

年輪酸素同位体比を用いた 弥生・古墳時代の気候・農業生産・ 人口の変動シミュレーション

Simulation of Variations in Climate, Agricultural Production, and Population
During Yayoi and Kofun Eras Using Tree-Ring Oxygen Isotopic Ratios

中塚 武

NAKATSUKA Takeshi

- ①はじめに一問題の所在
- ②年輪酸素同位体比を使った中部日本の夏季気候の復元
- ③気候と農業生産の関係—近世の知見から
- ④シミュレーションモデルの提案
- ⑤気候変動の周期性と社会応答の関係
- ⑥弥生・古墳時代の生産・人口の経年変動
- ⑦弥生～古墳時代史への示唆
- ⑧おわりに—今後の課題

【論文要旨】

樹木年輪セルロースの酸素同位体比は、夏の降水量や気温の鋭敏な指標として、過去の水稲生産量の経年変動の推定に利用できる。実際、近世の中部日本の年輪酸素同位体比は、近江や甲斐の水稲生産量の文書記録と高い相関を示し、前近代の水稲生産が夏の気候によって大きく支配されていたことが分かる。この関係性を紀元前 500 年以降の弥生時代と古墳時代の年輪酸素同位体比に当てはめ、本州南部の水稲生産量の経年変動ポテンシャルを推定し、さらに生産—備蓄—消費—人口の 4 要素からなる差分方程式を使って、同時期の人口の変動を計算した。ここでは農業技術や農地面積の変化が考慮されていないので、人口の長期変動は議論できないが、紀元前 1 世紀の冷湿化に伴う人口の急減や、紀元前 3—4 世紀、紀元 2 世紀、6 世紀の気候の数十年周期変動の振幅拡大に伴って飢饉や難民が頻発した可能性などが指摘でき、集落遺跡データや文献史料と対比することが可能である。

【キーワード】 樹木年輪、酸素同位体比、気候変動、農業生産、人口

①……………はじめに ―問題の所在

1. 定量的な先史時代像を目指して

先史時代の日本列島に生きた人々の歴史を考える上で、当時の人口や生産の変遷を自由に明らかにできたら、研究は大いに進むに違いない。しかし先史時代の人々の暮らしを遺跡の出土物などから明らかにする考古学は、現代社会を扱う諸学問はもとより、同じ歴史を扱う文献史学と比べても、人口や生産などの社会要素を定量的に明らかにすることには、必ずしも長けていない。その背景には、第一に、先史時代の出土物には文字情報が含まれていないので、人口の数や生産の量を定量的に示す数字が存在せず、第二に、遺跡や遺物の数といった考古学者が数値化できるデータも、土器の型式編年における年代論的な制約があるので必ずしも定量的なデータに変換できないという問題があった。本論文では、夏の降水量や気温の新しい指標である樹木年輪セルロースの酸素同位体比を用いて、気候はもちろん、人口や生産についても定量的に復元する、全く新しい先史時代の研究方法について提案する。

2. 土器の相対編年による定量的研究の難しさ

縄文時代から近世まで日本列島各地で確立されている土器の型式編年は、日本考古学の精緻な研究を特徴づける膨大な体系であり、全国の埋蔵文化財の調査現場から出土する大量の土器を使って常に進化し続けている。全ての考古学者が何らかの形でこの情報を共有しているため、過去のあらゆる時代はその地域と時代を代表する「〇〇式」などの土器型式の名前で呼ばれる。その体系は、土器が出土した地層の上下関係をもとに、相対的な年代順について絶対の正確性をもっているため、その型式名で時代を語れば将来も矛盾が生じることはない。しかし土器型式の相対編年に基づく研究には、本質的な制約がある。

1つは、日本の考古学が自然科学や世界史との間で、自然や社会の事象の時間的前後関係を議論するときの制約である。古気候や古環境などの自然科学のデータは通常絶対年代や暦年代で示され、中国などの文献史学の記録も暦年代で表されるが、土器型式の多くはこの絶対年代や暦年代との対応関係が未だ明確になっていない。系統的に測定されてきた土器付着炭化物の¹⁴C年代についても、¹⁴C年代法に含まれる誤差や校正曲線の理解の難しさを反映して、その測定結果が示す各土器型式の暦年代観は考古学者の間で必ずしも合意されていない。

もう1つは、遺跡数や遺物数などの数値データを使って定量的な考察をする際の制約である。一般に土器の型式は、その製作者集団の世代交代と共に変化すると考えられるので、一形式の存続期間は概ね数十年と想定されるが、個々の型式の年代幅を正確に決めることは難しい。それゆえ例えば、同じ地域で時間的に連続する型式AとBの土器があり、Bの出土数がAの2倍あったとしても、「Bの時代に単位時間当たりの土器生産量がAの時代の2倍になった」ことを意味するのか、「Bの時代がAの時代よりも単に2倍長かった」だけなのかは分からない。「単位時間当たりの土器生産量」が分かれば、それは「人口」などの基本的社会要素の推定につながるが、土器編年と絶

対年代の関係が曖昧な状況に留まっているため、遺物や遺跡の数値データを時間当たりの定量的な値として解釈する上で大きな制約になっている。

3. 年輪酸素同位体比の可能性（その1）

近年、日本において急速に発展してきた樹木年輪セルロースの酸素同位体比の研究〔中塚, 2015; 2018〕には、こうした状況を全く異なる2つの方向から改善できる可能性がある。1つは、遺跡や遺物の暦年代決定への貢献である。従来の年輪年代法が測定対象にしていた年輪の幅をそのセルロースの酸素同位体比に置きかえた酸素同位体比年輪年代法では、あらゆる樹種の比較的年輪数の少ない出土材、すなわち樹皮が付いた小径で転用の可能性の少ない無数の丸杭や矢板などの年代が決定できる。それゆえ木材が普遍的に出土する低湿地遺跡の遺構の暦年代を一年単位で決められると同時に、木器との一括性が高い状態で出土した土器の暦年代を高い確度で決めていくことができる。そのことにより、土器型式の相対編年をもとに構成されてきた日本考古学の研究に定量的な時間軸を与えることができ、上記の2つの制約を一気に解消していける可能性がある。

さらに言えば、年単位で製作年代を確定できない個々の土器や石器、金属器などの遺物とは異なり、年輪のある木器であれば、個々の製作年代を年単位で明らかにできる可能性がある。その木器の年代別製作個数のヒストグラムを、遺跡ごと地域ごとに積み上げていくことで、先史時代の単位時間当たりの人間活動を定量的に明らかにしていくことが原理的に可能である。こうした研究は、年輪考古学の先進地域であるアメリカ南西部などでは既に成功しており〔Bocinsky et al., 2016 など〕、日本でも年輪酸素同位体比を使えば、十分に実現できる可能性がある。

4. 年輪酸素同位体比の可能性（その2）

もう1つの全く異なる方向性が、本論文で提案する年輪酸素同位体比を使った先史時代の農業生産と人口の定量的なシミュレーションである。年輪セルロースの酸素同位体比は、年輪年代の決定に利用できると同時に、アジアモンスーン地域で農業生産力の変動を規定する夏の降水量や気温を正確に復元できる代替指標（プロキシ）である。既に日本でも、列島各地で縄文中期まで遡って過去約5千年分の年単位のデータが蓄積しており、特に中部日本では、過去2600年間を対象に十分な個体数のセルロース酸素同位体比のデータを用いた上に、その水素同位体比も併用することで、数年から数千年までのあらゆる周期の夏の降水量や気温の変動を正確に復元することに成功している〔Nakatsuka et al., 2020〕。

この中部日本のデータの最大の特長は、時代を越えて古気候復元に用いる木材の数を揃えたことで、弥生時代や古墳時代における気候復元の精度が近世や近現代と同じレベルになっていることである。一方、弥生時代から現代まで日本列島の人々の最大の生業であった水田稲作の豊凶は、ずっと夏の気温や降水量に支配されてきたと考えられるので、例えば近世における気候と農業生産力との関係は、年輪セルロースの酸素同位体比という窓を通して、弥生・古墳時代の任意の時期、任意の年の水田稲作の豊凶の推定に使えるはずである。

本論文ではさらに一步進んで、穀物備蓄を基盤とした前近代の農業社会を対象にして、「生産・備蓄・消費・人口」の相互関係をモデル化して、そのモデルに年輪セルロース酸素同位体比から推

定できる農業生産力の変動を外部情報として与えることで、弥生・古墳時代の人間社会の変動を定量的に計算（シミュレーション）を試みる。そして、その結果をこれまでに得られている弥生・古墳時代の考古学的情報と対比することで、先史時代の人間社会の変遷を考えるための新しい研究方法論を提案する。その方法論は、今後、前述の年輪酸素同位体比による木器の年別製作数のヒストグラムなどと組み合わせることで、より包括的な先史時代の定量的な研究方法論に発展していくものと思われる。

②……………年輪酸素同位体比を使った中部日本の夏季気候の復元

1. 年輪酸素同位体比の規定要因

樹木年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比は、光合成が行われる季節（主に夏）の降水（水蒸気）の同位体比と相対湿度によって決まり、降水（水蒸気）の同位体比が高いときに高く、相対湿度が高いときに低くなる。一方、日本を含むアジアモンスーン地域では、概ね、降水量が多いときに降水（水蒸気）の同位体比が低くなり（雨量効果という）、また降水量が多いときに相対湿度は高い。それゆえ日本では、年輪セルロースの酸素同位体比は夏の降水量と負の相関をもつことになる。また日本の夏には、降水量と気温の間に顕著な負の相関関係があるので、年輪セルロースの酸素同位体比から間接的に過去の夏の気温を復元することも可能である。こうしたメカニズムを利用して、アジアモンスーン地帯の各国では過去数百年間以上の時代を対象に、主に山岳地域の長樹齢の現生木を使って気候変動の年単位での復元が進められてきた [Treydte et al., 2006; Griebinger et al., 2011; Li et al., 2011; Xu et al., 2011; Sano et al., 2012; Liu et al., 2017 など]。

2. 樹齢効果の存在と水素を使った補正

埋蔵文化財行政の発展した日本では、現生木に加えて遺跡出土材を活用することができる。それゆえ、東海から近畿を中心とした本州中部では、主にヒノキの出土材を用いて弥生時代前期まで遡って年輪セルロース酸素同位体比の測定が行われ、そのデータは、さまざまな時代の年単位での気候変動の復元と共に、年輪年代の決定に広く用いられてきた [樋上ら, 2015; 井上ら, 2018; 斎藤ら, 2018; 對馬ら, 2019 など]。しかし人為的伐採による環境変化の影響を大きく受けた遺跡出土材には、気候変動とは関係なく樹齢と共に徐々に酸素同位体比が低下する樹齢効果が顕著に認められるため、これまでは、百年以上の長周期での気候変動の復元は難しかった。

近年、樹齢効果が伐採後の陽当りの変化等に伴う成長速度の変化で説明できることが分かり、同じセルロースから得られる酸素と水素の同位体比が、気候変動に対しては正相関、樹齢効果に対しては逆相関で変化することから、両方の同位体比を組み合わせた連立方程式を解くことで、樹齢効果の影響を消去して気候変動だけを復元する手法が考案され、それに基づいて、年輪セルロースの同位体比を用いた長期の気候変動の復元が初めて行われた [Nakatsuka et al., 2020]。図 1 は、本州中部の広域から得られた計 67 個体のヒノキなどの長樹齢の針葉樹の年輪試料（採取地点は、図 3b に表示）のセルロースの酸素と水素の同位体比を接合・統合して計算した、過去 2600 年間の

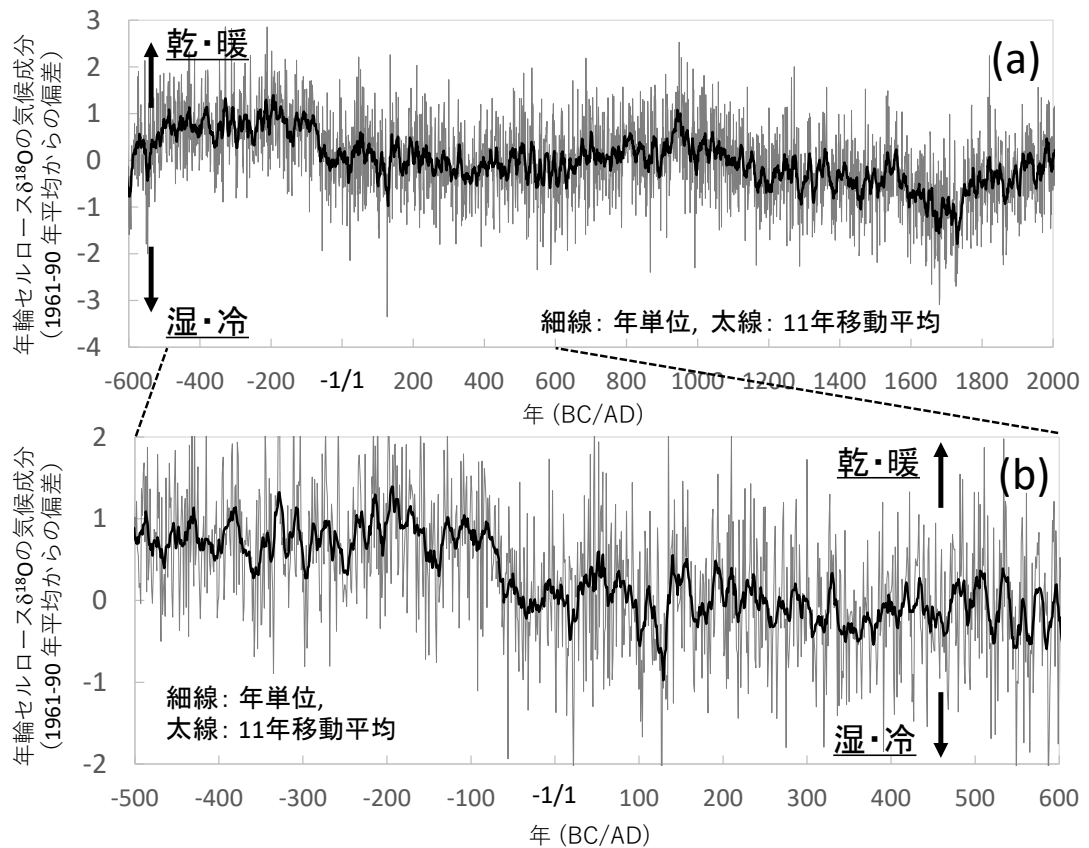


図 1

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] とその弥生・古墳時代におけるクローズアップ (b)。

年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動であり、そこでは短周期の気候変動はもちろん、長周期の気候変動についても正確に再現されている。

3. 気象データや他の古気候指標との比較

図 2 は、このデータの 20 世紀以降の部分を実地観測データと比較したものである。このデータが夏の降水量及び相対湿度と顕著な負の相関を示し、夏の気温とは正の相関を示すことが分かる。図 3 は、このデータがその地域の気候と有意な相関を示すエリアの空間的範囲が、降水量については本州南部から九州・四国、さらに揚子江下流域までの東西に長く伸びた梅雨前線に平行な領域に分布しており、気温については日本の中・西部から朝鮮半島、中国東部の広域に対応していることを示している。

図 1 のデータは、図 4 a, b に示すように、近世の日記の天候記録や中世の気象災害記録から推定される夏の気候の短期的・長期的変動ともよく合致することが分かっており [Nakatsuka et al., 2020; 中塚, 2022], また、図 4 c のように、尾瀬ヶ原の泥炭堆積物の花粉組成から復元された千年周期の気候変動などともよく合致することが確認された。つまり、図 1 には、日本の水田稲作の豊凶を左右する夏の気候の情報が、年から千年までのあらゆる周期の変動について、正確に切れ目なく (シームレスに) 記録されているのである。

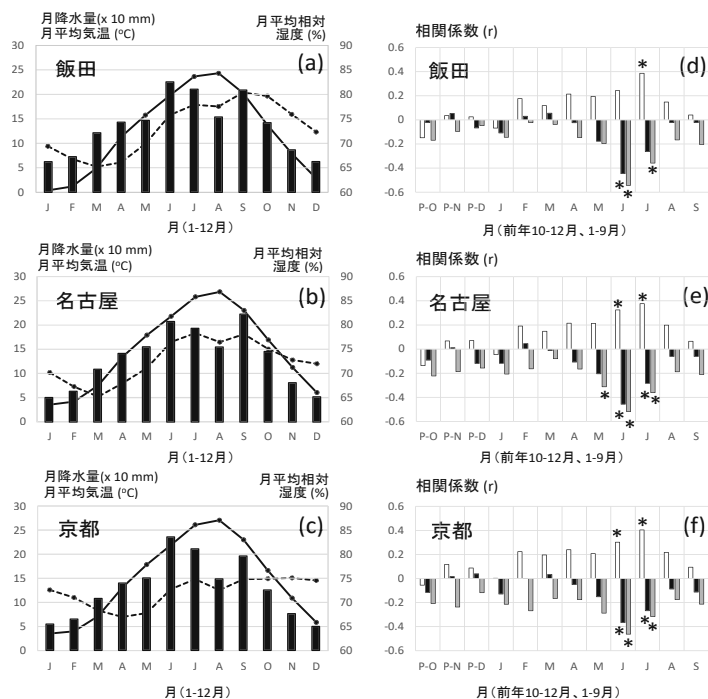


図 2

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）。図中の相関係数の*は、99 % 以上の有意性を表す。10–12 月については、樹木の成長が 9 月までに終わることから、前年との相関を計算した。Nakatsuka et al. [2020] より。

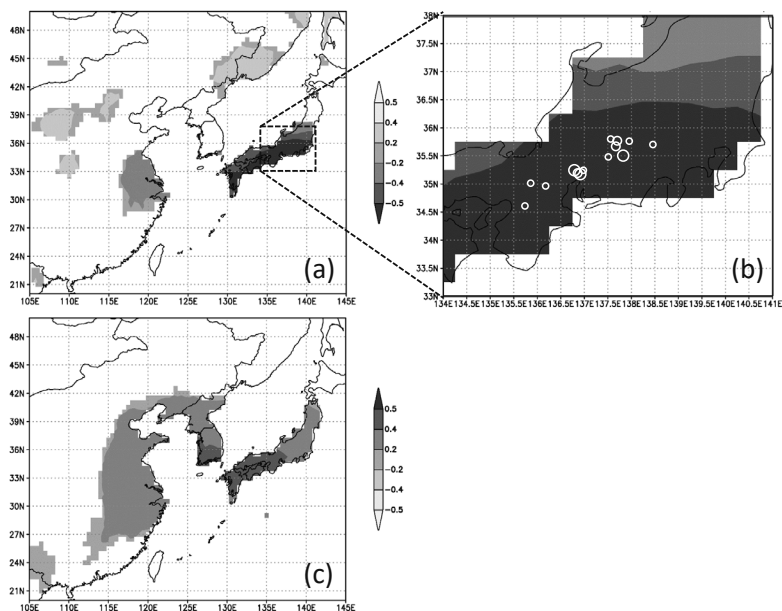


図 3

東アジア (a) および本州中部 (b) の陸域における 6–7 月の降水量、及び東アジアの陸域における 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。90 % 以上の有意性をもつ相関の領域のみを表示した（白色の領域は、「相関が有意ではない」もしくは「陸上ではない」領域である）。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）。Nakatsuka et al. [2020] より。

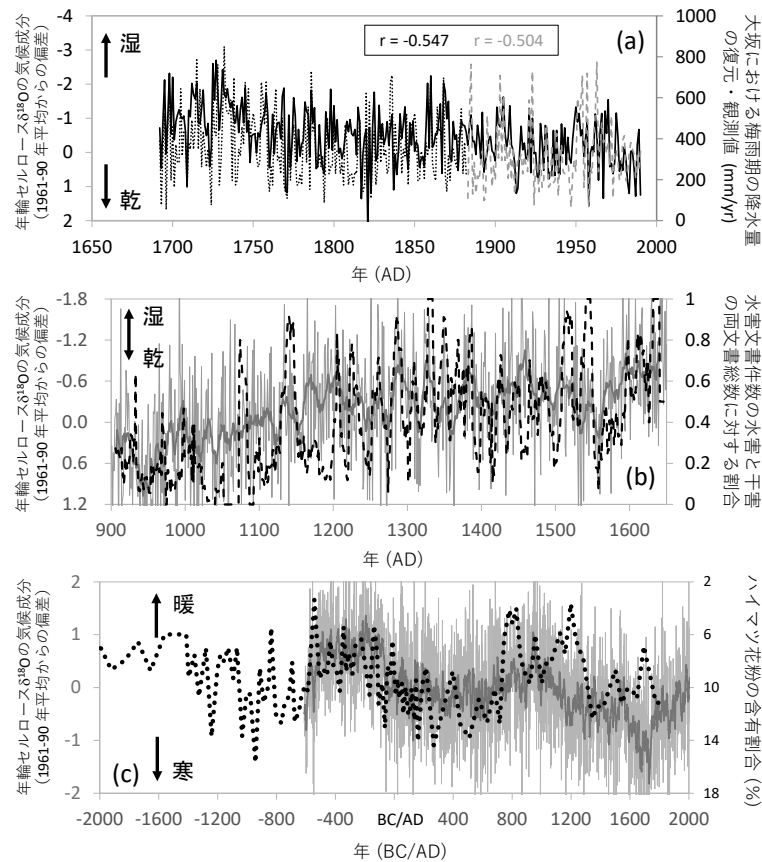


図 4

中部日本の年輪酸素同位体比の気候成分 (a: 黒実線一年毎の値, b, c: 灰細線一年毎の値, 灰太線—11 年移動平均値, a と b は、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) とこれまでに得られている他の指標による古気候復元との比較。(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), (c) 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 (%) (阪口, 1989; 黒点線。 ^{14}C による年代決定のため、年代には百年程度の誤差を含む。古墳時代以降は、堆積速度が遅いため、データの解像度が低くなっている)。Nakatsuka et al. [2020] より。

③……………気候と農業生産の関係 —近世の知見から

1. 近世の農業生産力と古気候データの比較

図 1 の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分と農業生産量の関係を明らかにしていくために、ここではまず、弥生時代や古墳時代と同じように水田稲作を主な生業としていた近世の江戸時代に着目する。江戸時代には、日本中のさまざまな村々で毎年の年貢の請求書 (免定) が保存されており、その中には村の元々の石高から、その年の凶作分を差し引いた「残高」、つまり年貢徴収対象となる収穫高が書かれていることがある。また、稲の収穫量の変動を農民自らが理解するために、日本各地で村ごとに水田の単位面積当たりの籾の収穫量を記録した「坪刈記録」が残されてきた。いずれも水稻生産力の変動の記録として使えるデータである。

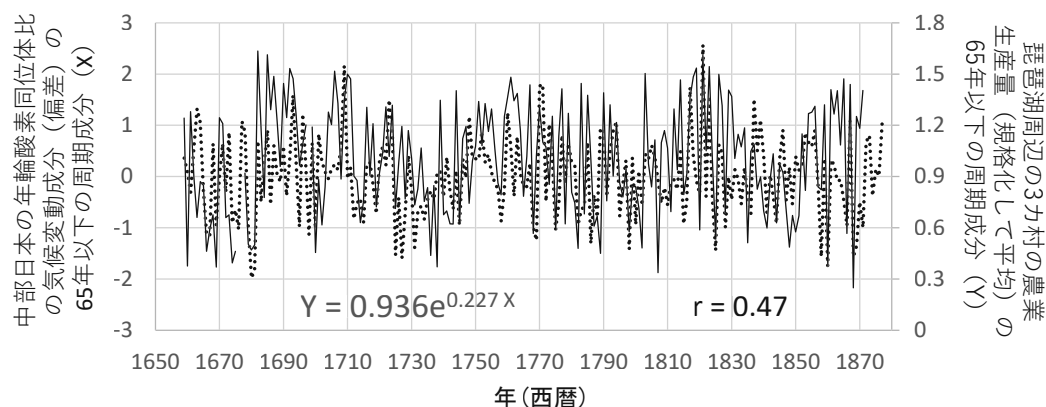


図5

中部日本の年輪酸素同位体比の気候成分(黒点線) [Nakatsuka et al., 2020] と近江国の琵琶湖周辺三カ村の免定(年貢割付帳)に記された残高から推定した農業生産量(黒実線) [鎌谷ら, 2016] の比較。酸素同位体比と農業生産量の65年以下の周期成分を計算するために、それぞれ「65年移動平均値」との「差」と「比」を計算した。「比」を用いた理由は、農業生産量を「平均値が1となる0以上の値」で表示するためである。図中の r は両者の間の相関係数、方程式は両者の関係を近似した指数関数である。

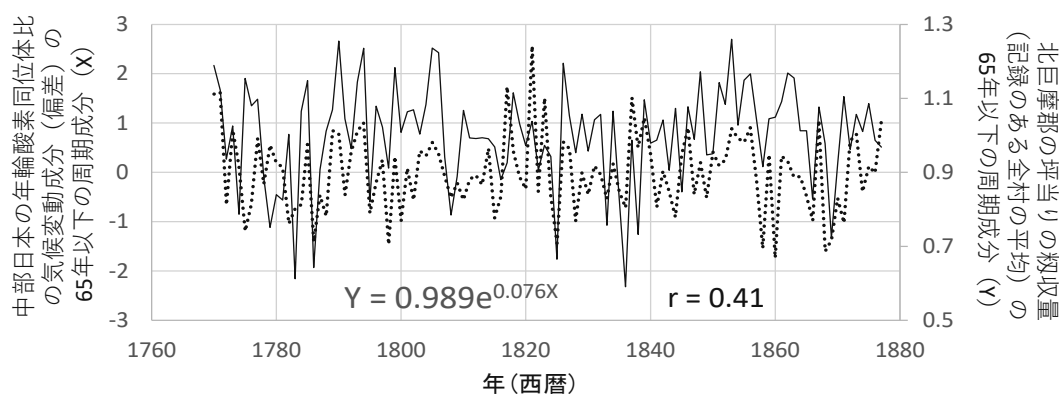


図6

中部日本の年輪酸素同位体比の気候成分(黒点線) [Nakatsuka et al., 2020] と甲斐国北部・北巨摩地域の多数の村で測られてきた坪当りの水稻の籾収穫量 [佐藤, 1987] の比較。酸素同位体比と籾収穫量の65年以下の周期成分を計算するために、それぞれ「65年移動平均値」との「差」と「比」を計算した。「比」を用いた理由は、籾収穫量を「平均値が1となる0以上の値」で表示するためである。図中の r は両者の間の相関係数、方程式は両者の関係を近似した指数関数である。

図5に、近江国(滋賀県)の琵琶湖周辺の3カ村の免定に記された残高の変動 [鎌谷ら, 2016] を、それぞれ規格化して平均したものと、前章で紹介した図1の中部日本の年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動を比較した図を示す。ここでは、年貢賦課に関わる社会状況の長期的変化の影響を避けて、気候変動が農業生産に与える影響だけをより純粋に議論するために、両データともに65年より短い周期成分(数十年以下の時間スケールの変動を表すものとして、「2の累乗年」である64年までの周期成分を取り出した)に着目している。両者の間には、数年～数十年の周期で顕著な正の相関があり、琵琶湖周辺の村々では降水量の増大(酸素同位体比の低下)が、琵琶湖の水位の上昇にともなう水害をもたらし、凶作に直結していたことを示している。

図6には、甲斐国(山梨県)北部の北巨摩郡の丘陵地帯の村々で得られている坪刈記録 [佐藤, 1987] を、年ごとに平均して求めた稲籾の収穫量の変動を、やはり図1の年輪セルロース酸素同位

体比の気候成分と比較したものを示す。ここでもまた、水稻収量に関わる農業技術の長期変化の影響を避けて、気候変動が農業生産に与える影響だけをより純粋に議論するために、両データともに65年以下の周期成分に着目している。やはり両者の間には、数年～数十年の周期での顕著な正の相関があり、この場合は、水害というよりも気温の低下（酸素同位体比の低下）による冷害が、稲の生育に悪影響を与えていたと解釈できる。

2. 時代を越えた知見の共有へ

これらの結果は、第一に、日本の水田稲作の豊凶には夏の気候の変動が直接的な影響を及ぼしてきたことを証明すると同時に、第二に、図1で示した弥生時代前期からの年輪セルロース酸素同位体比の気候成分を使えば、弥生時代以降のあらゆる時代のあらゆる年に起きた気候変動による水稻収穫量の変動を、ある程度は推定できることを意味している。もちろん、図5と図6に見られる相関は、完全なもの（相関係数 $r=1$ ）ではないので、農業生産力の変動に気候以外の要因も効いていることは間違いない。しかし両者は、近江の低地と甲斐の高地という全く異なる環境下で得られたものであり、図5と図6に見られる気候と農業生産量の関係性は、弥生前期以降の中日本～西日本（図3）では、時間と空間を越えてどこでもある程度の再現性を持っていたであろうことを示唆している。図5と図6では、年輪酸素同位体比と農業生産量の間に、ともに正の相関が認められるが、その量的な関係性は、図中の方程式から、「年輪酸素同位体比の“1”の増加に対して農業生産量が、それぞれ25%および8%増大する」というように、場所ごとに異なっていたことが分かる。この結果は、水害による農業生産へのダメージの方が、冷害によるダメージよりも大きいことを示すようにもみえるが、実際には、むしろ地域ごとに気候変動が農業生産に与える影響の量的な関係性は、さまざまであると考えられるべきであろう。

④……………シミュレーションモデルの提案

1. シミュレーションの目的

ここで、前近代の農業社会における農業生産力と人口の関係についての簡単なシミュレーションモデルを導入する。その目的は、気候変動に伴う農業生産力の変化が人々に与える影響を考えるにあたって、「生産力の変化が、そのまま人口の変化に比例した」というような漠然とした仮定をおくのではなく、前近代の農業社会の特徴である穀物備蓄の役割に着目することで、人口の変化についても、より多面的な考察を行うためである。

例えば、数百年の周期で生産力の大きな変動が起きれば、人口もそれに比例して大きく変化する可能性があると思われる一方で、数年の周期で生産力が大きく変動しても、人口がそれに追従して同じ周期で大きく変動することは、人間の寿命を考えると不可能であり、逆に備蓄を活用することで、食糧の消費量、つまり食糧が扶養できる人口をほぼ一定に保つこともできるはずである。それでは、その中間の時間スケール、すなわち数十年の場合はどうであろうか。こうした問題を自由に考察するために、本論ではシミュレーションモデルを使う。

2. モデルの構造と機能

モデルは、図7に示すように4つの項目、つまり農作物の年あたりの「生産量」、「消費量」、「備蓄量」と「人口」からなり、対象とする空間スケールは任意、すなわち時代ごとの農作物の流通範囲などに対応した任意の広さ、つまり村、地域、国などのさまざまなものを想定している。図7の差分方程式に記すように、年ごとの生産量と備蓄量の合計が人々の生存のための農作物の必要最低限の摂取量を上回れば、一人当たりの余剰食糧摂取量に比例して出生率は上がるとしている。一方、自然死亡率は平均寿命を概ね40歳として0.025/年で固定しているので、人口調整は出生率の変化を通じて行われるとした。このことは、歴史上、食糧供給が減った時代には、晩婚化、非婚化、新生児の間引きなどの手法で、自発的な出生率の抑制による人口調整が行われていた事実に対応している。しかし食糧供給量が人口からの必要最低限の要請を下回ったときには、餓死者や難民の発生によって強制的な人口の調整が行われることも、このモデルでは想定している。

このモデルには、2つのパラメーター（食糧摂取の増大に応じて、出生率がどの程度増大するかを示す「出生増加率」(a)と、余剰食糧のうち、どの程度の割合を実際に消費するかを示す「食糧摂取率」(b))があって、それぞれが地域ごと時代ごとの人間社会の特性を反映して変化しうると想定している。また、このモデルでは生産力は気候だけで決まり、生産力に人口は影響しないが、実際には気候変動による人口の増大（減少）は、労働力の増大（減少）を介して、農業生産を増大（減少）させ、更に人口を増大（減少）させうるので、実際にはこのモデル以上に、人口が気候変動に敏感に応答する可能性もある。

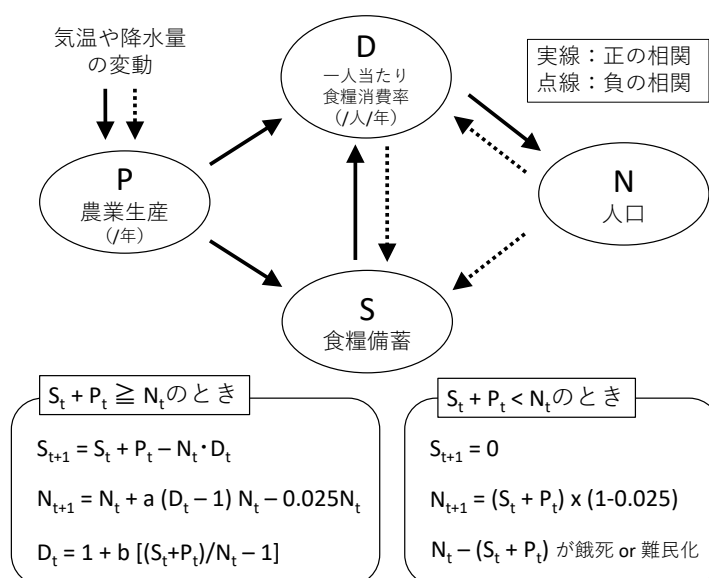


図7

気候変動が農業生産力を介して人口の変動に与える影響を評価するための「生産—備蓄—消費—人口の関係性」についてのダイナミカルモデル。式の中で添え字のtは年を表し、パラメーターのaとbは出生増加率と食糧摂取率を表す係数である。ここでは、式を簡略化するために、「一年間に一人の人間が自らの生存のために摂取すべき必要最低限の農作物の量」を1と定義しており、餓死者や難民が発生しないためには、 $S_t + P_t$ は、 N_t を下回らないことが必要である。

3. 考古学的考察のあり方

図5と図6に示したように、中部日本の年輪酸素同位体比（図1）から中日本～西日本の地域を対象に、夏の気温や降水量の変動を介して、農業生産力の変動が推定できるとしても、気候変動の農業生産量に対する影響には地域ごとに差があり、水害や冷害にも脆弱な地域と余り脆弱でない地域があるはずである。また時代ごと地域ごとに、人間社会の生業や文化の多様性から、農作物の摂取や出生率の調整のあり方にも差異があると思われる。それゆえシミュレーションでは、第6章に示すように、そうした地域ごと時代ごとの状況の違いを想定して、気候と生産力の関係（気候感度）および、出生増加率や食料摂取率について、さまざまな値を与えて、多数の計算を行うことにする。

そうした多数の計算の結果として得られる、さまざまな人口の変動パターンを中日本～西日本の各地域・各時代の実際の考古学的データと比較することで、それぞれの地域の事例が、どの計算結果に対応しうるのか、という新しい観点からの考察が可能になる。例えば、ある特定の気候感度や出生増加率、食糧摂取率の条件の下で、ある年代に気候変動によって飢饉や難民が発生すると計算された場合でも、同じ年代に、別の条件下では飢饉や難民が発生しなかった、すなわち食糧に若干の余裕が残された計算結果もあったとする。これを考古学的なデータと比較する際には、前者の事例が、人口の大幅な減少が起きる地域に対応するのに対して、後者の事例は、人口減少が必ずしも起きない、あるいは他所からの難民の流入によって、むしろ人口が増大する地域に対応すると解釈できる可能性がある。また、同じ地域の中に複数の異なる環境のエリアがあって、それぞれが異なる計算結果に対応すると考えられる場合には、計算結果の一部に見られる難民の発生は、その地域の内部での人々の活発な移動、例えば集落の標高方向への垂直移動などに対応していたと考えることもできる。

このように、多数のシミュレーションの結果と対応させて、地域ごとの社会応答の特徴を考察することで、中日本から西日本、即ち、図1のデータが気候、即ち農業生産力の変動と直結すると考えられるエリア（図3）における、包括的な気候変動の社会に対する影響評価が可能になるものと考えられる。

⑤……………気候変動の周期性と社会応答の関係

1. モデルの予習の必要性

弥生・古墳時代の実際の古気候データから推定される農業生産力の変動をモデルに導入する前に、農業生産力の変動が人口の変化にどのような影響を及ぼすかについて、その変動の周期性に着目しながらモデルを使って確認しておきたい。「食料備蓄の存在を考慮すると、農業生産力と人口が単純な比例関係になるとは限らない」ということがシミュレーションの出発点であったが、複雑な変動を示す実際の古気候データをモデルに与える前に、模式的な生産量の変動パターンを使ってシミュレーションを行っておくことが、モデルの特徴を十分に把握するために有効だと考えられるからである。

2. 数十年周期変動の影響の特異性

図8に、出生増加率(a)と食料摂取率(b)をそれぞれ0.1, 0.2とおき、農作物の生産量を4年周期、40年周期、400年周期で、それぞれ50%の振幅で変化させた際に、備蓄量、人口がどのように変化するかを、食糧の供給不足による餓死者・難民の発生数の推移と共に示した。図8aのような数年周期の生産量の変動なら、食料備蓄を活用することで凶作年を乗り切れるので、見かけ上、人口はほとんど変わらず、餓死者や難民も発生しない。しかし、図8bの数十年周期の生産量の変動の場合は、凶作が数年以上続くと食糧備蓄はやがて底を尽き、一方で出生率の抑制による人口調整も間に合わないで、結果的に大量の難民や餓死者を生む可能性がある。これは数十年周期の大きな気候変動が起ると、大規模な移民や戦乱が発生する可能性があることを示唆している。一方で、図8cの数百年周期の生産量の変動なら、出生率を抑制することで飢饉や難民の発生は抑止できるが、その結果、人口自体が大幅に減少することになるので、考古学的な情報に大きな痕跡を残している可能性がある。

実際には、数百年の間に農地面積を拡大したり、農業技術を革新したりすれば、人口の減少は克服できる可能性もあるので、人口の長期変動に関して、このモデルだけを使って単純な予想をする

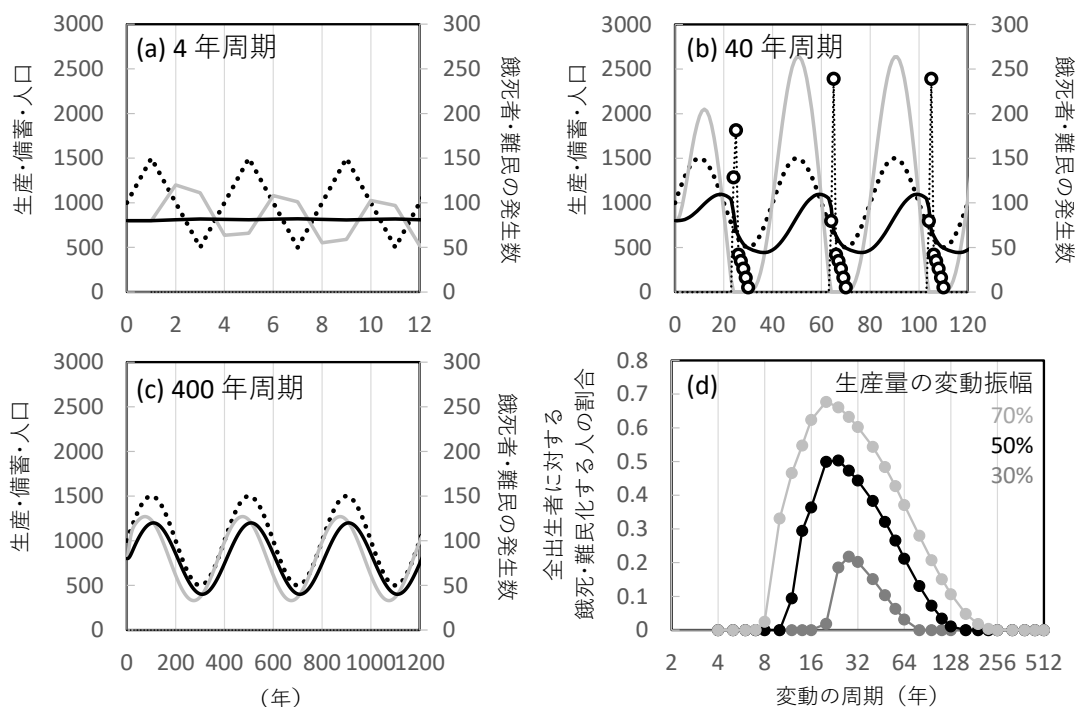


図8

気候変動の影響により農作物の生産量(黒点線)が4年(a)、40年(b)、400年(c)の周期で50%の振幅をもって変動したときの農作物の備蓄量(灰実線)と人口(黒実線)及び餓死者・難民の発生数(白丸)の変化、および生産量の変動振幅を30%(濃灰)、50%(黒)、70%(薄灰)として、変動周期を連続的に変えたときの全出生者に対する餓死者・難民の発生割合(d)。それぞれの計算は定常状態(生産量1000、備蓄量800、人口800)から始め、(d)のY軸の値は人口の周期的変動が安定した段階で計算した。ここでは、図7における出生増加率と食糧摂取率は、それぞれ0.1, 0.2とおいた。

ことは難しい。また同じ気候変動が起きても、農業生産力の変動の大きさは、図5や図6に示したように地域ごと時代ごとに異なると考えられるし、出生増加率と食糧摂取率の2つのパラメーターも時代ごと地域ごとに变化する可能性があることは、前章で述べたとおりである。

しかし次章でも具体的に示すように、最も餓死者や難民を発生させやすい気候変動のパターンが数十年周期の変動であることは、図8dに示すように、テストの条件を多少変化させても変わらない。これらの結果に留意した上で、次に実際に、弥生・古墳時代の古気候データを使って、人口の変動をシミュレーションしてみよう。

⑥……………弥生・古墳時代の生産・人口の経年変動

1. 古気候データの農業生産力への換算

古気候データを使って図7のシミュレーション計算を行うためには、最初にそれを農産物の生産量におきかえる換算式を作成する必要がある。第3章で示したように、図5と図6の近世の残高や坪刈記録と年輪酸素同位体比の気候成分の関係は、年輪酸素同位体比の“1”の変化に対して、それぞれ25%および8%の割合で变化する指数関数の形で表せる。弥生時代の水害や冷害に対する対応力が、江戸時代のそれと同水準もしくは、より脆弱だったと考えて、ここでは残高と年輪酸素同位体比の関係から導かれた関数(図5)を基準にして、それに対して1.0倍、1.5倍、2.0倍、気候変動への感度が高かったと仮定(具体的には、指数関数の指数に含まれる年輪酸素同位体比の気候成分の偏差に掛かる係数の大きさを、1.0倍、1.5倍、2.0倍)して、3種類の生産力の変動を計算した。以後、図5における「残高と年輪酸素同位体比の関係を基準とした気候感度」を本論文では暫定的に p と置く。それに対して1.5倍の気候感度($p=1.5$)を与えたときの農業生産量の変動が図9Aの灰線であり、その変動の振れ幅は、 $p=1.0$ とすると小さく、 $p=2.0$ とすると大きくなる。もっとも、3つの場合とも同じ年輪酸素同位体比のデータを基にしているの、それらの農業生産量の時間変化パターンは、振れ幅以外については同じである。

2. 多様な条件での人口変動の計算

まず、農業生産量の気候感度(p)、及び、モデルの中の2つのパラメーターである出生増大率(a)と食糧摂取率(b)の3つを、それぞれ1.5、0.2、0.2として、農作物の生産量、備蓄量、人口、餓死者・難民の発生人数の変遷について計算してみた(図9A)。ちなみに、ここでY軸の数値自体には、余り意味はない。図9の結果は、全て「年輪酸素同位体比の気候成分(偏差)が1のときに1年当りの農作物の生産量が1000(1000人が生存するために必要な1年当りの最低限の農産物の量)程度になる」、つまり、その程度の数の人々が暮らす空間スケールを想定した計算結果であるが、これを100にしても10000にしても、図7の方程式の構造が単純であるため、変動のパターン自体は変わらないことを確認している。それゆえ、ここでは人口の絶対数ではなく、その変動パターンだけを考察の対象とする。

生産量は、年輪セルロース酸素同位体比の気候成分の変動を反映して、弥生時代中期後葉まで高

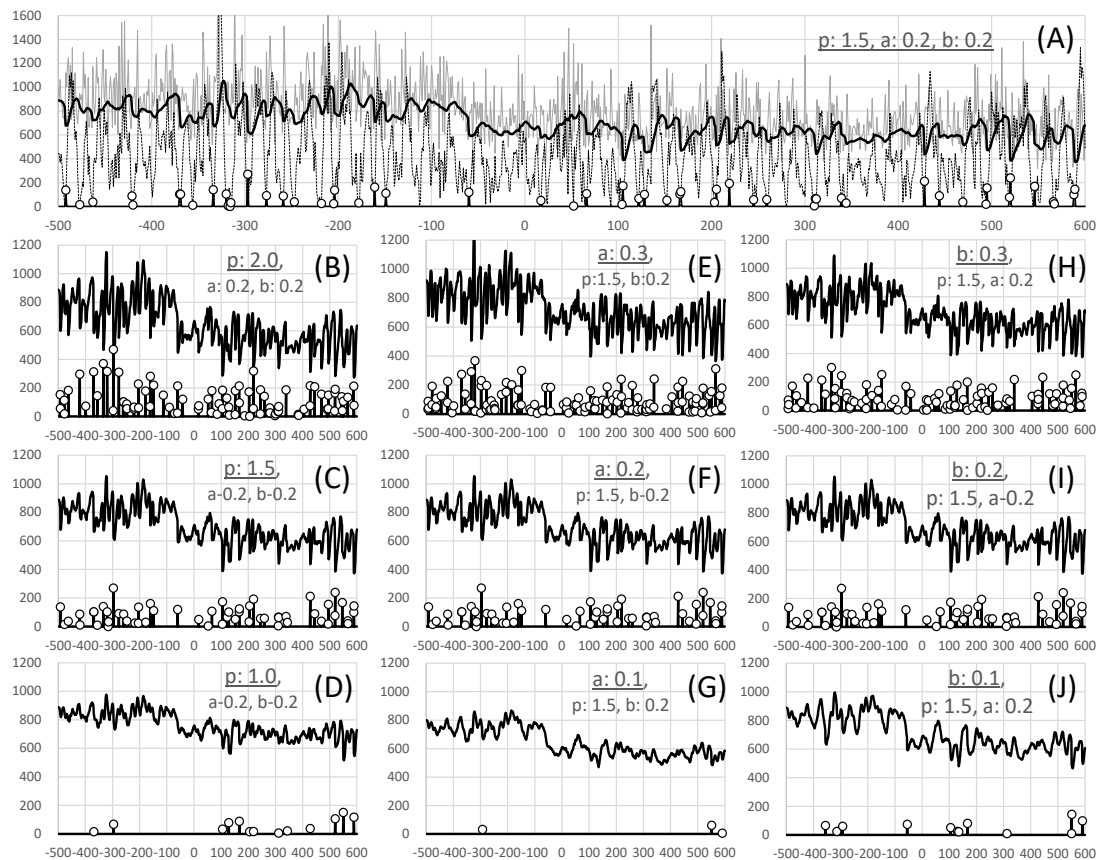


図9

弥生・古墳時代の中日本～西日本における農作物の生産量（灰実線：A）、備蓄量（黒点線：A）、人口（黒実線：A-J）の変動、及び食糧不足による餓死者や難民の発生数（白丸：A-J）のシミュレーション。横軸は、西暦（紀元前500年～紀元600年）を表す。計算には図7のモデルと、中部日本の年輪酸素同位体比の気候成分（図1）、および近世における図1と農業生産力との関係（図5）を利用した。（A）では、気候感度（ p ）、出生増加率（ a ）、食糧摂取率（ b ）を、それぞれ1.5、0.2、0.2として計算し、（B-D）、（E-G）、（H-J）では、それぞれ気候感度（ p ）、出生増加率（ a ）、食糧摂取率（ b ）だけを変化させて、計算した。

く、弥生時代後期から古墳時代で低くなり、人口もそれに対応して変化するが、実際には、農地の拡大や技術の進歩によって、生産量は気候変動とは関係なく長期的に増大しうるので、人口の長期的な比較の信頼性は低い。しかし、異なるパラメーターや気候感度で計算した全てのパネルに普遍的にみられる、紀元前1世紀の急激な人口減少などの中期的な変化は、時間スケールからみても十分な信憑性があると言える。

図9B-Dに示すように、農業生産量の気候感度（ p ）が大きいほど、生産量の変動の振幅が大きくなるので、人口もそれに対応して激しく変化する。そして、食料が不足する時期には、餓死者や難民が大量に発生することになる。しかし、 p が小さければ、そうした不慮の餓死や移住を迫られる人々の発生頻度は少なくなる。同じ気候感度（ $p=1.5$ ）であっても、出生増加率（ a ）が大きくなると、人口の変動が激しくなり、結果的に餓死者や難民が発生してしまう機会が増える（図9E-G）。同様に、食糧摂取率（ b ）が増加すると、備蓄が減少しやすく、人口が増加するスピードが速くなるので、結果的に人口の変動が激しく、餓死者や難民が発生するリスクが拡大する（図9H-J）。

3. 多数の計算結果の相同・相違性

考古学的な資料との比較を行う際に重要となってくると考えられるのが、第一に、紀元前1世紀における人口の急減のように、全ての計算結果に普遍的にみられる中・長期的な人口変化であり、第二に、餓死者や難民の発生といった中期的な人口関連のイベントである。

前者には、図1の年輪酸素同位体比の千年スケールの長期変動を反映して、全ての計算結果において、「弥生時代の方が古墳時代よりも人口が多い」という結果も含まれるが、先述のように、このモデルには長期的な農地面積の拡大や農業技術の革新の効果が入っていないので、人口の長期変動の解釈については注意が必要である。一方、後者の発生率は、気候感度や出生増加率、食糧摂取率の違いによって大きく変化するが、大変興味深いことに、いずれの計算結果でも、餓死者や難民の発生イベントは、紀元前4-3世紀、紀元2世紀、紀元6世紀を中心とする特定の時代に集中している。

同じ時代に餓死者や難民の発生が集中するのは、その時代に前章で議論した数十年周期の気候変動の振幅拡大が起きているからである(図1)。その中でも、異なる気候感度やパラメーターを用いた計算結果を相互に詳細に比較すると、同じ年に餓死者や難民が発生する場合もあれば、餓死者や難民の顕著な発生年が数十年単位でずれてくる場合もある。このことは、食料備蓄の度合いや人口増加のスピードの違いによって、同じ気候変動が起きた場合でも、地域ごとに異なるタイミングで餓死者や難民が発生する可能性を示しており、考古学的な資料との対比を行う上でも、重要な知見になると思われる。

⑦……………弥生～古墳時代史への示唆

1. 近畿の集落動態との比較

図9の計算結果が、中日本～西日本の弥生～古墳時代の遺跡の資料と、どのような関係にあるかについての詳細な評価は、今後の考古学的な比較検討に委ねたいが、ここでは既に報告されている包括的な中日本～西日本の当該時代の集落動態の特徴との間で、原初的な比較を行いたい。具体的には、森岡ら[2016]が取りまとめた、近畿地方一円における弥生時代から古墳時代にかけての集落動態の変遷、特に遺跡数や建物跡数から推察される広域で共通した人口変動の画期との比較である。そこでは、弥生時代中期から古墳時代中期にかけて、以下のように、おおむね4つの画期が認められている。すなわち、画期Ⅰは、弥生時代中期後半から後期前半にかけての「人口減少」、画期Ⅱは、弥生時代後期前半から後期後半にかけての「人口増加」、画期Ⅲは、弥生時代後期後半から庄内式期にかけての「人口増加」、画期Ⅳは古墳時代前期後半から中期前半にかけての「人口増大」である。

第1章でも述べたように、存続期間の明確でない土器型式の相対編年に対応させた遺跡数や建物跡数のデータから、必ずしも人口の変化を定量的に推定できるとは限らないが、明確に認識されている特定の土器型式の時代に、集落址が一斉に消滅、あるいは増加しているのであれば、そのこと

をもって、人口が減少あるいは増大したと考えることは、議論の出発点としては、正しいものと思われる。この知見を、図9の計算結果と比較するためには、画期のそれぞれの暦年代を指定しておく必要がある。現時点で、考古学者の間で、それぞれの画期の暦年代が完全に定まっているわけではないが、森岡ら[2016]の中では、概ね、以下のように想定されているものと思われる。すなわち、画期Ⅰは、紀元前後、画期Ⅱは、紀元100年前後、画期Ⅲは、紀元2世後半、画期Ⅳは、紀元400年前後を中心とする時期を表していると考えられる。

これらの年代観を前提に、4つの画期を図9における人口変動の計算結果と比較してみると、まず、画期Ⅰは、紀元前1世紀に起きた大規模な寒冷・湿潤化に伴う人口の減少が、それをもたらしたと考えることができる。画期Ⅱについては、1世紀半ばの数十年間に及ぶ温暖・乾燥化によって人口が盛り返したことが、図9から想定できるので、そのことが対応している可能性がある。画期Ⅲの時期は、気候の数十年周期での変動が激しい時期にあたり、人口も乱高下するので、そのことが遺跡数や建物跡数の増大という形で、各地域に認められた可能性があるが、土器の型式編年の時間解像度の制約から、どのタイミングの人口増加が画期Ⅲに対応しているのかを明らかにすることは現時点では難しく、それは今後の課題である。画期Ⅳについては、図9において、生産量や人口の変動が比較的緩やかな時期に当たっており、徐々に温暖・乾燥化が進行する中で、人口の堅調な増大が見られることが、画期Ⅳに対応している可能性がある。

2. 時代区分との対応関係

図9のシミュレーションは、長周期の変動については、モデルに農地面積の変化などの考慮がされていないので、余り意味がないが、数十年以内の周期の変動については、前述の人口の変動パターンに加えて、食糧の絶対的な不足、即ち餓死者や難民が発生するタイミングを推定できることから、大きな意味があると考えている。特に、紀元前4-3世紀、紀元2世紀、紀元6世紀に、モデルが予測する飢饉や難民の発生イベントが集中していることは、時代の変化を考える上で、大変興味深い。

紀元2世紀と6世紀は、それぞれ弥生時代と古墳時代の終末期に当たり、文献史的にも、倭国乱（2世紀）や磐井の乱、武蔵国造の争い（6世紀）のように各時代を代表する内乱が起きたとされている時代でもある。数十年周期での気候変動に伴う農業生産量の大きな変動が、人口の乱高下と激しい食糧不足をもたらし、それが飢饉や難民の発生を介して、当該期の内乱を発生させたとするれば、それが正に、気候変動が時代の転換をもたらす具体的なメカニズムの一つに対応していると言えるかもしれない。2世紀の後半から始まる庄内式期の時代は、全国的に各地域の土器が移動する、すなわち人々の流動が確認できる時代である。図9で計算される地域ごとの飢饉や難民の頻発が、そうした人々の流動の原因であったと考えることは、想像に難くはない。

紀元前4-3世紀は、弥生時代中期前半に当たり、北部九州などで戦乱が頻発したことが、吉野ヶ里遺跡の多数の戦傷遺体の存在などからも知られている。日本国内に同時期の文献史料は一切残されていないが、この時代は丁度、中国における戦国時代に当たっている。図3のように、中部日本の年輪酸素同位体比は、日本のみならず中国東部の気候変動ともよく対応しているので、東アジア全体で、当該期に気候の数十年周期変動の振幅拡大に伴って、飢饉や難民が繰り返し発生し、社会不安が増大していた可能性は高い。ちなみに中国における動乱は、前述の2世紀（後漢の衰亡期）

と6世紀（隋による南朝の征服期）にも頻繁に起きているので、気候変動に対する社会の応答は、時代を越えて広域で同調していた可能性が指摘できる。

⑧……………おわりに —— 今後の課題

1. 考古学的知見との対比の促進

前章では、近畿地方の集落遺跡のデータ集成の結果との原初的な比較を少し行ったが、図9に示した生産量と人口、飢饉や難民の発生などの計算結果は、精度の高い年単位の古気候データに基づいているという意味で、今後、日本各地の考古学的知見との総合的な対比を行っていく価値があるものと考えられる。特に、地域ごとの集落址や水田址の数の変遷、及びその場所、すなわち標高の変遷などに対比することによって、気候変動が農業生産量の変動を介して、どのように人口の変化やその流動をもたらしたのかを議論できるとともに、年輪酸素同位体比が直接示唆する水害や干害などの気候災害の発生に対して、地域社会がどのように対応したのかを、きめ細かく解析することができる。その際には、遺跡出土材の年輪酸素同位体比が明らかにできる遺跡や遺構の暦年代を踏まえて、遺跡や遺構の情報を、年単位での気候の復元や生産・人口の推定と直接対比することも、有効であろう。

こうした取り組みでは、図9にも示した、同じ気候変動に対する多様な社会応答の可能性を前提にして、同時代の異なる地域間での集落や水田の動態の「違い」に積極的に着目していくことが、特に重要であると思われる。そうした取り組みの中から、先史時代の日本列島の人々の気候変動に対する応答のあり方を、空間的に総合的に明らかにしていくことができるであろう。また、図9の計算には未だ全く反映されていない技術革新や農地開発などの積極的な人々の環境応答のあり方についても、計算の結果と遺跡の事実の間での不一致点、矛盾点を徹底的に考察する中から、浮かび上がらせていくこともできるはずである。

2. 先史社会データの定量化と共に

図9の計算結果は、曲がりなりにも定量的であり、年単位で年代が確定した情報である。こうしたデータを本格的に活用していくためには、比較対象となる遺跡や遺物の数値データの方も、より定量的な情報にしていくことが求められる。その際には、本論文の第1章でも書いたように、同一遺跡や同一地域内における「木器の出現年代別ヒストグラム」などの人間活動の変遷を示す定量的データが、新しい指標として登場してくることが期待される。一般に、低湿地の遺跡から出土する大量の杭や板などの木材の大部分には、樹皮直下までの年層が入っていることが多く、転用される可能性も少ないので、1本1本の年単位での伐採年代の特定が原理的に可能である。しかし実際には、含まれている年輪の数が10年程度しかないものが多く、年輪数の少なさという意味で、年輪酸素同位体比を用いても、その年代を決定することは難しかった。

近年、年輪に含まれるセルロースの酸素や水素の同位体比を、その年層内変動、すなわち季節変動のレベルまで分析することで、年輪数の少ない小径木についても、1本1本の年代を確定させ

て行ける技術の開発が進みつつある[李ら, 2019 など]。そうした新しいデータからは、先史時代の
人々の活動の定量的な記録としての「木器の出現年代別ヒストグラム」が本当に取得できる可能性
がある。こうした技術の発展と共に、定量的な先史時代像が、次々に明らかになり、そのデータを
本論文で述べたシミュレーション結果などと比較することにより、先史時代の理解がより総合的・
定量的になっていくことを期待している。

参考文献

- 井上智博・中塚武・李 貞・對馬あかね・佐野雅規・遠部慎・中原計 「酸素同位体比年輪年代法による池島・福万寺
遺跡の弥生時代水田に関する年代観の構築」『大阪文化財研究』, 51, 1-26, 2018
- 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
- 斉藤颯人・木村勝彦・箱崎真隆・佐野雅規・對馬あかね・李 貞・中塚武 「年輪酸素同位体比分析による多賀城跡西
辺の柵木の年代決定」『多賀城跡（宮城県多賀城跡調査研究所年報2017）』42-45, 2018
- 阪口豊 『尾瀬ヶ原の自然史—景観の秘密をさぐる』中公新書, 中央公論社, 1989
- 佐藤常雄 『日本稲作の展開と構造』吉川弘文館, 1987
- 對馬あかね・李 貞・中塚武・仁木聡 「島根県出土材の酸素同位体比年輪年代法による年代決定」『古代文化研究（島
根県古代文化センター）』27, 1-16, 2019
- 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
- 中塚武 「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」『国立歴史民俗博物館研究報告』2022
（印刷中）
- 樋上昇・中塚武・大石恭平 「稲沢市下津宿遺跡出土井戸枠の酸素同位体比年輪年代測定結果について」『愛知県埋蔵
文化財センター研究紀要』16, 49-68, 2015
- 藤本久志編 『日本中世気象災害史年表稿』高志書院, 2007
- 水越充治 「文書記録による小氷期の中中部日本の気候復元」『地学雑誌』102, 152-166, 1993
- 森岡秀人・三好玄・田中元浩 「総括」古代学研究会編『集落動態からみた弥生時代から古墳時代への社会変化』
六一書房, 355-398, 2016
- 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
- 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.
- Grießinger, J., Bräuning, A., Helle, G., Thomas, A., and Schleser, G. “Late Holocene Asian summer monsoon variability reflected
by $\delta^{18}\text{O}$ in tree-rings from Tibetan junipers”. *Geophysical Research Letters* 38, L03701, 2011.
- Li, Q., Nakatsuka, T., Kawamura, K., Liu, Y., and Song H. “Hydroclimate variability in the North China Plain and its link with El
Niño–Southern Oscillation since 1784 A.D. Insights from tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ ”. *Journal of Geophysical Research* 116,
D22106, 2011.
- Liu, Y., Cobb, K. M., Song, H., Li, Q., Li, C.-Y., Nakatsuka, T., An, Z., Zhou, W., Cai, Q., Li, J., Leavitt, S. W., Sun, C., Mei,
R., Shen, C.-C., Chan, M.-H., Sun, J., Yan, L., Lei, Y., Ma, Y., Li, X., Chen, D., and Linderholm, H. W. “Recent
enhancement of central Pacific El Niño variability relative to last eight centuries”. *Nature Communications* 8, 15386,
doi:10.1038/ncomms15386, 2017.
- Nakatsuka, T., M. Sano, Z. Li, C. Xu, A. Tsushima, Y. Shigeoka, K. Sho, K. Ohnishi, M. Sakamoto, H. Ozaki, N. Higami, N.
Nakao, M. Yokoyama, T. Mitsutani, “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, <https://doi.org/10.5194/cp-16-2153-2020>, 2020.
- Sano, M., Xu, C., and Nakatsuka, T. “A 300-year Vietnam hydroclimate and ENSO variability record reconstructed from
tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ ”. *Journal of Geophysical Research* 117, D12115, 2012.

-
- Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D. C., Winiger, M., Haug, G. H., and Esper, J. “The 20th century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium”. *Nature* 440, 1179–1182, 2006.
- Xu, C., Sano, M., and Nakatsuka, T. “Tree ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ of *Fokienia hodginsii* in northern Laos: A promising proxy to reconstruct ENSO?”. *Journal of Geophysical Research* 116, D24109, doi: 10.1029/2011JD016694, 2011.

(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)

(2020 年 12 月 11 日受付，2021 年 2 月 9 日審査終了)

Simulation of Variations in Climate, Agricultural Production, and Population During Yayoi and Kofun Eras Using Tree-Ring Oxygen Isotopic Ratios

NAKATSUKA Takeshi

Oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of tree-ring cellulose, a novel proxy sensitive to summer precipitation and temperature, can be utilized to estimate past inter-annual variations in paddy rice productivity. In fact, tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in central Japan shows high correlations with documentary records on paddy rice productions in Ohmi and Kai regions during early modern era, indicating that premodern paddy rice productions were seriously influenced by summer climate. I applied this relationship to tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ time-series in central Japan during Yayoi and Kofun eras since 500 BCE in order to calculate inter-annual potential variations in paddy rice productivity and human population in southern Honshu using differential equations consisting of four variables (agricultural production, storage, consumption, and population). Although long-term variations in population cannot be discussed here because of the lack of changes in agricultural technology and rice paddy areas in the equation, their middle-and short-term variations are illustrated clearly as the decrease in population due to rapid wetting and cooling in 1st century BCE and the frequent occurrence of famines and refugees in 3rd–4th centuries BCE and 2nd and 6th centuries CE caused by enhancements of multi-decadal climate variability, those are comparable with archeological evidences and historical literature.

Key words: tree ring, oxygen isotope ratio, climate variability, agricultural productivity, human population