ヒノキアスナロの重量成長と気候情報の関係

澤内寧子¹・野堀嘉裕^{*1}・野田真人²

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 日林誌 89: 292~296, 2007 本研究では、ヒノキアスナロ (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino) について軟 X 線デンシトメトリーで得られた年輪幅と年輪内平均密度のデータから重量を算出し、気候情報（月平均気温・月積算降水量）との相関分析を行った。その結果、三つの年輪情報ともに肥大成長期の気温の影響を受けていることがわかった。また、6 月の平均気温との関係では年輪幅よりも重量値で高い相関係数が算出された。このことから、年輪幅や年輪内平均密度だけでなく、重量値でも気候との関係を検討できる可能性のあることが示唆された。

キーワード：気候情報、重量成長、軟 X 線デンシトメトリー、年輪幅、ヒノキアスナロ

Sawauchi, Y., Nobori, Y., and Noda, M.: **The Relationships between Climate Condition and Annual Weight Growth of *Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino.** J. Jpn. For. Soc. 89: 292~296, 2007 In this study, annual weight growth of *Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino was calculated by tree-ring width and wood density by soft X-ray densitometry. Correlation coefficients were calculated from this tree-ring information and climate data on monthly average temperature and monthly total precipitation. It was recognized that three kinds of tree-ring information are influenced by average temperature during the enlargement period. In particular, the correlation coefficient value of annual weight growth and June temperature was larger than tree-ring width. It was suggested that annual weight growth data can be used in climatic analysis on similar occasions of tree ring width and wood density.

Key words: annual weight growth, climate data, soft X-ray densitometry, *Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino, tree-ring width

I. はじめに

年輪年代学や年輪気候学などで扱われてきた年輪情報は、当初はおもに年輪幅だけが用いられてきた (Douglas, 1914, 1919, 1921) が、1970 年代以降軟 X 線デンシトメトリーの手法の開発 (Polge, 1970; Parker, 1970) に伴い早材、晩材ごとの肥大成長量に加えてそれぞれの密度や年輪内最大・最低密度などの情報が利用できるようになってきた (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988)。わが国における年輪幅や密度に及ぼす気候要素の抽出に関する研究例としては小林・深沢 (1992), Kobayashi *et al.* (1998), 安江ら (1994), Yasue *et al.* (1996a) などをはじめとして多数の研究例がある。野堀 (1994) はアカエゾマツの年輪幅と年輪内平均密度と気候要因を用いて重回帰分析を行っており、肥大成長期の気温が年輪幅、晩材形成期の気温が年輪内平均密度に正に関与することを明らかにしている。近年では、気候要素に最も強く反応する年輪情報として年輪内最大密度が注目されている (Yasue *et al.*, 1996b, 1997, 2000)。この点に着目し、久保 (2003) は南アルプスに生育するコメツガの年輪幅と年輪内最大密度と気候との関係を明らかにしたう

で、気候復元を試みている。

ところで、光合成によって生産された炭水化物の樹幹部への配分を考えた場合、肥大成長を計測した“年輪幅”は 1 次元要素であり、みかけの成長量を計測したものといえる。樹木の光合成生産を的確に捉えようとすれば重量成長を把握する必要がある。一方、軟 X 線デンシトメトリーで得られる情報源の年輪幅と年輪内平均密度から重量値を算出することが可能である。これまでに樹幹部の重量成長を推定した研究 (藤原, 2003) や幹材積成長量のデータを用いて年輪気候学的解析を行った例 (Jozsa, 1987) はあるものの、重量値のデータを年輪気候学的研究に応用した例は見当たらない。筆者らは青森県内の各地域に成育するヒノキアスナロについて年輪情報の分析を行っており (澤内・野堀, 2005)、地域内、地域間での同調性が高いこと、遠方になるにしたがって相関分析で得られる *t* 値が低下すること、これらを応用すれば出土木の産地の特定に寄与する可能性のあることを明らかにした。本研究では軟 X 線デンシトメトリーで得られた年輪幅と密度から算出した重量値をもとにヒノキアスナロ (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino) の年輪気候学的分析を試みることにした。

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: ynobori@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

¹ 山形大学大学院農学研究科 (997-8555 鶴岡市若葉町 1-23)

Graduate School of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakabamachi, Tsuruoka 997-8555, Japan.

² 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター和歌山研究林 (649-4563 和歌山県東牟婁郡古座川町平井 343-1)

Wakayama Experimental Forest, Hokkaido University, 343-1 Hirai, Kozagawa, Higashimuro-gun, Wakayama 649-4563, Japan.

(2006 年 2 月 17 日受付; 2007 年 3 月 23 日受理)

II. 材料と方法

材料は青森県南津軽郡大鰐町内の三ツ目内山国有林 517 林班い小班で 2004 年 7 月に収穫のために伐採したヒノキアスナロ 22 個体である。同山林は北緯 40 度 29 分、東経 140 度 30 分、標高 250~590 m の北向き斜面にあり、冷温帯の落葉広葉樹帯のなかでも日本海側の多雪地にありヒノキアスナロの多い森林となっている。最寄りの気象官署である青森市の気候 (1971~2000 年の平年値) は図-1 のとおりである。

深澤 (1990) は標準的な年輪幅の変動を得るためには、年輪幅の測定は、根張りの影響の少ない地上 5 m 程度を推奨している。また、採取したヒノキアスナロは地際では根張りの影響が大きく、不整年輪や不連続年輪がみられたので、伐採時の採材部位にあわせて地上高約 6 m 付近の円板を採取した。採取した円板から四つの側線を得るために、髓が入るよう厚さと幅が 25 mm ほどの四つのブロックを取り出した。その後、各ブロックからツインソーで厚さ 1.4 mm のクロスセクションを切り出した。作製したクロスセクションと標準吸収体はドライオープンで 105℃、24 時間乾燥させ全乾状態としジップロックに密封して保管した。軟 X 線写真はクロスセクションと標準吸収体の両者ともにジップロック開封後の数%の含水状態として撮影を行った。標準吸収体は厚さ 1 mm のドロノキ単板 (密度 0.3517 g/cm³) を 10 枚、階段状に積層したものを使用した。X 線写真撮影は、秋田県立大学付属木材高度加工研究所の年輪測定用軟 X 線撮影装置 (Softex SR-1010 型、ソフテックス社製) を使用した。撮影条件は、照射距離 2 m、電圧 20 V、電流 14 mA、撮影時間 3 分とした。撮影フィルムは FUJI-

図-1. 青森市の気候図
1971~2000 年の平年値。

図-2. ヒノキアスナロの軟 X 線写真画像

FILM Industrial X-RAY FILM IX FR を用いた。現像、定着、乾燥したフィルムは EPSON 社製 GT-7600 スキャナの透過原稿ユニットを用いて、解像度 1,200 dpi でパソコンに取り込んだ。図-2 に軟 X 線写真の一例を示すが不連続年輪などの影響がないことがわかる。

年輪幅および年輪内平均密度の計測は REGENT INSTRUMENTS INC 製の年輪解析用ソフト WinDENDRO (Density2002 a) を用いた。WinDENDRO で計測された年輪情報のうち、本研究では前述のとおり年輪幅と年輪内平均密度のデータを用いた。本研究では試料採取部位の重量値を算出することとしたので、計算方法はまず円板より採取した 4 測線の年輪幅を平均し、次に年輪幅を半径とする円の面積を求めた上で該当年の年輪内平均密度を乗じて各年の重量値を求めた。なお、試料の厚さは 1.4 mm であるが、便宜上厚さ 1 cm の試料の重量値として算出した。1 年ごとの重量値の計算式は式のとおりである。

$$W_k = \sum_{k=1}^n (RW_k - RW_{k-1})^2 \times \pi \times RD_k \times t \quad (1)$$

ここで、

W_k : k 年の重量値 (g)

k : 対象年

n : 年輪数

RW : 年輪幅 (cm)

RD : 年輪内平均密度 (g/cm³)

t : 計算上の試料の厚さ (1 cm)

本研究では、式より求めた重量値 (weight) の他、年輪幅 (RW) と年輪内平均密度 (RD) の三つの年輪情報を用いて気候データとの関係を検討した。また、気候データとの関係を見る際に年輪情報を標準化する必要性がある。そこで、本研究では Holmes (1983) が開発したプログラム「COFECHA」を用いてクロスデーティングを行った後、「ARSTAN」(Cook and Peters, 1981) を用い 8 年および 32 年スプラインで標準化処理を行った。二つのスプラインを用いた理由は、解析対象年輪数の半分以上で 2" の最大値としての 32 年および比較的短期的周期の抽出を目的とした 8 年の両者を分析対象としたことによる。気候データは試料採取地から最も近くの気象官署でデータの蓄積の多い青森市 (採取地の北東約 50 km) の年別月平均気温と月間降水量 1928 年から 2004 年の 77 年分を使用した。また本研究では、気候データと年輪情報との相関分析を行う際、年輪形成が終了する 9 月より後の気候要因は、翌年の年輪形成に影響を及ぼしているものと考えた。そのため、前年 10 月

から当年9月の気候データと当年の年輪情報において相関分析を行った。なお、分析対象年数が比較的短いので気候変動のトレンドを排除するための標準化は行っていない。

III. 結果と考察

8年スプラインによる標準化処理後の年輪幅の変動、年輪内平均密度の変動、重量値の変動を図-3に示す。また、32年スプラインによる標準化処理後の年輪幅の変動、年輪内平均密度の変動、重量値の変動を図-4に示す。表-1にARSTANによる平均感度(Mean sensitivity)の一覧を示す。8年および32年スプラインのどちらの変動をみても年輪内平均密度のデータの変動幅が小さいのに対して年輪幅と重量値の変動幅が比較的大きいことがわかった。年輪幅と重量値の変動はほぼ同様の傾向を示しているが、わずかに年輪幅変動の変位幅が大きい傾向がうかがわれた。過去の研究事例で重量値が扱われなかった理由の一つとしては、標準化処理後の変動幅が狭い重量値をあえて扱わなかった可能性が考えられた。表-1よりARSTANの基本統計

図-3. 8年スプラインによる標準化処理後の年輪情報の変動

図-4. 32年スプラインによる標準化処理後の年輪情報の変動

計量ではいずれのスプラインを使った場合でも重量値のMean sensitivityが大きい値を示していた。標準化処理方法の違いとしては8年スプラインに対して32年スプラインの場合に変動幅が大きいことがわかった。ARSTANのMean sensitivityの値が大きいこと、変動幅が大きく相関分析で優位なこと、また気候情報を標準化していないことを考慮して、以後の気候情報との関係の分析では32年スプラインによる標準化処理後のデータを使用することとした。

表-2に32年スプラインによるARSTANの基本統計量一覧を示す。年輪幅、年輪内平均密度、重量値ともに個体間総当たり相関の平均値(Between trees)の値は高くないが、個体とサイトクロノロジーとの相関の平均値(Trees vs radii)が高いこと、個体ごとのクロノロジーの一致性(Agreement with population chronology)が9割を超えており、第1固有ベクトルに含まれる変動の割合(Variance in first eigenvector)も20~30%と比較的高い値を示していることから、ARSTANで算出された年輪幅、年輪内平均密度、重量値のサイトクロノロジーは後述の解析に耐えうる程度の個体共通変動を抽出しているものと判断された。そこで、それぞれの年輪情報と気象情報との相関分析を行うこととした。

年輪幅、年輪内平均密度、重量値に対する月別平均気温の相関分析結果を表-3に示した。この表をみると、年輪幅に対して当年6月の平均気温で1%レベルの負の相関、年輪内平均密度に対しては当年5月に1%レベルの正の相関、7月に1%レベルの負の相関、重量値に対しては前年の11月の5%レベルの負の相関、当年の6月に0.1%レベルの負の相関が認められた。これらの結果をみると5~7月の肥大成長期と考えられる時期に相関係数が統計的に有意と

表-1. ARSTANによるMean sensitivityの比較

年輪情報	8年スプライン	32年スプライン
RW	0.0962	0.1114
RD	0.0260	0.0310
Weight	0.1011	0.1342

表-2. ARSTANによる32年スプラインの基本統計量一覧

Mean correlations	RW	RD	Weight
Between trees	0.277	0.174	0.260
Trees vs mean	0.525	0.425	0.509
Signal to noise ratio	17.620	9.661	16.480
Agreement with population chron.	0.946	0.906	0.943
Variance in first eigenvector	31.77%	22.04%	30.53%
Chron. common interval mean	0.998	0.995	0.992
Chron. common interval std dev.	0.104	0.028	0.119

Detrended series を表示した。

表-3. 年輪情報と月別の平均気温との相関分析結果

年輪情報	月											
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
RW	0.0163	-0.1242	-0.0050	-0.0020	0.0519	0.1158	0.1648	-0.0732	-0.3353**	-0.0377	0.0940	0.0202
RD	0.1903	-0.0286	0.0276	-0.0150	0.0942	0.1583	0.1369	0.3331**	0.0007	-0.3029**	-0.1312	0.1981
Weight	-0.0555	-0.2302*	-0.1153	-0.0736	-0.0706	0.0055	0.0773	-0.1139	-0.3892***	-0.1499	0.0853	-0.0408

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

表-4. 年輪情報と月別の積算降水量との相関分析結果

年輪情報	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
<i>RW</i>	-0.1924	-0.1476	-0.0114	0.0736	-0.0699	0.0171	0.0546	0.0899	-0.0045	0.0148	0.0600	-0.1571
<i>RD</i>	0.0755	0.1952	0.2521*	0.1672	0.1269	-0.0187	0.0741	-0.1093	-0.0231	-0.1722	0.0810	-0.0458
<i>Weight</i>	-0.2747*	-0.0667	-0.0846	-0.1291	-0.2288*	-0.0825	0.1538	0.0518	-0.0102	-0.1161	0.1277	-0.1553

* $p < 0.05$

なっているが、年輪幅と重量値では負の相関となっていることがわかった。また、重量値では年輪内平均密度や年輪幅よりも相関係数が大きな値となっていることがわかったが、これは年輪幅と年輪内平均密度の相乗の効果と考えられる。橋本ら（1993）はヒノキアスナロ稚樹の光合成特性について述べており、肥大成長時期において低温条件でも旺盛な光合成能力を示すことを述べている一方、一定の条件を超える高温下では光合成能力が低下することを示している。本研究ではヒノキアスナロの成木について分析したものであるが、概ね同様の傾向が示されたこととなり注目に値する。

月別の積算降水量との関係を見ると年輪内平均密度で前年の11月に5%レベルの正の相関、重量値で前年の10月と当年2月に5%レベルでの負の相関が認められた（表-4）。これらの結果を見ると前年の10～2月の成長停止期と考えられる時期に相関係数の値が大きく統計的に有意となる傾向のあることがわかった。成長停止期の気候が翌年の成長に影響する理由については筆者ら（野堀，1994）が示しているように積雪地の場合は冬季の降雪などさまざまな影響が考えられるが、現時点では不確実性を排除して考察することができないので、ここでは後述するように成長期の気候の影響についてのみ考察を行うこととした。月平均気温に比べると相関係数の値は全体的に低い傾向が認められた。このことから、試料採取地のヒノキアスナロでは成長に及ぼす月積算降水量の影響は月平均気温より小さいことが考えられた。

それぞれの年輪情報の変動から解説できる樹木の成長を考えると、次のことが考えられる。たとえば年輪内平均密度に対する正の関与を想定したとき、気温が高くなると年輪内平均密度の値が増加し、気温が低くなっているときは年輪内平均密度が減少する現象が起こっていることを示している。年輪内平均密度が増加するということは、①早材形成時期に成長が悪く細胞の数や大きさを増やすことができず早材密度が高くなり、結果的に平均密度が増加する場合、②晩材形成の時期が延びて平均密度が高くなる場合、の2とおりパターン、また両者が同時に起こった場合が考えられる。矢崎・船田（2005）は針葉樹における細胞形態の変化は多くのパターンがあり、密度はさまざまな原因で増加、減少すると述べている。前述のように年輪内最大密度が気候要素に対して強い反応を示す理由は、樹木の細胞形成過程、特に晩材形成時期における生理的現象を的確に捉えたものと考えられる。一方、本研究で用いた重量値は1年間の光合成による物質生産の総量に影響する時期を明

図-5. 6月の平均気温と重量値の変動

らかにしたものと考えられ、試料採取地である青森県大鰐町周辺に生育するヒノキアスナロの場合は肥大成長時期の高温は光合成および重量成長を抑制する作用があるが、肥大成長時期の低温は光合成および重量成長を抑制するわけではなくむしろ促進する効果があると考えられた。すなわち、重量値が光合成生産物の量を反映する一つの指標として重要であることが示唆された。

本研究では従来使用されてきた年輪幅や年輪内平均密度と同様に重量値でも気候との関係を検討できることがわかった。このことより、年輪情報と気候の関係を検討する際の新たな要素として、重量値が有効になりうることが示唆された。図-5に1925年から2005年までの6月の気温と32年スプラインによる標準化処理後の重量値の変動を示すが、両者が負の相関を示していることがわかる。また、両者の関係を応用すれば重量値の変動データから6月の平均気温を推定することができると考えられた。

なお、本研究では樹幹の1断面の軟X線デンシトメトリーで得られる重量値を求めたが、今後1年輪ごとの重量値の解析が進めば肥大成長に関する樹木生理学的メカニズムの研究も進展していく可能性が示唆された。また、樹幹の高さ方向ごとの年輪幅と年輪内平均密度を得られれば、樹幹部全体の重量値の連年成長量を算出することができる。樹幹部の重量値の算出には、Nobori *et al.* (2004) による樹幹解析と軟X線デンシトメトリーを組み合わせた「Stem Density Analyzer」が活用できるので、今後は樹幹部全体の重量成長に関する分析が行われることを期待したい。

引用文献

Cook, E.R. and Peters, K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for

- dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull.* 41: 45–53.
- Douglas, A.E. (1914) A method of estimating rainfall by the growth of trees. *In* The Climate factor. Huntington, E. (ed.), Carnegie Institution, Washington, 101–122.
- Douglas, A.E. (1919) Climate cycles and tree growth, Vol. I. 289 pp, Carnegie Institution, Washington.
- Douglas, A.E. (1921) Dating our prehistoric ruins. *Nature Hist.* 21: 27–30.
- Fritts, H.G. (1976) Tree rings and climate. 567 pp, Academic Press, London.
- 藤原 健 (2003) 年輪解析によるスギ樹幹の年間重量成長量の推定. 日本木材学会大会発表要旨集 53: 48.
- 深澤和三編 (1990) 樹木の年輪が持つ情報. 141 pp, 北海道大学農学部, 札幌.
- 橋本良二・高橋宏輔・白旗 学 (1993) ミズナラーヒバ林下に生育する両椎樹の光合成及び呼吸特性. *日林論* 104: 549–550.
- Holmes, R.L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 43: 69–78.
- Jozsa, L.A. (1987) Some climatic aspects of biomass productivity of white spruce stem wood. *Can. J. For. Res.* 17: 1075–1079.
- 小林 修・深澤和三 (1992) 環境変動とヨーロッパトウヒの年輪情報. *樹木年輪* 5: 4–11.
- Kobayashi, O., Funada, R., Yasue, K., and Ohtani, J. (1998) Evaluation of climatic and nonclimatic factors on the radial growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* Carr.) by dendrochronological methods. *Ann. Sci. For.* 55: 277–286.
- 久保典子 (2003) 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 14–15.
- 野堀嘉裕 (1994) 軟 X 線デンス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. *日林誌* 76: 89–94.
- Nobori, Y., Sato, K., Onodera, M., Noda, M., and Katoh, T. (2004) Development of stem density analyzing system combined X-ray densitometry and stem analysis. *Jpn. J. For. Plann.* 10: 47–51.
- Parker, M.L. (1970) Preparation of X-ray negatives of tree-ring specimens for dendrochronological analysis. *Tree-Ring Bull.* 30: 11–22.
- Polge, H. (1970) The use of X-ray densitometric methods in dendrochronology. *Tree-Ring Bull.* 30: 1–10.
- 澤内寧子・野堀嘉裕 (2005) ヒノキアスナロの年輪幅同調性. *東北森林科学会* 10: 100–105.
- Schweingruber, F.H. (1988) Tree rings. 276 pp, D. Reidel Publishing, Boston.
- 矢崎健一・船田 良 (2005) 高 CO₂ 環境下での樹幹形成. *森林科学* 45: 11–17.
- 安江 恒・船田 良・野田真人・深澤和三 (1994) 北海道大学天塩地方演習林に成育するアカエゾマツの年輪気候学的解析. *北大農演報* 51: 246–266.
- Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., and Ohtani, J. (1996b) Effect of climate factors on variation in the maximum density of *Picea glehnii* Mast. and associated changes in tracheid dimensions. *Dendrochronologia* 14: 89–97.
- Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., and Ohtani, J. (1997) Tree-ring width and maximum density of *Picea glehnii* as indicators of climatic changes in northern Hokkaido, Japan. *Can. J. For. Res.* 27: 1962–1970.
- Yasue, K., Funada, R., Kobayashi, O., and Ohtani, J. (2000) The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to climatic factors. *Trees* 14: 223–229.
- Yasue, K., Funada, R., Kondo, T., Kobayashi, O., and Fukazawa, K. (1996a) The effect of climatic factors on the radial growth of Japanese ash in northern Hokkaido, Japan. *Can. J. For. Res.* 26: 2052–2055.