

樹木年輪セルロースの酸素同位体比からみた古代日本の気候変動

Climate Variation in Ancient Japan Inferred from
Tree-ring Cellulose Oxygen Isotopic Ratio

中塚 武

NAKATSUKA Takeshi

①はじめに

②樹木年輪セルロース酸素同位体比とは何か

③樹木年輪酸素同位体比の長期データの作成

④古代日本の気候変動の特徴

⑤おわりに

【論文要旨】

気候変動は人間社会の歴史的要因の一つであるとされてきたが、古代日本の気候変動を文献史学の時間解像度に合わせて詳細に解析できる古気候データは、これまで存在しなかった。近年、樹木年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比が夏の降水量や気温の鋭敏な指標になることが分かり、現生木や自然の埋没木に加えて、遺跡出土材や建築古材の年輪セルロース酸素同位体比を測定することにより、先史・古代を含む過去数百年～数千年間の夏季気候の変動を年単位で復元する研究が進められている。その中では、セルロースの酸素同位体比と水素同位体比を組み合わせることで、従来の年輪による古気候復元では難しかった数百年～数千年スケールの気候の長期変動の復元もできるようになってきた。得られたデータは、近現代の気象観測データや国内外の既存の低時間解像度の古気候記録と良く合致するだけでなく、日本史の各時代から得られたさまざまな日記の天候記録や古文書の気象災害記録とも整合しており、日本史と気候変動の対応関係を年単位から千年単位までのあらゆる周期で議論することが可能になってきている。まず数百年以上の周期性に着目すると、日本の夏の気候には、紀元前3、2世紀と紀元10世紀に乾燥・温暖、紀元5、6世紀と紀元17、18世紀に湿潤・寒冷の極を迎える約1200年の周期での大きな変動があり、大規模な湿潤（寒冷）化と乾燥（温暖）化が古墳時代の到来と古代の終焉期にそれぞれ対応していた。また人間社会に大きな困難をもたらすと考えられる数十年周期の顕著な気候変動が6世紀と9世紀に認められ、それぞれ律令制の形成期と衰退期に当たっていることなども分かった。年単位の気候データは、文献史料はもとより、酸素同位体比年輪年代法によって明らかとなる年単位の遺跡動態とも直接の対比が可能であり、今後、文献史学、考古学、古気候学が一体となった古代史研究の進展が期待される。

【キーワード】 樹木年輪、酸素同位体比、古代日本、気候変動

①……………はじめに —これまでの研究状況

対象とする時代と本論文の目的

本論文が対象とする古代の範囲は、歴博共同研究「北と南からみた古代の列島社会」において研究対象とされた、古墳時代から平安時代までである。しかし本論文で紹介する最も重要な古気候データである樹木年輪セルロースの酸素同位体比は、既に日本各地で現在から縄文時代中期まで遡る約5000年間に亘って取得されてきており、これまでに得られている他の様々な自然の古気候データも、古代という時代区分に関わらずさまざまな時間スケール・時代範囲にわたって復元されてきていて、古墳時代から平安時代はそれらが網羅する時代の一部に過ぎない。それゆえ本論文では、古代における気候変動の特徴を示すことを主な目的としつつ、古代という時代を気候という観点から他の時代と相対化して評価することをもう一つの目的としたい。

少ない古代の気候記録媒体

しかし実際には、古代を対象とする気候変動の復元は日本ではこれまであまり行われてこなかった。気象観測の実施されていなかった前近代の気候を、日記や古文書などの文献史料を含むさまざまな媒体を使って復元する学問である古気候学は、一般に時代が遡るほどその遂行は難しくなる。近世と異なり古代からは毎日の天候の状況が記された日記などの史料はほとんど得られないし、気象関連の災害が記された古文書の数も少なく統計的に十分な精度での古気候復元は行えない。それゆえ日本では古代に遡りうる文献史的な気候復元は桜の開花日 [Aono and Saito, 2010] などの特定の事象に着目して、主に冬から春の季節の気候に対して行われてきたにすぎない。一方で46億年前の地球の誕生以来の自然の気候変動の復元には、太古の大陸の堆積岩、深海底の堆積物、極域のアイスコア、鍾乳石、湖沼堆積物、樹木やサンゴの年輪など、気候変動の多様な時間・空間スケールに合わせて、さまざまな自然の古気候記録媒体が用いられてきた。しかし古墳時代から平安時代という古代に限って言うと、千年以上の時間スケールの気候変動を明らかにするのが得意な堆積物からみると、古代という時代は新しく短すぎて高解像度の復元は難しいし、一年単位の気候変動を明らかにできる年輪では、古代は逆に時代範囲が古く長すぎてデータが到達しないことが多かった。つまり古代という時代の気候変動の復元は、自然の古気候記録媒体からみても、なかなか厄介な対象だったのである。

フェアブリッジ曲線の呪縛

そうした中で日本の中世史や古代史の研究に長く影響を与え続けたのが、山本 [1976] によって紹介されたフェアブリッジ曲線である [Fairbridge, 1961]。このデータ自体は1960年当時に得られていた世界のさまざまな地点のさまざまな年代の海水準のデータを組み合わせて、歴史時代の海水準変動を明らかにしようとした労作であるが、地点ごとに全く異なる地殻変動の影響が取り除けておらず、グローバルな海水準変動データとしては全く不正確なものであることが発表の直後から分

かっていた。また寒冷化に伴う氷床の発達によって 100 m を越えるような大幅な海水準の低下が起きた氷河時代のアナロジーとして、歴史時代の微小な海進・海退を気温の上昇・低下に結びつけることにも、地殻変動の影響や河川からの土砂供給量の変化、気温変化と海水面変化のタイムラグなどへの配慮が完全に欠落しており、全く現実的ではなかった。しかし古代を含む歴史時代の「気温」の長期変化が一本の線で表された便利な曲線として、フェアブリッジ曲線は世界の中でも日本史の研究者のみによって利用され続け、古代日本における気候と歴史の関係を考える際の大きな障害となってきた。

価値ある既存データの存在

フェアブリッジ曲線が誤った形で古代史の研究に受容され続けた一方で、日本国内にも信頼度の高い古代の時代を含む古気候データは存在した。その代表的なものが、阪口 [1989] が明らかにした尾瀬ヶ原の泥炭堆積物に含まれるハイマツ花粉のデータである（図 1）。ハイマツは寒冷地域に生息する樹木であるため、その花粉の含有率は夏の気温と逆相関を示す。泥炭断面から 2cm 間隔で採取され放射性炭素で高精度に年代決定されたハイマツ花粉の含有率の変動は、中世以降については人間活動による植生改変の影響で信頼度が下がるものの、先史・古代の時代では夏の気温の変化を表すものとして精度が高く、古墳寒冷期の提唱などを通じて歴史の研究者にも広く受容されてきた。しかし 1980 年代の先史時代（特に弥生時代）の暦年代観は、放射性炭素に基づく現在の暦年代観とは完全に乖離しており、このデータを用いた先史時代史の全面的な解釈はできない状況にあった。

これに対して、近年このデータを検証できる全く新しいデータが広島湾の堆積物から得られた [Kawahata et al., 2017]。夏の表面水に生息する植物プランクトンの一種、円石藻だけが持つ特殊な有機化合物であるアルケノンの分子組成から復元された表面水温の変動のデータである（図 1）。

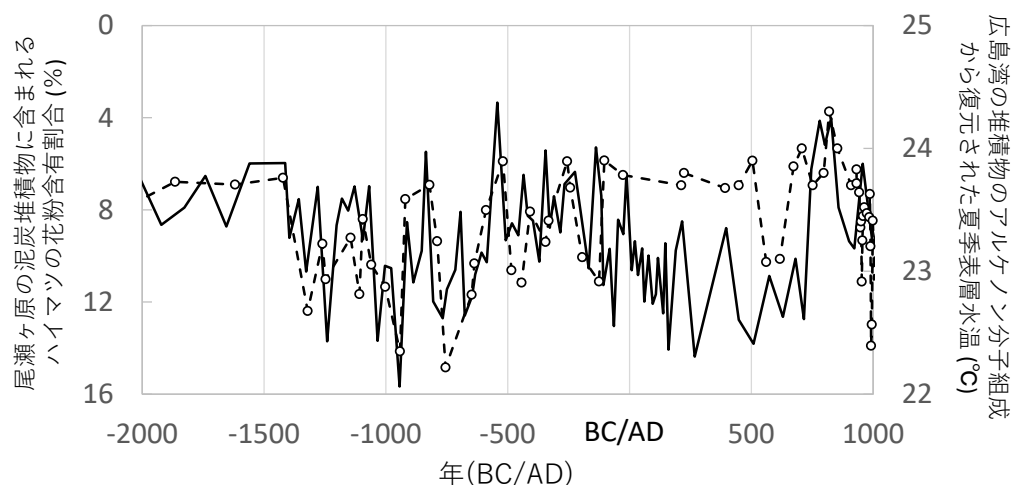


図 1

これまでの日本における数百～数千年周期の気温・水温変動の復元の事例。実線がハイマツ花粉含有割合 [阪口, 1989]、破線と白丸がアルケノン古水温計のデータ [Kawahata et al., 2017] を、それぞれ示す。

夏の表面水は太陽放射による加熱で密度が軽く下層の水とは混ざりにくい状態になっており、その水温はむしろ大気的气温に対応することが分かっている。広島湾の水温（気温）データと尾瀬ヶ原のハイマツ花粉含有率の変動は、それぞれの試料の時間解像度が悪くなる一時期を除けば大変よく一致しており、これらのデータが古代を含む時代の気温変動の記録として、信頼できるものであることを示している。

図1の堆積物のデータは時間解像度が必ずしも高くなく、放射性炭素で決められた年代軸にも最大100年程度の誤差が含まれている可能性があり、古代の文献記録との直接的な照合は難しい。一方で近年、アジア大陸の樹木年輪データベースを用いて、過去1200年間の東アジアの夏の平均気温の変化が1年単位で復元された [Cook et al., 2013]。これは主にアジア大陸内部の寒冷域の年輪幅のデータを使って計算されたものであるが、図2に示すように、東アジアの平均気温の低下が歴史時代の日本における大飢饉の発生に直結したことが明瞭に示されており、広域の同調性がある気温であれば、比較的遠隔地のデータでも日本の歴史の研究に応用できることを示している。このデータは現生木を基にしているので平安時代以降に限られているが、近世や中世では気温の変化が大きな飢饉の発生に直結していたことが分かり、古代でも気温変化が日本社会に大きな影響を与えてきたことを強く示唆している。

日本の年輪研究の課題と酸素同位体比

図2は、主にヒマラヤやチベット、モンゴルなどの遠隔地の年輪データに基づいているので、日本史の理解を進める上では完全な正確さは望めない。もちろん日本でも長年にわたり樹木の年輪幅や年輪密度から過去の気温などを復元する研究が進められてきた [Yonenobu and Eckstein, 2006; Ohyama et al., 2013]。しかし日本における年輪を使った気候変動の復元は、これまでは主に過去約400年間の近世までに限られていた。その背景には、第一に、日本には屋久島などを除くと古代まで届く樹齢千年を超えるような長樹齢木はほとんど存在せず、第二に、日本では森林内で樹木が密生していて年輪の幅や密度に樹間相互作用が大きく影響するので、統計的に十分な精度で古気候を復元するためには、数十個体分の年輪試料を確保する必要がある、第三に、現生木の古代における

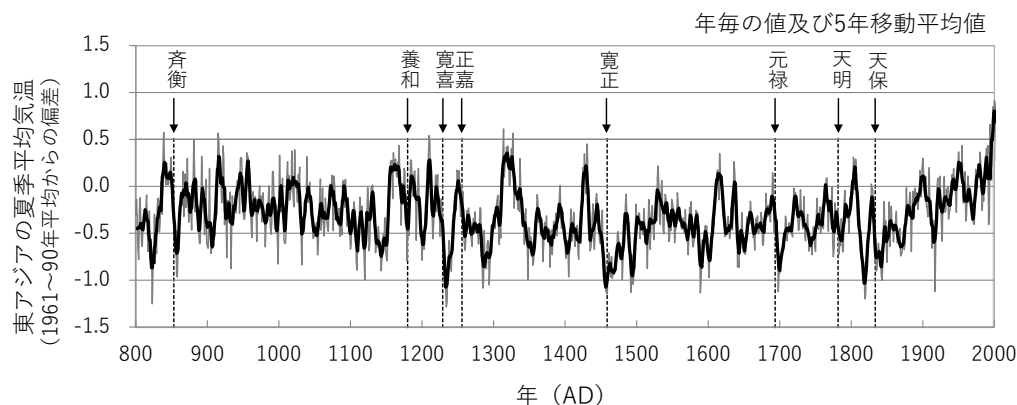


図2

アジアの広域年輪幅データベースから復元された東アジアの夏季平均気温の変動(灰線：年単位の値、黒線：5年移動平均)と歴史上の大きな飢饉の発生年(元号と共に示す)。

代替物となる遺跡出土材や建築古材などは数が限られていて、古代の各年代に対して数本以上の試料を集めるのは困難である、などの事情があった。

しかし 21 世紀になって状況が一気に好転してきた。本論文の主題である樹木年輪のセルロース酸素同位体比が夏の降水量や気温の正確な指標になることが分かり、その迅速かつ正確な分析技術の開発も進んで、年輪数が多い試料であれば、樹種の違いを問わず、遺跡出土材や建築古材、自然埋没木などの少数の木材試料からでも、確実に古代の気候変動が復元できる展望が出てきたのである [中塚, 2015, 2018]。そのことについて、以下、順を追って説明したい。

②……………樹木年輪セルロース酸素同位体比とは何か

セルロースの酸素同位体比とは

最初に樹木年輪セルロースの酸素同位体比が、なぜ夏の降水量や気温の正確な指標になるのかについて簡単に述べる。酸素同位体比とは、試料中に含まれる酸素の 3 つの安定同位体（同じ元素だが重さが違う原子であり、放射性同位体のように壊変はしない、つまり安定な同位体）のうち、重さ 18 の酸素原子の数を重さ 16 の酸素原子の数で割ったものである。その自然界での変動幅はごく僅かなので、通常はその比を国際標準物質である VSMOW（ウィーン Vienna の国際原子力機関が配っている標準平均海水 Standard Mean Ocean Water）の比で割ってさらに 1 を引いて千倍した、 $\delta^{18}\text{O}$ （式 1）という形で表す。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}} (\text{‰}) = \left\{ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{vsmow}}} - 1 \right\} \times 1000, \quad \text{式(1)}$$

一般に木材はセルロース、リグニン、ヘミセルロースの 3 つの主成分からなるが、そのうちセルロースが最も構造が簡単で安定しており、抽出作業中に試験管内の水などと交換してしまう酸素は分子内には含まれていない。つまり年輪形成時の酸素同位体比の情報がセルロースの中には保持されており、樹木年輪の酸素同位体比の研究では、通常、セルロースだけを抽出して、その酸素同位体比を測定する。

酸素同位体比による古気候復元の原理

セルロースの原料となるグルコースは光合成によって葉内で作られるので、セルロースの酸素同位体比の変動は葉内水の酸素同位体比の変動を反映している。そして葉内水の酸素同位体比は光合成が行われる時期の「降水の酸素同位体比」と「相対湿度（最大が 100 %、最低が 0 % のいわゆる湿度）」という 2 つの気象学的因子のみによって決まる（式 2）。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{葉内水}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{降水}} + (\varepsilon_e + \varepsilon_k)(1-h), \quad \text{式(2)}$$

ちなみに、この式では h が相対湿度であり、 ε_e と ε_x はそれぞれ水が蒸発するときと水蒸気が葉の気孔を通過（拡散）するときに元々の葉内水や葉内の水蒸気と比べて、どの程度酸素同位体比が低い水が移動するかを示す定数（+9 と +29）である。 h は 0 以上 1 以下の値をとるため、葉内水の酸素同位体比は、根から葉に吸われて上がってくる降水起源の酸素同位体比よりも常に高くなる。 h が小さいとき（乾燥しているとき）には、葉からの水蒸気の蒸散（蒸発と拡散）が起きやすく、その際、軽い酸素 16 が重い酸素 18 よりも早く蒸散していくので、葉内では重い酸素 18 が濃縮しやすく、葉内水の酸素同位体比は、より高くなることを、この式 2 は表している。

セルロースの酸素同位体比は、葉という構造物を持つあらゆる植物の中で同じ変動パターンを示すため、樹種によらず年輪年代の決定や古気候の復元に使うことができる [中塚, 2015, 2018]。式 2 から年輪酸素同位体比は、「降水の同位体比」と正の相関、「相対湿度」と負の相関を持つ。一方、日本のような中緯度の湿潤地域では、「降水同位体比」には降水量と負の相関（雨量効果という）があり、「相対湿度」には降水量と正の相関がある（雨が降る日は湿っている）ので、結果的に年輪酸素同位体比は、常に降水量と負の相関を示すことになる [中塚, 2014]。また日本の夏には一般に、長雨が降ると冷夏になり、雨が降らないと猛暑になるという降水量と気温の間の気象学的な逆相関の関係があるため、年輪酸素同位体比のデータから夏の気温のおおよその変動も推定可能である。

ブレイクスルーとしての迅速な分析手法の開発

年輪セルロース酸素同位体比のこのような性質は 1980 年代までには知られていたが、当時は有機物であるセルロースの酸素を、酸化剤を使った燃焼に頼らず（つまり外部から酸素を混入させず）に同位体比質量分析計に導入可能な気体分子に変換する適切な方法がなかったため、年輪のような大量の数の試料の酸素同位体比を測定することは技術的に難しかった。しかし 2000 年頃に、有機物に含まれる酸素を約 1400 °C に熱した無酸素状態のセラミック製の管の中で一瞬に炭素と共に熱分解して一酸化炭素に換え、そのままヘリウムガスに乗せて質量分析計に送り込み、その酸素同位体比を測定するという熱分解元素分析計と同位体比質量分析計のオンライン装置が欧州で開発され、一気に測定の可能性が広がった。さらに 2010 年頃に日本の私たちの研究室が中心となって、木材の年輪を薄い板のままでセルロースにして、柔らかくなったセルロースの板から年輪を切り取るという「板ごとセルロース抽出法」 [Kagawa et al., 2015] の開発に成功し、これらの技術によって年輪酸素同位体比の分析にかかる作業の時間や費用が数十～数百分の一に縮小され、膨大な数に上る過去数千年間の木材年輪の系統的分析の条件が整った。ちなみに後者の板ごと抽出の技術は、まだ欧米には十分に浸透しておらず、本論文で紹介する過去数千年間に及ぶ精度の高い年輪酸素同位体比のデータは、まだ日本でしか得られていない。

③……………樹木年輪酸素同位体比の長期データの作成

日本全国での急速な進展

技術的な基盤が整ったあと最近 10 年ほどの間に日本全国の自治体の埋蔵文化財センターなどの協力を得て、今から約 5000 年前までの年単位の酸素同位体比のデータが、日本各地で蓄積してきた（図 3）。同様の研究は、私たちの研究室が主導的に関わってアジア各国でも行われており、そのデータは過去数百年間、日本でいえば中世以降のアジアにおける気候の時空間変動の実態を詳細に明らかにしつつあるが、古代を含む過去 1000 年を超える時代を対象にして十分なデータが蓄積しているのは、遺跡出土材の恒常的な取得が可能な埋蔵文化財行政が発達した日本だけの成果である。データの中には、遺跡出土材以外にも現生木や、日本固有の古い木造建築物の修理の際に得られる建築古材の端材、水田の土地改良や河川工事の現場から発掘される自然の埋没木から得られたものも多数含まれている。

日本でこのように急速にデータの蓄積が進められた要因の一つは、奈良文化財研究所で 1980 年代から進められてきた年輪幅に基づく年輪年代法の研究成果 [光谷, 2005]、特に年代の分かった過去約 3 千年に及ぶヒノキやスギの試料の蓄積があったからである。その基盤の上に新しい分析手法の開発がなされたことで、木材年輪のセルロース酸素同位体比の測定が急速に進み、古気候の復元と年輪年代決定の一石二鳥の研究の遂行が可能となった。

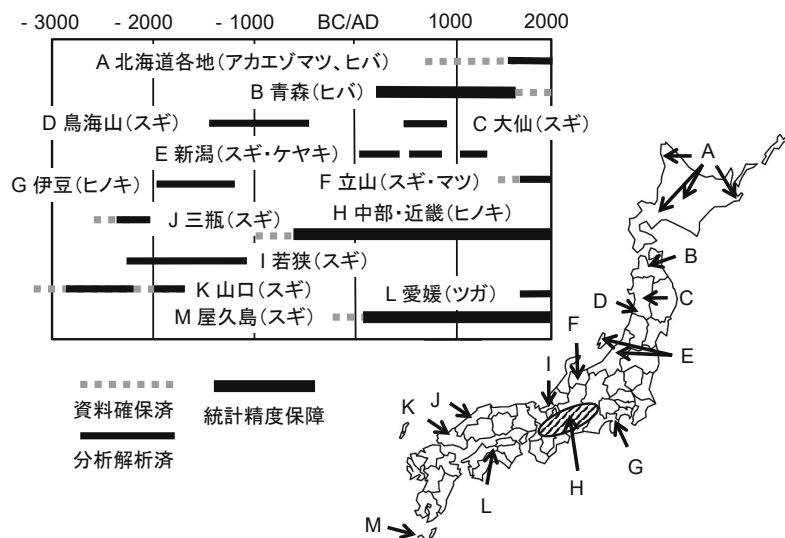


図 3

2019 年末の段階での日本における樹木年輪セルロース酸素同位体比の標準年輪曲線（マスタークロノロジー）の構築状況。

樹齢効果の克服の必要性

樹木年輪の酸素同位体比には、式 2 が示すように生物学的な要因が一切含まれていないことが期待されるが、実際には樹種によっては樹齢効果（樹齢の経過とともに新たに形成される年輪の酸素同位体比が徐々に低下していく効果）が顕著に表れることがある [Esper et al., 2010]。特に日本の森林のように人間による長年の施業の影響で樹木の生息環境が大きく変動してきた場所では、その

効果が顕著に表れることも分かってきた [図 4a: Nakatsuka et al., 2020]。こうした長期に亘ってゆっくりと変化する樹齢効果は、木材の年輪年代の決定だけが目的なのであれば、長周期の変動を何らかの関数で近似して、そこからのずれを短周期の変動として取り出すことで、除去・克服できる。しかしその際に、気候の長周期変動も一緒に除去されてしまうため、古代の気候を理解するうえで重要な数百年スケールの気候変動を復元するためには、何らかの方法で樹齢効果と気候の長周期変動を分離する必要がある。そのためには、まず樹齢効果のメカニズムを理解する必要がある。

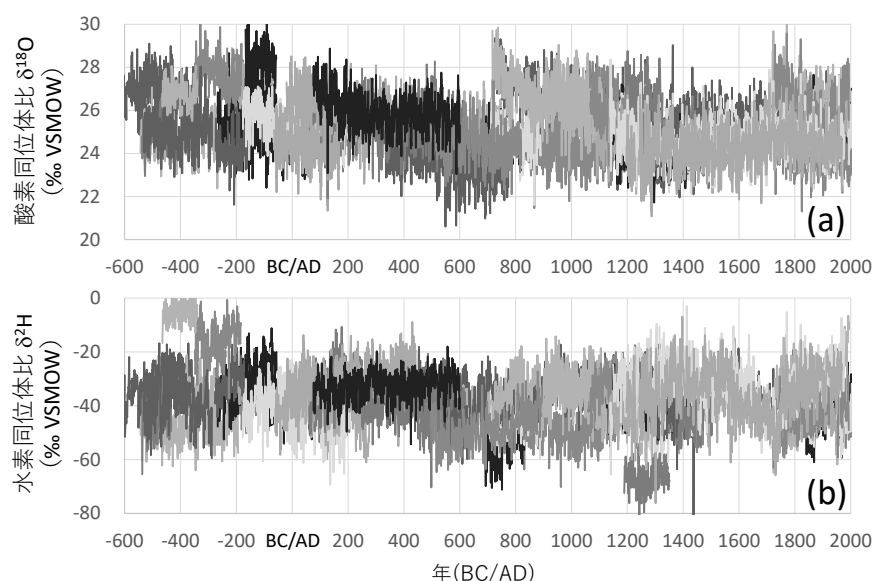


図 4

過去 2600 年間の中部日本の樹木年輪セルロースの酸素 (a) と水素 (b) の同位体比の変動パターン。全部で 67 個体のデータを表示。酸素と水素の同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$) はそれぞれ、式 1 のように国際標準物質 (VSMOW) の同位体比に対する千分偏差である $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ (‰) の形で表している。Nakatsuka et al. [2020] より。

長期に亘る樹齢効果は、光合成のあとで葉から幹に有機物（糖類）が運ばれてセルロースの形に再合成されるまでの間に、周囲の水と糖類の間で 2 次的に酸素同位体比の交換が行われる度合いが、樹齢や生息環境の変化に伴ってゆっくり変化的ること（一般に樹齢と共に増大すること）で説明できる。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{セルロース}} = f(\delta^{18}\text{O}_{\text{降水}} + \varepsilon_h) + (1-f)[\delta^{18}\text{O}_{\text{降水}} + (\varepsilon_c + \varepsilon_k)(1-h) + \varepsilon_a], \quad \text{式 (3)}$$

ここで f は、幹においてセルロース合成の前におきる、周囲の水（根から吸われた降水由来の水）との間での 2 次的な酸素同位体の交換率である。 ε_h と ε_a は、ともに水から糖類へ酸素原子の置換が行われる際の同位体比の変化の大きさであるが、前者が樹幹、後者が葉内で起きる反応に対応している。酸素同位体比の場合、実は ε_h と ε_a の大きさは同じ (+27) であり、降水の酸素同位体比をそのまま反映する樹幹の水の方が葉内水よりも酸素同位体比が低い（式 2 参照）ことにより、 f の増大と共にセルロースの酸素同位体比は低くなる。

この2次的同位体交換率 (f) は、樹齢だけでなく樹木の生息環境によっても変化するため、その変化を年輪ごとに求めることは難しい。しかし酸素同位体比と同時に測定していたセルロースの水素同位体比が解決の糸口を与えてくれた。水素は酸素と同様に水に含まれる元素であるため、気候変動に対しては式2 (と同じ形の方程式) に従って同位体比は同じ方向に変化するが、図4bに示すように、その樹齢効果は酸素と水素の間で逆方向に生じることも分かってきた。これは水素同位体比の場合、水から有機物へと水素原子の置換が起きる際の同位体比の変化の方向が、葉と幹の間で反対になり (式3の中で、 ϵ_h が約 +150、 ϵ_a が約 -150 になり)、樹齢と共に f が増大するに従って、セルロースの水素同位体比は高くなるというメカニズムで説明できる。

シームレスな長～短周期変動の復元

年輪セルロースの酸素と水素の同位体比が、気候変動によって正の相関をもって変化し、樹齢効果 (森林環境の変化) によって負の相関を持って変化するというメカニズムを踏まえて、酸素と水素の同位体比の連立方程式を解く形で、中部日本の過去2600年間を網羅する全67個体の酸素同位体比のデータから、樹齢効果を除去して気候変動の成分のみを抽出し、そのデータをつなぎ合わせて作成したのが、図5aである [Nakatsuka et al., 2020]。尚、試料の収集地点は、後述の図7bに示すように近畿～東海の広域に分布するが、この範囲内であれば個々の試料間での酸素同位体比の変動の相関は十分に高く、それらを結合することで地域を代表する年輪酸素同位体比のデータが作成できる。

このデータには、年単位から千年単位までのあらゆる周期の気候変動の情報が、継ぎ目なく (シームレスに) 含まれている。一般に年輪幅を代表とする樹木年輪の情報には、何らかの樹齢効果が顕

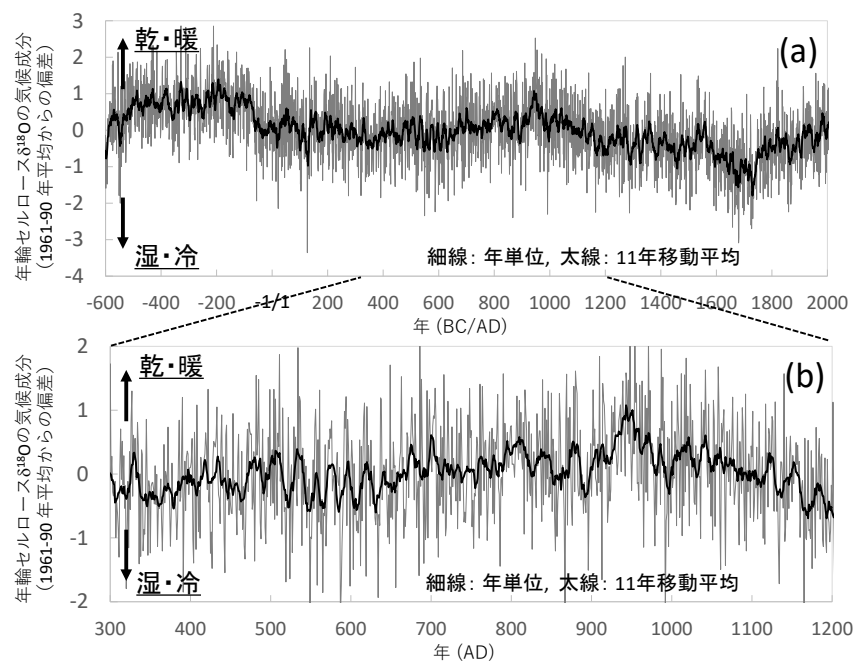


図5

酸素と水素の同位体比を統合して計算した、過去2600年間の中部日本の樹木年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動 [a: Nakatsuka et al., 2020] とその古代におけるクローズアップ (b)。

著に表れることが多く、樹木の年輪は千年単位などの長周期の気候変動の復元には不向きであると言われてきたが、年輪セルロースの酸素・水素同位体比を組み合わせることで、従来にない精度で、あらゆる周期の気候変動の復元が可能になった。これは考古学と年輪年代学の連携による長年の木材試料の収集と、板ごとセルロース抽出法を含む分析技術の革新によって、世界に先駆けて日本で初めて実現した全く新しい研究の成果である。

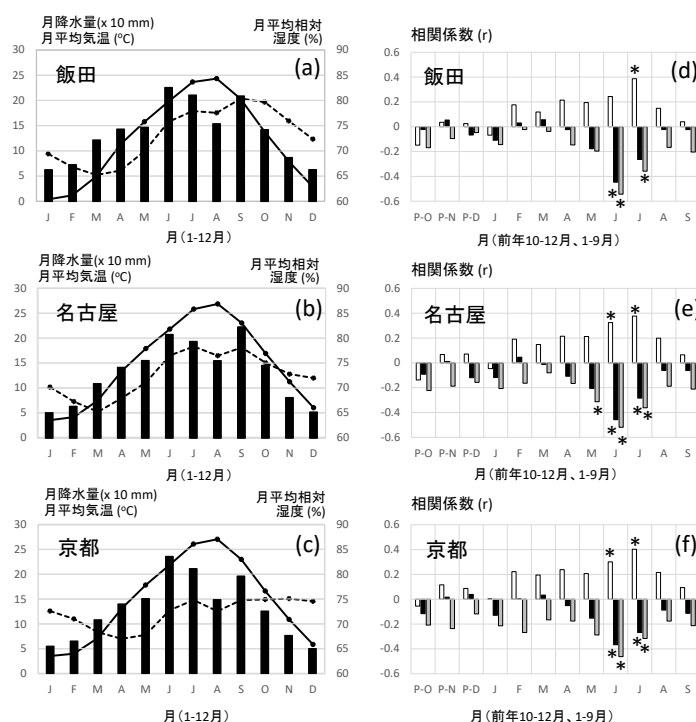


図 6

飯田、名古屋、京都における 20 世紀以降 (1901-2005) の月平均気温 (実線)、月降水量 (黒棒)、月平均相対湿度 (破線) の平均値 (a-c) とそれぞれの地点の月平均気温 (白棒)、月降水量 (黒棒)、月平均相対湿度 (灰棒) の変動の中部日本の樹木年輪セルロースの酸素同位体比の気候成分との相関係数 (d-f)。図中の*は、99%以上の相関の有意性を示す。Nakatsuka et al. [2020] より。

データの特徴と歴史的検証

この年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の 20 世紀以降の部分、近畿～中部地方の月別気象観測データと比較したのが図 6 である。図 6 からは、このデータが樹木の成長する季節である夏の降水量や相対湿度と顕著な負の相関を持ち、気温ともある程度の正の相関を示すこと、つまり式 2 を正確に反映していることを示している。この年輪セルロース酸素同位体比の気候成分を、20 世紀以降の東アジアの広域における 6-7 月の降水量や気温と比較してみる (図 7) と、このデータは試料の得られた近畿～中部地方のみならず、関東から九州、さらに中国の揚子江下流域までの東西に広い領域、すなわち梅雨前線に対応した領域の降水量と良い相関を示し、日本の夏の降水量が梅雨に支配されていることを示している (図 7a)。このデータは同時に東アジア広域の夏の気温の変動の指標としても、ある程度の信頼性があることも分かった (図 7c)。

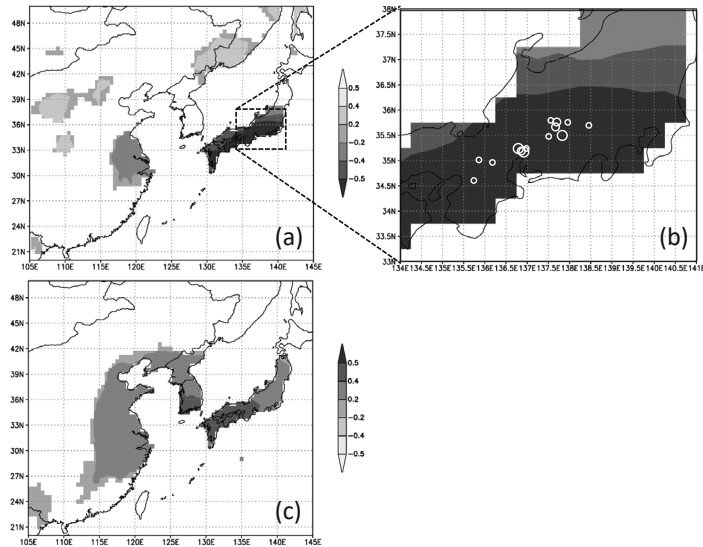


図 7

東アジア (a) および本州中部 (b) における 6-7 月の降水量、及び東アジアにおける 6-7 月の平均気温 (c) と中部日本の樹木年輪セルロース酸素同位体比の気候成分との相関係数の空間分布。計算にはオランダ王立気象研究所の Climate Explorer を用い、対比した気象観測データは CRU TS 4.03 の 1901-2005 の期間のものである。(b) の白丸は樹木年輪試料の採取地点 (採取市町村の役場所在地で表示) と各地点の試料数を表す (大: 10-15 個, 中: 4-9 個, 小: 1-3 個)。図中の大部分を占める白色の部分は、有意な相関 (> 90%) が確認できなかった地域を示す。Nakatsuka et al. [2020] より。

図 5 の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の古代における特徴を議論する前に、その近世や中世の期間における既存の文献史的な気候データとの関係を確認しておきたい。図 8a は、近畿～東海地方の膨大な数の日記の天候記録を収集して復元された 17 世紀以来の大坂における梅雨期の降水量の経年変動との比較である [水越, 1993]。年輪セルロース酸素同位体比の気候成分は、年単位のみならず、十年単位、百年単位の変動パターンにおいても、日記から復元された夏の降水量の変動とよく一致していることが分かる。図 8b は中世の本州中部における夏 (新暦の 6-8 月) の気象災害に関する記録 [藤木編, 2007] の中で、「水害の記録件数」の「水害と干害の合計の件数」に対する比 (雨災害比率) を表したものである。10 世紀に多かった干ばつの割合が、11-12 世紀の間に減少し、その後、上下動を繰り返しながら推移して、中世末から近世にかけて、さらに減少、つまり雨関係の災害の割合が増大していくことが分かるが、これは、同時期の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変化 (同位体比の低下 = 湿潤化) と良く対応している。

図 9 では、図 1 に示した尾瀬ヶ原のハイマツ花粉割合から推定される日本の夏季気温の長期変化 [図 9a; 阪口, 1989] 及び、世界中のさまざまな古気候データを集約して計算された北半球の陸上の夏季平均気温の変動 [図 9b; Mann et al., 2008] を、中部日本の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分と重ねて示した。全てのデータには約千年の周期での大きな変動が認められ、酸素同位体比の気候成分は、対比するデータの時間解像度の低い区間を除けば、そうした長周期の変動と概ねよく一致した変動を示している。つまり、このデータが年単位から千年単位までのあらゆる周期の降水量や気温の変動を正確に反映したデータであることが、確認できた [Nakatsuka et al., 2020]。

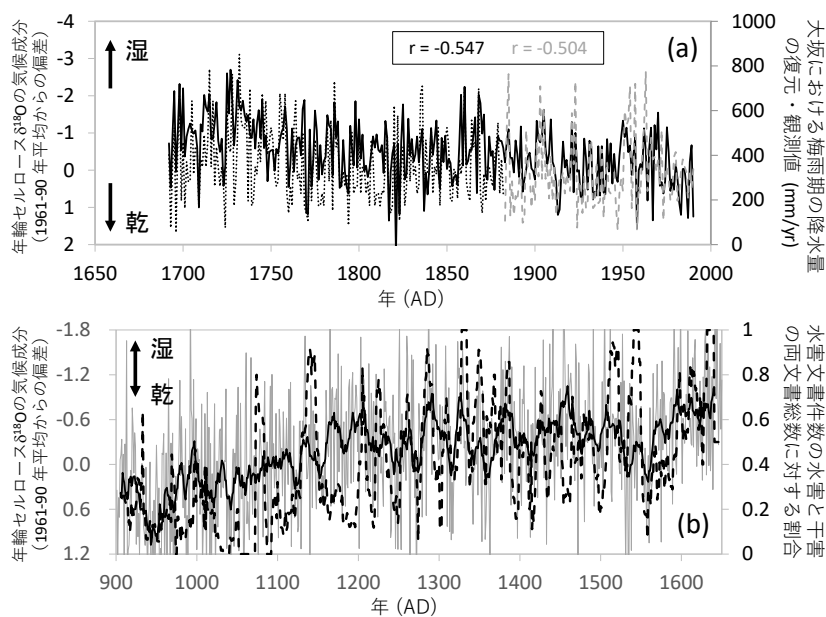


図8

中部日本の樹木年輪セルロース酸素同位体比の気候成分 (a: 黒実線-年毎の値, b: 灰実線-年毎の値, 黒実線-11年移動平均値。降水量の多い年が上側になるように、酸素同位体比は上下反転させて表示している) と歴史史料の比較。(a) 大坂における梅雨期の降水量(水越, 1993; 近畿・東海の日記史料からの復元(黒点線)と観測値(灰破線)。図中の r は、それぞれのデータと酸素同位体比の気候成分の間での相関係数を示す), (b) 中部日本における水害と干害の気象災害記録の総数に対する水害記録数の割合(藤木編 [2007] から計算; 11年移動平均値—黒破線)。Nakatsuka et al. [2020] より。

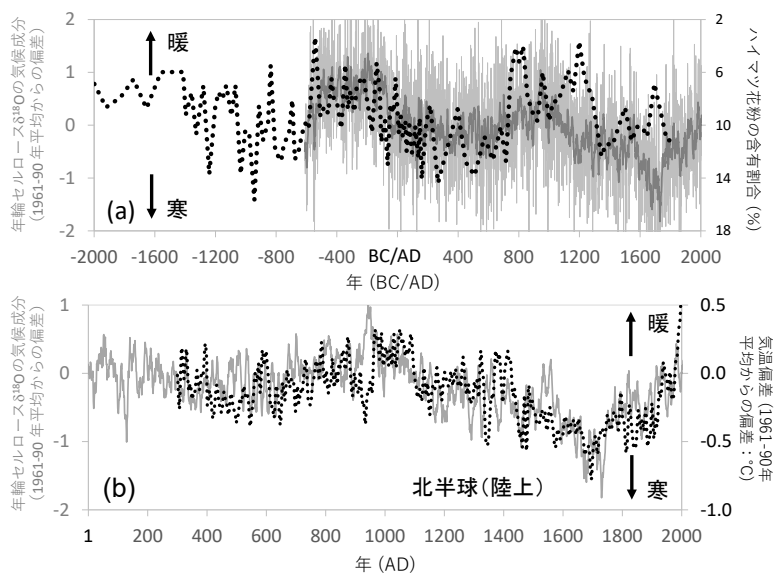


図9

中部日本の樹木年輪セルロース酸素同位体比の気候成分 (a: 灰細線-年毎の値, 灰太線-11年移動平均値, b: 灰実線-11年移動平均値) と低時間解像度の古気候データの比較。(a) 尾瀬ヶ原の泥炭堆積物におけるハイマツ花粉の含有割合(%) (黒点線: 阪口, 1989), (b) さまざまな古気候データを総合して復元した北半球陸上の平均気温の偏差(黒点線: Mann et al., 2008)。Nakatsuka et al. [2020] より。

④……………古代日本の気候変動の特徴

千年周期の気候変動と古代日本

ここからは古代の時代を中心にして、図 5a に示された中部日本の気候変動の特徴を詳しく見ていきたい。まず、図 5a の全体を概観すると、弥生時代以来、日本列島の人々の最大の生業であった水田稲作に最も影響を与える日本の夏の気候には、弥生時代の中期（紀元前 3-2 世紀）と平安時代の前期（紀元 10 世紀）に乾燥・温暖の極を迎え、逆に古墳時代の中・後期（紀元 5-6 世紀）と江戸時代（紀元 17-18 世紀）に湿潤・寒冷の極を迎える、約 1200 年の周期での大きな変動があったことが分かる。

こうした大きな周期での気候変動が日本の社会構造の大局的な変化にどのような影響を与えたか。それは今後の歴史学・考古学の大きな研究課題になると思われる。紀元前 1 世紀の突然の湿潤・寒冷化が、弥生時代中期末の人々に水稻の生産量の低下や水害の頻発などの形で甚大な影響を与えたとすれば、それが高地性集落の形成をはじめ、戦乱の頻発や人々の流動で特徴づけられる弥生時代後期の不安定な過渡期を経て、古代の始まりともいえる古墳時代への社会の転換をもたらす原動力になった可能性があるかもしれない。一方の古代の終わりである平安時代には、10 世紀に乾燥・温暖化の極を迎えた。図 8b にも示したように、この時期に頻発した干ばつが水田の灌漑システムを破綻させ、律令制の水田の多くを耕作放棄地に変えて行った可能性がある。その後、11 世紀以降に気候状況が反転し再び徐々に湿潤化していく中で、民間の資本を活用する形で農地が再開発され、それが荘園制の緩やかな形成につながっていったとすれば、古代から中世への日本社会の大きな転換を説明できるかもしれない。その詳細を語ることは、本論の能力をはるかに超えているが、今後の歴史学・考古学的な議論の発展が期待される。

数十年周期変動の振幅拡大 —6, 9 世紀の危機

年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動（図 5）には、こうした千年を越えるような長周期での気候変動とは別に、数十年単位での周期的な気候変動も顕著に認められる。また、その数十年周期の変動の振幅自体が、数百年に一度の割合で拡大することも分かってきた。古代の時代を拡大した図 5b をみると、6 世紀と 9 世紀に顕著な振幅拡大が見つけられる。6 世紀は、よく知られているように、古代の中でも地方分権的な古墳時代が飛鳥・奈良時代の律令制に基づく中央集権国家に変貌を遂げる時代であり、一方の 9 世紀は、災害の頻発と共に律令制が本格的に揺らぎ始める時代でもある。この数十年周期の気候変動と社会の変化の見かけの関係性の背後にある普遍的なメカニズムを理解し、その歴史的検証を行うことができれば、それは古代におきた時代の転換を気候変動の観点から理解していく上で、もう一つの鍵になるものと思われる。

数十年周期での気候変動の振幅拡大は、人々に何をもたらした可能性があるだろうか。弥生時代以来の前近代の農業社会では穀物の備蓄が可能であり、数年周期での気候変動、すなわち数年の豊作・凶作のサイクルに対しては、備蓄穀物を活用することで対応することができたと考えられる。

逆に、数百年以上の周期での気候変動に対しては、個々の人々が気付かないうちに人口の増減や生活スタイルの変化、技術の発達などを通して、世代を越えて人々は徐々に適応することができたであろう。しかし数十年周期での大きな気候変動の場合はどうであろうか。気候が好適な時期の農業生産力の増加に伴う人口の拡大や生活水準の向上は、その時代に育った若い世代と共に社会に定着するが、その10年、20年後に農業生産が凶作に転じた際には、備蓄穀物は直ぐに枯渇する一方で、人口の調整も間に合わず、飢饉や戦乱、難民などが頻発した可能性がある。渇水の時代に低地に定着した集落が水害の頻発する時代になって一斉に高地に移動せざるを得なくなった際にも、やはり、さまざまな社会的な混乱が起きることが予想される。こうした数十年周期の気候変動の振幅が拡大する時期は、本論の対象とする時代以外にも、紀元前3～4世紀、紀元2世紀、12～14世紀、17～18世紀にも認められ、それぞれの時代における社会変動と気候変動の関係を考古学的・歴史学的に比較検討することが可能である。古代にはさまざまな文献史料や考古資料が残されており、詳細な気候変動との年代論的な対応付けから、その因果関係の有無まで、系統的な研究の進展が期待される。

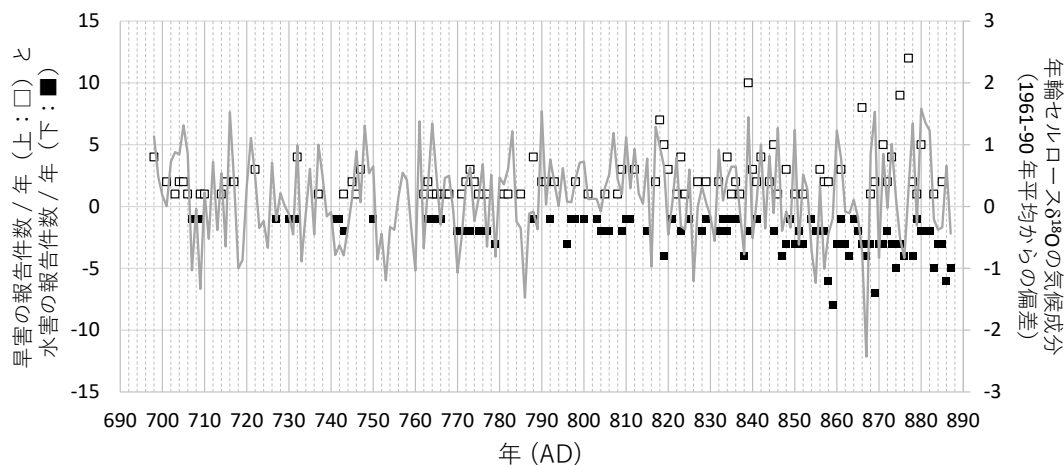


図 10

中部日本の樹木年輪セルロース酸素同位体比の気候成分（灰実線）と六国史に記された年ごとの旱害（□）と水害（■）の発生件数の比較 [今津，2020]。

数年周期の変動—六国史などとの対比

図5のデータの最大の特徴の一つは、年単位で降水量（や気温）の変動が復元できるということである。これは、図1などに示す従来の時間分解能の粗い古気候データでは全く不可能なことであった。古代には、中世や近世と比べると文献史料は少ないが、六国史には、気候変動に関連した可能性のある洪水や干ばつなどの気象災害の記録も残されている。図10はそうした六国史の年ごとの記録の件数を、洪水系と干ばつ系に分けて示し、年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動と重ねてプロットしたものである [今津，2020]。一見したところ、両者の関係は整合的であるようにも見えるが、詳しく見ると、酸素同位体比が高い乾燥年でも洪水の記録はあるし、逆に、酸素同位体比が低い湿潤年でも干ばつが起きている年はある。

このことは何を意味しているのでしょうか。ここで一つ注意しておかねばならないことは、年輪酸素同位体比のデータは一年に一個しか取得されていないので、それは樹木の光合成が行われる春から夏の気候の平均値に過ぎないということである。これに対して、古代の文献に載っている気象災害の記録は、必ずしも春から夏の平均値を示すわけではなく、あくまでも、その時々々の記録である。それゆえ、春から夏の気象災害記録がある程度満遍なく揃う中世や近世であれば、図8に示すように、両者の間にある程度関係性が出てくるが、古代の両者の関係性（図10）は確率論的なレベルの話に過ぎない。この点に留意しつつ今後は次項で示すように年輪酸素同位体比の季節変動（年層内変動）の分析を組み合わせることなどにより、より詳細かつ冷静な史料と年輪酸素同位体比の対比が求められている。

⑤……………おわりに 一今後の可能性

年輪酸素同位体比の特徴とその応用への期待

これまで述べてきたように、中部日本で得られた過去2600年間に及ぶ樹木年輪セルロースの酸素同位体比は、日本の歴史の研究に応用できる新しい信頼性の高い資料である。すでに、このデータの一部を用いたさまざまな論考が歴史学者や考古学者の手で生み出されており、今後も益々その応用が広がっていくことが期待できる〔鎌谷ら、2016；田村、2016；伊藤・中塚、2017；若林、2019など〕。本論の最後に特に研究手法の面から、年輪酸素同位体比のデータの歴史学的・考古学的活用の可能性について、いくつかの論点を提示したい。年輪セルロース酸素同位体比の気候成分は、水田稲作の豊凶を介して日本の歴史に大きな影響を与えたと考えられる夏の気候の変動を、1年から1000年までのあらゆる周期で満遍なく再現している。別の言い方をすると、このデータがもつ従来の歴史学や考古学にはない最大の特長は、「データの精度が21世紀でも弥生時代でも全く同じ」という事実である。実際、図5に表されたデータの作成過程では、20世紀でも紀元前5世紀でも、統計学的に必要な同じ質と量のデータが用いられており、20世紀の酸素同位体比と気象データの相関は、そのまま紀元前5世紀でも保証されていると考えてよい。一方で歴史の研究で用いられる文献史料や考古資料は、時代が遡るにつれて、その内容はどんどん変化していき、一般に古くなればなるほど、その数は減って、そこから得られる情報量は少なくなる。それが歴史上の各時代の社会の動態を理解する上での大きな制約となってきた。しかし年輪酸素同位体比には、この制約がないのである。このことは歴史の研究に何をもたらすであろうか。

時代を越えた知見の共有 一近現代から古代へ

おそらく考えうる方法論の一つは、時代を越えた知見の共有、特に近・現代や近世で得られた詳細な気候変動と人間社会の関係に関する情報を中世以前の時代にさかのぼって利用する、というアプローチである。生物の一種である水稻の収穫量と気候変動の間には、品種改良や農業土木の発達した20世紀以降になっても、明確な関係性があることが農業統計データから証明されている。実際、ダムによる利水の技術が発達した現代では、干ばつによる凶作は少なくなったが、日照不足に

よる冷害や台風などによる風水害は、今でも水稻の収穫量を著しく毀損する。この関係性は前近代の江戸時代でも、年輪セルロース酸素同位体比などの古気候データと年貢割付帳（免定）〔鎌谷ら、2016〕や稲の坪刈記録〔佐藤、1987〕などの年ごとの水稻の収穫量に関連した古文書データとの関係から、より明確な形で確認できる。一方で、これまでは中世以前の時代から年ごとの農業生産量のデータを取得することは至難の業であった。しかし近現代・近世のデータ・資料から得られた「気候と農業生産の関係」を、中世以前の年輪酸素同位体比のデータに当てはめれば、弥生時代以降の任意の時代・任意の年の「農業生産力のポテンシャル」を復元することが理論的には可能になる。

もちろん農地の面積や人口、農業技術が全く違う状況下で、気候データだけから実際の農業生産量を復元することはできないが、その短期的な変動のパターン、すなわち豊凶のサイクルについては年輪酸素同位体比から推定することができるはずである。こうした知見は、農業生産力の変化を契機にして飢饉や紛争、難民などが歴史上のどのタイミングで発生した可能性があるか、という推論を歴史の研究に提供できる。もちろん、実際に飢饉や紛争、難民が発生したかどうか、また当時の社会がそれを乗り越えられたかどうかは、気候変動だけで決まるものではなく、時々の社会の技術的・経済的・政治的な能力次第である。むしろ、気候データからの推論と歴史の現実を比較して、その差異を比較史の手法で検討していくことで、「気候・環境変動に強い社会とは何か」というような、全く新しい問いを歴史の研究に発することができるに違いない。

これまでの日本史の研究では、時代間での文献史料の性格の違い、ひいては社会の性質の根本的な違いから、時代を越えた比較史の研究は難しいとされてきた。これは、現代社会が抱える諸問題の解決に役立つ何らかの教訓の提供を歴史の研究に求める多くの一般市民の目から見ると、大変残念なことでもあった。今回、年輪セルロース酸素同位体比という時代を越えて均質な「新しい史料」が登場したことで、これまでは時代間での研究交流の障壁となってきた時代毎の社会の個性に、比較史の観点から新しく光を当てていける可能性があるのではないだろうか。もちろんそのためには、歴史学や考古学自体の中で、現代史を含めたあらゆる時代を視野に入れた課題の共有が図られなければならないが、その際、「気候変動に対する社会の適応力」は、地球温暖化に直面した現代を含めて、時代を越えた共通の研究対象になると考えられる。

年輪年代測定と古代史学の可能性

年輪酸素同位体比が持つもう一つ特長は、建築古材や出土木材の年輪年代の決定に、樹種の違いを越えて応用できるという点である。従来の年輪年代法は、年輪幅の変動という「気候変動に対する樹木の成長量の生物学的な応答パターン」を比較の対象にするものであったため、もともと長樹齢のヒノキやスギなど年輪幅の標準年輪曲線（マスタートクロノロジー）が得られている特定の樹種だけを対象に、しかも年輪数が百年以上あるような大型材のみに適用されてきた。そうした木材は、通常製材の過程で樹皮や辺材が除去されていることが多く、年輪年代が決まったとしても、遺跡の構築年代との直接の関係が期待される樹木の伐採年代は分からないし、また貴重な大型材は建物の建て替えなどの際に、再利用（転用）されることも多い。つまり、年輪年代が遺跡や建物の実際の年代よりも、百年以上古く出ることがしばしばあった。

酸素同位体比を用いた新しい年輪年代法〔中塚、2015；2018〕の場合は、第一に樹種の違いによら

ず全ての木材に適用できるし、第二に個体間での変動の相関性が高いため、年輪数が30-50年程度の小径木でも年代決定に至る可能性がある。つまり水田や水路の杭や板、堅穴住居や掘立柱建物を含む民家の柱、あるいは洪水や土砂崩れなどで埋積した自然木など、樹皮や辺材が付いていて転用の可能性も低く、大量に取得できて考古学的、建築学的な価値も相対的に低く、酸素同位体比の分析に伴う資料の部分的な破壊も許容されやすい木材群を分析の対象にすることができる。これまでに、こうした資料群の分析により、先史・古代の多くの遺跡の年代決定が日本各地で行われてきている。

新しく得られた年輪酸素同位体比のデータ（図5）は、古代については、これまで主に文献史料と対比することで歴史の研究に活用されてきた[今津, 2020 など]。今後は、それに加えて年輪酸素同位体比が明らかにする遺跡や遺物の年代情報を、年輪酸素同位体比自体の変動パターンと比較することで、全く新しく気候変動と人間社会の関係を議論していける可能性がある。その際には、年輪考古学の先進地域である米国南西部などにおいて、長年にわたって測定されてきた「遺跡出土材の年輪年代データのヒストグラム」を「人間活動の変遷の量的指標」にする取り組み[Bocinsky et al., 2016]を、日本の先史・古代社会の研究にも応用するなど、気候と社会の関係についての全く新しい発想での研究を始めることが展望できる。

季節変動解析と災害史研究の高度化

現時点では、図5の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分は、あくまでも年単位の解像度で得られているに過ぎない。つまりこのデータは、樹木が活発に光合成をおこなう春から夏の期間の気候（降水量や相対湿度、あるいは気温）の「平均」に対応している。しかし実際には、ひと夏の間でも、長い干ばつの直後に洪水が起きたり洪水の後に長い猛暑になったりと、大きな災害が起きた年でも「平均」してしまうと「通常の降水量や気温」になる場合も珍しくはない。その結果、図10でも議論したように古代の文献史料が表す顕著な災害の発生が、必ずしも年輪酸素同位体比の経年変動データからは認定できないことがある。

このような状況を克服するために、木材の各年層をさらに数個に分割して（現在は等間隔に6個に分割するというフォーマットに従って）、セルロースの酸素同位体比の季節変動（年層内変動）を明らかにする研究を近現代・近世と先史・古代の弥生時代後期、古墳時代初期の資料群を対象に行っている。年層をさらに細かく分割することの元々の目的は、1つの木材試料から得られるデータの数を増やすことで、遺跡から出土する小径木の年代を決めることであった[李ら, 2019]が、その年代決定のために別途必要となる年輪セルロース酸素同位体比の季節変動のマスタークロノロジーは、今後、古代を含む日本史のあらゆる時代を対象にして、洪水や干ばつなどの気象災害が、どのような頻度で歴史上のどの年、どの時代に起きたのかを正確に明らかにしていく上で、重要なデータベースとなる。

年輪セルロース酸素同位体比の気候成分（図5）を用いた歴史学・考古学の研究は、このように様々なレベルでの新しい概念の構築、データの収集、技術の革新などを伴いながら、今後、益々発展していくものと期待される。多くの関係する皆さんの積極的な議論・研究への参入を期待するものである。

引用文献

- 伊藤啓介・中塚武：「『CD-ROM版 鎌倉遺文』に収録された古文書件数と気候復元データの関係の定量的分析」『鎌倉遺文研究』40, 23-53, 2017.
- 今津勝紀：「日本古代の気象と王権—九世紀後半の全般的危機—」『気候変動から読みなおす日本史3—先史・古代の気候と社会変化』（中塚武, 若林邦彦, 樋上昇編）臨川書店, 157-187, 2020.
- 鎌谷かおる・佐野雅規・中塚武：「日本近世における年貢上納と気候変動—近世史研究における古気候データ活用の可能性をさぐる—」『日本史研究』646, 36-56, 2016.
- 阪口豊：『尾瀬ヶ原の自然史』中公新書, 1989.
- 佐藤常雄：『日本稲作の展開と構造』吉川弘文館, 1987.
- 田村憲美：「日本中世史研究と高分解能古気候復元—その理論的準備と山城国上桂荘を事例とする一試行—」『日本史研究』646, 19-35, 2016.
- 中塚武：「樹木年輪セルロースの酸素同位体比による気候変動の復元」『現代の生態学② 地球環境変動の生態学』（原登志彦編）共立出版, 193-215, 2014.
- 中塚武：「酸素同位体比年輪年代法がもたらす新しい考古学研究の可能性」『考古学研究』62, 17-30, 2015.
- 中塚武：「酸素同位体比年輪年代法の誕生と展開」『考古学と自然科学』76, 1-13, 2018.
- 藤木久志編：『日本中世気象災害史年表稿』高志書院, 2007.
- 水越允治：「文書記録による小氷期の中日本気候復元」『地学雑誌』102, 152-166, 1993.
- 光谷拓実：「年輪年代法—実年代を探る—」『文化遺産の世界』16, 1-11, 2005.
- 山本武夫：『気候の語る日本の歴史』そしえて, 1976.
- 李 貞・中塚武・庄建治朗・岡村勝行：「セルロース酸素同位体比の季節変動を用いた年輪数の少ない小径木の年代決定」『日本文化財科学会2019年大会講演要旨集』2019.
- 若林邦彦「水害に関わる環境と初期農耕社会集落動態」『資料が語る災害の記録と記憶—国立歴史民俗博物館研究叢書6』（樋上雄彦編）朝倉書店, 2019.
- Aono, Y., and Saito, S.: Clarifying springtime temperature reconstructions of the medieval period by gap-filling cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *International Journal of Biometeorology*, 54, 211-219, 2010.
- Bocinsky, R. K., Rush, J., Kintigh, K. W., Kohler, T. A.: Exploration and exploitation in the macrohistory of the pre-Hispanic Pueblo Southwest. *Science Advance* 2, e1501532, 2016.
- Cook, E. R., Krusic, P. J., Anchukaitis, K. J., Buckley, B. M., Nakatsuka, T., Sano, M., and PAGES Asia2k Members: Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. *Climate Dynamics*, 41, 2957-2972 doi: 10.1007/s00382-012-1611-x41, 2013.
- Esper, J., Frank, D. C., Battipaglia, G., Büntgen, U., Holert, C., Treydte, K., Siegwolf, R., and Saurer, M.: Low-frequency noise in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tree ring data: A case study of Pinus uncinata in the Spanish Pyrenees. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB4018, doi: 10.1029/2010GB003772, 2010.
- Fairbridge, R. W.: Convergence of evidence on climatic change and ice ages. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 95, 542-579, 1961.
- Kagawa, A., Sano, M., Nakatsuka, T., Ikeda, T., and Kubo, S.: An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-sectional laths, *Chemical Geology*, 393-394, 16-25, 2015.
- Kawahata, H., Matsuoka, M., Togami, A., Harada, N., Murayama, M., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Matsuzaki, H., and Tanaka, Y.: Climatic change and its influence on human society in western Japan during the Holocene. *Quaternary International*, 440, 102-117, 2017.
- Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., Bradley, R. S., Miller, S. K., Rutherford, S., and Ni, F.: Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, *Proceedings of National Academy of Science of United States of America*, 105, 13252-13257, 2008.
- Nakatsuka, T., Sano, M., Li, Z., Xu, C., Tsushima, A., Shigeoka, Y., Sho, K., Ohnishi, K., Sakamoto, M., Ozaki, H., Higami, N., Nakao, N., Yokoyama, M., and Mitsutani, T.: A 2600-year summer climate reconstruction in central Japan by integrating tree-ring stable oxygen and hydrogen isotopes, *Climate of the Past*, 16, 2153-2172, 2020, <https://doi.org/10.5194/cp-16-2153-2020>.
- Ohyama, M., Yonenobu, H., Choi, J.-N., Park, W.-K., Hanzawa, M., and Suzuki, M.: Reconstruction of northeast

Asia spring temperature 1784–1990, *Climate of the Past*, 9, 261–266, 2013.

Yonenobu, H., and Eckstein, D.: 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, L10701, doi : 10.1029/2006GL026170, 2006.

(名古屋大学環境学研究科, 国立歴史民俗博物館共同研究員)

(2021 年 3 月 16 日受付, 2021 年 7 月 27 日審査終了)

Climate Variation in Ancient Japan Inferred from Tree-ring Cellulose Oxygen Isotopic Ratio

NAKATSUKA Takeshi

Climate is a possible driving factor of human history, but there were not reliable past climate records for ancient Japan, directly comparable with paleographic evidences. Recently, tree-ring cellulose oxygen isotope ratios have been analyzed as a proxy of summer precipitation and temperature in monsoonal Asia, and annually-resolved summer climate variations are now being clarified for last several millennia over Japan by analyzing archaeologically excavated woods and old architectural woods in addition to living old trees and naturally buried logs. Although low-frequency climate signals have been hardly obtained by tree rings, multi-centennial and millennial climate variations can be reconstructed precisely by integrating cellulose oxygen and hydrogen isotope ratios in central Japan.

The obtained time-series are not only correlated well with modern and contemporary meteorological observations and low-resolution long-term natural proxy records, but also corresponding to weather reports in old diaries and climatic disasters in old paleography, suggesting that it is possible to discuss relationships between climate variations and human history at every time scale from annual to millennial. There is an approximately 1200-year periodicity in Japanese summer climate with driest (warmest) periods in BCE 3rd–2nd and CE 10th centuries and wettest (coolest) periods in CE 5th–6th and 17th–18th centuries, where long-term wetting (cooling) and drying (warming) corresponded to advent of Kofun-period and demise of Ancient-period, respectively. Multi-decadal climate variations were enhanced in CE 6th and 9th centuries, possibly bringing difficulties for agricultural societies at that time and underlying emergence and decline of Ritsuryo system. The annually-resolved climate data can be compared not only with documentary records but also with archaeological evidences precisely dated by oxygen isotope dendrochronology, so that it can be utilized in depth for inter-disciplinary studies among history, archaeology and paleoclimatology hereafter.

Key words : Tree Ring, Oxygen Isotope Ratio, Ancient Japan, Climate Variability