩演習林（以下、演習林）を選択した。演習林は東京都西多摩郡奥多摩町に位置し（**Fig. 2.1**），日原川の支流である祖谷入沢源流地域にあたる。演習林の西端は演習林内で最も標高の高い狩倉山（標高 1,452 m）で、山頂から東北にのびる北境尾根が北側の境界となり、南東にのびる三ノ木戸尾根が南の境界となっている。そして東端に演習林の研修センター（標高 650 m）が位置する。地質は、三ノ木戸尾根にチャート層がみられる他は石灰岩層が全体に広がっている。土壌は、三ノ木戸尾根にみられる火山灰土壌と他のほとんどを占める石灰岩を母材とする森林褐色土からなる（吉沢ら 1985）。林分の構成はスギ、ヒノキ、カラマツ、サワグルミなどの人工林とミズナラ、ミズキ、カエデなどの落葉広葉樹二次林からなる。その他にアカマツ、モミ、ツガなどの天然生針葉樹が尾根部に点在する。供試樹木の生育地は標高 650～1250 m，北緯 35°48'44"～35°49'11"，東経 139°03'27"～139°04'52"の範囲内であった。研修センターでの年平均気温（1995～2000 年）は 11.4℃，年降水量は約 1,548 mm であり，月降水量と月平均気温の季節変化は **Fig. 2.2** のとおりである。

b) 供試樹種の選択

供試樹種を選択するにあたって供試樹木についてはあらかじめ 3 つの条件を定めて決めた。すなわちそれは、1) 立木の外観：なるべく大きく、曲がりやねじれがないものであること。これは、年輪数が多く、成熟しており、健康である供試樹木を選択するためである。2) 生育状況：なるべくまとまって生育しているもの。これは、樹種ごとに多くの個体から年輪試料を採取する必要があるためである。そして、3) これらの条件を満たすなるべく多くの樹種を選択し、供試樹種とすることにした。

c) 樹木年輪試料の採取

成長錐（ハグロフ社製、内径 5 mm、長さ 40 cm または 30 cm）を用いて円柱状の樹木年輪試料（以下、コア試料）を、2001 年 6 月 30 日から 2002 年 6 月 6 日の間に採取した。コア試料は、各個体につき胸高部位（地上高約 1.2 m）の異なる 2 方向以上から採取した。傾斜地に生育する樹木は、針葉樹と広葉樹では異なるが、共に傾斜上下は偏心成長の影響を大きく受けるため、できるだけ等高線に沿った側面からコア試料を採取した。

d) 供試樹種と樹木年輪試料の概況

供試樹種として、針葉樹はアカマツ（*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.）とモミ（*Abies firma* Siebold et Zucc.），ツガ（*Tsuga sieboldii* Carrière），スギ（*Cryptomeria japonica* D.Don），ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endl.）の 5 樹種，広葉樹はサワグルミ（*Pterocarya rhoifolia* Siebold et Zucc.）とミズナラ（*Quercus crispula* Blume）の 2 樹種の合計 7 樹種を選択した。アカマツとモミ，ツガ，ヒノキ，ミズナラは尾根部に，スギとサワグルミは谷部（北向き斜面）に生育していた。また，モミとアカマツ，ツガ，ヒノキ，ミズナラは天然生木，スギとサワグルミは造

林木であった。各供試樹種の生育地の様子を **Fig. 2.3** に示した。

その他の樹種についても採取した。しかし、クリ (*Castanea crenata* Siebold et Zucc.) とヤマザクラ (*Cerasus jamasakura* H.Ohba) は高樹齢の個体が生育していたが個体数が少なく、カラマツ (*Larix kaempferi* Carrière) とホオノキ (*Magnolia obovata* Thunb.), コナラ (*Quercus serrata* Murray) は低樹齢であったため対象樹種から除外した。

供試樹木の概要を **Table 2.1** に示した。アカマツは 20 個体 (平均胸高直径 53.5 cm) からコア試料 53 本, モミは 32 個体 (平均胸高直径 58.3 cm) からコア試料 92 本, ツガは 16 個体 (平均胸高直径 54.4 cm) からコア試料 34 本, スギは 24 個体 (平均胸高直径 47.7 cm) からコア試料 49 本, ヒノキは 23 個体 (平均胸高直径 46.8 cm) からコア試料 46 本, サワグルミは 28 個体 (平均胸高直径 46.2 cm) からコア試料 59 本, ミズナラは 16 個体 (平均胸高直径 41.1 cm) からコア試料 31 本を, 合計 158 個体から 364 本のコア試料を採取した。

e) 木口薄片試料の作製

採取したコア試料はポリエチレン製コア試料保存管に入れ持ち帰った。コア試料のねじれや曲がりを防ぐために, 幅および深さが 5 mm の溝を掘った台木に固定し, 気乾状態になるまで 1 週間以上室内に静置し, 乾燥させた。

その後, 繊維方向の厚さを一定にした木口面の薄板試料 (以下, 木口薄板試料) を作製するために, 乾燥させたコア試料を台木から外し, 繊維方向が台木表面と垂直になるよう接着剤 (コニシ製, 木工用ボンド) を用いて再び台木に接着固定した。接着剤は木口薄板試料を切り出す際に, コア試料が破壊されるのを防ぐために十分に付ける必要がある。繊維方向が分かり難いコア試料は, あらかじめ木口面を刃物で削り確認した。さらにコア試料が接着剤の水分を吸い, ねじれや曲がりが生じないようにテープで固定し, 乾燥させた。乾燥後, 接着

剤の足りない隙間を確認し、接着剤を足した。

丸鋸を用いてコア試料から木口薄板試料を切り出した。2001年に採取したコア試料は独立法人森林総合研究所に切り出しを依頼し、一定厚さ 1.2 mm の木口薄板試料を得た。2002年に採取したコア試料は東京農業大学木工室で切り出した。この木口薄板試料は切りはじめと終わりがわずかに薄くなってしまった（平均厚さ：1.8 mm）。この木口薄板試料は厚さが一定ではないが、丸鋸により切り出したのでその表面は滑らかであった。このような厚さむらによる材密度値の変化は長周期的な変動として測定されるため、後に行なう標準化によって取り除くことができる。よって、この手順で以降の工程に進めた。

f) 軟 X 線写真撮影

木口薄板試料は撮影の前に恒温恒湿室（温度：20±2 °C, R.H.：60±5 %）内にて 24 時間以上保管し、含水率を調整した。軟 X 線写真撮影は、恒温恒湿室内に設置してある X 線写真撮影装置（ソフテックス社製, Softex EMBW 特型, 森林総合研究所設置, **Fig. 2.4**）を用いた。

木口薄板試料を標準吸収体と共にフィルム（フジフィルム製, X-RAY FILM IXFR 20.3cm×24.5 cm）上に直接置き撮影した。標準吸収体はあらかじめ密度値が明らかな物質で階段状に作られており、ネガフィルムの濃度値を木材の容積密度値に換算する基準となる。

撮影条件は、厚さ 1.2 mm の薄板試料は電圧 20 kV, 電流 14 mA, 撮影時間 4 分, 厚さ 1.8 mm の薄板試料は電圧 14 kV, 電流 12 mA, 撮影時間 4 分 30 秒とした。照射距離は 2.5 m で同じであった。

現像は現像室にて行ない、現像時間 5 分, 水洗 1～2 分, 定着 5 分とした。その後、蒸留水で洗浄し、撥水のために界面活性剤に漬け、再び蒸留水で軽く洗浄し、乾燥させた。

g) 測定

X 線ネガフィルムの濃度測定および材密度への変換，さらに樹木年輪変数の検出には年輪構造解析装置（Dendro 2003 Tree-Ring-Workstation；Walesch Electronic, **Fig. 2.5**）を用いた（以下，Dendro 2003）。Dendro 2003 ではネガフィルムの濃度値の測定や修正，年輪形成年の特定ができる。また，年輪幅や年輪内の材密度などの樹木年輪の特徴を表す変数（以下，樹木年輪変数）の算出がほぼ自動的に行なえる。ネガフィルムの濃度の測定は，フィルムごとに撮影した密度既知の標準吸収体のフィルム濃度と密度値の検量線を作成し，その相対値から材密度値に換算した。X 線ネガフィルムの濃度測定の走査は，放射方向の幅を 0.02 mm とし，0.01 mm ごとずらして測定した。接線方向の幅は，針葉樹の場合に 0.4～1.0 mm，広葉樹の場合には大径道管があるため 1.0 mm とした。

年輪界の判断は，Dendro 2003 によって得られた X 線ネガフィルムの濃度の変動（濃度曲線）を参考に行なった。また，X 線ネガフィルムの濃度値を木材の材密度値に換算し，コンピュータ上で年輪界や早晚材の境界を仕切ることで，年輪幅（ W_{ar} ）と早材幅（ W_{ew} ），晩材幅（ W_{lw} ），早材密度（ D_{ew} ），晩材密度（ D_{lw} ），晩材率（ P_{lw} ），年輪内最大密度（ D_{max} ），年輪内平均密度（ D_{mean} ），年輪内最小密度（ D_{min} ）の計 9 種類の樹木年輪変数を算出した。早晚材の境界値は各年輪内での最大最小密度差の 50 % 値とした。広葉樹 2 種は針葉樹と異なる年輪構造であるが同一条件で測定した。

X 線ネガ像とその濃度曲線との関係の一例を針葉樹ではアカマツ，広葉樹ではサワグルミとミズナラについて **Fig. 2.6** に示した。アカマツは年輪界直前に放射径が小径で，かつ厚壁の晩材仮道管が並ぶ高密度な部分があり，その後急激に材密度が低下し始めた位置を年輪界とした（**Fig. 2.6a**）。一般に，針葉樹の D_{max}

は、晩材部の最終部の狭い範囲に出現するが (Yasue et al. 2000)、アカマツにおいては晩材部の中でも比較的早い段階から中間部分で表れていた。このことはすでに知られており (佐伯 1963)、針葉樹の中でアカマツでは D_{\max} の位置がわずかに異なる。また、 D_{\min} の位置は、早材部の中でも前半の広範囲に出現しており、他の針葉樹を同じであった。

サワグルミは年輪界直前の小径かつ厚壁の木部繊維が接線方向に並ぶ高密度な部分 (D_{\max}) があり、その後急激に材密度が低下した位置を年輪界とした (Fig. 2.6b, Fig. 2.7a)。しかしながら、実際には、その高密度な部分の直後に 1 細胞分のターミナル柔細胞が並んだ位置が年輪界である。この高密度な部分は数細胞で構成されているため狭い。またその小径かつ厚壁の木部繊維は内腔がほぼないため最大最小密度差の 50 % 値で年輪内を前半と後半に分けた場合、この部分のみが後半部にあなっていた。なお、Fig. 2.6b で管孔が明瞭な部分と不明瞭な部分があるのは交錯木理のためであるが、そのような場合に X 線ネガ像が鮮明でなくなり、上述の高密度な部分以外も後半部に含まれることがあった。従って、サワグルミの場合の早材部は大半の部分を、晩材部は最終部のことを指す。なお、 D_{\min} は、年輪界直後、つまり年輪前半部の最初に位置していた。

ミズナラは大径道管のない高密度の孔圏外部から翌年の大径道管が並ぶ孔圏部で急激に材密度が低下し始める直前の位置を年輪界とした (Fig. 2.6c, Fig. 2.7b)。最大最小密度差の 50 % 値で年輪内を分けた場合、明らかに孔圏部と孔圏外部に分けられる。従って、ミズナラの早材部は孔圏部を、晩材部は孔圏外部を指す。また、ミズナラの年輪界は木口薄板試料では明瞭であるが、広放射組織により濃度曲線からは分かりにくくなることがあった。このため広放射組織をできるだけ避けて測定した。ミズナラの D_{\max} は、孔圏外部の中でも前半に位置することが多く見受けられた (Fig. 2.6c)。なお、本研究で用いたミズナラの年輪幅は 2.31~4.56 mm の範囲にあり、1 年輪のほとんどを孔圏部が占める“ぬ

か目”は見当たらなかった。

h) 形成年の確定

クロスデーティングにより各試料の年輪の形成年を確定した。クロスデーティングは、年輪幅の変動や特徴的な年輪の出現について個体間を目視で比較して行う照合と、プログラム COFECHA (Holmes 1983) を用いて複数の年輪幅時系列間を統計的に比較して行う照合とを、疑わしい箇所がなくなるまで繰り返すことにより行った。また、形成年や年輪界の位置などの修正は Dendro2003 を用いて X 線フィルムの濃度曲線とネガ像と比較しながら行った。

プログラム COFECHA は、測定した年輪幅の時系列を一定の長さの区間に分割し、それぞれを基準となる仮に算出した年輪幅指数値に対して年次方向に 1 年ごとにずらしながら重なっている部分の相関係数を求めるプログラムである。その得られた相関係数が最も高い位置を探すことによって照合を行った。従って、偽年輪や欠損輪が存在する場合にはその存在する区間を推定することが可能で、比較的容易に検出することができる。

プログラム COFECHA で得た個体間の相関係数が低かった樹木年輪試料は、樹種ごとに共通する年輪変動を抽出することは困難と判断し、以後の工程には用いないことにした。

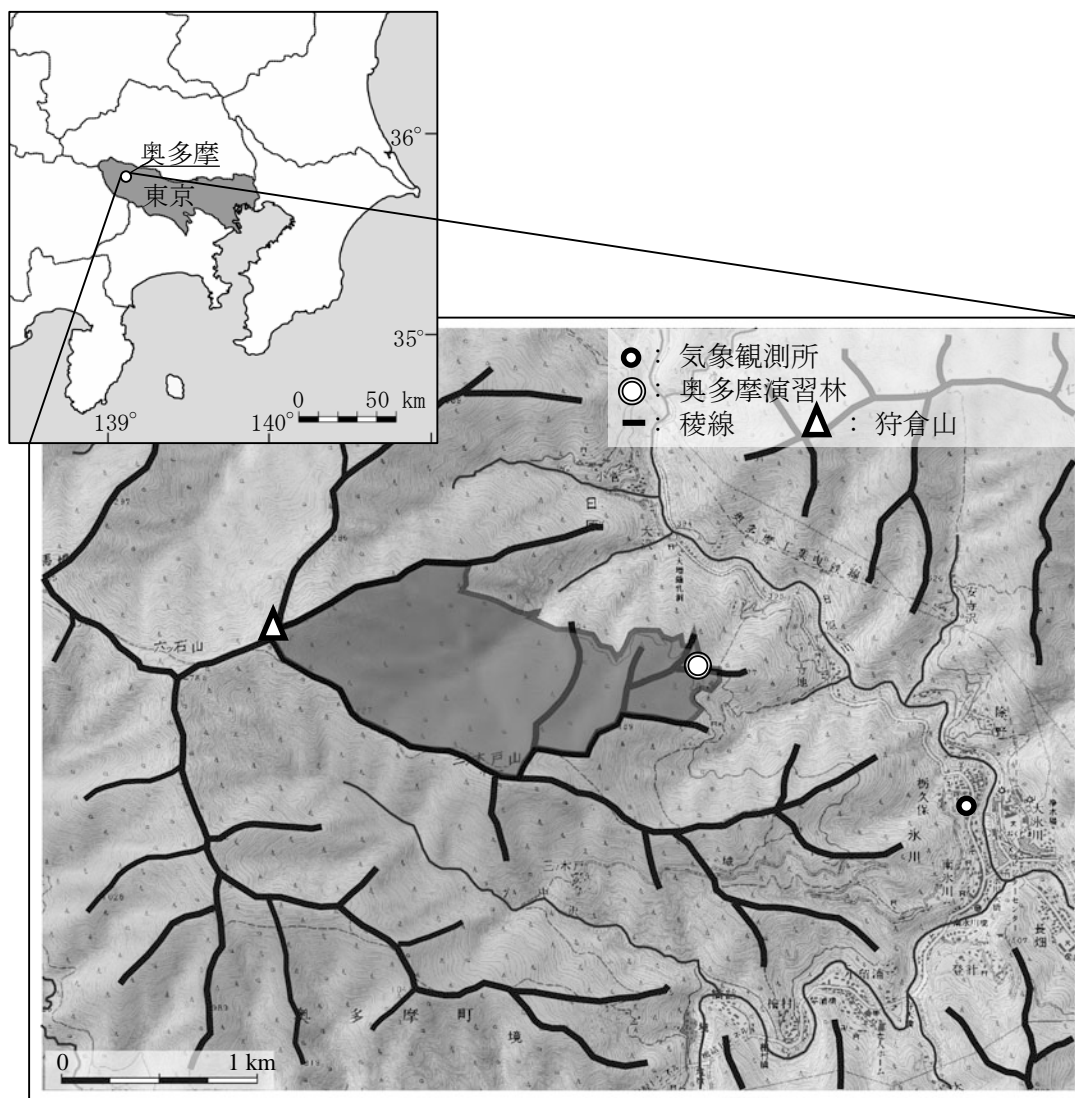


Fig. 2.1. 研究地域「奥多摩演習林」の位置

注 : 東京農業大学奥多摩演習林の位置を網掛けで示した。

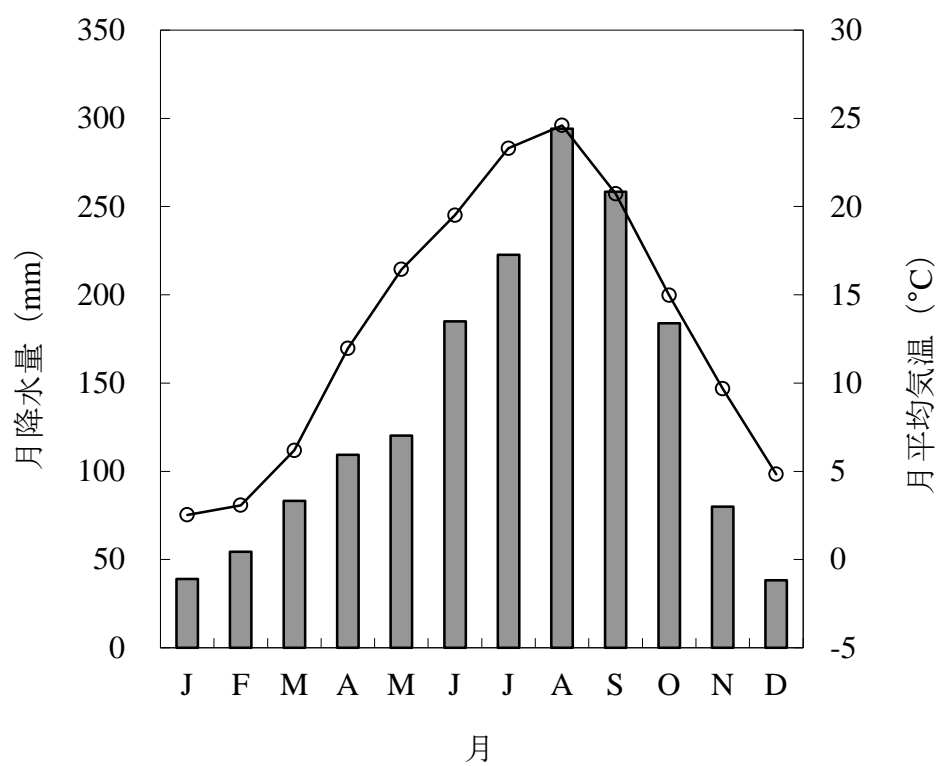


Fig. 2.2. 研究地域における月降水量と月平均気温の季節変化

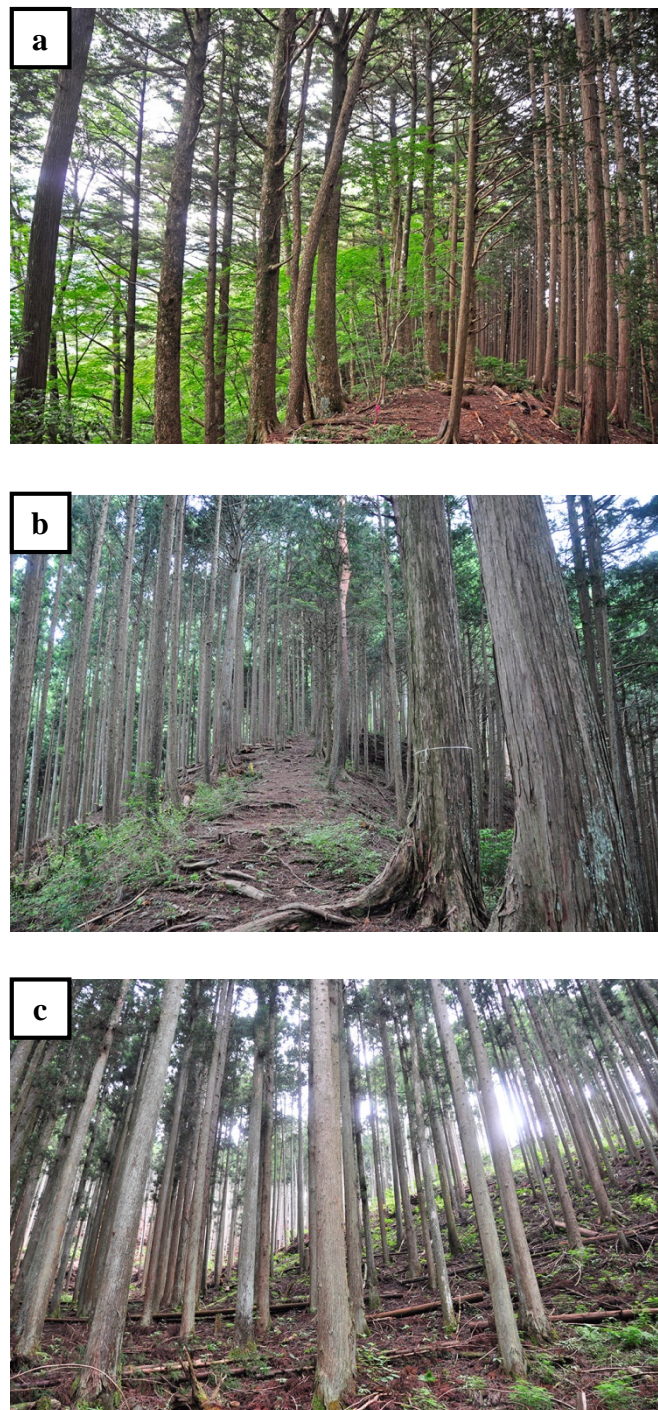


Fig. 2.3. 供試樹木の様子

凡 例：a：モミ，ツガ，b：アカマツ，モミ，ツガ，ヒノキ，c：スギ



Fig. 2.3. 供試樹木の様子（つづき）

凡 例：d：サワグルミ，e：ミズナラ

Table 2.1. 供試樹木の概要

樹種コード	個体数	コア試料数	胸高直径 (cm)
PIDE	20	53	53.5
ABFI	32	92	58.3
TSSI	16	34	54.4
CRJA	24	49	47.7
CHOB	23	46	46.8
PTRH	28	59	46.2
QUCR	16	31	41.1

凡 例：PIDE：アカマツ，ABFI：モミ，TSSI：ツガ，CRJA：スギ，CHOB：ヒノキ，PTRH：サワグルミ，QUCR：ミズナラ

注　：胸高直径は平均値を示した。



Fig. 2.4. 軟 X 線写真撮影装置



Fig. 2.5. 年輪構造解析装置 (Dendro 2003)

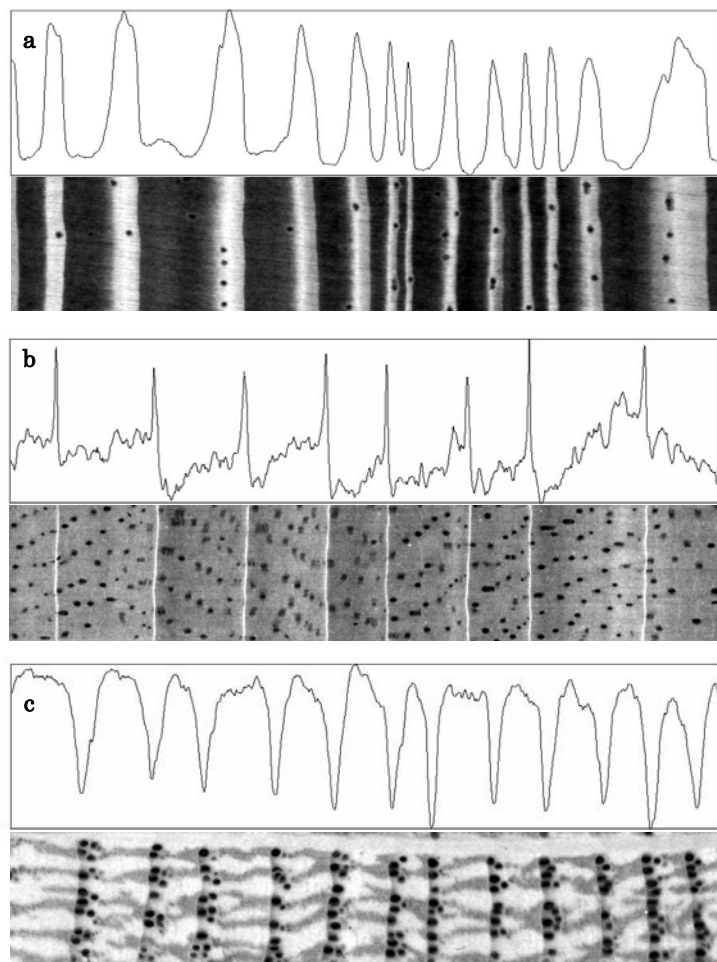


Fig. 2.6. X 線ネガ像と濃度曲線

凡 例：a：アカマツ，b：サワグルミ，c：ミズナラ

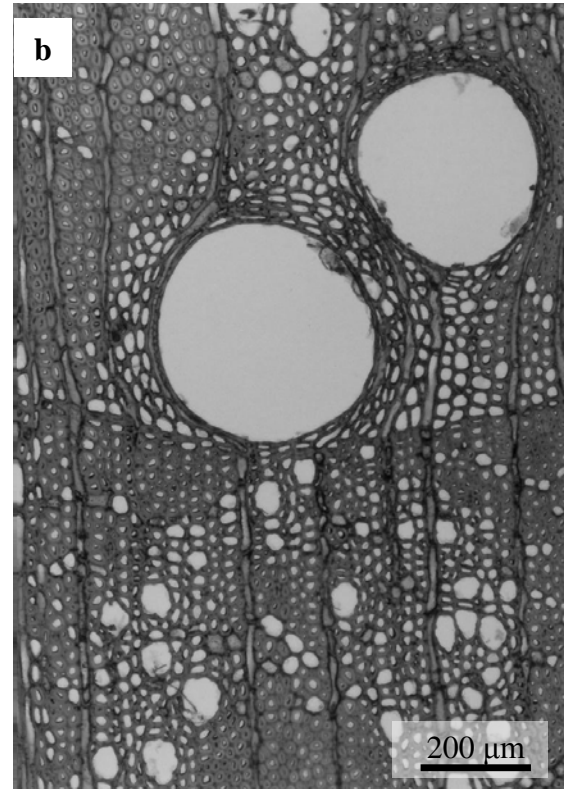
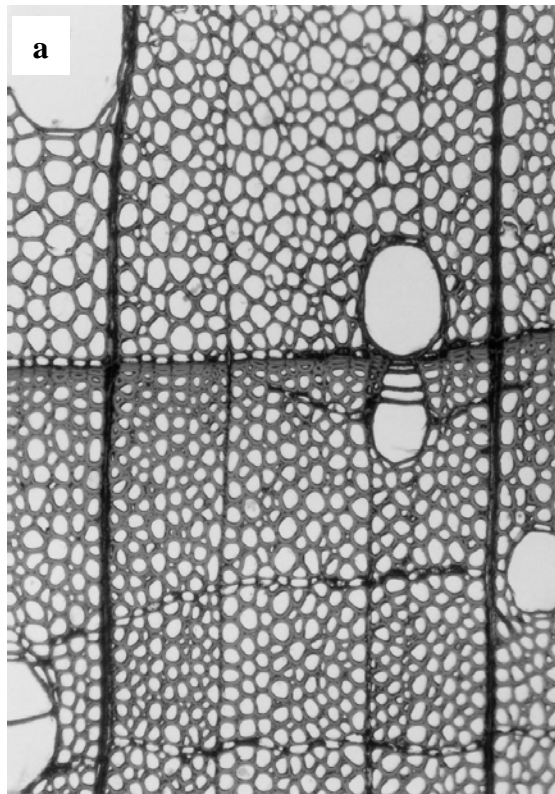


Fig. 2.7. 横断面での年輪界付近の様子（光学顕微鏡写真）

凡 例：a：サワグルミ， b：ミズナラ

2.1.3 結果と考察

a) 樹木年輪試料の概要

樹木年輪試料の概要を **Table 2.2** に示した。個体数は 20 個体以上を選択することを目指したが，ツガは演習林に現存する個体数が少なく，ミズナラは年輪数が 50 年輪を超えるような個体数が少なかったため，ともに 16 個体となった。また，スギ 1 個体とミズナラの 1 個体，サワグルミの 12 個体において X 線ネガ像での年輪界が不明瞭であったため測定ができなかった。特に，サワグルミは交錯木理を呈する場合があるため（桃井ら 2005），繊維方向と常に垂直な横断面を切り出すことが困難であった。また，アカマツとモミにおいては 4 方向から試料を採取した個体があるため測定した方向が多くなっている。平均年輪幅はモミ，ツガ，ヒノキで 2 mm 以下と狭かったが，アカマツ，サワグルミ，ミズナラで，3 mm 以上と広がった。

b) 年輪幅実測値における経年変動の傾向

年輪幅実測値における経年変動の傾向について，その概要を樹種ごとに以下に示す。アカマツでは **Fig. 2.8a** に示した PIDE02 のようにはじめは広いが 1934 年までに急激に狭くなり，以後はほぼ一定となる傾向（供試個体中 6 個体，以下同じ）と，PIDE06 のように 1984 年ごろまで徐々に狭くなり，それ以後広がる傾向（5 個体），そして PIDE15 のように全体的にはほぼ一定である傾向（5 個体）があった。

モミでは **Fig. 2.8b** に示した ABFI01 のように徐々に広がり一定となるが，1964 年に急激に狭くなり，以後は狭いまの傾向（10 個体）と，ABFI06 のように 1945 年ごろまで徐々に狭くなり，それ以後は狭いまの傾向（4 個体），そして ABFI13 のように全体的にはほぼ一定である傾向（16 個体）があった。

ツガでは **Fig. 2.8c** に示した TSSI05 のように全体的に狭い時期と広い時期とが

ある傾向（5 個体）、TSSI08 のようにはじめは広いが徐々に狭くなる傾向（5 個体）、そして TSSI12 のように徐々に広くなり、その後狭くなっていく傾向（5 個体）があった。他の樹種と異なり複数個体に共通する特定時期の大きな変動は明確ではなかった。

スギでは **Fig. 2.8d** に示した CRJA04 のように年輪数が約 100 年輪以上あり、1930 年ごろから 10 年間前後狭く、その後は広くなりほぼ一定である傾向（5 個体）と、残りの個体は樹齢 60 年前後であり、はじめは広いが徐々に狭くなっていたが、その中で CRJA07 のようにそのまま狭くなる傾向（7 個体）と CRJA12 のように 1975 年前後から広くなる傾向（10 個体）があった。

ヒノキでは **Fig. 2.8e** に示した CHOB13 のようにはじめは広いが 1935 年までに急激に狭くなり、以後は狭いまの傾向（11 個体）と、CHOB04 のように 1955 年前後から 15 年間ほど狭くなっている傾向（4 個体）、そして CHOB22 のように全体的にはほぼ一定である傾向（6 個体）があった。

サワグルミでは **Fig. 2.8f** に示した PTRH04 のみだが、年輪数が 100 年輪以上で 1953 年から 1970 年まで狭く、その前後はほぼ一定である傾向（1 個体）と、残りの個体は樹齢 50 年前後であり、はじめは広いが徐々に狭くなっていたが、その中で PTRH22 のようにそのまま狭くなる傾向（9 個体）と PTRH24 のように 1980 年前後から一定となる傾向（7 個体）があった。

ミズナラでは **Fig. 2.8g** に示した QUCR06 のように徐々に広くなる傾向（6 個体）と、QUCR15 のように徐々に狭くなる傾向（5 個体）、そして QUCR16 のように一度広くなった後に狭くなる傾向（6 個体）があった。

以上のように各樹種の年輪幅実測値における経年変動の傾向には、同一樹種であっても複数の傾向があることがわかった。加齢に伴う年輪幅の減少傾向は、造林木であるスギとサワグルミにおける年輪数が 60 年輪以下の個体で明確であった。また、他の地域でも確認された年輪幅実測値における経年変動の傾向と

して、鈴木（1992, 1997）は、本研究地域の 45～65 km ほど南に位置する神奈川県の大山周辺や箱根周辺に生育するモミとスギについて、また、亀岡ら（1992）は 20～90 km ほど東に位置する関東平野に生育するスギについて、1960 年代から 1970 年代にかけて年輪幅が狭くなっていることを報告している。この傾向は本供試樹木においても当てはまる個体が多くあり、さらにモミとスギ以外にツガとヒノキとサワグルミでも確認された。鈴木（1992, 1997）は、原因として両報告では大気汚染と関連付けている。実際のところ原因は不明であるが、本研究地域を越える広範囲の地域に共通しているようであるが、気候による影響とは異なる経年変動も年輪幅には記録されている可能性もあると考えられる。

Table 2.2. 樹木年輪試料の概要

樹種 コード	個体数	コア試料数	年輪数		年輪幅 (mm)		
			最大	平均	最大	平均	最小
PIDE	20	53	101	59.7	6.23	3.47	1.58
ABFI	32	92	175	102.8	4.02	1.96	0.80
TSSI	16	34	156	111.2	2.61	1.89	1.33
CRJA	23(1)	47(2)	115	67.4	4.47	2.99	1.27
CHOB	23	46	159	100.8	2.96	1.86	0.68
PTRH	16(12)	32(27)	113	46.3	5.84	3.47	2.36
QUCR	15 (1)	30 (1)	66	48.0	4.56	3.30	2.31

凡 例：Table 2.1 を参照， W_{ar} ：年輪幅

注：括弧内の数値は測定できなかった，または，測定しなかった個体数またはコア試料数を示した。

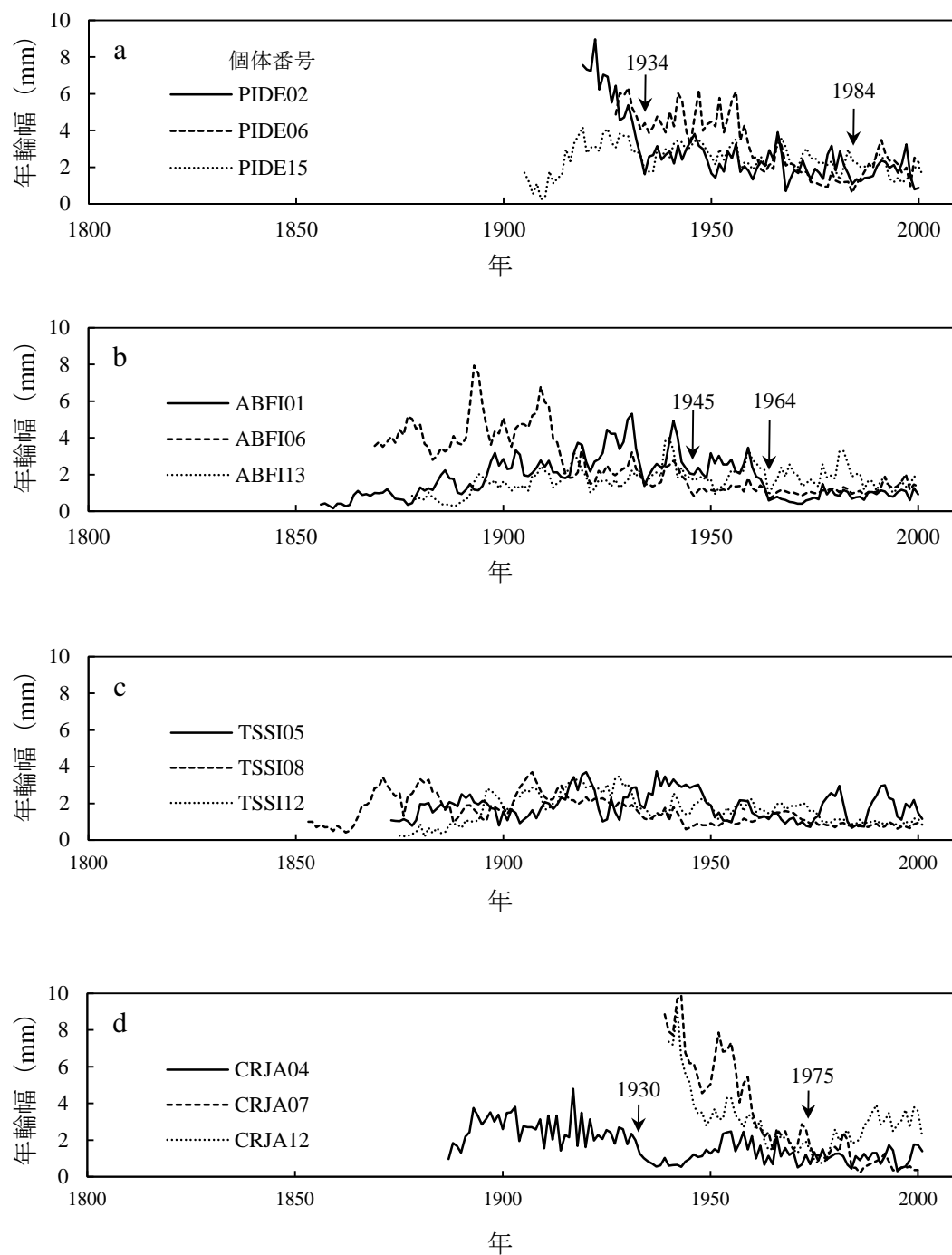


Fig. 2.8. 年輪幅実測値の経年変動

凡 例：Table 2.1 を参照

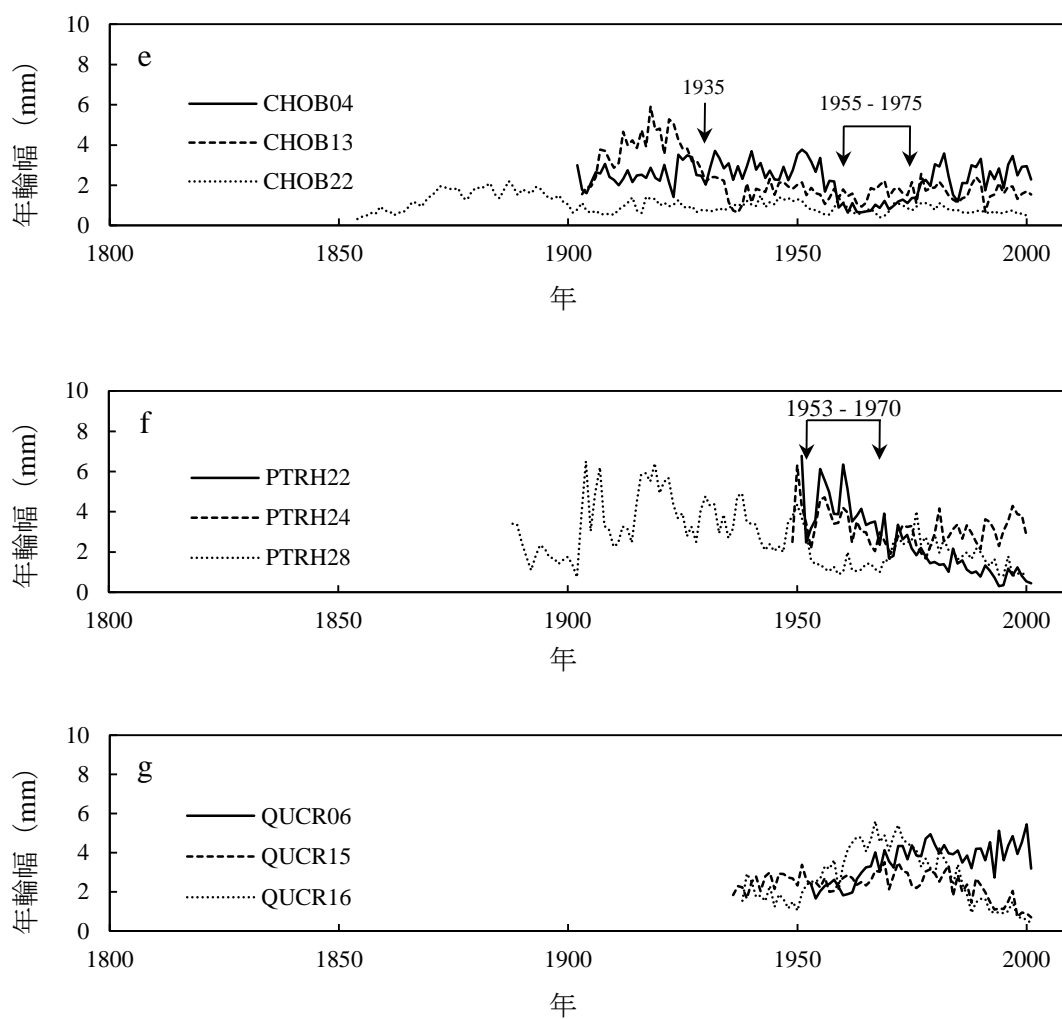


Fig. 2.8. 年輪幅実測値の経年変動（つづき）

凡 例：Table 2.1 を参照

2.1.4 結論

本節では、生育環境が共通となるような一定地域内に樹齢約 50 年以上の個体が少なくとも 20 個体は生育している樹種が複数存在し、かつ長期にわたる気候情報も存在する地域として東京農業大学奥多摩演習林を選択し、供試樹種を選択を行った。続いて、軟 X 線デンシトメトリを用いて樹木年輪変数の測定を行った。また、その樹木年輪変数の中で年輪幅の実測値について経年変動の傾向を明らかにした。

その結果、1) 供試樹種として、針葉樹はアカマツとモミ、ツガ、スギ、ヒノキの 5 樹種が、広葉樹はサワグルミとミズナラの 2 樹種が、比較的高樹齢であり、個体数が多く存在したため選択できることがわかった。しかしながら、今後、クリやヤマザクラ、カラマツ、ホオノキ、コナラなど対象から除外した樹種も研究対象として選択できることもわかった。

2) 各樹種における年輪幅実測値における経年変動の傾向には、同一樹種であっても複数の傾向があることがわかった。加齢に伴う年輪幅の減少傾向は、造林木であるスギとサワグルミにおける年輪数が 60 年輪以下の個体で明確であった。

3) 本研究地域を越える広範囲の地域に共通する長周期の経年変動ではあるが、気候による影響とは異なる長周期の経年変動も年輪幅には記録されている可能性があることがわかった。

2.2 樹木年輪クロノロジーの構築

2.2.1 はじめに

樹木年輪の経年変動には遺伝的、生理的要素などの内的因子や気候、樹間競争、生物害、地勢などの外的因子が影響を及ぼしている (Cook et al. 1990)。そのため樹木年輪－気候関係を解析するにあたって、まずは生育地や樹種、樹木年輪変数を代表する時系列である樹木年輪クロノロジーを構築する必要がある。樹木年輪クロノロジーは、形成年が決定できた各個体の各測線（コア試料）の樹木年輪時系列（tree-ring series）を、それぞれ標準化（長周期変動の除去と数値の指数化）し、さらに各個体間で平均化することで構築する。この標準化に用いる関数である標準化平滑関数（standardizing smoothing function）の種類は目的に合わせて選択する必要がある (Cook et al. 1990 ; 安江 1997)。

そこで本節では、個体間にできるだけ共通した気候による影響と考えられる樹木年輪の経年変動を抽出するために「標準化平滑関数の検討」を行い、樹木年輪クロノロジーを構築した。

2.2.2 標準化の概念と方法

a) 標準化の概念

年輪幅や年輪内平均密度などの樹木年輪変数には、樹木が成長する過程で受けた様々な生育環境に起因する変動が含まれている。一般的に樹木年輪年代学において、樹木年輪変数の時系列は式 2.1 で表されるようないくつかの因子に起因する変動の合成関数として考えられている (Cook et al. 1990 ; 安江 1994 ; 小林 2006)。

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (\text{式 2.1})$$

R_t : t 年に観測される年輪幅など樹木年輪変数の値

A_t : 個体の樹齢および直径に由来する成長傾向

C_t : 気候に由来する変動

$D1_t$: 隣接木からの被圧・開放など個体の周辺の局所的な攪乱による変動

$D2_t$: 気象害や生物害など個体群に共通する攪乱による変動

E_t : 既述の影響では説明できない因子による変動

δ : $D1_t$ と $D2_t$ の存在の有無を決定する係数, 0 または 1 の値をとる

気候に由来する変動は生育地内のすべての個体に対し共通すると考えられるため、生育地内の個体に共通する年輪幅や年輪内平均密度の時系列変動は主に気候による変動であると仮定できる。本研究の目的は樹木の気候応答を明らかにすることにあるため、各個体の時系列変動中の気候に由来する変動のみを残し、それ以外の因子に起因する変動を取り除く必要がある。気候に由来する変動 C_t 以外の変動を個体における樹木年輪変数の時系列の成長傾向 G_t と定義すると、 G_t は式 2.2 と表すことができる。この成長傾向を元の時系列 R_t から除去すること (式 2.3) で、気候に由来する変動 C_t を抽出した新しい時系列 I_t が算出される。この樹木年輪変数の時系列から成長傾向 G_t を除去または減衰させることを標準化 (standardization) と呼ぶ。

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t) \quad (\text{式 2.2})$$

$$I_t = R_t / G_t \quad (\text{式 2.3})$$

標準化を行う目的は、前述したように気候以外の因子に由来する変動、特に個体特有な変動を減衰させることと、比を求めることで全個体の平均値を 1 とし、樹木年輪情報を実測値に左右されない値とすることにある。また、標準化

した樹木年輪変数は、値が無次元量となり、樹木年輪指数 (tree-ring indices) と呼ばれる。そして年輪幅は年輪幅指数 (IW_{ar})、早材幅は早材幅指数 (IW_{ew})、晩材幅は晩材幅指数 (IW_{lw})、早材密度は早材密度指数 (ID_{ew})、晩材密度は晩材密度指数 (ID_{lw})、晩材率は晩材率指数 (IP_{lw})、年輪内最大密度は年輪内最大密度指数 (ID_{max})、年輪内平均密度は年輪内平均密度指数 (ID_{mean})、年輪内最小密度は年輪内最小密度指数 (ID_{min}) と呼ぶ。

この標準化に用いる関数である標準化平滑関数には、指数曲線、回帰直線、多項式曲線、等加重移動平均、ガウス型加重移動平均、3 次平滑化スプライン関数 (Cook et al. 1981) (以下、スプライン関数) などが用いられている。それらの違いについては安江ら (1994) や野田 (1996) の報告が詳しい。そのような中で、近年はスプライン関数が頻繁に用いられている (安江 1997; Fujiwara et al. 1999; 久保 2002; 澤内ら 2007)。

スプライン関数を標準化に用いる場合、得られる樹木年輪指数の周期成分特性はフィルタ長に従って変化する。例えば、フィルタ長が短い場合には、 $D1_t$ を取り除くことに有効であるが、同時に C_t の長周期変動も取り除いてしまう。一方、フィルタ長が長い場合には、 C_t の長周期変動を含むが、 $D1_t$ を十分に取り除くことができない。したがって、できるだけ気候に起因する変動を減衰させずに、それ以外の変動を減衰させられるようなスプライン関数のフィルタ長を検討する必要がある。しかしながら、標準化に用いるスプライン関数の最適なフィルタ長の選択に当たり、これまでの研究において統一された基準は示されておらず、研究の目的および樹木年輪変数に応じてスプライン関数のフィルタ長を検討する必要がある (Cook et al. 1990; 安江 1997; 野田 2006)。

そこで、本研究では気候による影響と考えられる個体間にできるだけ共通した樹木年輪の経年変動を抽出するために標準化平滑関数を検討し、樹木年輪クロノロジーを構築することにした。

b) 標準化平滑関数の検討

標準化平滑関数の検討は、年輪幅と年輪内平均密度について行った。標準化平滑関数の種類としてスプライン関数を用い、そのフィルタ長として5種類(10, 20, 30, 60, 120 年)の中から最適なものを検討した。標準化平滑関数の検討には、同一樹種内における個体間総当たりの相関係数の平均値 (mean correlation coefficients between trees : \bar{r}_{bt}) を指標とした。標準化平滑関数の検討と樹木年輪クロノロジーの構築にはプログラム ARSTAN (Cook et al. 1981) を用いた。なお、プログラム ARSTAN の算出結果によると、フィルタ長 10 年のスプライン関数で標準化することで 10 年周期の変動が 50% に低減され、31.5 年周期の変動は 1% に低減される。

また、プログラム ARSTAN では、標準化したクロノロジー (standardized chronology) と標準化後に自己相関を取り除いたクロノロジー (residual chronology) の2つのクロノロジーを算出できる。しかし、樹木の気候応答を検討するには自己相関を取り除く必要がないと考え、本研究では前者のみを対象とした。

2.2.3 結果と考察

a) 標準化平滑関数の検討

年輪幅の標準化に用いるスプライン関数について、フィルタ長の違いによる \bar{r}_{bt} の違いを樹種ごとに比較した (Fig. 2.9)。その結果、ツガ以外の6樹種においてフィルタ長 10 年を適用した場合に \bar{r}_{bt} が最も高い値となった。また、フィルタ長が長くなるにしたがい \bar{r}_{bt} が低くなる傾向があった。

スプライン関数のフィルタ長を検討した報告として、北海道の3ヶ所のうち2ヶ所に生育するアカエゾマツ (安江 1997) や南アルプス仙丈岳に生育するコメ

ツガ（久保 2002）ではフィルタ長 20 年を用いた場合に \bar{r}_{bt} が最も高く、フィルタ長が長くなるほど \bar{r}_{bt} が低くなったと報告している。一方で、長期間にわたる気候の復元を目的とする場合には、長周期成分を除去しないようにフィルタ長を長くする必要があるとし、安江（1997）は 66 年の、久保（2002）は 150 年のフィルタ長を選択している。

しかしながら本研究では、長周期の気候の変化を抽出するよりも個体間に共通する経年変動を出来るだけ抽出することが樹木の気候応答を検討するために必要であると考え、フィルタ長 10 年のスプライン関数を標準化平滑関数として適用することとした。

b) 樹木年輪クロノロジーの概要

アカマツは 20 個体の全て、モミは 32 個体中 29 個体、ツガは 16 個体中 14 個体、スギは 23 個体の全て、ヒノキは 23 個体全て、サワグルミは 16 個体中 12 個体、ミズナラは 15 個体全てを樹木年輪クロノロジーの構築に用いることにした（Table 2.3）。なお、他の個体との相関係数が低かったモミ 3 個体とツガ 2 個体、サワグルミ 4 個体は用いないことにしたため、測定した樹木年輪試料（Table 2.2）よりも少なくなっている。これらの年輪幅の変動は個体内の方向別に部分的に異なっており、その結果として個体内での相関係数が低かった。明瞭ではなかったがあて材の可能性もある。サワグルミ 2 個体については個体内での年輪幅の変動は同調しており、樹木年輪クロノロジーとの相関係数が低い原因は不明であった。

プログラム ARSTAN で算出された樹木年輪クロノロジーの基本統計量の中で、隣り合う年輪間の相対的な変化の大きさを表す平均感度（mean sensitivity : MS）は、針葉樹 5 樹種では近い値を示した。つまり、 IW_{ar} と IW_{ew} , IW_{lw} , IP_{lw} では 0.11~0.18 であり、 ID_{mean} と ID_{min} , ID_{ew} , ID_{lw} , ID_{max} では 0.02~0.05 であった

(Table 2.3)。一方、サワグルミの IW_{ar} と IW_{ew} , IW_{lw} , IP_{lw} では 0.19~0.35 であり, ID_{mean} と ID_{min} , ID_{ew} , ID_{lw} , ID_{max} では 0.04~0.06 と針葉樹よりも大きな値であった。また、ミズナラの IW_{ar} と IW_{ew} , IW_{lw} , IP_{lw} および ID_{mean} と ID_{ew} , ID_{lw} , ID_{max} では針葉樹とほぼ同じ値であったが, ID_{min} では 0.11 と大きかった。

これらの値は他の報告（澤内ら 2007；黄ほか 2000；Fujiwara et al. 1999；Graumlich et al. 1992；Tardif et al. 2001；Watson et al. 2002）と同じか、もしくはわずかに小さかった。値が小さい原因として、標準化に用いたスプライン関数のフィルタ長が他の報告よりも短いことが考えられる。また、サワグルミおよびミズナラの ID_{min} において MS の値が大きかったのは、個体数が少ない時期の変動幅が大きいことが原因であると考えた。

次に、 IW_{ar} と ID_{mean} について、プログラム初期設定による最大限可能な年輪数を含む最適な共通期間（common interval time span）での基本統計量（Table 2.4）を見ると、 \bar{r}_{bt} が低い値を示す樹種もあるが、どの樹種も各試料の値とその平均値との時系列間の相関係数の平均値（mean correlation coefficients of radii vs mean : \bar{r}_{r-m} ）や第 1 寄与率（variance in first eigenvector）は澤内ら（2007）の報告などと近い値を示した。7 樹種の樹木年輪クロノロジーを IW_{ar} については Fig. 2.10 に、 ID_{mean} については Fig. 2.11 に示した。また、各樹木年輪クロノロジーに含まれるコア試料数の変化を Fig. 2.12 に示した。 IW_{ar} のクロノロジー（Fig. 2.10）には、第 2.1 節で示した加齢に伴う年輪幅の減少傾向や気候による影響とは異なる長周期の年輪幅の経年変動が確認できないため、そのような変動はほぼ減衰させることができたと考える。

Table 2.4 の統計量は長い期間についてまとめて算出されるため、 \bar{r}_{r-m} がその期間中一定であるかわからない。そこで、 IW_{ar} について \bar{r}_{r-m} を統計期間が 40 年間ごとに 20 年間を重複させながら区切った場合の値（ $\bar{r}_{r-m(40y)}$ ）をプログラム COFECHA によって算出した（Fig. 2.13）。 $\bar{r}_{r-m(40y)}$ の算出に際し、自己回帰モデル

ングおよび対数変換処理を行わないように設定した。サワグルミ以外の樹種では、区分した期間が古くなるほど $\bar{r}_{r-m(40y)}$ が低くなる傾向があったが、長期間にわたって高い $\bar{r}_{r-m(40y)}$ が認められた。サワグルミの場合、1940年以前の資料は1個体分しかないため $\bar{r}_{r-m(40y)}$ が高い値を示していた。どの樹木年輪クロノロジーにおいても少なくとも1940年以後においては個体数が10個体以上であり、高い $\bar{r}_{r-m(40y)}$ が認められた。

以上のことから、樹木の気候応答に関する情報の一つとなる同一樹種内に共通した経年変動が抽出でき、そのような樹木年輪クロノロジーが構築できたと考える。

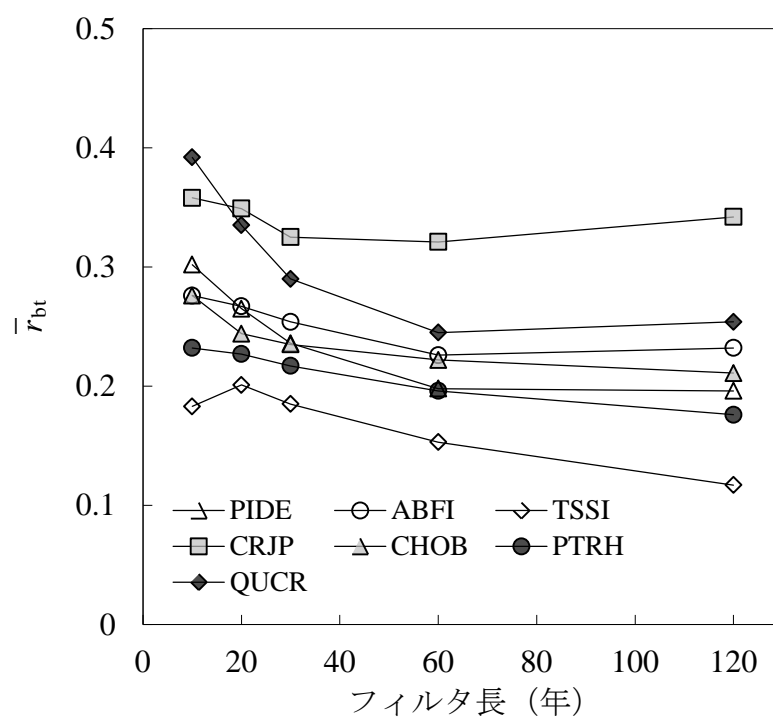


Fig. 2.9. 異なるフィルタ長のスプライン関数を用いて得られた \bar{r}_{bt} の比較

凡 例 : **Table 2.1** を参照, \bar{r}_{bt} : 同一樹種内における個体間総当たりの相関係数の平均値

Table 2.3. 標準化した樹木年輪クロノロジーの基礎統計量 (1)

		樹種コード						
		PIDE	ABFI	TSSI	CRJA	CHOB	PTRH	QUCR
個体数		20	29	14	23	23	12	15
コア試料数		48	76	20	47	42	20	30
統計期間		1901- 2001	1826- 2001	1843- 2001	1846- 2001	1887- 2001	1888- 2001	1936- 2001
平均感度	IW_{ar}	0.12	0.13	0.10	0.13	0.12	0.19	0.13
	IW_{ew}	0.14	0.14	0.12	0.15	0.13	0.20	0.14
	IW_{lw}	0.18	0.15	0.13	0.12	0.15	0.32	0.15
	IP_{lw}	0.14	0.12	0.11	0.13	0.15	0.35	0.03
	ID_{min}	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.06	0.11
	ID_{ew}	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.06
	ID_{ar}	0.05	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02
	ID_{lw}	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01
	ID_{max}	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02

凡 例 : **Table 2.1** を参照, IW_{ar} : 年輪幅指数, IW_{ew} : 早材幅指数, IW_{lw} : 晩材幅指数, IP_{lw} : 晩材率指数, ID_{min} : 年輪内最小密度指数, ID_{ew} : 早材密度指数, ID_{mean} : 年輪内平均密度指数, ID_{lw} : 晩材密度指数, ID_{max} : 年輪内最大密度指数

Table 2.4. 標準化した樹木年輪クロノロジーの基礎統計量 (2)

	樹種 コード	共通期間 (年)	個体数 (コア試料数)	\bar{r}_{bt}	\bar{r}_{r-m}	第1寄与率
IW_{ar}	PIDE	1947-1998(52)	15(26)	0.30	0.56	35.93%
	ABFI	1910-1998(89)	27(49)	0.28	0.54	31.50%
	TSSI	1932-2000(69)	13(18)	0.18	0.48	25.03%
	CRJA	1944-2000(57)	18(31)	0.36	0.62	40.12%
	CHOB	1932-2000(69)	23(41)	0.28	0.55	32.08%
	PTRH	1963-2000(38)	10(16)	0.23	0.53	34.23%
	QUCR	1963-2000(39)	13(24)	0.39	0.65	44.19%
ID_{mean}	PIDE	1947-1998(52)	15(26)	0.40	0.64	43.74%
	ABFI	1910-1998(89)	26(49)	0.32	0.58	35.98%
	TSSI	1932-2000(69)	13(17)	0.17	0.47	25.31%
	CRJA	1944-2000(57)	18(28)	0.29	0.56	34.07%
	CHOB	1932-2000(69)	23(40)	0.20	0.47	24.81%
	PTRH	1963-2000(38)	10(15)	0.34	0.62	41.27%
	QUCR	1963-2001(39)	13(22)	0.14	0.41	23.98%

凡 例 : **Table 2.1**, **Table 2.3** を参照, \bar{r}_{bt} : 同一樹種内における個体間総当たり
の相関係数の平均値, \bar{r}_{r-m} : 各試料の値とその平均値との時系列間の
相関係数の平均値

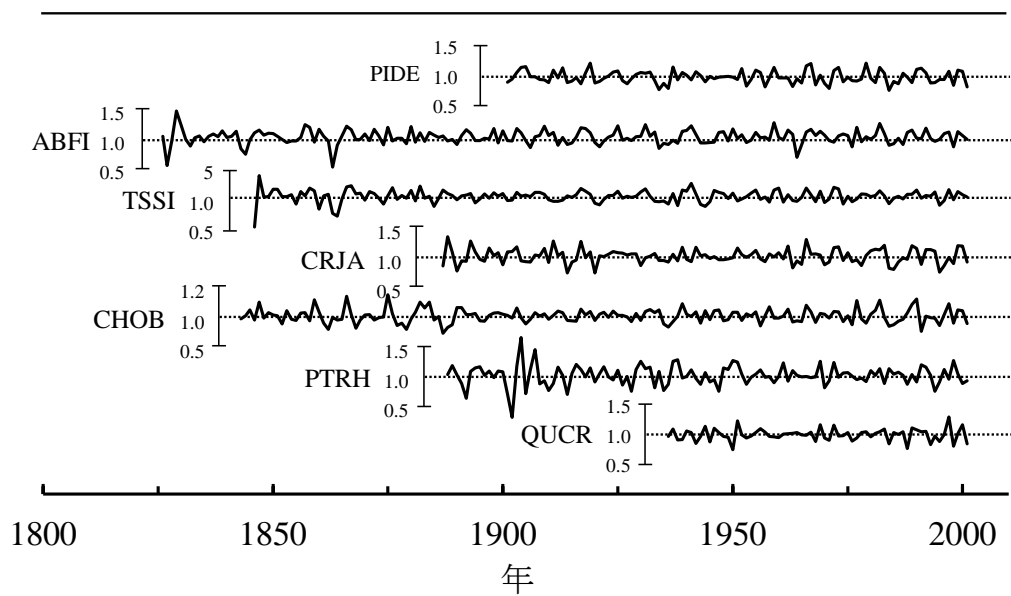


Fig. 2.10. 標準化した樹木年輪クロノロジー（年輪幅指数）

凡 例：Table 2.1 を参照

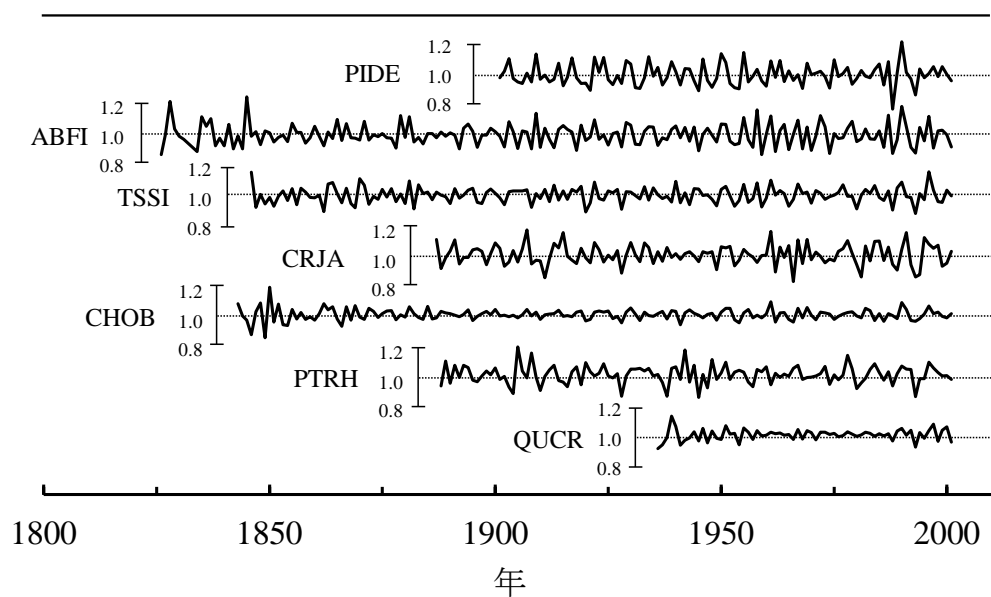


Fig. 2.11. 標準化した樹木年輪クロノロジー（年輪内平均密度数）

凡 例：Table 2.1 を参照

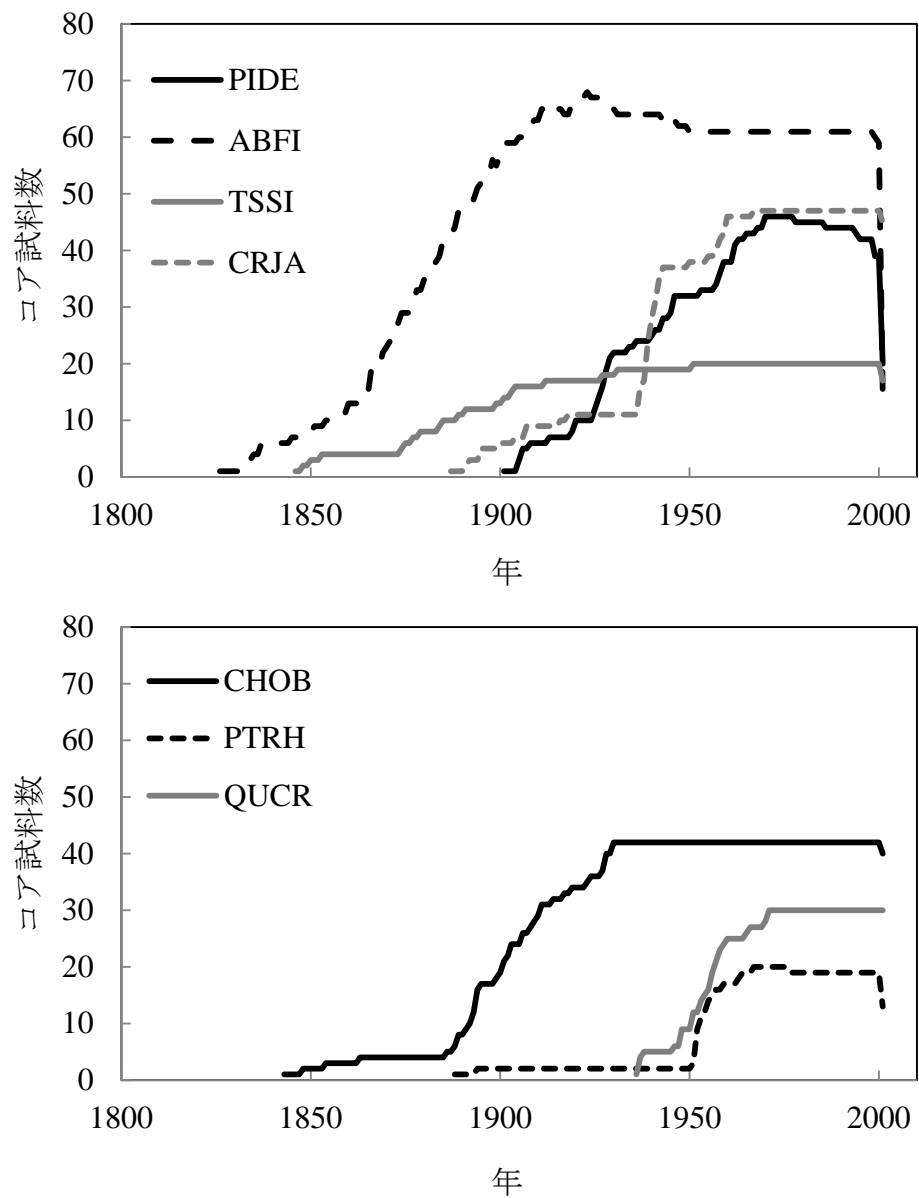


Fig. 2.12. 各樹木年輪クロノロジーに含まれるコア試料の数

凡 例 : **Table 2.1** を参照

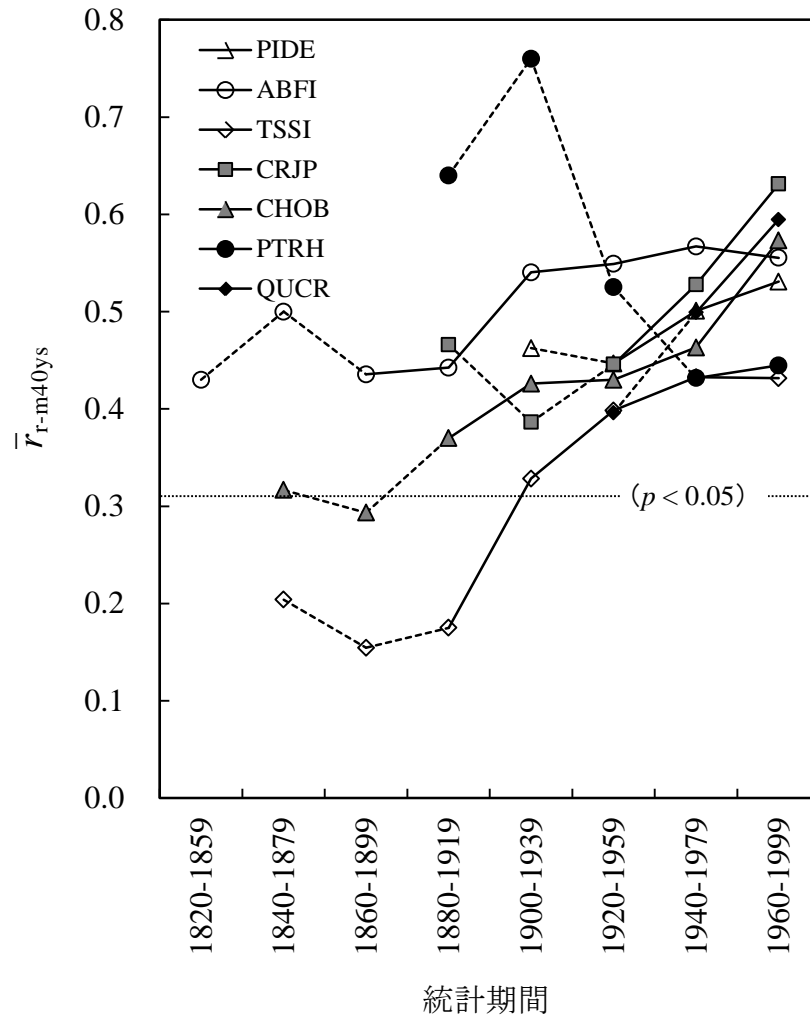


Fig. 2.13. \bar{r}_{r-m} を統計期間が40年間ごとに20年間を重複させながら区切った場合の値 ($\bar{r}_{r-m40ys}$) の経年変化

凡 例 : **Table 2.1** を参照, \bar{r}_{r-m} : 各試料の値とその平均値との時系列間の相関係数の平均値

注 : 個体数が10個体以下の区間は点線で示した。水平線は有意水準5%値を示した。

2.2.4 結論

本節では個体間にできるだけ共通した気候による影響と考えられる樹木年輪の経年変動を抽出するために「標準化平滑関数の検討」を行い、樹木年輪クロノロジーを構築した。

その結果、1) 標準化平滑関数について検討し、フィルタ長 10 年の 3 次平滑化スプライン関数を用いた場合に同一樹種内における個体間総当たりの相関係数の平均値 (\bar{r}_{bt}) が最も高い値となることがわかり、それを適用することに決定した。

2) その標準化平滑関数を 7 樹種における 9 種類の樹木年輪変数に適用して、合計で 63 系列の樹木年輪クロノロジーを構築できた。つまり、各樹木年輪クロノロジーには同一樹種内に共通した経年変動があることがわかった。 IW_{ar} のクロノロジーには、第 2.1 節で示した加齢に伴う年輪幅の減少傾向や気候による影響とは異なる長周期の年輪幅の経年変動が確認できないため、そのような変動はフィルタ長 10 年の 3 次平滑化スプライン関数を用いることでほぼ減衰させることができたと考える。また、その基本統計量は既往の報告とほぼ同じであり、適正な樹木年輪クロノロジーが構築できたと考える。

標準化平滑関数の種類は目的や樹種、生育条件によって最適なものが異なると考えられるため、どのようにして標準化平滑関数を選択したのかを検討した報告が日本においては少ないため、今後そのような検討を行っていく必要があると考える。

2.3 まとめ

第 2 章では、樹木年輪情報の収集と樹木年輪クロノロジーの構築を行った。第 2.1 節では樹木年輪情報の収集を行った。そのために供試樹種を選択し、軟 X 線デンシトメトリを用いて樹木年輪変数を測定した。さらに年輪幅実測値の経年変動について明らかにした。第 2.2 節では気候による影響と考えられる個体間にできるだけ共通した樹木年輪の経年変動を抽出できる「標準化平滑関数の検討」を行い、樹木年輪クロノロジーを構築した。その結果を以下にまとめる。

1) 供試樹種として、針葉樹はアカマツとモミ、ツガ、スギ、ヒノキの 5 樹種が、広葉樹はサワグルミとミズナラの 2 樹種が、比較的高樹齢であり、個体数が多く存在したため選択できることがわかった。また、各樹種の年輪幅実測値における経年変動の傾向には、同一樹種であっても複数の傾向があることがわかった。それは、造林木であるスギとサワグルミの年輪数が 60 年輪以下の個体で明確であった加齢に伴う年輪幅の減少傾向と、本研究地域を越える広範囲の地域に共通するが気候による影響とは異なる長周期の経年変動であり、年輪幅にはこれらも記録されている可能性があることがわかった。

2) 標準化平滑関数について検討し、フィルタ長 10 年の 3 次平滑化スプライン関数を用いた場合に、同一樹種内における個体間総当たりの相関係数の平均値 (\bar{r}_{bt}) が最も高い値となることが分かり、それを適用することに決定した。

3) その標準化平滑関数を 7 樹種における 9 種類の樹木年輪変数に適用して、合計で 63 系列の樹木年輪クロノロジーを構築できた。つまり、各樹木年輪クロノロジーには同一樹種内に共通した経年変動があることがわかった。また、その基本統計量は既往の報告とほぼ同じであり、適正な樹木年輪クロノロジーが構築できたと考える。

第3章 樹木年輪情報の基礎情報の把握

3.1 樹木年輪変数と組織構造や年輪構造との関係

3.1.1 はじめに

樹木年輪－気候関係の解析結果を考察する上で「樹木年輪情報の基礎情報」を明らかにしておくこと必要と考えた。

樹木年輪指数の基となる樹木年輪変数は、当然のことながら木部細胞の放射方向に並んだ数や直径や細胞壁厚，さらにはそれら細胞の配列や構成要素率など組織構造や年輪構造に起因している。そのため樹木年輪変数と組織構造や年輪構造との関係，さらには組織構造自体を樹木年輪変数として樹木年輪－気候関係を検討した報告がある（Wimmer et al. 2000 ; Yasue et al. 2000 ; Wang et al. 2002 ; Silkin et al. 2003）。その中で，Yasue ら（2000）は北海道のアカエゾマツを供試樹木として年輪内最大密度と組織構造との関係について検討し，年輪内最大密度は年輪最終部の細胞に起因していることを明らかにした。このことは多くの針葉樹においても同様であると考えられる。

しかしながら，本研究で対象とした針葉樹の中でアカマツは晩材部の中でも比較的早い段階で年輪内最大密度が表れることが多くみられる（佐伯 1963a, 1963b ; **Fig. 3.1**）。その原因として，アカマツの早晩材の移行が急であり，晩材での仮道管の壁は著しく厚壁化するが，晩材での仮道管の扁平化が顕著ではない（佐伯 1982）ことが挙げられる。しかしながら，佐伯の報告では測定対象が5～10年輪と少ないため，改めて確認する必要があると考えた。

一方，広葉樹においては組織構造が複雑であるため，組織構造と材密度との関係を検討した報告はあるが（深沢ら 1972 ; 船田ら 1995 ; Zhang 1997 ; Mothe et al. 1998），材密度に関する樹木年輪変数を用いて樹木年輪－気候関係を検討した報告は少ない（涌井ら 2008 ; 眞山ら 2011）。環孔材の樹種については，樹木年輪－気候関係を検討する際に，年輪幅を孔圏幅と孔圏外幅とに分けて用いた

報告（安江 2001 ; Lebourgeois 2004），孔圏部の管孔面積を用いた報告（Matisons et al. 2012）がある。散孔材の樹種については，年輪内平均管孔面積を用いて樹木年輪－気候関係を検討した報告がある（Leal et al. 2004）。

本研究でも用いたミズナラの材密度と組織構造との関係について，ある年輪幅以上になると孔圏幅（ほぼ一定）の材密度への寄与率が低くなり，ある年輪幅以下では孔圏だけになること，また，孔圏外の材密度の変化は厚膜の木部繊維と薄膜の小径道管よりなる火焰状模様との割合の変動が主な原因であると深沢ら（1972）は報告している。そして，ミズナラの X 線ネガ像（**Fig. 2.6c**）を見ると，孔圏外部の中で髄側から樹皮側に移るにしたがって火焰状模様の低密度部が占める割合が多くなっていた。そして，年輪内最大密度が孔圏外部の中でもそのはじめに表れることが多く認められる（深沢ら 1972 ; Mothe et al. 1998 ; **Fig. 2.6c**）。一方で，サワグルミについては材密度と組織構造との関係を明らかにした報告はみあたらない。

そこで本節では，針葉樹の中でも特徴的な晩材を持つアカマツと，材密度と組織構造との関係が把握できていないサワグルミを対象として「樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係」を検討することとした。

3.1.2 方法

a) 試料およびプレパラートの作製

試料は，樹木年輪変数を測定した木口薄片試料の中から，4 個体各 1 方向を選出した（**Table 3.1**）。アカマツでは計 67 年輪，サワグルミでは計 65 年輪について測定した。木口薄片試料を約 1cm ごとに分割し（**Fig. 3.2**），滑走式ミクロームで 15 μm 厚の横断面切片を採取した。切片をゲンチアナバイオレットで染色後，常法に従い永久プレパラートとした。横断面切片の採取の際は，試料を台木に瞬間接着剤で固定して行った。

b) 画像解析

作製したプレパラートの顕微鏡写真は、光学顕微鏡に接続した CCD カメラで画像を撮影し、PCに取り込んだ。解像度は1ピクセル $1.47\ \mu\text{m}$ であった。その画像を画像解析ソフト (NIH Image 1.61) とマクロプログラム (CDAM ver. 2.8, 小林 1997) を用いて、放射方向の細胞径 (D_{rc}) と細胞内腔径 (D_{lu})、隣接2細胞壁厚 (T_{dw}) と細胞内腔面積 (A_{lu}) を1年輪ごとに測定した (**Fig. 3.3**)。また、細胞壁率として細胞径に対する隣接2細胞壁厚の比 (Mork's index) を算出した。測定には1年輪につき細胞の放射列を5列選択し、アカマツは仮道管を、サワグルミは木部繊維を対象とした。

サワグルミについては、上述した方法 (方法 A) で得られた各細胞内腔面積の年輪内平均値 ($A_{lu\text{-mean-A}}$) と2つの放射組織と年輪界に囲まれた範囲内の各細胞内腔面積の年輪内平均値 ($A_{lu\text{-mean-B}}$) を算出した方法 (方法 B) の2種類を適用し、測定方法について検討した (**Fig. 3.4**)。なお、道管は含まないように選択範囲を選択した。

その後、年輪幅 (W_{ar}) または年輪内平均密度 (D_{mean}) と細胞の横断面での寸法の年輪内平均値との関係について単相関分析を用いて検討した。また、測定した横断面での寸法の変動と同一試料の同一年輪の X 線ネガ像の濃度値の変動とを比較した。

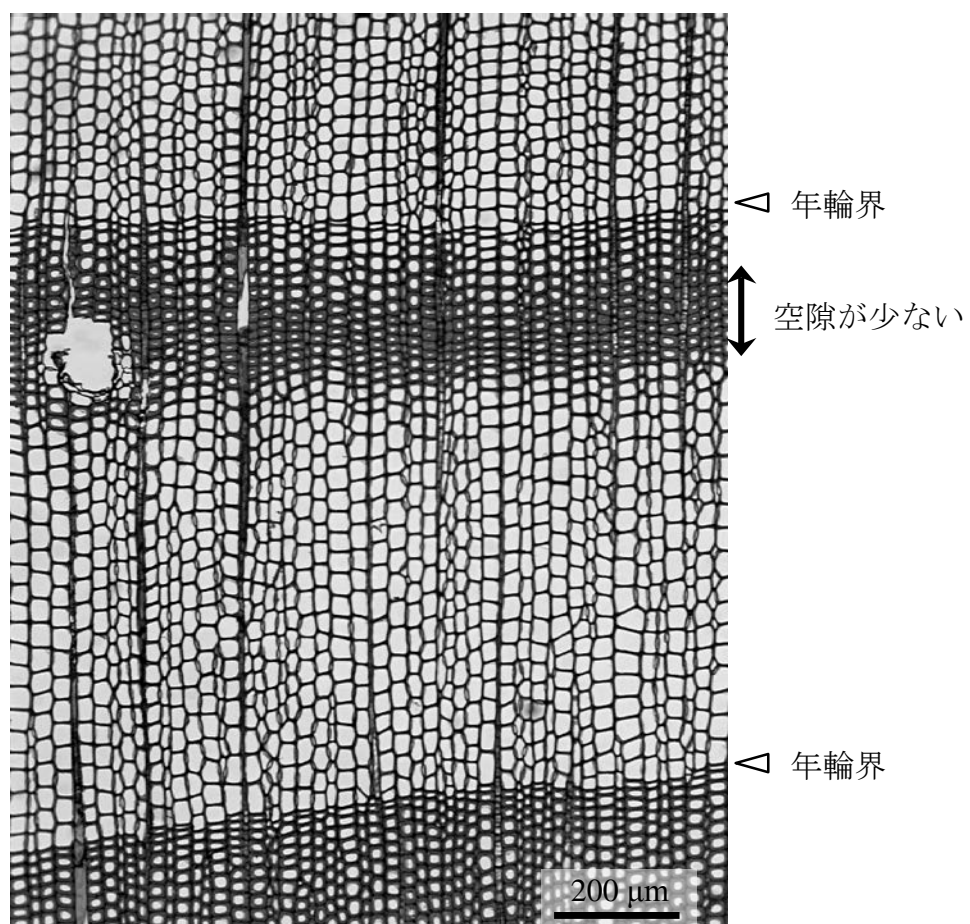


Fig. 3.1. アカマツ横断面の様子（光学顕微鏡写真）

Table 3.1. 供試樹木の概要

個体番号	測定した年輪数	年輪幅(mm)		
		最小	平均	最大
PIDE 15	18	1.10	2.10	3.30
PIDE 16	16	0.88	1.49	2.01
PIDE 18	17	0.86	1.41	1.99
PIDE 19	16	0.78	1.37	2.27
PTRH 11	16	0.52	1.50	2.32
PTRH 12	16	1.35	2.26	4.14
PTRH 17	6	0.60	0.87	1.20
PTRH 22	27	0.44	1.22	2.10

凡 例 : PIDE : アカマツ, PTRH : サワグルミ

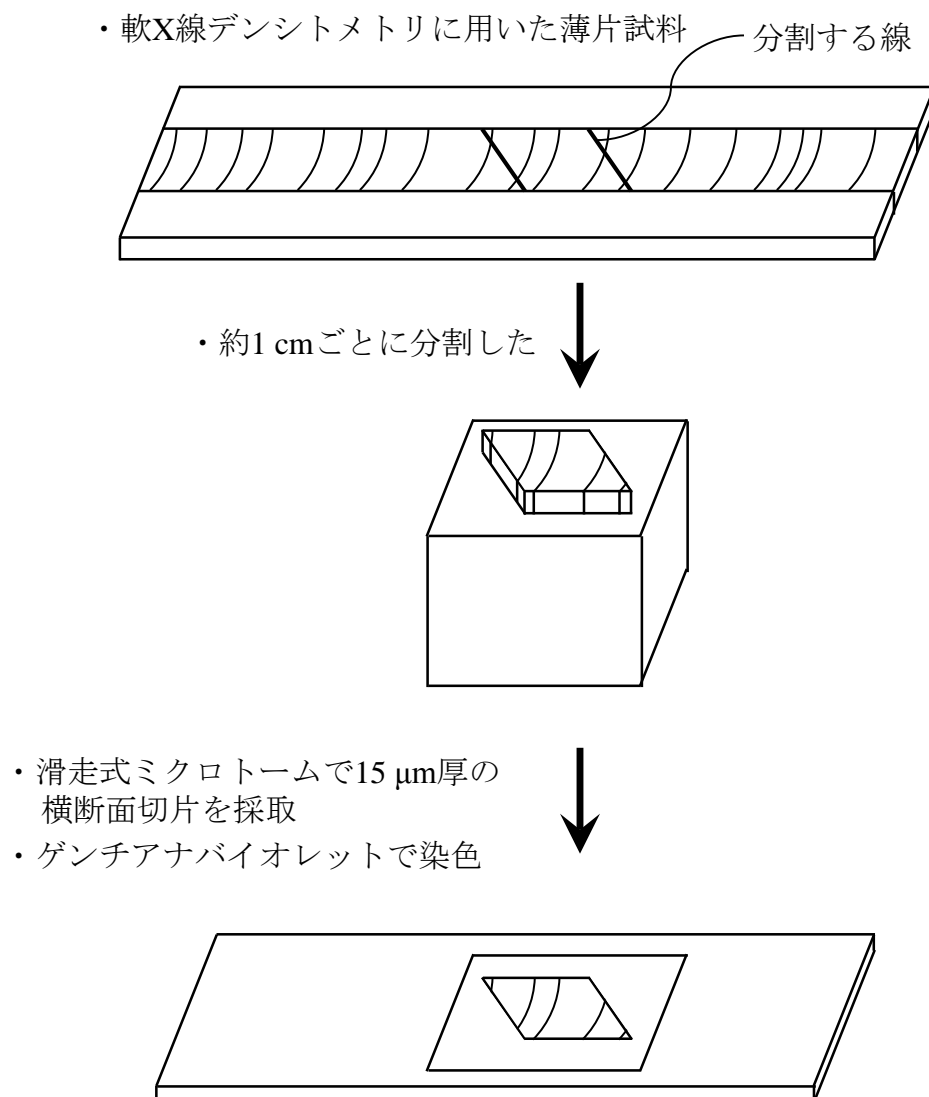


Fig. 3.2. 細胞の寸法を測定するための試料の準備

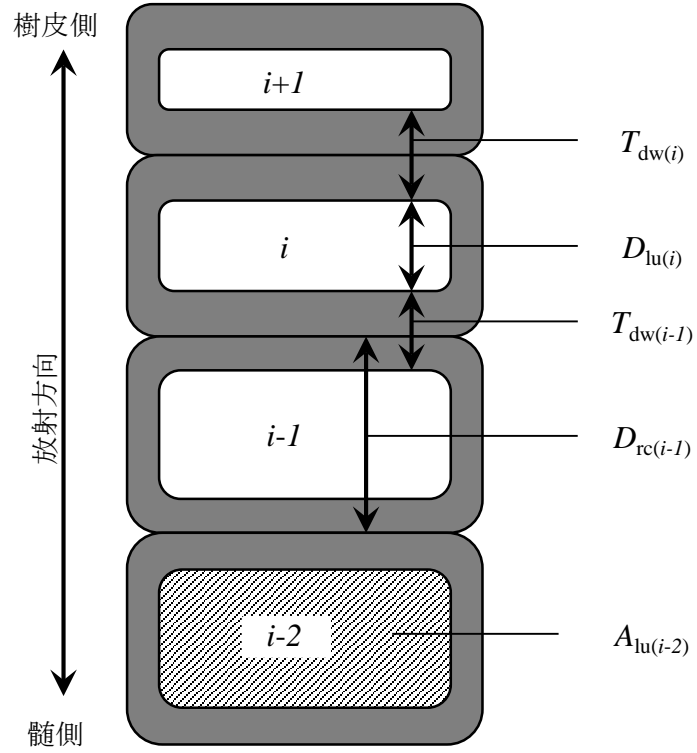


Fig. 3.3. 画像解析によって測定した細胞の寸法

凡 例 : $T_{dw(i)}$: i 番目と $i+1$ 細胞の隣接 2 細胞壁厚, $D_{lu(i)}$: i 番目の細胞内腔径,

$D_{rc(i-1)}$: $i-1$ 番目の細胞径, $A_{lu(i-2)}$: $i-2$ 番目の細胞内腔面積

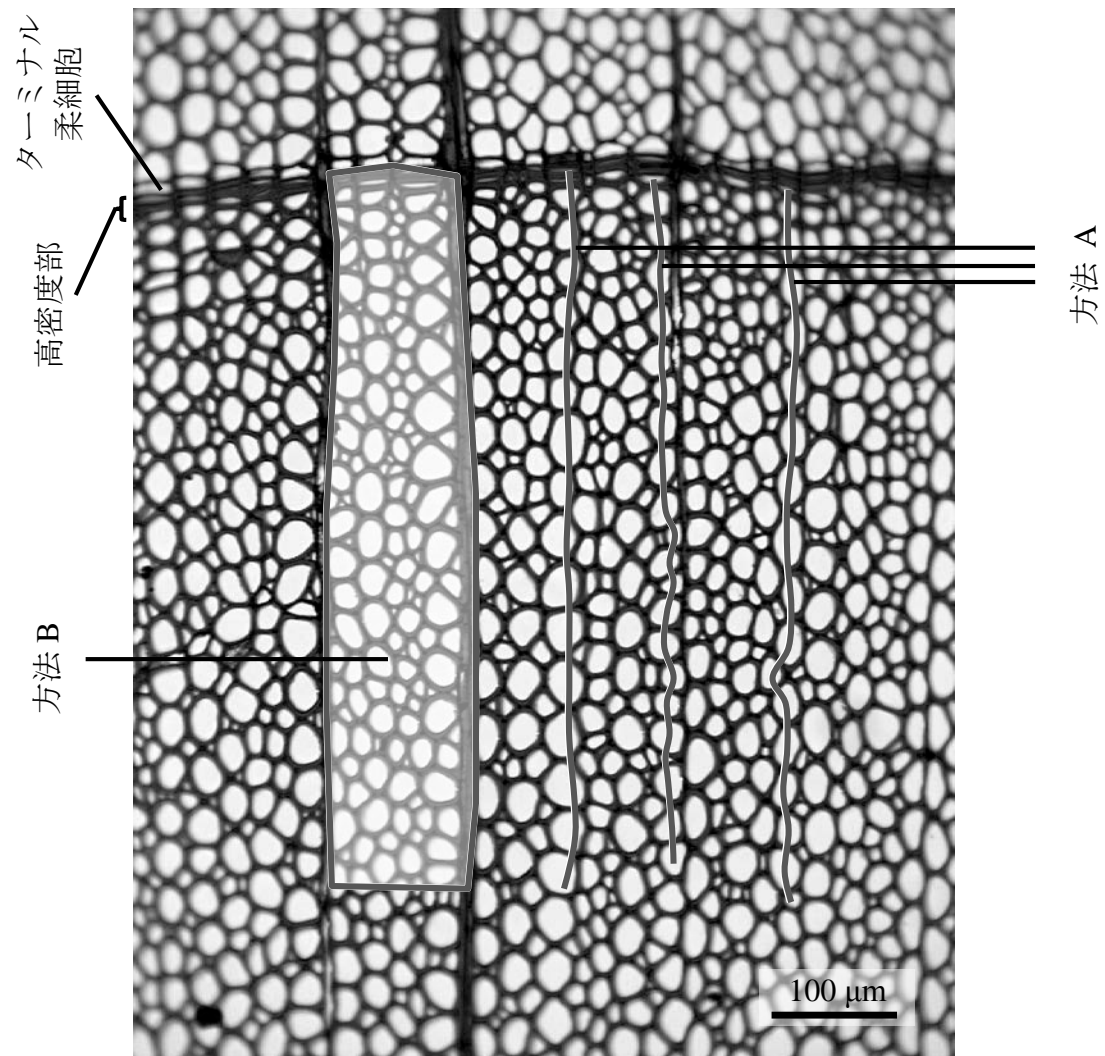


Fig. 3.4. サワグルミにおける測定方法の選択

3.1.3 結果と考察

a) アカマツ

a-1) 年輪幅および年輪内平均密度を決定する因子

Table 3.2 に年輪幅 (W_{ar}) および年輪内平均密度 (D_{mean}) と年輪内細胞数 ($N_{cell-ar}$) や年輪内平均細胞径 ($D_{rc-mean}$) , 年輪内平均細胞内腔径 ($D_{lu-mean}$) , 年輪内平均細胞内腔面積 ($A_{lu-mean}$) , 年輪内平均隣接 2 細胞壁厚 ($T_{dw-mean}$) , 年輪内平均細胞壁率 ($P_{cw-mean}$) との関係を示した。

W_{ar} では、全ての個体において有意水準 1 % で有意な相関係数を示したのは $N_{cell-ar}$ のみであり、正の関係であった。そして、 W_{ar} と $N_{cell-ar}$ との関係は個体による違いが少なかった (**Fig. 3.5**)。一方で、 W_{ar} と $N_{cell-ar}$ との関係は 1 個体以外では無相関であった。一般に、 W_{ar} は $N_{cell-ar}$ と $D_{rc-mean}$ によって決定されるが、アカマツの W_{ar} は主に $N_{cell-ar}$ によって広狭することがわかった。

一方、 D_{mean} では、全ての個体において有意水準 1 % で有意な相関係数を示したのは $D_{lu-mean}$ および $P_{cw-mean}$ であった (**Table 3.2, Fig. 3.6**)。5 % 水準では、 $D_{rc-mean}$ と $T_{dw-mean}$ が全ての個体において有意な相関係数を示した。 $D_{rc-mean}$ と $T_{dw-mean}$ とでは、どの個体においても $T_{dw-mean}$ との方が D_{mean} との間に絶対値の大きな相関係数が認められた。つまり、一般に、 D_{mean} は $P_{cw-mean}$ と同じとされ、 $D_{rc-mean}$ と $T_{dw-mean}$ の両方によって影響を受けるが、アカマツの D_{mean} は、より $T_{dw-mean}$ による影響が大きいことがわかった。

a-2) 年輪内最大密度と年輪内最小密度の出現位置

年輪内最大密度 (D_{max}) の出現位置を確認するために、年輪内最終に形成された仮道管から髄方向に向かう 20 細胞分の細胞径 (D_{rc}) と隣接 2 細胞壁厚 (T_{dw}) , 細胞壁率 (P_{cw}) の変化について **Fig. 3.7a** ~ **Fig. 3.7c** に示した。各年輪の平均を得るために年輪内最終にある仮道管を No.1 とし、そこから早材に向けて 20 細

胞分に番号を付けた (**Fig. 3.7a** の上部写真)。なお、年輪によっては 20 細胞中に早材部がある場合もあれば、晩材部の中間までしか入っていない場合もあったが、一律に測定した。

D_{rc} は、No.20 から No.14 にかけて次第に小さくなったが、No.14 から No.3 までは 40 μm 以下とほぼ一定であり、最終の No.1 と No.2 でとても小さくなった (**Fig. 3.7a**)。特に、最終に形成される No.1 の D_{rc} は約 20 μm ほどと小さかった。また、個体の違いや w_{ar} の違いにかかわらず D_{rc} の値にばらつきは少なかった。

一方、 T_{dw} は、No.20 から No.12 にかけて次第に厚くなり、No.12 から No.6 まではほぼ一定であったが、その間に最大値を示した (**Fig. 3.7b**)。そして No.6 から No.1 にかけて次第に薄くなった。 D_{rc} の変化と異なり、個体の違いや年輪幅の違いによって T_{dw} の値にはばらつきがあった。

また、 P_{cw} は、No.20 から次第に大きくなり、No.12 から No.8 の間と No.1 の 2 箇所に明らかに高い仮道管が出現していた (**Fig. 3.7c**)。 P_{cw} についても個体による差があるが、このような傾向は T_{dw} によるものとする。

そこで同一年輪を測定した X 線ネガ像の濃度値と P_{cw} の放射方向の変化を示した (**Fig. 3.8**)。ともに似た曲線が得られたが、特に年輪界における P_{cw} の高い (D_{rc} が小さい) 仮道管が P_{cw} では確認できるのに対してネガフィルムの濃度値では明瞭でなかった。その原因として、年輪界が直線ではないため、また、年輪界付近の P_{cw} の高い (D_{rc} が小さい) 仮道管は 1 から 2 細胞しかないため、晩材部と翌年の早材部の仮道管を同時に測定してしまうことが考えられる。つまり、アカマツの D_{max} は晩材部に出現するが、その位置は年輪内最終ではなく晩材部の中でも比較的早い段階から中盤にかけて出現する材密度であることがわかった。一方、 D_{min} は、他の針葉樹と同様に早材部前半 (D_{rc} の減少や細胞壁の厚壁化が始まる前) の広い範囲で出現していた (**Fig. 3.8**)。

b) サワグルミ

b-1) 測定方法の検討

方法 A によって得た細胞内腔面積の年輪内平均値 ($A_{lu-mean-A}$) と方法 B によって得た細胞内腔面積の年輪内平均値 ($A_{lu-mean-B}$) を年輪ごとに測定し比較した (**Fig. 3.9**)。方法 A では放射方向に並んでいる細胞を選択するのに対して、方法 B では散在する A_{lu} が小さい細胞も測定できるため、方法 B で得られた $A_{lu-mean-B}$ は、方法 A で得られた $A_{lu-mean-A}$ よりも小さな値となっていた。しかし、 $A_{lu-mean-A}$ と $A_{lu-mean-B}$ との間には有意水準 1 % で有意な正の相関関係が認められた。このことから、方法 A でも各年輪の細胞寸法を把握できると考えた。

b-2) 年輪幅および年輪内平均密度を決定する因子

Table 3.3 に W_{ar} および D_{mean} と年輪内細胞数 ($N_{cell-ar}$) や年輪内平均細胞径 ($D_{rc-mean}$)、年輪内平均細胞内腔径 ($D_{lu-mean}$)、年輪内平均細胞内腔面積 ($A_{lu-mean}$)、年輪内平均隣接 2 細胞壁厚 ($T_{dw-mean}$)、年輪内平均細胞壁率 ($P_{cw-mean}$) との関係を示した。

W_{ar} では、全ての個体において有意水準 1 % で有意な相関係数を示したのは木部繊維の $N_{cell-ar}$ のみであり、正の関係であった。 W_{ar} と $N_{cell-ar}$ との関係は個体による違いが少なかった (**Fig. 3.10**)。つまり、アカマツの場合と同様にサワグルミにおいても W_{ar} は主に $N_{cell-ar}$ によって広狭が決まることがわかった。

一方、 D_{mean} では、全ての個体において有意水準 5 % 以上で有意な相関係数を示したのは木部繊維の $P_{cw-mean}$ のみであった (**Table 3.3, Fig. 3.11**)。有意水準 5 % 以上で有意な関係のみに回帰線を付けた。他の細胞寸法は個体によって相関関係が認められないものがあつた。このことから、サワグルミの D_{mean} は、当然、 $P_{cw-mean}$ と相関関係があるものの、 $P_{cw-mean}$ の算出に用いる $D_{rc-mean}$ と $T_{dw-mean}$ のどちらがより $P_{cw-mean}$ に影響を及ぼしているかは不明であつた。

b-3) 年輪内最大密度や年輪内最小密度の出現位置

同一年輪を測定した X 線ネガ像の濃度値と細胞壁率 (P_{cw}) の放射方向の変化を示した (Fig. 3.12)。また、既に Fig. 2.6 に X 線ネガ像とその濃度値について示した。X 線ネガ像の濃度値において、 D_{min} は 1 年輪内の始めに出現していた。 P_{cw} ではその傾向が明瞭ではなかった。この原因として今回は道管を測定していないことが考えられる。サワグルミの管孔の直径は 1 年輪内の始め大きく、次第に小さくなる傾向を持っている。そのため、道管も含めた P_{cw} は X 線ネガ像の濃度値と同様な傾向を持つと考えられる。

一方、 D_{max} は 1 年輪内の最終部に出現することがわかる。Fig. 3.12 の X 線ネガ像の濃度値では最終部の高濃度部が明確ではないが、その理由は濃度測定時に測定幅を広く取ったためであり、最終部の高濃度部以外の部分と平均化されたためだと考えられる。Fig. 2.6 では最終部の高濃度部が明瞭である。

Table 3.2. アカマツの樹木年輪変数と組織構造との関係

	個体番号	$N_{\text{cell-ar}}$	$D_{\text{rc-mean}}$ (μm)	$D_{\text{lu-mean}}$ (μm)	$A_{\text{lu-mean}}$ (μm^2)	$T_{\text{dw-mean}}$ (μm)	$P_{\text{cw-mean}}$
W_{ar} (mm)	PIDE 15	0.97**	0.58*	0.41	0.26	0.36	-0.23
	PIDE 16	0.91**	0.17	0.05	-0.04	0.36	0.11
	PIDE 18	0.98**	0.19	-0.03	-0.20	0.51*	0.16
	PIDE 19	0.88**	0.31	0.24	0.15	0.11	0.19
D_{mean} (g/cm^3)	PIDE 15	0.22	-0.56*	-0.72**	-0.47	0.58*	0.63**
	PIDE 16	0.64**	-0.70**	-0.74**	-0.76**	0.71**	0.71**
	PIDE 18	0.51*	-0.48*	-0.71**	-0.72**	0.62**	0.65**
	PIDE 19	0.44	-0.68**	-0.80**	-0.75**	0.80**	0.80**

凡 例：PIDE：アカマツ， W_{ar} ：年輪幅， D_{mean} ：年輪内平均密度， $N_{\text{cell-ar}}$ ：年輪内細胞数， $D_{\text{rc-mean}}$ ：年輪内平均細胞径， $D_{\text{lu-mean}}$ ：年輪内平均細胞内腔径， $A_{\text{lu-mean}}$ ：年輪内平均細胞内腔面積， $T_{\text{dw-mean}}$ ：年輪内平均隣接 2 細胞壁厚， $P_{\text{cw-mean}}$ ：年輪内平均細胞壁率

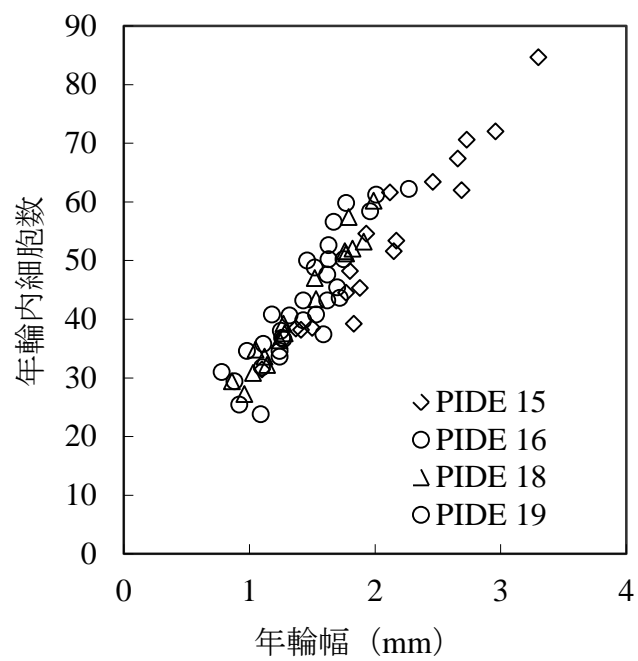


Fig. 3.5. アカマツの年輪幅と年輪内細胞数との関係

凡 例 : **Table 3.1** を参照

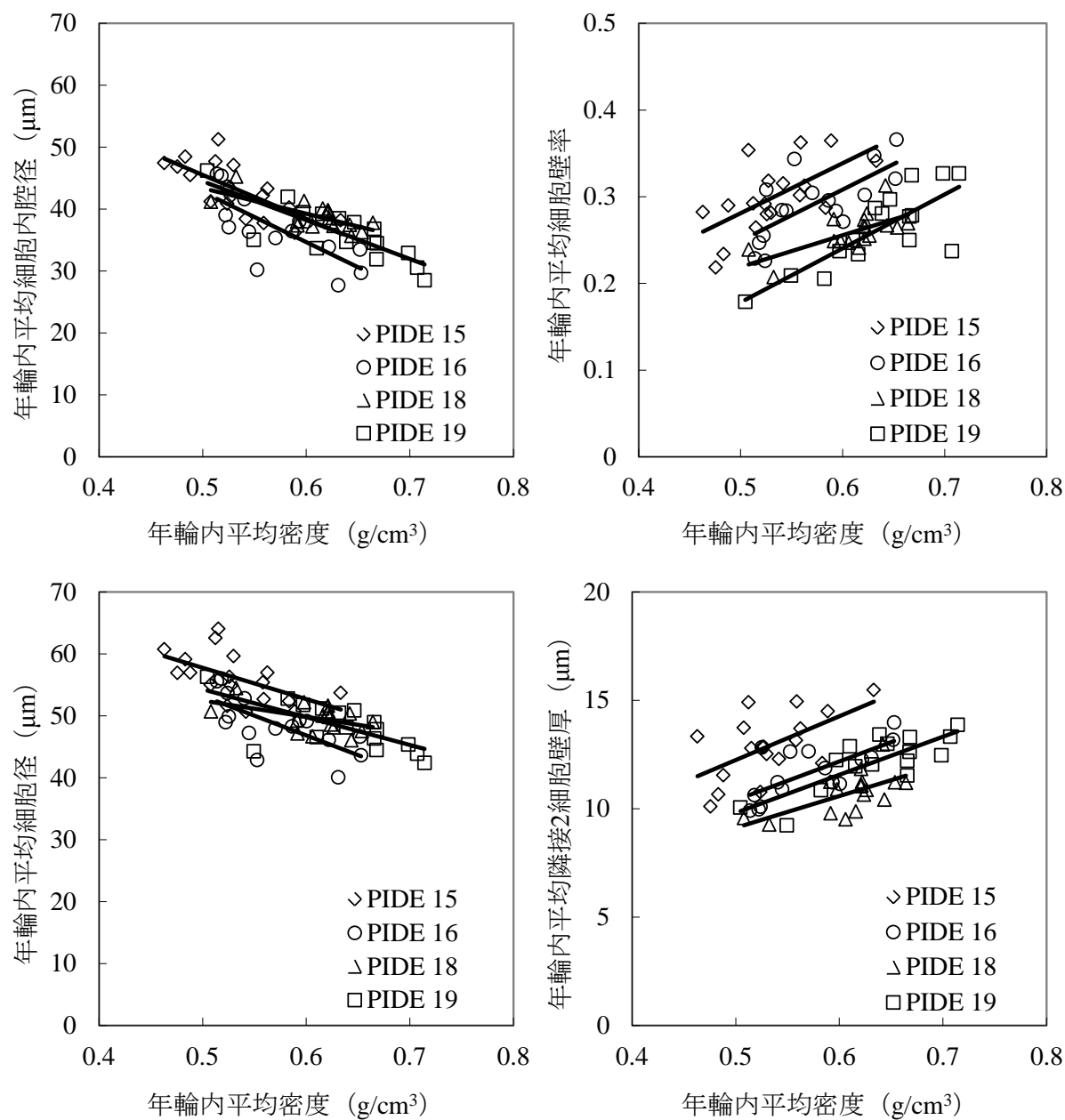
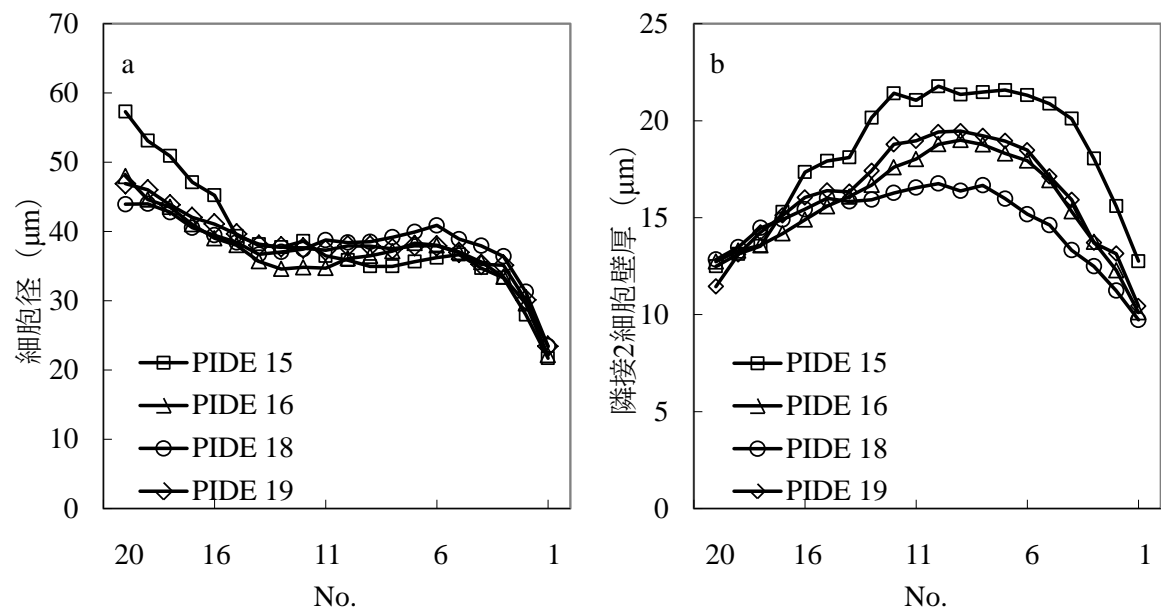


Fig. 3.6. アカマツの年輪内平均密度と仮道管寸法の年輪内平均との関係

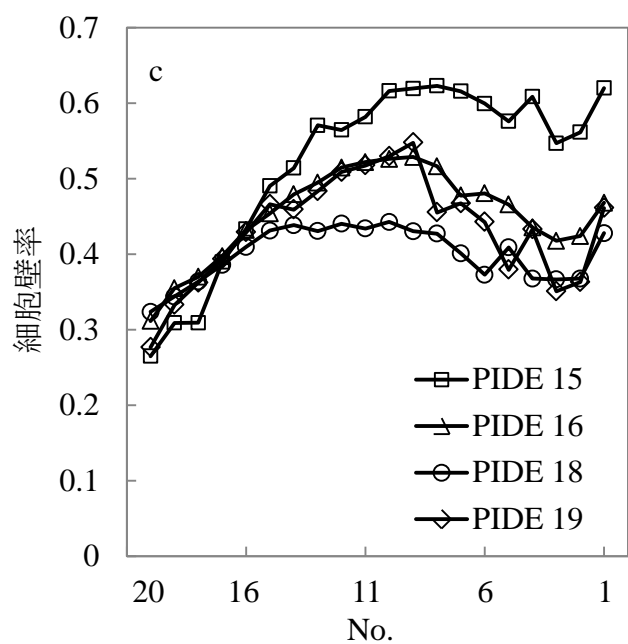
凡 例 : **Table 3.1** を参照



1年輪内最終に形成された細胞からの番号 1年輪内最終に形成された細胞からの番号

Fig. 3.7. アカマツの晩材部における仮道管の寸法変化

凡 例 : **Table 3.1** を参照, a : 細胞径, b : 隣接 2 細胞壁厚



1年輪内最終に形成された細胞からの番号

Fig. 3.7. アカマツの晩材部における仮道管の寸法変化（つづき）

凡 例 : **Table 3.1** を参照, c : 細胞壁率

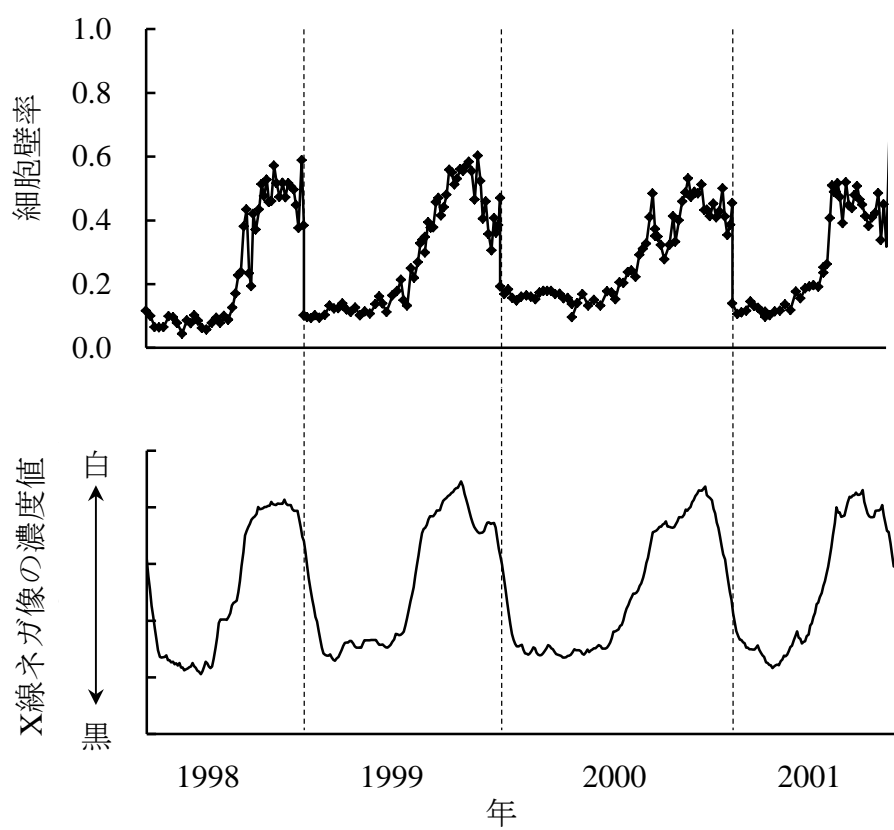


Fig. 3.8. X 線ネガ像の濃度値と細胞壁率の放射方向の変動の一例（アカマツ）

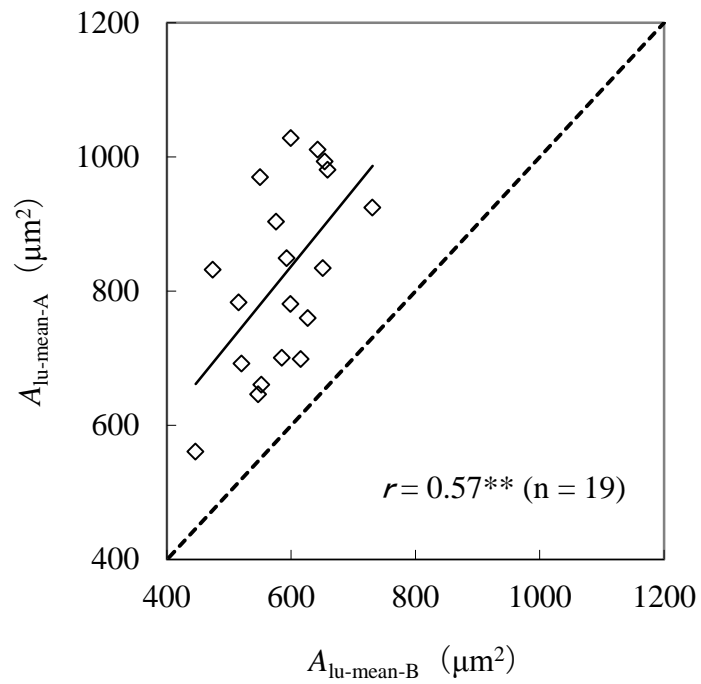


Fig. 3.9. 異なる測定方法による年輪内平均内腔面積の違い（サワグルミ）

凡例： $A_{lu-mean-A}$ ：方法 A によって得られた年輪内平均細胞内腔面積， $A_{lu-mean-B}$ ：
方法 B によって得られた年輪内平均細胞内腔面積

Table 3.3. サワグルミの樹木年輪変数と組織構造との関係

	個体番号	$N_{\text{cell-ar}}$	$D_{\text{rc-mean}}$ (μm)	$D_{\text{lu-mean}}$ (μm)	$A_{\text{lu-mean}}$ (μm^2)	$T_{\text{dw-mean}}$ (μm)	$P_{\text{cw-mean}}$
W_{ar} (mm)	PTRH 11	0.80**	-0.17	-0.22	-0.19	0.42	0.48
	PTRH 12	0.96**	-0.01	-0.04	0.15	0.27	0.04
	PTRH 17	0.99**	0.57	n.d.	0.38	0.39	0.09
	PTRH 22	0.94**	0.31	-0.19	-0.23	0.60**	0.45
D_{mean} (g/cm^3)	PTRH 11	0.69**	-0.56*	-0.60*	-0.63*	0.49	0.75**
	PTRH 12	0.17	-0.48	-0.55*	-0.49	0.47	0.74**
	PTRH 17	0.10	-0.35	n.d.	-0.81*	0.56	0.89*
	PTRH 22	0.69**	0.04	-0.40	-0.49**	0.57**	0.62**

凡 例 : PTRH : サワグルミ, W_{ar} : 年輪幅, D_{mean} : 年輪内平均密度, $N_{\text{cell-ar}}$: 年輪内細胞数, $D_{\text{rc-mean}}$: 年輪内平均細胞径, $D_{\text{lu-mean}}$: 年輪内平均細胞内腔径, $A_{\text{lu-mean}}$: 年輪内平均細胞内腔面積, $T_{\text{dw-mean}}$: 年輪内平均隣接 2 細胞壁厚, $P_{\text{cw-mean}}$: 年輪内平均細胞壁率, n.d. : データなし

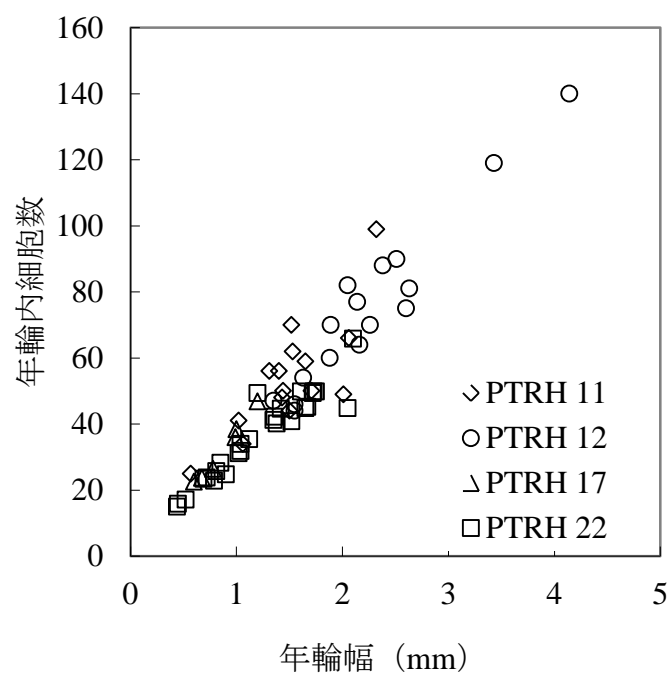


Fig. 3.10. サワグルミの年輪幅と細胞数との関係

凡 例 : **Table 3.3** を参照

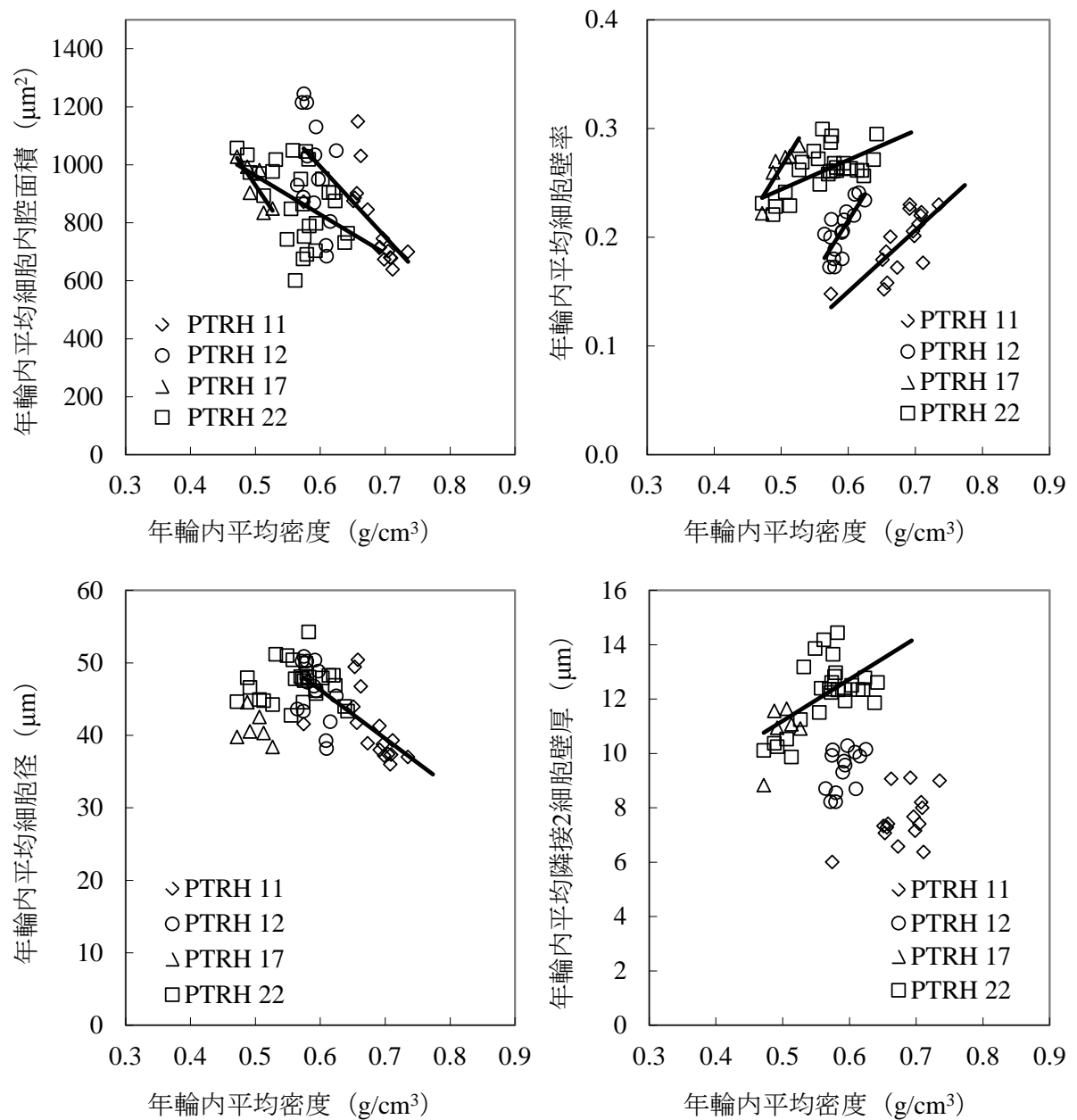


Fig. 3.11. サワグルミの年輪内平均密度と木部繊維寸法の年輪内平均との関係

凡 例 : **Table 3.3** を参照

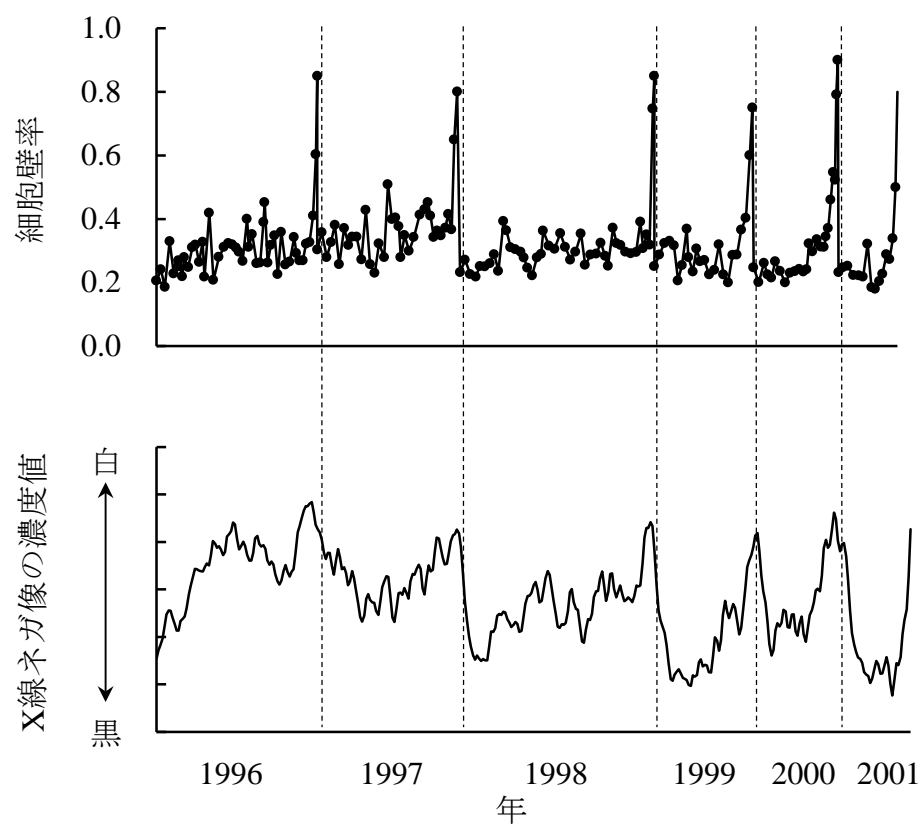


Fig. 3.12. X 線ネガ像の濃度値と細胞壁率の放射方向の変動の一例（サワグルミ）

3.1.4 結論

本節では、アカマツとサワグルミを対象として「樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係」を検討することとした。

その結果、1) 一般に、針葉樹の D_{\max} は晩材最終部に出現するが、アカマツの D_{\max} は晩材部の中でも比較的早い段階から中盤にかけて出現することがわかった。また、 D_{\min} は他の針葉樹と同様に早材部の中でも前半の広範囲に出現することがわかった。

2) サワグルミの D_{\min} は1年輪内の始めに、 D_{\max} は1年輪内の最終部に出現することがわかった。

3) W_{ar} について、アカマツとサワグルミともに、 W_{ar} は主に細胞数に起因することがわかった。

4) D_{mean} は細胞径と隣接2細胞壁厚の両方によって影響を受けていたが、アカマツの D_{mean} は、より隣接2細胞壁厚による影響が大きいことがわかった。一方、サワグルミの D_{mean} は、どちらがより影響を及ぼしているかは不明であった。

3.2 木部形成の季節変化

3.2.1 はじめに

樹木年輪－気候関係の検討に用いる気候変数は、主に月別の統計値を用いられる。そして、樹木年輪－気候関係において、有意な関係性が認められるのは木部形成を行っている時期の月であることが多い（安江ら 1994 ; Fujiwara et al. 1999）。しかしながら、供試樹木の生育地において、木部形成の季節変化を把握した上で樹木年輪－気候関係を考察した報告（安江ら 1994）は少ない。

木部形成を季節的に観察した報告として、本研究対象地域から約 25 km 北西の秩父地域に生育するモミでは、4 月中旬から細胞分裂が再開し、6 月末までには 1 年間に形成される新生仮道管総数の 80 %が形成され、6 月下旬以降に形成された新生仮道管は晩材細胞となり、7 月には多数の新生仮道管で二次壁の堆積が行われている（島地 1979）、とある。本研究対象地域から約 100 km 東に位置する茨城県つくば市に生育するスギと茨城県千代田に生育するヒノキでは、ともに 4 月初めには細胞分裂が再開し、4 月から 5 月で急増し、6 月下旬から晩材が形成され、停止時期はスギでは 10 月中旬、ヒノキでは 11 月初旬であった（山下ら 2006）、と報告されている。また、本研究地域に生育するサワグルミにおいて、形成層帯の細胞数は 5 月には増加し始め、6 月初旬に最も多く、その後だんだんと減少すること、また、新生木部繊維の数は 6 月初旬から 7 月下旬までに急激に増加し、その後 10 月にかけてわずかに増加し続けていた（青山 2004）、と報告されている。本研究対象地域から約 200 km 北西に離れるが岐阜県荘川村に生育するミズナラを含む落葉広葉樹 19 樹種について、環孔材の樹種では 5 月上旬までの比較的早い時期に肥大成長の開始が集中したのに対して、散孔材の樹種の開始時期はいずれも遅く 5 月上旬から 6 月中旬にみられたこと（小見山 1991）、また、成長速度が極大となる時期は環孔材の樹種と散孔材の樹種とでは環孔材の樹種の方が早い、ともに 6 月から 7 月であったことが観測されてい

る（小見山ら 1987）。このような環孔材と散孔材の違いは，Suzuki ら（1996）も報告している。

そこで本節では，定期的に採取した形成層付近の試料から新生仮道管の分裂数とその状態を観察することで「木部形成の季節変化」について明らかにした。また，特に，材密度に影響を及ぼす細胞壁厚に注目して，その厚さの季節変化を把握した。試料採取は供試樹種である 7 樹種全てについて行ったが，本節ではアカマツとモミを対象とした。他の樹種について，試料採取は行っているが，測定はまだ行っていない。

3.2.2 方法

a) 供試樹木

第 2 章で樹木年輪クロノロジーの構築に用いた供試樹木の中からアカマツとモミのそれぞれ 4 個体を選び試料を採取した。採取は，2002 年の 4/17，4/25，5/1，5/8，5/22，6/5，6/19，7/3，7/17，7/31，8/28，9/25，10/23 の計 14 回行った。5/22 まではほぼ 7 日間隔で，それ以降はほぼ 14 日間隔で採取日を決めた。供試樹木の概要を **Table 3.4** に示した。

試料の採取には，内径 2.5 mm のインクリメントパンチャー（Swiss Federal Research Institute WSL 製；Forster et.al. 2000；**Fig. 3.13**）を用い，師部と木部を含む長さ約 1 cm のコア試料を採取した（**Fig. 3.14**）。採取位置は胸高部位とし，傷害組織の形成を避けるために，互いに約 10 cm 以上離れた。試料は採取後，直ちに 3 % グルタルアルデヒドで固定した。

b) プレパラートの作製

形成層帯の横断面切片を採取するために各試料をメタクリレート系樹脂（Kulzer 社製のテクノビット；黒岩 1992）で包埋した。包埋方法は小嶋（2002）

の報告を参考にした。包埋するために、まずコア試料から外樹皮と 2000 年以前に形成された木部を除くようにトリミングし、3 時間水洗した。その後、70 % エタノール (3 時間)、80 % エタノール (3 時間)、90 % エタノール (3 時間)、95 % エタノール (3 時間)、100 % エタノール (24 時間、1 回目)、100 % エタノール (24 時間、2 回目)、100 % エタノール (24 時間、3 回目) のエタノールシリーズに浸漬して脱水した。

つづいて、エタノールと予備浸漬液 (テクノビット 7100 主剤 + 硬化剤 I) の混合液を 5 : 1 (エタノール : 予備浸漬液、24 時間)、3 : 2 (12 時間)、2 : 3 (12 時間)、1 : 5 (12 時間)、全量 (予備浸漬液、24 時間)、全量 (24 時間)、全量 (24 時間) に浸漬してエタノールから予備浸漬液に置換した (冷蔵庫にて保管)。

次に、8 時間以上前に混合液 (予備浸漬液 + 硬化剤 II) で底にベースを作っておいたビームカプセルに試料を入れてから、混合液をビームカプセルに流し込み、包埋し、冷蔵庫で保管した (24 時間)。その後、室温に戻し、ドラフト内でテクノビット 3040 をビームカプセルに流し込むことで硬化 (重合) させた。

硬化後、包埋試料をビームカプセルから取り出し、滑走式マイクロームで厚さ 10 μm の横断面切片を採取し、永久プレパラートとした。横断面切片の採取は、包埋試料を台木に瞬間接着剤で固定して行った。

c) 測定

測定は、1 年輪につき仮道管放射列を 5 列選択し、偏光顕微鏡直交ニコル下で複屈折が確認される、つまり二次壁が存在する仮道管を対象として仮道管の数とその接線壁厚を測定した。仮道管数の測定は、偏光顕微鏡下で行い、仮道管接線壁厚の測定は、光学顕微鏡に取り付けたデジタイザ (グラフテック製、KD4620) で行った (精度 : 0.2 μm)。採取位置による肥大成長量の差異を補正するために 2001 年に形成された仮道管の数も測定した。

Table 3.4. 供試樹木の概要

個体番号	アカマツ				モミ			
	1	2	3	4	1	2	3	4
胸高直径 (cm)	41.4	57.3	44.6	57.3	52.5	60.5	66.8	57.3
平均年輪幅 (mm)	4.37	3.04	2.70	3.44	1.88	1.62	1.90	1.39

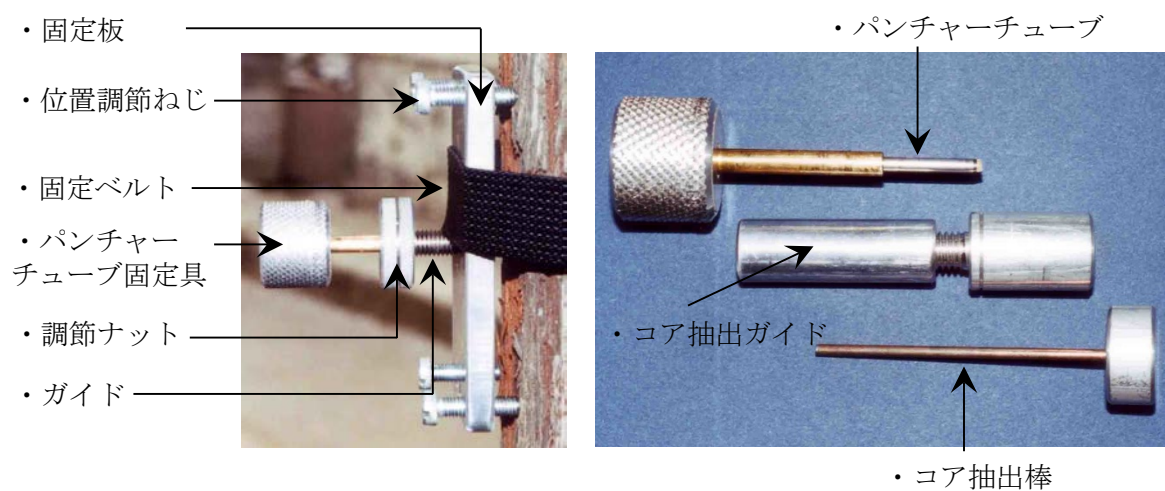


Fig. 3.13. インクリメントパンチャー

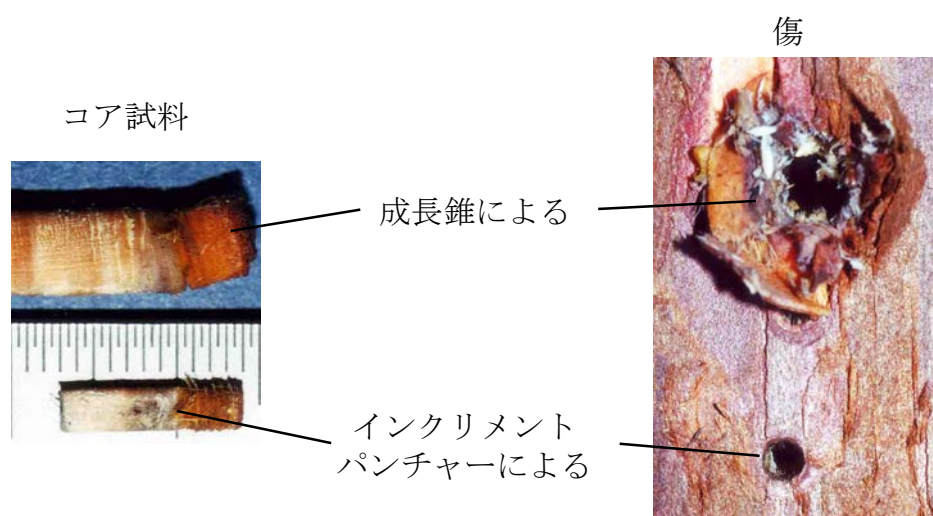


Fig. 3.14. コア試料と採取によって生じた傷

3.2.3 結果と考察

a) 新生仮道管の数の季節変化

採取を開始した4月17日におけるアカマツの形成層帯付近の光学顕微鏡写真と偏光顕微鏡写真を **Fig. 3.15a** と **Fig. 3.15b** に示した。形成層帯の細胞よりも細胞径の大きい細胞 (ex) が確認されたことから、すでに細胞の分裂・拡大は行われ始めていたことがわかる。しかしながら、その細胞は、偏光顕微鏡下で壁が複屈折を呈していなかった。その状態は5月1日まで（アカマツの1個体を除く）続いた。5月1日に採取したモミの形成層帯付近の光学顕微鏡写真と偏光顕微鏡写真を **Fig. 3.16a** と **Fig. 3.16b** に示した。

5月8日に採取した試料では、ほぼすべての個体において偏光顕微鏡下で壁が複屈折を呈した細胞が観察できた。5月8日に採取した試料ではないがその様子をアカマツについては **Fig. 3.15c** と **Fig. 3.15d** に、モミについては **Fig. 3.16c** と **Fig. 3.16d** に示した。偏光顕微鏡下で壁が複屈折を呈した、つまり、二次壁の堆積を伴った新生仮道管数の季節変化を **Fig. 3.17** に示した。5月8日に採取した試料以降7月31日に採取した試料まで、二次壁の堆積を伴った新生仮道管の数は急増した。7月31日までに、アカマツで1年輪内の約70%，モミでは約90%が形成されていた。そして、9月25日までに1年輪内のほぼ全ての新生仮道管が形成されていた。

b) 新生仮道管の壁厚の季節変化

新生仮道管の壁厚の季節変化について、アカマツについては **Fig. 3.18** に、モミについては **Fig. 3.19** に示した。採取位置により成長量に違いがあること、特にモミには傷害樹脂道が形成されてしまったことなどにより、ばらつきがあった。形成層帯での細胞分裂が停止したと考えられる10月23日に採取した試料の細胞数を当年形成された全細胞数（100%）とした場合、7月3日に採取した

試料では、全細胞数の約 60 %に位置する新生仮道管が形成されていた。その中で全細胞数の約 30 %までの位置にある細胞の壁厚は 3 μm ほどで一定であり、それ以降 40 %まで壁厚は減少し 1 μm ほどの厚さで一定となっていた。また、7 月 31 日に採取した試料では、全細胞数の約 40~50 %に位置する細胞の壁厚が 4 μm よりも厚くなっていた。一般に、早材部の壁厚はアカマツで 2.5~3.0 μm 、モミで 2.0~3.0 μm とされている（島地 1976）。つまり、6 月中には早材部にあたる細胞のほとんどが二次壁の形成を完了しつつあり、また、二次壁の形成はほとんど行われていないが晩材部となりうる仮道管もわずかに形成されていることがわかる。7 月 31 日以降に採取した試料では、当年形成された全細胞数の約 40 %以降で明らかに早材部よりも厚壁の細胞が確認できた。壁厚が徐々に厚くなり、10 月 23 日に採取した試料では、アカマツとモミともに壁厚は 8.0 μm となっていた。一般に、晩材部の壁厚はアカマツで 3.0~8.0 μm 、モミで 4.0~8.0 μm とされている（島地 1976）。一方で、10 月 23 日に採取した試料において、晩材後半部の壁厚がまだ薄く、最終の数細胞は早材部の細胞よりも薄壁であった。10 月 23 日に採取した試料の新生仮道管および同試料の前年（2001 年）に形成が完成している年輪界の光学顕微鏡写真と偏光顕微鏡写真を、アカマツについては **Fig. 3.20** に、モミについては **Fig. 3.21** に示した。10 月 23 日に採取した試料の形成層帯の細胞は、偏光顕微鏡下で、壁が複屈折を呈した細胞と接していたことから、細胞の分裂や拡大は行われていないことがわかった。一方、前年（2001 年）に完成している年輪界の晩材仮道管と比較すると、10 月 23 日に採取した試料の年輪界の晩材仮道管は、内容物が含まれており、かつ、壁が明らかに薄かった。つまり、10 月 23 日においても晩材最終部の細胞は二次壁を形成は継続していることがわかった。

c) 樹木年輪変数と木部形成の季節変化との関係

第 3.1 節と第 3.2 節の結果と既往の研究の結果を合わせて各樹種の樹木年輪変数が持つ基礎情報、つまり、樹木年輪変数と木部形成の季節変化との関係を考察し、**Fig. 3.22** にまとめた。

まず、針葉樹の幅に関する樹木年輪変数について、幅に関する樹木年輪変数は主に細胞数に起因すると考えられる。そこで、細胞分裂の季節変化を見ると、アカマツとモミにおいて細胞分裂は 4 月下旬から再開し、6 月下旬に早晚材の移行があり、細胞分裂の停止時期は明確ではないが 9 月下旬までに細胞分裂はほぼ完了していると考えられた。一方、マツ科の樹種よりもヒノキ科の樹種の方が早い時期から形成層活動を再開する可能性がある（島地 1979；山下ら 2006）。また、本研究で供試樹種として選択した針葉樹 5 樹種の開花時期を見ると、スギとヒノキが 3 月から 4 月と早く、マツ科 3 樹種が 4 月から 5 月となっており（佐竹ら 1989；平井 1996）、約 1 ヶ月の時期のずれがあった。このようなことから、アカマツとモミの W_{ew} は 4 月下旬から 6 月下旬、 W_{lw} は 6 月下旬から少なくとも 10 月初めまでの気候に影響を受けている可能性がある。一方、スギとヒノキの W_{ew} は 4 月上旬から影響を受け始めると予想した。ツガはモミと同じと考えた。

一方、針葉樹の材密度に関する樹木年輪変数について、材密度に関する樹木年輪変数は細胞壁率に起因すると考えられる。そこで、細胞壁の堆積について季節変化を見ると、アカマツとモミにおいて細胞壁の堆積は 5 月下旬から再開し、7 月中旬には晩材部にあたる仮道管の細胞壁にも堆積が始まった。その後 10 月下旬においても晩材部最終部にあたる仮道管の細胞壁は堆積が完了していなかった。このようなことから、 D_{ew} は 5 月中旬から 7 月中旬、 D_{lw} は 7 月中旬から 10 月末までの気候に影響を受けている可能性がある。そして、早材部の前半に位置する D_{min} は 5 月中旬から 6 月中旬、晩材部の最終部に位置する D_{max} は

9月中旬から10月末までの気候に影響を受けている可能性がある。このことはアカマツを除く4樹種の針葉樹に共通すると考えた。一方、アカマツの D_{\max} は W_{lw} の中でも前半に出現するため、その時期よりも少し早い9月上旬から10月上旬までの時期の気候に影響を受けている可能性があると予想した。

次に、サワグルミについて、5月中旬から細胞分裂が再開し、10月にかけて新生木部は形成されていた（青山 2002）。そして、年輪最終部に小径で厚壁な木部繊維が数細胞形成されていた。つまり、サワグルミの W_{ew} は5月中旬から8月中旬、 W_{lw} は8月中旬から9月中旬までの気候に影響を受けている可能性がある。また、 D_{lw} は1年輪内の狭い範囲の最終部に位置するため、 D_{ew} は5月下旬から9月上旬、 D_{lw} は9月中旬から10月中旬までの気候に影響を受けている可能性がある。そして D_{\min} は1年輪内の始めに位置するため5月下旬から7月中旬、 D_{\max} は D_{lw} とほぼ同じ位置にあるため9月中旬から10月中旬までの気候に影響を受けている可能性があると予想した。

また、ミズナラについて、展葉の時期を確認したところ2002年の4月17日には開始していた（**Fig. 3.23**）。この時、サワグルミも展葉を開始していた。散孔材の樹種の肥大成長は展葉よりも遅く始まり、環孔材の樹種の肥大成長は展葉よりも早く始まることが知られている（小見山 1991；小見山ら 1987；Suzuki et al. 1996）。また、同じ地域に生育する場合、成長速度が極大となる時期は環孔材の樹種と散孔材の樹種とでは環孔材の樹種の方が早い、ともに6月から7月であったことが観測されている（小見山ら 1987）。ミズナラなど環孔材の樹種の孔圏部に位置する道管は越冬細胞に由来すると考えられる（今川ら 1972）。その越冬細胞が拡大し始め、二次壁を形成する時期として、コナラでは開芽とほぼ同じ時期であったと報告されている（工藤ら 2011）。ミズナラの孔圏部の道管は1から3列ほどであり（佐伯 1982；**Fig. 2.6b**）、孔圏部と孔圏外部との密度差は大きく、また、 D_{\max} が孔圏外部の始めに出現する場合が多い（深沢ら

1972 ; Mothe et al. 1998, **Fig. 2.6c**)。また、岐阜県に生育するミズナラの肥大成長をデンドロメーターで計測した報告によると、肥大成長の休止は 9 月末であった (小見山ら 1991)。つまり、ミズナラの W_{ew} は 4 月上旬から 5 月上旬、 W_{lw} は 5 月上旬から 9 月下旬までの気候に影響を受けている可能性がある。そして、 D_{ew} は 4 月中旬から 5 月中旬、 D_{lw} は 5 月中旬から 10 月中旬までの気候に影響を受けている可能性がある。そして D_{min} は 4 月中旬から 5 月中旬、 D_{max} は 6 月上旬から 7 月中旬までの気候に影響を受けている可能性があると予想した。

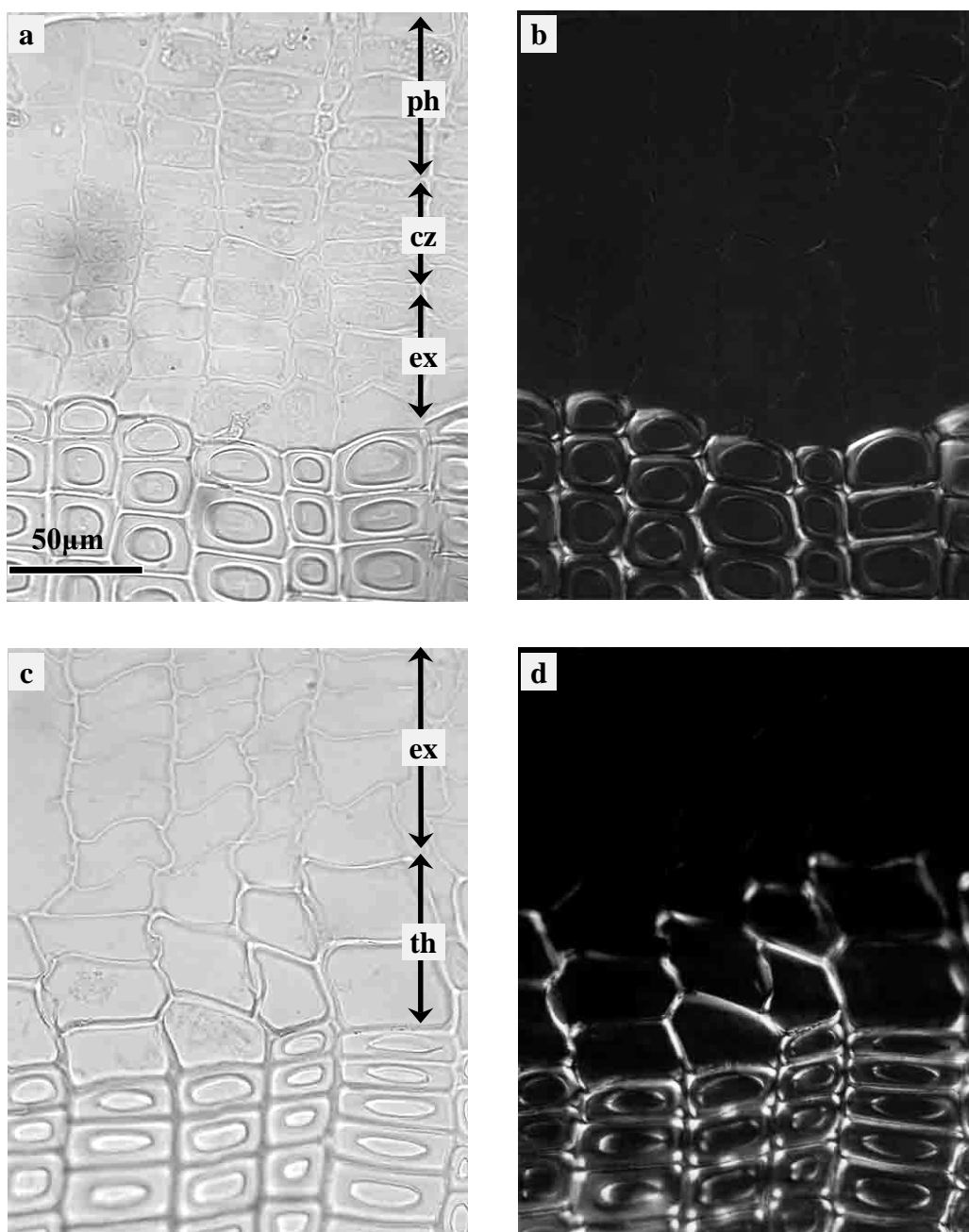


Fig. 3.15. アカマツにおける新生細胞の横断面での様子

凡 例 : a, c : 光学顕微鏡写真, b, d : 偏光顕微鏡写真, ph : 師部細胞, cz :

形成層帯の細胞, ex : 拡大帯の細胞, th : 二次壁肥厚帯の細胞

注 : a と b は 4 月 17 日に, c と d は 6 月 5 日に採取した試料である。

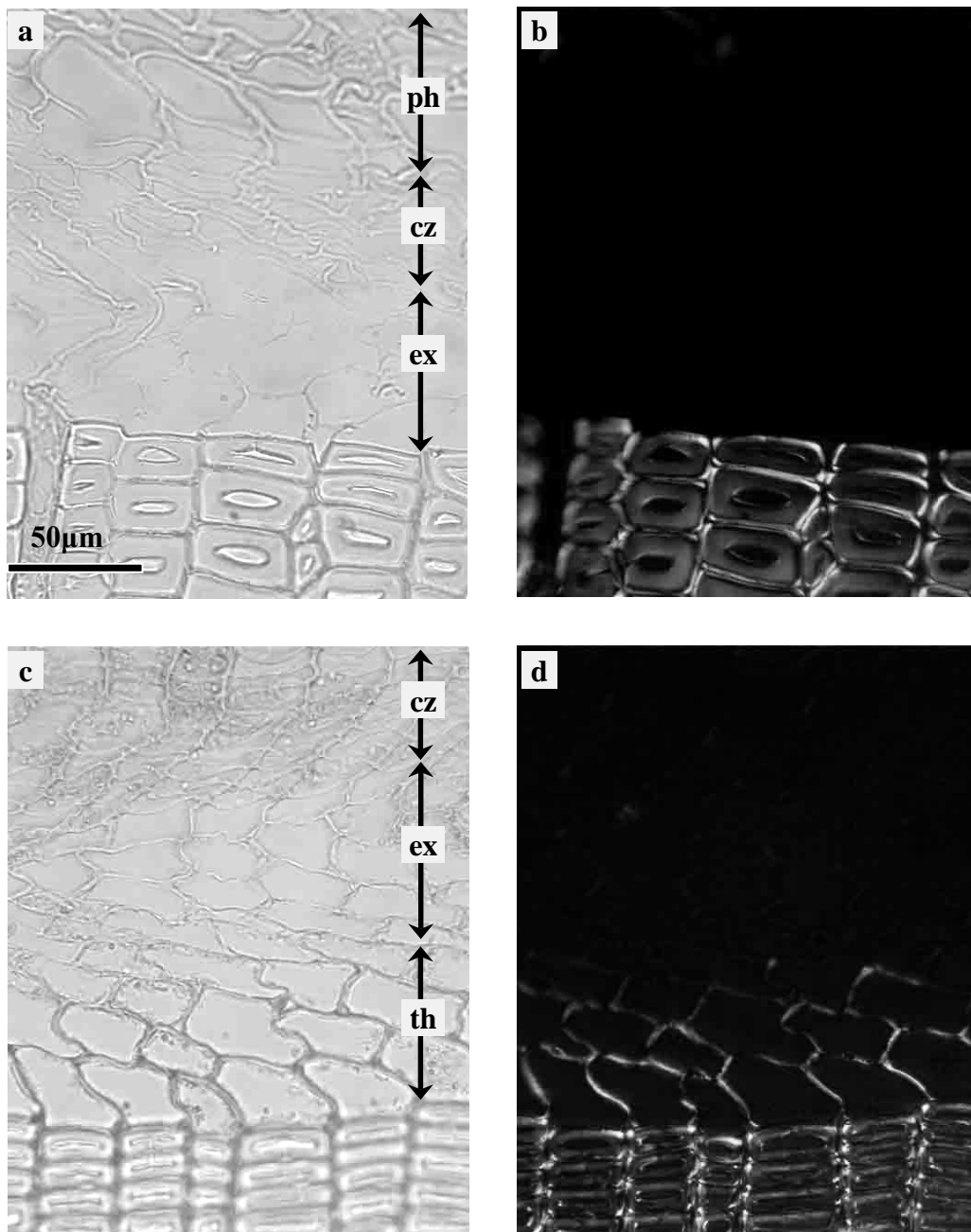


Fig. 3.16. モミにおける新生細胞の横断面での様子

凡 例 : **Fig. 3.15** を参照

注 : a と b は 5 月 1 日に, c と d は 5 月 22 日に採取した試料である。

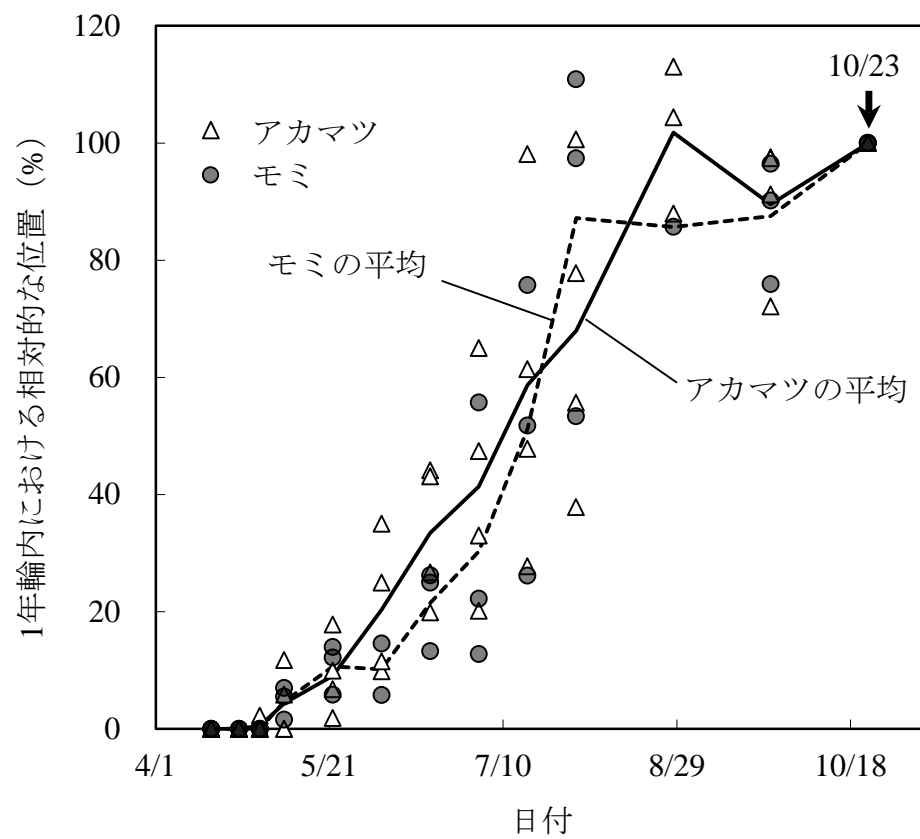


Fig. 3.17. 二次壁の堆積を伴った新生仮道管数の季節変化

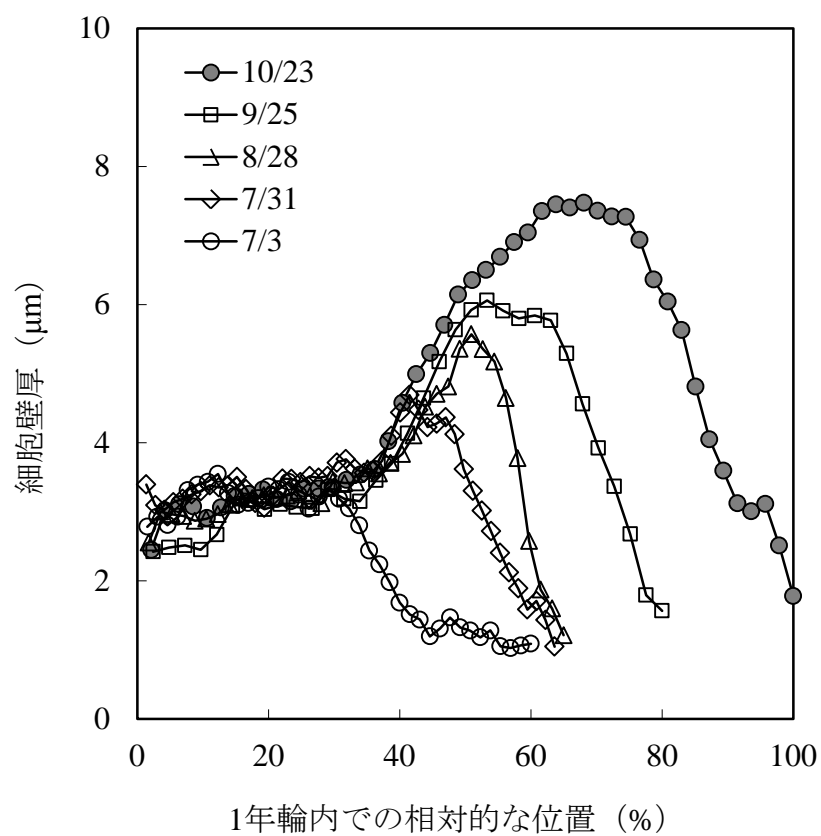


Fig. 3.18. アカマツにおける細胞壁形成の季節変化

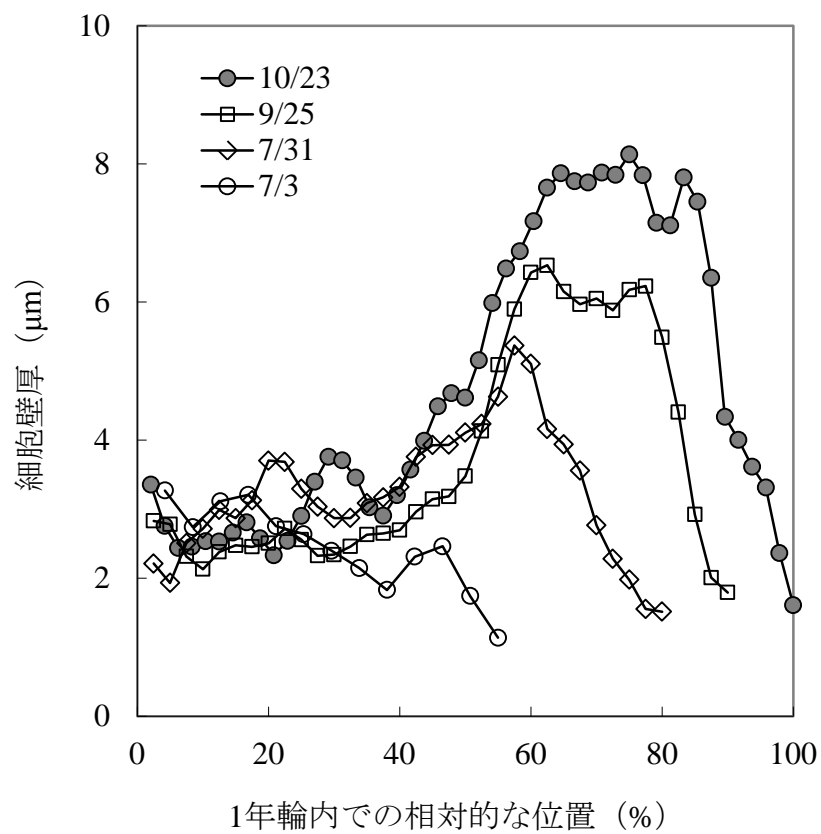


Fig. 3.19. モミにおける細胞壁形成の季節変化

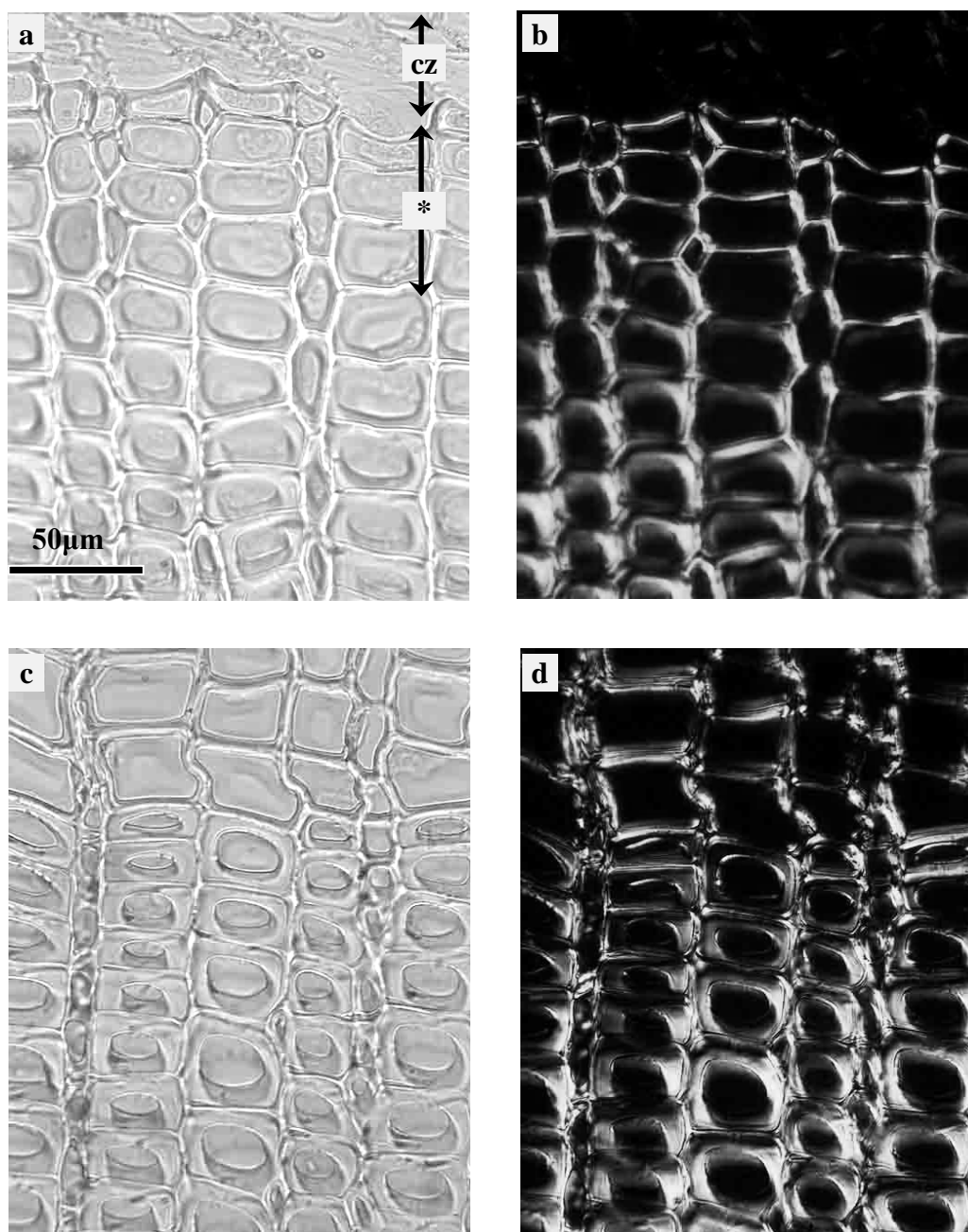


Fig. 3.20. アカマツの新生細胞の横断面での様子

凡 例 : a, c : 光学顕微鏡写真, b, d : 偏光顕微鏡写真, cz : 形成層帯の細胞,
* : 二次壁形成が完了していない細胞

注 : 10月23日に採取した試料であるが, aとbは当年形成部分, cとdは
前年(2001年)形成部分の年輪界付近である。

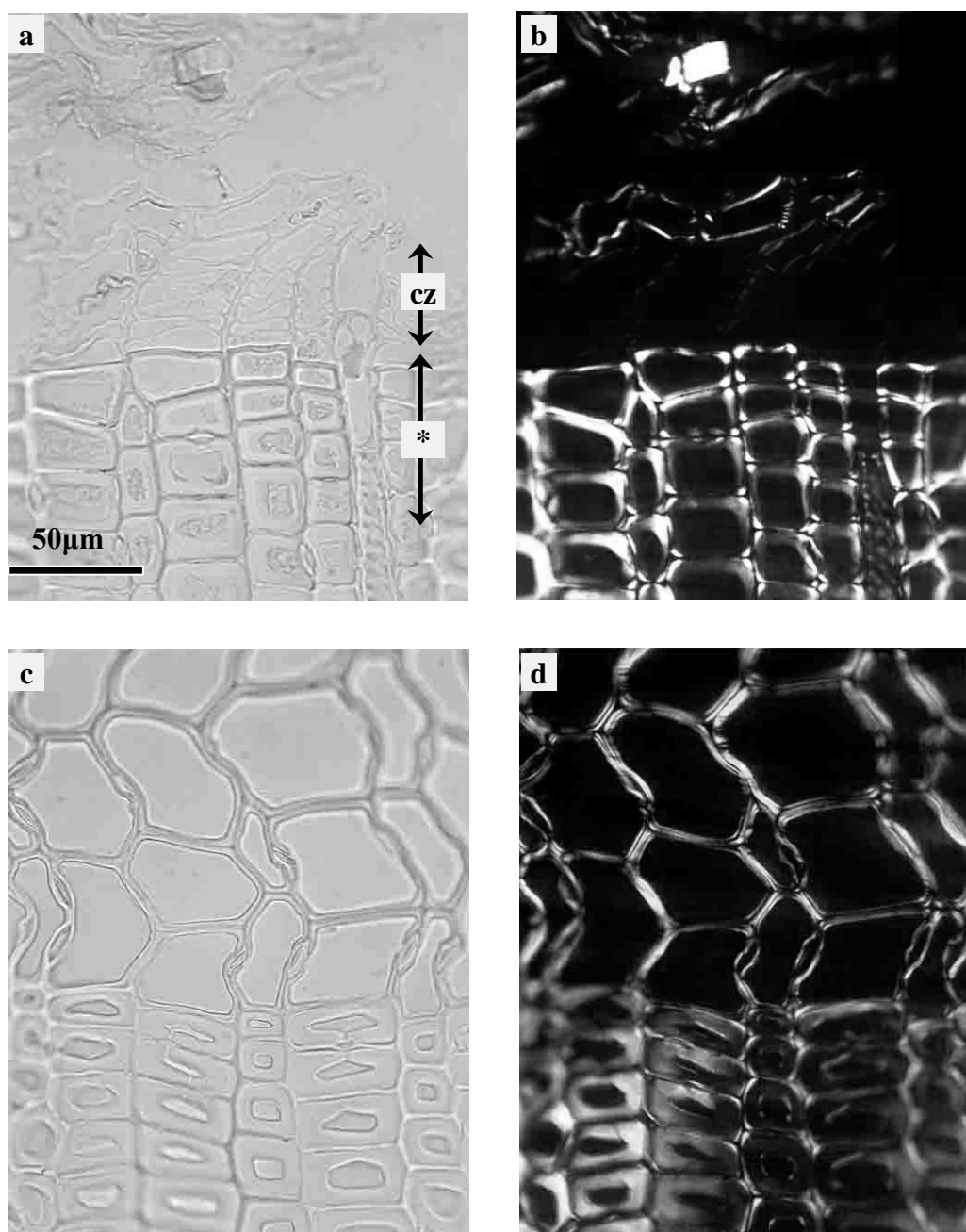


Fig. 3.21. モミの新生細胞の横断面での様子

凡 例 : **Fig. 3.20** を参照

注 : 10月23日に採取した試料であるが、aとbは当年形成部分、cとdは前年（2001年）形成部分の年輪界付近である。

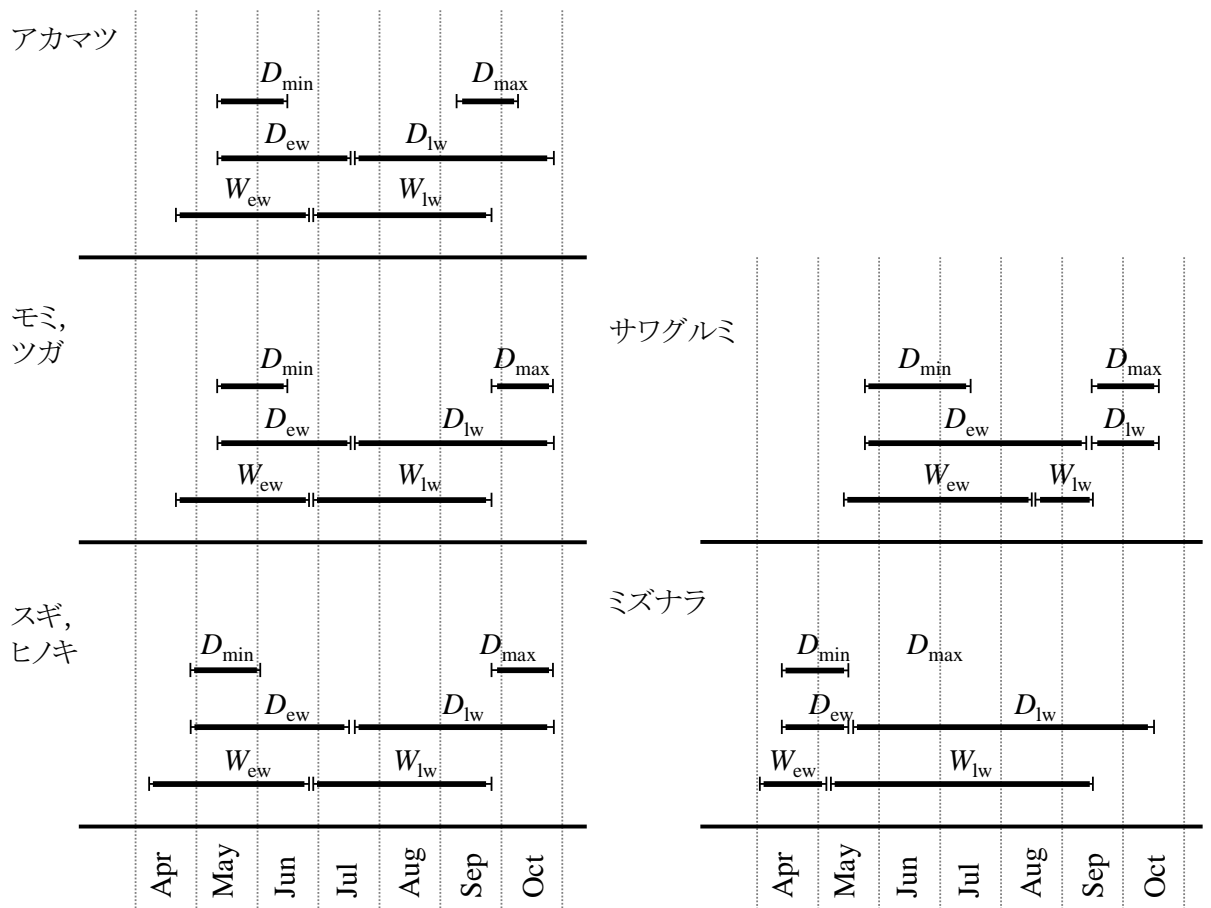


Fig. 3.22. 各樹木年輪変数が形成されたと考えられる時期

凡 例 : IW_{ar} : 年輪幅指数, IW_{ew} : 早材幅指数, IW_{lw} : 晩材幅指数, IP_{lw} : 晩材率指数, ID_{min} : 年輪内最小密度指数, ID_{ew} : 早材密度指数, ID_{mean} : 年輪内平均指数, ID_{lw} : 晩材密度指数, ID_{max} : 年輪内最大密度指数



Fig. 3.23. 4 月 17 日における開葉の様子

凡 例 : *a*: サワグルミ, *b*: ミズナラ

3.2.4 結論

本節では、アカマツとモミを対象として、定期的に採取した形成層付近の試料から新生仮道管の分裂数とその状態を観察することで「木部形成の季節変化」について明らかにした。また、特に、材密度に影響を及ぼす細胞壁厚に注目して、その厚さの季節変化を明らかにした。

その結果、以下の傾向はアカマツとモミでほぼ同じであった。今後、他の樹種についても明らかにしたい。

1) 4 月中旬には細胞の分裂や拡大は行われていたが、5 月に入るまで二次壁の形成は行われていないことがわかった。5 月上旬に採取した試料から 7 月下旬までは二次壁が形成され始めた新生仮道管が急増し、その後は 10 月 23 日までわずかに増加し続けた。

2) 6 月中に早材部にあたる細胞はほぼ分裂し終えたが、二次壁の形成は完了していない段階であることがわかった。そして、7 月中旬ごろからは晩材部にあたる細胞の二次壁形成が始まっていることがわかった。

3) 10 月中旬においても晩材最終部の細胞は二次壁の形成が完了していないことがわかった。

4) また、本節と第 3.1 節の結果、さらに既往の研究の結果を合わせて樹木年輪変数と木部形成の季節変化との関係を考察し、まとめた。

3.3 樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間，樹種間）

3.3.1 はじめに

軟 X 線デンシトメトリを用いて針葉樹における複数の樹木年輪変数を得て，それぞれの樹木年輪変数ごとに構築した指数を用いて樹木年輪－気候関係を検討した報告（Conkey 1979；斉藤 1989；野堀 1994；安江ら 1997a；Chen 2010；Chen 2012）では，異なる樹木年輪変数ごとに構築された指数は有意な相関を示す気候変数に共通点と相違点があることが示されている。

また，樹木年輪－気候関係を複数樹種間で比較した報告では，針葉樹と広葉樹に関わらず，樹木年輪指数と気候変数との間には有意な相関関係が複数樹種で共通して認められたこと（Watson et al. 2002）や，その相関関係が近縁種では類似していたこと（Graumlich 1992）が報告されており，また，樹種による樹木年輪情報と気候情報との関係の特徴と木部形成を行っている時期との関連性（Fujiwara et al. 1999）が考察されている。つまり，構築した樹木年輪クロノロジーには，樹種や樹木年輪変数の特徴に関する情報が含まれていると考えられる。そのため，それらの関連性を明らかにしておくことが樹木年輪－気候関係の解析結果の信頼性を向上させるために有効であると考えた。

そこで本節では，各「樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間，樹種間）」を明らかにするために，樹木年輪クロノロジー間の比較を行った。

3.3.2 方法

第 2 章で構築した東京農業大学奥多摩演習林に生育するアカマツとモミ，ツガ，スギ，ヒノキ，サワグルミ，ミズナラにおける年輪幅指数（ IW_{ar} ）および早材幅指数（ IW_{ew} ），晩材幅指数（ IW_{lw} ），年輪内平均密度指数，早材密度指数（ ID_{ew} ），晩材密度指数（ ID_{lw} ），年輪内最大密度指数（ ID_{max} ），年輪内最小密度指数（ ID_{min} ），晩材率指数（ IP_{lw} ）の計 9 種類の樹木年輪指数のクロノロジー間の関係を単相関

分析によって検討した。また、相関係数だけでは複数の樹木年輪クロノロジー間の関係性が把握しづらいため、相関係数を基に主成分分析を行った。主成分分析での主成分負荷量は分散共分散行列を用いて求めた。

樹木年輪指数間の関係を検討する際には、針葉樹 5 樹種と広葉樹 2 樹種とを分けて検討した。また、樹種間の関係を検討する際には、年輪幅指数 (IW_{ar}) と年輪内平均密度指数 (ID_{mean}) に対象をしぼった。両分析ともに統計期間は、樹木の気候応答を検討する際に参考とするために気象資料が入手できた期間 (1954~2000 年) に合わせた。

3.3.3 結果と考察

a) 樹木年輪指数による違い

a-1) 針葉樹について

樹種ごとに算出した 9 種類の樹木年輪指数のクロノロジー間の相関係数 (r) を 5 樹種で平均した値 (\bar{r}) を **Table 3.5** 右上に、0.1 %水準で有意な r を示した樹種数 (n_{sp}) を **Table 3.5** 左下に示した。幅に関する 4 つの指数 (IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} , IP_{lw}) 間では、 IP_{lw} 以外の間では n_{sp} が 4 樹種以上であった。一方、密度に関する 5 つの指数 (ID_{min} , ID_{ew} , ID_{mean} , ID_{lw} , ID_{max}) 間では、 ID_{mean} と他の 4 つの指数との n_{sp} が 4 樹種以上であったが、早材部にあたる ID_{min} や ID_{ew} と晩材部にあたる ID_{lw} や ID_{max} との間では n_{sp} は少なかった。 IP_{lw} は IW_{lw} と ID_{mean} との間では n_{sp} が 4 樹種であった。その IP_{lw} を除くと、幅に関する指数と密度に関する指数との間には明確な関係は不明であった。

\bar{r} を基にして、得られた主成分分析の結果を、幅に関する指数については **Fig. 3.24** に、材密度に関する指数については **Fig. 3.25** に示した。幅に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 62.2 %, 第 2 主成分の寄与率が 36.7 %であった。また、材密度に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 63.0 %, 第 2 主成分の寄与率が

26.3 %であった。幅に関する指数のうち、 IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} の第1主成分はほぼ同じ値であったが、第2主成分では、 IW_{lw} , IW_{ar} , IW_{ew} の順に並んでいた。また、その中では IW_{ar} と IW_{ew} は近くに位置し、 IW_{lw} が離れていた。

同様に、材密度に関する指数においても第1主成分はほぼ同じ値であったが、第2主成分では、 ID_{max} , ID_{lw} , ID_{mean} , ID_{ew} , ID_{min} の順に並んでいた。その中で、 ID_{max} と ID_{lw} , ID_{ew} と ID_{min} は、それぞれ近くに位置していた。また、 ID_{mean} は ID_{lw} と ID_{ew} との中間ではあるが、 ID_{ew} よりに位置していた。

つまり、幅に関する指数は IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} の並びで、材密度に関する指数は ID_{min} , ID_{ew} , ID_{mean} , ID_{lw} , ID_{max} の並びで似た経年変動を持っていることがわかった。また、 IW_{ar} と ID_{mean} は、ともに晩材部よりも早材部の樹木年輪変数と似た経年変動を持っていることがわかった。また、 IP_{lw} と ID_{mean} との間の \bar{r} や n_{sp} の値が大きかった原因として、早晚材の境界値を各年輪内密度差の50%値としたため、 D_{mean} の大小によって P_{lw} が影響を受けている可能性が考えられる。つまり、 ID_{mean} には早晚材の移行に関連した情報も含まれている可能性がある。

以上のような樹木年輪指数間の関係性は他の報告でも同様であった (Wimmer et al. 2000 ; Chen et al. 2010 ; Chen et al. 2012)。したがって、幅または材密度に関する指数は、それぞれ形成された順に似た経年変動を有しているといえ、そのように関連付けて考察する必要があると考える。

a-2) サワグルミおよびミズナラについて

9種類の樹木年輪指数間のクロノロジー間の r をサワグルミについては**Table 3.6**右上に、ミズナラについては**Table 3.6**左下に示した。幅に関する指数について、サワグルミの IW_{ar} は IW_{ew} と、ミズナラの IW_{ar} は IW_{lw} と0.1%水準で有意な r が認められた。同様に、材密度に関する指数についても、サワグルミの ID_{mean} は ID_{ew} や ID_{min} と、ミズナラの ID_{mean} は ID_{lw} や ID_{max} と0.1%水準で有意な r が認め

られた。

また、その r を基にして得られた主成分分析を行った結果を、サワグルミの幅に関する指数については **Fig. 3.26** に、材密度に関する指数については **Fig. 3.27** に、ミズナラの幅に関する指数については **Fig. 3.28** に、材密度に関する指数については **Fig. 3.29** に示した。

サワグルミにおいて、幅に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 59.4 %，第 2 主成分の寄与率が 39.4 % であった。また、材密度に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 64.3 %，第 2 主成分の寄与率が 29.2 % であった。 IW_{ar} と IW_{ew} は近くに位置したが、 IW_{lw} は第 1 主成分ですでに離れていた。また、 ID_{ew} は ID_{min} と、 ID_{lw} は ID_{mean} と ID_{max} と、それぞれ近くに位置していた。

IP_{lw} は、 IW_{lw} と他のものより近くに位置していた。 W_{lw} について約 300 年輪を調べると、最小で 5 μm ，平均で 52 μm ，最大で 400 μm となっていた (**Fig. 3.30**)。また約 85 % の年輪で W_{lw} は 100 μm 以下であった。つまり、サワグルミの W_{lw} は **Fig. 2.6b** や **Fig. 2.7a** で示したように年輪界直前の小径かつ厚壁の木部繊維が接線方向に並ぶ高密度な部分の幅にあたると考えられる。一方、 W_{lw} が 100 μm 以上の年輪は W_{ar} が狭い場合に多く認められた。 W_{lw} が 100 μm 以上の場合は、上述した高密度な部分以外も含まれてしまっていたが、 ID_{lw} と ID_{max} とが似た経年変動を持っていたことから、 W_{lw} や ID_{lw} が年輪界直前の小径かつ厚壁の木部繊維が接線方向に並ぶ高密度な部分の幅や材密度を代表できていると考え、第 4 章以降で行う樹木年輪－気候関係の解析に用いることに問題ないと考えた。

一方、ミズナラにおいて、幅に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 64.9 %，第 2 主成分の寄与率が 33.9 % であった。また、材密度に関する指数では第 1 主成分の寄与率が 59.0 %，第 2 主成分の寄与率が 30.3 % であった。 IW_{ar} と IW_{lw} は近くに位置し、 IW_{ew} は第 1 主成分ですでに離れていた。また、 ID_{ew} は ID_{min} と、 ID_{lw} は ID_{max} と、それぞれ近くに位置していた。 IP_{lw} は、他のものより IW_{lw} と近

くに位置していた。 ID_{\max} は孔圏外部の中でも前半に位置することが多く見受けられ (**Fig. 2.6c**), 第 1 主成分は ID_{ew} や ID_{\min} とほぼ同じ値であったが, 第 2 主成分も含めると ID_{ew} や ID_{\min} から最も離れて位置していた。

b) 樹種による違い

樹種ごとの樹木年輪クロノロジー間の関係について, 針葉樹では IW_{ar} (**Table 3.7 左下**) と ID_{mean} (**Table 3.7 右上**) とともに 5 樹種間全ての組み合わせで有意な r が認められた。サワグルミの IW_{ar} は他の 6 樹種と有意な r が認められなかった。サワグルミでは年輪幅の広狭を制限する要因が他の樹種とは異なるを考える。

これらのことから, 構築された IW_{ar} と ID_{mean} のクロノロジーは異なる要因の影響を記録しているが, それぞれは一定地域内に生育する複数樹種間に共通する要因を記録していると考ええる。

IW_{ar} のクロノロジーでは第 1 主成分の寄与率が 47.8 %, 第 2 主成分の寄与率が 16.5 %であった。主成分負荷量の分布は, 針葉樹 5 樹種が比較的近い位置に集まっていた (**Fig. 3.31**)。第 1 主成分では, サワグルミが離れて位置していた。その他の樹種は近くに位置していたが, 針葉樹を値が大きい順に並べるとスギ, ヒノキ, ツガ, アカマツ, モミとなっていた。つまり, ヒノキ科 (旧スギ科を含む) 2 樹種, マツ科 3 樹種の順に並んでいた。また, 第 2 主成分においても, 広葉樹 2 樹種は針葉樹と離れた位置にあり, さらにそれぞれの位置も離れていた。広葉樹の中ではサワグルミよりミズナラの方が針葉樹の近くに位置していた。針葉樹の中ではアカマツが少し離れて位置していた。

一方, ID_{mean} のクロノロジーでは, 第 1 主成分の寄与率が 55.4 %, 第 2 主成分の寄与率が 16.6 %であった。第 1 主成分の寄与率は IW_{ar} よりも ID_{mean} のクロノロジーの方が高いことから, ID_{mean} の方が本研究で用いた樹種間に共通した経年変動であると考えられる。第 1 主成分では IW_{ar} のクロノロジーの場合よりも全

樹種が接近して位置していた (**Fig. 3.32**)。値の大きい順に並べるとモミ，アカマツ，ツガ，ヒノキ，スギ，ミズナラ，サワグルミとなる。つまり，マツ科 3 樹種，ヒノキ科 2 樹種，広葉樹 2 樹種の順に位置していた。広葉樹 2 樹種の中では， IW_{ar} のクロノロジーの場合と同様にサワグルミよりもミズナラの方が針葉樹の近くに位置していた。一方で，第 2 主成分では針葉樹はマツ科とヒノキ科とが明らかに分かれて位置していた。マツ科 3 樹種と広葉樹 2 樹種とは近くに位置していたが，ヒノキ科 2 樹種とは離れていた。

主成分分析を用いた樹木年輪クロノロジーの複数樹種間の比較について Graumlich (1992) は，アメリカ五大湖付近に生育する針葉樹 3 樹種と広葉樹 8 樹種の IW_{ar} のクロノロジーを用い，各樹種の主成分負荷量は属ごとに集まって分布していたと報告しており，本研究でも同様なことがいえると考える。

これらのことから，主成分負荷量の分布における樹種の位置関係は異なっていたが，近縁種の樹木年輪クロノロジーは，(IW_{ar} および ID_{mean} 共に)，遠縁の種より共通した変動成分を有していることが分かり，樹木の気候応答についての樹種特性が分析しうると考える。

Table 3.5. 針葉樹 5 樹種における 9 種類の樹木年輪指数間の関係

	IW_{ew}	IW_{ar}	IW_{lw}	IP_{lw}	ID_{min}	ID_{ew}	ID_{mean}	ID_{lw}	ID_{max}
IW_{ew}		0.957	0.519	-0.409	-0.379	-0.138	-0.342	-0.249	-0.027
IW_{ar}	5		0.723	-0.162	-0.337	-0.067	-0.145	-0.183	0.036
IW_{lw}	4	5		0.513	-0.166	0.094	0.339	-0.027	0.129
IP_{lw}	-1	-1	4		0.198	0.244	0.705	0.204	0.171
ID_{min}	-3	-2	0	1		0.844	0.637	0.316	0.152
ID_{ew}	-1	1	1	2	5		0.759	0.327	0.330
ID_{mean}	-1	-1	1	4	4	5		0.575	0.521
ID_{lw}	0	0	0	1	1	1	4		0.867
ID_{max}	0	0	0	0	0	1	4	5	

凡 例 : IW_{ar} : 年輪幅指数, IW_{ew} : 早材幅指数, IW_{lw} : 晩材幅指数, IP_{lw} : 晩材率指数, ID_{min} : 年輪内最小密度指数, ID_{ew} : 早材密度指数, ID_{mean} : 年輪内平均指数, ID_{lw} : 晩材密度指数, ID_{max} : 年輪内最大密度指数

注 : 右上の数値は 5 樹種で平均した相関係数を示した。左下の数値は有意な相関係数 ($p < 0.01$) が認められた樹種数を示した。

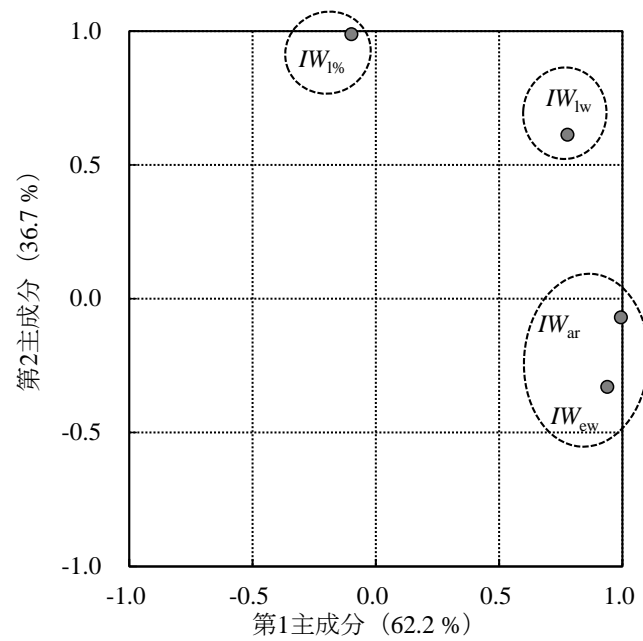


Fig. 3.24. 幅に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布(針葉樹 5 樹種)

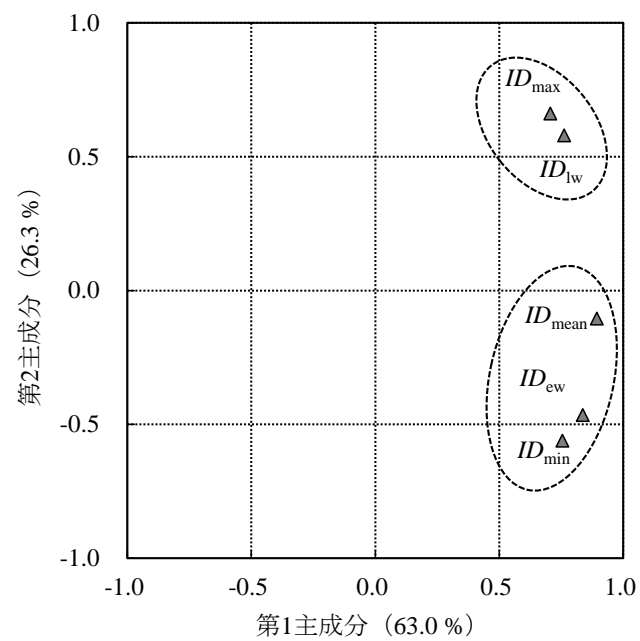


Fig. 3.25. 材密度に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布 (針葉樹 5 樹種)

Table 3.6. サワグルミおよびミズナラにおける 9 つの樹木年輪指数間の関係

	IW_{ew}	IW_{ar}	IW_{lw}	IP_{lw}	ID_{min}	ID_{ew}	ID_{mean}	ID_{lw}	ID_{max}
IW_{ew}		0.97	n.s.	-0.52	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
IW_{ar}	n.s.		n.s.	-0.40	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
IW_{lw}	n.s.	0.98		0.81	n.s.	n.s.	n.s.	-0.65	-0.44
IP_{lw}	-0.53	0.64	0.76		n.s.	n.s.	n.s.	-0.71	-0.57
ID_{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		0.84	0.80	0.36	n.s.
ID_{ew}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.89		0.97	0.40	0.33
ID_{mean}	n.s.	0.53	0.56	0.60	0.48	0.38		0.33	0.30
ID_{lw}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.37	n.s.	0.83		0.92
ID_{max}	n.s.	0.40	0.39	0.32	n.s.	n.s.	0.67	0.71	

凡 例 : **Table 3.5** を参照

注 : 右上の数値はサワグルミ, 左下の数値はミズナラについて有意水準 5% で有意な相関係数を示した。太文字の値は有意水準 1 % で有意な相関係数, n.s.は無相関を示した。

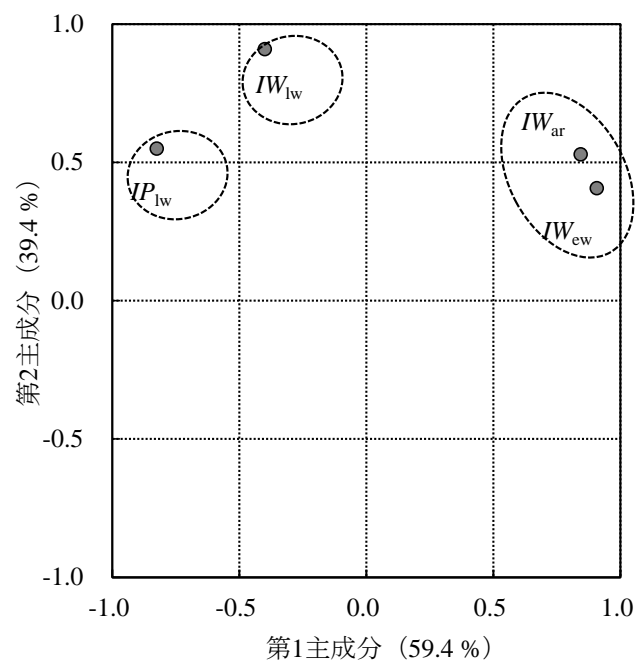


Fig. 3.26. サウグルミの幅に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布

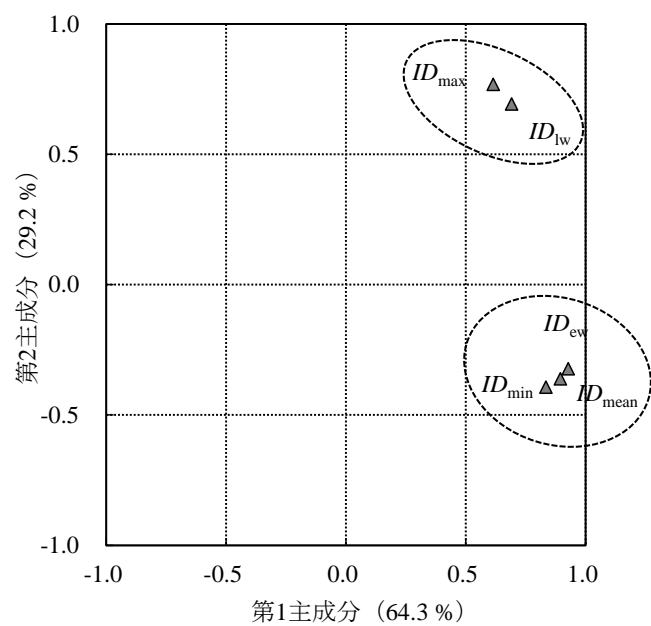


Fig. 3.27. サウグルミの材密度に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布

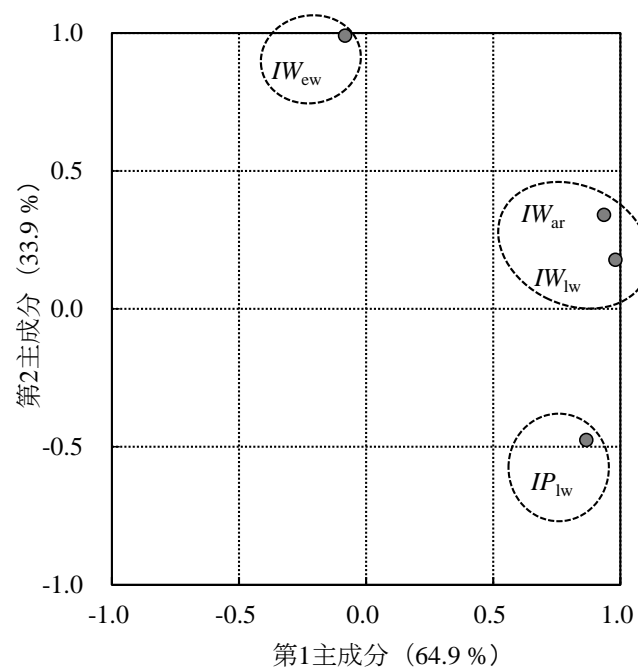


Fig. 3.28. ミズナラの幅に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布

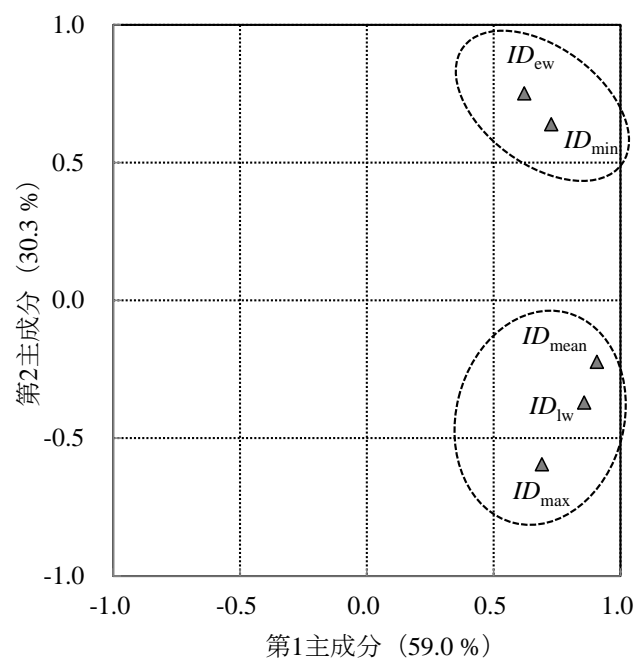


Fig. 3.29. ミズナラの材密度に関する樹木年輪指数における主成分負荷量の分布

Table 3.7. 標準化した樹木年輪クロノロジー間の関係

	PIDE	ABFI	TSSI	CRJP	CHOB	PTRH	QUCR	
IW_{ar}	PIDE	0.53	0.41	0.35	0.33	0.36	0.59	ID_{mean}
	ABFI	0.40	0.65	0.37	0.64	0.44	0.44	
	TSSI	0.60	0.40	0.38	0.48	0.45	0.55	
	CRJP	0.50	0.41	0.66	0.64	0.31	n.s.	
	CHOB	0.33	0.53	0.52	0.62	n.s.	0.46	
	PTRH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.42	
	QUCR	0.46	n.s.	0.42	0.30	0.34	n.s.	

凡 例 : **Table 3.5** を参照

注 : 右上の数値は ID_{mean} , 左下の数値は IW_{ar} について有意水準 5% で有意な相関係数を示した。太文字の値は有意水準 1 % で有意な相関係数, n.s.は無相関を示した。

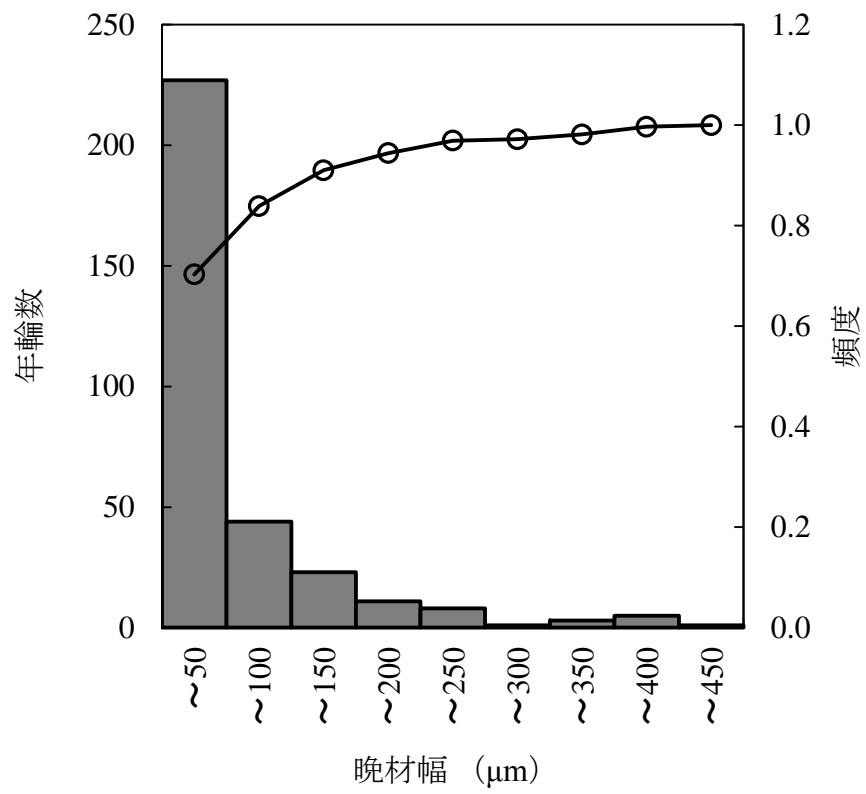


Fig. 3.30. サワグルミにおける晩材幅 (IW_{lw}) の範囲

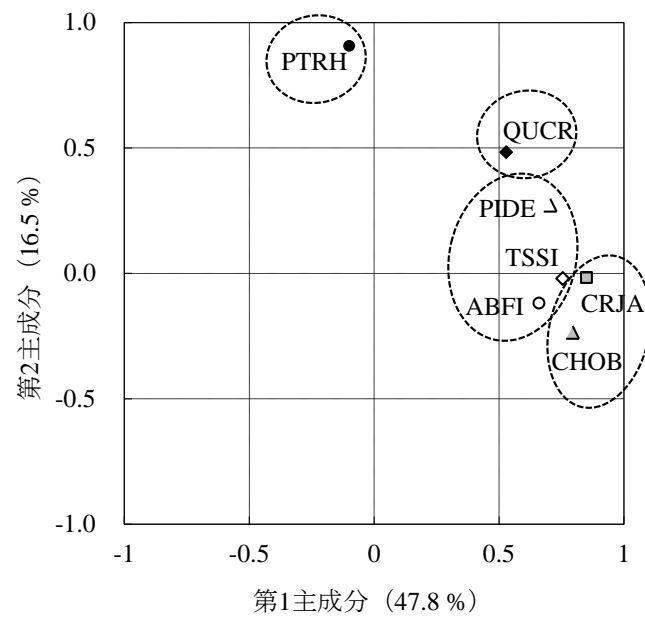


Fig. 3.31. 年輪幅指数における主成分負荷量の分布 (7 樹種)

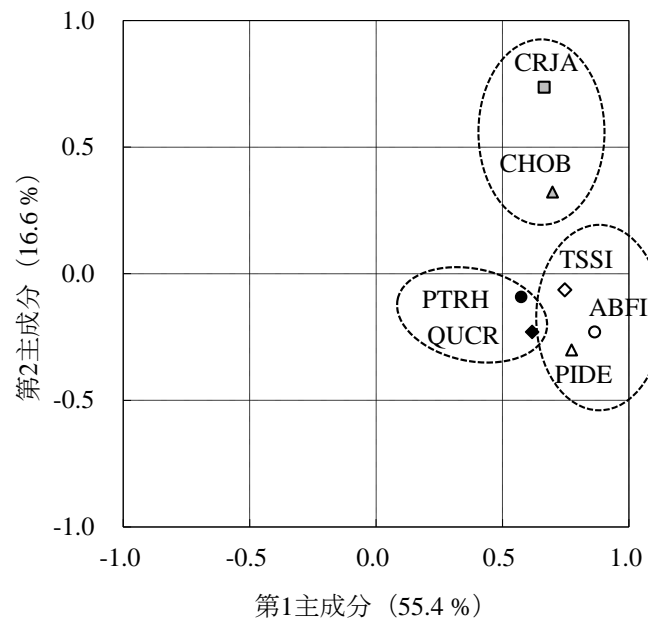


Fig. 3.32 年輪内平均密度指数における主成分負荷量の分布 (7 樹種)

3.3.4 結論

本節では、「樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間，樹種間）」を明らかにするために，樹木年輪クロノロジー間の共通点や違いを明らかにした。

その結果，樹木年輪指数による違いとして，1) 針葉樹 5 樹種の幅に関する指数は IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} の並びで，材密度に関する指数は ID_{min} , ID_{ew} , ID_{mean} , ID_{lw} , ID_{max} の並びで似た変動成分を持っていることがわかった。また， IW_{ar} と ID_{mean} は，ともに晩材部よりも早材部の樹木年輪指数と似た変動成分を持っていることがわかった。

2) サワグルミにおいて IW_{ar} は IW_{ew} と， ID_{mean} は ID_{ew} や ID_{min} と似た経年変動を持っていることがわかった。また，サワグルミの W_{lw} は年輪界に並んだ厚壁かつ小径の木部繊維の数細胞幅にあたると考えられ， IW_{ar} や IW_{ew} とは異なる変動成分を持っていることがわかった。

3) ミズナラにおいて IW_{ar} は IW_{lw} と， ID_{mean} は ID_{lw} や ID_{max} 似た経年変動を持っていることがわかった。また， ID_{min} は ID_{ew} と， ID_{max} は ID_{lw} と似た変動成分を有していることがわかった。

以上 3 点から，幅または材密度に関する指数は，それぞれ形成された順に似た経年変動を有しているといえる。

さらに，4) 樹種の違いについて， IW_{ar} と ID_{mean} のクロノロジーを対象として単相関分析を行った結果，複数樹種間に共通する経年変動があることがわかった。また，主成分分析により，近縁種の樹木年輪クロノロジーは，遠縁の種より共通した変動成分を多く有している傾向があることがわかった。つまり，近縁種は共通した気候応答を，遠縁の種では異なる気候応答をしている可能性があることがわかった。

3.4 まとめ

第3章では、「樹木年輪情報の基礎情報」を得るために、第3.1節では「樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係」を検討した。次に、第3.2節では、定期的に採取した形成層付近の試料から新生細胞の分裂数とその状態を観察することで「木部形成の季節変化」について明らかにした。第3.3節では、構築した「樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間，樹種間）」を明らかにするために、各樹木年輪クロノロジーの共通点や違いを明らかにした。その結果を以下にまとめる。

1) アカマツとサワグルミについて、幅に関する樹木年輪変数は細胞数に、材密度に関する樹木年輪変数は細胞壁率に起因することを確認できた。また、両樹種において各樹木年輪変数が代表するような1年輪内での位置を明らかにした。

2) アカマツとモミについて「木部形成の季節変化」を明らかにした。形成層における細胞分裂が4月下旬から再開すること、細胞壁の堆積が10月末まで完了していないことがわかった。

3) 樹木年輪クロノロジー間の比較を行い、幅または材密度に関する指数は、それぞれ形成された順に似た経年変動を有していることがわかった。また、複数樹種間に共通する経年変動がある一方で、近縁種の樹木年輪クロノロジーは、遠縁の種より共通した変動成分を多く有している傾向があることがわかった。

第4章 樹木年輪－気候関係の解析 I（樹木年輪情報の検討）

4.1 樹種間の比較

4.1.1 はじめに

樹木の気候応答を検討するために樹木年輪－気候関係を解析した報告は多数あるが、特に日本においては同一生育地域における複数樹種を対象としてその関係の解析やその関係の樹種間での比較を行った報告が少ない（Takahashi et al 2010 ; Fujiwara et al. 1999）。樹木年輪－気候関係を複数樹種間で比較した報告では、針葉樹と広葉樹に関わらず、樹木年輪指数と気候変数との間には有意な相関関係が複数樹種で共通して認められたこと（Watson et al. 2002）や、その相関関係が近縁種では類似していたこと（Graumlich 1992）が報告されており、また、樹種による樹木年輪－気候関係の特徴と木部形成を行っている時期との関連性を考察した報告（Fujiwara et al. 1999）がある。そのため樹木年輪に含まれる樹木の気候応答に関する情報をより明らかにするには、樹木年輪－気候関係を検討した報告をさらに蓄積していく必要がある。

そこで本節では、「樹木年輪情報」の種類として「樹種」に着目し、供試樹木として選択した針葉樹 5 樹種と広葉樹 2 樹種について、樹木年輪－気候関係を解析し、7 樹種間の比較を行った。

4.1.2 方法

a) 樹木年輪情報

第 2 章で構築した東京農業大学奥多摩演習林に生育するアカマツとモミ、ツガ、スギ、ヒノキ、サワグルミ、ミズナラの年輪幅指数（ IW_{ar} ）および年輪内平均密度指数（ ID_{mean} ）のクロノロジーを用いた。

b) 気候情報

樹木年輪－気候情報関係を解析する際には、長期間記録された気象資料の入手が解析結果の信頼性を高めるために重要となる。演習林の研修センター（標高 650 m）で記録されている気象資料は観測期間が短いため、樹木年輪試料の採取地から東方 2～4 km 離れた位置にある東京都水道局水源林管理事務所奥多摩出張所（標高約 355 m，以下，「奥多摩」，**Fig. 2.1**）の気象資料を用いた。奥多摩の気象資料は、日降水量が 1925 年 1 月から、日平均気温と日最高気温と日最低気温が 1953 年 10 月から、日平均相対湿度が 1959 年 8 月から記録されている。なお、演習林の研修センターでの年平均気温は 11.4 °C、年平均相対湿度は 76.7 %、年降水日数は 145 日、年降水量は約 1548 mm であった（1995～2000 年の平均）。一方、奥多摩における同期間で平均した年平均気温は 12.8 °C、年降水量は約 1547 mm であった。また、研究地域に最も近い（約 19 km）気象庁の観測所（秩父）と奥多摩の両気象資料間で各月の時系列間（1954～2000 年）の相関係数を平均すると、月平均気温では 0.84、月降水量では 0.92 であったため研究地域の気象資料として扱うことにほぼ問題ないと考えた。

c) 樹木年輪指数と気候変数との単相関分析

樹木年輪－気候関係を検討するために、樹木年輪指数のクロノロジーと気候変数の時系列との間の単相関分析を行った。形成層の活動期については、第 3.2 節で述べたがスギやヒノキは 4 月初めから（山下ら 2006）、本研究地域生育するモミやツガ（第 3.2 節）、秩父地域に生育するモミ（島地 1979）では 4 月中旬から、本研究地域生育するサワグルミ（青山 2002）では 5 月から、形成層活動が再開し、10 月末までには活動を停止することがわかっている。そこで気候変数には前年 3 月（前年の形成層活動開始直前）から当年 10 月（当年の形成層活動停止）までの計 20 ヶ月分の月平均気温（ $T_{\text{mean(m)}}$ ）と月最高気温（日最高気温

の月平均値： $T_{\max(m)}$ ），月最低気温（日最低気温の月平均値： $T_{\min(m)}$ ），月平均相対湿度（ $H_{\text{mean}(m)}$ ），月降水量（ $P_{\text{total}(m)}$ ），月降水日数（0.1 mm 以上： $P_{\text{days}(m)}$ ）を用いた。また，単相関分析の統計期間は， $H_{\text{mean}(m)}$ 以外の 5 種類については記録が存在する 1954 年から樹木年輪資料が得られた 2000 年までの計 47 年間とした。 $H_{\text{mean}(m)}$ については 1960 年から 2000 年までの計 41 年間とした。

4.1.3 結果と考察

a) 樹木年輪情報と気候情報との関係の概要

樹木年輪指数のクロノロジーと気候変数の時系列との間の単相関分析の結果を **Fig. 4.1** に示した。相関係数（ r ）は有意水準 5 % 以上の場合に「有意」としたが， r の大きさの違いを表すために 10 %，5 %，1 %，0.5 %，0.1 % 水準の 5 段階で示すことにした。樹木年輪指数と気候変数との間で有意な r が認められた相関関係の数を **Fig. 4.2** に示した。その数は，スギでは IW_{ar} よりも ID_{mean} の場合に多く，モミでは IW_{ar} と ID_{mean} とでほぼ同数，それら以外では ID_{mean} よりも IW_{ar} の場合に多かった。サワグルミとミズナラの IW_{ar} では他の針葉樹の IW_{ar} よりも少なかった。第 2 章で記した同一樹種内における個体間総当たりの r の平均値（ \bar{r}_{bt} ）が小さかったツガの IW_{ar} や ID_{mean} ，ミズナラの ID_{mean} においても他の樹木年輪指数と比べて有意な相関関係の数に変わりなかった。よって， \bar{r}_{bt} が多少小さい樹木年輪指数のクロノロジーであっても樹木年輪情報と気候情報との間には関連性があると考ええる。

$T_{\max(m)}$ と $T_{\min(m)}$ と $T_{\text{mean}(m)}$ は樹木年輪指数との相関関係が似た傾向であったため（**Fig. 4.1** 上 3 段），まずは $T_{\text{mean}(m)}$ を気温に関する気候変数の代表とみなして考察する。

複数樹種間に共通した有意な相関関係についてまとめると，① IW_{ar} と当年 1 月から 3 月までの $T_{\text{mean}(m)}$ との間（「 $IW-T_{(c-\text{Jan/Mar})}$ 」の相関関係），② ID_{mean} と当年

5 月から 8 月までの $T_{\text{mean(m)}}$ との間 (「 $ID-T_{(c\text{-May/Act})}$ 」の相関関係), ③ ID_{mean} と前年 5 月から 7 月までの $T_{\text{mean(m)}}$ との間 (「 $ID-T_{(p\text{-May/Jul})}$ 」の相関関係), ④ ID_{mean} と当年 6 月から 9 月の $P_{\text{days(m)}}$ との相関関係との間 (「 $ID-P_{\text{days(c-Jun/Sep)}}$ 」の相関関係) の 4 つの相関関係が確認された (Fig. 4.1)。

この 4 つの相関関係について, それぞれ r の絶対値が大きい 3 樹種における相関関係を散布図で示した (Fig. 4.3)。どの散布図においても特に外れ値はなく, 分布の形はほぼ線形であったため, それぞれの r はそれらの分布状態を適正に示していると考えた。

b) IW_{ar} と休止期の $T_{\text{mean(m)}}$ との相関関係

針葉樹 5 樹種の IW_{ar} と当年 1 月から 3 月までの $T_{\text{mean(m)}}$ との間に有意な正の r が認められ, その有意な相関関係が認められた樹種数および r の絶対値が 1 月から次第に増え, 特に 3 月において顕著であった (Fig. 4.1 左 1 段目)。ミズナラでも 3 月においては有意ではないが 10 %水準の r が確認された。一方, IW_{ar} と前年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ との相関関係について見ると, 当年の場合より絶対値は小さいが, マツ科 3 樹種の IW_{ar} と有意な正の r が認められ, r の符号 (正負) は前年と当年とで同じであった。また, 有意ではないが 10 %水準の r がスギとサワグルミにおいても確認された。

休眠期を休眠導入期, 冬休眠期, 休眠解除期, 休止期と分けた場合 (永田 2002) に 1 月から 3 月の形成層活動の状態は休止期に当たる。この休止期には形成層始原細胞の細胞質がゲル状態からゾル状態となり, 細胞壁の可塑性が増すこと (Priestley 1930 ; 渡辺 1978) が知られている。また, Oribe ら (2001) は休止期においてスギの樹幹に局所加温処理を行うことにより形成層活動が再開することを報告している。つまり, 休止期は形成層活動再開への準備を行っている期間であると考えられる。 W_{ar} は主に放射方向に並んだ木部細胞の数とその放射

径によって決まるが (Wang et al. 2002 ; Momoi et al. 2005 ; 第 3.1 節), 休止期の気温が細胞径の拡大に直接制限しているとは考えにくい。したがって, 休止期の気温によって, 形成層活動再開への準備状態が制限を受け, それによって形成層活動の再開時期が早期化あるいは晩期化し, そのため細胞分裂が活発に行われる期間が長期化あるいは短期化することで, 分裂回数が増減するため, 当年の W_{ar} の広狭に影響が生じている可能性がある。そして, この準備状態への制限は, 休止期に入ってから形成層活動の再開直前にかけて次第に大きくなる可能性がある。

一方で, 形成層活動再開の早期化あるいは晩期化が翌年の W_{ar} の広狭に直接制限するとは考えにくい。東京都田無市に生育するスギ, ヒノキ, アカマツの光合成速度は 2 月で最も低く, 3 月以降は上昇すること (Negisi 1966) が報告されている。つまり, 休止期の気温によって, 常緑針葉樹の場合は形成層活動再開のみならず光合成活動の活発化が早期化あるいは晩期化することで, 光合成産物の貯蔵量が増減し, 当年だけでなく翌年の W_{ar} の広狭にも影響が生じている可能性がある。

c) ID_{mean} と当年活動期の $T_{mean(m)}$ との相関関係

全 7 樹種の ID_{mean} と当年 5 月から 8 月までの $T_{mean(m)}$ との間に有意な正の r が認められ, それは特に 7 月において顕著であった (Fig. 4.1 右 1 段目)。また, この相関関係は 5 月から 8 月の期間において, 針葉樹 5 樹種ではヒノキ, スギ, モミ, ツガ, アカマツの順に, 広葉樹 2 樹種ではミズナラ, サワグルミの順に有意な r が認められた時期が遅くなっていた。この順序は第 3 章でまとめた各樹木年輪変数が形成されたと考えられる時期の樹種による違いと似ていた。

樹種によって有意な r が認められた時期に違いがあることについて, Fujiwara ら (1999) は樹種特有の成長特性である木部形成の再開時期や木部の形成活動

を行っている期間などの違いと関連付けて考察しており、本研究の結果からもそのようなことがいえると考ええる。

また、 IW_{ar} では当年活動期の気候変数との間に有意な r がほとんど認められなかった。針葉樹と広葉樹とでは組織構造が異なるため、組織構造の違いに合わせた検討が必要であるが、どの樹種も W_{ar} は主に木部細胞の数と径に、 D_{mean} は主に木部細胞の数と径と壁厚によって決まる (Wang et al. 2002 ; Momoi et al. 2005 ; 桃井ら 2004 ; 第 3.1 節)。このようなことから、 W_{ar} と D_{mean} の両方を規定する木部細胞の数や径の増減よりも D_{mean} のみを規定する木部細胞の壁厚が当年活動期の気温によって増減することで、 D_{mean} の大小に影響が生じている可能性がある。

d) ID_{mean} と前年活動期の $T_{mean(m)}$ との相関関係

サワグルミ以外 6 樹種の ID_{mean} と前年 5 月から 7 月までの $T_{mean(m)}$ との間に有意な負の相関関係が認められ、それは特に 5 月において顕著であり、5 月以降は次第に r の絶対値が減少するとともに有意な負の相関関係が認められた樹種数も減っていた (Fig. 4.1 右 1 段目)。この相関関係について、マツ科 3 樹種では前年 5 月以外に前年 6 月または前年 7 月でも有意な r が認められたが、他の樹種は前年 5 月のみであった。また、ツガとヒノキ科 2 樹種では、同じ気候変数である前年 7 月と 8 月の $T_{mean(m)}$ は IW_{ar} との間に有意な負の r が確認された。

Kagawa ら (2006) は、人為的に吸収させた $^{13}CO_2$ が翌年に形成された木部内にも含まれていたことを報告している。つまり、前年に貯蔵された光合成産物は翌年の木部形成に利用されていることがわかる。また、 ID_{mean} は当年活動期の $T_{mean(m)}$ との相関関係が正の関係であったのに対して、前年活動期の $T_{mean(m)}$ とで負の関係であった。翌年に利用可能な光合成産物の貯蔵量を増減させるのが前年活動期の生産量ならば前年と当年とで同じ符号 (正負) の r が確認され

るはずである。したがって、前年活動期の消費量が気温によって制限され、光合成産物の貯蔵量の変動することで翌年の D_{mean} の大小に影響が生じている可能性がある。

また、樹種によって有意な r が認められた時期に違いがあったが、前年に生産された光合成産物の貯蔵と利用について、樹種ごとの違いは不明であるため、今後検討したい。

e) ID_{mean} と当年活動期の $P_{\text{days(m)}}$ との相関関係

スギ以外 6 樹種の ID_{mean} と当年 6 月から 9 月の $P_{\text{days(m)}}$ との間に有意な負の相関関係が認められたが、特に 6 月において顕著であり、アカマツ以外の 5 樹種は 6 月以降 9 月に至るまで r の絶対値は減少するとともに有意な相関関係が認められた樹種数も次第に減っていた (**Fig. 4.1 右 6 段目**)。この相関関係は ID_{mean} と当年活動期の $T_{\text{mean(m)}}$ との相関関係とほぼ同じ時期であるが、6 月においては明らかに $P_{\text{days(m)}}$ との方が $T_{\text{mean(m)}}$ との間の r より大きかった。一方で、この時期の $H_{\text{mean(m)}}$ や $P_{\text{total(m)}}$ と ID_{mean} との間には有意な r がほとんど認められなかった。また、同時期の $P_{\text{days(m)}}$ と IW_{ar} との間に有意な r は認められなかった。

奥多摩では、6 月から 9 月の $P_{\text{days(m)}}$ は約 16 日と、年間で最も多くなる時期であり、特に、6 月初旬から 7 月中旬までは梅雨である。雨天は日射量を減少させるだけではなく、雨滴によって葉が濡れることで光合成が抑制されるとの報告がある (Ishibashi et al. 1996)。さらに、降雨によって樹幹表面の温度や林内の気温が低下することで形成層や新生木部細胞の温度も低下するだろう。形成層や分化中の仮道管は温度の変化に直接的に応答すると考察した報告 (Begum et al. 2012) があることから、形成層や新生木部細胞の温度低下によって木部形成の効率が低下する可能性がある。

一方、上述したように同時期の $P_{\text{days(m)}}$ と IW_{ar} との間に有意な r は認められな

いため、木部細胞の数や径の増減による D_{mean} への影響が、この相関関係の主要な制限要因ではないと考える。したがって、 $P_{\text{days(m)}}$ の多寡は、水分の多少ではなく光合成や木部形成の効率を左右させることで、木部細胞の壁厚に影響が生じている可能性がある。そのため、特に雨天や曇天が多い 6 月においては $T_{\text{mean(m)}}$ とよりも $P_{\text{days(m)}}$ との方が ID_{mean} との間の r が大きかったと考える。

f) 気温に関する気候変数と樹木年輪指数との関係

気温に関する気候変数 ($T_{\text{max(m)}}$, $T_{\text{min(m)}}$, $T_{\text{mean(m)}}$) に着目するとこれら 3 者と樹木年輪指数との相関関係にはそれぞれ似た傾向が確認できた (**Fig. 4.1** の 1~3 段目)。また、それぞれの月や樹種において認められた有意な r の絶対値が $T_{\text{max(m)}}$ と $T_{\text{min(m)}}$ と $T_{\text{mean(m)}}$ の中で最も大きな r を示した相関関係の数は IW_{ar} , ID_{mean} ともに $T_{\text{max(m)}}$ で最も多かった (**Fig. 4.4**)。 $T_{\text{min(m)}}$ は有意な相関関係が少なく、 r の絶対値は小さかった。そして、 $T_{\text{mean(m)}}$ はそれらの中間的な傾向であった。一方で、 IW_{ar} と休止期の気温との相関関係や ID_{mean} と当年活動期の気温との相関関係においては有意な r が認められた時期が $T_{\text{min(m)}}$, $T_{\text{mean(m)}}$, $T_{\text{max(m)}}$ の順に遅れている傾向が確認され、 $T_{\text{mean(m)}}$ と $T_{\text{min(m)}}$ が、 $T_{\text{max(m)}}$ よりも大きい絶対値の r が認められた相関関係もあった。

$T_{\text{mean(m)}}$ よりも $T_{\text{max(m)}}$ や $T_{\text{min(m)}}$ の方が樹木年輪変数との間に絶対値の大きい r が認められた報告 (斉藤 1989 ; Youngblut et al. 2008 ; Yu et al. 2007 ; Pederson et al. 2004 ; Wilson et al. 2002) がある。その中では $T_{\text{max(m)}}$ との r の絶対値が大きいとの報告が多く、本結果も同様な結果といえる。

日最高気温 ($T_{\text{max(d)}}$) と日最低気温 ($T_{\text{min(d)}}$) について、気象庁秩父観測所 (埼玉県) の 1 時間ごとの気象資料 (2007 年) を見ると、 $T_{\text{max(d)}}$ は、1 年を通して 14 時に最も多く観測され、11 時から 18 時の間に観測されていた。 $T_{\text{min(d)}}$ は、日の出の時間が季節により異なるため冬は 7 時、春と秋では 6 時、夏では 5 時に最

も多く観測され、3時から7時の間に観測されていた。つまり、 $T_{\max(d)}$ や $T_{\min(d)}$ は1日の最高値や最低値を示すだけではなく、それぞれ「日中の気温」や「明け方から早朝の気温」を示しているともいえる。

休眠期における $T_{\max(d)}$ や $T_{\min(d)}$ に対する樹木の成長応答について、本研究では用いていないポプラの冬芽についての報告ではあるが、冬休眠を解除するためには一定期間の低温が必要になり、そして $T_{\max(d)}$ が開芽可能温度を上回る日が続くようになると、冬芽の中にある葉原基が開芽に向けて成長を始める（永田2002）とされている。一方で、形成層活動期における $T_{\max(d)}$ や $T_{\min(d)}$ に対する樹木の成長応答については不明であるが、成長期の細胞壁成分の堆積には日周期性があること（Yoshida et al. 2000）が報告されている。また、形成層や分化中の仮道管は温度の変化に直接的に応答すると考察した報告（Begum et al. 2012）や、 $T_{\max(d)}$ や $T_{\min(d)}$ と樹木年輪指数との関係を検討し、 $T_{\max(d)}$ を昼間の気温、 $T_{\min(d)}$ を夜間の気温として考察した報告（Wilson et al. 2002）がある。また、光合成は日射のある昼間に行なわれており、光合成速度は気温によっても制限を受けることが知られている（Larcher 2004）。

$T_{\min(m)}$ と $T_{\max(m)}$ に対する成長応答の違いが、「明け方から早朝の気温」と「日中の気温」に対する成長応答の違いであるかどうか樹木年輪年代学の手法を用いた研究事例を蓄積するとともに、他の方法での検討が必要である。しかし、そのようなことが明らかになれば「形成層活動の再開に及ぼす休止期の気温の制限」や「細胞壁の肥厚に及ぼす当年活動期の気温の制限」は1日の中でも「日中の気温」に関連しているとともに、その制限が表れ始める時期には「明け方から早朝」に生じる最低気温に関連していると、本節での結果を考察できる。

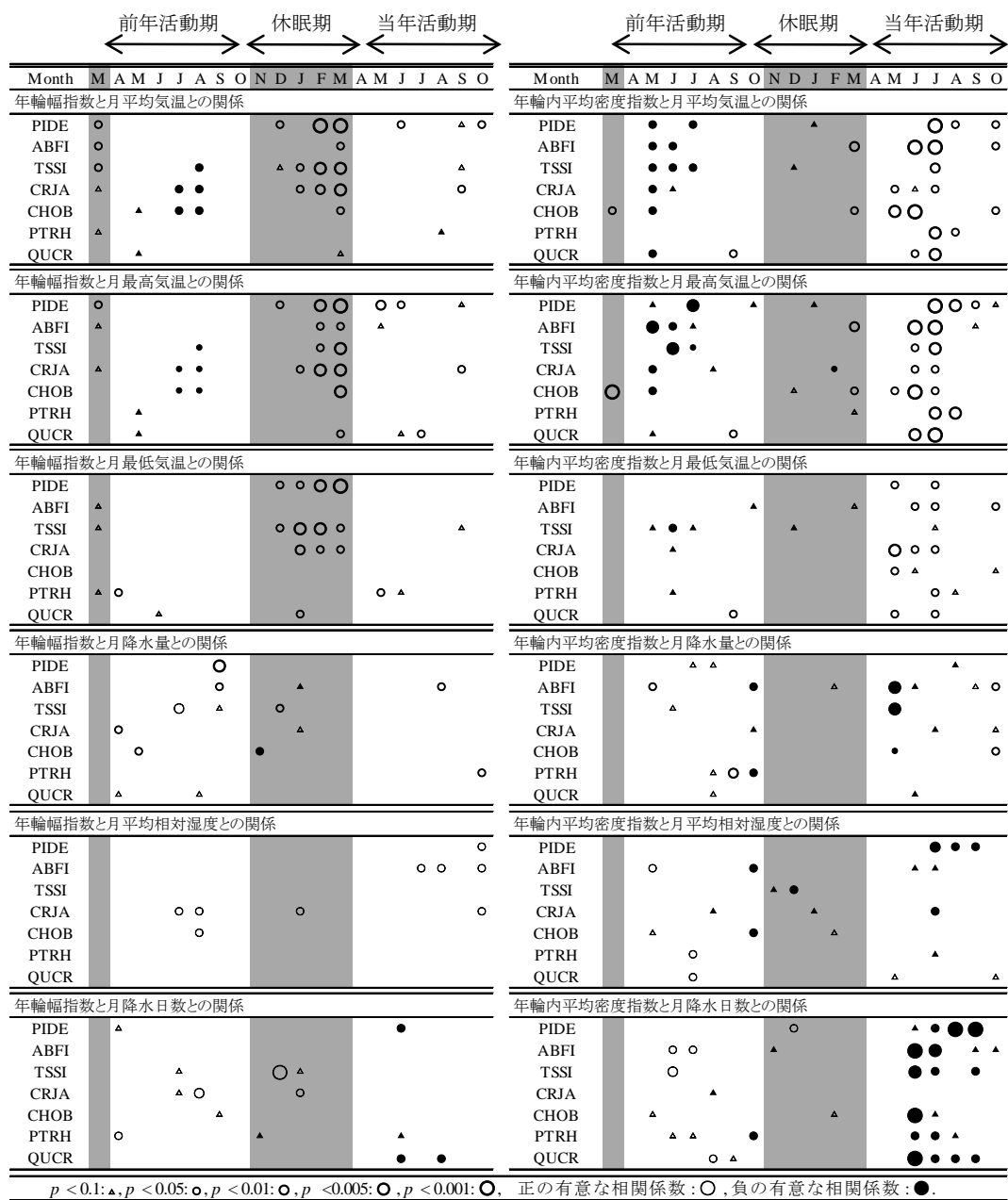


Fig. 4.1. 7 樹種の樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例：Table 2.1 を参照

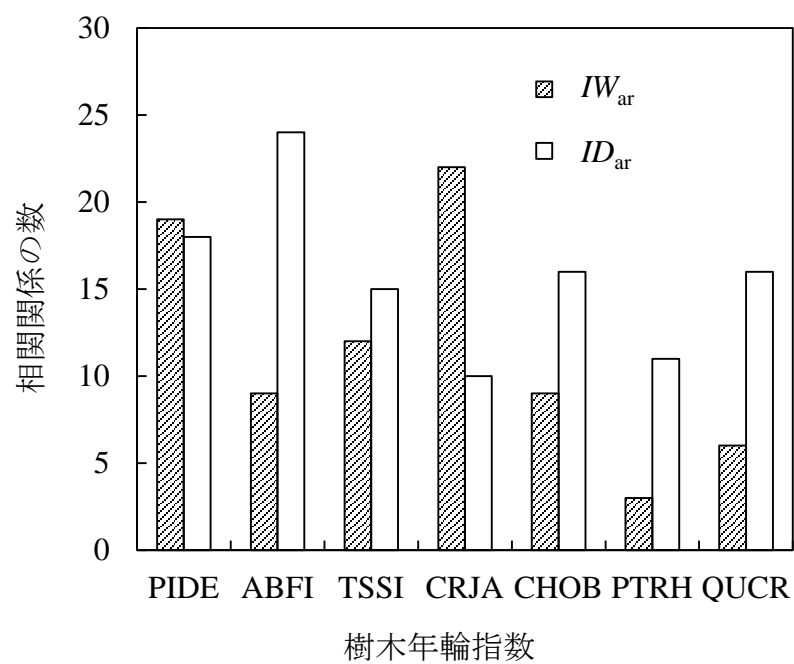


Fig. 4.2. 樹木年輪変数と気候変数との間で有意であった相関関係の数

凡 例 : **Table 2.1**, IW_{ar} : 年輪幅指数, ID_{mean} : 年輪内平均密度指数

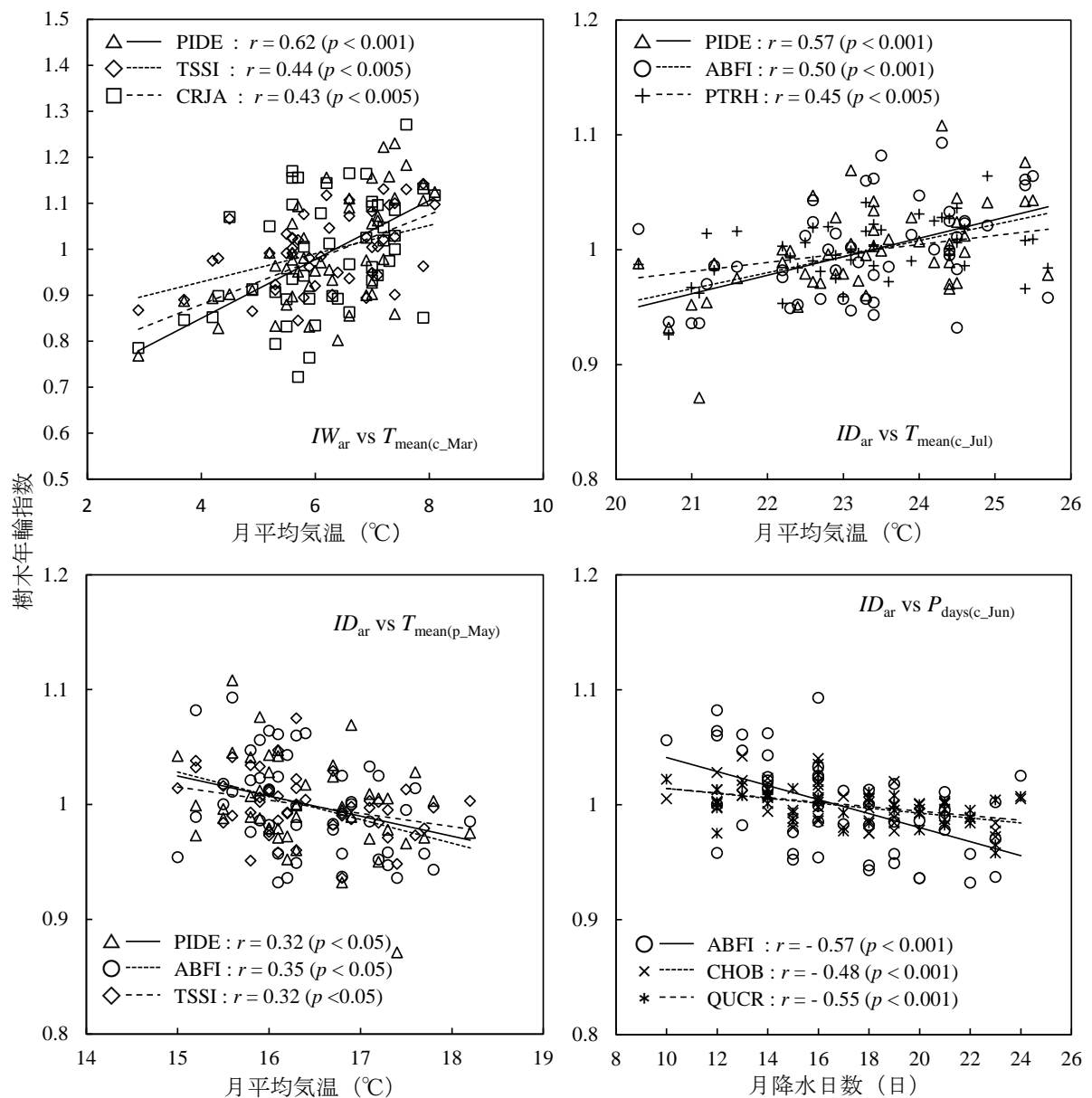


Fig. 4.3. 複数樹種間に共通した有意な樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例：Table 2.1 を参照， IW_{ar} ：年輪幅指数， ID_{mean} ：年輪内平均密度指数，

$T_{mean(c_Mar)}$ ：当年 3 月の平均気温， $T_{mean(c_Jun)}$ ：当年 6 月の平均気温，

$T_{mean(p_May)}$ ：前年 5 月の平均気温， $P_{days(c_Jun)}$ ：当年 6 月の降水日数

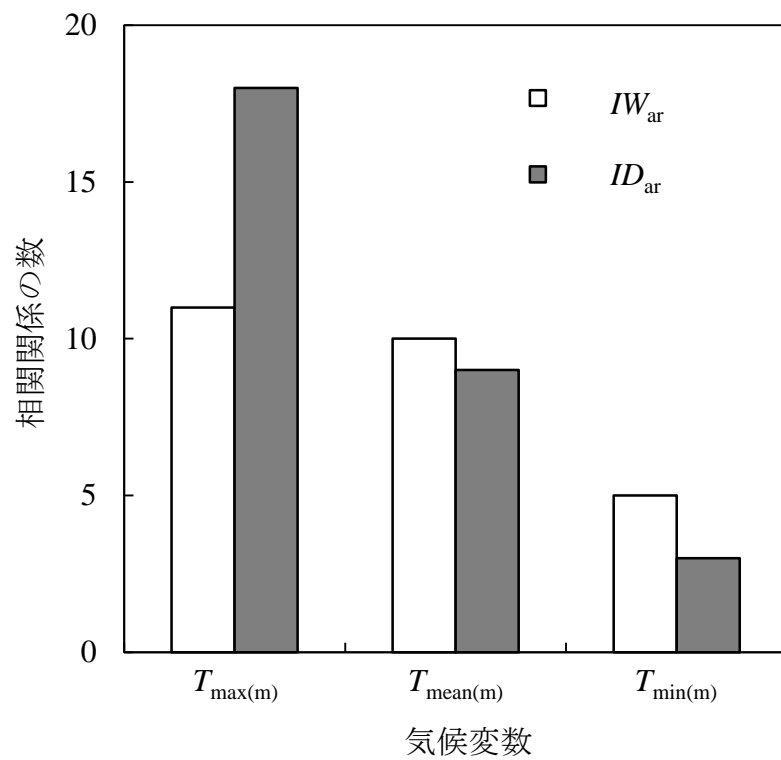


Fig. 4.4. 有意な相関係数(**Fig. 4.1** で示した)の絶対値が $T_{max(m)}$ と $T_{mean(m)}$ と $T_{min(m)}$ の中で最も大きかった相関関係の数

凡 例 : IW_{ar} : 年輪幅指数, ID_{mean} : 年輪内平均密度指数, $T_{mean(m)}$: 月平均気温, $T_{max(m)}$: 月最高気温, $T_{min(m)}$: 月最低気温

4.1.4 結論

本節では、「樹木年輪情報の種類」として「樹種」に着目し、供試樹木として選択した針葉樹 5 樹種と広葉樹 2 樹種について、樹木年輪－気候関係を解析し、その関係について 7 樹種間の比較を行った。

その結果、1) 東京都奥多摩地域に生育する複数樹種間に共通した有意な相関関係が、 IW_{ar} と当年休止期（1 月から 3 月）の $T_{mean(m)}$ との間、 ID_{mean} と当年活動期（5 月から 8 月）の $T_{mean(m)}$ との間、 ID_{mean} と前年活動期（5 月から 7 月）の $T_{mean(m)}$ との間、 ID_{mean} と当年活動期（6 月から 9 月）の $P_{days(m)}$ との間で確認された。つまり、生育環境が共通となるような一定地域内に生育する樹木は樹種（針葉樹や広葉樹を含む）が異なっても共通した気候応答を行っていることがわかった。そして、1 樹種では不明瞭な樹木年輪－気候関係であっても複数樹種で共通点を検討することで見落とさずに検討することができたと考える。

2) 上述の樹種間に共通した 4 つの相関関係には樹種による違いも確認できた。どの樹種が気候変数との間に有意な相関関係がより表れやすいということではなく、その違いは樹種による特徴が表れていると考える。また、このような樹種による特徴は、樹種数を増やすほど明確にできるようになると考える。

3) 気温に関する気候変数の $T_{max(m)}$ と $T_{min(m)}$ と $T_{mean(m)}$ は、樹木年輪指数との相関関係が似た傾向であったが、 $T_{max(m)}$ は $T_{mean(m)}$ や $T_{min(m)}$ よりも樹木年輪指数との間に有意な相関関係が多く、その相関係数 (r) の絶対値は大きかった。そして、 $T_{min(m)}$ を「明け方から早朝の気温」、 $T_{max(m)}$ を「日中の気温」として樹木の気候応答を考察することは有用であると考ええる。しかしながら、このような視点で考察した報告はわずかであるため多くの研究の蓄積が望まれる。

4.2 針葉樹 5 樹種における樹木年輪変数間の比較

4.2.1 はじめに

本研究で用いた測定方法である軟 X デンシトメトリでは年輪幅や年輪内平均密度以外の樹木年輪変数を得ることができる (Schwingruber et al. 1978 ; Cook et al. 1990)。軟 X 線デンシトメトリを用いて針葉樹における複数の樹木年輪変数ごとに構築された指数を得て樹木年輪－気候関係を検討した報告 (Conkey et al. 1979 ; 齊藤 1989 ; 野堀 1994 ; 安江ら 1994 ; Chen et al. 2010 ; Chen et al. 2012) では、異なる樹木年輪指数は有意な相関関係を示す気候変数に共通点と相違点があることが示されている。またそれら樹木年輪変数と木材組織との関連も報告されている (Wimmer et al. 2000 ; Yasue et al. 2000 ; Wang et al. 2002 ; Silkin et al. 2003 ; Momoi et al. 2005)。しかしながら、樹木年輪－気候関係の樹木年輪指数による違いについての報告は少なく、各樹木年輪変数が記録している樹木の気候応答に関する情報は十分には把握できていない。

そこで本節では、「樹木年輪指数」に着目し、針葉樹 5 樹種における 9 種類の樹木年輪変数ごとに構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。なお、広葉樹 2 樹種については次の第 4.3 節で述べた。

4.2.2 方法

a) 樹木年輪情報

樹木年輪情報として、第 4.1 節で用いたアカマツとモミ、ツガ、スギ、ヒノキにおける年輪幅指数 (IW_{ar}) および年輪内平均密度指数 (ID_{mean}) に加えて、第 2 章で構築した早材幅指数 (IW_{ew})、晩材幅指数 (IW_{lw})、早材密度指数 (ID_{ew})、晩材密度指数 (ID_{lw})、年輪内最大密度指数 (ID_{max})、年輪内最小密度指数 (ID_{min})、晩材率指数 (IP_{lw}) の計 9 種類の樹木年輪指数のクロノロジーを用いた。

b) 樹木年輪指数と気候変数との単相関分析

第 4.1 節と同様に、樹木年輪－気候関係を検討するために、樹木年輪指数のクロノロジーと気候変数の時系列との間の単相関分析を行った。気象資料として東京都水道局水源林管理事務所奥多摩出張所（「奥多摩」、**Fig. 2.1**）を用い、気候変数には前年 3 月（前年の形成層活動開始直前）から当年 10 月（当年の形成層活動停止）までの計 20 ヶ月分の月平均気温（ $T_{\text{mean(m)}}$ ）と月最高気温（日最高気温の月平均値： $T_{\text{max(m)}}$ ）、月最低気温（日最低気温の月平均値： $T_{\text{min(m)}}$ ）、月平均相対湿度（ $H_{\text{mean(m)}}$ ）、月降水量（ $P_{\text{total(m)}}$ ）、月降水日数（0.1 mm 以上： $P_{\text{days(m)}}$ ）を用いた。また、単相関分析の統計期間は、 $H_{\text{mean(m)}}$ 以外の 5 種類については記録が存在する 1954 年から樹木年輪資料が得られた 2000 年までの計 47 年間とした。 $H_{\text{mean(m)}}$ については 1960 年から 2000 年までの計 41 年間とした。

4.2.3 結果と考察

a) 樹木年輪－気候関係における樹種間の共通点

a-1) 幅に関する樹木年輪指数と気候変数との関係

各樹種における樹木年輪－気候関係について、アカマツは **Fig. 4.5** に、モミは **Fig. 4.6** に、ツガは **Fig. 4.7** に、スギは **Fig. 4.8** に、ヒノキは **Fig. 4.9** に示した。

まず、5 樹種において共通する樹木年輪－気候関係を把握するために、各気候変数に対して 5 %水準で有意な r を示した樹種数（ n_{sp} ）を調べた（**Table 4.2**）。なお、樹木年輪指数は、幅または材密度別に形成された順に並ぶように配置した（**Fig. 3.31** 参照）。

IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} について n_{sp} をみると（**Table 4.2**），①前年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ との間に正の相関関係（「 $IW-T_{\text{(p-Mar)}}$ 」の相関関係），②前年 7 月と 8 月の $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$ との間に負の相関関係（「 $IW-T_{\text{(p-Jul/Aug)}}$ 」の相関関係），③当年 1 月か

ら3月までの $T_{\max(m)}$ および $T_{\text{mean}(m)}$, $T_{\min(m)}$ との間に正の相関関係 (「 $IW-T_{(c\text{-}Jan/Mar)}$ 」の相関関係) の計3つの相関関係が、複数樹種に共通して確認できた。

その中で「 $IW-T_{(c\text{-}Mar)}$ 」と「 $IW-T_{(p\text{-}Jul/Aug)}$ 」の相関関係は、前年との相関関係であるとともに、指数の違いによって n_{sp} に大きな違いはなかった。一方、「 $IW-T_{(c\text{-}Jan/Mar)}$ 」の相関関係は、当年1月から当年3月までの間で IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} の順に早い時期から n_{sp} が増加しており、樹木年輪変数間の違いが見受けられた。 $T_{\max(m)}$ が他の気候変数よりも樹木年輪指数との間に有意な r を多く示したため、 $T_{\max(m)}$ と幅に関する樹木年輪指数との間に得られた r を5樹種で平均した値 (\bar{r}_{sp}) を **Fig. 4.10** に示した。 \bar{r}_{sp} の季節変化は n_{sp} の季節変化と似ていた。

a-2) 材密度に関する樹木年輪指数と気候変数との関係

ID_{\min} , ID_{ew} , ID_{mean} , ID_{lw} , ID_{\max} について n_{sp} をみると (**Table 4.2**), ①前年5月の $T_{\max(m)}$ および $T_{\text{mean}(m)}$ との間に負の相関関係 (「 $ID-T_{(p\text{-}May)}$ 」の相関関係), ②当年5月の $P_{\text{total}(m)}$ との間に負の相関関係 (「 $ID-P_{\text{total}(c\text{-}May)}$ 」の相関関係), ③当年5月から10月までの $T_{\max(m)}$ および $T_{\text{mean}(m)}$ との間に正の相関関係 (「 $ID-T_{(c\text{-}May/Oct)}$ 」の相関関係), ④当年5月から9月までの $P_{\text{days}(m)}$ との間に負の相関関係 (「 $ID-P_{\text{days}(c\text{-}May/Sep)}$ 」の相関関係) の計4つの相関関係が、複数樹種に共通して確認できた。

その中で、「 $ID-T_{(p\text{-}May)}$ 」の相関関係は、 ID_{\min} と ID_{lw} において n_{sp} が少ないが、 ID_{ew} と ID_{\max} とでは同程度であった。「 $ID-P_{\text{total}(c\text{-}May)}$ 」の相関関係は、 ID_{lw} や ID_{\max} よりも ID_{ew} や ID_{\min} において n_{sp} が多かった。「 $ID-T_{(c\text{-}May/Oct)}$ 」の相関関係は、 n_{sp} が ID_{\min} と ID_{ew} では当年5月から7月とで、 ID_{lw} と ID_{\max} では当年7月から10月とで多く確認できる傾向があった。また、 ID_{mean} はそれらの中間的な傾向であった。「 $ID-P_{\text{days}(c\text{-}May/Sep)}$ 」の相関関係は、「 $ID-T_{(c\text{-}May/Oct)}$ 」の相関関係と同様な傾向があり、その傾向はわずかではあるが $P_{\text{total}(m)}$ や $H_{\text{mean}(m)}$ においても見られた。

$T_{\max(m)}$ と材密度に関する樹木年輪指数との間に得られた r を5樹種で平均した値(\bar{r}_{sp})をFig. 4.11に示した。当然、 \bar{r}_{sp} の季節変化は n_{sp} の季節変化と似ていたが、特に「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係において \bar{r}_{sp} では、 n_{sp} よりも細かな樹木年輪指数間の違いが見られた。つまり、 ID_{min} や ID_{ew} との \bar{r}_{sp} は5月から大きくなり始め、6月で最大となり、7月で小さくなり、8月以降は無相関となっていた。一方、 ID_{lw} や ID_{max} との \bar{r}_{sp} は、 ID_{min} や ID_{ew} との \bar{r}_{sp} が小さくなり始めた7月から急激に大きくなり、8月で最大となり、それ以降10月まであまり小さくならなかった。また、7月と8月は ID_{max} よりも ID_{lw} との \bar{r}_{sp} の方が大きかったが、9月と10月では ID_{max} との \bar{r}_{sp} の方が大きかった。 n_{sp} では、9月において ID_{lw} や ID_{max} はともに2樹種と減るが、 \bar{r}_{sp} はあまり小さくなっておらず、この関係が途切れているのではないことがわかった。そして、 ID_{mean} は、7月において他の材密度に関する樹木年輪指数を比べて最も高い \bar{r}_{sp} を示しており、 ID_{ew} と ID_{lw} との中間的な傾向を示していることがわかった。

a-3) 当年活動期以前の気候による木部形成への制限

「 $IW-T_{(p-Mar)}$ 」と「 $IW-T_{(p-Jul/Aug)}$ 」, 「 $ID-T_{(p-May)}$ 」の相関関係から、前年活動期の気候による木部形成への制限は早材部または晩材部に関わらず現れると考える。このことは他の報告でも同様であった(安江ら 1994; Chen et al. 2010; Chen et al. 2012; Wimmer et al. 2000)。つまり、前年に生産され、蓄積された光合成産物は、当年形成層活動の全期間において木部形成を制限している可能性がある。

また、「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係において、休眠期の気候による木部形成への制限は、より早い時期ほど晩材部よりも早材部に現れ、また $T_{\max(m)}$ よりも $T_{\min(m)}$ によって現れていた。この時期は休眠期中でも休止期にあたると考えられるが、休止期においてスギの樹幹に局所加温処理を行うことにより形成層活動の再開を誘導できることが報告されている (Oribe et al. 2001)。つまり、この

時期の気温によって休眠打破や形成層の再活動化が制限を受ける可能性がある。しかし、3月では IW_{lw} においても4樹種で有意な r が確認された。 W_{lw} に関連する早晚材の移行や形成層帯での細胞分裂停止の時期が樹冠量の違いによって左右されるとの報告 (Funada et al. 1990) がある。この樹冠量の違いが光合成産物の量の違いを示しているのならば、この時期の気温によって光合成産物の量が増減することによって細胞分裂停止の時期が左右され、そのことによって W_{lw} も制限される可能性がある。

a-4) 当年活動期の気候による木部形成への制限

「 $ID-P_{total(c-May)}$ 」と「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」, 「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係から、当年活動期の気候による木部形成への制限は、同時期に形成中の部位に現れると考える。このような材密度の指数における気温に対する早材部と晩材部の相関関係の時期的な違いはこれまでも報告されている (野堀 1994 ; 安江ら 1994 ; Chen et al. 2010 ; Chen et al. 2012)。さらに、細胞壁量についても同様なことが北部中央シベリアに生育するカラマツ2樹種で確認されている (Silkin et al. 2003)。また、5月から早材部での n_{sp} が増え、7月で早材部と晩材部での n_{sp} が逆転し、それ以降10月まで晩材部での n_{sp} が多いままであるという季節変化は、仮道管の二次壁形成の季節変化 (島地 1979, 第3.2節) と似ている。このようなことから、材密度を決定する細胞数、細胞径、細胞壁厚のうち、細胞壁厚がこの相関関係により関連していると考えられる。つまり、当年活動期の気候は仮道管の二次壁形成を直接的に制限している可能性がある。もしそうならば、樹木年輪-気候関係を、仮道管の二次壁形成の季節変化に関する情報として検討に加えることができる可能性がある。

また、「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係が認められた気候変数と樹木年輪指数との組み合わせは、「 $ID-P_{total(c-May)}$ 」と「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係、さらに当年6

月から9月までの $H_{\text{mean(m)}}$ との間に負の相関関係が認められる組み合わせと重なっている。これら3つの相関関係は水分に関する気候変数であるが $P_{\text{total(m)}}$ は早材部に、 $P_{\text{days(m)}}$ は早材部と晩材部の両方に、そして $H_{\text{mean(m)}}$ は晩材部にと、有意な r を示す樹種数が多くなる部分に違いがあった。

b) 樹木年輪－気候関係における樹種間の違い

先に、各樹種における樹木年輪－気候関係について、アカマツは Fig. 4.5 に、モミは Fig. 4.6 に、ツガは Fig. 4.7 に、スギは Fig. 4.8 に、ヒノキは Fig. 4.9 に示した。前述 a) で示した樹木年輪－気候関係における樹種間の共通点を基に、各樹種の特徴を把握した。

b-1) アカマツ

「 $IW-T_{(c\text{-Jan/Mar})}$ 」の相関関係は明瞭であった。また、「 $ID-T_{(c\text{-May/Oct})}$ 」の相関関係において、早材（6月と7月）と晩材（7～10月）との違いが明瞭であった。また、「 $ID-P_{\text{days}(c\text{-May/Sep})}$ 」の相関関係も明瞭であり、「 $ID-T_{(c\text{-May/Oct})}$ 」の相関関係が不明瞭となった8月と9月においては「 $ID-P_{\text{days}(c\text{-May/Sep})}$ 」の相関関係が明瞭になっていた。また、当年成長期において $P_{\text{total(m)}}$ や $H_{\text{mean(m)}}$ においても有意な r が認められた。また、アカマツにのみ当年活動期の気温と幅に関する樹木年輪指数との間に明らかな相関関係が認められた。そして、 IW_{ew} は5月、 IW_{ar} は5月と6月、 IW_{lw} は6～10月の $T_{\text{max(m)}}$ との間に有意な r が認められた。 IW_{ew} と IW_{lw} はともに ID_{ew} と ID_{lw} が $T_{\text{max(m)}}$ との間に有意な相関関係を示した月（ ID_{ew} : 6月と7月、 ID_{lw} : 7～10月）よりも1ヶ月早い月との間に有意な相関関係が認められたことになる。このことは第3章で把握した新生細胞の拡大段階と二次壁形成（肥厚）段階との時間差と似ている。つまり、同時期に形成中の部位にあたる樹木年輪指数との間に有意な r が現れていたといえる。また、特に6～10月

の $T_{\max(m)}$ との間では ID_{lw} や ID_{\max} と同等以上に IW_{lw} は有意な r が認められた。第 3.1 節で述べたが、アカマツ晩材部の仮道管は他の樹種に比べてその放射径の減少が少ないことと関連している可能性がある。

b-2) モミ

「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係は不明瞭であり、他の樹種では IW_{lw} よりも IW_{ew} との間に明瞭な相関関係が表れるのに対して、モミでは IW_{lw} に表れ、 IW_{ew} とは有意な r が認められなかった。また、「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係は明瞭であり、また、早材（5～7 月）と晩材（8～10 月）との違いも明瞭であった。一方で、「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係は早材（5～7 月）では明瞭であったが、晩材（8～10 月）とでは不明瞭であった。また、特に 5 月においては $P_{total(m)}$ に、最も明瞭な相関関係が認められた。

b-3) ツガ

「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係明瞭であった。「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係や「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係はにおいて、 ID_{min} では有意な r が認められなく晩材（ ID_{lw} , ID_{\max} ）では明瞭であった。

b-4) スギ

「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係は明瞭であった。一方で、「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係は 5 樹種の中で最も不明瞭であった。また、「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係は認められなかった。さらに、 $P_{total(m)}$ や $H_{mean(m)}$ においても有意な r がほとんど認められなかった。

b-5) ヒノキ

「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係は3月とのみであり、 IW_{lw} とは有意な r が認められなかった。一方、「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係において、早材（5月と6月）と晩材（7～10月）との違いが明瞭であった。

b-6) 樹種間の違いのまとめ

「 $IW-T_{(p-Jul/Aug)}$ 」の相関関係について、各樹種を相関関係がより明瞭な順に並べると、スギとヒノキ（7月と8月）、ツガ（8月）、モミとアカマツ（無相関）の順となった。「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係について、各樹種を相関関係がより明瞭な順に並べると、アカマツ（12～3月）、スギ（1～3月）、ツガ（2月と3月）、モミ（2月と3月、晩材のみ）とヒノキ（3月）の順となった。この「 $IW-T_{(p-Jul/Aug)}$ 」と「 $IW-T_{(c-Jan/Mar)}$ 」の相関関係について、樹種の違いの原因は考察できなかった。

「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係について、各樹種を相関関係がより明瞭な順に並べると、モミとヒノキ、アカマツ、ツガ、スギの順となった。また、この関係について、特に早材部の樹木年輪指数との間に有意な r が認められた月が早い順に並べると、ヒノキとスギ（5月と6月）、モミ（5～7月）、アカマツとツガ（6月と7月）の順となった。相関関係がより明瞭な順の原因は考察できなかったが、有意な r が認められた月が早い順は、ヒノキとスギ（ヒノキ科）がモミとアカマツとツガ（マツ科）よりも早い時期に形成層活動を再開させるためではないかと考えた。

「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係について、各樹種を相関関係がより明瞭な順に並べると、アカマツとモミとツガ、ヒノキ、スギ（無相関）の順となった。また、「 ID と当年成長期の $P_{total(m)}$ や $H_{mean(m)}$ との間」の相関関係について、各樹種を相関関係がより明瞭な順に並べると、アカマツ、モミ、ツガとヒノキ、スギの順となり、この「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」との相関関係とほぼ同じであった。これらの相関関係はともに水分条件との関係である。一般にいわれている「マツ尾根、

ヒノキ中腹，スギ沢」は，斜面上の各位置の環境条件と重要な造林 3 樹種の生態生理学的特性のつながりを的確に表している（畑野ら 1987）とされる。アカマツでは，スギとヒノキに比べ，わずかな水分不足によって気孔の抵抗が増すので，光合成速度が早くから下がる（根岸 1978）。このような樹種による違いが木部形成についてもある可能性がある。つまり，この相関関係の樹種による違いは，水分条件に対する成長応答の樹種による違いが現れているのではないかと考えられる。

その他の樹種間の共通点においては樹種間の違いが明らかにできなかった。

また，樹種間における共通点ではなかったが，アカマツにのみ当年成長期の気温と幅に関する樹木年輪指数との間に明らかな相関関係が認められた。そして，「 $ID-P_{\text{days(c-May/Sep)}}$ 」の相関関係や「 ID と当年成長期の $P_{\text{total(m)}}$ や $H_{\text{mean(m)}}$ との間」の相関関係と同様に，同時期に形成中の部位にあたる樹木年輪指数との間に有意な r が現れていた。この点についてもアカマツは他の 4 樹種の針葉樹と比べて独特な成長特性を持っていると考えられる。

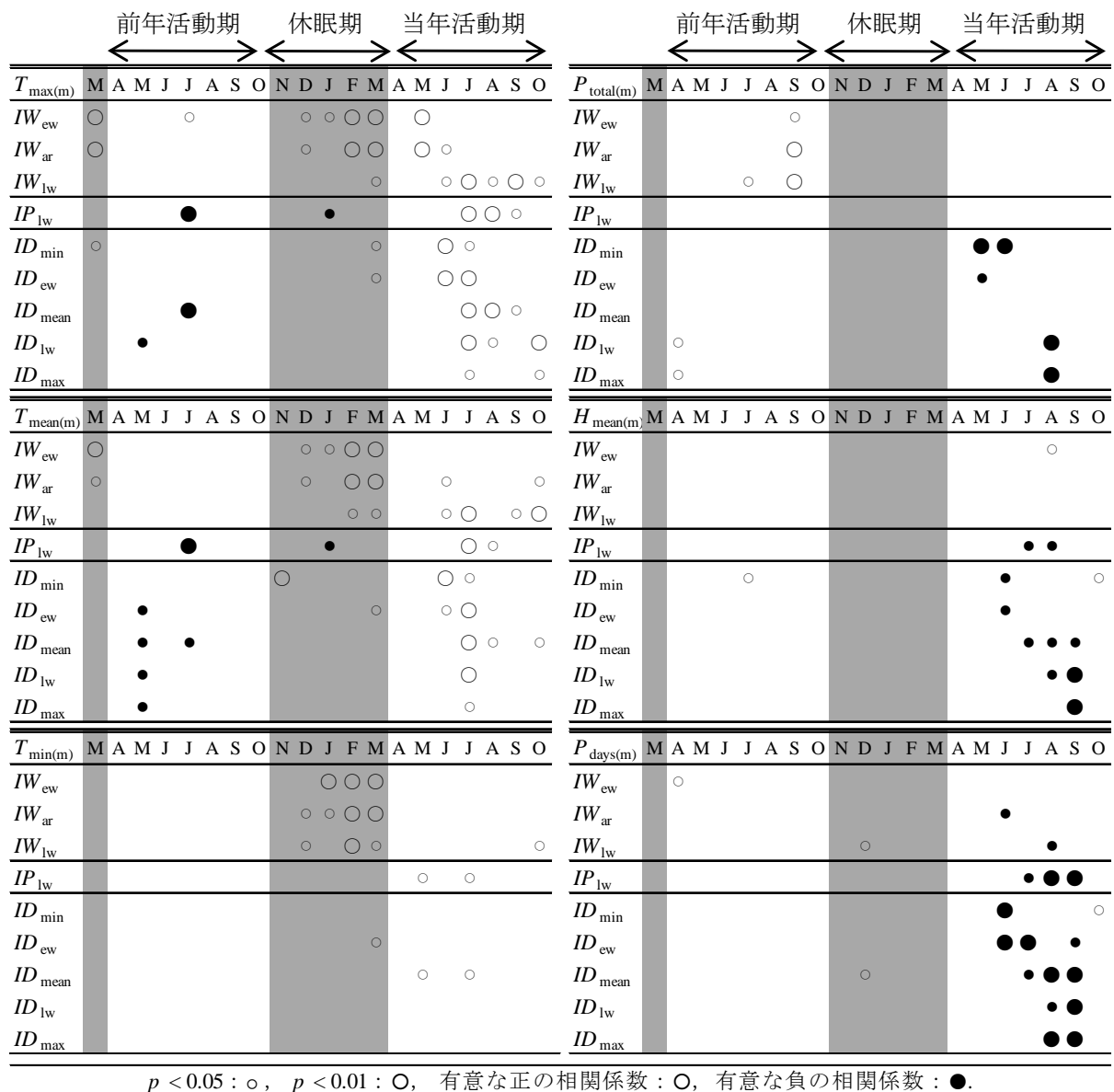


Fig. 4.5. アカマツの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Table 3.5** を参照, $T_{\text{mean}(m)}$: 月平均気温, $T_{\text{max}(m)}$: 月最高気温, $T_{\text{min}(m)}$: 月最低気温, $P_{\text{total}(m)}$: 月降水量, $H_{\text{mean}(m)}$: 月平均相対湿度, $P_{\text{days}(m)}$: 月降水日数

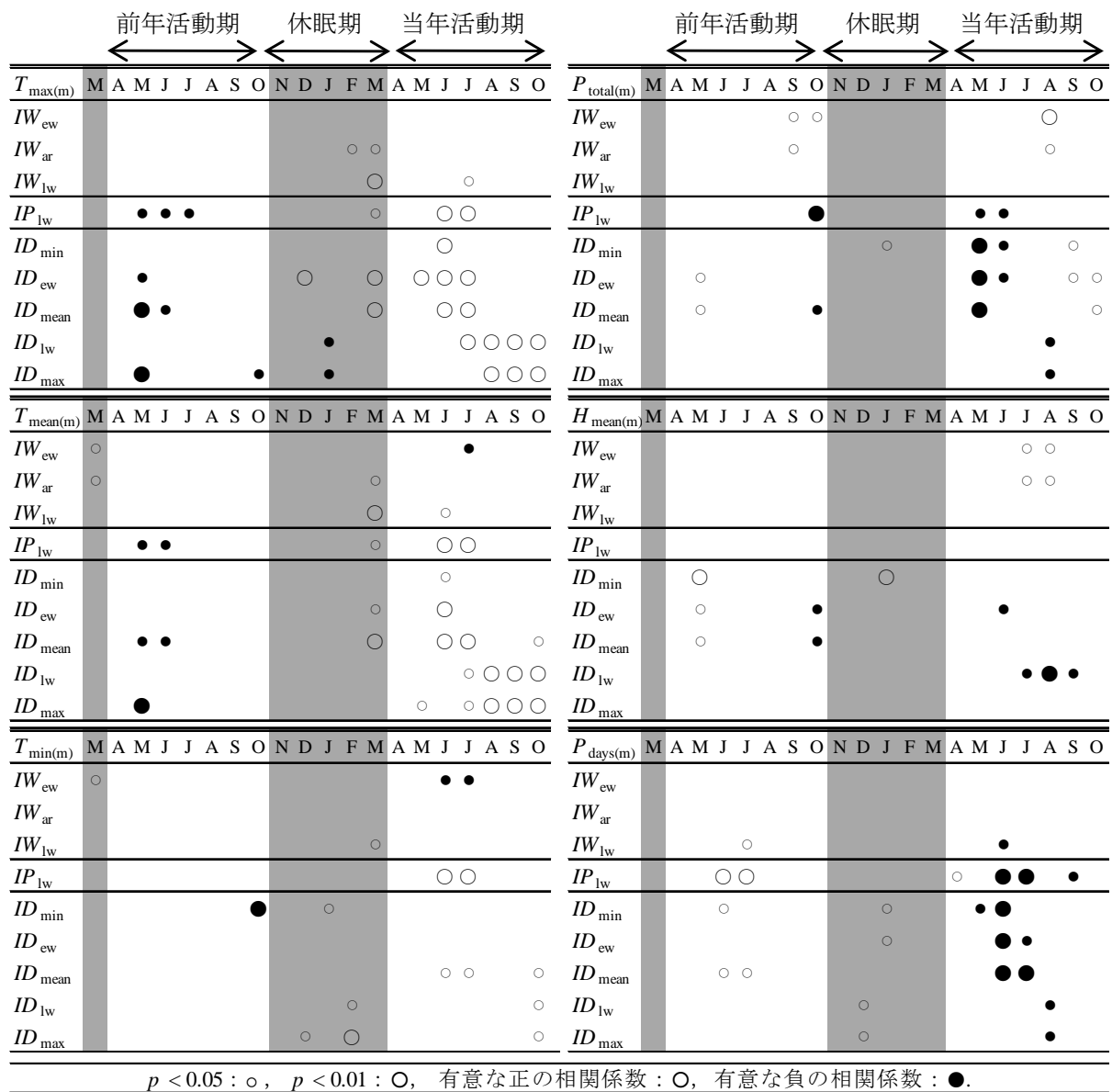


Fig. 4.6. モミの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

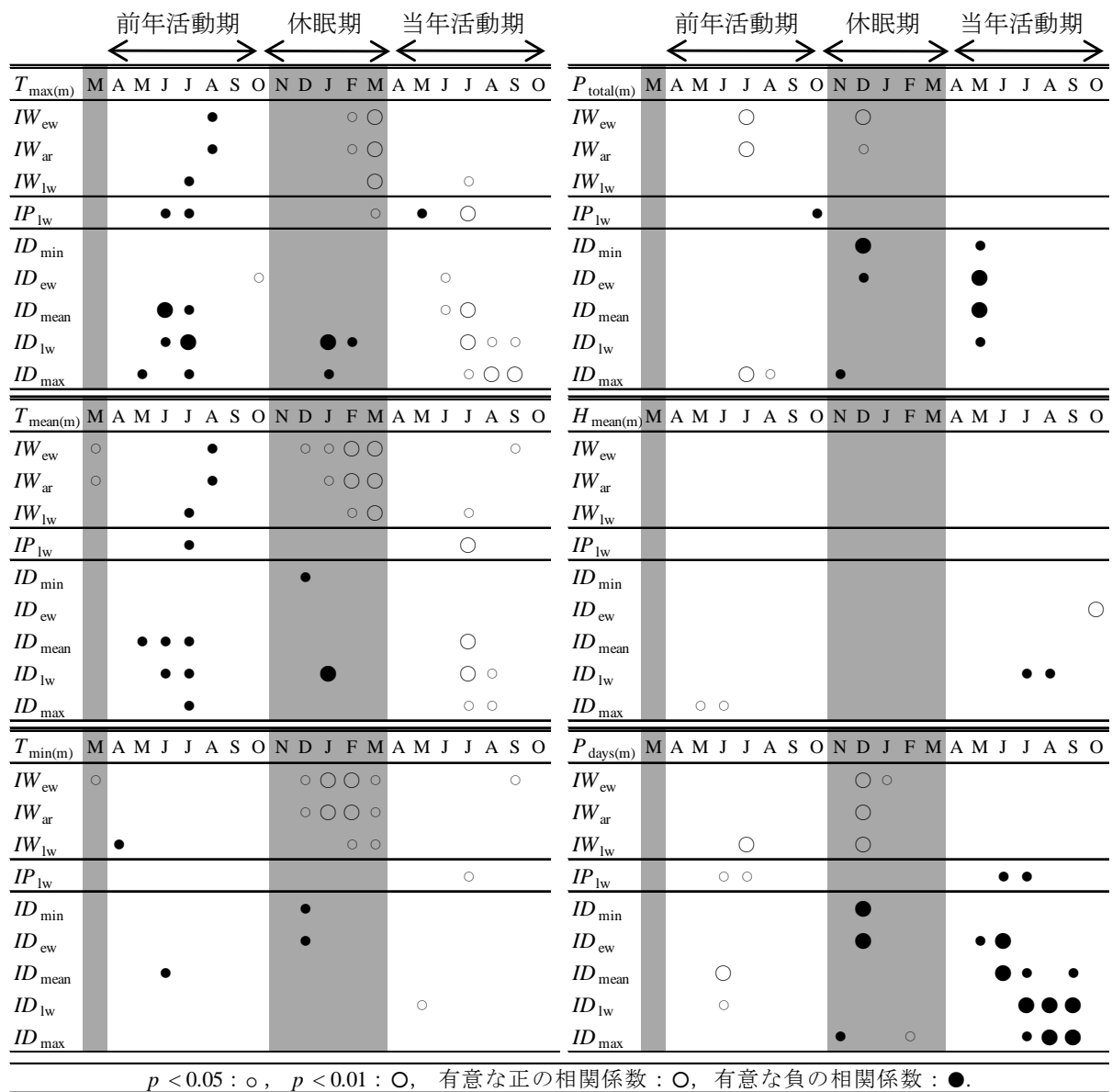


Fig. 4.7. ツガの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

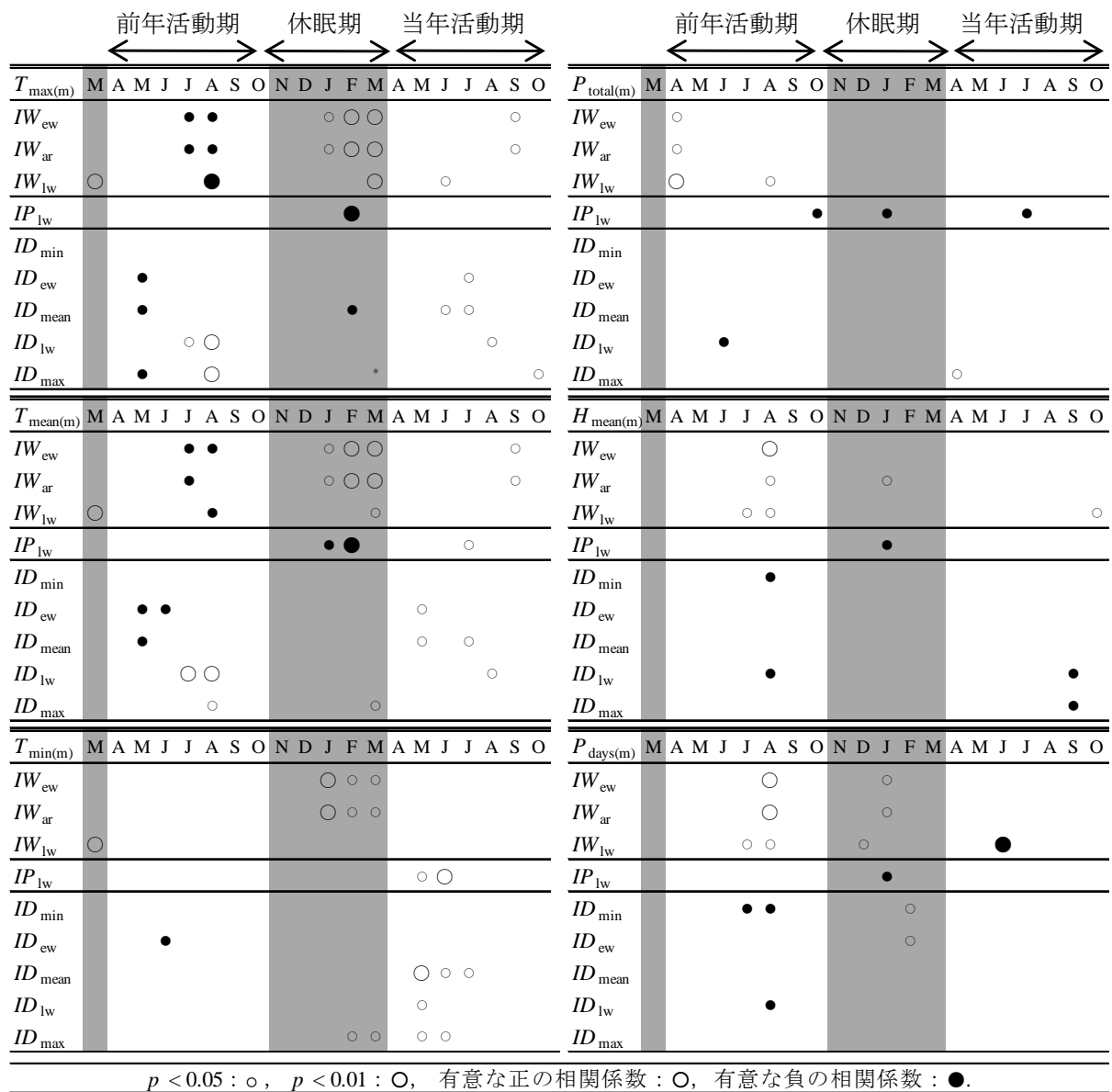


Fig. 4.8. スギの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

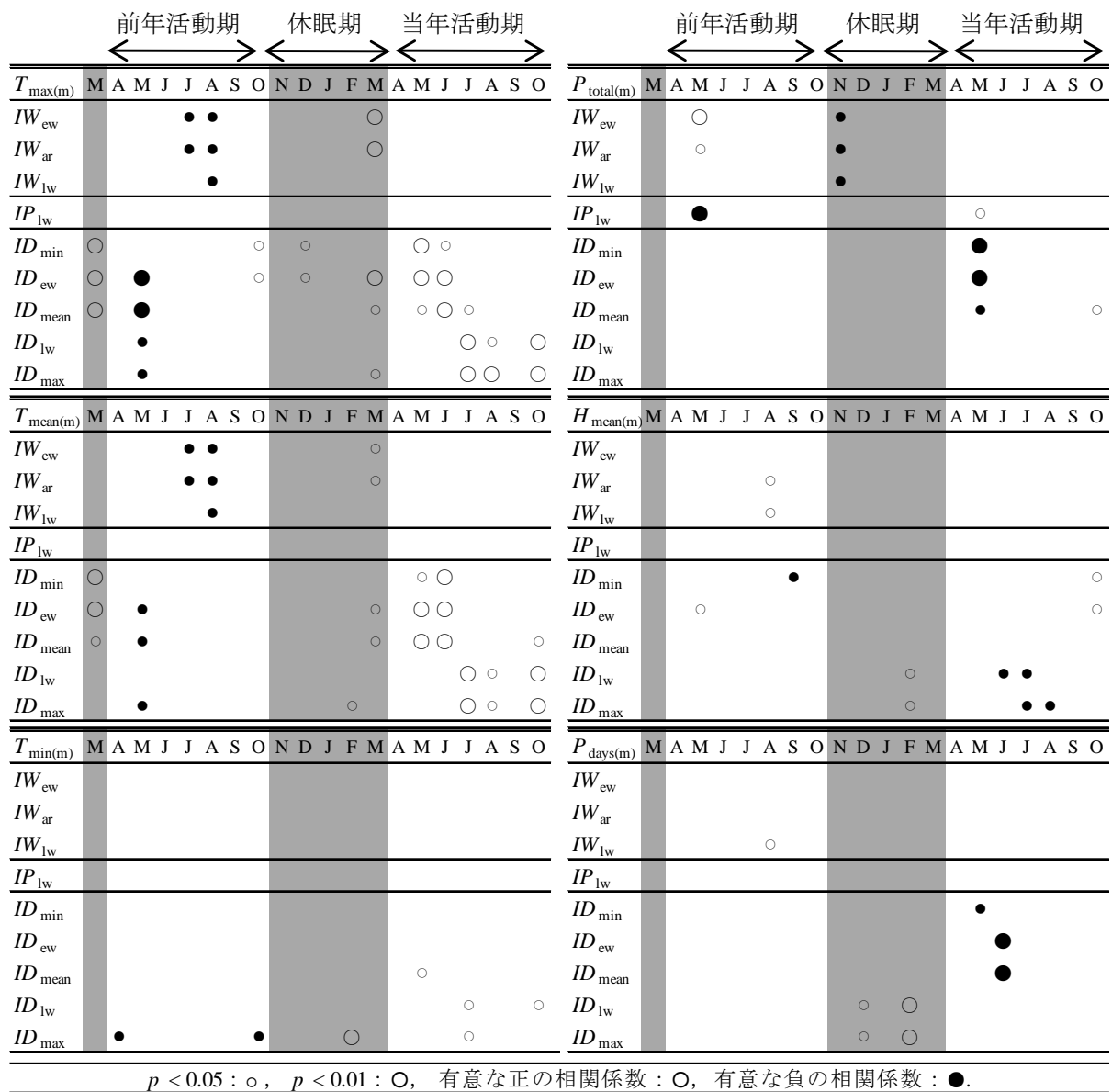


Fig. 4.9. ヒノキの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

Table 4.2. 樹木年輪指数と気候変数との間に有意な相関係数が認められた樹種数

前年活動期 ← 休眠期 → 当年活動期 →													前年活動期 ← 休眠期 → 当年活動期 →												
$T_{\max(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}	①			②	③					①	②	③	④		①					①					
IW_{ar}	①			②	③					①	①	④	⑤		①	①			①						
IW_{lw}	①			①	②							④			①	③	①	①	①						
IP_{lw}			①	②	③					①	①	②		①	①	③	①	①							
ID_{\min}	②							①		①			①		①	③	①								
ID_{ew}	①		③					②		②			③		②	④	③								
ID_{mean}	①		③	②	②						①	②		①	④	⑤	①	①							
ID_{lw}			②	①	①	①				②	①					④	⑤	②	③						
ID_{\max}			④		①	①		①		②		②				③	③	②	④						
$T_{\text{mean}(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}		③			②	②				②	③	③	④					①		②					
IW_{ar}		③			②	③				①	②	③	⑤			①		①	①						
IW_{lw}		①			①	②					②	④			②	②		①	①						
IP_{lw}			①	①	②					②	①	①			①	④	①								
ID_{\min}	①							①	①					①	③	①									
ID_{ew}	①		③	①							②		②	③	①										
ID_{mean}	①		⑤	②	②						②		②	②	④	①			③						
ID_{lw}			①	①	①	①			①						④	④	①	②							
ID_{\max}			③		①	①			①	①		①		①	④	③	①	②							
$T_{\min(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}	②									①	③	③	③			①	①		①						
IW_{ar}										②	③	③	③												
IW_{lw}	①	①							①		②	③								①					
IP_{lw}													②	②	③										
ID_{\min}								①		①	①														
ID_{ew}			①						①			①													
ID_{mean}			①										③	②	③			①							
ID_{lw}										①		②		①				②							
ID_{\max}		①						①	①	①	③	①		①	①	①				①					
$P_{\text{total}(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}		①	①		①		②	①	①	①										①					
IW_{ar}		①	①		①		②		①	①										①					
IW_{lw}		①			①	①	①		①																
IP_{lw}			①					③			①					①	①	①							
ID_{\min}										①	①						④	②		①					
ID_{ew}			①							①							④	①		①					
ID_{mean}			①						①								③			②					
ID_{lw}		①		①													①		②						
ID_{\max}		①			①	①			①						①				②						
$H_{\text{mean}(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}						①				①								①	②						
IW_{ar}						②				①								①	①	①					
IW_{lw}					①	②														①					
IP_{lw}										①				①		③	①								
ID_{\min}		①	①	①	①				①							②				②					
ID_{ew}		③						①		①						②				②					
ID_{mean}		①						②		①								②	①	①					
ID_{lw}			①		①							①				①	④	④	③						
ID_{\max}		①	①	①					①								①	②	②						
$P_{\text{days}(m)}$	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O					
IW_{ew}	①				①				①	②							①								
IW_{ar}					①				①	①							②								
IW_{lw}				③	②				③								②		①						
IP_{lw}			②	②					①			①		②	③	①	②								
ID_{\min}		①	①	①					①	①	①			②	②					①					
ID_{ew}									①	①	①			①	④	②		①							
ID_{mean}		②	①						①					③	③	①	②								
ID_{lw}		①		①					②	①						①	③	②							
ID_{\max}									①	②	②					①	③	②							

凡 例：Table 3.5, Fig. 4.5 を参照

注：表中の数値は樹木年輪指数と気候変数との間に有意な相関係数が認められた樹種数を示した。正の有意な相関関係には白い丸で囲んだ数字を、負の有意な相関関係には黒い丸で囲んだ数字で示した。3 樹種以上で有意な相関係数が認められた関係は網掛けで示した。

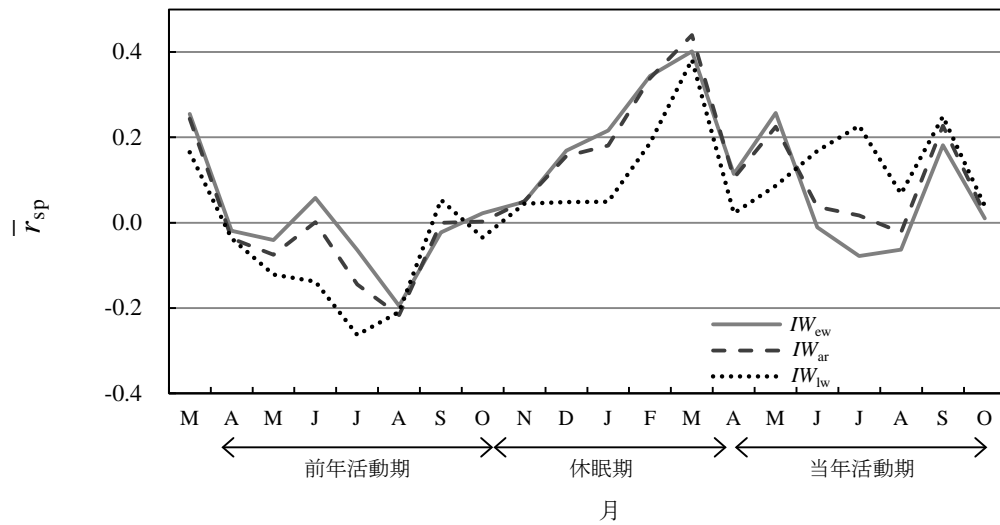


Fig.4.9. 幅に関する樹木年輪指数と気候変数との相関関係（針葉樹 5 樹種平均：

\bar{r}_{sp} ）の季節変化

凡 例：Table 4.2 を参照

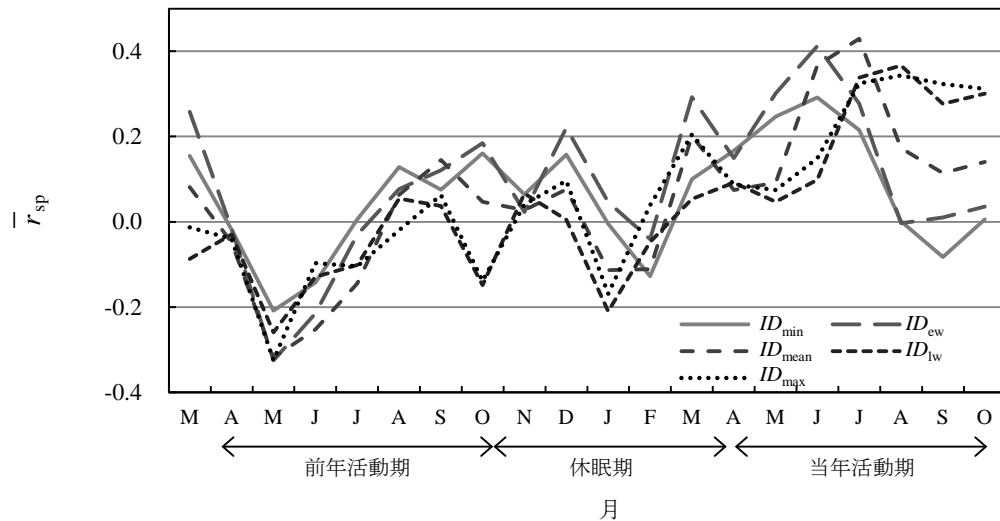


Fig.4.10. 材密度に関する樹木年輪指数と気候変数との相関関係（針葉樹 5 樹種

平均： \bar{r}_{sp} ）の季節変化

凡 例：Table 4.2 を参照

4.2.4 結論

本節では、「樹木年輪変数」に着目し、供試樹種を針葉樹 5 樹種に絞り、9 種類の樹木年輪変数から構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。

その結果、1) 幅に関する樹木年輪指数について、複数の樹種間に共通して有意な相関関係が、前年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ との間、前年 7 月と 8 月の $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$ との間、当年 1 月から 3 月までの $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$, $T_{\text{min(m)}}$ との間、において確認できた。その中で、当年 1 月から 3 月までの $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$, $T_{\text{min(m)}}$ との間の相関関係は、当年 1 月から 3 月までの間で IW_{ew} , IW_{ar} , IW_{lw} の順に早い時期から、 n_{sp} (各気候変数に対して 5 %水準で有意な r を示した樹種数) が増加しており、樹木年輪変数間の違いが見受けられた。当年の気候変数とは多くの樹種間に共通した有意な相関関係が認められなかった。

2) 材密度に関する樹木年輪指数について、多くの樹種間に共通して有意な相関関係が、前年 5 月の $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$ との間、当年 5 月の $P_{\text{total(m)}}$ との間、当年 5 月から 10 月までの $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$ との間、当年 5 月から 9 月までの $P_{\text{days(m)}}$ との間、において確認できた。その中で、当年 5 月から 10 月までの $T_{\text{max(m)}}$ および $T_{\text{mean(m)}}$ との間の相関関係は、 n_{sp} が ID_{min} と ID_{ew} では当年 5 月から 7 月とで、 ID_{lw} と ID_{max} では当年 7 月から 10 月とで多く確認できた。 ID_{mean} はそれらの中間的な傾向であった。当年 5 月から 9 月までの $P_{\text{days(m)}}$ との間にも同様な傾向が見受けられた。つまり、材密度に関する樹木年輪指数が有意な r を示す当年活動期の気候変数は、その材密度に関する樹木年輪指数 (変数) が形成されたと考えられる時期の気候変数であることがわかった。このことより、樹木年輪－気候関係の情報を木部形成活動の季節変化に関する情報として検討に加えることができる可能性がある。

3) 樹木年輪－気候関係における樹種による違いが確認できた。特に、アカマ

ツにのみ当年成長期の気温と幅に関する樹木年輪指数との間に明らかな相関関係が認められた。「 $ID-T_{(c-May/Oct)}$ 」の相関関係について、特に早材部の樹木年輪指数との間に有意な r が認められた月が早い順に並べると、ヒノキとスギ（5月と6月）、モミ（5～7月）、アカマツとツガ（6月と7月）の順となり、この違いは、ヒノキとスギがモミやアカマツとツガよりも早い時期に形成層活動を再開させるためではないかと考えた。また、「 $ID-P_{days(c-May/Sep)}$ 」の相関関係と「 ID と当年成長期の $P_{total(m)}$ や $H_{mean(m)}$ との間」の相関関係をまとめると、アカマツ、モミ、ツガ、ヒノキ、スギの順に相関関係がより明瞭であり、この相関の樹種による違いは、水分条件に対する応答の樹種による違いが表れているのではないかと考えた。

以上のことから、どの樹木年輪指数にもそれぞれ木部形成に関する情報が含まれていると考えられるため、気候に敏感に応答していないとしても検討に加えておく必要があることがわかった。そのため、今後、複数の樹木年輪指数を用いて得られた樹木年輪－気候関係の情報が蓄積されていくことが望まれる。

4.3 広葉樹 2 樹種における樹木年輪変数の比較

4.3.1 はじめに

広葉樹は組織構造が複雑であるため、年輪構造や組織構造と年輪の幅や材密度との関係を検討した報告（深沢ら 1972；船田ら 1995）はあるが、多くの樹種については明らかとなっていない。環孔材の樹種については、1 年輪を孔圏幅と孔圏外幅とに分けて樹木年輪－気候関係を検討した報告がある（安江 2001, Lebourgeois 2004）。また、材密度に関する樹木年輪変数ごとに構築された指数を用いて樹木年輪－気候関係を検討した報告（涌井ら 2008；眞山ら 2011）は少ない。散孔材の樹種についてはそのような報告が見当たらない。

このように広葉樹については複数の樹木年輪変数ごとに構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析した報告が少ないため、そのような研究成果を蓄積していく必要がある。

そこで本節では、第 4.2 節に続き、広葉樹 2 樹種における 9 種類の樹木年輪変数から構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。

4.3.2 方法

a) 樹木年輪情報

樹木年輪情報として、第 4.1 節で用いたサワグルミとミズナラにおける年輪幅指数 (IW_{ar}) および年輪内平均密度指数 (ID_{mean}) に加えて、第 2 章で構築した、早材幅指数 (IW_{ew})、晩材幅指数 (IW_{lw})、早材密度指数 (ID_{ew})、晩材密度指数 (ID_{lw})、年輪内最大密度指数 (ID_{max})、年輪内最小密度指数 (ID_{min})、晩材率指数 (IP_{lw}) の計 9 種類の樹木年輪指数のクロノロジーを用いた。樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係、各樹木年輪指数間の関係は第 3.2 節で示したが、散孔材の樹種であるサワグルミの晩材は年輪界直前の小径かつ厚壁の木部繊維

が接線方向に並ぶ高密度な部分（以下、年輪界直前の高密度部）に当たり、早材はそれ以外の部分にあたる。また、環孔材樹種であるミズナラの早材は孔圏部、晩材は孔圏外部にあたる。

b) 樹木年輪指数と気候変数との単相関分析

第 4.1 節と同様に、樹木年輪－気候関係を検討するために、樹木年輪指数のクロノロジーと気候変数の時系列との間の単相関分析を行った。気象資料として東京都水道局水源林管理事務所奥多摩出張所（「奥多摩」、**Fig. 2.1**）を用い、気候変数には前年 3 月（前年の形成層活動開始直前）から当年 10 月（当年の形成層活動停止）までの計 20 ヶ月分の月平均気温（ $T_{\text{mean(m)}}$ ）と月最高気温（日最高気温の月平均値： $T_{\text{max(m)}}$ ）、月最低気温（日最低気温の月平均値： $T_{\text{min(m)}}$ ）、月平均相対湿度（ $H_{\text{mean(m)}}$ ）、月降水量（ $P_{\text{total(m)}}$ ）、月降水日数（0.1 mm 以上： $P_{\text{days(m)}}$ ）を用いた。また、単相関分析の統計期間は、 $H_{\text{mean(m)}}$ 以外の 5 種類については記録が存在する 1954 年から樹木年輪資料が得られた 2000 年までの計 47 年間とした。 $H_{\text{mean(m)}}$ については 1960 年から 2000 年までの計 41 年間とした。

4.3.3 結果と考察

a) サワグルミ

サワグルミにおいて樹木年輪－気候関係を解析した結果を **Fig. 4.12** に示した。なお、樹木年輪指数は、幅または材密度別に形成された順に並ぶように配置した（**Fig. 3.31** 参照）。

幅に関する樹木年輪指数は、どの気候変数とも明らかな相関関係は認められなかった。一方、材密度に関する樹木年輪指数は、当年 6 月から 8 月の気温に関する気候変数（ $T_{\text{max(m)}}$ 、 $T_{\text{min(m)}}$ 、 $T_{\text{mean(m)}}$ ）との間に有意な r が確認された。この相関関係において、年輪界直前の高密度部以外の部分の材密度指数（ ID_{min} 、

ID_{ew}) は当年 7 月と 8 月の気温と有意な正の r が認められたのに対して、年輪界直前の高密度部の材密度指数 (ID_{max} , ID_{lw}) は当年 6 月と 7 月の気温と有意な正の r が認められた。つまり、各樹木年輪変数が形成された順序と異なっていた。この原因については不明である。この原因を明らかにするためには、 ID_{max} や ID_{lw} にあたる年輪界直前の高密度部の小径かつ厚壁の数細胞がどのような形成過程を持つか明らかにする必要がある。

また、 ID_{min} 以外の 4 種類の材密度に関する樹木年輪指数は、当年 6 月から 10 月の月降水日数 ($P_{days(m)}$) との間に有意な負の r が確認された。この相関関係において、 ID_{max} 以外の 3 つの樹木年輪指数が当年 6 月と 7 月の $P_{days(m)}$ と有意な r が認められたのに対して、 ID_{max} は当年 6 月から 9 月までの $P_{days(m)}$ と有意な r が認められた。この相関関係の場合は各樹木年輪変数が形成された順序となっていた。

b) ミズナラ

ミズナラにおいて樹木年輪－気候関係を解析した結果を **Fig. 4.13** に示した。なお、樹木年輪指数は、幅または材密度ごとに形成された順に並ぶように配置した (**Fig. 3.31** 参照)。つまり、ミズナラの場合は他の樹種と異なり、年輪内最大密度は孔圏外部の始めに現れることが多く、さらにその位置は 1 年輪内の中央よりも前部にある。そのため、 ID_{ew} と ID_{mean} との間に配置した。

幅に関する樹木年輪指数の中で IW_{lw} と IW_{ar} について、当年 3 月と当年 7 月の $T_{max(m)}$ との間に正の、当年 6 月と 8 月の $P_{days(m)}$ との間に負の有意な r が認められた。一方、 IW_{ew} においても当年 7 月の $T_{max(m)}$ との間に有意な r が認められたが負の相関関係であった。

材密度に関する樹木年輪指数について前年 9 月と当年 4 月から 7 月の間の気温に関する気候変数 ($T_{max(m)}$, $T_{min(m)}$, $T_{mean(m)}$) との間に有意な r が確認された。

この相関関係について、 $T_{\text{mean(m)}}$ との関係をみると、有意な r が認められるのは ID_{min} と ID_{ew} では 4 月、 ID_{max} では 5 月と 6 月、 ID_{mean} と ID_{lw} では 6 月と 7 月との間であり、各樹木年輪変数が形成された順序となっていた。また、 ID_{mean} と ID_{lw} では当年 6 月から 9 月までの $P_{\text{days(m)}}$ との間に負の有意な r が認められた。

以上のように、ミズナラにおいては孔圏部と孔圏外部の樹木年輪指数が持つ情報は明確に異なることがわかった。そして、その違いは各樹木年輪変数が形成された時期と関係があると考ええる。

また、材密度に関する樹木年輪指数についてミズナラはサワグルミよりも早い時期の気温との間に有意な相関関係が認められた。同じ地域に生育する環孔材の樹種と散孔材の樹種において、開葉時期がほぼ同じであっても環孔材の樹種では開葉より先に肥大成長を始め、散孔材の樹種では開葉から一定期間後に肥大成長を始めるため肥大成長を開始する時期の違いが明確である（小見山 1991）とのことである。つまり、このことがミズナラがサワグルミよりも早い時期の気温との間に有意な相関関係が認められた原因である可能性がある。もしそうならば、針葉樹と同様に樹木年輪－気候関係を木部形成活動の季節変化に関する情報として検討に加えることができる可能性がある。

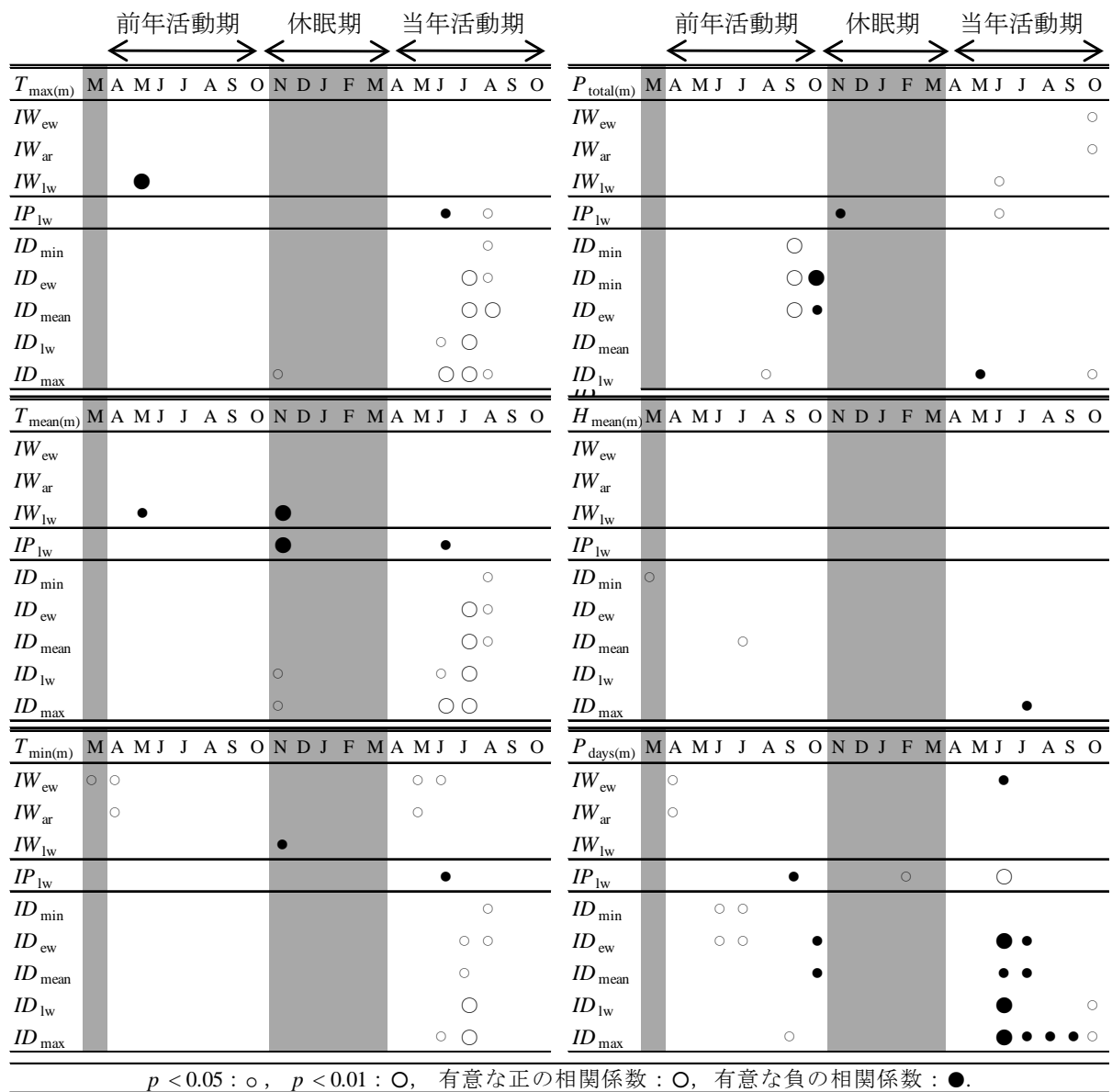


Fig. 4.12. サワグルミの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

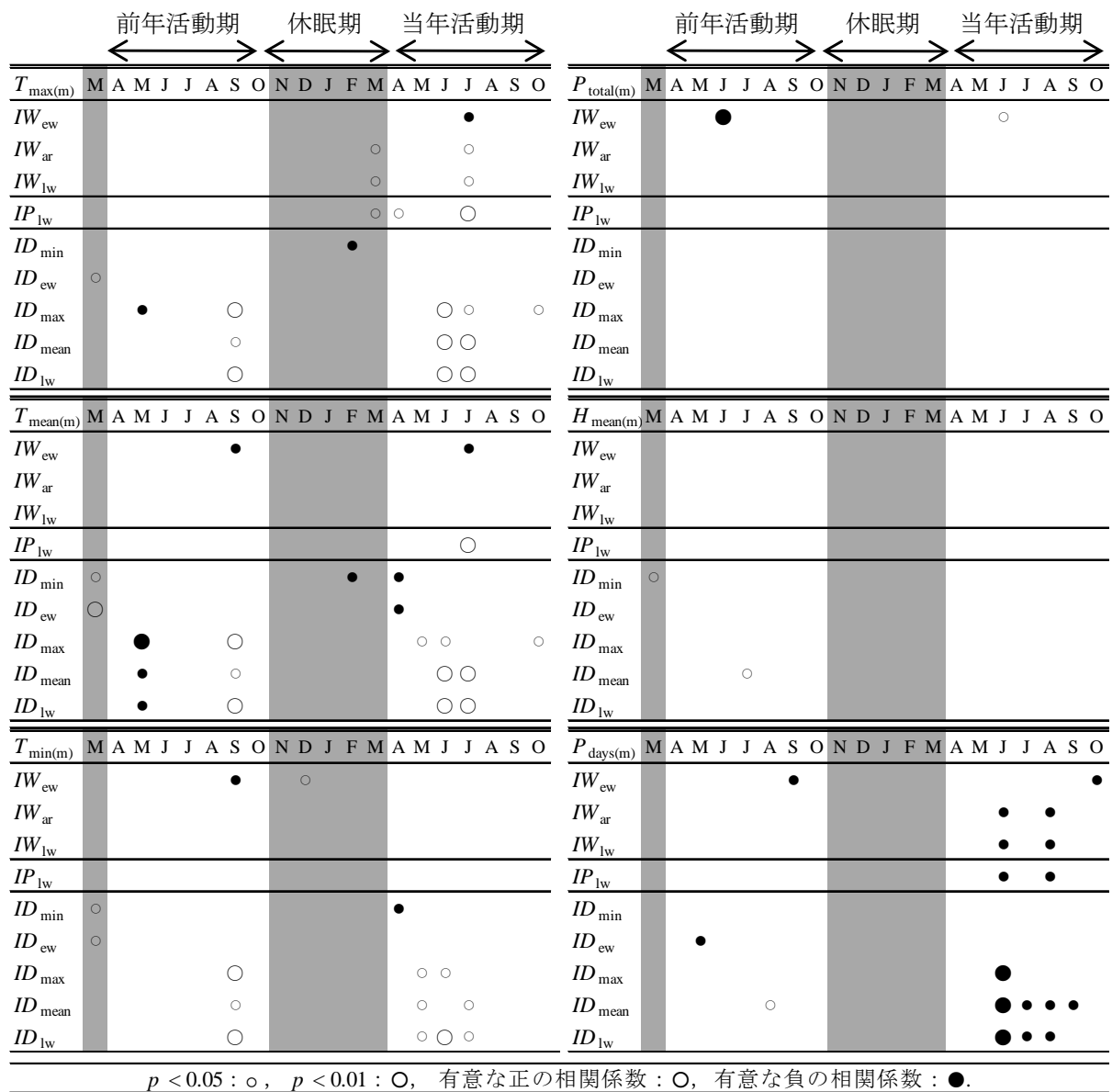


Fig. 4.13. ミズナラの樹木年輪指数と気候変数との相関関係

凡 例 : **Fig. 4.5** を参照

4.3.4 結論

本節では、第 4.2 節に続き「樹木年輪指数」に着目し、広葉樹 2 樹種における 9 種類の樹木年輪変数から構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。

その結果、1) サワグルミについて、幅に関する樹木年輪指数は、どの気候変数とも明らかな相関関係は認められなかった。また、材密度に関する樹木年輪指数は、当年 6 月から 8 月の気温に関する気候変数 ($T_{\max(m)}$, $T_{\min(m)}$, $T_{\text{mean}(m)}$) との間に有意な相関関係が確認された。この当年活動期の気温と材密度に関する樹木年輪指数との関係は、年輪界直前の高密度部以外の部分の材密度指数 (ID_{\min} , ID_{ew}) は当年 7 月と 8 月の気温と有意な正の r が認められたのに対して、年輪界直前の高密度部の材密度指数 (ID_{\max} , ID_{lw}) は当年 6 月と 7 月の気温と有意な正の r が認められた。つまり、各樹木年輪変数が形成された順序と異なっていた。一方、 ID_{\min} 以外の材密度に関する 4 つの樹木年輪指数は、当年 6 月から 10 月の月降水日数 ($P_{\text{days}(m)}$) との間に有意な負の r が確認された。この相関関係の場合は各樹木年輪変数が形成された順序となっていた。

2) ミズナラについて、幅に関する樹木年輪指数の中で IW_{lw} と IW_{ar} について、当年 3 月および当年 7 月の $T_{\max(m)}$ との間に有意な正の r が、当年 6 月と 8 月の $P_{\text{days}(m)}$ との間に有意な負の r が認められた。一方、 IW_{ew} についても当年 7 月の $T_{\max(m)}$ との間に有意な負の r が認められた。材密度に関する樹木年輪指数について、前年 9 月の気温に関する気候変数 ($T_{\max(m)}$, $T_{\min(m)}$, $T_{\text{mean}(m)}$) との間に有意な正の r が、当年 4 月から 7 月の間の気温に関する気候変数との間に有意な正の r が確認された。 ID_{mean} と ID_{lw} では当年 6 月から 9 月までの $P_{\text{days}(m)}$ との間に有意な負の r が認められた。材密度に関する樹木年輪指数と当年 4 月から 7 月の間の $T_{\text{mean}(m)}$ との関係をみると、有意な r が認められるのは ID_{\min} と ID_{ew} では 4 月、 ID_{\max} では 5 月と 6 月、 ID_{mean} と ID_{lw} では 6 月と 7 月との間であり、各樹木

年輪変数が形成された順序となっていた。

以上のように、広葉樹の場合も、どの樹木年輪指数にもそれぞれ木部形成に関する情報が含まれていると考えられるため、気候に敏感に応答していないとしても検討に加えておく必要があることがわかった。また、材密度に関する樹木年輪指数についてミズナラはサワグルミよりも早い時期の気温との間に有意な相関関係が認められ、この違いが肥大成長を開始する時期の樹種による違いであるならば、針葉樹と同様に樹木年輪－気候関係を木部形成活動の季節変化に関する情報として検討に加えることができる可能性がある。

一方で、広葉樹は年輪構造が多様であるため、それぞれが記録する樹木年輪－気候関係の情報も異なってくると考えられる。そのため、今後他の広葉樹についても検討に加え、樹木年輪－気候関係を明らかにしていくことが望まれる。

4.4 まとめ

第4章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「樹木年輪情報」に着目した。第4.1節では、その「樹木年輪情報」の種類として「樹種」に着目し、供試樹木として選択した針葉樹5樹種と広葉樹2樹種について、樹木年輪－気候関係を解析し、その関係について7樹種間の比較を行った。次に、「樹木年輪指数」に着目し、第4.2節では針葉樹5樹種について、第4.3節では広葉樹2樹種について、9種類の樹木年輪変数ごとに構築された樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析し、その解析結果を比較した。その結果を以下にまとめる。

1)「樹種」に着目した結果、生育環境が共通となるような一定地域内に生育する樹木は樹種（針葉樹や広葉樹を含む）が異なっても共通した気候応答を行っており、複数樹種で共通点を検討することで、1樹種では不明瞭な樹木年輪－気候関係であっても検出できることがわかった。また、その複数樹種での共通点に含まれる樹種による違いは、樹種による特徴が表れていると考えられ、樹種数を増やすことで樹種による特徴を明確にできるようになると考える。

2)「樹木年輪指数」に着目した結果、どの樹木年輪指数にもそれぞれ木部形成に関する情報が含まれていると考えられ、気候に敏感に応答していないとしても検討に加えておく必要があることがわかった。特に、材密度に関する樹木年輪指数が有意な r を示す当年活動期の気候変数は、その材密度に関する樹木年輪指数（変数）が形成されたと考えられる時期の気候変数であることがわかった。このことは樹木年輪－気候関係の情報を木部形成活動の季節変化に関する情報として検討が可能なことを示していると考ええる。また、このような傾向は針葉樹と広葉樹とも見られたが、広葉樹は年輪構造が多様であるため、それぞれ樹木年輪変数が記録する樹木年輪－気候関係の情報も異なっていると考えられた。今後、他の広葉樹について検討に加えることで、さらに多くの木部形成に関わる情報を得ることができると考える。

第5章 樹木年輪－気候関係の解析 II（気候情報の検討）

5.1 供試樹木の生育地と気象観測地との距離

5.1.1 はじめに

樹木年輪－気候関係を検討した既往の研究では供試樹木の生育地と気象観測地との距離が離れている報告がほとんどであり，両者の距離が近い報告（Chen 2010）は少ない。**Fig. 5.1** に，既往の文献（日本）における「統計期間の長さ」と「供試樹木の生育地から気象観測地までの距離」との関係を示したが，気象資料は統計期間の長いものほど供試樹木の生育地から離れていることがわかる。一方で，年輪幅の変動には同調性があるという特徴を生かして産地判別を試みた藤原ら（2011）は，より産地に近い気候変数との間に高い相関係数（ r ）が認められる確率が高いと報告している。つまり，樹木年輪－気候関係の解析結果の信頼性を向上させるためには，樹木年輪情報の情報源である供試樹木の生育地と気候情報の観測地ができるだけ近い場所である必要があると考えられる。そして，供試樹木の生育地から，どの程度まで離れた位置の気象観測地で観測された気象資料まで利用が可能なかを明らかにしておくことが必要であると考えた。また，逆に供試樹木の生育地と気象観測地との距離を近くにするものの効果を明らかにする必要があると考えた。

そこで本節では，樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」の中で「供試樹木の生育地と気象観測地との距離」に着目し，供試樹種の生育地である奥多摩と，それ以外の気象観測地で得られた気象資料とを用いて，奥多摩の樹木年輪情報との樹木年輪－気候関係を検討した。

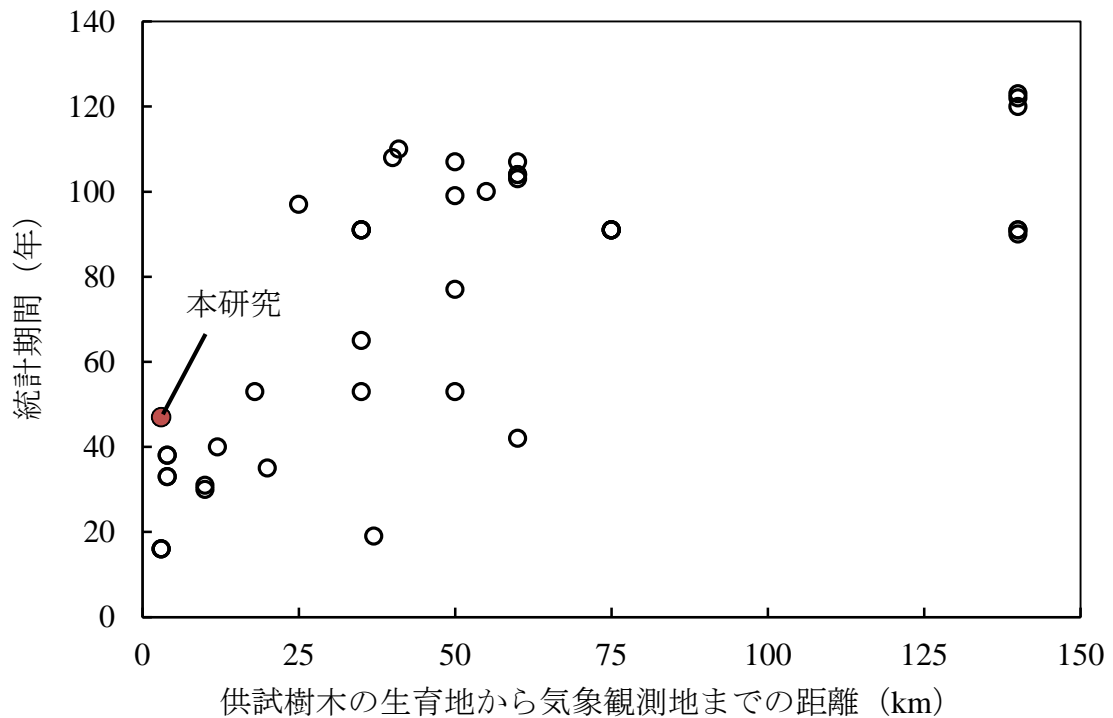


Fig. 5.1. 既往の文献（日本，1971～2013）における「統計期間の長さ」と「供試樹木の生育地から気象観測地までの距離」との関係（高橋 1971；藤原ら 1992；岸ら 1993；野堀 1994；D. D'Arrigo et al. 1997；Kobayashi et al. 1997；安江 1997；Fujiwara et al. 1999；藤原 2001；山川 2001, 2002；大山ら 2002；久保ら 2003；武市 2005；嶋田ら 2006；山瀬ら 2006；安田ら 2007；澤内ら 2007；佐々木ら 2008；涌井ら 2008, 2009；伊藤ら 2009；Takahashi 2012；桃井ら 2013）

5.1.2 方法

a) 樹木年輪情報

第 2 章で構築した針葉樹 5 樹種（アカマツ，モミ，ツガ，スギ，ヒノキ）の年輪幅指数（ IW_{ar} ）および年輪内平均密度指数（ ID_{mean} ）のクロノロジーを用いた。

b) 気候情報

気候変数には前年 3 月から当年 10 月までの月平均気温（ $T_{mean(m)}$ ）と月降水量（ $P_{total(m)}$ ）を用いた。気象観測地は，供試樹種の生育地に最も近い奥多摩（2～4 km，東京都水道局水源林管理事務所）に加え，複数の地点を選択した。奥多摩以外の気象資料としては，奥多摩で気象観測が始まった 1954 年以前から観測が行われている 133 観測地（気象庁観測，**Table 5.1**）の気象資料を選択した。なお，奥多摩から各気象観測地までの距離は緯度経度の差より算出した。標高については考慮しなかった。

c) 解析方法

第 4 章と同様に，奥多摩に加えて 133 観測地の気候変数の時系列と樹木年輪指数のクロノロジーとの間の単相関分析を行った。得られた樹木年輪－気候関係について，第 4 章で明らかにした有意な r ($p < 0.05$) が 3 樹種以上の樹種に共通して認められた次の 8 組の樹木年輪－気候関係（**Fig. 5.2**）に着目して，奥多摩からの距離や地理的分布との関係を検討した。その 8 組とは，①前年 3 月の $T_{mean(m)}$ と 3 樹種の IW_{ar} （「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Mar)}$ 」），②前年 8 月の $T_{mean(m)}$ と 3 樹種の IW_{ar} （「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Aug)}$ 」），③当年 2 月の $T_{mean(m)}$ と 3 樹種の IW_{ar} （「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Feb)}$ 」），④当年 3 月の $T_{mean(m)}$ と 5 樹種の IW_{ar} （「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Mar)}$ 」），⑤前年 9 月の $P_{total(m)}$ と IW_{ar} （「 $IW_{ar}-P_{total(p-Sep)}$ 」），⑥前年 5 月の $T_{mean(m)}$ と 5 樹種の ID_{mean}

(「 $ID_{ar}-T_{mean(p-May)}$ 」), ⑦当年 7 月の $T_{mean(m)}$ と 5 樹種の ID_{mean} (「 $ID_{ar}-T_{mean(c-Jul)}$ 」),
⑧当年 5 月の $P_{total(m)}$ と 3 樹種の ID_{mean} (「 $IW_{ar}-P_{total(c-May)}$ 」) である。

⑤「 $IW_{ar}-P_{total(p-Sep)}$ 」の相関関係は 2 樹種（アカマツ，モミ）とのみ有意であったが， $P_{total(m)}$ との間に 3 樹種以上に共通して有意な相関が認められた組み合わせが少なかったため，アカマツやモミと同じマツ科であるツガを合わせた 3 樹種で，この組み合わせについても検討した。また，⑦「 $ID_{ar}-T_{mean(c-Jul)}$ 」の相関関係では，ヒノキとは有意な r が認められなかったが，ヒノキを合わせた 5 樹種とした。

統計期間は 1954 年から 2000 年までの 47 年間とした。

Table 5.1. 気象観測地（気象庁）の概要

	観測所名	北緯	東経	標高(m)	奥多摩からの 距離(km)
1	秩父	35°59.4′	139°04.4′	232.1	19.3
2	熊谷	36°09.0′	139°22.8′	30.0	45.6
3	河口湖	35°30.0′	138°45.6′	859.6	45.7
4	甲府	35°40.0′	138°33.2′	272.8	50.7
5	東京	35°41.1′	139°45.6′	6.1	62.9
6	前橋	36°24.3′	139°03.6′	112.1	65.3
7	横浜	35°26.3′	139°39.1′	39.1	66.4
8	梶井沢	36°20.5′	138°32.8′	999.1	75.7
9	三島	35°06.8′	138°55.5′	20.5	79.3
10	網代	35°02.8′	139°05.5′	66.9	85.4
11	諏訪	36°02.7′	138°06.5′	760.1	91.6
12	つくば	36°03.4′	140°07.5′	25.2	97.7
13	宇都宮	36°32.9′	139°52.1′	119.4	107.6
14	松本	36°14.7′	137°58.2′	610.0	111.0
15	静岡	34°58.5′	138°24.2′	14.1	112.0
16	飯田	35°31.4′	137°49.3′	516.4	118.8
17	長野	36°39.7′	138°11.5′	418.2	123.4
18	勝浦	35°09.0′	140°18.7′	11.9	133.8
19	大島	34°44.9′	139°21.7′	74.0	135.5
20	石廊崎	34°36.1′	138°50.6′	54.7	136.6
21	水戸	36°22.8′	140°28.0′	29.3	139.4
22	銚子	35°44.3′	140°51.4′	20.1	160.6
23	高田	37°06.3′	138°14.8′	12.9	161.4
24	高山	36°09.3′	137°15.2′	560.0	169.1
25	浜松	34°42.5′	137°43.1′	31.7	174.8
26	白河	37°07.9′	140°12.9′	355.0	177.7
27	富山	36°42.5′	137°12.1′	8.6	195.9
28	若松	37°29.3′	139°54.6′	212.1	199.7
29	名古屋	35°10.0′	136°57.9′	51.1	205.3
30	小名浜	36°56.8′	140°54.2′	3.3	205.9
31	岐阜	35°24.0′	136°45.7′	12.7	215.4
32	伊良湖	34°37.7′	137°05.6′	6.2	224.1
33	新潟	37°54.7′	139°02.8′	19.0	232.5
34	金沢	36°35.3′	136°38.0′	5.7	236.4
35	福島	37°45.5′	140°28.2′	67.4	248.5
36	福井	36°03.3′	136°13.3′	8.8	259.6
37	津	34°44.0′	136°31.2′	2.7	262.4
38	輪島	37°23.5′	136°53.7′	5.2	262.4
39	彦根	35°16.5′	136°14.6′	87.3	264.4
40	敦賀	35°39.2′	136°03.7′	1.6	273.9
41	上野	34°45.7′	136°08.5′	159.2	292.1
42	山形	38°15.3′	140°20.7′	152.5	293.0
43	仙台	38°15.7′	140°53.8′	38.9	315.7
44	京都	35°00.9′	135°43.9′	41.4	317.1
45	奈良	34°41.6′	135°49.6′	104.4	321.5
46	尾鷲	34°04.2′	136°11.6′	15.3	327.5
47	舞鶴	35°27.0′	135°19.0′	2.4	343.6
48	大阪	34°40.9′	135°31.1′	23.0	348.0
49	酒田	38°54.5′	139°50.6′	3.1	349.7
50	石巻	38°25.6′	141°17.9′	42.5	350.2
51	神戸	34°41.8′	135°12.7′	5.3	373.6
52	豊岡	35°32.1′	134°49.3′	3.4	387.0
53	和歌山	34°13.7′	135°09.8′	13.9	398.7
54	潮岬	33°27.0′	135°45.6′	73.0	402.2
55	本洲	34°20.3′	134°54.3′	109.3	414.8
56	姫路	34°50.3′	134°40.2′	38.2	415.7
57	大船渡	39°03.8′	141°42.8′	36.9	428.9
58	鳥取	35°29.2′	134°14.3′	7.1	440.2
59	秋田	39°43.0′	140°05.9′	6.3	442.0
60	徳島	34°04.0′	134°34.4′	1.6	455.4
61	盛岡	39°41.9′	141°09.9′	155.2	468.2
62	津山	35°03.8′	134°00.5′	145.7	468.3
63	岡山	34°39.6′	133°55.0′	2.8	487.4
64	高松	34°19.0′	134°03.2′	8.7	488.0
65	宮古	39°38.8′	141°57.9′	42.5	495.1
66	多度津	34°16.5′	133°45.1′	3.7	515.5
67	米子	35°26.0′	133°20.3′	6.4	522.1
68	境	35°32.6′	133°14.1′	2.0	530.2
69	室戸岬	33°15.1′	134°10.6′	185.0	532.7
70	深浦	40°38.7′	139°55.9′	66.1	540.5

	観測所名	北緯	東経	標高(m)	奥多摩からの 距離(km)
71	松江	35°27.4′	133°03.9′	16.9	546.5
72	八戸	40°31.6′	141°31.3′	27.1	563.1
73	高知	33°34.0′	133°32.9′	0.5	565.1
74	青森	40°49.3′	140°46.1′	2.8	574.7
75	松山	33°50.6′	132°46.6′	32.2	616.9
76	呉	34°14.4′	132°33′	3.5	621.2
77	むつ	41°17.0′	141°12.6′	2.9	634.5
78	広島	34°23.9′	132°17.7′	3.6	638.4
79	浜田	34°53.8′	132°04.2′	19.0	645.4
80	清水	32°43.3′	133°00.6′	31.0	656.1
81	宇和島	33°13.6′	132°33.1′	2.4	664.8
82	宿毛	32°55.2′	132°41.7′	2.2	669.5
83	江差	41°52.0′	140°07.4′	3.7	677.7
84	函館	41°49.0′	140°45.2′	35.0	681.6
85	萩	34°24.6′	131°24.3′	2.2	716.9
86	室蘭	42°18.7′	140°58.5′	39.9	739.3
87	大分	33°14.1′	131°37.1′	4.6	742.5
88	浦河	42°09.7′	142°46.6′	36.7	771.7
89	下関	33°56.9′	130°55.5′	3.3	773.8
90	寿都	42°47.7′	140°13.4′	33.4	780.9
91	苫小牧	42°37.4′	141°32.8′	6.3	784.9
92	日田	33°19.3′	130°55.7′	82.9	797.6
93	倶知安	42°54.0′	140°45.4′	176.1	799.5
94	飯塚	33°39.1′	130°41.6′	37.1	804.7
95	阿蘇山	32°52.8′	131°04.4′	1142.3	805.4
96	札幌	43°03.6′	141°19.7′	17.4	827.0
97	宮崎	31°56.3′	131°24.8′	9.2	829.4
98	小樽	43°10.9′	141°01.0′	24.9	834.4
99	福岡	33°34.9′	130°22.5′	2.5	835.1
100	熊本	32°48.6′	130°42.4′	37.7	839.7
101	油津	31°34.7′	131°24.4′	2.9	852.5
102	岩見沢	43°12.7′	141°47.1′	42.3	853.1
103	佐賀	33°15.9′	130°18.3′	5.5	853.7
104	帯広	42°55.3′	143°12.7′	38.4	865.0
105	人吉	32°13.0′	130°45.3′	145.8	867.2
106	都城	31°43.8′	131°04.8′	153.8	868.5
107	佐世保	33°09.5′	129°43.6′	3.9	908.2
108	巖原	34°11.8′	129°17.5′	3.7	911.3
109	長崎	32°44.0′	129°52.0′	26.9	914.6
110	平戸	33°21.6′	129°33.0′	57.8	915.6
111	釧路	42°59.1′	144°22.6′	4.5	916.7
112	鹿児島	31°32.8′	130°32.8′	3.9	921.9
113	阿久根	32°01.6′	130°12.0′	40.1	922.2
114	旭川	43°45.4′	142°22.3′	119.8	925.3
115	牛深	32°11.8′	130°01.6′	3.0	927.5
116	留萌	43°56.7′	141°37.9′	23.6	928.3
117	種子島	30°43.2′	130°58.9′	24.9	942.4
118	枕崎	31°16.3′	130°17.6′	29.5	958.8
119	羽幌	44°21.8′	141°42.0′	7.9	974.7
120	屋久島	30°23.1′	130°39.5′	37.3	990.0
121	根室	43°19.8′	145°35.1′	25.2	1003.2
122	網走	44°01′	144°16.7′	37.6	1012.5
123	紋別	44°20.7′	143°21.3′	15.8	1014.2
124	雄武	44°34.8′	142°57.8′	15.8	1027.3
125	北見枝幸	44°56.4′	142°35.1′	6.7	1055.5
126	稚内	45°24.9′	141°40.7′	2.8	1088.1
127	名瀬	28°22.7′	129°29.7′	2.8	1223.3
128	南大東島	25°49.7′	131°12.6′	15.3	1338.1
129	那覇	26°12.4′	127°41.1′	28.1	1520.9
130	久米島	26°20.2′	126°48.2′	5.0	1571.6
131	宮古島	24°47.6′	125°16.6′	39.9	1801.1
132	石垣島	24°20.2′	124°09.8′	5.7	1916.2
133	与那国島	24°28.0′	123°00.6′	30.0	1990.4

注：奥多摩からの距離に近い順に並べた。

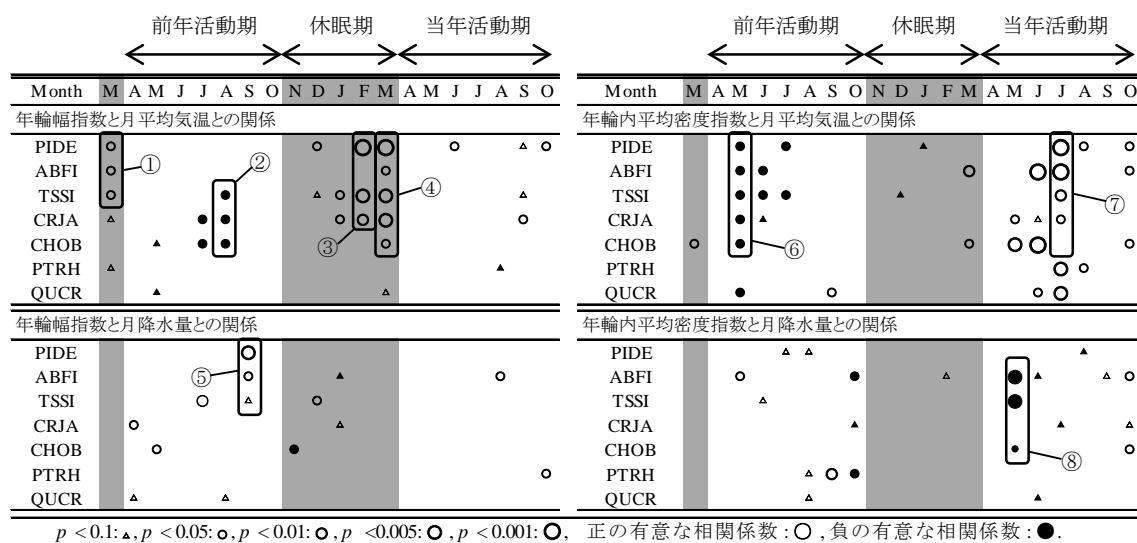


Fig. 5.2. 着目した 8 組の樹木年輪－気候関係

凡 例：①：前年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 3 樹種の IW_{ar} との関係，②：前年 8 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 3 樹種の IW_{ar} との関係，③：当年 2 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 3 樹種の IW_{ar} との関係，④：当年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 5 樹種の IW_{ar} との関係，⑤：前年 9 月の $P_{\text{total(m)}}$ と IW_{ar} との関係，⑥：前年 5 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 5 樹種の ID_{mean} との関係，⑦：当年 7 月の $T_{\text{mean(m)}}$ と 5 樹種の ID_{mean} との関係，⑧：当年 5 月の $P_{\text{total(m)}}$ と 3 樹種の ID_{mean} との関係

5.1.3 結果および考察

a) 気候変数の気象観測地間による違い

a-1) 月平均気温

樹木年輪－気候関係の解析結果について検討する前に、気候変数の気象観測地間による違いを明らかにした。奥多摩の $T_{\text{mean(m)}}$ とその他の気象観測地の $T_{\text{mean(m)}}$ との r を12ヶ月で平均した値($\bar{r}_{12\text{m}}$)を算出し、 $T_{\text{mean(m)}}$ の気象観測地間による違いについて**Fig. 5.3**に示した。**Fig. 5.3**では左上に奥多摩からの距離と $\bar{r}_{12\text{m}}$ との関係、右下に地理的分布と $\bar{r}_{12\text{m}}$ との関係を示し、また、地理的分布と $\bar{r}_{12\text{m}}$ との関係を緯度と経度に分解したものを左下と右上に示した。

奥多摩からの距離が離れるほど $\bar{r}_{12\text{m}}$ は小さくなった。しかし、奥多摩から1000 km以上離れた北は網走から南は名瀬まで有意水準1%で有意な $\bar{r}_{12\text{m}}$ が認められた。一方で大島は、距離の割には $\bar{r}_{12\text{m}}$ が低かった。

つまり、 $T_{\text{mean(m)}}$ は広範囲の地域に共通した経年変動を持っていることがわかった。

a-2) 月降水量

奥多摩の $P_{\text{total(m)}}$ とその他の気象観測地の $P_{\text{total(m)}}$ との r を12ヶ月で平均した値を算出し、 $P_{\text{total(m)}}$ の気象観測地間による違いについて**Fig. 5.4**に示した。図の見方は**Fig. 5.3**と同様である。奥多摩からの距離が離れると急激に $\bar{r}_{12\text{m}}$ は減少した。奥多摩から約160 km離れた高田では有意水準5%で有意な $\bar{r}_{12\text{m}}$ は認められなく、特に日本海側の気象観測地のものとは $\bar{r}_{12\text{m}}$ が低くなっている傾向があった。一方で、奥多摩からの距離が比較的近い秩父(約19 km)、河口湖(約46 km)、熊谷(約46 km)などは $P_{\text{total(m)}}$ の方が $T_{\text{mean(m)}}$ の場合よりも高い $\bar{r}_{12\text{m}}$ が認められた。

つまり、 $P_{\text{total(m)}}$ は $T_{\text{mean(m)}}$ よりも狭い範囲の地域に共通した経年変動を持っていることがわかった。また、 $T_{\text{mean(m)}}$ と $P_{\text{total(m)}}$ とでは地域間の共通性の傾向が異

なっていることがわかった。

b) 樹木年輪－気候関係の気象観測地間による違い

樹木年輪－気候関係の解析により得られた r をもとに，対象とした樹種間で平均した値 (\bar{r}_{sp}) を算出し，樹木年輪－気候関係の気象観測地間による違いについて**Fig. 5.5**～**Fig. 5.12**に示した。**Fig. 5.5**～**Fig. 5.12**では左上に奥多摩からの距離と \bar{r}_{sp} との関係，右下に地理的分布と \bar{r}_{sp} との関係を示し，また，地理的分布と \bar{r}_{sp} との関係を緯度と経度に分解したものを左下と右上に示した。

どの樹木年輪－気候関係も奥多摩からの距離が離れるにつれて r は低下する傾向が確認された。しかしながら，その低下の傾向が気候変数によって異なっており，3つの傾向に分かれた。

それは，傾向A： \bar{r}_{sp} が有意水準5%で有意である気象観測地が奥多摩のみのも（①「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Mar)}$ 」，⑥「 $ID_{ar}-T_{mean(p-May)}$ 」）。これらの関係は前年の $T_{mean(m)}$ とのものであった。傾向B：広範囲の気象観測地で有意であり，奥多摩よりも高い \bar{r}_{sp} を示す地点が含まれるもの（②「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Aug)}$ 」，③「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Feb)}$ 」，④「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Mar)}$ 」，⑦「 $ID_{ar}-T_{mean(c-Jul)}$ 」）。その中では，②「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Aug)}$ 」と⑦「 $ID_{ar}-T_{mean(c-Jul)}$ 」では高い \bar{r}_{sp} を示す気象観測地が北側に広がっており，③「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Feb)}$ 」と④「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Mar)}$ 」では高い \bar{r}_{sp} を示す気象観測地が南西側に広がっていた。これらの関係は，前者では夏の気温，後者は春の気温とのものであった。傾向C：奥多摩に近いが無相関となる地点があり，奥多摩からの距離に関して \bar{r}_{sp} のばらつきが大きいもの（⑤「 $IW_{ar}-P_{total(p-Sep)}$ 」と⑧「 $IW_{ar}-P_{total(c-May)}$ 」）。これらの関係は $P_{total(m)}$ とのものであった。つまり，気候変数によって気候情報を利用可能な気象観測地の分布は異なることがわかった。

次に，上記8組の樹木年輪－気候関係で得られた \bar{r}_{sp} を気象観測地ごとに平均した値の分布を**Fig. 5.13**に示した。その値は，奥多摩の気候変数が他の気象観

測所のものと比べて最も高かった。

以上のことから、気温については比較的広範囲の気候情報が利用可能であることがわかった。しかし、前年の $T_{\text{mean(m)}}$ との相関関係（①「 $IW_{\text{ar}}-T_{\text{mean(p-Mar)}}$ 」と⑥「 $ID_{\text{ar}}-T_{\text{mean(p-May)}}$ 」）のように、相関関係が比較的小さい場合にはできるだけ供試樹木の生育地に近い気象観測地から気候情報を得る必要があることがわかった。また、 $P_{\text{total(m)}}$ については、 $T_{\text{mean(m)}}$ と比べて近い観測地から気候情報を得る必要があることがわかった。樹木の気候応答を明らかにするためには、供試樹木の生育地とできるだけ近い位置に設置された気象観測地から気候情報を得ることは必要であることがわかった。

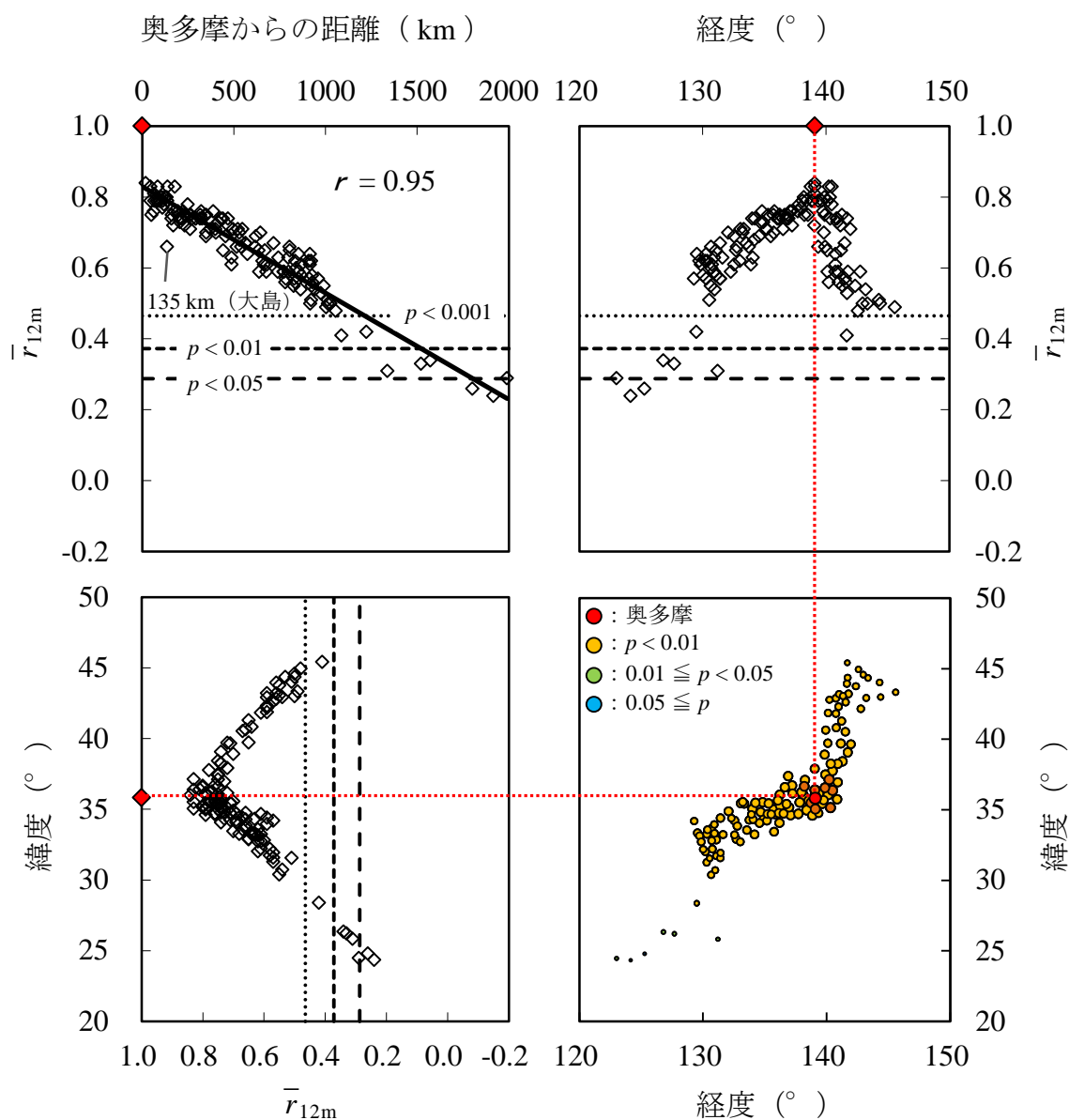


Fig. 5.3. 月平均気温における奥多摩とその他の気候観測所との間の相関係数（12ヶ月平均： \bar{r}_{12m} ）の分布

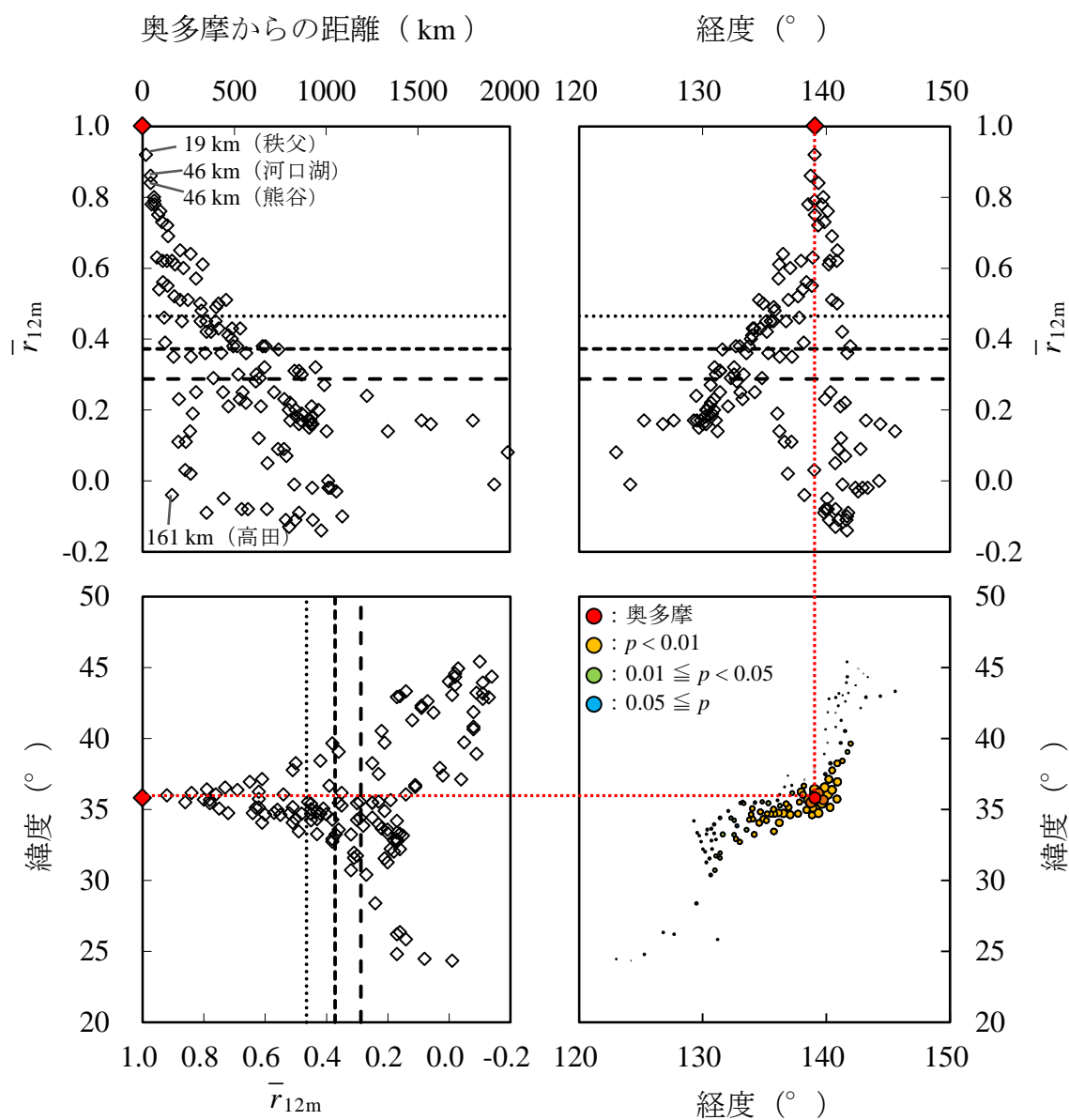


Fig. 5.4. 月降水量における奥多摩とその他の気候観測所との間の相関係数（12ヶ月平均： \bar{r}_{12m} ）の分布

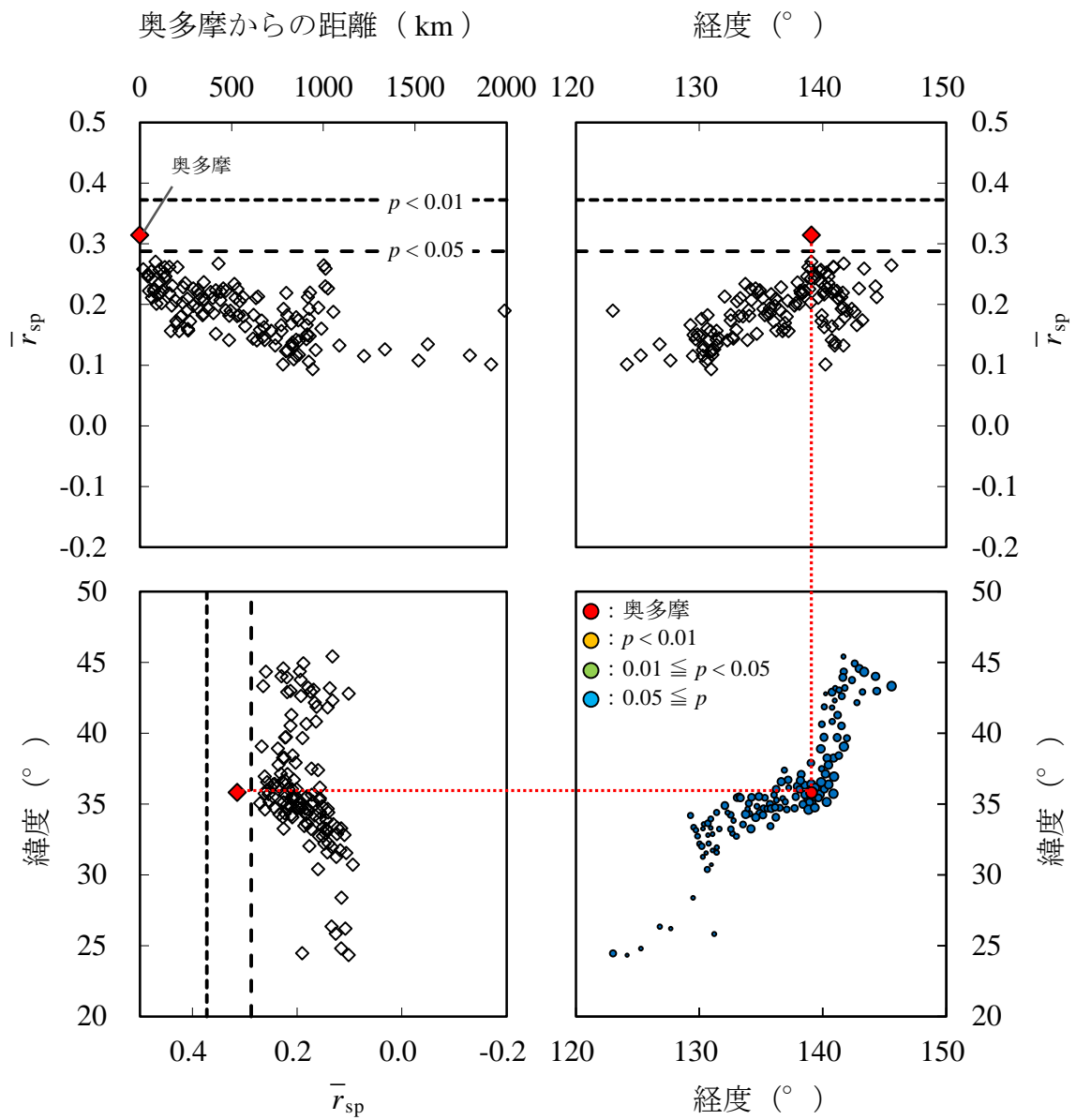


Fig. 5.5. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (①「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Mar)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

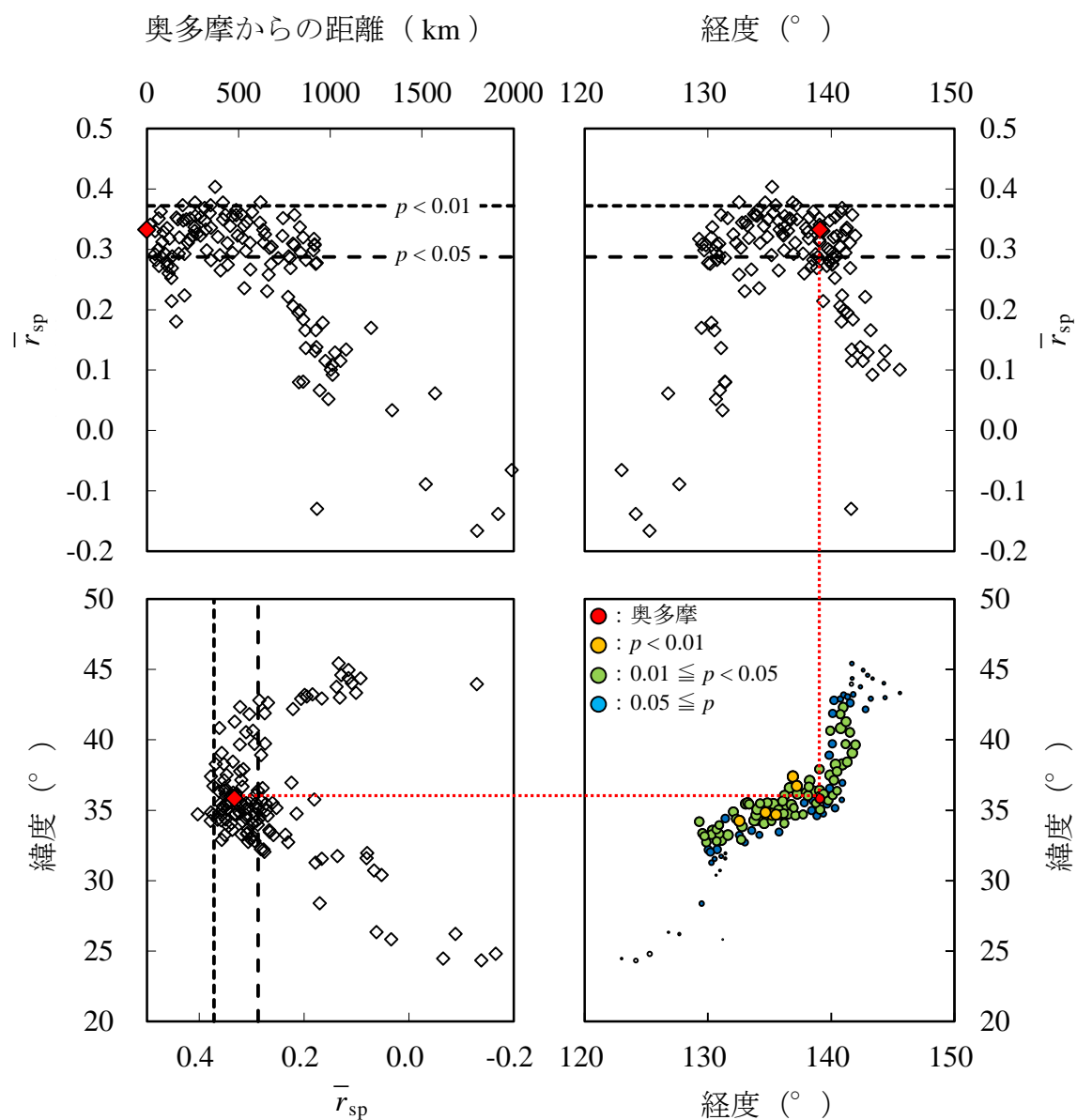


Fig. 5.6. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (②「 $IW_{ar}-T_{mean(p-Aug)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

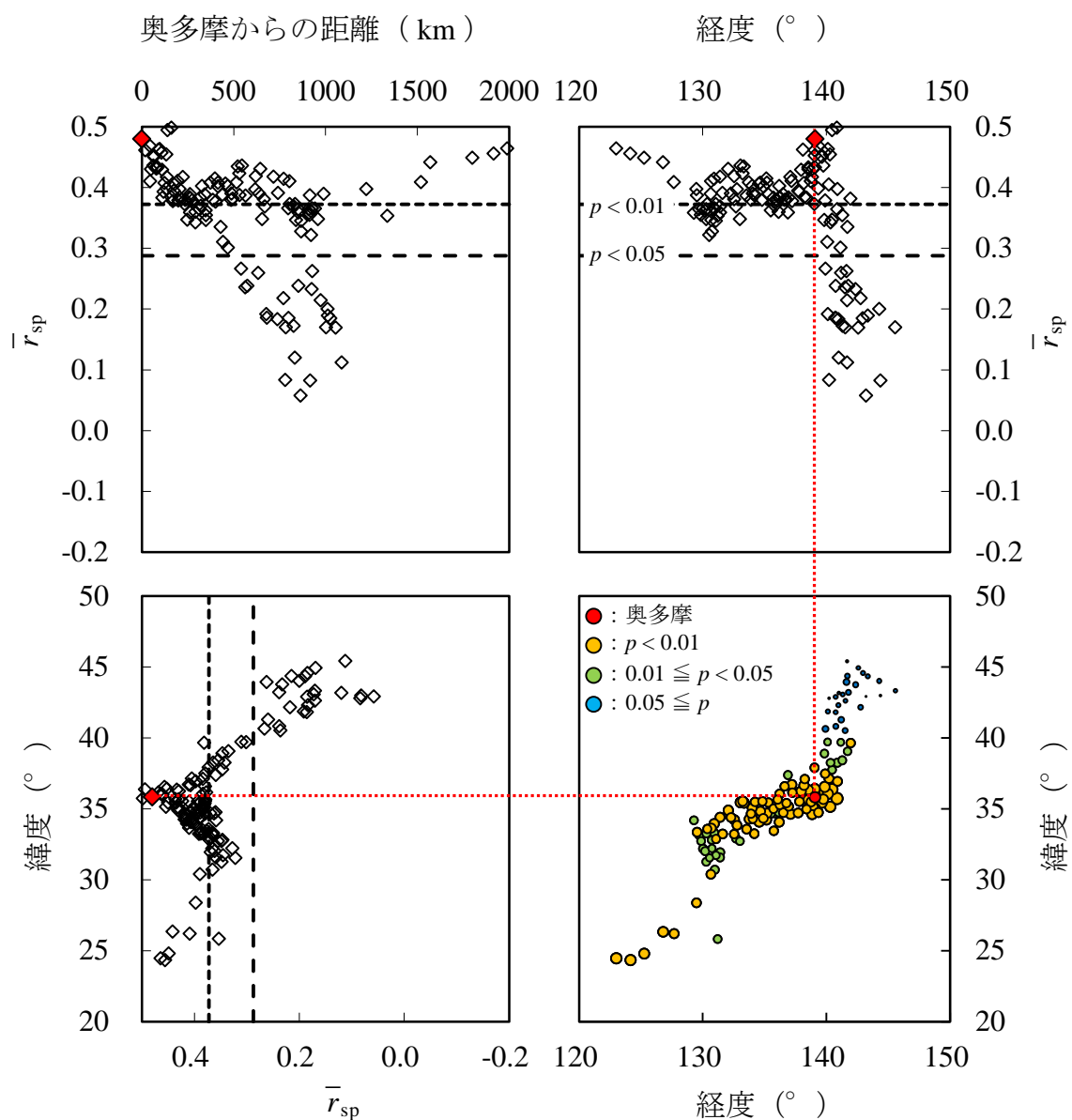


Fig. 5.7. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (③「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Feb)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

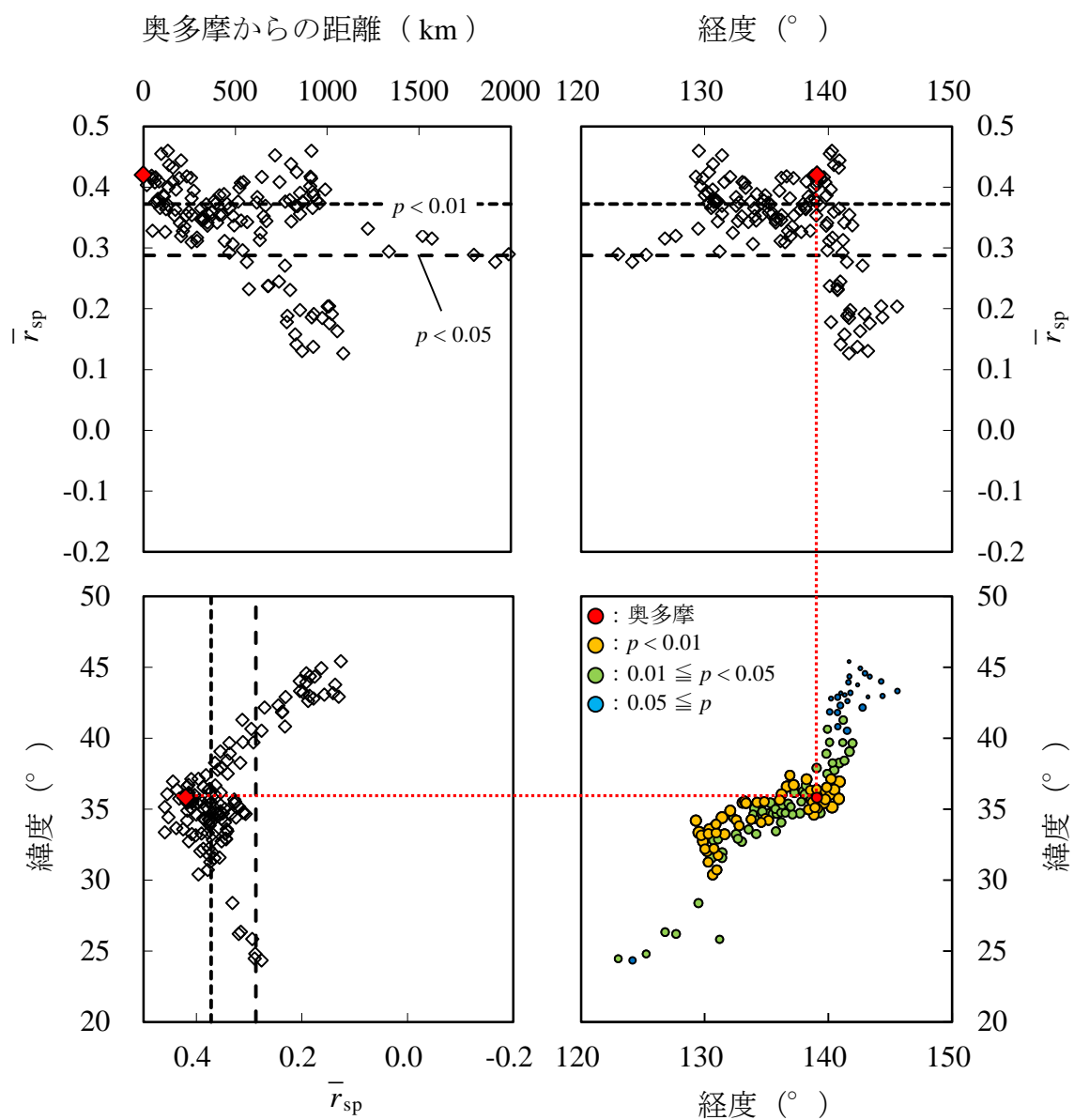


Fig. 5.8. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (④「 $IW_{ar}-T_{mean(c-Mar)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

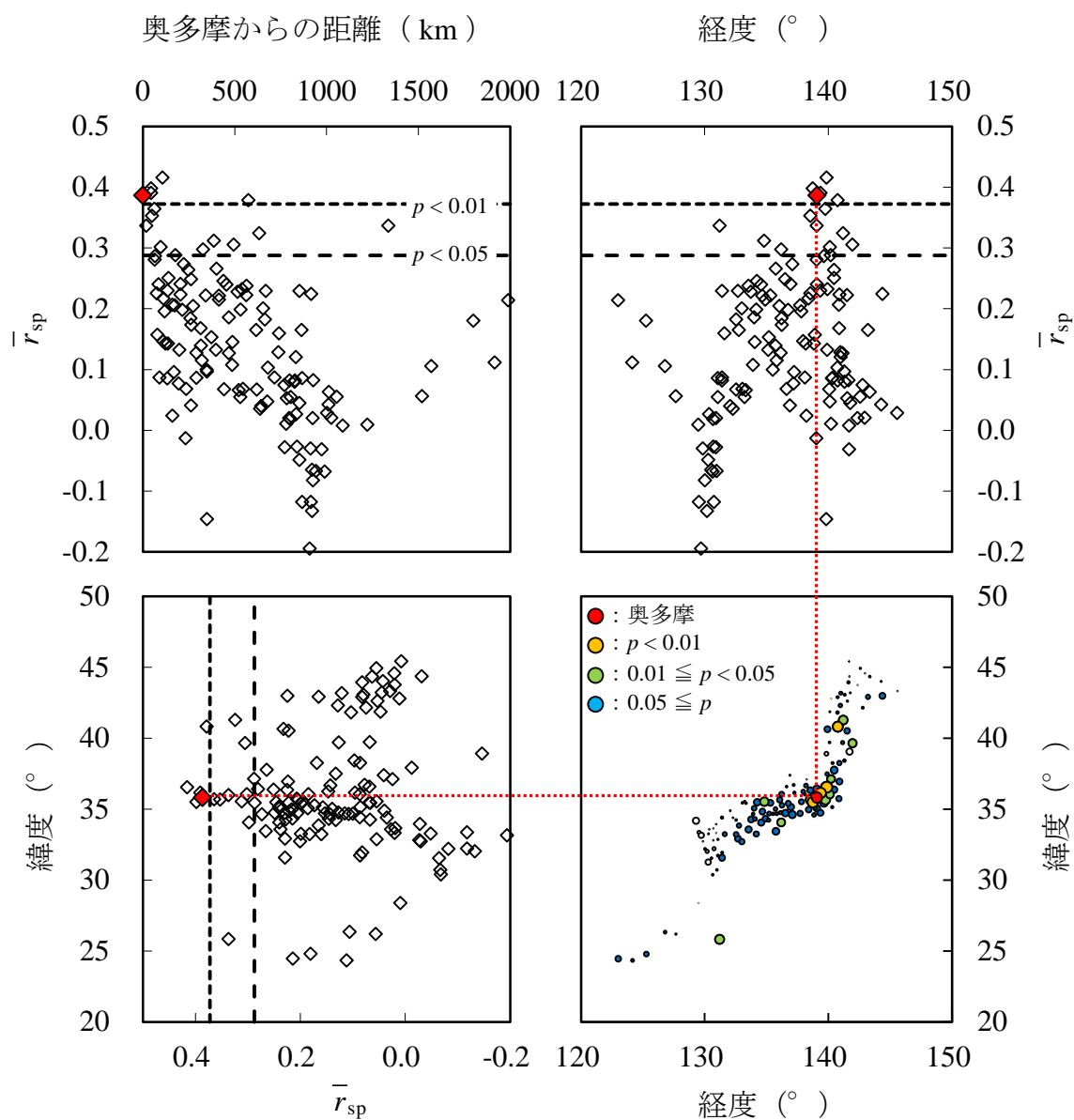


Fig. 5.9. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (⑤「 $IW_{ar}-P_{total(p-Sep)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

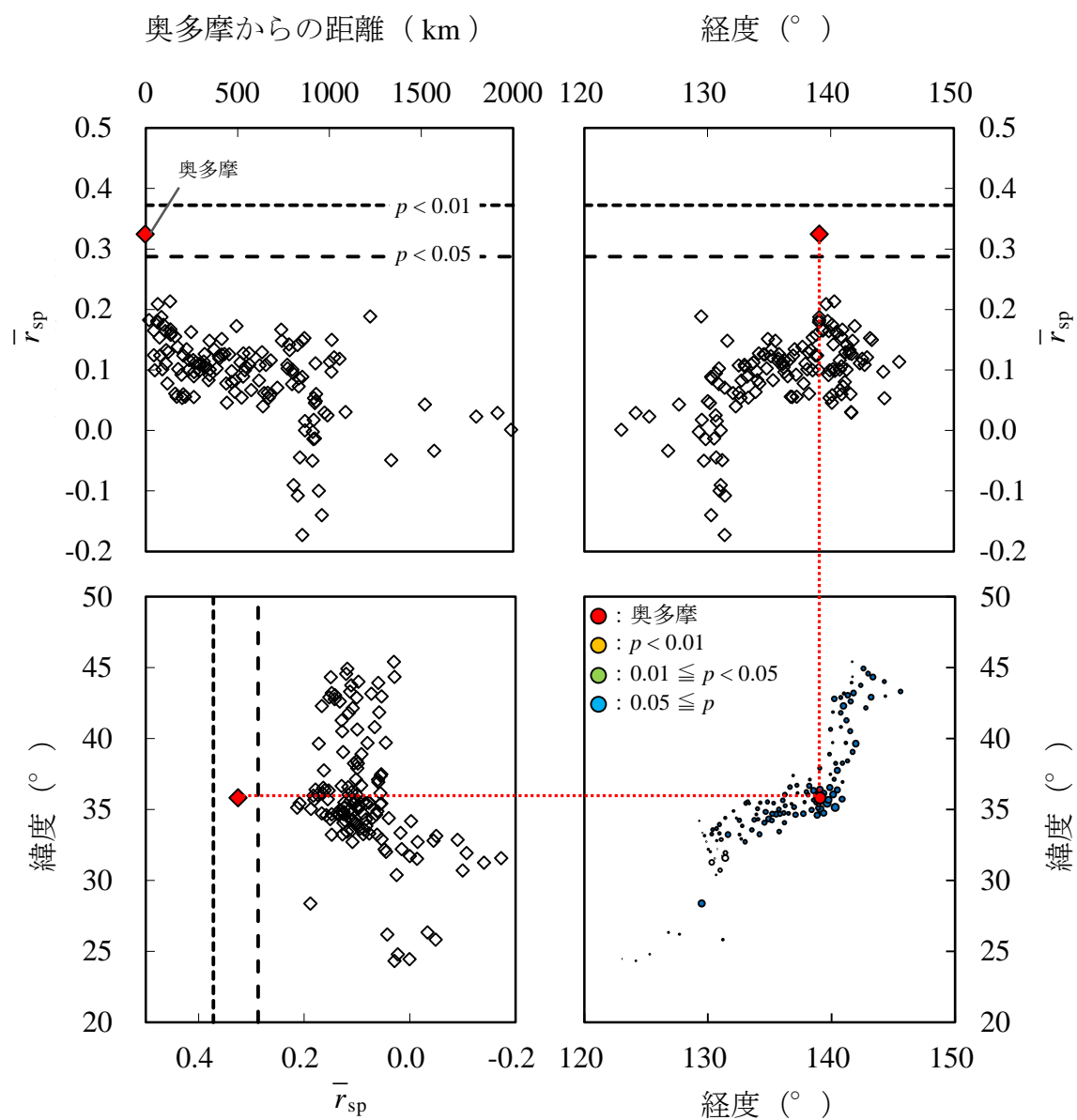


Fig. 5.10. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (⑥「 $ID_{ar}-T_{mean(p-May)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

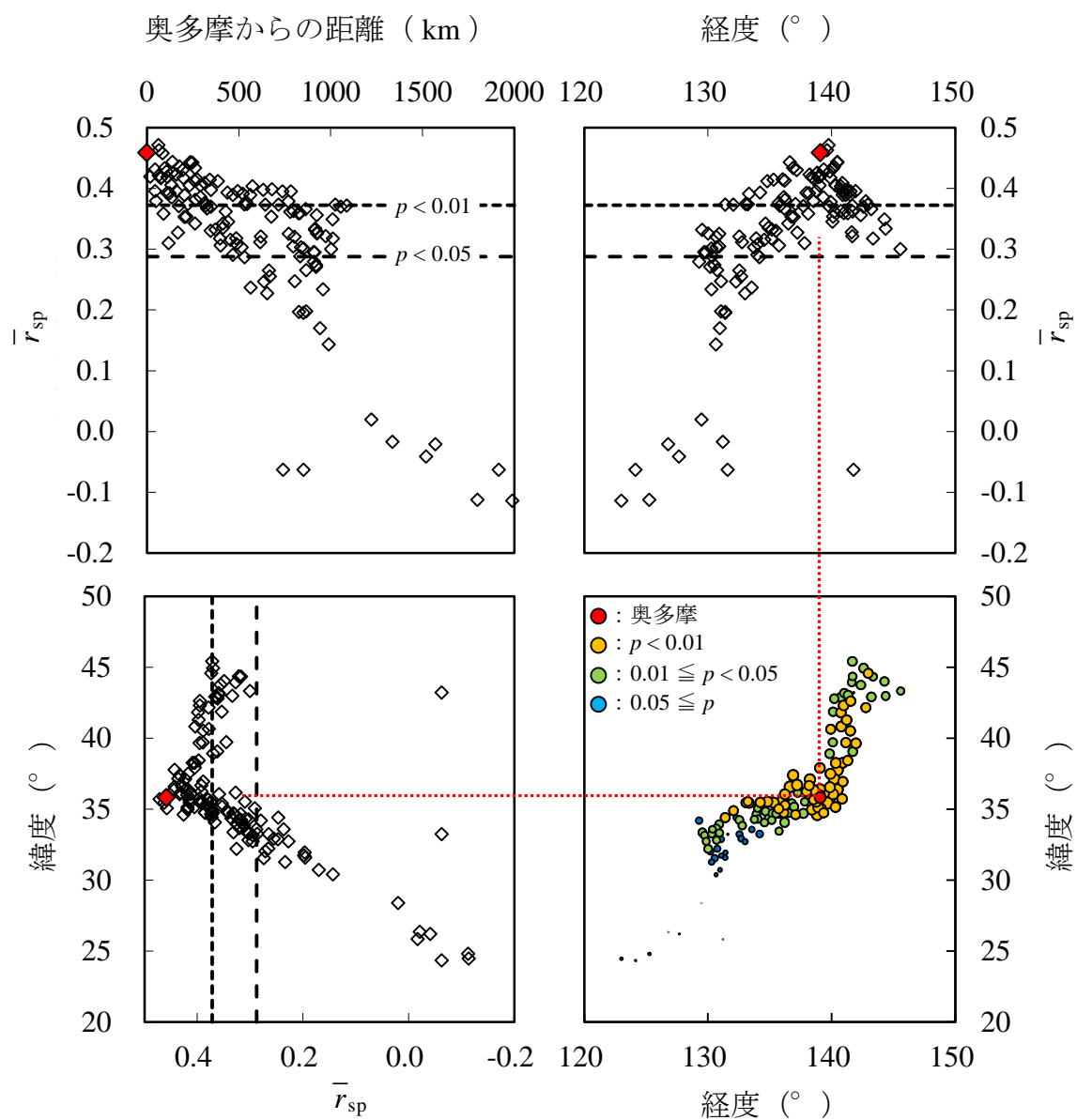


Fig. 5.11. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (⑦「 $ID_{ar}-T_{mean(c-Jul)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

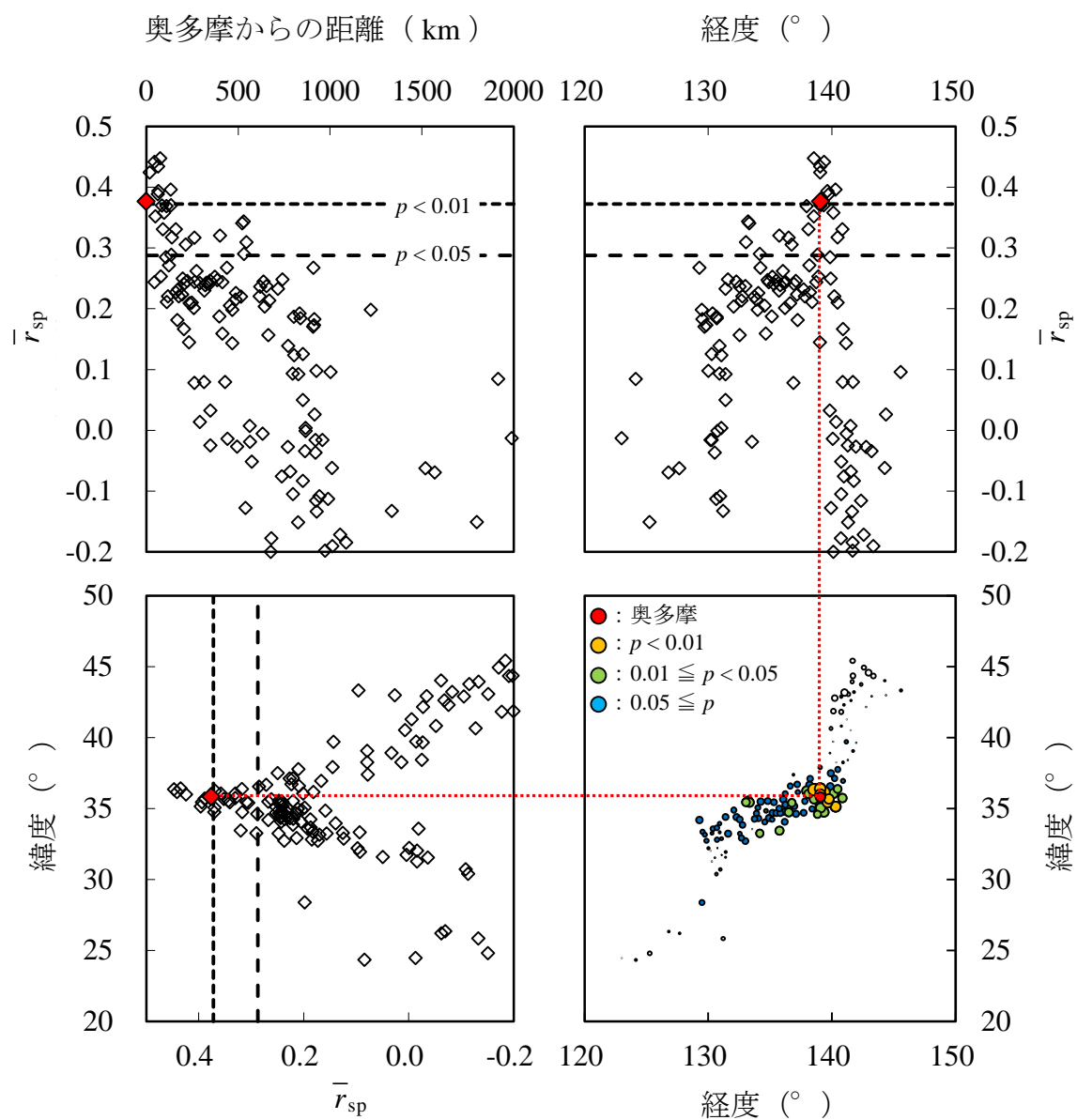


Fig. 5.12. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い (⑧「 $IW_{ar}-P_{total(c-May)}$ 」)

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

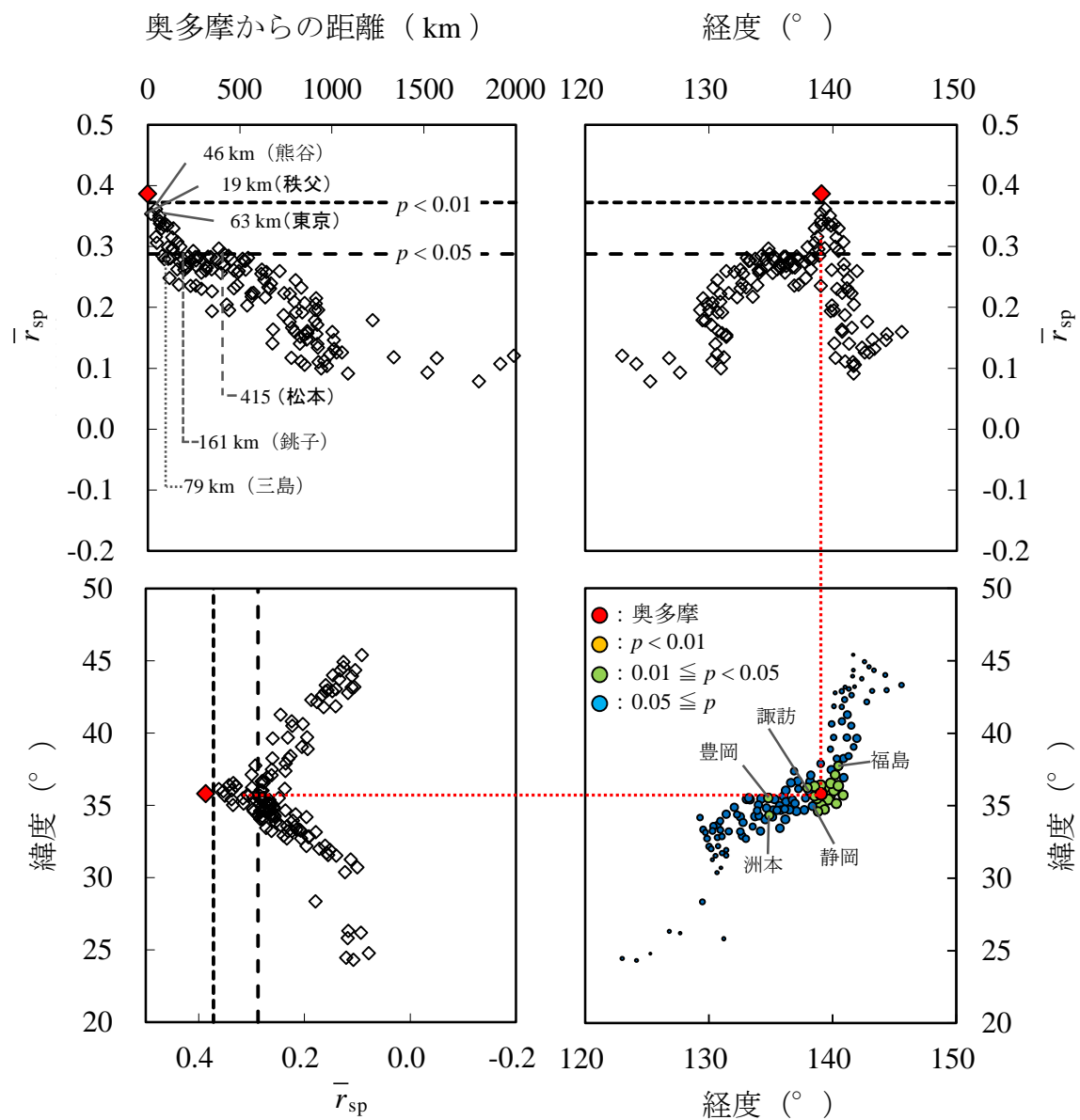


Fig. 5.13. 樹木年輪－気候関係の気象観測地による違い（8組の樹木年輪－気候関係の平均）

凡 例 : \bar{r}_{sp} : 対象とした樹種間で相関係数 (r) を平均した値

5.1.4 結論

本節では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」の中で、「供試樹木の生育地と気象観測地との距離」に着目し、供試樹種の生育地である奥多摩と、それ以外の気象観測地で得られた気候変数とを用いて、奥多摩の樹木年輪情報との樹木年輪－気候関係を検討した。

その結果、1) 樹木年輪変数と各気象観測地の気候変数との r は、気象観測地の位置が供試樹種の生育地から離れるにつれ低下した。しかし、比較的広範囲の気象観測地における気候変数との間に有意な r が認められたことから、広範囲に共通した気候の影響が樹木年輪情報に含まれていると考えられ、気候復元を行う場合には、比較的広範囲の気候情報が利用可能であることもわかった。

2) r が有意 ($p < 0.05$) である気象観測地の分布には3つの傾向があった。それは、傾向 A：前年の $T_{\text{mean(m)}}$ との関係（奥多摩のみのもの）、傾向 B：当年の $T_{\text{mean(m)}}$ との関係（広範囲の地点で有意なもの）、傾向 C： $P_{\text{total(m)}}$ との関係（狭い範囲の地点で有意なもの）であり、その違いは気候変数によるものであった。つまり、気候変数によって気候情報を利用可能な気象観測地の分布は異なることがわかった。

3) 全8組の樹木年輪－気候関係で得られた r を各気象観測地ごとに平均すると奥多摩が最も高い r を示していた。

以上のことから、樹木の気候応答を明らかにするためには、供試樹木の生育地とできるだけ近い位置に設置された気象観測地から気候情報を得ることが重要であることがわかった。

5.2 開花日推定法の導入

5.2.1 はじめに

第4章で樹木年輪－気候関係を検討した結果、針葉樹5樹種に共通して年輪幅指数と2月や3月の気温との間に有意な相関関係が認められた。早春の気温と年輪幅との有意な相関関係は多数報告されている（安江ら 1994；野田 2006）。この時期（1月～4月）における奥多摩の気温の変化を **Fig. 5.14** に示した。1年の中で気温が最も低くなる時期が1月の中旬から2月の中旬であり、それ以降気温が上昇し始める。また、第3章で示したように、奥多摩に生育する樹木において2月と3月は細胞分裂再開前の休止期であると考えられる。一方で、この2月から3月にスギやヒノキは開花し、その花粉の量は開花直前までの気温によって影響を受けていると報告されている（川島ら 1993；金指ら 2002）。

このような開花と開花直前までの休眠期の気温との関係を対象とした研究としてはソメイヨシノなどの開花日推定に関する研究がある（小元ら 1989；青野ら 1990a, 1990b, 2003）。開花日などの推定方法の研究では、開花日の経年変動と同調するような推定モデルを検討する。つまり、推定モデルの検討方法は、樹木年輪気候学的手法で樹木年輪指数の経年変動と同調するような気候変数を検討する工程と似ている。

このようなことから、樹木年輪－気候関係の解析に用いる気候情報に開花日推定法を導入することで、樹木年輪－気候関係をより明確に表すことができるようになるのではないかと考えた。

そこで本節では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」として「開花日推定法の導入」することの有効性を検討した。その際には、細胞分裂再開前の気温と年輪幅との関係に焦点を絞った。

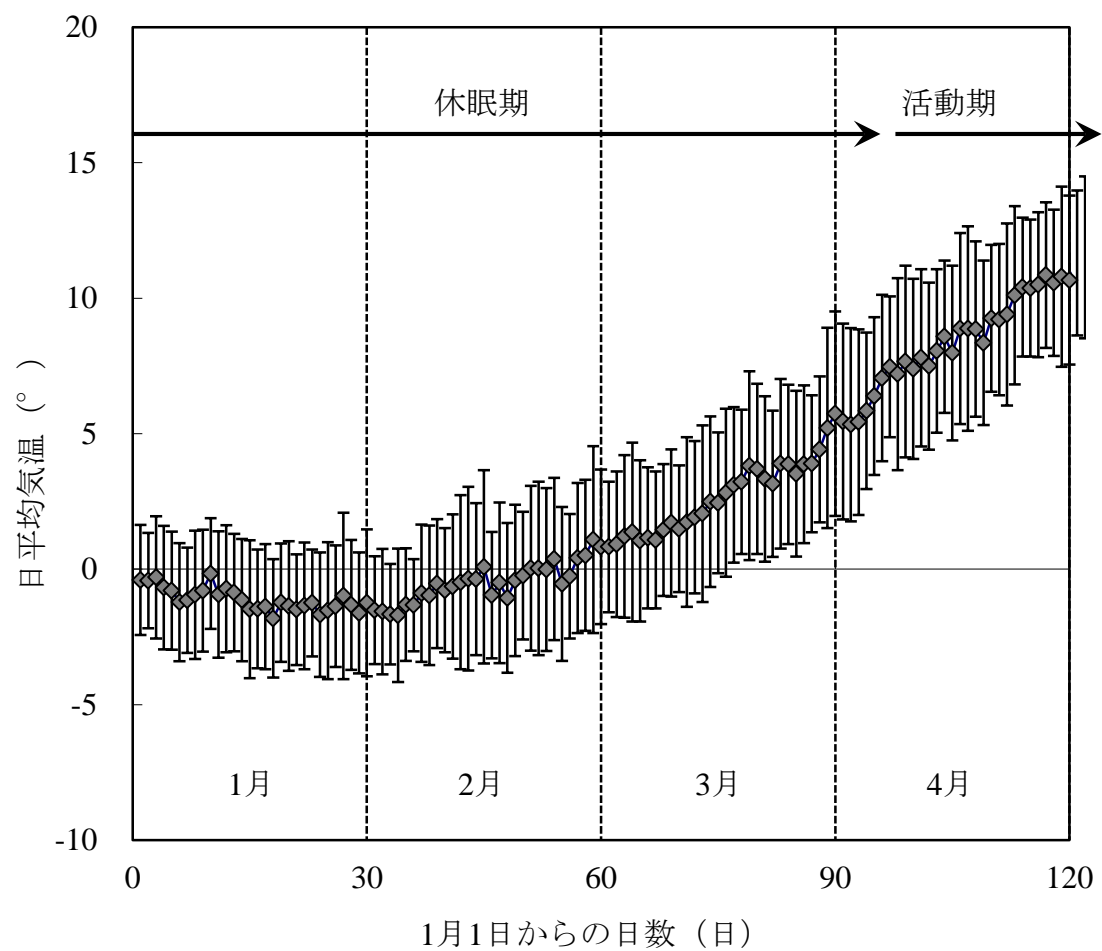


Fig. 5.14. 研究地域における休眠期から形成層活動再開前後における日平均気温の変化（1954～2000 年）

凡 例 : ◆ : 平均値, エラバー : 標準偏差

注 : 研究地域付近の気温を把握するために奥多摩の気象資料に標高差（約 300 m）の補正を -1.8°C 行った値を示した。

5.2.2 方法

a) 樹木年輪情報

第2章で構築した針葉樹5樹種（アカマツ，モミ，ツガ，スギ，ヒノキ）の年輪幅指数（ IW_{ar} ）のクロノロジーを用いた。

b) 気候情報

気象資料には奥多摩（2～4 km，東京都水道局水源林管理事務所）の日平均気温（ $T_{mean(d)}$ ）を用い，気候変数を作成した。また，供試樹種の生育地と気象観測所とには高度差が約300 mあるため，奥多摩の $T_{mean(d)}$ に -1.8°C の補正を行って，以降の気候変数の作成に用いた。

開花日の推定モデルを作成するためには，気象要素やその算出方法，またその積算する期間の検討を行う必要がある。算出方法には，有効積算温量法や温度変換日数法などがあり，これらは有効な温度や温度に対する特性と，またそれらが係る有効な期間など植物生理学的な考えに基づいて検討されている。

そこで本研究では，植物生理学的な考えに基づいた気候変数の算出方法として，1) 積算温量法，2) 有効積算温量法，3) 温度変換日数法について検討した。

b-1) 積算温量法

積算温量法（accumulated temperature）とは，定めた期間の間の気温を積算し，その値がある閾値を越えた日を開花日とする方法である（川島ら 1993）。積算温量法による気候変数の算出方法を式 5.1 と Fig. 5.15 上に示した。この方法では標準温度（standard temperature : T_s ）を変化させることで値は変化するが，経年変動は変化しないため最適積算期間のみを検討した。

b-2) 有効積算温量法

有効積算温量法 (accumulated effective temperature) とは、植物の生育や生息に必要な温度は一定温度以下では無意味である、という考えに基づいており、ある閾温度以上の日別気温を積算し、その積算値がある閾値を越えた日を開花日とする方法である (川島ら 1993)。有効積算温量法による気候変数の算出方法を式 5.2 と Fig. 5.15 下に示した。この方法では設定する限界温度 (standard temperature : T_s) によって値の経年変動が変化する。そこで T_s を -5°C から $+5^{\circ}\text{C}$ まで変化させ最適積算期間を検討した。

b-3) 温度変換日数法

温度変換日数法 (the number of days transformed to standard temperature) は反応速度論的な考え方にに基づき、温度による生物活性の変化を説明することを目的とした方法である (小元ら 1989)。つまり、ある日の温度条件での 1 日分の反応量が、特定の標準温度の条件で何日分の反応量に相当するかを換算し、その日数を積算する (川島ら 1993)。温度変換日数法による気候変数の算出方法を式 5.3 と Fig. 5.16 上に示した。この方法では温度特性値 (characteristic temperature : E_a) と標準温度 (standard temperature : T_s) を設定するが、設定する標準温度によって積算温度変換日数の値は変化するが経年変動は変化しない。そのため、標準温度は小元ら (1989) の報告を参考に 298 K (25°C) の一定とした。一方、 E_a によって経年変動が変化するため、 E_a のみについて検討することとした。また、 E_a を変化させたときの気温と温度変換日数との関係を示した (Fig. 5.16 下)。 E_a が大きいほど低温の効果が小さく、高温の効果が大きく評価されることになる。既往の研究において E_a は 20~125 kJ/mol の間で検討している報告が多いが (小元ら 1989, 川島 1993)、本研究では 20~300 kJ/mol まで変化させ最適積算期間を検討した。なお、気体定数は $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ である。

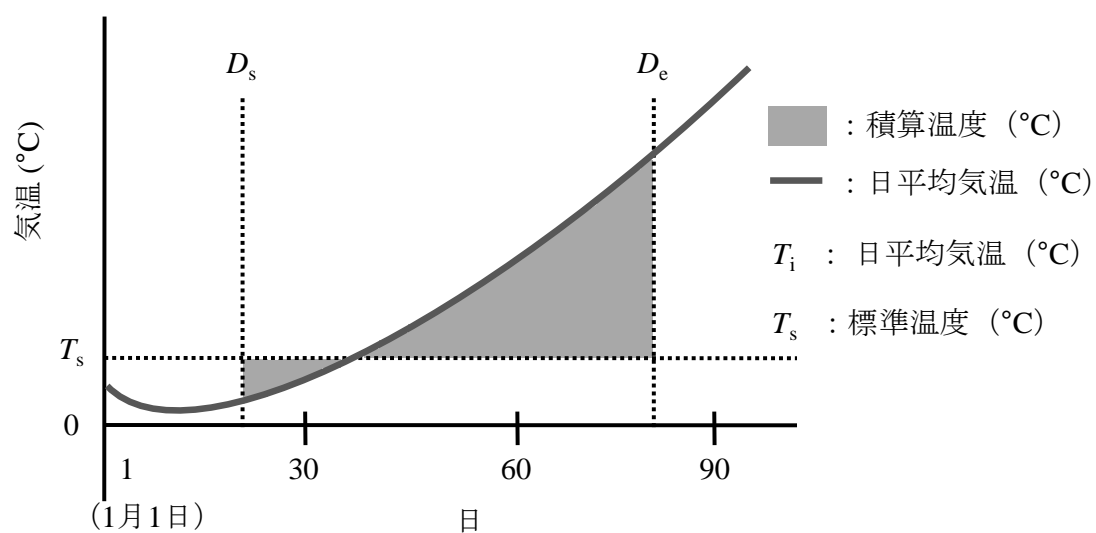
c) 解析方法

評価の指標として開花日などの推定では実測日と推定日との誤差を用いているが、本研究では年輪幅指数と作成した気候変数との間の相関係数 (r) を用いた。統計期間は 1954 年から 2000 年の、計 47 年間とした。積算開始日の検討には、積算終了日を 90 日 (1 月 1 日からの日数) に固定して積算開始日を 1 日から 90 日まで変化させることで作成した気候変数と IW_{ar} との間で得られた r を指標とした。一方、積算終了日の検討には、積算開始日を 1 日 (1 月 1 日からの日数) に固定して積算開始日を 1 日から 120 日まで変化させることで作成した気候変数と IW_{ar} との間で得られた r を指標とした。

また、気候変数を作成し、算出方法ごとの設定値 (T_s , E_a) の最適値や最適積算期間の効果を検討した。さらに、温度変換日数法と有効積算温量法とを組み合わせた場合も検討した。

○ 積算温度法

$$T_{\text{sum}} = \sum (T_i - T_s) \quad \dots \dots \dots \text{(式 5.1)}$$



○ 有効積算温度法

$$T_{\text{sum}(\geq T_s)} = \sum T_i (T_i \geq T_s) \quad \dots \dots \dots \text{(式 5.2)}$$

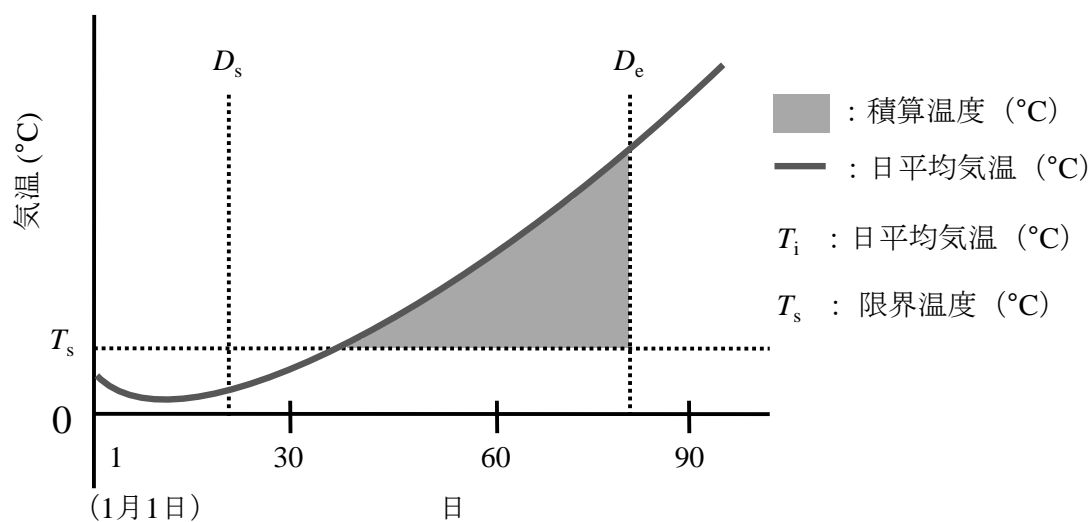


Fig. 5.15. 積算温度法および有効積算温度法による気候変数の算出方法

○ 温度変換日数法 (DTS)

$$DTS_{\text{sum}} = \sum \exp \left[E_a (T_i - T_s) / (R \times T_i \times T_s) \right] \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{式 5.3})$$

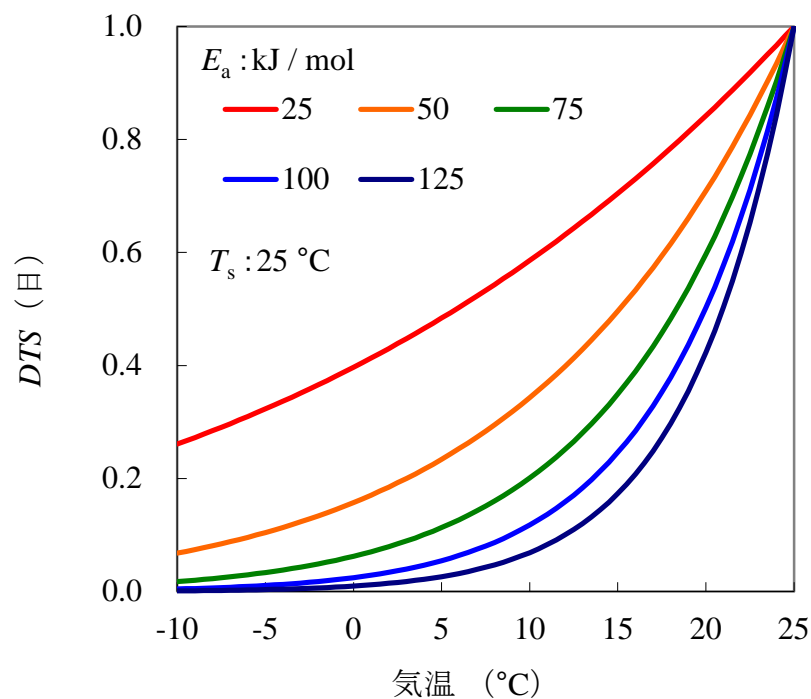
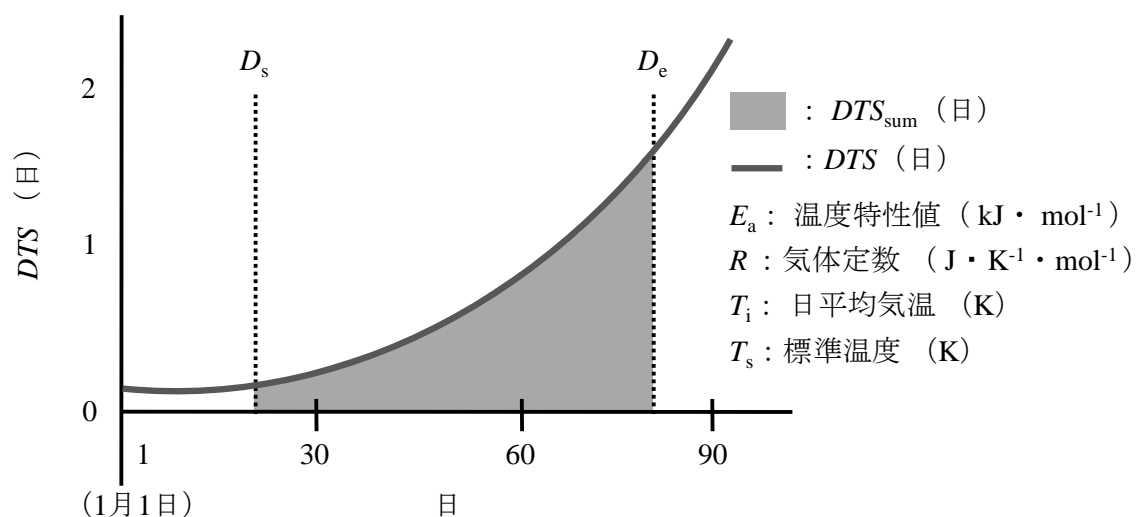


Fig. 5.16. 温度変換日数法 (DTS) による気候変数の算出方法

5.2.3 結果および考察

a) 積算温量法

積算温量法を用いて作成した気候変数と年輪幅指数との相関関係を **Fig. 5.17** に示した。積算開始日を検討した **Fig. 5.17a** では、どの樹種も積算開始日を 90 日目から 60 日目に変化させるにしたがい r は急激に大きくなった。そして、60 日目より早くしても大きな変化はなかった。ヒノキ以外は 1 月である 1 日目から 31 日目の間で最も高い r が確認された。一方、ヒノキでは 50 日目であった。樹種による違いは大きかったが、 r が最も高い値を示した積算開始日ははっきりしていた。また、積算終了日を検討した **Fig. 5.17b** では、どの樹種も積算終了日を 1 日目から 80 日目に変化させるに従い r は徐々に大きくなった。そして 80 日目から 100 日目の間で最も高い r が確認されたが、最も高い値を示した積算終了日は積算開始日と異なりはっきりしなかった。また、それ以降、 r の値はあまり大きな変化を示さず、次第に小さくなった。

b) 有効積算温量法

有効積算温量法を用いて作成した気候変数と年輪幅指数との相関関係を **Fig. 5.18～Fig. 5.20** に示した。 r の大きさは色で表した。傾向としては積算温量法を用いた場合と同じであったが、最適な積算終了日は 80 日前後であった。また、積算開始日を検討したときの最適な T_s は積算終了日を検討したときの最適な T_s よりも低い値を示した。この原因として、積算終了日を検討する際には最適な積算開始日以前の期間が含まれてしまっているからだと考える。そのため、最適な T_s は、ツガ以外の 4 樹種においては最適積算期間において r が最も大きくなるのは積算開始日の検討をした際に示された最適な T_s と同じ値であった(**Fig. 5.18～Fig. 5.20**)。

また、**Fig. 5.18～Fig. 5.20** を基に定めた最適積算期間で積算したときの T_s と r

と関係を **Fig. 5.21** に示した。モミ以外は T_s が $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ までは r の大きさがほぼ一定であり、 $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ より大きくなると r は低下した。一方、モミではもともと r が大きくはないが、 T_s を $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ より大きくすると r は大きくなった。それぞれ最大となった T_s はアカマツ ($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、スギ ($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、ツガ ($+1\text{ }^{\circ}\text{C}$)、ヒノキ ($+1\text{ }^{\circ}\text{C}$)、モミ ($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$) の順に大きくなっていた。

開芽時期の推定に用いる T_s について、吉良 (1949) が温量指数 (暖かさの指数) の T_s として採用した $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ が用いられていることが多い (木村ら 1995 ; 澤田ら 1999)。しかし、 T_s が $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未満のときに推定誤差が少なくなったとの報告もある (川島 1993 ; 藤本 2007)。藤本 (2007) は、広葉樹 29 樹種について検討し、その T_s は樹種によって異なり、 $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ のときに多くの樹種で推定誤差が少なくなったとしている。

本研究の結果もモミ以外において最適な T_s は $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下であり、 $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上にすると r は小さくなったことから、モミ以外の樹種では気温が $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下のときも形成層活動再開に有効な温度である可能性がある。こうした樹種間による最適な T_s の違いについて、遺伝的な面、生理生態学的な面から解明していく必要がある。

c) 温度変換日数法 (DTS)

温度変換日数法を用いて作成した気候変数と年輪幅指数との相関関係を **Fig. 5.22**～**Fig. 5.24** に示した。温度変換日数法も傾向としては有効積算温量法を用いた場合と同じであった。しかしながら、最適な積算終了日は積算温量法の場合よりもさらに明確になった。また、積算開始日を検討したときの最適な E_a は積算終了日を検討したときの最適な T_s よりも高い値を示した。

また、**Fig. 5.22**～**Fig. 5.24** を基に定めた最適積算期間で積算したときの T_s による効果を **Fig. 5.25** に示した。 E_a がある値で r が最大となり、その値から外れ

ると r は小さくなっていった。 r が最大となった E_a は、スギ (60 kJ/mol), ツガ (90 kJ/mol), アカマツ (100 kJ/mol), モミ (150 kJ/mol), ヒノキ (200 kJ/mol) の順に大きくなっていった。

開花や開芽時期の推定に用いる E_a について、小元 (1989) はソメイヨシノの開花について 71 kJ/mol (17 kcal/mol) のときに推定誤差が最も小さくなったと報告している。また、スギの開花については 98 kJ/mol のときに (川島 1993), 広葉樹 29 樹種の開芽については 42~63 kJ/mol, 樹種によっては 104 kJ/mol のときに (藤本 2007), 推定誤差が最も小さくなったと報告している。

本研究の結果も、モミとヒノキ以外において最適な E_a は他の報告とほぼ同じ値となったといえる。しかし、各樹種における最適な E_a の違いについては今後の課題である。

d) 温度変換日数法 × 有効積算温量法

温度変換日数法を用いて検討した最適な E_a と最適積算期間において有効積算温量法を併用して T_s を変化させて作成した気候変数と年輪幅指数との相関関係を **Fig. 5.26** に示した。前述した 3 つの算出方法の結果よりも、 r は大きくなっていった。しかし、 T_s を変化させてもほぼ r は変わらず、 T_s が 2°C より大きくなるとモミ以外では r が小さくなった。一方、モミのみにおいて、限界温度が +2°C より大きくなると r が大きくなっていった。それぞれ最大となった T_s はスギ (-2 °C), アカマツ (0 °C), ツガ (0 °C), ヒノキ (+1 °C), モミ (+5 °C) の順に大きくなっていった。

e) 限界温度 (T_s), 温度特性値 (E_a), 最適積算期間の有効性

積算温量法と有効積算温量法, 温度変換日数法を検討して作成した気候変数と年輪幅指数との間に認められた r を 5 樹種で平均した値 (\bar{r}_{sp}) を **Fig. 5.27** に示

した。月平均気温 ($T_{\text{mean(m)}}$) の中で最も高い r を示した3月を基準した場合、どの算出方法においても積算期間を日単位で検討した最適積算期間にすることで \bar{r}_{sp} は高くなっていた。また、その最適積算期間において有効積算温量法と温度変換日数法を用いることで積算温量法よりも高い \bar{r}_{sp} が認められた。そしてその両方法を用いることでさらに高い \bar{r}_{sp} が認められた。また、それらの効果、つまり \bar{r}_{sp} が増加した値は、 E_a (+0.024)、 T_s (+0.040)、最適積算期間 (+0.090) の順で大きかった。つまり、細胞分裂再開前の気温と年輪幅との関係は、最適積算期間や T_s 、 E_a の3者の影響が含まれていると考えられる。そして、 E_a よりも T_s による影響の方が大きい可能性がある。

このことについて、積算温量法と有効積算温量法、温度変換日数法を用いて、スギの開花日を推定した川島ら(1993)は、3者の中では有効積算温量法を用いた場合に最も推定誤差が小さくなったと報告している。また、広葉樹29樹種の開芽日を推定した藤本(2007)の報告でも、温度変換日数法よりも有効積算温量法を用いた場合に最も推定誤差が小さくなっていた。このことは本研究結果と同じといえる。

3種類の算出方法での最適積算期間についてまとめると (**Fig. 5.28**)、積算開始日は樹種による差が大きいですが、どの算出方法を用いてもほぼ同時期が最適となった。ヒノキのみ極端に積算開始日が遅かった。一方、積算終了日は樹種による差が少ないが、算出方法によって最適な積算終了日に違いがあり、また同じ算出方法であっても最適な積算終了日が特定できない場合(アカマツ、ツガ)もあった。最適な積算終了日は3月中旬から4月初旬であり、この時期は形成層活動が再開する直前である。最適な積算終了日が特定しにくい原因として、形成層活動の再開日そのものに経年変動があるためではないかと考える。また、積算温量法ではヒノキ科とマツ科とで最適な積算終了日が異なり、第3章でまとめた形成層活動再開時期の違いと似ていたが、有効積算温量法や温度変換日

数法では最適な積算終了日に樹種の違いがみられなかった。

このように、最適積算期間の決定方法について今後検討していく必要が多々ある。一方で、最適積算期間を検討することで、形成層活動の期間や季節変化に関する情報を得られる可能性もあると考える。

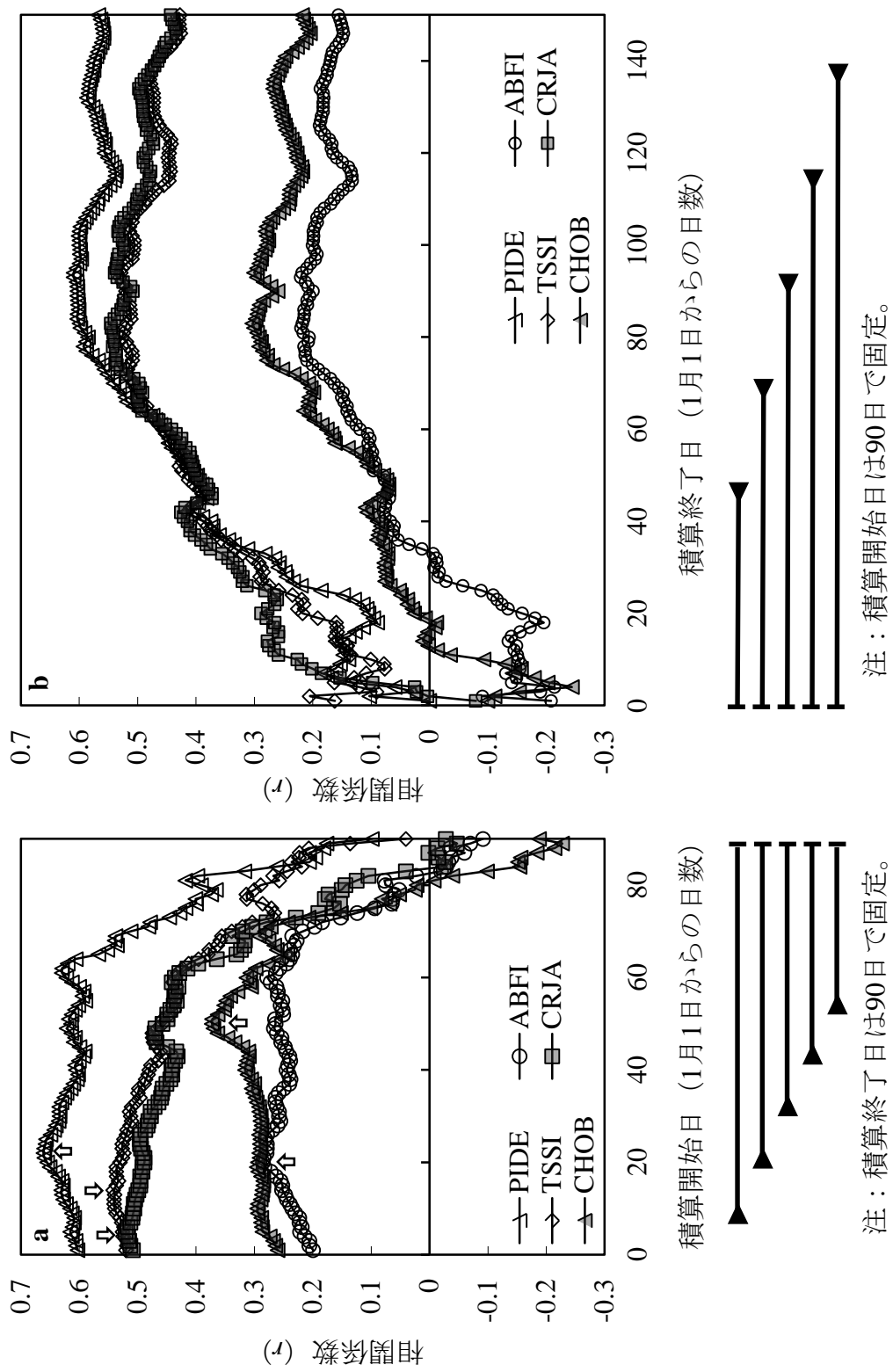
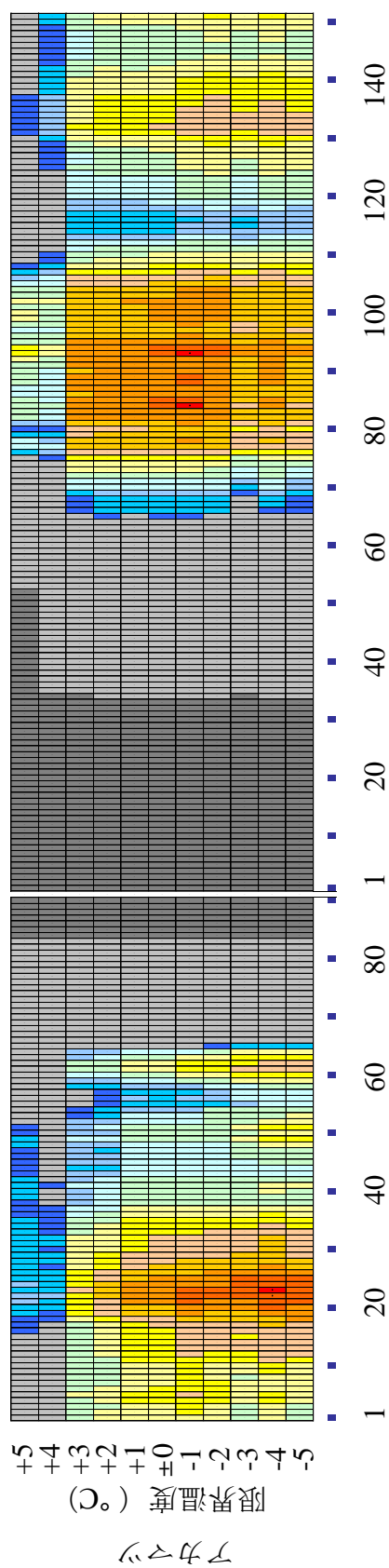


Fig. 5.17. 積算温度法における積算開始日と積算終了日の検討



積算開始日 (1月1日からの日数)

注：積算終了日は90日で固定。

積算終了日 (1月1日からの日数)

注：積算開始日は90日で固定。

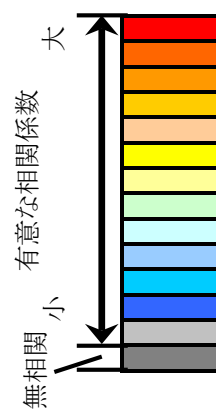


Fig. 5.18. 有効積算温度法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（アカマツ）

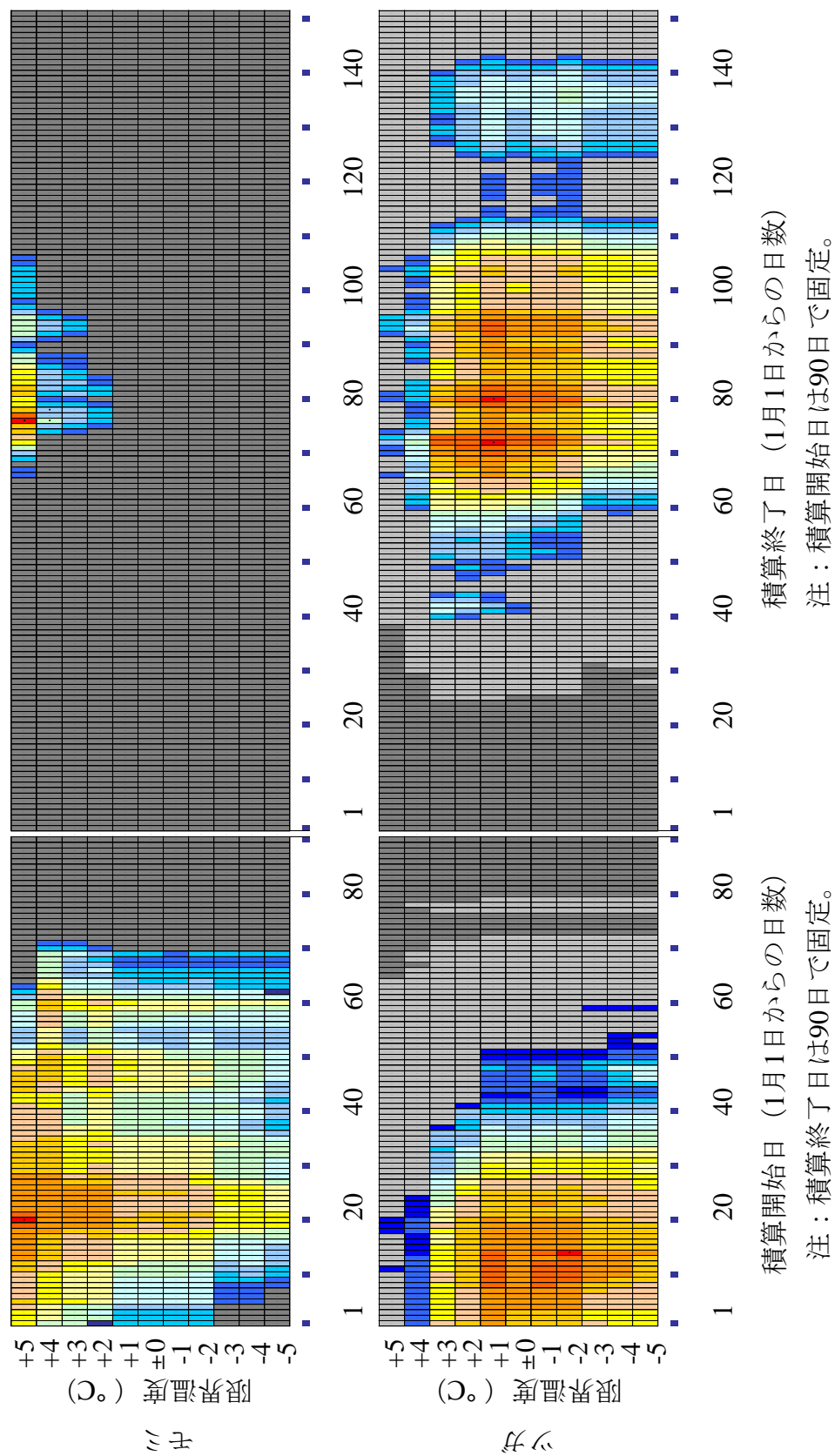


Fig. 5.19. 有効積算温度法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（モミ，ツガ）

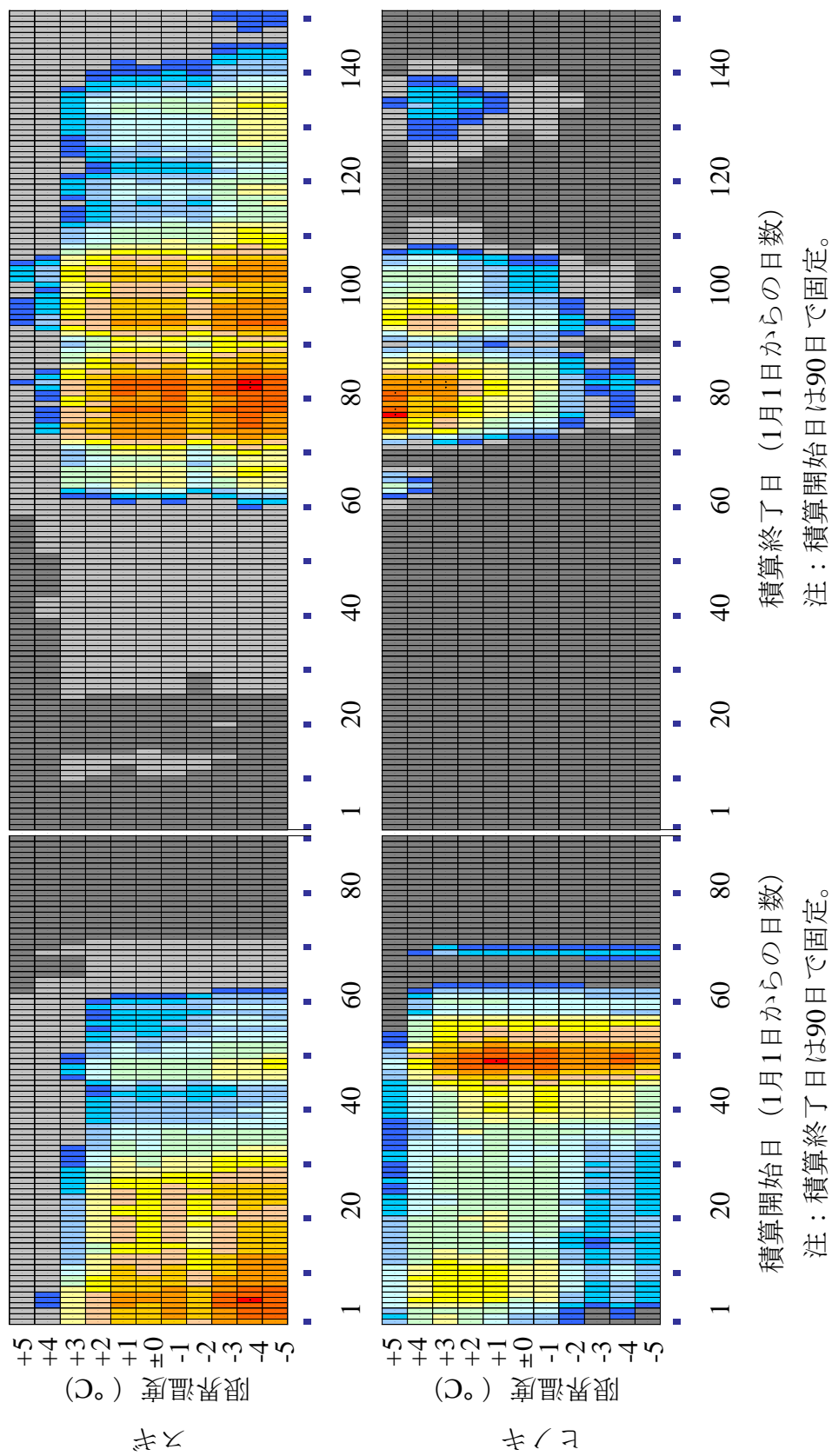


Fig. 5.20. 有効積算温度法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（スギ，ヒノキ）

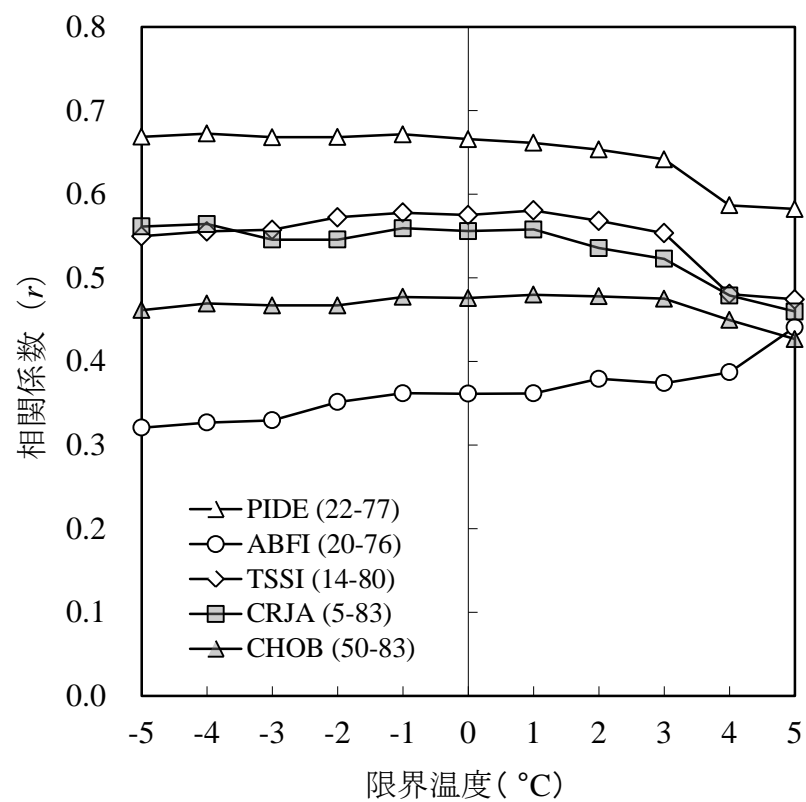
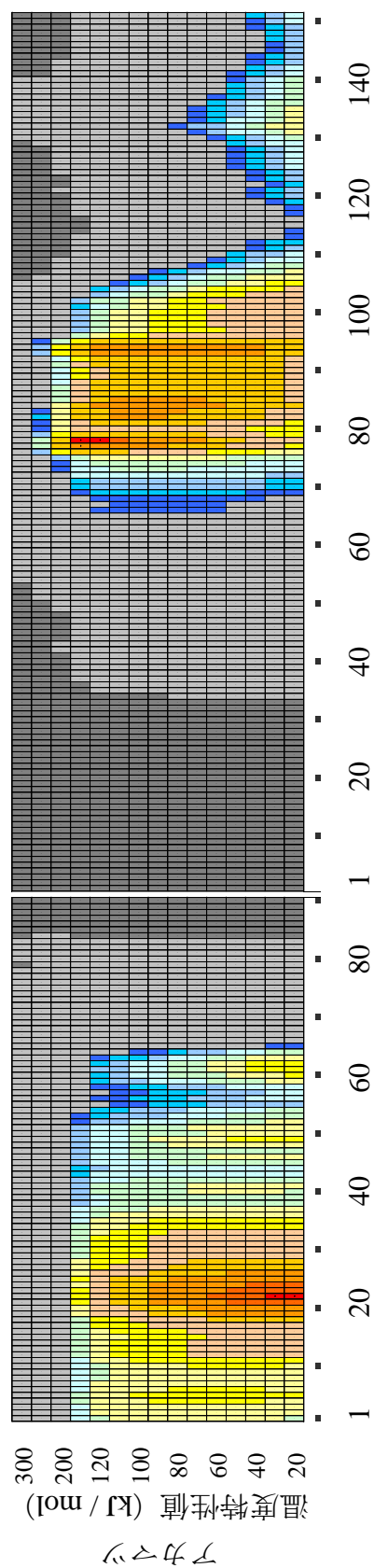


Fig. 5.21. 有効積算温量法における限界温度の検討

注 : 括弧内の数値は最適積算期間を示した。



積算開始日 (1月1日からの日数)
注：積算終了日は90日で固定。

積算終了日 (1月1日からの日数)
注：積算開始日は90日で固定。

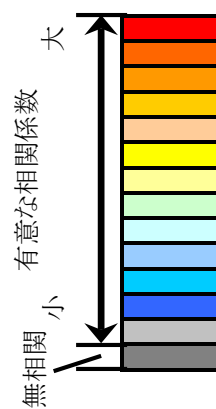


Fig. 5.22. 温度変換日数法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（アカマツ）

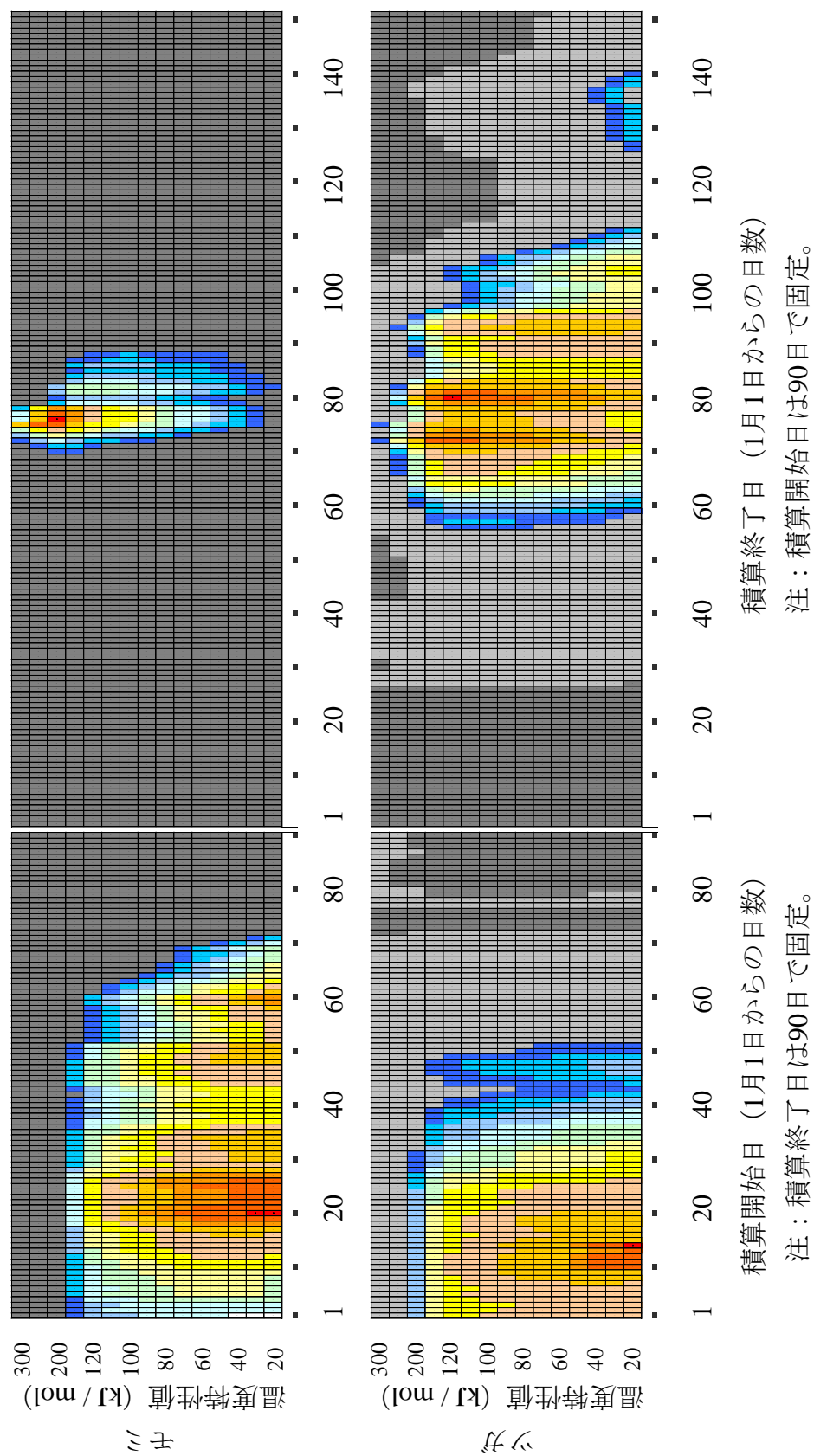


Fig. 5.23. 温度変換日数法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（モミ，ツガ）

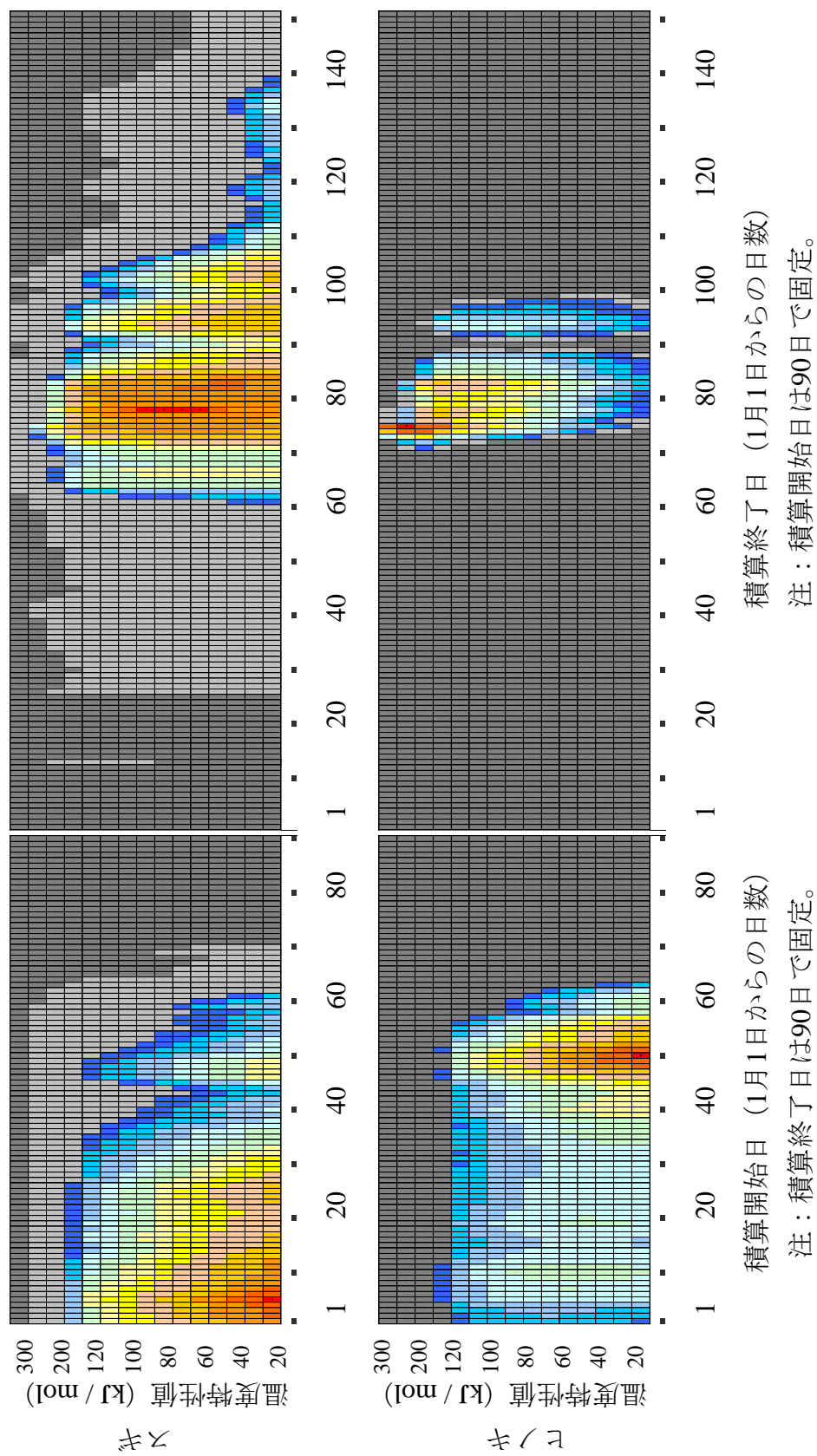


Fig. 5.24. 温度変換日数法における限界温度と積算開始日，積算終了日の検討（スギ，ヒノキ）

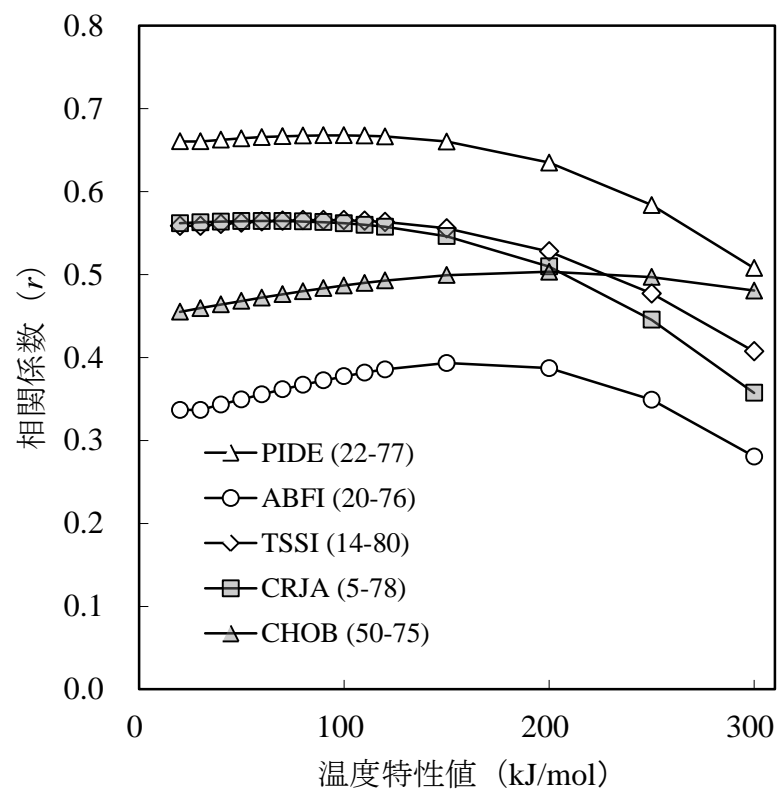


Fig. 5.25. 温度変換日数法における温度特性値 (E_a) の検討

注 : 括弧内の数値は最適積算期間を示した。

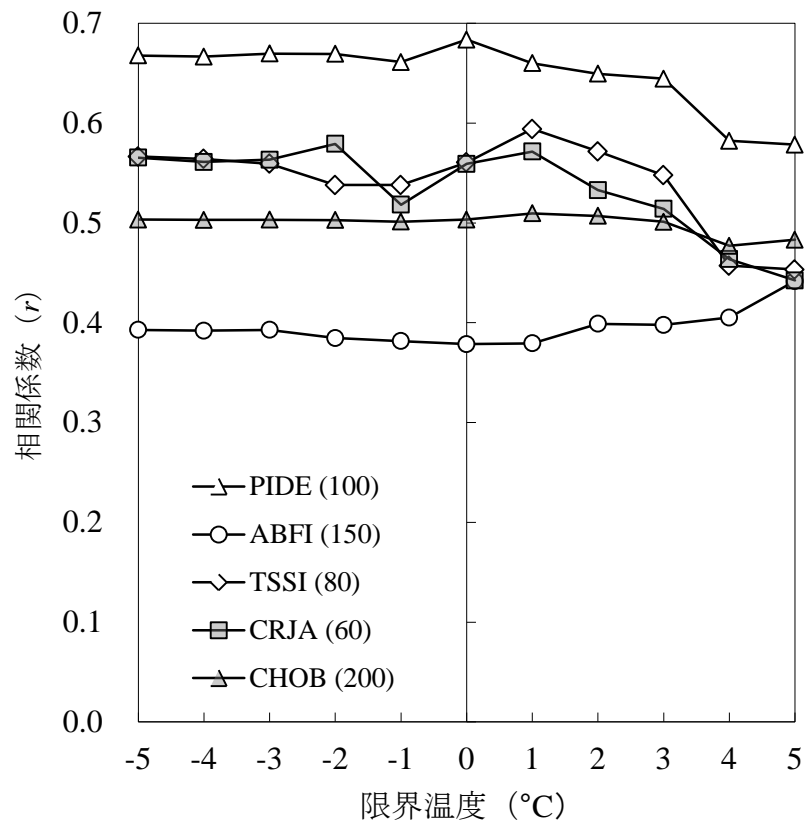


Fig. 5.26. 最適な E_a を定めた温度変換日数における限界温度の検討

注 : 括弧内の数値は最適な温度特性値(E_a)を示した。

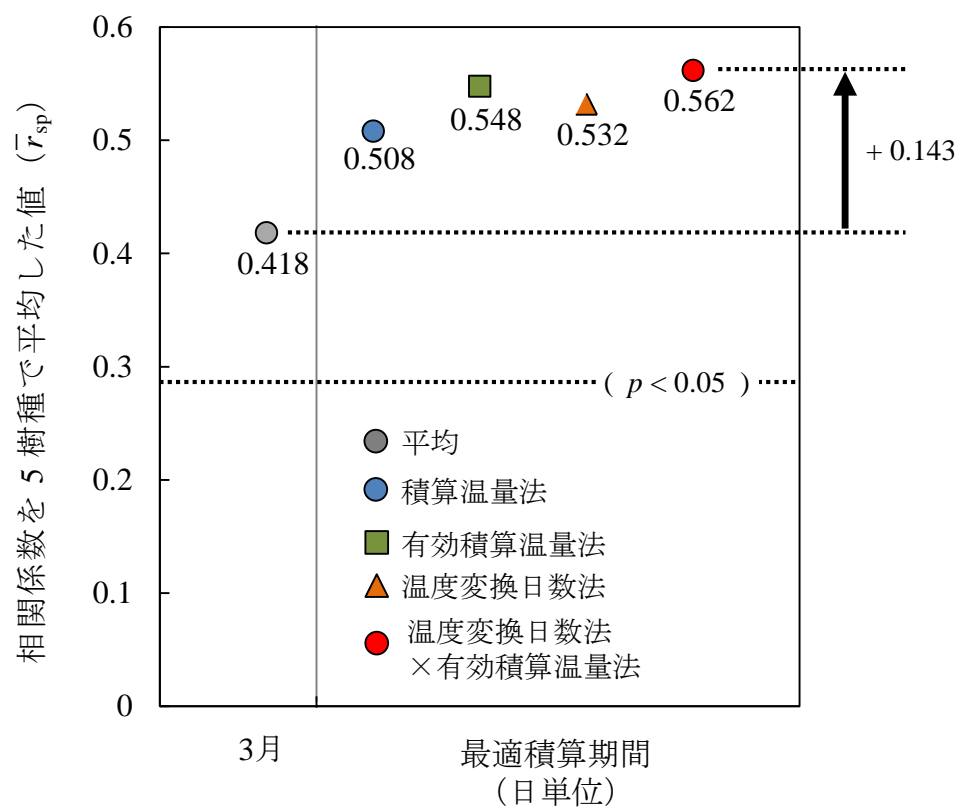
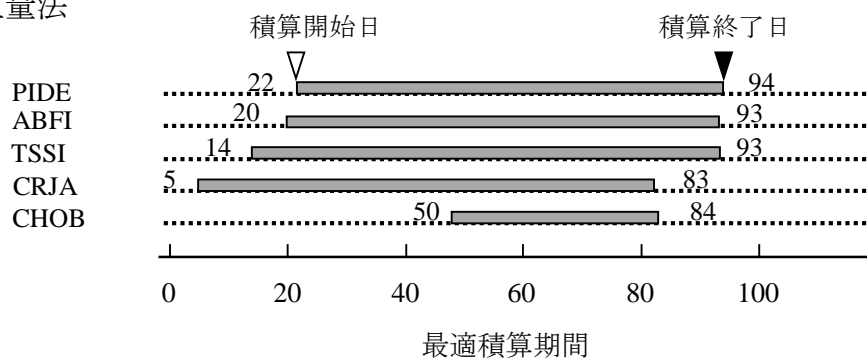
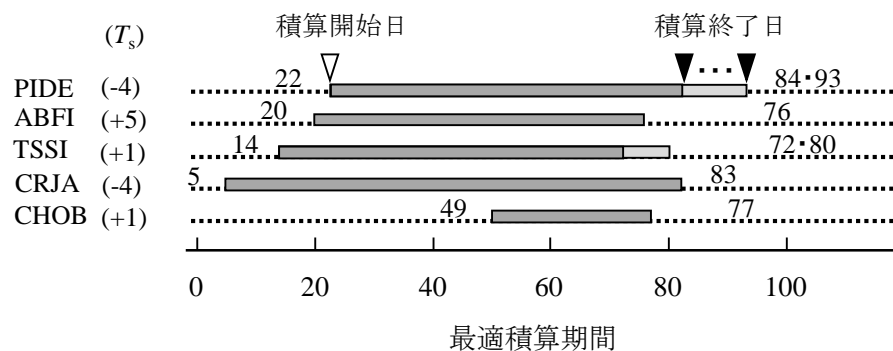


Fig. 5.27. 最適積算期間や限界温度，温度特性値の効果

○積算温量法



○有効積算温量法



○温度変換日数法

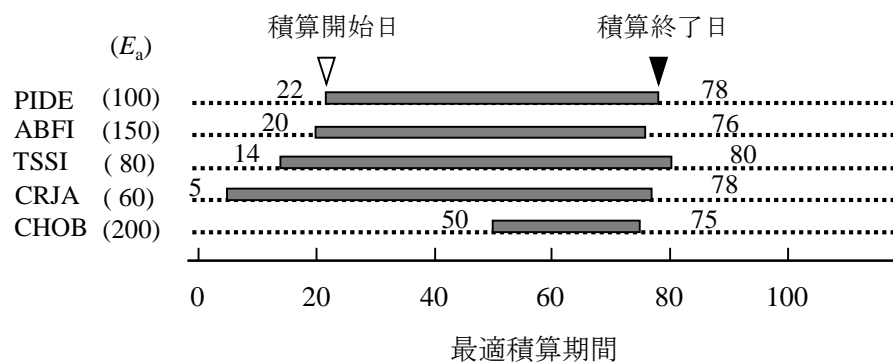


Fig. 5.28. 異なる算出方法による最適積算期間

凡 例 : T_s : 限界温度, E_a : 温度特性値

5.2.4 結論

本節では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」として「開花日推定法の導入」を検討した。気候変数の算出方法として、積算温量法と有効積算温量法、温度変換日数法を用いて「限界温度 (T_s)、温度特性値 (E_a)、最適積算期間」の検討をおこなった。その際には、細胞分裂再開前の気温と年輪幅との関係に焦点を絞った。

その結果、1) どの算出方法においても積算期間を日単位で検討した最適積算期間にすることで r は高くなっていた。また、その最適積算期間において有効積算温量法と温度変換日数法を用いることで積算温量法よりも高い r が認められ、その両方法を併用することでさらに高い r が認められた。つまり、細胞分裂再開前の気温と年輪幅との関係には、 T_s や E_a の影響が含まれていると考える。

2) T_s や E_a は樹種によって異なっていた。 T_s や E_a については、現在は十分に理解できていないため、今後の課題である。

3) 積算開始日は樹種による差が大きいですが、どの算出方法を用いてもほぼ同じ日が最適となった。一方、積算終了日は樹種による差が少ないが、算出方法によって最適な積算終了に違いがあり、また同じ算出方法であっても最適な積算終了日が特定できないものもあった。最適積算期間の決定方法についても今後検討していく必要がある。一方で、最適積算期間を検討することで、形成層活動の期間や季節変化に関する情報を得られる可能性もある。

以上のことから、樹木年輪－気候関係の解析を行う際に、植物生理学的な考えに基づいた気候変数の導入を検討することで、樹木年輪－気候関係を明確に示すことができた。また、そのことにより形成層や新生細胞の活動における T_s や E_a 、さらには活動期間について検討しうることがわかった。

5.3 まとめ

第5章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「気候情報」に着目した。第5.1節では、その「気候情報」の中で、「供試樹木の生育地から気象観測地までの距離」に着目し、供試樹種種の生育地である奥多摩と、それ以外の気象観測地で得られた気候変数を用いて、奥多摩の樹木年輪情報との樹木年輪－気候関係を検討した。第5.2節では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる気候情報として「開花日推定法の導入」を検討した。その結果を以下にまとめる。

1) 「供試樹木の生育地から気象観測地までの距離」に着目した結果、樹木の気候応答を明らかにするためには、供試樹木の生育地とできるだけ近い位置に設置された気象観測地から気候情報を得る必要があることがわかった。

2) 気候情報として「開花日推定法の導入」を検討した結果、樹木年輪－気候関係の解析を行う際に、限界温度や温度特性値、最適積算期間を検討することによって、樹木年輪－気候関係を明確に示すことができ、また、そのことにより形成層や新生細胞の活動における限界温度や温度特性値、さらには形成層活動の期間や季節変化について検討しうることがわかった。

以上のことから、木部形成に関わる樹木の気候応答を明らかにするために樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」について、生物学的な視点を導入して検討することで、樹木年輪－気候関係の解析結果の中に因果関係が含まれていることを示すことができたと考える。

第6章 樹木年輪－気候関係の解析 III（解析方法の検討）

6.1 統計期間の検討

6.1.1 はじめに

樹木年輪－気候関係の解析方法として多くの研究では単相関分析やレスポンスファンクション解析を用いている。その際には、統計期間をできるだけ長くとることが信頼性の高い結果を得るためには重要となる。一方で、その統計期間内で樹木年輪－気候関係が一定の関係にあるかを明らかにしておく必要もあると考える。この樹木年輪－気候関係の時間的な変動性を検討する方法として移動相関分析が用いられている（Biondi 1997 ; Carrer et al. 2006 ; Filippo et al. 2007 ; Reynolds-Henne et al. 2007 ; Gea-Izoquierdo et al. 2009 ; Carrer et al. 2010 ; Carrer 2011）。この手法を用いることで、より動的な視点で樹木年輪－気候関係を検討することができる（Biondi 1997）と提案している。しかしながら、日本においては移動相関分析を用いて樹木年輪－気候関係の時間的な変動性を検討した報告はみあたらない。

そこで本節では、樹木年輪－気候関係の「解析方法」の中で「統計期間」に着目し、統計期間内で常に樹木年輪－気候関係が維持されているかを検討するために、移動相関分析を用いて樹木年輪－気候関係の経年変動を検討した。

6.1.2 方法

a) 樹木年輪情報

第2章で構築した7樹種（アカマツ、モミ、ツガ、スギ、ヒノキ、サワグルミ、ミズナラ）の年輪幅指数（ IW_{ar} ）および年輪内平均密度指数（ ID_{mean} ）のクロノロジーを用いた。

b) 気候情報

奥多摩の当年 1 月から 10 月の月平均気温 ($T_{\text{mean(m)}}$) を用いた。

c) 解析方法

樹木年輪－気候関係の解析における統計期間を一定間隔で区切り、それを 1 年ずつずらしながら単相関分析を行う移動相関分析を行った。統計期間の間隔について既往の研究では 31 年から 100 年の間で様々であった (Biondi 1997 ; Carrer et al. 2006 ; Filippo et al. 2007 ; Carrer et al. 2010 ; Carrer 2011)。統計期間の間隔を短くすることは自由度を少なくすることであるため解析結果の信頼性を低くするが、同時に樹木年輪－気候関係の時間的な変動性を細かく示すことができる。そこで、統計期間の間隔を 10 年または 20 年とした場合の樹木年輪－気候関係を検討したが、樹木年輪－気候関係の時間的な変動は 10 年または 20 年の場合で似た傾向を示していたため、本研究では 20 年に設定した。なお、全体の統計期間は 1954 年から 2000 年までの 47 年間である。

6.1.3 結果および考察

a) 年輪幅指数 (IW_{ar}) と月平均気温 ($T_{\text{mean(m)}}$) との関係

Table 6.1, Table 6.2 に 7 樹種の IW_{ar} と $T_{\text{mean(m)}}$ との 20 年移動相関分析の結果を示した。統計期間が全期間 (1954～2000 年、各表の最下段) の場合に相関係数 (r_{all}) が有意 ($p < 0.05$) であった相関関係の中で、唯一アカマツの IW_{ar} と当年 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ との間のみで、20 年移動相関分析で得られた相関係数 (r_{20y}) においても全期間で有意であった。その他の r_{all} が有意であった相関関係は、 r_{20y} が有意でない期間があった。その中で、ツガおよびスギの IW_{ar} と当年 1 月から 3 月の $T_{\text{mean(m)}}$ との間では統計期間が近年になるほど r_{20y} の絶対値が小さくなっていた。一方で、 r_{all} が有意でなかったミズナラの IW_{ar} と当年 3 月と 4 月の $T_{\text{mean(m)}}$

との間では r_{20y} の絶対値が 1970 年以降に大きくなり、有意な値を示していた。

つまり、樹木年輪－気候関係は全統計期間内で一定であることは少なく、変動していることがわかった。このような樹木年輪－気候関係の経年変動について Filippo ら (2007) は生物季節との関連性を指摘している。また、その中では、1) 近年になってから相関関係が低くなっている関係、2) 近年になってから相関関係が高くなっている関係があることがわかった。このような近年において相関関係がそれ以前と異なる傾向を示す関係について、近年における地球温暖化傾向との関連性を指摘した報告 (Filippo et al. 2007; Carrer et al. 2010) がある。

b) 年輪内平均密度指数 (ID_{mean}) と月平均気温 ($T_{mean(m)}$) との関係

Table 6.3, Table 6.4 に 7 樹種の ID_{mean} と $T_{mean(m)}$ との 20 年移動相関分析の結果を示した。 r_{all} が有意であった相関関係であっても、全期間において r_{20y} が有意であった関係はなかった。その中で、 ID_{mean} と当年活動期の $T_{mean(m)}$ との間では、高い r_{20y} が認められる月が全統計期間の前半と後半とで異なっていた。つまり、アカマツでは 6 月から 7 月と 8 月へと、モミとツガでは 6 月から 7 月へと、スギでは 5 月と 6 月から 7 月へと、ヒノキでは 5 月から 6 月へと移行していた。

また、アカマツとモミ、ツガ、スギ、ミズナラの ID_{mean} と 7 月の $T_{mean(m)}$ との間、ヒノキの ID_{mean} と 6 月の $T_{mean(m)}$ との間では、全統計期間の始めは有意な r_{20y} が認められたが、途中の期間で有意でなくなり、その後再度有意な r_{20y} が認められるようになっていた。

つまり、高い r_{20y} が認められる月が 2 ヶ月から 3 ヶ月の間で変動している場合があることから、樹木年輪－気候関係の経年変動には、時期（季節）的な変動も含まれていると考えた。このような樹木年輪－気候関係の経年変動について Filippo ら (2007) は生物季節の変化（成長再開時期の移行や成長期間の拡大）との関連性を指摘している。

また、「 IW_{ar} と形成層活動再開直前の気温との関係」と「 ID_{mean} と当年活動期の気温との関係」とでは経年変動が異なっていた。つまり、木部形成期間全般にわたって気候による影響を受けやすい時期（年）やそうではない時期があるわけではないと考える。

Table 6.1. IW_{ar} と $T_{mean(m)}$ との間の 20 年移動相関関係（アカマツ・モミ・ツガ）

統計期間（年）	PIDE										統計期間（年）	ABFI									
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	0.041	0.565	0.609	0.159	0.165	0.027	0.237	0.16	0.441	0.436	1954-1973	-0.29	0.476	0.283	-0.17	0.192	0.011	0.056	-0.06	0.193	0.29
1955-1974	0.087	0.579	0.623	0.144	0.129	-0.03	0.276	0.201	0.51	0.417	1955-1974	-0.29	0.472	0.257	-0.14	0.184	-0.06	-0.05	-0.06	0.208	0.273
1956-1975	0.114	0.555	0.596	0.193	0.165	-0.14	0.213	0.235	0.539	0.381	1956-1975	-0.28	0.441	0.223	-0.12	0.199	-0.14	-0.12	-0.05	0.233	0.239
1957-1976	0.141	0.572	0.575	0.239	0.21	-0.19	0.253	0.301	0.53	0.364	1957-1976	-0.24	0.364	0.205	0.017	0.292	-0.09	0.032	0.126	0.325	0.262
1958-1977	0.25	0.553	0.498	0.251	0.133	-0.27	0.245	0.373	0.481	0.373	1958-1977	-0.33	0.248	0.253	0.059	0.233	-0.19	0.021	-0.09	0.331	0.303
1959-1978	0.242	0.543	0.51	0.256	0.136	-0.28	0.217	0.362	0.486	0.384	1959-1978	-0.34	0.291	0.288	0.102	0.233	-0.21	-0.02	-0.12	0.386	0.305
1960-1979	0.399	0.575	0.522	0.171	-0.01	0.132	0.071	0.341	0.425	0.475	1960-1979	-0.28	0.128	0.209	0.062	0.183	-0.05	-0.13	-0.16	0.288	0.222
1961-1980	0.39	0.59	0.54	0.173	-0.02	0.105	0.082	0.31	0.441	0.464	1961-1980	-0.29	0.134	0.214	0.07	0.167	-0.07	-0.12	-0.1	0.303	0.211
1962-1981	0.411	0.599	0.496	0.176	0.036	0.143	0.082	0.333	0.522	0.53	1962-1981	-0.31	0.119	0.218	0.086	0.195	-0.07	-0.09	-0.11	0.347	0.272
1963-1982	0.393	0.56	0.517	0.15	0.172	0.072	-0.08	0.281	0.451	0.477	1963-1982	-0.26	0.082	0.297	0.05	0.401	-0.13	-0.31	-0.23	0.155	0.246
1964-1983	0.322	0.532	0.478	0.183	0.245	0.103	-0.05	0.31	0.398	0.47	1964-1983	-0.24	0.084	0.299	0.073	0.4	-0.18	-0.34	-0.22	0.213	0.264
1965-1984	0.427	0.614	0.578	0.357	0.308	0.247	-0.15	0.16	0.308	0.442	1965-1984	-0.12	0.11	0.379	0.594	0.523	-0.13	-0.29	-0.18	0.181	0.085
1966-1985	0.437	0.59	0.559	0.297	0.213	0.272	-0.2	0.119	0.25	0.41	1966-1985	-0.08	0.052	0.305	0.475	0.338	-0.08	-0.4	-0.25	0.068	-0.01
1967-1986	0.53	0.557	0.527	0.28	0.317	0.331	-0.18	0.089	0.13	0.369	1967-1986	-0.04	0.008	0.28	0.468	0.387	-0.05	-0.4	-0.27	0.018	-0.05
1968-1987	0.619	0.634	0.507	0.315	0.292	0.294	-0.2	0.047	0.123	0.474	1968-1987	-0.06	-0.06	0.169	0.428	0.261	-0.15	-0.53	-0.34	-0.03	-0.16
1969-1988	0.623	0.599	0.596	0.373	0.271	0.323	-0.23	0.019	0.078	0.425	1969-1988	0.002	-0.07	0.141	0.376	0.254	-0.11	-0.55	-0.32	-0	-0.17
1970-1989	0.517	0.527	0.56	0.32	0.285	0.331	-0.2	2E-04	-0.01	0.447	1970-1989	0.043	-0.03	0.192	0.405	0.134	-0.15	-0.56	-0.32	0.124	-0.17
1971-1990	0.473	0.602	0.589	0.308	0.371	0.387	-0.14	0.097	0.12	0.523	1971-1990	0.052	-0.05	0.216	0.419	0.113	-0.15	-0.56	-0.32	0.089	-0.18
1972-1991	0.551	0.658	0.673	0.38	0.405	0.497	0.006	0.112	0.137	0.516	1972-1991	0.059	-0.04	0.192	0.37	0.105	-0.16	-0.55	-0.3	0.057	-0.23
1973-1992	0.533	0.659	0.662	0.397	0.386	0.478	-0	0.092	0.104	0.439	1973-1992	0.199	0.003	0.304	0.4	0.181	-0.2	-0.51	-0.32	0.039	-0.25
1974-1993	0.437	0.565	0.705	0.345	0.445	0.576	-0	0.036	0.13	0.534	1974-1993	0.184	-0.02	0.31	0.435	0.191	-0.19	-0.47	-0.31	0.05	-0.21
1975-1994	0.431	0.566	0.705	0.367	0.454	0.584	-0.09	-0.01	0.062	0.447	1975-1994	0.218	-0	0.375	0.409	0.163	-0.19	-0.49	-0.33	0.047	-0.25
1976-1995	0.443	0.578	0.722	0.365	0.461	0.584	-0.1	-0.02	0.074	0.446	1976-1995	0.241	0.017	0.4	0.409	0.176	-0.16	-0.49	-0.34	0.052	-0.25
1977-1996	0.443	0.611	0.728	0.337	0.443	0.559	-0.13	-0.03	0.066	0.423	1977-1996	0.214	0.061	0.426	0.204	-0	-0.17	-0.65	-0.5	-0.13	-0.35
1978-1997	0.339	0.577	0.76	0.368	0.395	0.543	-0.12	-0.12	0.032	0.318	1978-1997	0.329	0.141	0.409	0.14	0.041	-0.1	-0.68	-0.42	-0.19	-0.45
1979-1998	0.404	0.565	0.711	0.23	0.276	0.565	-0.08	-0.08	-0	0.233	1979-1998	0.435	0.086	0.337	-0.06	-0.09	-0.03	-0.57	-0.33	-0.26	-0.53
1980-1999	0.268	0.359	0.697	0.262	0.392	0.471	-0.05	-0.1	0.049	0.09	1980-1999	0.397	0.046	0.35	-0.08	-0.1	-0.03	-0.57	-0.32	-0.17	-0.56
1981-2000	0.308	0.301	0.656	0.216	0.431	0.523	-0.01	-0.11	0.063	0.105	1981-2000	0.422	0.033	0.344	-0.1	-0.08	0.012	-0.57	-0.42	-0.19	-0.55
1954-2000	0.241	0.48	0.624	0.156	0.239	0.321	0.106	0.073	0.27	0.309	1954-2000	-0.01	0.168	0.294	4E-04	0.08	-0.04	-0.21	0.082	-0.07	-0.07

統計期間（年）	TSSI									
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	0.318	0.713	0.495	-0.05	-0.13	-0.28	0.04	0.285	0.231	0.277
1955-1974	0.355	0.707	0.534	-0.1	-0.15	-0.27	0.264	0.314	0.286	0.287
1956-1975	0.395	0.687	0.5	-0.05	-0.11	-0.45	0.186	0.36	0.32	0.238
1957-1976	0.392	0.621	0.512	0.03	-0.03	-0.39	0.249	0.4	0.385	0.282
1958-1977	0.412	0.625	0.507	0.017	-0.02	-0.36	0.249	0.381	0.389	0.258
1959-1978	0.448	0.591	0.546	-0.01	-0.06	-0.23	0.278	0.371	0.397	0.19
1960-1979	0.519	0.531	0.519	-0.05	-0.12	-0.07	0.219	0.372	0.35	0.166
1961-1980	0.551	0.506	0.483	0.027	-0.08	-0.05	0.166	0.348	0.291	0.211
1962-1981	0.519	0.481	0.485	0.077	0.013	-0.02	0.321	0.362	0.44	0.373
1963-1982	0.521	0.452	0.518	0.058	0.147	-0.06	0.133	0.293	0.351	0.353
1964-1983	0.492	0.433	0.496	0.066	0.191	-0.03	0.165	0.304	0.302	0.339
1965-1984	0.581	0.5	0.564	0.313	0.252	0.106	0.119	0.22	0.232	0.272
1966-1985	0.583	0.486	0.579	0.311	0.2	0.119	0.083	0.186	0.2	0.263
1967-1986	0.652	0.395	0.533	0.32	0.298	0.203	0.103	0.186	0.144	0.164
1968-1987	0.638	0.357	0.495	0.304	0.25	0.17	0.035	0.159	0.126	0.094
1969-1988	0.672	0.287	0.585	0.351	0.219	0.217	-0.03	0.138	0.081	-0.01
1970-1989	0.637	0.282	0.621	0.355	0.138	0.196	-0.02	0.127	0.123	0.015
1971-1990	0.589	0.411	0.617	0.331	0.269	0.272	0.044	0.236	0.287	0.159
1972-1991	0.596	0.42	0.563	0.269	0.257	0.209	0.049	0.264	0.238	0.092
1973-1992	0.509	0.431	0.501	0.3	0.186	0.222	0.029	0.271	0.209	-0.05
1974-1993	0.446	0.332	0.555	0.123	0.234	0.343	-0.08	0.124	0.209	-0.01
1975-1994	0.361	0.309	0.363	0.253	0.354	0.369	-0.16	0.194	0.154	0.109
1976-1995	0.376	0.304	0.365	0.203	0.322	0.432	-0.16	0.034	0.232	0.036
1977-1996	0.387	0.415	0.386	0.206	0.312	0.367	-0.27	0.021	0.232	0.096
1978-1997	0.194	0.34	0.417	0.229	0.222	0.33	-0.23	-0.1	0.147	-0.06
1979-1998	0.234	0.392	0.419	0.184	0.157	0.32	-0.26	-0.09	0.177	-0.08
1980-1999	0.159	0.311	0.411	0.156	0.163	0.305	-0.25	-0.08	0.239	-0.12
1981-2000	0.179	0.288	0.399	0.138	0.183	0.342	-0.24	-0.11	0.242	-0.11
1954-2000	0.293	0.45	0.441	0.035	0.037	0.051	0.047	0.162	0.274	0.076

凡例：PIDE：アカマツ，ABFI：モミ，
TSSI：ツガ，CRJA：スギ，
 IW_{ar} ：年輪幅指数， $T_{mean(m)}$ ：月
平均気温。

	n = 20	n = 47
<div></div> : $p > 0.1$	0.38	0.24
<div></div> : $p = 0.05$	0.44	0.29
<div></div> : $p < 0.01$	0.56	0.37

注：表中の数値は樹木年輪指数と気候変数との相関係数を示した。赤色の数値は有意な負の相関係数 ($p < 0.05$) を示した。

Table 6.2. IW_{ar} と $T_{mean(m)}$ との間の 20 年移動相関関係 (スギ・ヒノキ・サワグルミ・ミズナラ)

統計期間 (年)	CRJA	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	統計期間 (年)	CHOB	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	1954-1973	0.261	0.528	0.645	0.193	-0.2	-0.14	-0.01	0.166	0.36	0.208		1954-1973	0.204	0.57	0.225	0.071	0.018	-0.11	0.077	0.271	0.352	0.2
	1955-1974	0.285	0.536	0.656	0.166	-0.22	-0.16	0.091	0.188	0.395	0.215		1955-1974	0.254	0.58	0.271	0.038	-0.02	-0.15	0.197	0.312	0.422	0.179
	1956-1975	0.285	0.484	0.611	0.193	-0.21	-0.27	0.013	0.191	0.44	0.159		1956-1975	0.273	0.554	0.236	0.072	0.004	-0.26	0.142	0.336	0.445	0.14
	1957-1976	0.285	0.435	0.625	0.236	-0.14	-0.23	0.078	0.238	0.479	0.195		1957-1976	0.257	0.431	0.308	0.169	0.1	-0.09	0.25	0.398	0.597	0.265
	1958-1977	0.354	0.427	0.577	0.232	-0.19	-0.25	0.07	0.292	0.448	0.185		1958-1977	-0.01	0.185	0.364	0.221	-0.02	-0.27	0.194	-0.08	0.542	0.324
	1959-1978	0.298	0.477	0.581	0.299	-0.15	-0.39	-0.02	0.253	0.493	0.247		1959-1978	-0.05	0.199	0.347	0.255	0.024	-0.45	0.151	-0.06	0.525	0.45
	1960-1979	0.297	0.494	0.59	0.297	-0.16	-0.32	-0.02	0.254	0.528	0.242		1960-1979	-0.13	0.11	0.287	0.279	0.085	-0.54	0.205	-0.06	0.535	0.291
	1961-1980	0.316	0.464	0.575	0.3	-0.11	-0.21	-0.08	0.127	0.469	0.275		1961-1980	-0.12	0.122	0.312	0.26	0.089	-0.48	0.204	-0.08	0.546	0.291
	1962-1981	0.254	0.433	0.59	0.316	-0.13	-0.24	-0.03	0.086	0.478	0.331		1962-1981	-0.16	0.104	0.336	0.264	0.044	-0.51	0.25	-0.12	0.531	0.318
統計期間 (年)	CRJA	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	統計期間 (年)	CHOB	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	1963-1982	0.307	0.425	0.664	0.309	0.013	-0.25	-0.14	-0.02	0.359	0.375		1963-1982	-0.12	0.062	0.401	0.204	0.301	-0.53	-0.07	-0.24	0.309	0.268
	1964-1983	0.199	0.352	0.581	0.396	0.109	-0.27	-0.15	0.034	0.305	0.367		1964-1983	-0.23	0.036	0.383	0.187	0.35	-0.45	-0.01	-0.25	0.228	0.24
	1965-1984	0.328	0.45	0.65	0.621	0.183	-0.08	-0.21	-0.06	0.223	0.31		1965-1984	-0.06	0.167	0.477	0.411	0.4	-0.25	-0.07	-0.31	0.159	0.185
	1966-1985	0.377	0.369	0.583	0.488	-0.03	-0.01	-0.33	-0.17	0.082	0.225		1966-1985	-0.01	0.119	0.438	0.32	0.236	-0.2	-0.16	-0.37	0.061	0.126
	1967-1986	0.519	0.272	0.546	0.511	0.098	0.073	-0.34	-0.22	-0.05	0.126		1967-1986	0.078	0.044	0.397	0.306	0.339	-0.16	-0.15	-0.41	-0.05	0.062
	1968-1987	0.517	0.258	0.529	0.504	0.075	0.055	-0.35	-0.24	-0.06	0.101		1968-1987	0.074	0.022	0.357	0.293	0.29	-0.2	-0.2	-0.44	-0.07	0.02
	1969-1988	0.461	0.307	0.525	0.5	0.093	0.03	-0.3	-0.23	-0.05	0.154		1969-1988	0.114	-0.05	0.419	0.326	0.265	-0.17	-0.24	-0.47	-0.11	-0.06
	1970-1989	0.532	0.364	0.549	0.533	-0.01	-0.01	-0.32	-0.2	0.125	0.123		1970-1989	0.213	0.038	0.451	0.372	0.149	-0.2	-0.26	-0.43	0.076	-0.08
	1971-1990	0.498	0.456	0.543	0.517	0.092	0.057	-0.26	-0.1	0.248	0.223		1971-1990	0.16	0.169	0.6	0.376	0.177	0.033	-0.15	-0.21	0.214	0.093
統計期間 (年)	CRJA	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	統計期間 (年)	CHOB	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	1972-1991	0.483	0.452	0.439	0.386	0.063	-0.05	-0.28	-0.06	0.16	0.109		1972-1991	0.115	0.144	0.402	0.18	0.118	-0.14	-0.22	-0.15	0.089	-0.04
	1973-1992	0.45	0.453	0.412	0.412	0.029	-0.08	-0.29	-0.09	0.114	-0.01		1973-1992	0.077	0.135	0.384	0.177	0.097	-0.14	-0.22	-0.15	0.08	-0.07
	1974-1993	0.427	0.418	0.396	0.249	0.017	-0.04	-0.41	-0.26	0.068	-0.05		1974-1993	0.043	0.098	0.389	0.153	0.109	-0.12	-0.22	-0.18	0.083	-0.04
	1975-1994	0.39	0.399	0.307	0.289	0.05	-0.04	-0.42	-0.22	0.059	0.008		1975-1994	0.023	0.095	0.366	0.181	0.127	-0.12	-0.29	-0.19	0.038	-0.06
	1976-1995	0.429	0.415	0.344	0.256	0.075	0.075	-0.41	-0.3	0.114	-0.02		1976-1995	0.053	0.112	0.386	0.17	0.133	-0.05	-0.29	-0.24	0.079	-0.08
	1977-1996	0.436	0.475	0.349	0.306	0.121	0.023	-0.46	-0.26	0.167	0.064		1977-1996	0.035	0.147	0.396	0.064	0.041	-0.07	-0.37	-0.31	-0.01	-0.12
	1978-1997	0.428	0.472	0.363	0.329	0.111	0.007	-0.46	-0.32	0.171	0.071		1978-1997	0.101	0.228	0.375	-0.02	0.075	0.032	-0.37	-0.2	-0.09	-0.28
	1979-1998	0.492	0.428	0.323	0.188	0.032	0.066	-0.39	-0.28	0.102	-0.01		1979-1998	0.161	0.216	0.349	-0.1	0.007	0.058	-0.34	-0.17	-0.13	-0.33
	1980-1999	0.423	0.378	0.331	0.147	0.021	0.072	-0.38	-0.26	0.186	-0.02		1980-1999	0.188	0.305	0.412	-0.14	-0.04	0.146	-0.36	-0.15	-0.06	-0.28
1981-2000	0.439	0.317	0.299	0.119	0.053	0.057	-0.3	-0.19	0.237	-0.02	1981-2000	0.205	0.274	0.396	-0.15	-0.01	0.157	-0.32	-0.14	-0.04	-0.28		
1954-2000	0.353	0.38	0.431	0.17	-0.01	-0.01	-0.16	-0.05	0.325	0.086	1954-2000	0.082	0.192	0.309	0.028	0.02	-0.04	-0.09	-0.11	0.149	-0.09		

統計期間 (年)	PTRH	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	統計期間 (年)	QUCR	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	1954-1973	0.308	-0.25	0.244	0.128	0.342	0.405	0.072	-0.17	-0.01	0.363		1954-1973	0.324	-0.08	0.064	-0	0.242	0.21	-0.06	0.063	0.003	0.367
	1955-1974	0.301	-0.25	0.221	0.144	0.341	0.438	-0	-0.17	-0.01	0.363		1955-1974	0.356	-0.06	0.085	-0	0.213	0.183	-0.05	0.097	0.061	0.348
	1956-1975	0.286	-0.27	0.204	0.142	0.328	0.472	-0.02	-0.18	0.013	0.351		1956-1975	0.348	-0.09	0.052	0.004	0.211	0.157	-0.1	0.092	0.089	0.321
	1957-1976	0.315	-0.25	0.174	0.167	0.341	0.447	0.01	-0.09	0.008	0.328		1957-1976	0.406	-0.09	-0.02	0.186	0.36	0.101	0.095	0.35	0.185	0.283
	1958-1977	0.373	-0.2	0.126	0.147	0.359	0.471	0.01	0.042	-0.02	0.295		1958-1977	0.415	-0.01	-0.01	0.151	0.465	0.205	0.111	0.352	0.225	0.236
	1959-1978	0.36	-0.16	0.143	0.168	0.362	0.432	-0.02	0.024	0.018	0.305		1959-1978	0.432	-0.05	-0.01	0.105	0.445	0.282	0.144	0.357	0.19	0.199
	1960-1979	0.25	-0.15	0.146	0.215	0.441	0.164	0.072	0.03	0.083	0.224		1960-1979	0.442	0.067	0.054	0.102	0.423	0.299	0.145	0.364	0.253	0.271
	1961-1980	0.266	-0.15	0.16	0.186	0.457	0.208	0.046	-0.05	0.064	0.239		1961-1980	0.423	0.107	0.091	0.087	0.377	0.216	0.2	0.375	0.317	0.238
	1962-1981	0.348	-0.09	0.198	0.122	0.321	0.149	-0.17	-0.09	-0.15	0.06		1962-1981	0.406	0.108	0.103	0.084	0.365	0.19	0.214	0.351	0.307	0.247
1963-1982	0.315	-0.1	0.214	0.107	0.377	0.068	-0.26	-0.08	-0.15	-0	1963-1982	0.413	0.099	0.128	0.074	0.385	0.163	0.111	0.321	0.266	0.241		
統計期間 (年)	PTRH	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	統計期間 (年)	QUCR	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	1964-1983	0.383	-0.04	0.272	0.022	0.318	0.125	-0.2	-0.12	-0.15	-0.01		1964-1983	0.465	0.081	0.103	0.134	0.389	0.062	0.035	0.34	0.34	0.262
	1965-1984	0.255	-0.15	0.1	-0.07	0.248	0.011	-0.13	-0.04	-0.11	-0.02		1965-1984	0.551	0.28	0.318	0.251	0.445	0.24	-0.12	0.137	0.253	0.284
	1966-1985	0.238	-0.15	0.086	-0.1	0.239	0.008	-0.12	-0.03	-0.11	-0.03		1966-1985	0.511	0.286	0.327	0.285	0.464	0.223	-0.08	0.16	0.27	0.293
	1967-1986	0.195	-0.16	0.092	-0.09	0.216	0.007	-0.13	-0.01	-0.06	-0.03		1967-1986	0.486	0.309	0.345	0.287	0.461	0.22	-0.09	0.161	0.266	0.311
	1968-1987	0.187	-0.16	0.11	-0.09	0.228	0.023	-0.11	-0	-0.06	-0.05		1968-1987	0.505	0.334	0.347	0.298	0.466	0.219	-0.04	0.161	0.269	0.348
	1969-1988	0.072	-0.13	0.149	-0.01	0.231	-0.03	-0.01	-0.03	-0.09	-0.03		1969-1988	0.26	0.312	0.428	0.427	0.417	0.111	0.104	0.065	0.146	

Table 6.3. ID_{mean} と $T_{\text{mean(m)}}$ との間の 20 年移動相関関係 (アカマツ・モミ・ツガ)

PIDE	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	ABFI	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	-0.1	0.118	-0.02	-0.2	0.413	0.541	0.451	-0.05	-0.02	0.499	1954-1973	0.226	6E-04	0.372	0.24	0.336	0.552	0.474	-0.01	0.066	0.217
1955-1974	0.029	0.176	0.062	-0.22	0.307	0.411	0.46	0.073	0.186	0.385	1955-1974	0.308	0.046	0.422	0.203	0.255	0.517	0.539	0.079	0.203	0.144
1956-1975	0.001	-0.01	-0.16	-0.17	0.305	0.159	0.221	0.051	0.379	0.179	1956-1975	0.347	0.007	0.374	0.269	0.305	0.456	0.484	0.119	0.248	0.077
1957-1976	-0.01	-0.05	-0.14	-0.15	0.301	0.228	0.221	0.051	0.4	0.223	1957-1976	0.344	-0.02	0.394	0.261	0.297	0.513	0.455	0.115	0.259	0.1
1958-1977	0.101	-0.02	-0.23	-0.16	0.297	0.242	0.215	0.19	0.364	0.192	1958-1977	0.394	-0.04	0.338	0.273	0.247	0.466	0.451	0.16	0.213	0.107
1959-1978	0.134	-0.11	-0.25	-0.24	0.26	0.355	0.283	0.22	0.245	0.137	1959-1978	0.416	-0.12	0.285	0.244	0.316	0.379	0.503	0.257	0.096	0.219
1960-1979	0.038	-0.11	-0.25	-0.19	0.329	0.117	0.367	0.225	0.31	0.07	1960-1979	0.426	0.151	0.452	0.271	0.329	0.376	0.575	0.292	0.266	0.4
1961-1980	0.026	-0.09	-0.24	-0.2	0.298	0.067	0.397	0.236	0.349	0.05	1961-1980	0.398	0.163	0.459	0.288	0.291	0.284	0.597	0.321	0.294	0.371
1962-1981	0.052	-0.05	-0.22	-0.27	0.169	0.002	0.316	0.206	0.22	-0.1	1962-1981	0.485	0.247	0.488	0.241	0.177	0.255	0.513	0.326	0.171	0.254
1963-1982	0.058	-0.04	-0.23	-0.27	0.109	0.023	0.309	0.216	0.234	-0.09	1963-1982	0.463	0.264	0.494	0.249	0.186	0.194	0.416	0.415	0.268	0.193
1964-1983	0.149	0.004	-0.17	-0.31	0.057	0.029	0.308	0.189	0.302	-0.08	1964-1983	0.531	0.287	0.524	0.215	0.165	0.2	0.417	0.397	0.296	0.196
1965-1984	0.068	-0.13	-0.28	-0.3	0.002	-0.08	0.423	0.301	0.319	-0.15	1965-1984	0.53	0.35	0.54	0.152	0.195	0.248	0.33	0.304	0.297	0.291
1966-1985	-0.01	-0.1	-0.3	-0.28	0.109	-0.12	0.476	0.361	0.369	-0.14	1966-1985	0.5	0.338	0.481	0.017	0.142	0.26	0.322	0.33	0.275	0.231
1967-1986	0.045	-0.04	-0.27	-0.29	0.131	-0.14	0.476	0.329	0.279	-0.09	1967-1986	0.544	0.399	0.504	-0.01	0.18	0.233	0.325	0.283	0.156	0.279
1968-1987	0.083	0.036	-0.22	-0.25	0.184	-0.1	0.532	0.344	0.291	0.079	1968-1987	0.592	0.485	0.495	0.04	0.213	0.222	0.411	0.275	0.167	0.491
1969-1988	-0.14	0.061	-0.06	-0.01	0.159	-0.19	0.58	0.185	0.131	0.069	1969-1988	0.434	0.461	0.598	0.175	0.198	0.164	0.469	0.199	0.075	0.452
1970-1989	-0.21	0.032	-0.05	-0.03	0.098	-0.21	0.612	0.169	0.123	0.102	1970-1989	0.343	0.408	0.586	0.137	0.183	0.165	0.493	0.18	0.02	0.487
1971-1990	-0.22	0.185	0.17	0.018	0.13	0.065	0.617	0.31	0.274	0.27	1971-1990	0.246	0.556	0.612	0.117	0.312	0.324	0.543	0.34	0.256	0.629
1972-1991	-0.2	0.199	0.164	0.006	0.128	0.061	0.652	0.333	0.248	0.227	1972-1991	0.261	0.562	0.618	0.149	0.321	0.346	0.575	0.332	0.272	0.644
1973-1992	-0.26	0.19	0.143	0.001	0.111	0.065	0.649	0.332	0.244	0.216	1973-1992	0.097	0.527	0.509	0.114	0.232	0.388	0.562	0.356	0.272	0.631
1974-1993	-0.31	0.13	0.172	0.085	0.151	0.086	0.693	0.406	0.283	0.3	1974-1993	-0.01	0.418	0.525	0.147	0.279	0.427	0.596	0.39	0.31	0.701
1975-1994	-0.37	0.116	0.1	0.133	0.191	0.089	0.669	0.416	0.25	0.313	1975-1994	-0.09	0.408	0.405	0.232	0.356	0.448	0.568	0.429	0.269	0.75
1976-1995	-0.35	0.165	0.153	0.161	0.245	0.062	0.701	0.473	0.159	0.419	1976-1995	-0.07	0.422	0.423	0.229	0.365	0.461	0.558	0.386	0.286	0.748
1977-1996	-0.33	0.206	0.159	0.222	0.292	0.026	0.699	0.5	0.213	0.447	1977-1996	-0.1	0.344	0.388	0.01	0.181	0.481	0.538	0.259	0.091	0.496
1978-1997	-0.45	0.168	0.191	0.249	0.246	0.005	0.698	0.463	0.173	0.336	1978-1997	-0.05	0.344	0.371	0.023	0.196	0.459	0.514	0.279	0.137	0.546
1979-1998	-0.42	0.241	0.216	0.266	0.222	-0.03	0.686	0.457	0.234	0.351	1979-1998	-0.08	0.396	0.396	0.08	0.217	0.441	0.495	0.259	0.179	0.578
1980-1999	-0.42	0.302	0.26	0.237	0.193	0.029	0.674	0.468	0.275	0.417	1980-1999	-0.17	0.304	0.366	0.092	0.268	0.393	0.525	0.258	0.185	0.544
1981-2000	-0.42	0.305	0.263	0.238	0.188	0.042	0.648	0.497	0.264	0.421	1981-2000	-0.15	0.295	0.364	0.076	0.288	0.459	0.506	0.23	0.165	0.563
1954-2000	-0.25	0.109	0.084	0.007	0.212	0.175	0.573	0.314	0.179	0.303	1954-2000	0.093	0.169	0.385	0.109	0.235	0.465	0.498	0.176	0.154	0.363

統計期間 (年)

TSSI	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	-0.01	-0.29	0.254	0.209	0.355	0.658	0.494	-0.08	-0.05	0.072
1955-1974	0.031	-0.27	0.266	0.218	0.322	0.677	0.438	-0.04	0.02	0.012
1956-1975	0.072	-0.32	0.206	0.3	0.389	0.631	0.358	0.009	0.062	-0.07
1957-1976	0.039	-0.36	0.269	0.223	0.318	0.759	0.275	-0.1	0.055	-0.03
1958-1977	-0.06	-0.46	0.276	0.267	0.207	0.576	0.245	-0.24	0.026	0.044
1959-1978	-0.1	-0.47	0.247	0.293	0.273	0.424	0.22	-0.22	-0.02	0.158
1960-1979	-0.21	-0.35	0.362	0.379	0.381	0.211	0.363	-0.22	0.131	0.211
1961-1980	-0.25	-0.25	0.355	0.375	0.219	-0.03	0.447	0.084	0.24	0.101
1962-1981	-0.21	-0.2	0.426	0.332	0.016	-0.12	0.296	0.058	0.023	-0.15
1963-1982	-0.21	-0.2	0.448	0.311	0.119	-0.16	0.139	0.021	-0.03	-0.17
1964-1983	-0.15	-0.19	0.48	0.317	0.094	-0.22	0.092	0.025	0.052	-0.15
1965-1984	-0.26	-0.31	0.216	0.158	0.013	-0.32	0.17	0.123	0.096	-0.13
1966-1985	-0.28	-0.39	0.1	-0.05	-0.14	-0.32	0.098	0.097	0.009	-0.27
1967-1986	-0.22	-0.28	0.177	-0.06	-0.14	-0.37	0.103	0.074	-0.05	-0.18
1968-1987	-0.2	-0.25	0.127	-0.05	-0.2	-0.46	0.094	0.034	-0.07	-0.03
1969-1988	-0.33	-0.12	0.137	0.04	-0.13	-0.5	0.24	-0	-0.08	0.061
1970-1989	-0.24	-0.06	0.181	0.089	-0.21	-0.51	0.206	0.006	0.059	0.049
1971-1990	-0.28	0.11	0.213	0.073	-0.09	-0.3	0.277	0.154	0.247	0.219
1972-1991	-0.3	0.099	0.178	0.048	-0.09	-0.31	0.232	0.148	0.244	0.234
1973-1992	-0.36	0.087	0.155	0.036	-0.12	-0.3	0.226	0.155	0.248	0.242
1974-1993	-0.38	0.031	0.195	0.248	-0.03	-0.25	0.384	0.335	0.308	0.358
1975-1994	-0.4	0.026	0.166	0.262	-0.02	-0.25	0.391	0.337	0.313	0.355
1976-1995	-0.38	0.037	0.182	0.258	-0.02	-0.21	0.381	0.296	0.331	0.348
1977-1996	-0.37	-0.09	0.129	-0.05	-0.21	-0.08	0.367	0.118	0.046	0.041
1978-1997	-0.33	-0.05	0.105	-0.11	-0.19	-0.03	0.377	0.236	0.012	-0.03
1979-1998	-0.25	-0.06	0.089	-0.17	-0.23	-0.01	0.411	0.254	-0	-0.07
1980-1999	-0.22	-0.01	0.084	-0.15	-0.23	-0.01	0.409	0.245	-0.06	-0.02
1981-2000	-0.15	-0.04	0.069	-0.21	-0.15	0.127	0.399	0.115	-0.12	-0.06
1954-2000	-0.16	-0.14	0.165	0.01	-0.01	0.184	0.394	0.053	-0.04	0.002

統計期間 (年)

ABFI	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	0.226	6E-04	0.372	0.24	0.336	0.552	0.474	-0.01	0.066	0.217
1955-1974	0.308	0.046	0.422	0.203	0.255	0.517	0.539	0.079	0.203	0.144
1956-1975	0.347	0.007	0.374	0.269	0.305	0.456	0.484	0.119	0.248	0.077
1957-1976	0.344	-0.02	0.394	0.261	0.297	0.513	0.455	0.115	0.259	0.1
1958-1977	0.394	-0.04	0.338	0.273	0.247	0.466	0.451	0.16	0.213	0.107
1959-1978	0.416	-0.12	0.285	0.244	0.316	0.379	0.503	0.257	0.096	0.219
1960-1979	0.426	0.151	0.452	0.271	0.329	0.376	0.570			

Table 6.4. ID_{mean} と $T_{\text{mean(m)}}$ との間の 20 年移動相関関係 (スギ・ヒノキ・サワグルミ・ミズナラ)

統計期間 (年)	CRJA										統計期間 (年)	CHOB									
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	-0.03	-0.36	-0.17	-0.15	0.533	0.479	0.338	-0.08	-0.08	0.167	1954-1973	0.035	-0.24	0.07	0.182	0.658	0.568	0.49	-0.07	0.113	0.428
1955-1974	0.001	-0.35	-0.15	-0.15	0.508	0.502	0.322	-0.05	-0.03	0.135	1955-1974	0.094	-0.23	0.072	0.229	0.642	0.48	0.315	-0.01	0.237	0.353
1956-1975	0.036	-0.33	-0.16	-0.11	0.545	0.509	0.31	-0.01	-0.04	0.125	1956-1975	0.139	-0.18	0.091	0.266	0.675	0.504	0.326	0.047	0.188	0.368
1957-1976	0.034	-0.31	-0.17	-0.13	0.478	0.513	0.246	-0.04	-0.07	0.114	1957-1976	0.179	-0.16	0.042	0.315	0.703	0.468	0.363	0.148	0.186	0.338
1958-1977	-0.02	-0.35	-0.16	-0.11	0.459	0.449	0.237	-0.11	-0.08	0.14	1958-1977	0.187	-0.19	-0	0.331	0.685	0.408	0.356	0.122	0.155	0.353
1959-1978	0.029	-0.4	-0.17	-0.18	0.408	0.603	0.305	-0.1	-0.13	0.053	1959-1978	0.198	-0.21	-0.01	0.285	0.675	0.444	0.367	0.132	0.121	0.338
1960-1979	0.027	-0.38	-0.16	-0.18	0.405	0.512	0.313	-0.09	-0.12	0.061	1960-1979	0.203	-0.09	0.058	0.29	0.665	0.411	0.385	0.142	0.192	0.395
1961-1980	-0	-0.35	-0.15	-0.16	0.346	0.376	0.353	0.027	-0.08	0.027	1961-1980	0.192	-0.09	0.056	0.304	0.64	0.349	0.395	0.158	0.204	0.382
1962-1981	0.145	-0.26	-0.21	-0.26	0.284	0.405	0.133	0.081	-0.2	-0.18	1962-1981	0.359	0.02	0.077	0.242	0.545	0.341	0.165	0.172	-0.05	0.163
1963-1982	0.101	-0.27	-0.21	-0.27	0.319	0.33	0.032	0.13	-0.15	-0.27	1963-1982	0.304	0.013	0.098	0.224	0.621	0.213	-0.03	0.212	-0.01	0.054
1964-1983	0.176	-0.24	-0.17	-0.3	0.287	0.321	0.027	0.111	-0.12	-0.26	1964-1983	0.373	0.007	0.086	0.267	0.617	0.112	-0.1	0.232	0.07	0.085
1965-1984	0.05	-0.34	-0.29	-0.39	0.203	0.158	0.118	0.207	-0.08	-0.28	1965-1984	0.445	0.172	0.253	0.334	0.65	0.241	-0.21	0.083	0.029	0.126
1966-1985	-0	-0.29	-0.25	-0.3	0.333	0.109	0.208	0.269	0.013	-0.23	1966-1985	0.416	0.155	0.188	0.264	0.608	0.247	-0.22	0.098	0.004	0.07
1967-1986	-0.03	-0.1	-0.12	-0.34	0.289	0.008	0.227	0.314	0.058	-0.05	1967-1986	0.467	0.408	0.351	0.252	0.595	0.149	-0.22	0.069	-0.06	0.279
1968-1987	0.009	-0.05	-0.17	-0.34	0.275	-0.04	0.231	0.298	0.052	0.079	1968-1987	0.528	0.448	0.307	0.271	0.574	0.093	-0.25	0.025	-0.09	0.336
1969-1988	-0.05	-0.07	-0.1	-0.25	0.265	-0.06	0.269	0.252	-0.01	0.038	1969-1988	0.503	0.42	0.381	0.334	0.567	0.102	-0.25	-0.01	-0.14	0.296
1970-1989	-0.28	-0.21	-0.15	-0.35	0.27	-0.04	0.335	0.196	-0.19	0.112	1970-1989	0.303	0.316	0.381	0.257	0.564	0.109	-0.21	-0.07	-0.26	0.402
1971-1990	-0.3	-0.14	-0.14	-0.36	0.322	0.009	0.355	0.234	-0.11	0.164	1971-1990	0.185	0.439	0.541	0.247	0.525	0.351	-0.03	0.167	0.032	0.528
1972-1991	-0.23	-0.12	0.015	-0.14	0.334	0.197	0.411	0.159	0.017	0.282	1972-1991	0.239	0.473	0.604	0.311	0.549	0.442	0.087	0.174	0.054	0.526
1973-1992	-0.26	-0.13	-0.01	-0.17	0.32	0.222	0.398	0.18	0.044	0.342	1973-1992	0.154	0.419	0.522	0.252	0.483	0.465	0.067	0.198	0.076	0.559
1974-1993	-0.28	-0.14	0.043	0.033	0.345	0.206	0.521	0.347	0.119	0.42	1974-1993	0.072	0.337	0.532	0.316	0.508	0.484	0.148	0.258	0.125	0.62
1975-1994	-0.24	-0.11	0.132	0.02	0.308	0.21	0.403	0.247	0.045	0.266	1975-1994	0.097	0.347	0.578	0.298	0.484	0.484	0.118	0.211	0.106	0.52
1976-1995	-0.28	-0.15	0.081	0.022	0.275	0.117	0.402	0.301	0.003	0.274	1976-1995	0.061	0.321	0.554	0.294	0.468	0.462	0.124	0.211	0.144	0.501
1977-1996	-0.29	-0.19	0.071	-0.05	0.213	0.15	0.433	0.263	-0.06	0.178	1977-1996	0.01	0.237	0.501	0.034	0.245	0.481	0.107	0.074	-0.06	0.252
1978-1997	-0.3	-0.18	0.065	-0.07	0.219	0.18	0.436	0.326	-0.08	0.11	1978-1997	0.007	0.243	0.506	0.033	0.246	0.496	0.108	0.083	-0.07	0.223
1979-1998	-0.36	-0.12	0.112	0.054	0.279	0.128	0.374	0.284	-0.01	0.188	1979-1998	-0.03	0.275	0.525	0.084	0.266	0.484	0.082	0.065	-0.05	0.252
1980-1999	-0.34	-0.11	0.091	0.078	0.297	0.112	0.376	0.271	-0.07	0.184	1980-1999	-0.05	0.262	0.506	0.104	0.3	0.472	0.093	0.057	-0.08	0.227
1981-2000	-0.34	-0.09	0.1	0.079	0.293	0.157	0.325	0.213	-0.12	0.194	1981-2000	-0.07	0.282	0.513	0.119	0.271	0.493	0.052	0.018	-0.11	0.223
1954-2000	-0.19	-0.2	-0.01	-0.05	0.307	0.245	0.335	0.11	-0.12	0.149	1954-2000	0.008	0.038	0.291	0.144	0.42	0.492	0.228	0.022	-0.02	0.326

統計期間 (年)	PTRH										統計期間 (年)	QUCR									
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1954-1973	0.037	0.625	0.47	0.032	-0.06	-0.14	0.091	0.244	0.281	-0.25	1954-1973	-0.12	0.008	0.068	-0.14	0.45	0.709	0.511	-0.14	0.018	0.339
1955-1974	0.086	0.624	0.517	-0.03	-0.08	-0.07	0.357	0.268	0.321	-0.22	1955-1974	-0.02	0.054	0.091	-0.11	0.425	0.572	0.267	-0.03	0.258	0.188
1956-1975	0.097	0.598	0.497	-0.01	-0.06	-0.14	0.338	0.281	0.335	-0.26	1956-1975	0.018	-0.01	-0.02	-0.04	0.524	0.468	0.113	0.018	0.352	0.083
1957-1976	0.081	0.536	0.556	0.031	-0.02	-0.04	0.361	0.281	0.406	-0.2	1957-1976	0.052	-0.01	-0.06	0.058	0.575	0.455	0.2	0.159	0.381	0.062
1958-1977	0.203	0.491	0.47	0.067	-0.22	-0.22	0.368	0.35	0.326	-0.18	1958-1977	0.178	-0.06	-0.22	0.074	0.516	0.384	0.188	0.269	0.307	0.075
1959-1978	0.23	0.146	0.271	-0.14	-0.21	0.044	0.463	0.385	0.017	-0.21	1959-1978	0.188	-0.15	-0.3	0.01	0.548	0.359	0.239	0.344	0.182	0.121
1960-1979	0.28	0.188	0.293	-0.16	-0.25	0.157	0.422	0.381	0.011	-0.13	1960-1979	0.164	-0.08	-0.26	0.023	0.565	0.275	0.273	0.354	0.241	0.142
1961-1980	0.199	0.166	0.225	-0.05	-0.29	-0.03	0.443	0.529	0.042	-0.16	1961-1980	0.135	-0.05	-0.25	0.029	0.502	0.169	0.323	0.393	0.296	0.104
1962-1981	0.212	0.136	0.163	0.003	-0.1	0.086	0.626	0.6	0.274	-0.01	1962-1981	0.166	-0.02	-0.25	-0.01	0.464	0.146	0.269	0.385	0.239	0.024
1963-1982	0.222	0.139	0.147	0.01	-0.13	0.114	0.586	0.613	0.289	0.01	1963-1982	0.17	-0.03	-0.2	-0.02	0.496	0.106	0.125	0.341	0.18	0.01
1964-1983	0.213	0.113	0.115	0.051	-0.11	0.075	0.547	0.626	0.302	0.015	1964-1983	0.238	-0.02	-0.2	0.002	0.49	0.051	0.081	0.347	0.252	0.032
1965-1984	0.067	-0.05	-0.07	-0.07	-0.17	-0.07	0.609	0.682	0.328	0.012	1965-1984	0.284	0.052	-0.08	0.094	0.508	0.115	0.043	0.286	0.221	0.018
1966-1985	0.052	-0.06	-0.11	-0.11	-0.18	-0.07	0.592	0.668	0.321	-0.01	1966-1985	0.267	0.055	-0.09	0.109	0.511	0.108	0.054	0.287	0.228	0.02
1967-1986	0.119	-0.08	-0.14	-0.13	-0.12	-0.05	0.606	0.637	0.22	-0.02	1967-1986	0.269	0.253	0.036	0.121	0.49	0.03	0.051	0.305	0.248	0.183
1968-1987	0.15	-0.05	-0.19	-0.13	-0.15	-0.1	0.571	0.631	0.215	0.057	1968-1987	0.328	0.292	-0.05	0.133	0.46	-0.05	-0	0.274	0.244	0.252
1969-1988	0.04	-0.04	-0.13	-0.04	-0.14	-0.14	0.607	0.566	0.161	0.058	1969-1988	0.122	0.255	0.095	0.314	0.412	-0.12	0.129	0.156	0.103	0.185
1970-1989	0.074	-0.02	-0.12	-0.02	-0.14	-0.15	0.595	0.577	0.163	0.046	1970-1989	0.136	0.286	0.159	0.35	0.265	-0.17	0.115	0.15	0.232	0.204
1971-1990	0.048	0.071	-0.06	-0.02	-0.09	-0.03	0.616	0.613	0.249	0.138	1971-1990	0.097	0.376	0.397	0.377	0.251	0.087	0.193	0.282	0.337	0.334
1972-1991	0.067	0.08	-0.01	0.0																	

6.1.4 結論

本節では、樹木年輪－気候関係の「解析方法」の中で「統計期間」に着目し、統計期間内で常に樹木年輪－気候関係が同じように維持されているかを検討するために、移動相関法を用いて、樹木年輪－気候関係の経年変動を調べた。

その結果、1) 樹木年輪－気候関係は全統計期間内で一定であることは少なく、緩やかに変動していることがわかった。また、その中では、①近年になってから相関関係が低くなっている関係、②近年になってから相関関係が高くなっている関係、③途中で相関関係が低い時期がある関係、が認められた。

2) 高い r_{20y} が認められる月が2ヶ月から3ヶ月の間で移行している場合があり、樹木年輪－気候関係の経年変動には、時期（季節）的な変動も含まれていることがわかった。

3) 「 IW_{ar} と形成層活動再開直前の気温との関係」と「 ID_{mean} と成長期の気温との関係」とでは経年変動が異なっており、木部形成全般にわたって気候による影響を受けやすい時期（年）やそうではない時期があるわけではないと考える。

以上のことから、樹木年輪－気候関係を検討する際には、できるだけ長い統計期間をとることと同時に、移動相関分析を用いて樹木年輪－気候関係の経年変動を明らかにすることも必要であると考ええる。また、今後、第5.3節で検討した気候変数の最適積算期間の経年変動を調べることで生物季節の変化（成長再開時期の移行や成長期間の拡大）を検討できる可能性がある。そして、近年における地球温暖化傾向との関連性を明らかにするためにも、多くの研究報告が望まれる。

6.2 単相関分析における回帰線のあてはめ

6.2.1 はじめに

樹木年輪－気候関係を解析するにあたって、多くの研究では単相関分析やレスポンスファンクション解析を用いている。これらの解析方法では直線的な関係にある樹木年輪－気候関係に関する情報が得られる（Biondi 1997）。つまり、単相関分析は、樹木年輪情報と気候情報との関係が直線的（1 次関数）である場合に有効であるが、そうではない（2 次関数など）場合には評価できない。

すべての植物はそれぞれに成長の適温を持ち、またそれを超えると成長が停止するような最高温、最低温を持つ（福岡 2010）、とされるように生物の活動は光や気温、水分などの条件に対して、曲線部を持った関係を示す。しかしながら、樹木年輪－気候関係の解析に 1 次関数以外の回帰線をあてはめて検討した報告は見当たらない。

そこで本節では、樹木年輪－気候関係の「解析方法」の中で「単相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目し、第 4.1 節で検討した樹木年輪－気候関係について、回帰線として 1 次関数に加えて 2 次関数も併せてあてはめて検討した。

6.2.2 方法

a) 樹木年輪情報

第 2 章で構築した 7 樹種（アカマツ、モミ、ツガ、スギ、ヒノキ、サワグルミ、ミズナラ）の年輪幅指数（ IW_{ar} ）および年輪内平均密度指数（ ID_{mean} ）のクロノロジーを用いた。

b) 気候情報

奥多摩の当年 1 月から 10 月の月平均気温（ $T_{mean(m)}$ ）を用いた。

c) 回帰線のあてはめ

各樹木年輪指数のクロノロジーと各気候変数の時系列との散布図をエクセルにて作成し、1次関数および2次関数の回帰線をあてはめた。その際に得られた決定係数を相関係数に変換し、各回帰線の評価を行った。統計期間は、1954年から2000年までの47年間とした。

6.2.3 結果および考察

1次関数の回帰線をあてはめて得られた相関係数(r_1)と2次関数の回帰線をあてはめて得られた相関係数(r_2)との関係を **Fig. 6.1** に示した。すべての樹木年輪－気候関係で r_2 は r_1 と同じか、それより値が大きかった。また、 r_1 において有意ではなかった樹木年輪－気候関係が、 r_2 で有意となったものが多く認められた。

次に、あてはめた回帰線による相関係数の差($r_2 - r_1$)を、樹種別にまとめた図を **Fig. 6.2** に、気候変数別にまとめた図を **Fig. 6.3** に示した。樹種や樹木年輪指数による違いは不明であった (**Fig. 6.2**)。一方で、気候変数の中で、特に4月においては $r_2 - r_1$ が大きく、 IW_{ar} との間には7樹種の平均では $r_2 - r_1$ が約0.2大きくなった (**Fig. 6.3**)。

そこで、最も $r_2 - r_1$ が大きい値を示したモミの IW_{ar} と4月の $T_{mean(m)}$ との関係を **Fig. 6.4** に示した。 r_1 が0.00であったのに対して、 r_2 では0.44となっていた。モミの IW_{ar} と4月の $T_{mean(m)}$ との関係は、約12℃より低温では正の関係にあり、高温では負の関係となっていた。供試樹木の生育地は、気象観測所（奥多摩）との間に気温差が約1.8℃（高低差：約300 m）あるため、約10℃が分岐点となる。

$T_{mean(m)}$ と IW_{ar} との関係について、1次関数の回帰線をあてはめた場合、当年3

月とは針葉樹 5 樹種に共通して有意な正の r_1 が認められたが、4 月とはどの樹種も有意な r_1 が認められなかった（第 4 章参照）。休止期と考えられる 3 月の気温によって形成層活動の再開時期が早期化あるいは晩期化する可能性があると考えたが、4 月の中旬には細胞分裂の再開が行われる（第 3 章参照）。つまり、4 月は形成層活動の状態の転換期であることからこのような関係となったのではないかと考える。

以上の結果から、単相関分析に加えて、2 次関数などの曲線部を持つ回帰線も併せて樹木年輪－気候関係を検討することは有効であることがわかった。

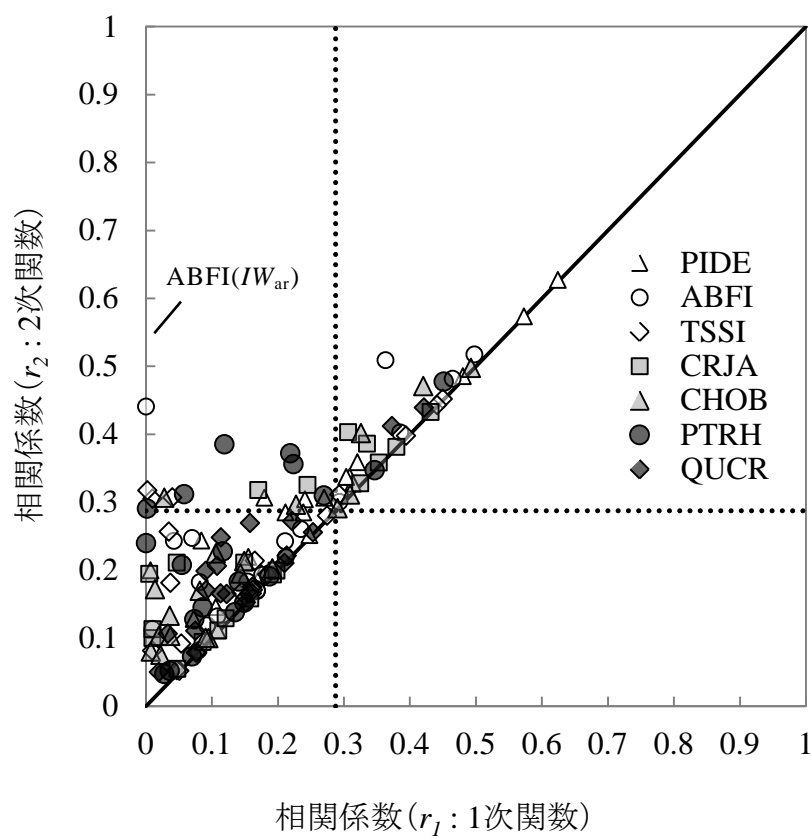


Fig. 6.1. 1 次関数の回帰線をあてはめて得た相関係数 (r_1) と 2 次関数の回帰線をあてはめて得た相関係数 (r_2) との関係

凡 例 : **Table 6.1**, **Table 6.2** を参照

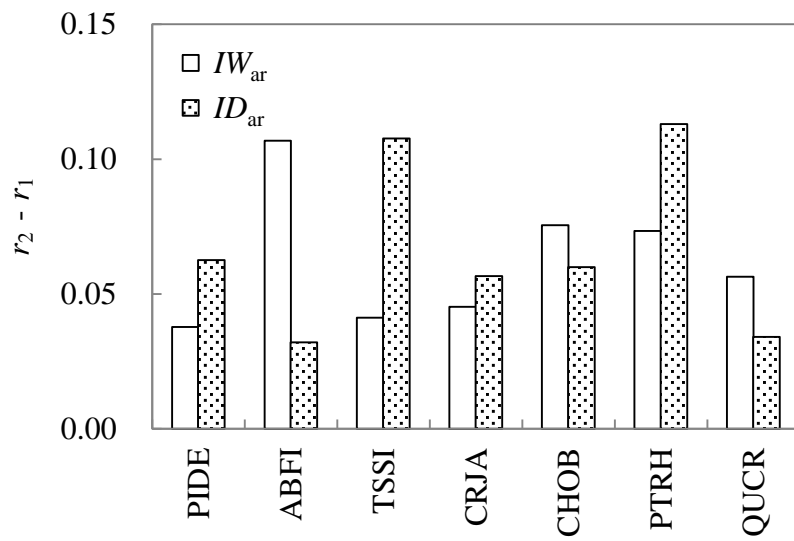


Fig. 6.2. $r_2 - r_1$ の樹種による違い

凡 例 : Table 6.1, Table 6.2, Fig. 6.1 を参照

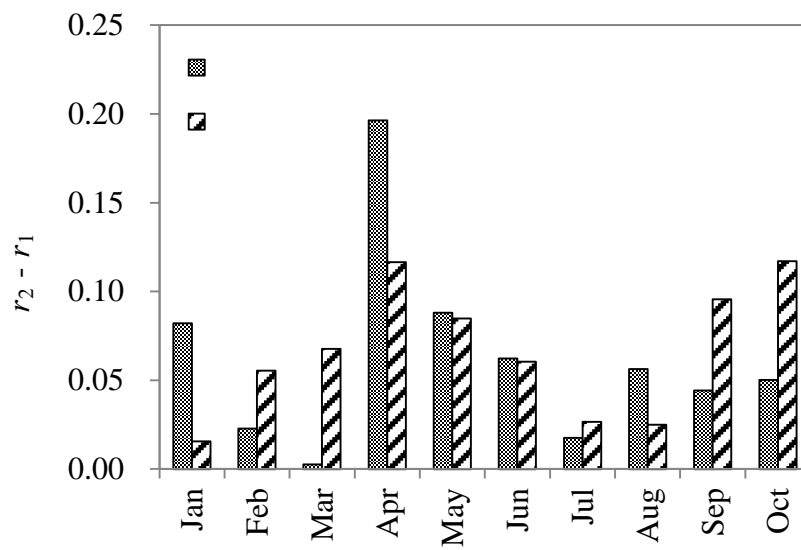


Fig. 6.3. $r_2 - r_1$ の月による違い

凡 例 : Table 6.1, Table 6.2, Fig. 6.1 を参照

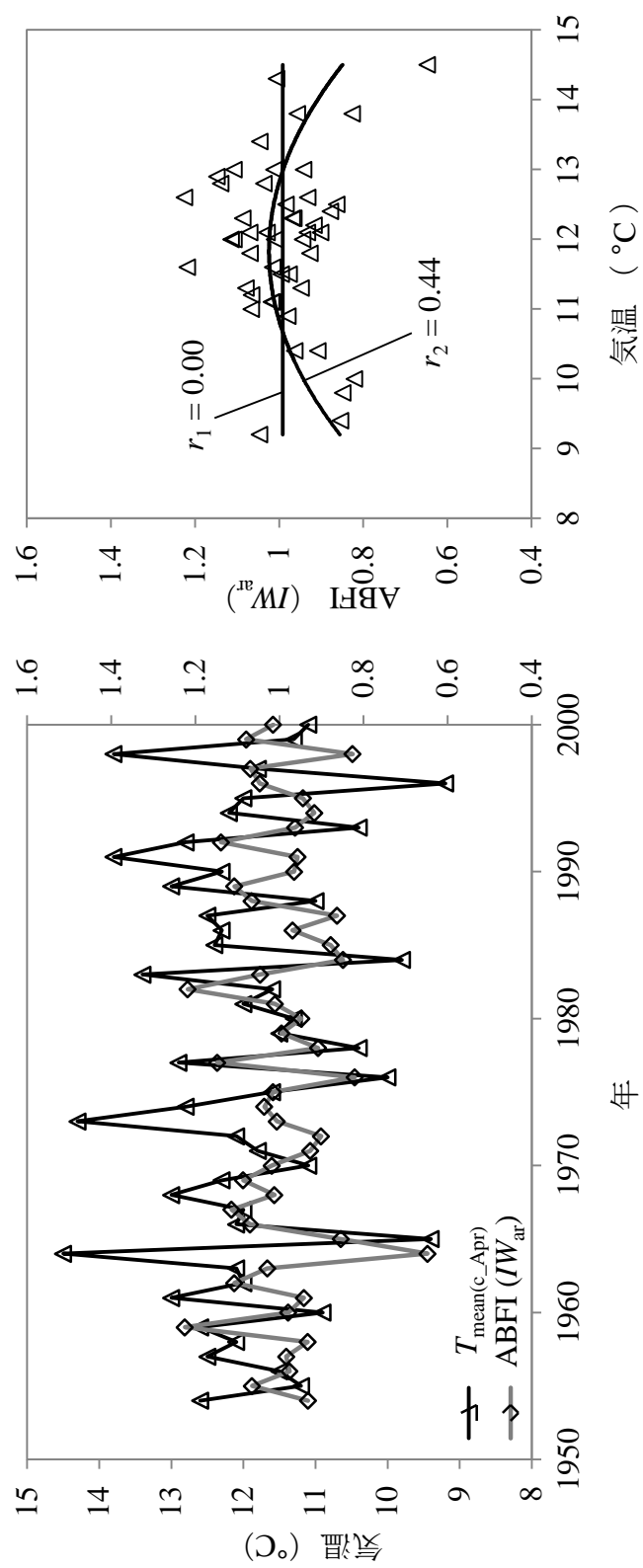


Fig. 6.4. モミ (ABFI) の IW_{ar} と $T_{\text{mean}(c_Apr)}$ との関係

凡 例 : **Table 6.1** を参照, $T_{\text{mean}(c_Apr)}$: 当年 4 月の平均気温

6.2.4 結論

本節では、樹木年輪－気候関係の解析方法の中で「相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目し、第 4.1 節で検討した樹木年輪－気候関係について、回帰線として 1 次関数に加えて 2 次関数も併せてあてはめて検討した。

その結果、多くの場合、樹木年輪－気候関係は 1 次関数の回帰線で表現できるが、2 次関数の回帰線の方が明らかに当てはまり良い場合もあることがわかった。特に形成層活動の状態の転換期であると考えられる 4 月の気温と針葉樹の年輪幅との関係において 1 次関数よりも 2 次関数の回帰線をあてはめることで著しく高い r が得られた。

このようなことから、単相関分析に加えて、2 次関数などの曲線部を持つ回帰線も併せて樹木年輪－気候関係を検討することは有効であると考ええる。

しかしながら、このような報告例がないため、今後このような検討をした報告が蓄積されることが望まれる。また、本研究では回帰線として単に 1 次関数と 2 次関数を用いたが、一般に生物は気温条件や水分条件などに対して、曲線部を持った関係であることが多いため、他分野の研究では生物学的な現象を考慮した様々な回帰線が検討されている。今後、そのような手法で樹木年輪－気候関係を評価することも有効ではないかと考える。

6.3 まとめ

第 6 章では、樹木年輪－気候関係の解析に用いる「解析方法」に着目した。第 6.1 節では、その「解析方法」の中で「統計期間」に着目し、樹木年輪－気候関係について移動相関法を用いて解析し、その関係の経年変動を検討した。第 6.2 節では「単相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目し、樹木年輪－気候関係について、回帰線として 1 次関数に加えて 2 次関数も併せてあてはめて検討した。その結果を以下にまとめる。

1) 「統計期間」に着目した結果、樹木年輪－気候関係を検討する際に移動相関分析を用いることで、樹木年輪－気候関係の変動性を明らかにできた。また、その変動性は生物季節の変化を検討できる可能性があった。

2) 「単相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目した結果、分析に用いる回帰線として 1 次関数だけではなく 2 次関数も併せてあてはめて樹木年輪－気候関係を検討することが有効であることがわかった。

以上のことから、木部形成に関わる樹木の気候応答を明らかにするために樹木年輪－気候関係の解析に用いる「解析方法」について、生物学的な視点を導入して検討することで、樹木年輪－気候関係の解析結果の中に含まれている因果関係を示すことができたと考える。そして、今後このような検討を行っていくことも必要だと考える。

第7章 総括

樹木年輪年代学的手法は木部形成に関わる様々な樹木の生物学的な現象を基礎としているが、そのような樹木の生物学的な現象をブラックボックスとみなし、そこからの出力である樹木年輪情報を年代決定や気候復元などの研究に用いることが樹木年輪年代学的手法の特徴の一つともいえる。この手法を用いた気候復元を行うための樹木年輪－気候関係の解析では、樹木の生物学的な現象の1つである樹木の気候に対する成長応答（樹木の気候応答）に関する情報を得ることができる。

そこで本研究では樹木年輪年代学的手法を用いて木部形成に関わる樹木の気候応答を明らかにすることを目的とした。しかし、一般に、樹木年輪－気候関係の解析を行う目的が気候復元であるため、木部形成に関わる樹木の気候応答など樹木の生物学的な現象の解明を目的とした場合には検討が不十分な部分があった。それは、対象とされる地域や樹種、樹木年輪変数などの「樹木年輪情報」には、より気候の影響が明らかに現れるものが選択され、そうではないものに対する検討が不十分であること。また、気候変数の経年変動の代替となるような経年変動を、樹木年輪の変動を基に構築することが樹木年輪気候学の目的であるため、「気候情報」そのものや、「解析手法」に検討を加えた報告が少ないこと。そして、樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係、木部形成の季節変化、樹木年輪クロノロジー間の関係といった「樹木年輪情報の基礎情報」を明らかにした上で樹木年輪－気候関係を考察した報告が少ないこと、などが挙げられ、**第1章**で既往の研究を整理した。

このようなことから、樹木年輪年代学的手法を用いて樹木年輪－気候関係を検討する際に、上述したような検討が不十分な部分について検討することで、樹木の気候応答についてこれまでより明らかにできるのではないかと考えた。

第2章では、樹木年輪情報の収集と樹木年輪クロノロジーの構築を行うため

に生育環境が共通となるような一定地域内に樹齢約 50 年以上の個体が約 20 個体は生育している樹種が複数存在し、かつ長期にわたる気候情報も存在する地域として東京農業大学奥多摩演習林を選択し、供試樹種を選択を行った。供試樹種として、針葉樹はアカマツとモミ、ツガ、スギ、ヒノキの 5 樹種が、広葉樹はサワグルミとミズナラの 2 樹種が、比較的高樹齢であり、個体数が多く存在したため選択し、コア試料を採取した。樹木年輪情報の測定には軟 X 線デンシトメトリを用いて、複数種類の樹木年輪変数を得た。さらに、樹種ごとに年輪幅実測値の経年変動について明らかにした。そして、気候による影響と考えられる個体間にできるだけ共通した樹木年輪の経年変動を抽出しうる「標準化平滑関数の検討」を行い、フィルタ長 10 年の 3 次平滑化スプライン関数を適用することに決定した。その標準化平滑関数を 7 樹種における 9 種類の樹木年輪変数に適用して、合計で 63 系列の樹木年輪クロノロジーを構築できた。つまり、構築した各樹木年輪クロノロジーには同一樹種内に共通した経年変動があることがわかり、以降の樹木年輪－気候関係の解析に用いることとした。

第 3 章では、「樹木年輪情報の基礎情報」を得るために、針葉樹の中でも特徴的な晩材を持つアカマツと、材密度と組織構造との関係が把握できていないサワグルミを対象として「樹木年輪変数と年輪構造や木材組織との関係」を明らかにした。また、アカマツとモミを対象として、定期的に採取した形成層付近の試料から新生仮道管の分裂数とその状態を観察することで「木部形成の季節変化」について明らかにした。また、特に、材密度に影響を及ぼす細胞壁厚に注目して、その厚さの季節変化を明らかにした。さらに、構築した「樹木年輪クロノロジー間の関係（樹木年輪指数間、樹種間）」を明らかにするために、各樹木年輪クロノロジーの共通点や違いを明らかにした。樹木年輪指数の違いは年輪構造や木部形成と関連していること、近縁種の樹木年輪クロノロジーは、遠縁の種より共通した変動成分を多く有している傾向があることがわかった。

第 4 章では、樹木年輪－気候関係の解析で用いる「樹木年輪情報」に着目した。まず、「樹木年輪情報」の種類として「樹種」に着目し、針葉樹 5 樹種と広葉樹 2 樹種について樹木年輪－気候関係を解析した。その結果、多くの樹種間に共通した有意な相関関係が、①年輪幅指数と当年 1 月から 3 月の月平均気温との間、②年輪内平均密度指数と当年 5 月から 8 月の月平均気温との間、③年輪内平均密度指数と前年 5 月から 7 月の月平均気温との間、④年輪内平均密度指数と当年 6 月から 9 月の月降水日数との間で確認され、異なる樹種が共通した気候応答を行っていることがわかった。つまり、生育環境が共通となるような一定地域内に生育する樹木は異なる樹種（針葉樹や広葉樹を含む）であっても共通した気候応答を行っていることがわかった。そして、1 樹種では不明瞭な樹木年輪－気候関係であっても複数樹種で共通点を検討することで、その関係を検出できることがわかった。

次に、「樹木年輪情報」の種類として「樹木年輪変数」に着目し、9 種類の樹木年輪変数ごとに構築した樹木年輪指数を用いて樹木年輪－気候関係を解析した。その結果、幅に関する樹木年輪指数は、当年の気候変数とは多くの樹種間に共通した有意な相関関係が認められなかったが、針葉樹 5 樹種において共通して当年活動再開前にあたる休止期の気温との間に有意な相関関係が認められた。一方、材密度に関する樹木年輪指数は、針葉樹と広葉樹に共通して、その材密度に関する樹木年輪指数（変数）が形成された時期の気候変数と有意な相関係数を示すことがわかった。また、当年のみでなく前年の活動時期の気候変数とも有意な相関係数を示すことがわかった。つまり、どの樹木年輪指数にもそれぞれ木部形成に関する情報が含まれていると考えられ、気候に敏感に応答していないとしても検討に加えておく必要があることがわかった。また、このことは樹木年輪－気候関係の情報を木部形成活動の季節変化に関する情報として検討が可能なことを示していると考ええる。

第 5 章では、樹木年輪－気候関係の解析で用いる「気候情報」に着目した。まず、「供試樹木の生育地と気象観測地との距離」に着目し、供試樹種の生育地である奥多摩と、それ以外の気象観測地で得られた気候変数を用いて、第 4 章と同様に樹木年輪－気候関係を検討した。その結果、樹木の気候応答を明らかにするためには、供試樹木の生育地とできるだけ近い位置に設置された気象観測地から気候情報を得る必要があるとわかった。一方で、樹木年輪情報との間に有意な相関関係を示す気候の広がり是比较的広範囲であることもわかった。

次に、樹木年輪－気候関係の解析に用いる「気候情報」として「開花日推定法の導入」を行った。その結果、有効温度や温度特性、最適積算期間などを検討することによって細胞分裂再開前の気温と年輪幅との関係をより明確にできた。つまり、樹木年輪－気候関係の解析を行う際に、植物生理学的な考えに基づいた気候変数を検討することで、より明確な樹木年輪－気候関係を示すことができ、また、そのことにより樹木の気候応答における有効温度や温度特性、さらには詳細な活動期間について検討しうることがわかった。

第 6 章では、樹木年輪－気候関係の解析の中で、「解析方法」に着目した。まず、「解析方法」の中で「統計期間」に着目し、樹木年輪－気候関係が統計期間内で常に維持されているかを検討するために、移動相関法を用いて樹木年輪－気候関係の経年変動を検討した。その結果、樹木年輪－気候関係は全統計期間内で一定であることは少なく、緩やかに変動していることがわかった。また、その樹木年輪－気候関係の経年変動には、時期（季節）的な変動も含まれていることがわかった。

次に、「相関分析における回帰線のあてはめ方」に着目し、樹木年輪－気候関係について一次関数の回帰線および二次関数の回帰線を用いて検討した。その結果、多くの場合、樹木年輪－気候関係は一次関数の回帰線で表現できるが、二次関数の回帰線の方が当てはまりが良い場合もあることがわかった。特に細

胞分裂再開時期である 4 月の気温と針葉樹の年輪幅との関係において一次関数の回帰線よりも二次関数の回帰線の方が著しく高い相関係数が得られた。

以上の結果より，生育環境がほぼ共通となるような一定地域から多様な樹木年輪情報（複数樹種・複数の樹木年輪変数）と気候情報を得て，「樹木年輪情報の基礎情報」を把握し，さらに樹木年輪－気候関係の解析で用いる「樹木年輪情報」や「気候情報」，「解析方法」について生物学的な視点を導入して検討することで，各情報の関連性を強めることができ，樹木年輪に含まれる樹木の気候応答に関する情報をより明確にできたと考える。このことは，樹木年輪－気候関係の解析結果の中に因果関係が含まれていることを示すことができたと考えた。そして，樹木年輪年代学的手法を用いて得られた樹木の気候応答に関する情報は十分信頼性があることがわかった。

また，「気候情報」や「解析方法」の有効かつ新たな検討方法を提案できたと考える。これらの検討方法については，検討が十分とはいえないため今後も検討していくことが必要である。

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり終始御指導をいただきました東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科・小林 純 教授，大林宏也 教授に深甚なる感謝の意を表します。また，本論文作成にあたり貴重なご意見をいただきました東京農業大学・故塩倉高義 名誉教授（元地域環境科学部森林総合科学科），栃木紀郎 博士（元地域環境科学部森林総合科学科）に深く感謝の意を表します。

本研究の技術的手法から本論文のとりまとめに至るまで終始御指導いただきました独立行政法人森林総合研究所組織材質研究室・藤原 健 博士に深く感謝の意を表します。また，本論文のとりまとめに際して，多くのご教示とご指導をいただきました東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科・佐藤 明 教授に深く感謝の意を表します。本研究遂行にあたって多くのご助言をいただきました信州大学農学部森林科学科・安江 恒 准教授に深く感謝の意を表します。

試料採取にあたり，御協力いただきました東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科・奥多摩演習林・菅原 泉 教授，村尾克彦 職員，村尾時子 職員に深く感謝の意を表します。

貴重な気象観測資料を提供していただきました東京都水道局水源林管理事務所技術課奥多摩出張所に深く感謝の意を表します。

本研究に取り組み始めた学部 3 年（1999 年）から本年（2013 年）という 15 年間にわたって絶え間ない刺激と活力をいただきました多くの先輩方や多くの後輩方に深く感謝の意を表します。本論文には組み込むことができなかった多数の研究も含めて数多くの試料を採取させていただいた奥多摩演習林の樹木に深く感謝の意を表します。

最後に，長きにわたり見守ってくださいました両親に心から感謝いたします。

文献

- 1) Arakawa, H.: climatic change as revealed by blooming date of cherry blooms at Kyoto. *Journal of Meteorology* 13, 559-560 (1960).
- 2) Begum S., Nakaba S., Bayramzadeh, V., Oribe Y., Kubo, T., Funada R.: Temperature responses of cambial reactivation and xylem differentiation in hybrid poplar (*Populus sieboldii* x *P. grandidentata*) under natural conditions. *Tree Physiology* 28, 1813-1819 (2008).
- 3) Begum S., Nakaba S., Yamagishi Y., Yamane K., Islam M.A., Oribe Y., Ko J.H., Jin H.O., Funada R.: A rapid decrease in temperature induces latewood formation in artificially reactivated cambium of conifer stems. *Annals of Botany* 110, 875-885 (2012).
- 4) Biondi, F.: Evolutionary and moving response functions in dendroclimatology. *Dendrochronologia* 15, 139-150 (1997).
- 5) Carrer, M., Ujrbinati, C.: Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytologist* 170, 861-872 (2006).
- 6) Carrer, M., Nola, P., Motta, R., Urbinati, C.: Contrasting tree-ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. *Oikos* 119: 1515-1525 (2010).
- 7) Carrer, M.: Individualistic and time-varying tree-ring growth to climate sensitivity. *PLoS ONE* 6 (7): e22813 (2011).
- 8) Chen, F., Yuan, Y.J., Wei, W.S., Yu, S.L., Li, Y., Zhang, R.B., Zhang, T.W., Shang, H.M.: Chronology development and climate response analysis of schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) tree-ring parameters in the Urumqi river Basin, China. *Geochronometria* 36, 17-22 (2010).
- 9) Chen, F., Yuan, Y.J., Wei, W.S., Yu, S.L., Fan, Z.A., Zhang, R.B., Zhang, T.W., Li, Q., Shang, H.M.: Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China. *Theoretical and Applied*

Climatology 107, 633-643 (2012).

- 10) Conkey, L.E.: The Response of Tree-Ring Density to Climate in Maine. *Tree-Ring Bulletin* 39, 29-38 (1979).
- 11) Cook, E.R., Peters, K.: The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41, 45-55 (1981).
- 12) Cook E.R., Kairiukstis L.A.: “Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science” Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands, 1990, pp.394.
- 13) D'Arrigo, R., Yamaguchi, D., Wiles, G., Jacoby, G., Osawa A., Lawrence, D.: A Kashiwa oak (*Quercus dentata*) tree-ring width chronology from northern coastal Hokkaido, Japan. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 613- 617 (1997).
- 14) Eckstein D.: 年輪はなにを語るのか 年輪年代学－過去をのぞく窓. 森林科学 23, 2-5 (1998)
- 15) Filippo, A.D., Biondi, F., Cufar, K., Luis, M.D., Grabner, M., Maugeri, M., Saba, E.P., Schirone, B., Piovesan, G.: Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography* 34, 1873–1892 (2007).
- 16) Forster, T., Schweingruber, F.H., Denneler1, B.: Increment Puncher A tool for extracting small cores of wood and bark from living trees. *IAWA Journal* 21 (2), 169-180 (2000).
- 17) Fritts, H.C.: “Tree rings and climate”, Academic Press, London, 1976, pp.567.
- 18) Fujiwara, T., Okada, N., Yamashita, K.: Comparison of growth response of *Abies* and *Picea* species to climate in Mt. Norikura, central Japan. *Journal of Wood Science* 45, 92-97 (1999).
- 19) Funada, R., Kubo, T., Fushitani, M.: Early- and latewood formation in *Pinus*

- densiflora* trees with different amounts of crown, *IAWA Bulletin new series* 11 (3), 281-288 (1990).
- 20) Gea-Izoquierdo, G., Martin-Benito, D., Cherubini, P., Canellas, I.: Climate-growth variability in *Quercus ilex* L. west Iberian open woodlands of different stand density. *Annals of Forest Science* 66, 802 (2009).
- 21) Graumlich, L.J.: Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 133-143 (1992).
- 22) Holmes, R.L.: Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69-78 (1983).
- 23) Hughes, M.K.: Dendrochronology in climatology - the state of the art. *Dendrochronologia* 20(1-2), 95-166 (2002).
- 24) Ishibashi, M., Usuda, H., Terashima, I.: The loss of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase caused by 24-hour “rain” treatment fully explains the decrease in the photosynthetic rate in bean leaves. *Plant Physiology* 111, 635-640 (1996).
- 25) Kaennel, M., Schweingruber, F.H.: “Multilingual Glossary of Dendrochronology”. Paul Haupt Berne, pp. 467 (1995).
- 26) Kagawa, A., Sugimoto, A., Maximov, T.C.: ¹³CO₂ pulse-labelling of photoassimilates reveals carbon allocation within and between tree rings. *Plant, Cell & Environment* 29, 1571-1584 (2006).
- 27) Kobayashi, O., Funada, R., Fukazawa, K., Ohtani, J. A dendrochronological evaluation of the effects of air pollution on the radial growth of Norway spruce. *Mokuzai Gakkaishi* 43 (10), 824-831 (1997).
- 28) Larcher, W.: 炭素の利用と物質生産. “植物生態生理学 第2版”, Larcher, W., (佐伯敏郎, 舘野正樹監訳), シュプリンガー・フェラーク東京, 東京, 2004, pp.17-125.

- 29) Leal, S., Pereira, H., Grabner, M., Wimmer, R.: Tree-ring structure and climatic effects in young *Eucalyptus globulus* Labill. grown at two Portuguese sites: preliminary results. *Dendrochronologia* 21 (3), 139-146 (2004).
- 30) Lebourgeois F, Cousseau G, Ducos Y: Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill stand in the Forest of Bercè (Futaie des Clos, Sarthe, France). *Annals of Forest Science* 61, 361-372 (2004).
- 31) Matisons, R., Elferts, D., Brūmelis, G.: Changes in climatic signals of English oak tree-ring and cross-section area of earlywood vessels in Latvia during the period 1900-2009. *Forest Ecology and Management* 297, 34-44 (2012).
- 32) Momoi, T., Ohbayashi, H., Kobayashi, J.: Effects of climate variation on radial growth of *Pinus densiflora* in Okutama, Tokyo, Japan. *Phyton* 45, 451-455 (2005).
- 33) Mothe, F., Sciama, D., Leban, J.M., Nepveu, G.: Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique. *Annals of Forest Science* 55, 437-449 (1998).
- 34) Negisi, K.: アカマツ・スギ・ヒノキ 1 年生ナエの CO₂ 同化・呼吸・生長. 東京大学農学部演習林報告 No. 62, 1-115 (1966).
- 35) Oribe, Y., Funada, R., Shibagaki, M., Kubo, T.: Cambial reactivation in locally heated stems of the evergreen conifer *Abies sachalinensis* (Schmidt) Msaters. *Planta* 212, 684-691 (2001).
- 36) Pederson, N., Cook, E.R., Jacoby, G.C., Peteet, D.M., Griffin, K.L.: The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia* 22, 7-29 (2004).
- 37) Priestley, J.H.: Studies in the physiology of cambial activity I. Contrasted types of cambial activity. *New Phytologist* 29, 56-73 (1930).
- 38) Reynolds-Henne, C.E., Siegwolf, R.T.W., Treydte, K.S., Esper, J., Henne, S., Saurer, M.: Temporal stability of climate-isotope relationships in tree rings of oak and pine (Ticino, Switzerland). *Global biogeochemical cycles* 21, GB4009 (2007).

- 39) Schweingruber, F. H., Fritts, H. C., Braker, O. U.: The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin* 38, 61-91 (1978).
- 40) Schweingruber, F.H.: “Tree Rings: Basics and Application of Dendrochronology” Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands. 1988, pp. 276.
- 41) Silkin, P.P., Kirilyanov, A.V.: The relationship between variability of cell wall mass of early wood and latewood tracheids in larch tree-rings, the rate of tree-ring growth and climatic changes. *Holzforschung* 57, 1-7 (2003).
- 42) Speer, J.H.: “Fundamentals of Tree-Ring Research of tree-ring research” University of Arizona Press, Tucson, AZ (2010).
- 43) Sueda, T.: Dendroclimatological reconstruction for the last sub-millennium in Central Japan. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 5, 431-442 (1994).
- 44) Suzuki, M., Yoda, K., Suzuki, H.: Phenological comparison of the onset of vessel formation between ring-porous and diffuse-porous deciduous trees in a Japanese temperate forest. *IAWA Journal* 17 (4), 431-444 (1996).
- 45) Takahashi, K., Tokumitsu, Y., Yasue, K.: Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan. *Ecological Research* 20, 445-451 (2005).
- 46) Takahashi, K., Okuhara, I., Tokumitsu, Y., Yasue, K.: Responses to climate by tree-ring widths and maximum latewood densities of two *Abies* species at upper and lower altitudinal distribution limits in central Japan. *Trees* 25, 745-753 (2011)
- 47) Takahashi, K., Okuhara, I.: Comparison of climatic effects on radial growth of evergreen broad-leaved trees at their northern distribution limit and co-dominating deciduous broad-leaved trees and evergreen conifers. *Ecological Research* 27, 125-132 (2012).

- 48) Tardif, J., Brisson, J., Bergeron, Y.: Dendroclimatic analysis of *Acer saccharum*, *Fagus grandifolia*, and *Tsuga Canadensis* from an old-growth forest, southwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 31, 1491-1501 (2001).
- 49) Wang, L., Payette, S., Begin, Y.: Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 32, 477-486 (2002).
- 50) Watson, E., Luckman, B.H.: The dendroclimatic signal in Douglas-fir and ponderosa pine tree-ring chronologies from the southern Canadian Cordillera. *Canadian Journal of Forest Research* 32, 1858-1874 (2002).
- 51) Webb, G.E.: "Tree rings and telescopes: The scientific career of A.E. Douglass" , University of Arizona Press, Tucson, 1983, pp.242.
- 52) Wilson, R.J. S., Luckman, B.H.: Tree-ring reconstruction of maximum and minimum temperatures and the diurnal temperatures range in British Columbia, Canada. *Dendrochronologia* 20, 257-268 (2002).
- 53) Wimmer, R., Grabner, M.: A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate. *IAWA Journal* 21 (4) 403-416 (2000).
- 54) Xiong, L., Okada, N., Fujiwara, T.: The dendrocronological potential of ten species in the three gorges reservoir region of China. *IAWA Journal*, 21 (2), 181-196 (2000).
- 55) Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., Ohtani, J.: Effect of climate factors on variation in the maximum density of *Picea glehnii* Mast. and associated changes in tracheid dimensions. *Dendrochronologia* 14, 89-97 (1996).
- 56) Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., Ohtani, J.: Tree-ring width and maximum density of *Picea glehnii* as indicators of climatic changes in northern Hokkaido, Japan. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1962-1970 (1997).
- 57) Yasue, K., Funada, R., Kobayashi, O., Ohtani, J.: The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to

climatic factors. *Trees* 14, 223-229 (2000).

- 58) Yoshida, M., Hosoo, Y., Okuyama, T.: Periodicity as a factor in the generation of isotropic compressive growth stress between microfibrils in cell wall formation during a twenty-four hour period. *Holzforschung* 54, 469-473 (2000).
- 59) Youngblut, D., Luckman, B.: Maximum June-July temperatures in the southwest Yukon over the last 300 years reconstructed from tree rings. *Dendrochronologia* 25, 153-166 (2008).
- 60) Yu, D., Wang, G.G., Dai, L., Wang, Q.: Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. *Forest Ecology and Management* 240, 105-113 (2007).
- 61) Zhang, S.Y.: Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: implications in dendroclimatology. *Wood Science and Technology* 31, 63-72 (1997).
- 62) 青野靖之, 小元敬男: チルユニットを用いた温度変換日数によるソメイヨシノの開花日の推定. 農業気象 45 (4), 243-249 (1990b).
- 63) 青野靖之, 小元敬男: 温度変換日数を用いたサクラの開花日の簡易推定法. 農業気象 46 (3), 147-151 (1990a).
- 64) 青野靖之, 守屋千晶: 休眠解除を考慮したソメイヨシノの開花日推定モデルの一般化. 農業気象 59 (2), 165-177 (2003).
- 65) 青山美土里 : 広葉樹の木部形成—組織構造の季節変化と形成年ごとの比較—. 卒業論文, 東京農業大学, 東京, 2004, pp.45.
- 66) 伊藤延男, 三浦定俊: 木材年輪年代学序説. 保存科学 21, 1-8 (1982).
- 67) 伊藤万理耶, 中堀謙二, 古賀信也, 安江 恒: 信州と北海道におけるカラマツ造林木の肥大成長の気候応答. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 松本, A15-1000 (2009).

- 68) 今川一志, 石田茂雄: 樹木の木部形成に関する研究 I. カラマツにおけるその季節的経過. 北海道大学農学部演習林研究報告 27 (2), 373-396 (1970).
- 69) 今川一志, 深澤和三, 石田茂雄: カラマツ仮道管の木化経過に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 33 (1), 127-138 (1976).
- 70) 今川一志, 石田茂雄: 樹木の木部形成に関する研究 II. ハリギリの春材道管の発達. 北海道大学農学部演習林研究報告 29 (1), 54-72 (1972a).
- 71) 今川一志, 石田茂雄: 樹木の木部形成に関する研究 III. 数種環孔樹種における越冬細胞の存在. 北海道大学農学部演習林研究報告 29 (2), 207-221 (1972b).
- 72) 今川一志: 樹木の木部形成, 特にその季節的経過に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 42 (1), 149-178 (1985).
- 73) 大山幹成, 光谷拓実: 木曽ヒノキの成長変動と気候要素との相関関係. 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 岐阜, p.503 (2002).
- 74) 小元敬男, 青野靖之: 速度論的手法によるソメイヨシノの開花日の推定. 農業気象 45 (1), 25-31 (1989).
- 75) 織部雄一郎: 針葉樹における形成層および木部分化の再活動に関する研究. 鱗木育種研究報告 No.22 (2006).
- 76) 金指達郎, 横山敏孝: スギ雄花の休眠打破と開花に要する温度条件. 日本花粉学会会誌 48 (2), 95-102 (2002).
- 77) 亀岡喜和子・三沢 彰・ナスルラフ ニサル: 年輪幅生長から見た関東平野におけるスギの衰退に関する研究. 日本緑化工学学会誌, 16 (3), 1-10 (1991).
- 78) 川島茂人, 高橋裕一: 広域的なスギ開花日分布の推定手法—スギ花粉の拡散過程に関する研究 (IV) —. 日本花粉学会会誌 39 (2), 121-128 (1993).
- 79) 岸 泰之, 福岡義隆: 都市内外の環境変化に関する年輪気候学的研究. 樹

木年輪 6, 35-43 (1993).

- 80) 吉良竜夫: “日本の森林帯 (林業解説シリーズ 17)”, 日本森林技術協会, 東京, pp.42.
- 81) 木村徳志, 木佐貫博光, 倉橋昭夫: 北海道に自生する落葉広葉樹 25 種のフェノロジー 一年変動ならびに気温との関係ー. 日本林学会論文集 106, 367-370 (1995).
- 82) 清野 豁: 気候と農業. “新 農業気象・環境学”, 長野敏英, 大政謙次, 朝倉書店, 東京, 2005, pp1-8.
- 83) 工藤佳世, 細尾佳宏, 白井瑛里子, 中堀謙二, 安江 恒: 落葉性広葉樹環孔材コナラにおける孔圏道管形成と葉のフェノロジーの連動性. 第 61 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM) A18-03-1630 (2011).
- 84) 久保隆文: 木材の巨視的・肉眼的構造. “木質の構造”, 日本木材学会, 文英堂出版, 東京, 2011, pp.19-28.
- 85) 久保典子: 南アルプス仙丈岳に生育するコメツガの年輪幅と年輪内密度の変動におよぼす気候要素の影響. 卒業論文, 信州大学, 2002, pp. 38.
- 86) 久保典子, 安江 恒: 南アルプスに生育する樹木の年輪情報を用いた気候復元の試み. 樹木年輪研究会 2003 年度発表要旨集 p.14-15 (2003).
- 87) 黒岩晴子: 植物細胞組織の新しい形態的解析技術 高等植物の組織・細胞解析におけるテクノビット包埋法の利点. 月刊組織培養 18 (2), 65-69 (1992).
- 88) 黄 栄鳳, 古川郁夫: 2 種の中国乾燥地ポプラ造林木の道管要素長と木部繊維長の水平変動, 木材学会誌 46 (4), 363-367 (2000).
- 89) 小嶋てい子: カラマツ樹皮のスクレイドに関する研究. 大学院 農学研究科林学専攻 修士論文, 東京農業大学, 東京, 2000, pp. 61.
- 91) 小林 修: 樹木の肥大成長変動の要因についての年輪年代学的解析. 博士論文. 北海道大学, 札幌, 1997, pp.133.

- 90) 小林 修: 樹木年輪による古気候復元の方法と世界の研究動向. 低温科学 65, 43-48 (2006).
- 92) 小見山 章, 井上昭二, 石川達芳: 落葉広葉樹 25 種の肥大生長の季節性に関する樹種特性. 日本林学会誌 69 (10), 379-385 (1987).
- 93) 小見山 章: 落葉広葉樹の幹肥大成長の開始・休止時期と着葉期間の相互関係, およびそれらに関する環境要因. 日本林学会誌 73 (6), 409-418 (1991).
- 94) 佐伯 浩: 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (第 2 報) 早材・晩材の区分 (1). 木材学会誌 9(6), 231-243 (1963).
- 95) 佐伯 浩: “木材の構造”, 日本林業技術協会, 東京, 1982, pp. 218
- 96) 斉藤達也: 年輪指標の計測方法について. 第 2 回「樹木年輪」研究会 専門研究報告会報告書 55-66 (1989).
- 97) 酒井 昭, 吉田静夫: “植物と低温”, 東京大学出版, 東京, 1983, pp.137.
- 98) 佐々木達哉, 野堀嘉裕, 伊藤優美, 斎藤明大, 武山淳子: 年輪解析を用いたキタゴヨウの成長特性～肥大成長と気象要因の関係を指標として～. 2008 年度 樹木年輪研究会発表要旨集 p.11 (2008).
- 99) 佐竹義輔, 原 寛, 亘理俊次, 冨成忠夫: “日本の野生植物”, 平凡社, 東京, 1989, pp.1-321.
- 100) 澤内寧子, 野堀嘉裕, 野田真人: ヒノキアスナロの重量成長と気候情報の関係. 日本森林学会誌 89 (4), 292-296 (2007).
- 101) 澤田晴雄, 蒲谷 肇, 大村和也, 千嶋 武: 東京大学秩父演習林内ミズナラ 6 個体のフェノロジー. 日林関東支論 50, 139-140 (1999).
- 102) 志田 順: 気候の永年変化と東亜諸勢力の興亡盛衰. 科学知識 15, 10-17 (1935).
- 103) 嶋田千春, 安江 恒, 武田孝志, 徳本守彦: ヤクスギの年輪気候学的特性.

平成 18 年度「樹木年輪」研究会発表要旨集 12-13 (2006).

- 104) 島地 謙, 須藤彰司, 原田 浩: “木材の組織”, 森北出版株式会社, 東京, 1976, pp. 291.
- 105) 島地 謙: 樹木の形成層活動. 木材研究・資料 No.13, 35-46 (1979).
- 106) 庄 建治朗, カズメル, ミクロシュ: 小笠原諸島における年輪既往学研究の可能性について. 小笠原研究年報 34, 59-67 (2011).
- 107) 鈴木 清: 神奈川県大山のモミ林枯損経緯とその周辺地域の年輪幅の変化. 神奈川県森林研究所報告書 19, 23-42 (1992).
- 108) 鈴木 清: 年輪解析による松枯れ原因説の検証. 神奈川県森林研究所報告書, 23, 1-9 (1997).
- 109) 高橋宏明: スギ林の直径成長 (IV) 直径成長と気象因子との相関. 日本林学会誌 53 (10), 315-318 (1971).
- 110) 武市伸幸: 年輪幅より高知市の夏季平均日最低気温の年次変動を復元する試み. 天気 52 (12), 913-918 (2005).
- 111) 寺島一郎: 植物と環境. “植物生態学”, 寺島一郎, 彦坂幸毅, 竹中明夫, 大崎満, 大原 雅, 可知直毅, 甲山隆司, 露崎史郎, 北山兼弘, 小池孝良, 朝倉書店, 東京, 2004, pp.1-41.
- 112) ドナルド・アーレン: “最新気象百科” 古川武彦監訳, 丸善出版, 東京, 2008, pp.624.
- 113) 永田 洋: “樹木の季節適応. 樹木環境生理学”, 永田 洋, 佐々木恵彦, 文永堂出版, 東京, 2002, pp.4-45.
- 114) 中塚 武: 樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元を目指して. 低温科学 65, 49-56 (2006).
- 115) 奈良国立文化財研究所: “年輪に歴史を読むー日本における古年輪学の

成立一”．同朋舎，京都，1990，pp. 195.

- 116) 根岸賢一郎：物質の動き．“樹木 形態と機能”，文永堂，投稿，1978，pp.309.
- 117) 野田正人：樹木年輪幅の時系列変動の解析．北海道大学農学部演習林研究報告，53 (1)，97-146 (1996).
- 118) 野田正人：日本の年輪解析研究の現状と展望．木材学会誌 52 (5)，271-276 (2006).
- 119) 野堀嘉裕：軟 X 線デンシトメトリーによる苫小牧地方アカエゾマツ造林木 194 個体における年輪情報と気象情報の関係解析．日本林学会誌 76 (1)，89-94 (1994).
- 120) 畑野健一，佐々木恵彦：“樹木の生長と環境”，養賢堂，東京，1987，pp.382.
- 121) 平井信二：“木の大百科 解説編”，朝倉書店，東京，1996，pp.1-642.
- 122) 深沢和三，大谷 諄：ミズナラ材密度の樹幹内変動に及ぼす年齢効果．北海道大学農学部 演習林研究報告 29 (2)，171-188 (1972).
- 123) 深沢和三：“樹木の年輪が持つ情報”，深沢和三編，平成元年度科学研究費補助金（試験研究 1）研究成果報告書，札幌，pp.141 (1990).
- 124) 福岡義隆：“植物気候学”，古今書院，東京，2010，pp.234.
- 125) 藤本征司：広葉樹 29 種の 10 年間の開芽フェノロジー観測に基づく開芽日予測法の検討．日本林学会誌 89 (4)，253-261 (2007).
- 126) 藤原 健，太田貞明：日光白根山に生育した樹木の年輪構造．樹木年輪 5，42-47 (1992).
- 127) 藤原 健：スギの年輪解析における気象パラメーターの検討．2001 年度「樹木年輪」研究会講演要旨集 p35 (2001).

- 128) 藤原 健: 樹木年輪研究の動向と成果. 山林 1451, 60-68 (2005).
- 129) 藤原 健, 香川 聡, Thida Swe: 年輪情報によるチークの産地判別一年輪幅時系列を利用した産地判別の試みー. 第 61 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM) B18-02-1100 (2011).
- 130) 船田 良, 近藤健彦, 小林 修, 安江 恒, 深沢和三: 軟 X 線デンシトメトリーによるヤチダモ天然木の年輪解析. 北海道大学農学部 演習林研究報告 52 (1), 1995, 12-21 (1995).
- 131) 眞山寿里, 高橋誠, 武津英太郎, 中田了五, 大村和也, 千嶋武, 安江 恒: 秩父で生育した産地の異なるブナの年輪幅および年輪内密度の比較. 第 61 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM) B18-02-1115 (2011).
- 132) 眞山寿里, 田村 明, 安江 恒: 北海道で生育した産地の異なるブナの年輪幅・年輪内密度およびその変動と気候応答. 第 63 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM) B27-06-1515 (2013).
- 133) 光谷拓実: わが国における年輪年代学の確立とその応用 (第一報) 現生木のヒノキによる年輪変動パターンの特性検討. 木材学会誌 33 (3), 165-174 (1987a).
- 134) 光谷拓実: わが国における年輪年代学の確立とその応用 (第二報) 産地を異にするヒノキ相互間およびヒノキと異樹種間との年輪変動パターンの相関分析. 木材学会誌 33 (3), 175-181 (1987b).
- 135) 桃井尊央, 西山 毅, 加茂千里, 大林宏也, 栃木紀郎, 小林 純: サワグルミの管孔配列と木理. 第 55 回日本木材学会大会研究発表要旨集 (京都) p.176 (2005).
- 136) 桃井尊央, 大林宏也, 栃木紀郎, 小林 純, 塩倉高義: 東京都奥多摩地域に生育する樹木の気候応答に関する樹木年輪年代学的解析 (第 1 報). 木材学会誌 59(1), 13-21 (2013).
- 137) 安江 恒, 船田 良, 野田真人, 深沢和三: 北海道大学天塩地方演習林に

生育するアカエゾマツの年輪気候学的解析. 北海道大学農学部演習林報告 51 (2), 243-266 (1994).

138) 安江 恒：北海道北部の気候復元についての年輪気候学的研究. 博士論文, 北海道大学, 札幌, 1997, pp.144.

139) 安江 恒: 樹木の成長変動に気候要素が与える影響の年輪年代学的解析ーヤチダモの孔圏・孔圏外幅の変動要因ー. 2001 年度「樹木年輪」研究会講演要旨集, 16-18 (2001).

140) 安田 正次, 沖津 進: 平ヶ岳湿原におけるハイマツの年輪幅変動とその気候的要因森林立地 49 (1), 9-18 (2007).

141) 山川 渉：四国・石鎚山系におけるウラジロモミの年輪内密度におよぼす気候の影響. 2001 年度「樹木年輪」研究会講演要旨集 p.34 (2001).

142) 山川 渉：四国産コメツガの年輪幅変動におよぼす気候要素の影響. 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 岐阜, p.500 (2002).

143) 山下香菜, 岡田直紀, 加茂皓一：ワイヤデンドロメータによる樹木肥大成長の測定--バンドデンドロメータおよび刺針法との比較. 木材学会誌 52 (1), 8-18 (2006).

144) 山瀬啓介, 安江 恒, 武田孝志, 徳本守彦: ヤクスギ年輪幅および年輪内最大密度を用いた気候復元の可能性. 第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, A19-1045 (2008).

145) 吉沢 健, 中村武久, 榊田信弥, 端山重男: 東京農業大学奥多摩演習林のフロラに関する研究. 東京農業大学農学集報 29 (4), 300-317 (1985).

146) 涌井幸子, 安江 恒: 秩父演習林のブナの肥大成長と気候要素及び種子結実との関係解析. 2008 年度 樹木年輪研究会発表要旨集 p.7-8 (2008).

147) 涌井幸子, 安江 恒, 中堀謙二：中央アルプスに生育するブナの肥大成長に影響する気候要素. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 松本, A15-0930 (2009).

- 148) 涌井幸子・内海泰弘・中堀謙二・安江 恒: 宮崎に生育するブナの年輪幅
および年輪内密度変動と気候の関係. 第 60 回日本木材学会大会講演要旨集
(CD-ROM) A18-0900 (2010).
- 149) 和田鉄平, 細尾佳宏, 安江 恒: 異なる標高に生育する信州カラマツの葉
のフェノロジーおよび形成層活動期間. 第 61 回日本木材学会大会講演要旨集
(CD-ROM) A19-P-AM05 (2011).
- 150) 渡邊 剛: サンゴ骨格に記録された小氷期における熱帯域の気候変動.
日本海水学会誌 56, 118-122 (2002a).
- 151) 渡邊 剛: サンゴが語る最近の地球環境. 国立科学博物館ニュース 396,
11-13 (2002b).
- 152) 渡邊 剛: シャコガイが記録する日単位の環境変動. 地質ニュース 575,
42-47 (2002c).
- 153) 渡辺治人: 樹幹の形成. “木材理学総論”, 渡辺治人著, 農林出版株式会
社, 東京, 1978, p.20.