

米延仁志<sup>1</sup>・星野安治<sup>2</sup>・大山幹成<sup>3</sup>：  
魚梁瀬スギ標準年輪曲線（1768～2004）

Hitoshi Yonenobu<sup>1</sup>, Yasuharu Hoshino<sup>2</sup> and Motonari Ohyama<sup>3</sup>：  
Yanase sugi (*Cryptomeria japonica*) tree-ring chronology 1768–2004

**Abstract** We developed a ring-width chronology using living trees of old-growth Sugi (*Cryptomeria japonica*) in Yanase, Kochi Prefecture, Japan. The studied site is situated in a national forest in the mountainous area of south-eastern Shikoku Island, where Sugi-dominant stands mixed with *Tsuga* and *Abies* are distributed. A total of 18 cross-cut disks were used to measure ring widths at the precision of 0.01 mm for paired radii of a sample. Tree-mean curves were all successfully crossdated, and the final raw ring-width chronology were generated, covering CE 1768–2004. Crossdating statistics and the visual assessment of the ring-width series showed that the chronology is enough capable of dendrochronological use in future studies. A conventional method to detect pointer years was improved by producing a chronology for the percentage of agreement of increase or decrease of ring widths from those of the previous years. Mean ring-width series of age-aligned tree-mean curves showed the aging trend of the forest dynamics in radial growth, i.e., rapid depression in the very early stage, successive slow recovery, and then gradual, exponential decrease. The result suggested that the variability of the ring-width series are governed not only by the climate but also greatly by the ecological conditions.

**Keywords:** dendrochronology, growth trend, reference tree-ring chronology, ring width, Yanase Sugi (*Cryptomeria japonica*)

#### はじめに

四国の南東部は年降水量 3000～4000 mm を超える日本有数の多雨地帯であり、スギの生育適地でもある。1000 m 級の間山部にはスギ、ツガ、モミの高木林が分布し、中には樹高 40 m に達する老齢のスギが優占し、一部では群落をなしている地域もある。この地域のスギは魚梁瀬スギとよばれ、歴史的にも良材を産出してきた。吉野スギや木曾ヒノキなどと比べ、魚梁瀬スギの林業や木材利用の歴史に関する文献は乏しいが、千本山保護林記録整備委員会（1974、高知営林局、現四国森林管理局）によれば、長曾我部元親が天正 14 年（1586 年）に京都東山仏光寺大仏殿の用材搬出を指揮したことが魚梁瀬スギ利用の現存する初期の記録であり、江戸時代初期には土佐山内藩によって、御留山惣目録（貞享元年、1684 年、伐採禁止令）の作成等による保続的な林業が営まれたが、17 世紀以降には藩財政の悪化により濫伐が行われたとされる。このことは江戸時代の古建築等の重要な文化財に魚梁瀬産スギ材が多く含まれており、魚梁瀬スギが年輪年代学的にも価値が高いことを示唆している。

日本では数少ない貴重な老齢現生林であるにも関わらず、魚梁瀬スギの年輪研究は少ない。これまで、予察的な標準年輪曲線の構築（奈良国立文化財研究所、1990）と気候復元（例えば、武市、1988）が行われたがいずれも試料が 6 点と少なく、未だに“標準”とよべる状態には至っていない。

本研究では 18 点の樹幹円板試料から魚梁瀬スギの年輪幅標準曲線を構築した。年輪曲線の質を検証した結果、標準とよぶことができる、すなわち古文化財の年代測定や気候復元等に応用可能な基礎資料であるとの結論に至ったのでここに報告する。また、今後の年輪気候学・生態学的应用を目的として、肥大成長の経年変動特性を明らかにした。

#### 試料と方法

##### 1. 試料採取地点

林野庁四国森林管理局より魚梁瀬スギ大径木の樹幹円板 18 点の提供を受けた。試料は同局の技術開発課題（四国森林管理局、2008）のために採取されたものである。採集地点は安芸森林管理署魚梁瀬 2032 林班（N33° 40′, E134° 0′,

<sup>1</sup> 〒772-8502 鳴門市鳴門町高島字中島 748 鳴門教育大学大学院学校教育研究科  
Graduate School of Education, Naruto University of Education, Naruto 772-8502, Japan

<sup>2</sup> 〒630-8577 奈良市二条町 2-9-1 奈良文化財研究所  
Nara National Institute for Cultural Properties, Nara, 630-8577, Japan

<sup>3</sup> 〒980-0862 仙台市青葉区川内 12-2 東北大学植物園  
Botanical Gardens, Tohoku University, Sendai, 980-0862, Japan

表 1 魚梁瀬スギの年輪基本統計量とクロスデーティング指標値  
Table 1 Tree-ring series and crossdating statistics for living trees of Yanase Sugi

	Tree-ring series			Crossdating							
				BRT ( $n = 18$ )				BT ( $n = 153$ )			
	<i>nr</i>	<i>acc</i> (1)	<i>ms</i>	<i>olp</i>	<i>t<sub>BP</sub></i>	<i>t<sub>HO</sub></i>	<i>GLK</i>	<i>olp</i>	<i>t<sub>BP</sub></i>	<i>t<sub>HO</sub></i>	<i>GLK</i>
Max.	293	0.89	0.29	293	17.50	18.10	77.2	266	12.00	11.90	72.5
Q3	247	0.85	0.24	247	14.10	13.60	73.2	224	7.16	6.70	64.8
Median	225	0.76	0.22	225	11.75	11.50	72.1	211	5.60	5.47	62.7
Q1	198	0.70	0.21	198	10.45	10.45	70.3	185	4.38	4.49	60.1
Min.	173	0.60	0.16	173	8.01	7.91	64.5	172	2.15	2.17	53.5

BRT: 標準曲線一個体間, BT: 个体間, *nr* = 年輪数, *acc*(1) = 1 次自己相関, *ms* = 平均感応度 (mean sensitivity), Max. = 最大値, Q3 = 75 パーセンタイル, Median = メジアン, Q1 = 25 パーセンタイル, Min. = 最小値 (図 1 参照)

BRT: between reference and trees, BT: between trees, *nr*: number of rings, *acc*(1): first-order autocorrelation coefficients, *ms*: mean sensitivity, *olp*: the number of overlapped rings, Q1 and Q3: 25 and 75 percentiles, respectively.

800–1000 m a.s.l.) である (四国森林管理局, 国有林の図面: 127 安芸 12–10 馬路村, 安芸 (魚梁瀬) 6)。本研究では今後の年輪年代学的应用を目的として, 髓から最外年輪までの年輪記録を完備することとした。なお, 林班とは, 林業における施行のために尾根筋, 河川など自然地形を用いて境界を設定された区画のことである。

## 2. 年輪計測とデータ解析

試料木口面をベルトサンダー (粒度 #120, #400, 順次) で研磨した。年輪幅測定器 (Tree Ring Measuring System, Velmex Inc.) と測定用ソフトウェア Measure J2X (Voortech Consulting) を用いて年輪幅を 0.01 mm 精度で測定した。測線は異常材, 節等を避けつつ反対方向に 2 方向とし, 両者の年輪幅時系列のアンサンブル平均として試料年輪曲線 (tree-mean curve) を得た。

試料年輪曲線の年代をクロスデーティング (例えば, 米延ほか, 2010) によってマッチングの良好な個体を逐次的に積算平均し, 最終的に全 18 個体を用いて魚梁瀬スギ年輪幅標準年輪曲線 (ver. 1.0) を得た。なお, クロスデーティングにはソフトウェア PAST5 (SCIEM) を用いた。統計的クロスデーティングの指標値として Baillie & Pilcher の  $t$  値 ( $t_{BP}$ ), Holstein の  $t$  値 ( $t_{HO}$ ), 及び Gleichläufigkeit ( $GLK$ ) を算出し, 年代決定には主に  $t_{BP}$  を, 補助的に  $GLK$  を用いた。 $t_{HO}$  は使用する研究者は限られているが, 本研究では参考としてその基本統計量を紹介した。また, 年輪幅測定と標準年輪曲線の質の確認にはソフトウェア COFECHA (Holmes, 1983) も併用した。

## 結 果

### 1. クロスデーティング

試料年輪曲線とクロスデーティング指標値の基本統計量によると, 標準年輪曲線 (図 1) の開始年代 (1768 年) は試料年輪数 *nr* のメジアンと第 3 四分位 (表 1, Q3) (1757

~ 1779 年に相当) の中間にある。年輪数の上位 25% は 250 ~ 300 年程度であり, 今後の試料点数の増加による標準年輪曲線の延長が期待できる (表 1)。1 階自己相関係数 *acc*(1) と平均感応度 *ms* はそれぞれ, 年輪時系列の長期記憶性 (前年以前との類似性), 年々変動の大きさ (統計学における平均絶対誤差に近い) を示す指標であり (例えば, Cook & Kairiukstis, 1990), 前者が小さく, 後者が大きいほど年輪幅時系列は年々~数年の短周期振動が顕著となる。典型的には *acc*(1) は 0.0 ~ 0.6, *ms* は 0.02 ~ 0.4 程度の値を示す (例えば, Bunn et al., 2013)。本邦産温帯性針葉樹 (例えば, スギ, ヒノキ, ヒノキアスナロ) は大きい *acc*(1) と低い *ms* で特徴づけられる (*acc*(1) = 0.76 ~ 0.91, *ms* = 0.12 ~ 0.25) (Ohyama et al., 2013; Yonenobu & Eckstein, 2006; Ohyama et al., 2007)。魚梁瀬スギ年輪幅もこの範疇に入るが, 本邦産温帯性針葉樹としては小さめの *acc*(1) と大きめの *ms* を示した。この結果は魚梁瀬スギ年輪幅時系列が気候変動や森林生態系の動態 (競合, 被圧と開放, 伐採) などなんらかの外的要因を, 特にそれらの短周期成分を複合的に捕捉していることを示唆している。

クロスデーティング指標値に関して, 標準年輪曲線を構成する個体は全て標準曲線に対して (表 1, BRT) 高い  $t_{BP}$  値を示した。通常, スギ年輪幅時系列のクロスデーティングでは  $t_{BP} > \sim 5.5$  で, 目的的にも良好なマッチングとなることが経験的に知られており, 個体数は少ないが良質の標準年輪曲線が得られた。一方, 个体間比較 (表 1, BT) では  $t_{BP}$  のメジアンが 5.60 であり, 約半数の試料が単木間ではクロスデーティングで年代決定ができないことが示されているため, BRT の高い  $t$  値は, 年代決定のための標準年輪曲線の有用性を示している。

### 2. 魚梁瀬スギ年輪幅標準曲線

魚梁瀬スギ標準年輪曲線と個々の試料年輪曲線とを合わせて示した (図 1a)。標準年輪曲線に含まれる試料数も示

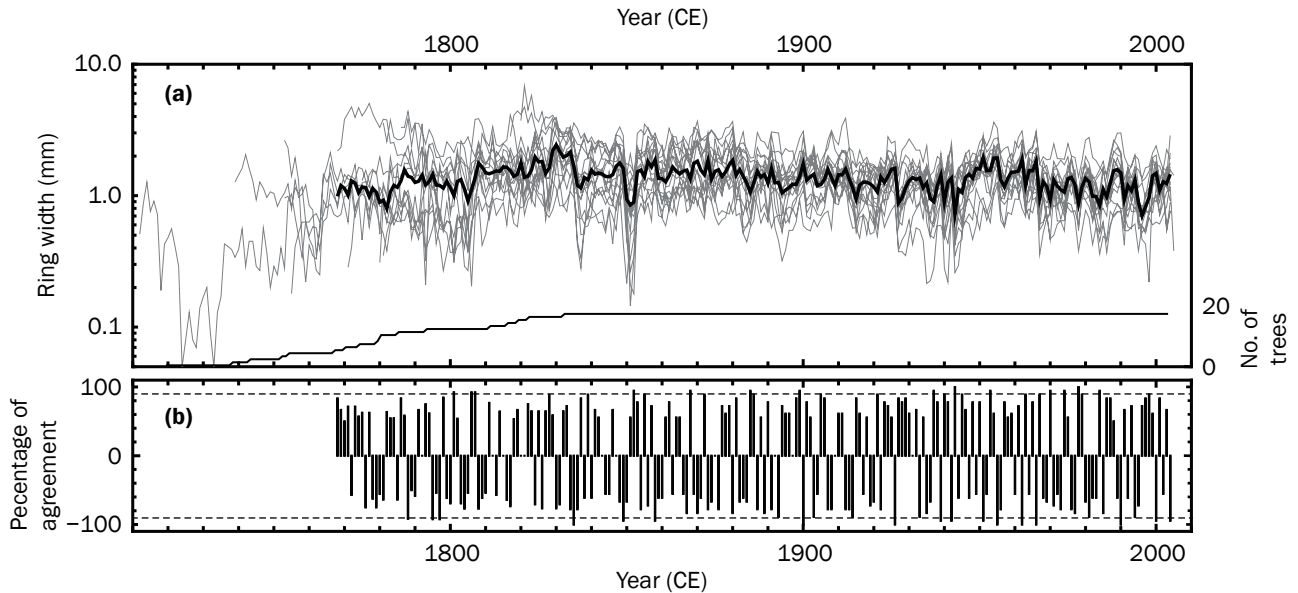


図1 (a) 魚梁瀬スギ標準年輪曲線 (CE 1768 ~ 2004) (ver. 1.0) と試料年輪曲線. (b) 年輪幅年々変動の増減一致率. 符号の正負はそれぞれ増減での一致する個体数の割合を示す. 破線は一致率 =  $\pm 90\%$ .

Fig. 1 (a) Yanase sugi (*Cryptomeria japonica*) tree-ring chronology (CE 1768–2004) with tree-mean curves. (b) Percentage of agreement (PoA) of year-to-year ring-width increase and decrease plotted as positive and negative values, respectively. Dotted horizontal lines show PoA equal to  $\pm 90\%$ , suggesting possible pointer years.

してある。クロスデーティングの過程で6個体のアンサンブル平均以降、最大の  $t_{BP}$  値で残りの試料の年代をほぼ機械的に決定できるようになった。このことを基準として6個体を超える年代範囲、CE 1768 ~ 2004年 (明和5 ~ 平成16年, 237年間) を正式版の標準年輪曲線 (ver. 1.0) とした。含まれる試料の最大点数は1833年以降の18点である。

## 考 察

### 1. 標準年輪曲線の特徴

標準年輪曲線を中心に個々の試料年輪曲線の変動を観察すると、例えば1850 ~ 1852年に顕著な成長減退を示すスパイクが見られる。時系列全体でこれより微弱ながら共通の信号成分を示すピークを、年輪幅増減に関わらず見出すことができる。こうした複数個体 (林班全体) に共通する変動成分は、気温や降水量等の気候変動のような広域で樹木の肥大成長に影響を及ぼす外的因子が考えられる。本研究では年代決定に資する指標として、このような年輪幅増減の定量化を試みた (図1b)。ここでは年輪幅の1階差分値 ( $rw_i(t) - rw_i(t-1)$ ,  $rw_i(t)$  は個体  $i$  の  $t$  年での年輪幅) の正負をそれぞれ  $\pm 1$  で符号化し、年ごとに増減が一致する個体数の割合 (一致率, percentage of agreement) を算出した。一致率の正負はそれぞれ前年からの年輪幅の増減

を示す。年輪の極端変動は年代の指標として用いられることがあるが、一方で微弱な変動でも高い割合で増減が一致することがあり、年代決定にはいずれも有用な情報である。指標年の表現方法については、翌年に年輪幅が増加する個体数の割合 (pointer interval, Schweingruber et al., 1990) や、ある閾値 (例えば90%) を設定し一致率がそれを超える年代を列挙する方法 (奈良国立文化財研究所, 1990) が取られてきた。前者では年輪幅増加の情報しか得られず、後者では異なる閾値で報告された結果の比較が難しい。そこで本研究では一致率をクロノロジーとして、かつ増減を値の正負で表現し、個体数 (図1a) とともにデータベース化することを試みた。現時点では試料数 ( $n = 18$ ) が少ないため本稿では指標年を列記することは避けるが、参考までに図中では  $\pm 90\%$  の閾値を添えた。

### 2. 肥大成長の加齢傾向

魚梁瀬スギの肥大成長量の平均的加齢傾向を示した (図2a)。標準年輪曲線 (図1a) が年代ごとに試料の年輪幅を平均して得られるのに対し、加齢傾向曲線は、髓からの年輪数で試料年輪曲線を揃え、平均化したものである。Friedman (1984) の super smoother 法を用いて加齢傾向を表現した (図2a 太線)。計算にはプログラミング言語 R (R Core Team, 2020) を用いた。平滑化パラメータ  $\alpha = 0$

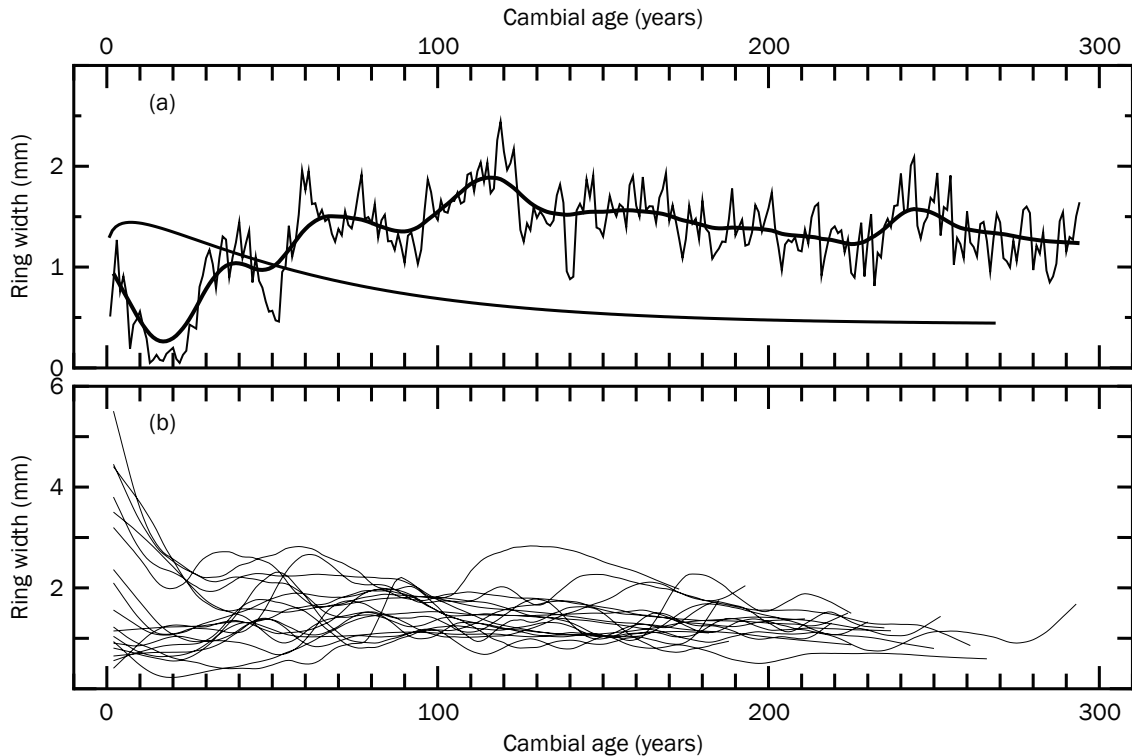


図2 (a) 肥大成長の加齢傾向. 年代では無く髄(樹心)からの年輪数で全個体の年輪幅を平均した. (b) 個々の試料の平滑化年輪曲線. パネル(a), (b)中の平滑化曲線はFriedmanのsuper smoother法によって得た.

Fig. 2 (a) Age-aligned raw chronology representing mean radial-growth trend. (b) Smoothed tree-mean curves for all trees used in the reference chronology (Fig. 1). Smooth lines in (a) and (b) were obtained using the Friedman's super smoother.

として、数10年(interdecadal)スケールより長い周期成分が残るように調整した。加齢傾向は年輪による環境復元を行う際に除去されるべき信号成分であり(例えば、安江, 2012), こうしたデータは年輪年代学の基礎資料として重要である。

魚梁瀬スギの肥大成長量は、(1)初期の20~30年間は急激に低下、(2)その後120年程度まで肥大成長量は漸増し、次いで緩やかに減少する。以下、その要因を分析する。

1) 個体レベル(図2b)では、最初期の年輪幅(肥大成長量)が2群に分けられる。高成長群(7個体)では成長量が指数関数的に急激に低下する。一方、低成長群(11個体)ではやや成長量が低下するものと、全く低下しないもの(4個体)が見られる。この原因は生育地点での個体周辺からの被圧効果、あるいはスギが陽樹~半陽樹であることから日照条件の違いに強く影響を受けたものと考えられる。

2) 30年以降は平均的な成長量(図2a)がピークを迎える120年ころまで個体レベルでの成長量の変動(図2b)は大きい、その後、徐々に一定の範囲に収斂し、漸減していく傾向が見られる。この原因として、樹高の増加によ

る生態的地位の獲得とそれに伴う枝の展開や葉量の増加により、上記の2群とも同等な成長量を示すようになり、その後樹高成長が鈍化し(例えば、鍋嶋・石井, 2008), 光合成生産量の安定化とともに肥大成長量が徐々に減速していくことが推察される。

ここで述べた生態学的プロセスの解釈については、試料数が十分ではなく、かつ採集地が国有林の林班という限られたエリアで得られたものである。今後、使用点数を増やしてより包括的に魚梁瀬スギの成長様式を明らかにする必要がある。

#### まとめ

本研究では魚梁瀬スギ現生木樹幹円板を用いて標準年輪曲線(CE 1768~2004, 237年間)、及び年輪幅増減のクロノロジーを構築した。標準年輪曲線の性能を、年輪幅時系列やクロスデーティング指標値の記述統計量をもとに検討した結果、これらは文化財の年代測定、森林生態系の経年変動や気候の復元等に利用できる性能を持つことが明らかとなった。肥大成長の傾向分析では加齢による魚梁瀬スギの成長トレンドとその生態学的要因を明らかにした。



魚梁瀬スギの肥大成長は初期に被圧,あるいは日照の影響を受け初期に急減し,その後成長量を増大させ,漸減的な成長に至る。

今後の課題としては試料数の増加と標準年輪曲線の延長があげられる。一方で魚梁瀬スギは2017年9月を最後に,国有林事業としての伐採は休止された(酒井ほか,2018)。そのため,展示用円板や製材品,古建築材等を活用することで効果的に成果が得られると考えている。

## 謝 辞

試料を提供していただいた林野庁四国森林管理局に謝意を表します。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費の助成を受けて行った(課題番号15KK0032,16700584,16H03098,17H02424,18H05221,20H01368)。

## 引用文献

- Bunn, A. G., Jansma, E., Korpela, M., Westfall, R. D. & Baldwin, J. 2013. Using simulations and data to evaluate mean sensitivity ( $\zeta$ ) as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia* 31: 250–254. DOI: 10.1016/j.dendro.2013.01.004.
- Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A., eds. 1990. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. 406 pp. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Friedman, J. H. 1984. A variable span smoother. *Technical Report, Laboratory for Computational Statistics, Department of Statistics, Stanford University* No. 5: 1–16. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a148241.pdf> (2020年11月11日参照)。
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69–78.
- 鍋嶋絵里・石井弘明. 2008. 樹高成長の制限とそのメカニズム. *日本森林学会誌* 90: 420–430. DOI: 10.4005/jjfs.90.420.
- 奈良国立文化財研究所, 編. 1990. 年輪に歴史を読む—日本における古年輪学の成立—. 195 pp. 同朋社, 京都.
- Ohyama, M., Yonenobu, H., Choi, J.-N., Park, W.-K., Hanzawa, M. & Suzuki, M. 2013. Reconstruction of northeast Asia spring temperature 1784–1990. *Climate of the Past* 9: 261–266. DOI: 10.5194/cp-9-261-2013.
- Ohyama, M., Ohwada, M. & Suzuki, M. 2007. Chronology development of Hiba arbor-vitae (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondae*) and dating of timbers from an old building. *Journal of Wood Science* 53: 367–373. DOI: 10.1007/s10086-006-0868-2.
- R Core Team. 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (2020年11月11日参照)。
- 酒井 敦・大谷達也・米田令仁・内山憲太郎・木村 恵. 2018. 魚梁瀬「天然」スギ林の間伐後の成長, 日本森林学会大会発表データベース No. 129: 96. DOI: 10.11519/jfsc.129.0.96.
- 四国森林管理局. 2008. 地球温暖化に伴うヤナセスギ等の成長促進効果の検証作業について. 林野庁. URL: [https://www.rinya.maff.go.jp/shikoku/gijutu\\_c/kanryokadai/h20kadai.html](https://www.rinya.maff.go.jp/shikoku/gijutu_c/kanryokadai/h20kadai.html) (2020年11月11日参照)。
- 四国森林管理局, 国有林の地図. [https://www.rinya.maff.go.jp/shikoku/release/keikaku/forest\\_drawing.html](https://www.rinya.maff.go.jp/shikoku/release/keikaku/forest_drawing.html) (2020年11月11日参照)。
- 千本山保護林記録整備委員会, 編. 1974. 魚梁瀬千本山保護林. 239 pp. 高知営林局, 高知.
- 武市伸幸. 1988. スギの年輪幅の変動より推定した高知県魚梁瀬の気温変化, *東北地理* 40: 181–189. DOI: 10.5190/tga1948.40.181.
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F. & Bräker, O. U. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8: 9–38.
- 安江 恒. 2012. 年輪から読む樹木・森林・環境のうごき—樹木年輪年代学の応用—. *森林科学* 65: 54–59. DOI: 10.11519/jjsk.65.0.54.
- 米延仁志・大山幹成・星野安治・光谷拓実・Eckstein, D. 2010. 年輪年代学におけるクロスデーティングのガイドライン—日本産材を用いた方法論の分析とモンテカルロシミュレーションによる統計的クロスデーティングの再検討—. *考古学と自然科学* 60: 1–12.
- Yonenobu, H. & Eckstein, D. 2006. Reconstruction of early spring temperature for central Japan from the tree-ring widths of Hinoki cypress and its verification by other proxy records. *Geophysical Research Letters* 33(10): 1–4. DOI: 10.1029/2006GL026170.

(2020年11月11日受理)