

# 縄文時代の寒冷化事象

小林哲夫

[ 無所属 (日本農業気象学会フェロー) ]

## Cooling Events in the Jomon Period

Tetsuo KOBAYASHI

[ Nonaffiliated (Fellow of SAMJ) ]

### 1. 序

もし、縄文時代の日本に野生のイネがあり、それが栽培化されて食料になったとすれば、縄文時代に気候の寒冷化を経験する必要があったという (佐藤, 2022)。ジャポニカ型の野生のイネは栄養繁殖性が強く、弱い種子繁殖性を強めるためには、寒冷化など、気候の激変が必要だったという。佐藤 (2022) は、寒冷化は 12000 年前と 3000 年前に起きたという前提の下で、前者は時期的に早すぎ、後者は逆に遅すぎると考え、日本に野生のイネはなかったとする説の一つの根拠とした。

相対的海水準 (海面水位) の時間変化を見ると、大陸の大規模氷床の融解に支配される海面水位の上昇が一時的に減速するか、海面低下が加速するのは、気候の寒冷化のサインである。関東平野における海面水位の時間変化を見ると (遠藤ほか, 2022)、確かに、約 12000 年前と 3000 年前にそれが認められるが、9000 年前と 5000 年前にもそれらしき痕跡が見られる。

野生のイネの栽培化と気候寒冷化の関係についての議論は、作物学の専門家に委ねざるをえないが、農業気象学を学ぶ立場から、本稿では縄文時代の寒冷化事象は、いつ、どのような原因で起きたのかについて、従来の知見を整理したい。

### 2. 完新世の気候

気候変動は放射強制力 (大気圏外縁における正味放射フラックス) の変動と内部変動によると考えられる。放射強制力の変動の原因としては、地球軌道、太陽活動、火山噴火、温室効果ガス濃度、氷床や植生などの地表面状態が考えられ、それぞれ固有の時間スケールを持つ。たとえば地球軌道は 1000 年以上、太陽活動は 10~100 年、火山噴火は数年の時間スケールで変動する。また内部変動としては、おもに大気循環や海洋循環などの変動が考えられる。

更新世末期の氷期 (ウルム氷期) においては、約 22000 年前 (以後、BP) に、北米大陸のローレンタイド氷床などの規模が最

大になった。融解による氷床の規模縮小は 18000 BP 頃から始まり、約 7000 BP まで続いた。この現象は、地球軌道と温室効果ガス濃度の変動に支配されたと考えられる。完新世は約 11500 BP に始まったとされるが、これは短期的な寒冷期であるヤングドリアス (YD) 期が終わった時点に相当する。

更新世から完新世への過渡期 (退氷期) には、たびたび、氷床融解水の流入などによって大西洋の子午線方向反転循環 (MOC) が抑制され、大西洋における北向き熱輸送が減少したために、寒冷期が訪れたと考えられている。YD 期はその代表例であり、8200 BP 頃にも、スケールは小さいが、同様の寒冷期が現れ、8.2k 事象と呼ばれる (小林, 2022)。上記の海面水位変動に現れた約 12000 BP と 9000 BP における寒冷化の痕跡は、これらの事象に相当すると思われる。

完新世には、地球軌道パラメタの変動により、北半球高緯度帯の夏の大气圏外縁の日射強度  $Q(60N, \text{June})$  は、約 11000BP に最大になり、その後 9000BP の約  $520 \text{ Wm}^{-2}$  から最近の約  $480 \text{ Wm}^{-2}$  まで  $40 \text{ Wm}^{-2}$  も減少した (Renssen *et al.*, 2006)。その結果、地表温度は、傾向としては低下したが、亜熱帯大西洋の海面水温は逆に上昇傾向を示した (Wanner *et al.*, 2008)。地球全体で見れば、地表温度変化の地理的分布は、単純ではない。

南極大陸やグリーンランド以外の大規模な氷床が融けて消失してからも、両氷床や高緯度の小規模な氷床、海氷、あるいは山岳氷河の拡大収縮が起きていた。拡大が顕著な時期は約 5400~4800 BP, 3800 BP, 3100~2500 BP, および 1400~1500 BP で、最初の拡大期は、約 8000 BP から 6000 BP まで続いた気候最適期あるいはヒブシサーマル期の終焉を示しており、本報のテーマである縄文時代の寒冷化事象と考えられる。また、最後の拡大期は小氷期と呼ばれる (Wanner *et al.*, 2008)。

約 150 BP 以後は、地表温度は上昇傾向に転じたが、この時期は人間活動の影響が大きく、完新世に対して人新世と呼ばれることがある。

### 3. 太陽活動の変動

完新世に現れた寒冷期の長さは高々 100 年の時間スケールである。したがって、その寒冷期をもたらす原因の最有力候補は、太陽活動と考えられる。

太陽-地球間の平均距離 (1 AU) における太陽放射エネルギー密度は、習慣的に太陽定数と呼ばれる。しかしながら、そ

の値は一定ではなく、1361 Wm<sup>-2</sup>前後で変動しており (Haigh and Cargill, 2015), その変動幅は 0.1%以上になる。また、11 年周期の変動が顕著であることが知られている。そこで現在は、太陽定数の代わりに TSI (total solar irradiance) と呼ばれることが多い。ただし波長帯別に見ると、変動幅は紫外線帯で大きく、1~10%にもなる (Haigh, 2011)。

太陽はプラズマ (正イオンと電子が混在する物質の状態、または高温電離ガス) の球状塊で、緯度によって角速度が異なる複雑な自転運動をしている。地球から球体に見える部分は光球と呼ばれ、その上に彩層、さらにコロナが広がる。電子が運動すると周囲には磁場が作り出されるので、太陽周辺には磁場が発達する。黒点は、光球面に出入りする磁力線が集中する、周囲よりは低温の領域である。太陽の活動度は、一般に黒点数で表現され、黒点数が多いときには TSI も大きい。磁力線は N 極を出て S 極へ入るので、黒点は両極がペアをなすよう光球面上に分布し、磁力線は光球外でループを描く (Lang, 2006)。

太陽近傍の磁場は強く、プラズマは閉じ込められているが、太陽から離れると磁場は弱まり、重力も弱まるので、プラズマは磁場の拘束を脱して太陽風となり、宇宙空間へ磁場を運ぶ。光球半径の約 215 倍離れた地球周辺では、磁力線のループが開いて、惑星間磁場 (IMF)  $\mathbf{B}$  の半径方向成分  $B_r$  は、近似的に太陽の緯度と無関係になる (Wang and Sheeley Jr., 1995)。そこで、次式によって地球軌道上の太陽フラックス (open solar flux)  $F_s$  を定義する。

$$F_s = \frac{1}{2} 4 \pi r^2 \langle |B_r| \rangle$$

ここで、 $r = 1 \text{ AU}$ 、 $\langle | \rangle$  は絶対値の半径  $r$  の球面上の時空間平均を示し、係数の 1/2 は、磁力線の外向き成分だけをカウントすることを意味する。

$F_s$  と TSI は正比例、 $F_s$  と銀河系宇宙線 (galactic cosmic ray, GCR) とは反比例の関係にあることが確認された (Lockwood *et al.*, 2010)。したがって、太陽活動を表わすプロキシ (代用指標, proxy) として GCR が使えることが分かる。太陽活動が弱いとき、すなわち  $F_s$  が小さいとき、GCR は大きくなる。

宇宙線は、約 90% が陽子、9% がヘリウムの核、残る 1% がより重い核から成る (Abreu *et al.*, 2012)。宇宙線の高エネルギー粒子が大気中の N や O に作用すると、それが「原始核工学的カスケード」の引き金になり、放射性核種 <sup>10</sup>Be や <sup>14</sup>C などが生成される (Wu *et al.*, 2018)。したがって、太陽活動が弱いとき、多くの <sup>10</sup>Be や <sup>14</sup>C が生成されることになる。グリーンランドや南極から採取された氷床コア内の <sup>10</sup>Be の時系列、あるいは樹木の年輪などから測定された <sup>14</sup>C の時系列は、同時期の太陽活動度の時系列と逆位相の関係を示すプロキシになる。1610 年以降については、太陽活動度を直接的に示す太陽黒点数の実測データがあるが、過去数 1000 年間の太陽活動度を知る手がかりは、このような宇宙線由来の放射性核種の時系列にある。なお、オーロラの発生数も太陽活動度のプロキシになる (Lang, 2006)。活動が活発なときは発生頻度も高い。

Wu ほか (2018) は、グリーンランドと南極で得られた 6 種類の <sup>10</sup>Be の時系列と、INTCAL09 の <sup>14</sup>C の時系列を用いて、過去 9000 年間の太陽活動度を推定し、その結果を等価黒点数で表わした。それによると、太陽の活動が弱かった時期、すなわち等

価黒点数が極端に少なかった時期は、約 8000~7300 BP, 5600~4800 BP, 2800~2400 BP, および 1300~300 BP であった。上記の氷河拡大期と比較すると、3800 BP を除いて、両者はほぼ重なる。ただし、完新世前期 (6000 BP 以前) については、氷河の拡大収縮に関するデータはない。

#### 4. 太陽活動変動の増幅機構

過去 9000 年間の大気圏外縁の夏の日射強度  $Q$  (60N, June) と太陽活動度 (<sup>14</sup>C に基づく TSI のアノマリ) の時間変化を見ると (Renssen *et al.*, 2006), TSI の変動振幅は高々 4 Wm<sup>-2</sup> で、 $Q$  の変動幅約 40 Wm<sup>-2</sup> と比較するとオーダーが一つ小さい。したがって、TSI の変動が気候に有意な影響を及ぼすためには、その変動を増幅する機構、すなわち正のフィードバック機構が必要になると思われる。

太陽活動の増幅機構には、海洋循環か大気循環の変動が絡むと考えられる。ここでは、海洋循環が TSI の変動と連動する増幅機構と、大気循環が紫外線帯の変動と連動する増幅機構の例を示す。

##### 4.1 TSI の変動

Renssen ら (2006) は、北海の海氷量に注目して、過去 9000 年間についてシミュレーションを行なった。何らかの原因で北海の海氷量が増大すれば、アルベドは増し、海氷の熱遮断効果によって深対流は妨げられ、MOC が弱まる。その結果、南からの熱エネルギー供給量が減り、海氷量はさらに増大する。これが期待される正のフィードバック機構である。海洋循環である MOC が増幅機構の主役となるのは、退氷期における YD 期や 8.2k 事象をもたらした機構と同じである (小林, 2022)。

上記のように、 $Q$  (60N, June) は単調に減少するので、地表温度を低下させる方向に作用する。寒冷化事象は、 $Q$  の低下に伴い非線形的に発生するか、あるいは TSI の減少のような別の現象が重なるなどして、生起するものと考えられる。

Renssen ら (2006) のシミュレーションでは、寒冷化をもたらす複数の原因の中で、太陽活動の変動が寄与する程度を確率で表現するように工夫された。変動幅の小さい太陽活動度が海氷量の変動に影響する確率は、もともと  $Q$  が大きい完新世前期では小さく、 $Q$  が減少する中期以降、次第に大きくなった。全球年平均気温への反応を見ると、TSI の負のアノマリが比較的長時間継続したときにのみ、海氷の大規模な形成によって、寒冷化事象の継続時間は約 50 年間長引いた。継続が比較的短時間の場合にはそのような延長は起きなかった。比較的長引く寒冷化事象は、5200 BP, 2700 BP, および 500 BP を中心とする時期に現れた。

##### 4.2 紫外線帯の変動

西ヨーロッパでは、850 BC (2800 BP) 事象と呼ばれる低温湿潤事象がよく知られている (Beer and van Geel, 2008)。この事象は太陽活動の変動に起因すると考えられており、変動振幅が大きい紫外線帯 ( $\lambda = 200 \sim 300 \text{ nm}$ ) に注目したシミュレーションが行なわれた (Martin-Puertas *et al.*, 2012)。具体的には、紫外線量の変動が中層大気の加熱とオゾンに関わる化学プロセスに

影響し、その結果、成層圏の極渦に生じる乱れが対流圏上層のジェット気流に伝わり、北半球中緯度の気候に影響するという、いわゆる「トップダウン」機構についてのシミュレーションである。

実際のシミュレーションは、最近の太陽活動の11年周期の変動を対象とし、太陽活動が最低のときと平均的な状態を比較する形で行なわれた。その結果、太陽活動が弱く紫外線量が少ない時期には、晩冬から早春にかけて、次のような特徴が現れた:

海面気圧は、アイスランドでは高くなり、亜熱帯大西洋(アゾレス諸島)では低くなった。これは、気圧の南北勾配が減少するNAO(北大西洋振動)の負のフェーズに似ている(Serreze and Barry, 2009)。このような条件下では、北部・中部ヨーロッパでは気温が低く、グリーンランドでは高い傾向がある。また北大西洋のストームトラックは南へ移動し、湿った空気を中部・南部ヨーロッパへ送り込み、降水量は増える。

これらの結果を再解析データ(reanalysis data)と比較することにより、「トップダウン」機構の作動が確認された。

## 5. 縄文時代の「イネの証拠」

Grainger (2020)によれば、縄文時代は、大雑把に言って、約10000 BPから2000 BPまでの8000年間続いた。ヒトは、10000 BP頃までは、小動物を追い、魚を取り、ドングリや根菜類などを集める狩猟採集生活をしていたが、次第に半定住または定住状態で、陸上での狩猟採集だけでなく海岸での漁労に頼る日本列島独特の定住採集生活が主流になった。しかし2000 BP頃までには、稲作中心の農業生活に移行した。

Higham (1995)によれば、縄文時代初期から、狩猟採集者により山焼きが行なわれていたことが、花粉分析により確認されている。しかし栽培が行なわれた形跡はない。海面水位がピークに達した7000~6000 BP頃になっても、農業が営まれた証拠はない。4500 BP以後になると山焼きだけでなく山林伐採の痕跡も認められる。もっとも早い「イネの証拠」は九州北部で見つかり、3300 BP頃と推定された。また、3000 BP頃になると、イネ栽培が後期縄文時代の日本列島に広がった。

佐藤(2022)によれば、「イネの葉の証拠(プラントオパール)」が岡山で発見され、6400 BP頃と推定された。これが「イネの証拠」に相当すると見なせるならば、上記の5000 BPと3000 BP頃に生じた2回の寒冷化事象は、イネの栽培化を含む、縄文時代後半の文化的進化の引き金になった可能性がある。人類初の文明が、5500 BP頃にメソポタミアで生まれたという説(小林, 2020)も、まったく無関係の話ではないように思える。

## 6. むすび

序で指摘した約5000 BPの寒冷化事象の影の薄さは、わが国における一般的な認識でもあるように思える。たとえば「縄文時代の歴史」(山田, 2019)の中で、著者の山田氏は、海面水位が低下し始めた6000 BP以降、「次第に気温自体は低下していたが、それも急激なものではなく、むしろ温暖で安定した気候が続いていた」と記している。

しかしながら、Magny and Haas (2004)によれば、チロリアンアルプスで発見された「アルプスのアイスマン」が生存していた頃

(5320~5050 BP)は、程近いボーデン湖の水位は上昇し、アルプスの山岳氷河は拡大した。チロル地方は寒冷で湿潤な状態にあった。この頃は、ヒプシサーマル期からネオ氷期へ変わる気候変換期で、世界中で寒冷化の傾向が認められ、多くの事例が確認されている。たとえば、中国や日本の南部を含むアジアモンスーン地帯でも、5500~4500 BP頃、偶然ではなく、統計的に有意な気候変動が起きた。すなわち、モンスーンは弱まり、チロル地方同様に寒冷であったが、乾燥していた(Morrill et al., 2003)。Magny and Haas (2004)は、これらの気候の変遷は地球軌道変動と太陽活動変動の連携によるものと推測した。

Lambの古典的なテキストのFig.52に(Lamb, 1995)、過去5400年間の、ホワイト山地(カリフォルニア)の樹木限界線近くのプリスルコーンパインの年輪幅の時間変化が示されている。明らかに、約5000 BPと3000~2500 BPに年輪幅の狭い、すなわち生長不良の期間が見られる。上述の東京湾の海面水位低下や、高緯度の小規模な氷床や山岳氷河の拡大と共に、約5000 BPと3000 BPに寒冷化事象が出現したことを示す有力な証拠と考えられる。その原因としては、GCRの増大との同時性などから、太陽活動度の低下が重要な役割を果たしたと推測される。

わが国における野生のイネの存在とその栽培化についての議論は、6400 BP頃のプラントオパールの発見と、5000 BP頃の寒冷化を前提にすれば、別の結論に至る可能性があるのかもしれない。

## 引用文献

- 遠藤邦彦・小宮雪晴・野内秀明・野口真利江, 2022: 縄文海進-海と陸の変遷と人々の適応-. 富山房インターナショナル, 東京, pp. 129.
- 佐藤洋一郎, 2022: イネの日本史(3版). 角川ソフィア文庫, 東京, pp. 235.
- 小林哲夫, 2022: ヒト進化論のための気候学. SPA & Water 出版, 福岡, pp. 187.
- 小林登志子, 2020: 古代メソポタミア全史. 中公新書, 東京, pp. 304.
- 山田康弘, 2019: 縄文時代の歴史. 講談社現代新書, 東京, pp. 325.
- Abreu JA, Beer J, Steinhilber F, Christl M, Kubik PW, 2012:  $^{10}\text{Be}$  in ice cores and  $^{14}\text{C}$  in tree rings: Separation of production and climate effects. *Space. Sci. Rev.* **176**, 343-349.
- Beer J, van Geer B, 2008: Holocene Climate Change and the Evidence for Solar and Other Forcings. In *Natural Climate Variability and Global Warming. A Holocene Perspective.* (ed. By R.W. Battarbee and H.A. Binney). Wiley-Blackwell, pp. 138-162.
- Grainger JD, 2020: *Climate Change. An Archaeological Study.* Pen and Sword Books, Yorkshire, pp. 288.
- Haigh PJ, 2011: Solar Influence on Climate. *Grantham Institute for Climate Change. Briefing paper No.5.* Imperial College London. pp.20.
- Haigh PJ, Cargill P, 2015: *The Sun's Influence on Climate.*

- Princeton University Press, Princeton and Oxford, pp. 207.
- Higham C, 1995: The transition to rice cultivation in southeast Asia. In *Last hunters-first farmers*. (ed. By Price TD, Gebauer AB). SAR Press, Santa Fe, pp. 127-155.
- Lamb HH, 1995: *Climate, History and the Modern World*. Routledge, London and New York, pp. 433.
- Lang KR, 2006: *Sun, Earth and Sky*. Second edition. Springer Science + Business Media, New York, pp. 284.
- Lockwood M, Harrison RG, Woollings T, Solanki SK, 2010: Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environ. Res. Lett.* **5**, 024001.
- Magny M, Haas JN, 2004: A major widespread climatic change around 5300 cal. yr BP at the time of the Alpine Iceman. *Journal of Quaternary Science* **19**, 423-430.
- Martin-Puertas C, Matthes K, Brauer A *et al.*, 2012: Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum. *Nature Geoscience* **5**, 397-401.
- Morrill C, Overpeck JT, Core JE, 2003: A synthesis of abrupt changes in the Asian summer monsoon since the last deglaciation. *The Holocene* **13**, 465-476.
- Renssen H, Goosse H, Muscheler R, 2006: Coupled climate model simulation of Holocene cooling events: oceanic feedback amplifies solar forcing. *Climate of the Past* **2**, 79-90.
- Serreze MC, Barry RG, 2009: *The Arctic Climate System*, Cambridge University Press, Cambridge, pp.385.
- Wang YM, Sheeley Jr. NR, 1995: Solar implications of *Ulysses* interplanetary field measurements. *The Astrophysical Journal*, **447**, L143-L146.
- Wanner H, Wanner H, Beer J *et al.*, 2008: Mid-to late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews* **27**, 1791-1828.
- Wu CJ, I. Usoskin IG, Krivova N *et al.*, 2018: Solar activity over nine millennia: A consistent multi-proxy reconstruction. *Astronomy & Astrophysics* **615**, A93, pp13.