

北日本産樹木を用いた酸素同位体比標準年輪曲線の構築
**Establishment of tree-ring oxygen isotope chronology
using the northern Japanese trees**

箱崎真隆^{1*}・中村俊夫¹・木村勝彦²・中塚武³

Masataka Hakozaiki^{1*}・Toshio Nakamura¹・Katsuhiko Kimura²・Takeshi Nakatsuka³

¹名古屋大学年代測定総合研究センター

²福島大学共生システム理工学類

³総合地球環境学研究所

¹Center for Chronological Research, Nagoya University

²Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University

³Research Institute for Humanity and Nature

**Correspondence author. E-mail: hakozaiki@nendai.nagoya-u.ac.jp*

Abstract

Establishment and extension of the tree-ring oxygen isotope chronology enable high-precision age determination of various archeological wooden materials and natural buried trees, and contributing to enhancement of past civilization and environmental understanding is expected. In this study, tree-rings oxygen isotope ratio measurement which used Asunaro (*Thujopsis dolabrata*) buried trees from Aomori were performed in north Japan which is locally insufficient of data for the purpose of building the oxygen isotope chronology. The oxygen isotope ratio of 25.29 - 30.33 ‰ was obtained as a result of measurement of 4 individual 629 rings. In crossdating between individuals, although the existence of missing-ring or the false annual ring was suspected by one individual, when it was rectified, sufficiently high correlation was acquired in all the combination. From this result, the north Japanese Asunaro buried tree was understood that the dendrochronological analysis based on oxygen-isotope ratio is possible. Moreover, a tree-ring oxygen isotope chronology over the 10th to 17th century was expected to build.

Keywords: *Thujopsis dolabrata; northern Japan; tree-ring oxygen isotope; dendrochronology*

1. はじめに

年輪年代法は、年代未知の木材試料の暦年代を1年単位で決定できる優れた年代測定法である。近年では、年輪の酸素同位体比を相互照合(クロスデーティング)のパラメータとして扱い、年輪幅では検討の難しかった樹種間の年代決定も試みられている(木村ほか 2012)。日本の低湿地では、多種多様な遺跡出土木材・自然埋没木が得られている(鈴木ほか 2009 など)。年輪酸素同位体比標準年輪曲線の構築と過去への延長は、出土材・埋没木の高精度年代決定の可能性を広げ、過去の文明と環境の高分解能復元に重要な役割を果たすと考えられる。

中塚ほか(2013)は、中部・近畿地方産ヒノキ試料(年代既知)の年輪酸素同位体比を測定し、過去 2000 年間にわたる長期標準年輪曲線を構築している。しかし、日本の他の地域では、現生木試料を用いた研究が大勢を占め、過去 1000 年に及ぶような長期標準年輪曲線の構築例は他にない。年輪酸素同位体比は、主に気象学的因子に規定されるため、樹種間の差異は小さいものの、気象条件の異なる地域間の差異は大きいと予想される。日本列島は南北に長く、特に北日本太平洋側では、夏季にオホーツク海気団から「ヤマセ」が吹きつける。そのため、この地域に生育する樹木は、他地域とは異なる酸素同位体比の変動パターンを持つ可能性がある。年輪酸素同位体比に基づく年代決定の高精度化や応用研究の拡充のためには、日本国内でも地域的差異を十分に検討する必要がある。特に上記の理由から、北日本での長期標準年輪曲線の構築は重要な課題といえる。

箱崎(2012)は、青森県下北半島太平洋岸に位置する猿ヶ森砂丘の埋没林において、年輪幅に基づく年輪年代学研究を行い、西暦 944-1604 年の 661 年間にわたるアスナロ標準年輪曲線(以下、AOSR)を構築している(図 1)。この標準年輪曲線を構成するアスナロ埋没木は、文化財ではなく、破壊を伴う酸素同位体比の測定が可能である。そこで本研究では、北日本版の酸素同位体比標準年輪曲線の構築を目指し、その基礎研究として、1)約 1000～400 年前のアスナロ埋没木のセルロース化の成否と木材構造の変化、2)年輪酸素同位体比測定の成否と個体差、3)年輪酸素同位体比時系列のクロスデーティングの成否と標準年輪曲線構築の可能性、の以上 3 点に焦点を当てて検討した。

表1 北日本猿ヶ森埋没林アスナロ埋没木年輪酸素同位体比試料の概要

sample code	t-value* vs AOSR-master	date of $\delta^{18}\text{O}$ sample		mean ring-width (mm)	
		oldest year	youngest year	wood	cellulose
AOSR002	5.50	1413	1499	1.83	1.29
AOSR007	6.11	1368	1474	1.63	1.16
AOSR017	4.54	1175	1285	1.16	0.81
AOSR028	4.21	1271	1449	1.13	0.77
AOSR040	6.43	1401	1595	0.82	0.55
AOSR042	3.67	1508	1584	1.65	1.17
AOSR066	1.64	1451	1504	2.20	1.67
AOSR405	5.66	1085	1178	1.59	1.27
AOSR407	6.33	1050	1234	0.91	0.58
AOSR408	6.66	1164	1341	1.03	0.69

* 酸素同位体比測定に供した年輪幅時系列と猿ヶ森埋没林標準年輪曲線(箱崎 2012)間のt値(Baillie & Pilcher 1973)

2. 試料と方法

試料は、東北大学植物園保管の青森県猿ヶ森産アスナロ埋没木 10 点である(表 1)。これらの試料は、AOSR(箱崎 2012)を構成し、相互の年代関係が確定している(図 1)。AOSR は、年代既知の遺跡出土木材(光谷 1993, 2005)との年輪年代解析により、暦年代既知である。

各試料の横断面から厚さ 1-2 mm, 幅 10-12 mm, 長さ 70-80 mm の薄板を切り出し、「板ごとセルロース抽出法(Kagawa et al. 2012)」によりセルロースを抽出した。セルロース抽出の前後で年輪幅を計測し(0.01 mm 精度), AOSR とのクロスデーティングにより年代を確認した。クロスデーティングの方法は、米延ほか(2010)に従った。電子実体顕微鏡(VHX-5000, KEYENCE 製)を使用して、セルロースの晩材部仮道管の形状を観察した。セルロース板より 150-200 μg /1 年輪のセルロース塊を切り出し、7 mm 角の銀箔で梱包した。梱包後、熱分解元素分析計-同位体比質量分析計 (TCEA-Delta V, Thermofisher Scientific 製)を使用して酸素同位体比を測定した。試料間の年輪酸素同位体比時系列を、年輪幅に基づく年代位置で比較し、統計値(生データ間及び 5 年移動平均法によって標準化したデータ間の相互相関計数, 危険率, t 検定値)を算出して評価した。また、グラフの目視でも変動パターンの同調を評価した。

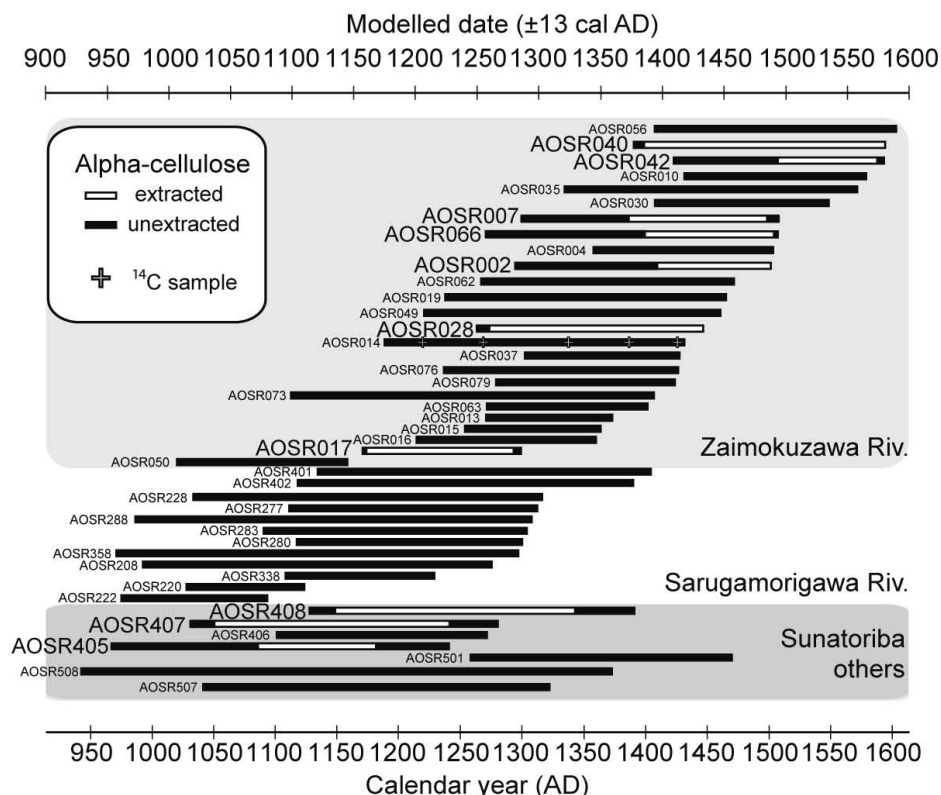


図 1 北日本猿ヶ森埋没林のアスナロ埋没木 44 試料の年輪年代関係図 (箱崎 2012 より改変)。
各試料の生育期間をバーで示した。酸素同位体比分析のためにセルロースを抽出した期間は白抜きバーで示した。
上辺 x 軸: 図中 + 印の ^{14}C 年代を Intcal09 (Reimer et al. 2009) でウィグルマッチングして推定された暦年代に準拠。
下辺 x 軸: 年代既知遺跡出土木材 (光谷 1993, 2005) との年輪年代解析によって与えられた暦年代に準拠。

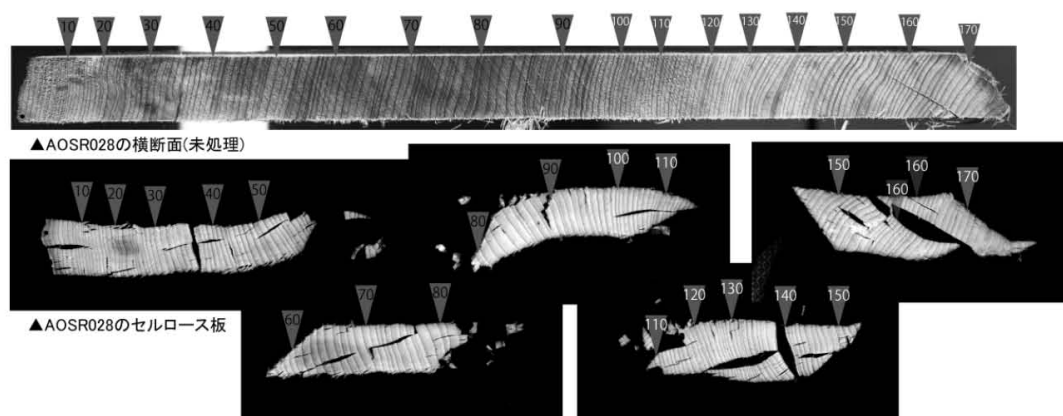


図 2 北日本猿ヶ森埋没林のアスナロ埋没木試料 (AOSR028) の横断面画像。

上：セルロース化前の横断面。下：セルロース化後の横断面。同じ年輪には同じ番号を記した。

3. 結果

板ごとセルロース抽出法により、アスナロ埋没木試料 10 点のセルロース化は成功した(図 2)。セルロース抽出の前後で、年輪幅は平均 70.1 %に収縮した(表 1)。電子実体顕微鏡で観察した結果、早材部仮道管は細胞壁が放射方向にやや潰れる形状となっていたが、晩材部仮道管は細胞壁の形状をほぼ元のまま保っており、年輪界の識別は可能であった(図 3)。各試料の年輪幅時系列を AOSR とクロスデーティングした結果、AOSR066 を除いて、想定的年代位置で高い相関が得られた(表 1)。

AOSR002, 028, 407, 408 の 4 個体 629 年輪の酸素同位体比を測定した結果、25.29～30.33 ‰の値が得られた(図 4A)。年代重複区間での酸素同位体比の平均差は、AOSR002-028 間で 0.18 ‰, AOSR028-408 間で 1.13 ‰, AOSR407-408 間で 0.36 ‰であった(図 4A)。

AOSR に基づく年代位置で、個体間の年輪酸素同位体比時系列をクロスデーティングした結果、AOSR002-028 の標準化データ間では $r_{std}=0.74$, $p_{std}<0.001$, $t_{std}=6.51$ と十分高い相関が得られた(図 4B)。一方、AOSR028-408 間では相関が無く、AOSR407-408 間では高い相関が得られなかった(図 4C, D)。グラフの目視確認をした結果、AOSR408 の一部に欠損輪または偽年輪の誤認(年輪を偽年輪と判定した可能性)の存在が疑われた。そこで、該当部分でデータを切り分け AOSR408'(暫定データ)を作成し、AOSR028, AOSR407 とクロスデーティングした。その結果、十分高い相関が得られた(図 4C, D)。

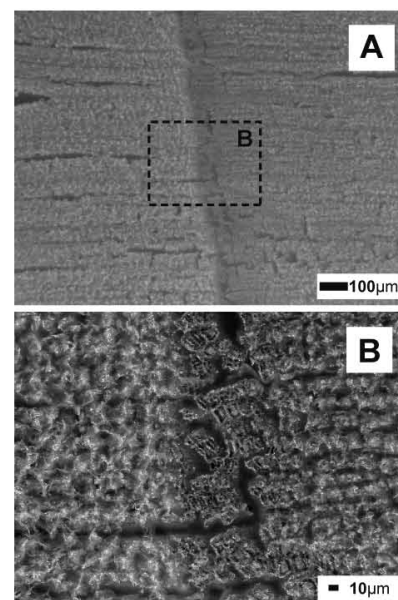


図 3 北日本産アスナロ埋没木 (AOSR405) セルロース板の電子実体顕微鏡画像。

A: 年輪界付近の拡大画像。B: 晩材部の拡大画像。
セルロース化処理により仮道管が放射方向にやや縮小しているが、晩材部の形状は良く保存されており、年輪界の判別は容易である。

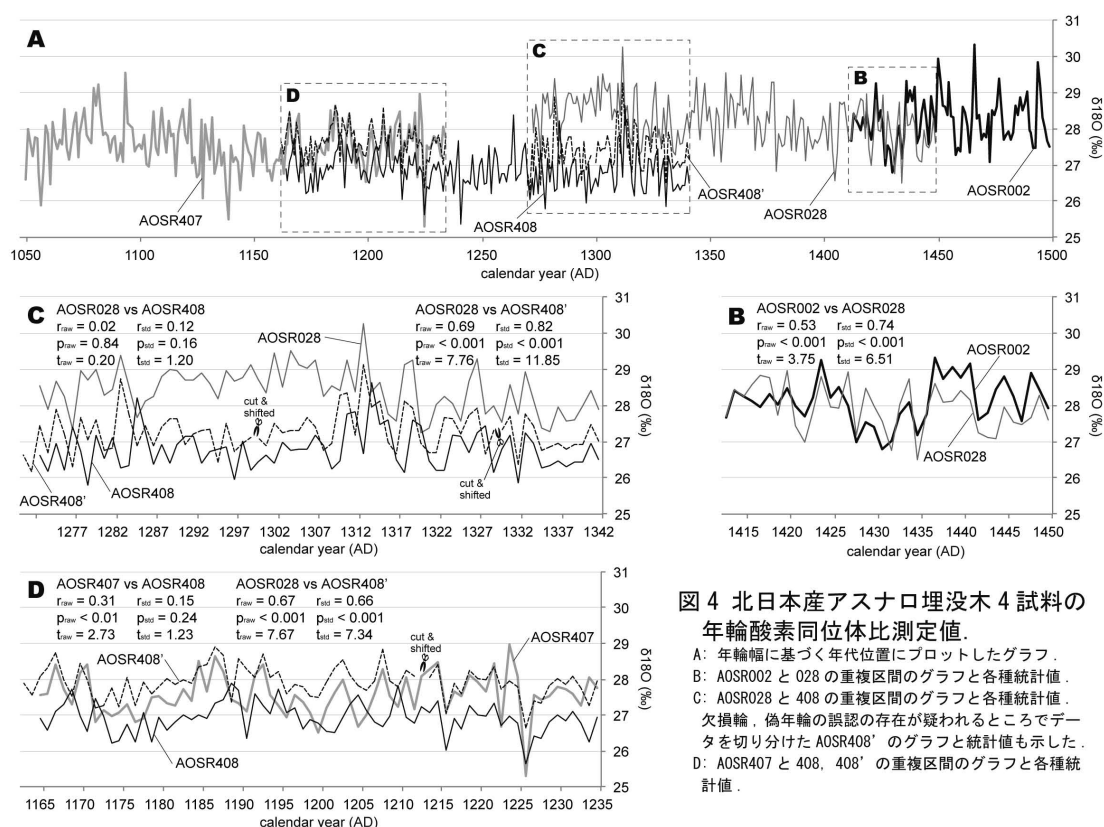


図4 北日本産アスナロ埋没木4試料の年輪酸素同位体比測定値。

A: 年輪幅に基づく年代位置にプロットしたグラフ。
 B: AOSR002と028の重複区間のグラフと各種統計値。
 C: AOSR028と408の重複区間のグラフと各種統計値。
 欠損輪、偽年輪の誤認の存在が疑われるところでデータを切り分けたAOSR408'のグラフと統計値も示した。
 D: AOSR407と408, 408'の重複区間のグラフと各種統計値。

4. 考察

板ごとセルロース抽出の結果、北日本産アスナロ埋没木は、セルロース化できることがわかった。木村ほか(2012)は約 2500 年前のスギ埋没木で、中塚ほか(2013)は約 1400 年前のヒノキ埋没木で板ごとセルロース抽出を成功させており、本研究では約 1000～500 年前のアスナロ埋没木でこれに成功した。このことから、板ごとセルロース抽出法は、幅広い時代のヒノキ科埋没木に適用できる手法であると考えられる。

セルロース板の高倍率観察の結果、アスナロ埋没木はセルロース抽出処理を経ても、晩材部仮道管の形状に大きな変化が無いことがわかった(図 3)。アスナロは偽年輪を形成しやすい樹木であり、年輪年代解析において、しばしば疑わしい年輪を確認するため、試料の木材組織の観察に立ち返ることがある。セルロース抽出によって晩材部仮道管の形状が損なわれてしまうと、偽年輪と年輪の識別は非常に困難となるが、板ごとセルロース抽出法で得たセルロース板では、その形状が良く保たれているため、偽年輪の識別も可能であると考えられる。このことから、板ごとセルロース抽出法は、年輪年代解析を行う上でも有利な手法であるといえる。

アスナロ埋没木セルロース試料の年輪酸素同位体比を測定した結果、4 個体から 25.29～30.33 ‰の値が得られた。そのなかで、AOSR028-408 間では 1.13 ‰の比較的大きな差が認められた。今回の測定試料の産地は、猿ヶ森砂丘内の 2 地点に分かれており、

AOSR002, 028 は材木沢周辺(太平洋から内陸 1 km, 標高 5-10 m), AOSR407, 408 は砂取場周辺(太平洋から内陸 2 km, 標高 30 m. 材木沢から北西に 2.5 km)から採取されている(箱崎 2012). 2.5 km の範囲で気象学的因子が大きく異なる可能性は低いので, AOSR028-408 間の年輪酸素同位体比の差は, 立地条件の違いを反映している可能性がある. まだ個体数が少ないので, 十分な検討はできないが, 年輪酸素同位体比の絶対値が, 立地条件の違いを反映しているのであれば, 将来, 木材の産地推定に応用する場合に, 重要な情報として考える必要がある.

年輪酸素同位体比のクロスデーティング結果から, 猿ヶ森埋没林のアスナロ埋没木は他個体と共通する酸素同位体比を記録していたことがわかった. 猿ヶ森埋没林の試料の多くは, 泥炭層に根を張った状態で埋没していた. このことから, アスナロの生育環境は湿地であったと推定されている(箱崎 2012). 年輪酸素同位体比は, 主に「降水の酸素同位体比」と「相対湿度」の気象学的因子に規定される. そのため, 湿地のように降水が一度プールされる環境では, 年々の「降水の酸素同位体比」の信号が弱められ, 個体間での同調が不明瞭になる可能性がある. また, 湿地では微地形ごとに土壤水分条件が大きく異なるため, 個体間の年輪酸素同位体比が同調しない可能性もある. しかし, 今回の結果が示すように, 個体間の酸素同位体比変動パターンは明瞭に同調しており(図 4), 猿ヶ森においては懸念された影響は小さかったと考えられる.

年輪酸素同位体比に基づく個体間のクロスデーティングの結果は, 年輪幅に基づく個体間の年代関係をほぼ裏付けた. ただし, AOSR408 には, 複数カ所に欠損輪か偽年輪の誤認があるとみられ, 試料を観察し直す必要があることがわかった. AOSR408 と年代が重なる AOSR017(表 1, 図 1)の酸素同位体比を測定し, その結果と照合することでも, 問題の年輪を特定することができると考えられる. AOSR408 の問題点は, 年輪幅の年輪年代解析では認識できていなかったものであり, 酸素同位体比の測定によって, 初めて明らかになった. 個体間で強く同調する酸素同位体比の変動は, 年輪幅に基づく年輪年代決定の検証に有効であると考えられる.

5. 今後の展望

本研究によって, 北日本産アスナロ埋没木は, 酸素同位体比に基づく年輪年代解析が可能であることが示された. 今回得られたデータでは, 個体数が少なく, また, 一部に問題が見つかったことから, 標準年輪曲線の構築には至らなかった. しかし, 個体間の年輪幅に基づく年代関係と酸素同位体比の変動が整合的であると確認されたので, 今後, 測定個体数を増やし, 問題を解決していけば, 10-17 世紀にわたる北日本版年輪酸素同位体比標準年輪曲線が確実に構築できると考えられる.

猿ヶ森埋没林では、今回の試料と同じ地層から得られていながら、年輪幅に基づく標準年輪曲線では年代決定できなかったアスナロ埋没木が多数ある。さらに、アカマツ、コナラ属コナラ節、トネリコ属など他の樹種の埋没木も多数得られている(箱崎 2012)。酸素同位体比標準年輪曲線は、これらの試料にも年代を与える可能性がある。猿ヶ森埋没林は 10-17 世紀の北日本低湿地の古生態、古環境を保存する貴重な資料である。できるだけ多くの埋没木の年代を明らかにして、猿ヶ森埋没林の古生態、古環境の復元にその情報を活かしていく必要がある。

日本には、猿ヶ森埋没林と同様に、湿地上に生育したと見られるヒノキ科樹木の埋没林が多数存在する(箱崎 2012 など)。これらの埋没林は、約 5000 年前から現代までの年輪情報を保存する貴重な試料である。今回の結果から、湿地で生育したヒノキ科樹木でも、年輪酸素同位体比分析を適用できるとわかったので、他の埋没林でもこれを積極的に推し進めていき、長期標準年輪曲線の構築と延長を目指して、そのデータを活用していくべきである。

謝辞

東北大学植物園大山幹成博士には、アスナロ埋没木試料を提供して頂いた。総合地球環境学研究所佐野雅規博士には、酸素同位体比測定にご協力頂いた。(株)KEYENCE には、電子実体顕微鏡(VHX-5000)の試作機を使用させて頂いた。名古屋大学年代測定総合研究センター城森由佳博士には、本稿の作成にあたり有益なご助言を頂いた。本研究は、名古屋大学年代測定総合研究センター新研究創成経費を使用して行った。

引用文献

- Baillie MGL, Pilcher JR. 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin*, 33: 7-14.
- 箱崎真隆. 2012. 完新世後期針葉樹埋没林の年輪年代学的研究. 東北大学博士学位論文.
- Kagawa A, Nakatsuka T, Helle G, Chungua Z and Yasue K. 2012. A method for extracting alpha-cellulose directly from tree-ring laths. *TRACE, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecoogy, Program and Abstracts of the Dendrosymposium 2012*. pp.85-85. May 09-12, 2012, Potsdam, Germany
- 木村勝彦・荒川隆史・中塚武. 2012. 鳥海山の神代杉による縄文晩期をカバーする年輪酸素同位体比の物差しの作成と実際の適用例. 日本植生史学会第 27 回大会講演要旨集. pp46-47. 11 月 23-24 日, 長岡.
- 光谷拓実. 1993. 年輪年代法による井戸枿材・曲物類・板材の年代測定. 青森県埋蔵文

化財調査センター編「高野川(2)遺跡-県営農免農道整備事業(高野川地区)に係る埋蔵文化財発掘調査報告書-」: 36-39pp, 青森県埋蔵文化財調査報告書第 153 集, 青森県教育委員会.

光谷拓実. 2005. 十三湊遺跡出土木材の年輪年代調査. 青森県教育委員会編「十三湊遺跡(第Ⅴ分冊)」: 183-187pp, 青森県埋蔵文化財調査報告書第 398 集, 青森県教育委員会.

中塚武・佐野雅規・大石恭平・シュ チェンシ・岡部雅嵩・大西啓子・河村公隆・坂本稔・尾寄大真・中尾七重・横山操・赤塚次郎・樋上昇・光谷拓実. 2013. 過去 2 千年間の本州中部産の全木材を対象にした年輪酸素同位体比クロノロジーの確立. 日本文化財科学会第 30 回大会研究発表要旨集. pp90-91. 7 月 6-7 日, 弘前.

Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Bertrand CJH, Blackwell PG, Buck CE, Burr GS, Cutler KB, Damon PE, Edwards RL, Fairbanks RG, Friedrich M, Guilderson TP, Hogg AG, Hughen KA, Kromer B, McCormac FG, Manning SW, Ramsey CB, Reimer RW, Remmele S, Southon JR, Stuiver M, Talamo S, Taylor FW, van der Plicht J, Weyhenmeyer CE. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4): 1029-1058.

鈴木三男・小川とみ・大山幹成. 2009. 新田(1)遺跡出土木材の樹種. 青森県埋蔵文化財調査センター編「新田(1)遺跡-東北新幹線建設事業に伴う遺跡発掘調査報告-(第 2 分冊)」: 28-40pp, 青森県埋蔵文化財調査報告書第 472 集, 青森県教育委員会.

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.

日本語要旨

年輪酸素同位体比の標準年輪曲線の構築と長期化は, 多種多様な遺跡出土材・自然埋没木の高精度年代決定を可能とし, 過去の文明・環境理解の深化に寄与することが期待される. 本研究では, 地域的にデータが不足している北日本において, 酸素同位体比標準年輪曲線を構築することを目的に, 青森県産アスナロ埋没木を用いた年輪酸素同位体比測定を行った. 4 個体 629 年輪の測定の結果, 25.29-30.33 ‰の酸素同位体比が得られた. 個体間のクロスデーティングでは, 1 個体に欠損輪または偽年輪の誤認の存在が疑われたが, それを補正すると, 全ての組み合わせで十分高い相関が得られた. この結果より, 北日本産アスナロ埋没木は, 酸素同位体比に基づく年輪年代解析が可能であり, 10-17 世紀にわたる標準年輪曲線が構築される見通しとなった.