

気候変動と文明の盛衰

小 泉 格*

Climate Variations and Changes in World History

Itaru KOIZUMI*

Abstract

The results of hydro-environment researches into marine and lacustrine sediments revealed climatic variations which seem to have some relationships between turns in world history and climatic changes. In the Japan Sea and northeast Pacific off Kashima from the Late Glacial to the Holocene, diatom temperature, $Td' = (\text{frequency of warm-water species}) \cdot (\text{frequency of warm- and cold-water species})^{-1} \times 100$, values show rhythmic fluctuations with durations of 1 kyr and 400-500 yrs (Koizumi *et al.*, 2004, 2006). This indicates a strong and regular inflow of the warm Tsushima Current into the Japan Sea as a branch of the warm Kuroshio Current. The decreases of Td' values correspond to a period of climatic deterioration under which cultural changes occurred in Japan. The paleoclimatic variations and the triple events of high ^{14}C in the atmospheric residual ^{14}C record denoted by Stuiver *et al.* (1991) are recognized in the diatom variations.

A similar periodicity is also recognized in North Atlantic drift ice (Bond *et al.*, 2001), concentrations of sea salt and terrestrial dust in the GISP2 ice core (O'Brien *et al.*, 1995), in lake deposits from the Jura in France (Magny, 1995), Tibet (Gasse *et al.*, 1991; Ji *et al.*, 2005), and Alaska (Hu *et al.*, 2003), and oxygen isotope variations from stalagmites in southern China (Wang *et al.*, 2005) and Oman (Neff *et al.*, 2001).

Climatic deteriorations are synchronous with periods when serious changes occurred in human intellectual achievements during the Holocene. The Agricultural Revolution (11,000-10,000yr BC), with the cultivation of wild plants and domestication of wild animals to produce and secure food, seems to coincide with the Younger Dryas event. Increased agricultural production made it possible to afford a population not engaged in agriculture, for example, people engaged in handicrafts, festivals, and politics. This seems to occur in the period coinciding with T_2 event in the T_1 - T_4 triplets, which have Maunder- and Spörer-type patterns occurring in sets of three, denoted by Stuiver and Braziunas (1993). The religious courtesy belief in the recycling and the reinforcing of life was converted into a rational and systematic consideration of life based on universal theory. This conversion of thinking seems to coincide with the T_3 event. Modern science was established in Europe in the 17th century. And now human beings are destroying natural environments using highly developed scientific technologies of their own. This is a negative revolution that human beings have never previously experienced.

In the south-to-north transect of the cores from both the Pacific and Japan Sea sides of Honshu, Td' values indicate that the Kuroshio Current and Tsushima Warm Current are both weakening at present. The present interglacial period might end and become a cooler climatic condition like a Little Ice Age within 300 years. The insolation at 37°N among the Earth's orbital

* 北海道大学名誉教授

* Emeritus Professor of Hokkaido University

parameters is weak at present (Koizumi and Ikeda, 1997). However, the mean global temperature has risen about 0.5 during the last century. Warming of the Earth, which is caused mainly by carbon dioxide in the atmosphere, has made natural environments unstable.

Key words : solar activity, diatom temperature index, Td' value, Bond event, 1500-year oscillation, climate and civilization, ancient civilization, irrigation

キーワード : 太陽活動, 珪藻温度指数, Td' 値, ボンドイベント, 1500 年周期, 気候と文明, 古代文明, 灌漑

I. は し が き

地球は水浸しの水惑星である。地球が形成される過程において, 広大な海洋をもったことが, 他の太陽系惑星と異なる地球の特徴となった。

海洋は, 地球に降り注ぐ太陽放射の大部分を吸収し, その大きな熱容量によって巨大な熱の貯蔵庫として機能する。海洋の上層部は, 大気や雪氷と相互作用をもち, 深層水は深層循環によって地球規模で熱と塩分の分配を行っている。海洋は, また, 大気への水蒸気を補給する巨大な貯水槽でもある。水は, 固体 液体 気体の三つの状態をもち, 各状態間を遷移するときに大量の熱を放出または吸収する。そして, 氷量の変化は海水面の昇降をもたらす。海洋は地球の表層環境に極めて大きい影響をおよぼしている。

日本近海から採取した海底堆積物中の珪藻化石の研究によって, 過去 15,000 年間を通じて, 海水準が高く, 黒潮や対馬暖流が強く流れていた時期は, 太陽エネルギーの出力が強く, 黒点数が多い温暖期に対応しており, その影響が日本歴史の背景にあったことが分かってきた (小泉, 1994)。完新世における太陽 大気 海洋の気候リンケージに関する研究結果が, 大西洋 (Bond *et al.*, 2001) やグリーンランド (O'Brien *et al.*, 1995) , ジュラ山地 (Magny, 1995) や中国 (Wang *et al.*, 2001) , そしてアラスカ (Hu *et al.*, 2003) などの世界各地から報告されている。

地球のもう一つの特徴は, 地球の形成後間もない 40 億年前に, 生命が海¹⁾で誕生し, それ以降生物が地球環境を改変してきたことである。この

時から, 生物と地球環境との相互作用が始まり, 生物は地球環境を変えることによって, 自らを進化させてきた。人間も海から進化した生物であることを示す痕跡が, 我々の体にさまざまな形で残っている。例えば, 胎児は小宇宙とも言うべき母親の羊水の中に浮かんでいるが, その羊水の塩分は海水と同じくらいである。人間は個体発生の過程で, ヒトが海中から陸上生活に至るまでにたどった系統進化をくり返す。系統進化上にみられる発達は, 体外にあった海水環境を体内に取り込み, 安定した環境として保護したことで, ヒトが進化しえたことを示している。

人類は, 人間を主体とした技術 経済 社会 精神 科学技術の変革を経て, その文明を発達させ, 人類を繁栄させてきたが, 現在は人間と環境の在り方が文明史上初めて問われている。アジアモンスーンの温暖で湿潤な気候環境が, 現在よりも拡大し分布していた時期には, 中央アジア内部まで湿気が到達して緑の草原地帯を形成していたが, 寒冷化が進んで乾燥して中央アジアが砂漠となった結果, 人類文明史の画期とされる農業革命, 都市革命, 精神革命, 科学革命などが生じたと考えられている (鈴木, 2000; 安田, 2004)。

II. 太陽活動と連動した完新世の気候変動

完新世を通じての主要な氷河とアルプス氷河の前進・後退や湖水準変動による気候変動と樹木年輪やサンゴ年輪中の大気 ^{14}C 濃度による太陽放射量の変動との関連性は明らかだったが, 10 年ないし 100 年スケールでの両者の関係は一般に確かでなかったし, 太陽活動に伴う放射強度の絶対

変化が小さすぎるため、気候に対する太陽放射の影響は不明であった。しかし、今世紀に入ってから、完新世の気候システムが大気中の ^{14}C 記録に基づいた10年ないし100年スケールでの太陽放射量の変動によって影響されていることが、アジアモンスーン域を含む北半球の中 高緯度域や低緯度域の海や湖沼、氷床、洞窟など多様な場所から採取した連続試料の詳細な年代測定と酸素同位体比、微化石群集組成、漂流岩屑量、無機元素など各種プロキシによる解析と解析から明らかになってきた (Neff *et al.*, 2001; Bond *et al.*, 2001; Hu *et al.*, 2003; Koizumi *et al.*, 2004, 2006; Dykoski *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005)。

1) 海域

1-1) 日本近海の海底堆積物

黒潮と対馬暖流に特有な暖流系の珪藻種群が、海底堆積物にどのくらい含まれているか、また寒流系の種群を合わせた全体に対する暖流系種群の比率はどのくらいかを求めると、暖流の強弱が分かる。この「珪藻温度指数、 Td' 値²⁾」(Koizumi *et al.*, 2004) を日本海の隠岐堆から採取した D-GC-6 (Koizumi *et al.*, 2006) と太平洋側鹿島沖の MD01-2421 (Koizumi *et al.*, 2004 の試料間隔 20 cm を本論では 16,000 年前以降を時間精度 4 倍の 5 cm にした) で分析した (採取位置は図 1 を参照)。これらの海底堆積物では、底生有孔虫殻と火山灰層の放射性炭素 ^{14}C 年代測定値に基づいた詳細な暦年代値が求められており、ほぼ 100 年間隔で分析された (図 2)。これらの Td' 値を予察的にパワースペクトル解析すると、日本海では 450 年、約 350 年、250 年に、鹿島沖では 950 年、550 年、約 300 年と 200 年に卓越する周期性が認められる (図 3)。同様な解析方法に基づく大気中の ^{14}C 濃度の記録 (Stuiver and Reimer, 1993) は 950 年、550 年、350 年、200 年の周期性を示した。黒潮と対馬暖流の強弱は、450 ~ 550 年と 350 年周期で太陽活動と対応しているが、黒潮と太陽活動の間で相関が強い 950 年の周期は日本海で認められない。

Bond *et al.* (1997) は、北大西洋から採取した海底堆積物の漂流岩屑中に含まれる赤鉄鉱の含有

量が 1500 年周期で変動することを見だし、含有量が増加した層準に 0 から 8 までの番号を付けて、ボンダイイベント (Bond event) とした。ボンダイイベントの層準は氷期に相当し、深層水の形成が弱体化した時期である。1500 年周期は湖底堆積物の粒径や花粉分析、グリーンランド氷床コア GIS2 の不純物濃度、オマーン沖の浮遊性有孔虫、中国石筍の酸素同位体比などの記録に認められるが、950 年、500 年、200 年などの周期が卓越する場合がある (Neff *et al.*, 2001; Hu *et al.*, 2003; Dykoski *et al.*, 2005)。

鹿島沖や隠岐堆の Td' 値変動は、太陽活動の変動史 (Stuiver and Reimer, 1993) とほぼ対応するが、幾つかの層準で最大 500 年くらいのずれが生じている (図 2)。年代値設定の問題や太陽 大気 海洋間の反応時間のずれなど解決すべき基本的な問題があるとしても、黒潮や対馬暖流が勢いよく流れている時期は、赤道帯の温度が高い時期である (Kitoh and Murakami, 2002)。地球表層の熱は太陽からの熱エネルギーでまかなわれているが、太陽光に垂直な赤道帯で受け取る放射熱が高くなる時期は太陽活動が活発な時期である。

太陽活動の変動史の復元は、一般に木の年輪に含まれる ^{14}C の分析によって行われる (Eddy, 1976; Stuiver and Reimer, 1993)。地球上の ^{14}C は大気上層部で、宇宙線由来の中性子が窒素核 ^{14}N に吸収されるとき、陽子が 1 個放出されて炭素の同位体 ^{14}C に変換されるので、大気中の ^{14}C の存在量は宇宙線の到来強度に依存することになる。太陽活動が活発なときには、宇宙線の一部が太陽風によって偏向し地球に到達する量は減少するので、 ^{14}C の生成率と存在量は減少する。一方、太陽活動が衰退しているときには、大量の宇宙線が地球に到来し、 ^{14}C の生成率は逆に増加するのである。 ^{14}C 生成率は、地球磁場強度の変動によっても影響を受けるが、図 2 の太陽変動史ではこの影響は除去されている。

図 2 より過去 15,000 年間を通観してみると、最終氷期末期の晩氷期 (LG) はベーリング / アレレード (BA) 温暖期に転じたが、12,000 年前

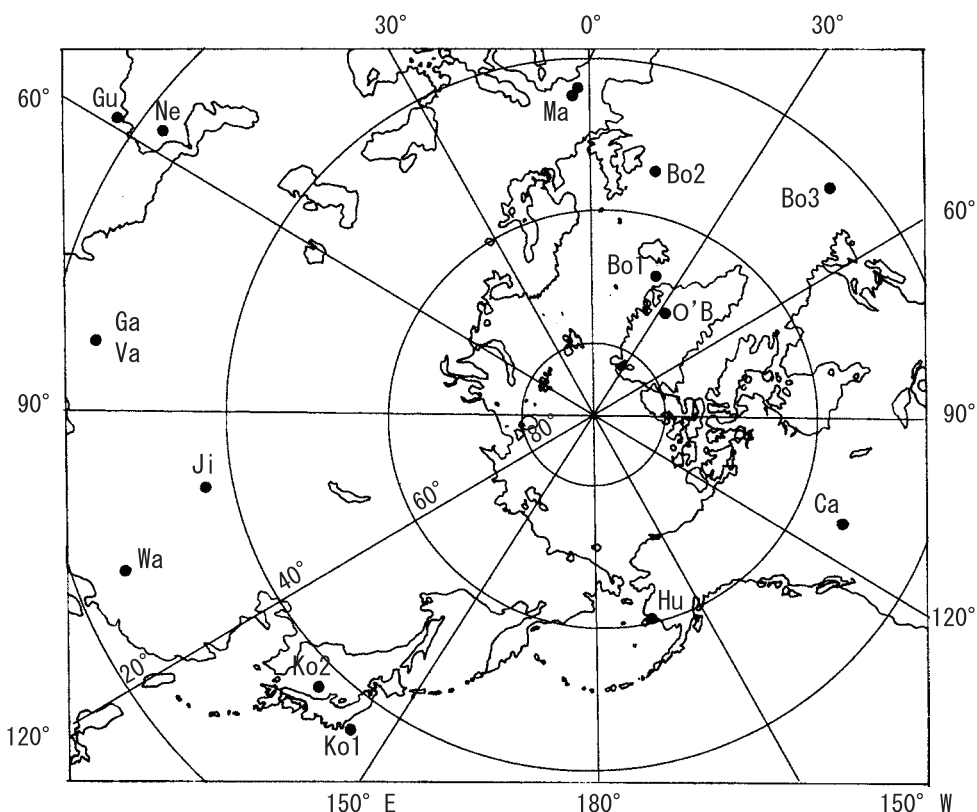


図 1 本論文中で言及した諸論文の研究対象地域と試料。

Fig. 1 Locations of the sites discussed in the present paper.

Bo1: 64 47 N, 29 34 W, 1855 m water depth (VM28-14; Bond *et al.*, 2001). Bo2: 54 16 N, 16 47 W, 2370 m water depth (VM29-191); 54 15 N, 16 50 W, 2393 m water depth (VM23-81); 55 28 N, 14 43 W, 2172 m water depth (KN158-4, MC52; Bond *et al.*, 2001). Bo3: 44 18 N, 46 16 W, 3958 m water depth (KN158-4, MC21, KN158-4, GGCC22); 43 58 N, 46 25 W, 3980 m water depth (EW9303, JPC37; Bond *et al.*, 2001). O'B: 72.6 N, 38.5 W, 3200m elevation (GISP2; O'Brien *et al.*, 1995). Ma: Lake Clairvaux, Lake Chalain, Lake Pluvius, Lake Bourget, Lake Annecy, Lake Paladru, Léman, Lake Neuchâtel, Lake Zürich (Magny, 1993, 1995). Ca: 52 04 N, 113 27 W, 13.2 m water depth (Pine Lake; Campbell *et al.*, 1998). Ga, Va: 35 30 N, 81 E, 8 m water depth (Sumxi Co, Longmu Co; Gasse *et al.*, 1991; Van Campo and Gasse, 1993). Gu: 18 03.079 N, 57 36.561 E, 807.8 m water depth (ODP Hole 723A, RC2730; Gupta *et al.*, 2003). Ne: 23 05 N, 57 21 E, 800 m elevation (Hoti cave; Neff *et al.*, 2001). Hu: 59 28 N, 161 07 W, ~ 17 m water depth (Arolik Lake; Hu *et al.*, 2003). Ji: 36 35 N, 100 30 E, 22.3 m water depth (QH-2000; Ji *et al.*, 2005). Wa: 25 17 N, 108 5 E, 680 m elevation (Dongge cave; Wang *et al.*, 2005). Ko1: 36.014 N, 141.468 E, 2223 m water depth (MD01-2421; Koizumi *et al.*, 2004). Ko2: 37.07 N, 134.70 E, 946 m water depth (D-GC-6); 39.31 N, 139.03 E, 760 m water depth (KH-86-2-9); 40.92 N, 139.87 E, 835 m water depth (KH-84-3-33); 41.83 N, 139.16 E, 2280 m water depth (KH-84-3-9); 41.56 N, 141.87 E, 975 m water depth (MD01-2409); 40.56 N, 142.93 E, 1520 m water depth (MR97-04-1; Koizumi *et al.*, 2006).

の前後 1000 年間に北ヨーロッパで新ドリラス期 (YD) と命名された寒冷期「寒の戻り」が起こった後に、本格的な温暖な気候となった。したがって、完新世の始まりは 11,600 年前とされるが、

寒冷気候から温暖気候へ移行する完新世前期においては寒暖の変動が大きくなっている。一番新しい小氷期に対応する太陽活動の減衰期は、ウォルフ極小期、シュペラー極小期、マウンダー極小

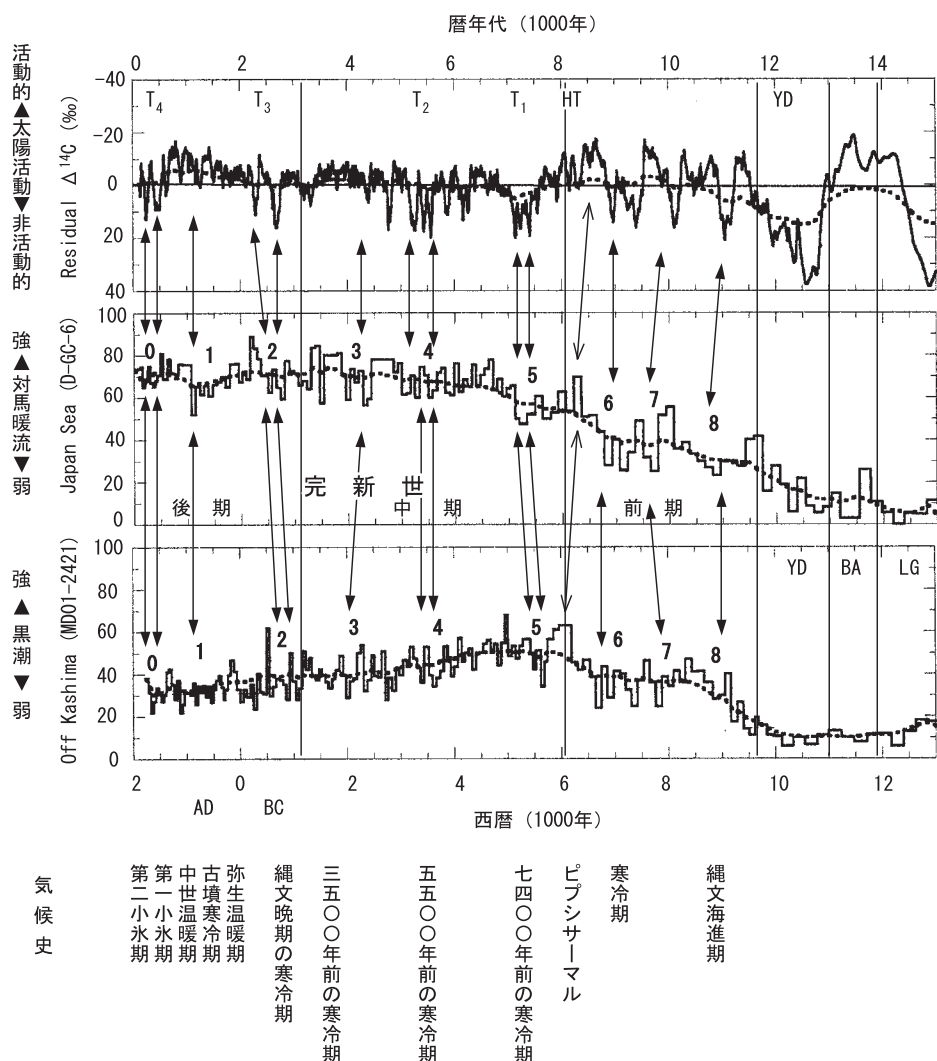


図 2 放射性炭素生成率による太陽活動 (Stuiver and Reimer, 1993) および珪藻温度指数 (Td') による黒潮 (MD01-2421) と対馬暖流 (D-GC-06) の脈動 (Koizumi *et al.*, 2004, 2006). 矢印は対応関係を示す. $T_1 \sim T_4$: 小氷期に匹敵するような寒冷気候期. 0 ~ 8: ボンドイベント. LG: 晩氷期. BA: ペーリング/アレード期. YD: 新ドリマス期. HT: ヒブシサーマル期. BC: 紀元前. AD: 西暦.

Fig. 2 Comparison of variations of Td' values in the Kuroshio Current (MD01-2421) (Koizumi *et al.*, 2004) and Tsushima Warm Current (D-GC-06) (Koizumi *et al.*, 2006), atmospheric residual ^{14}C record (Stuiver and Reimer, 1993), and climatic changes in Japan. Arrows indicate the corresponding changes. $T_1 \sim T_4$ denote triple events comparing Maunder and Sporer perturbations. Numbers 0 to 8 denote Bond events. LG: Last Glacial. BA: Bölling/Alleröd. YD: Younger Dryas. HT: Hypsithermal.

期と命名された三つの極小期から構成されているので、過去の太陽活動史において類似した三つの太陽活動極小期がセットになった時期は、小氷期に匹敵するような寒冷気候になった可能性のある

ことが指摘され、 $T_1 \sim T_4$ と名付けられた (Stuiver *et al.*, 1991). 7400 年前の寒冷期 (T_1)、5500 年前の縄文中期寒冷期 (T_2)、2750 年前の縄文晩期寒冷期 (T_3)、13 ~ 19 世紀の小氷期 (T_4) など

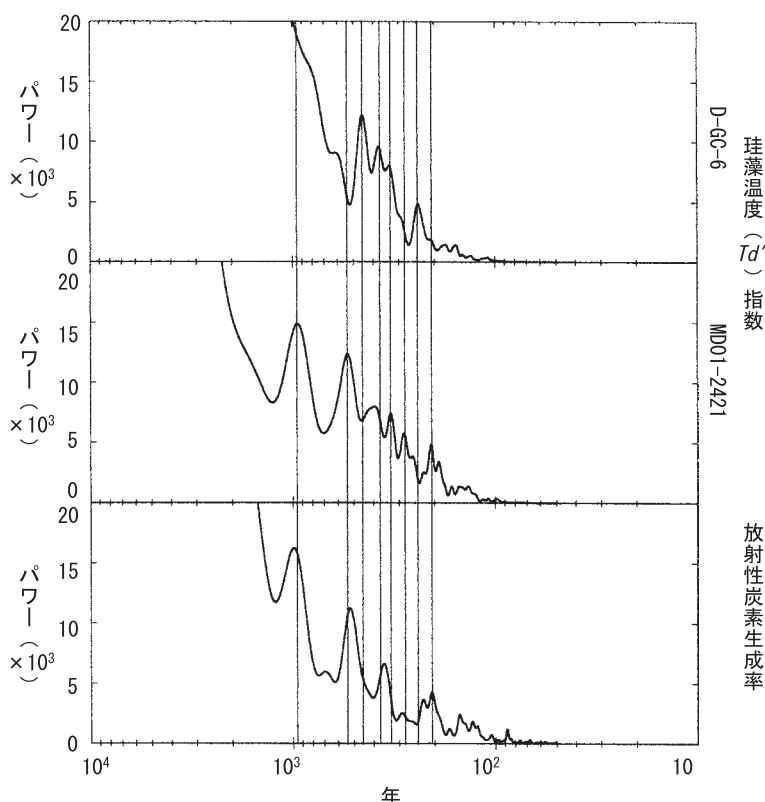


図 3 放射性炭素生成率による太陽活動 (Stuiver and Reimer, 1993), および珪藻温度 (Td') 指数による黒潮 (MD01-2421) と対馬暖流 (D-GC-6) の脈動 (Koizumi *et al.*, 2004, 2006) (図 2) のパワースペクトル解析。

Fig. 3 Power spectral analysis of variations of atmospheric residual ^{14}C record (Stuiver and Reimer, 1993), Td' values in the Kuroshio Current (MD01-2421) (Koizumi *et al.*, 2004) and Tsushima Warm Current (D-GC-06) (Koizumi *et al.*, 2006).

はこれらの太陽活動が衰退した時期に対応する。

1-2) 北大西洋の海底堆積物

北西大西洋のラブラドル海と北海から採取された完新世の海底堆積物は、漂流岩屑を含んでいて、これに含まれる赤鉄鉱、アイスランド起源の火山ガラス粒子、砕屑性炭酸塩鉱物などは、10年ないし100年スケールの変動を示すが、振幅の大きな変動は1500年周期をもち、完新世を通じて太陽放射と極めて緊密に対応している (図 4; Bond *et al.*, 2001)。

1-3) インド洋アラビア海の海底堆積物

オマーン沖から採取された完新世の海底堆積物に含まれる浮遊性有孔虫寒冷種の *Globigerina*

bulloides は、北大西洋のボンダイイベントに対応する層準で含有量が増加し、夏季モンスーンは100 ~ 1000年スケールでの北大西洋の寒冷期に対応して弱体化した (図 4; Gupta *et al.*, 2003)。

2) 陸域

2-1) GISP2 氷床コア

グリーンランドのSummitから採取されたGISP2 (Greenland Ice Sheet Project 2) に含まれる、海塩起源のNa, Cl, Mg, K, Caと陸源起源のNa, Mg, K, Caの含有量は、12,900 ~ 11,600年前の新ドリラス期から現在へ向かって減少している (O'Brien *et al.*, 1995)。陸源性のCaとMgの含有量が減少する原因は、完新世を

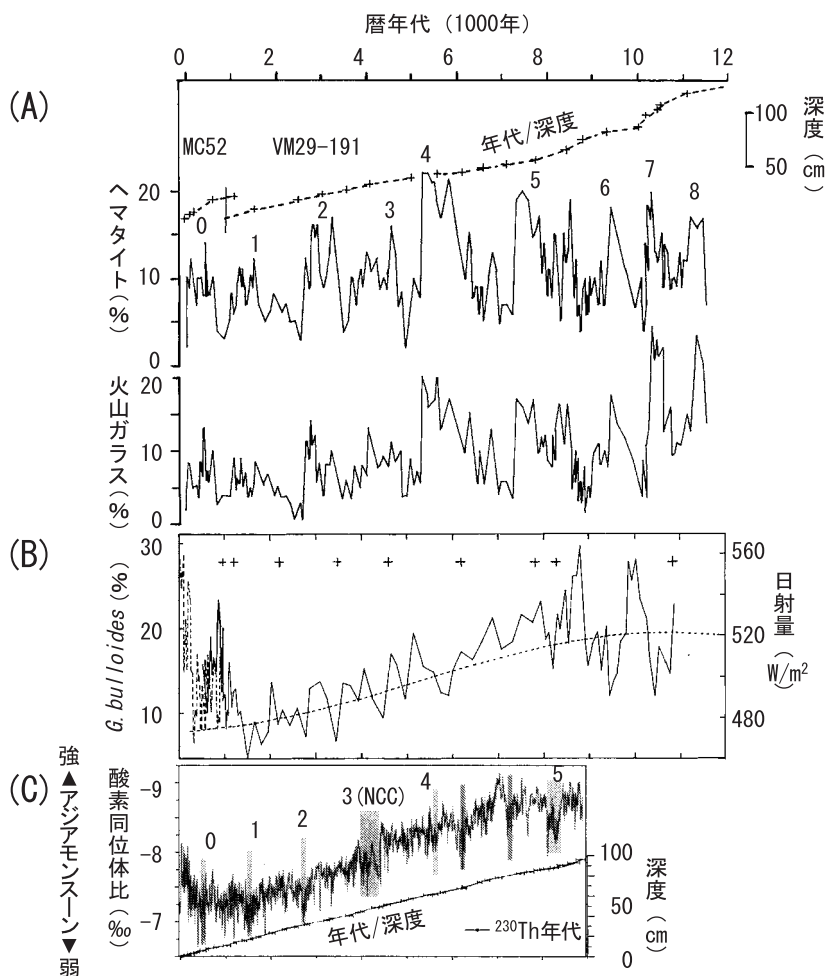


図 4 (A) 北大西洋から採取された VM29-191 コアと MC52 コアの堆積速度 (¹⁴C 年代/コアの深度)、および氷漂岩屑中のヘマトイト (赤鉄鉱) の含有量 (%) とアイスランド起源の火山ガラス粒子の含有量 (%). 番号 (0 ~ 8) はボンドイベント (Bond *et al.*, 2001). (B) オマーン沖のアラビア海から採取された ODP Hole 723A コア (実線) と RC2730 コア (破線) 中の浮遊性有孔虫寒冷種の *Globigerina bulloides* の含有量 (%) と北緯 65° 7 月の日射量 (W/m²) (点線). 十字印は ¹⁴C 年代測定の層準 (Gupta *et al.*, 2003). (C) 中国 Dongge 石筍の生成速度 (²³⁰Th 年代/深度)、酸素同位体比 (%). 縦の灰色と番号 (0 ~ 5) はボンドイベントとの対応, NCC は中国の新石器文化の崩壊との対応を示す. 番号のない縦の灰色 2 本はアジアモンスーンが弱体化した時期を示し, 北大西洋で氷漂岩屑量が増加した時期に相当する (Wang *et al.*, 2005).

Fig. 4 (A) Percentage variations in the amounts of hematite-stained grains and fresh volcanic glass from Iceland as the petrologic traces of drift ice in MC52-VM29-191 from the eastern North Atlantic (Bond *et al.*, 2001). Numbers 0 to 8 designate the North Atlantic's "1500-year" cycles. Age depth models are from Web table 1 in Bond *et al.*, 2001. (B) *Globigerina bulloides* percentage in ODP Hole 723A (solid line) and RC2730 (broken line) from the Arabian Sea, July insolation at 65°N shown by dotted line, and radiocarbon-dated intervals shown by crosses (Gupta *et al.*, 2003). (C) $\delta^{18}\text{O}$ record from the Dongge Cave stalagmite, southern China (Wang *et al.*, 2005). The numbered vertical bars denote the timing of Bond events (0 ~ 5) in the North Atlantic. Two vertical bars without numbers indicate notably weak Asian monsoon events that can be correlated to ice-rafted debris events. Age/depth relations are based on dates by ²³⁰Th vs. centimeters relative to the top. NCC: the collapse of the Neolithic Culture of China.

通じて海水準が上昇したことに伴って、露出していた大陸棚が沈水して、その面積が徐々に減少したことにあるとしている (Rampino *et al.*, 1987)。海塩と陸源性塵は、11,300 年前、8800 ~ 7800 年前、6100 ~ 5000 年前、3100 ~ 2400 年前、600 ~ 0 年前 (小氷期) などの時期に増加しており、これらの時期に南北の気温較差が増大して大気循環が約 2500 年の周期で活発になったことを示している。またこれらの時期は、三つの極小期からなる太陽放射の弱体期 (Stuiver and Braziunas, 1989) と一致している。これらの寒冷期には、北極振動と呼ばれる北極渦流の拡大が、あるいは子午線方向のフェレル循環の強化が動因となって、北半球中 高緯度域の温度が新ドリラス期以来の最低となったと考えられる (Mayewski *et al.*, 1994)。

2-2) 湖水準や湖底堆積物

2-2.1) 西ヨーロッパ中緯度域のジュラとアルプス

西ヨーロッパ中緯度域のジュラとフランス・アルプス山地において湖水準の下降、スイスとオーストリア・アルプスでの氷河前進や森林限界線の下降などによって示された寒冷化気候は、100 年ごとに変動しているが、振幅のより大きい約 2300 年の周期性が認められた (Magny, 1993)。ジュラ山地の湖水準が下降した時期は紀元前 7500 年、5200 年、3450 年、750 年、および紀元 1500 年 (小氷期に相当) など 5 層準の主要な寒冷期に対応している (Magny, 1995)。それらの時期は、大気中の ^{14}C の生成率と存在量が増加したことから何れも太陽活動が不活発な時期 (Stuiver and Braziunas, 1993) に対応していると解釈されている。

2-2.2) 西チベット高原

北半球の大気循環、特にモンスーン循環に重大な影響を与えるチベット高原の西部に位置する Sumxi-Longmu 湖から採取された 13,000 年前以降の湖底堆積物には、数 100 年スケールでくり返す激しい気候変動が認められた (Gasse *et al.*, 1991; Van Campo and Gasse, 1993)。堆積物中に含まれている炭酸塩の酸素同位体比や炭素同位

体比、花粉と珪藻化石群集から 13,000 年前、10,000 ~ 9900 年前、7500 ~ 6000 年前などの前 ~ 中期完新世では温暖で湿潤だったが、新ドリラス期の 10,500 年前、8000 ~ 7000 年前、4300 年前には寒冷で乾燥していたことが明らかにされた。約 9000 年前までは夏季の太陽放射量が増加し、強力なモンスーンがこの地域に発達していたことを指示する。これらの気候変動は、熱帯アフリカの北部地域における変動 (Gasse, 1977; Gillespie and Street-Perrott, 1983) と類似している。

2-2.3) 北東チベット高原

北東チベット高原に位置する中国最大の塩湖 Qinghai 湖から採取された 18,300 年前以降の湖底堆積物を複数のプロキシで分析した結果は、18,300 ~ 16,900 年前は厳冬で乾燥していたが、晩氷期から完新世にかけての漸移期では、寒冷・乾燥と温暖・湿潤の気候が激しく変動したことを示している (Ji *et al.*, 2005)。温暖な湿潤気候が完新世前期を特徴づけるが、8200 年前に一時的に寒冷で乾燥となり、6500 年前から 3900 年前にかけて、気候は温暖・湿潤から寒冷・乾燥へ変動し、2500 年前以降は寒冷で乾燥気候となった。

18,000 年前以降の Qinghai 塩湖における気候変動は、10 ~ 1000 年スケールでの東アジアモンスーンが太陽放射によって駆動された結果であると考えられる。

2-2.4) 南西アラスカ

北半球高緯度域に位置する南西アラスカの Arolik 湖から採取された完新世の湖底堆積物においては、珪藻殻の生物源シリカ含有量が 100 年スケールの変動を示すが、その時系列解析の結果は 90% 以上の信頼度で、950 年、590 年、435 年、195 年、170 年、135 年の周期性を示した。これらのうち、950 年と 400 ~ 500 年の周期は木の年輪の ^{14}C 分析から得られた太陽活動の周期性変動の一部に対応している (Stuiver and Braziunas, 1993)。また時系列解析の信頼度 80 ~ 90% では、約 1500 年の周期性が認められた。 (Hu *et al.*, 2003)。

2-2.5) 西カナダ

気候変動の1500年周期性は、西カナダのカリガリーとエドモントンの間に位置するPine湖から採取された4000年前以降の湖底堆積物の粒度の時系列解析の結果からも得られている(Campbell *et al.*, 1998)。彼らは、後氷期における新ドリアス(寒冷)期や小氷期、中世温暖期が孤立した非周期的イベント現象ではなく、地球規模の周期的現象である可能性が強く、これらの気候プロキシの変動が多様な独立した原因によって生じたのではなく、10年ないし1000年スケールで気候システムを地球外から駆動する太陽出力の周期的変動を反映するものと解釈した。

3) 洞窟内の石筍

3-1) 中国南部

中国南部のDongge洞窟から採取された石筍の酸素同位体比の記録は、完新世を通じて徐々に減少しており、アジアモンスーンの弱体化の現れであると解釈しているが、9000年前以降を通じて約1200年間隔で100～500年間継続する約8回の弱いモンスーンイベント(8300年前, 7200年前, 6300年前, 5500年前, 4400年前, 2700年前, 1600年前, および500年前)を示唆した(図4; Wang *et al.*, 2005)。これらの変動の一部はボンダイイベントの0.5に対応しており、アラビア海の南西モンスーンの弱体化イベント(Gupta *et al.*, 2003)ともほぼ一致している。

現在、この地点の気候は、強力なシベリア高気圧が発達して北風が吹く寒冷で乾燥した冬季と、熱帯収束帯が北方へ移動してモンスーンの降雨が最高潮に達する温暖で湿潤な夏季の季節がある。約4000年前に起こった数100年におよぶアジアモンスーンの弱体化は、中国北部の旱魃と南部の洪水をもたらした、中央部付近における新石器文化を崩壊させたことを、山岳氷河の前進、湖水準の下降、湖底堆積物中の炭酸塩による酸素同位体比、花粉や珪藻化石群集、粒径など多数の資料に基づいて論じている(Wu and Liu, 2004)。

3-2) オマーン北部

オマーン北部のHoti洞窟から採取された石筍の酸素同位体比記録における10年ないし100年

スケールの変化は、熱帯降雨量や夏季モンスーン強度の変化を指示しており、大気中の ^{14}C 存在量として現れた太陽放射変動に対応している。現在はアラビア半島の南端までしか北上していない熱帯収束帯が、この地域まで北上していたことを示唆している(Neff *et al.*, 2001)。9500年前, 9000年前, 8300年前, 7400年前, 6300年前などにおける降雨量や太陽活動の減少は、北大西洋における漂流岩屑の増加や太陽放射の減少(Bond *et al.*, 2001)に一致している。

現在、この地域は乾燥ないしは半乾燥気候で、インド夏季モンスーンは到達していないが、前中期完新世にはモンスーン降雨帯の北上と夏季モンスーンの勢力拡大がアフリカのサヘル、アラビア、インドなどに大量の雨をもたらしたと報告されている(Liu *et al.*, 1998)。

III. 気候変動の人類への影響

高分解能古気候解析に基づく10年ないし100年の時間スケールの気候変動の復元が、人類の歴史に与えた気候変動の影響を明らかにしつつある。地球外の太陽活動の変動が駆動力となって、地球規模で起こった気候変動が局地的ないし地域的規模の人間活動を制約して、文明の盛衰が生じたと考えられる。気候変動による寒冷化や乾燥化が、例えば地中海や中近東といった地域的な古代文明に生ずれば、その地域の水系や植生が変化し、土壌悪化などの自然環境を悪化させて、地域の地力を衰退させる。人類史の初期段階ほど、地域住民は自然環境に依存して生存している度合いが大きく、食糧の激減、疾病の発生・蔓延、人口の減少、社会不安、侵略戦争などが連鎖反応的に起こって、地域的文明は崩壊したと考えられる(安田, 1990; 吉野, 1993; ダイアモンド, 2000)。

1) 気候変動と文明の盛衰

完新世は、比較的安定した気候の時代であるとの見方があるが、完新世を通じて寒冷気候と温暖気候はくり返されている(図5)。完新世は、農耕が開始されて以来の先史時代から現在までを含むが、激変する気候変動が人類史に与えた影響は重大であったために多数の地域文明が盛衰をくり

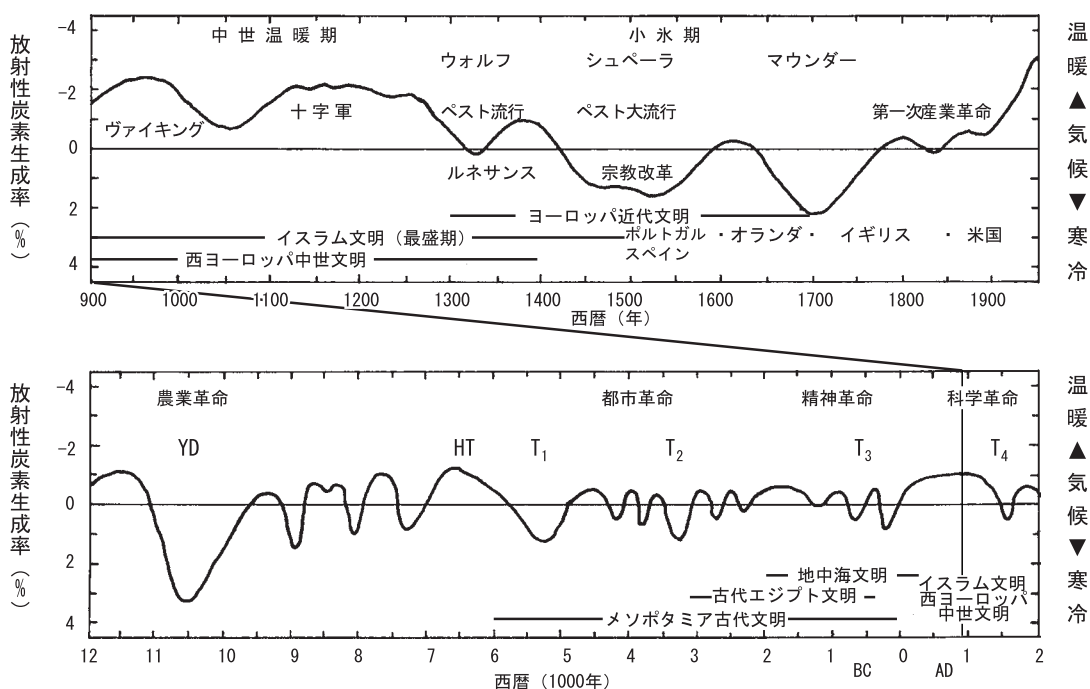


図 5 過去 12,000 年間の気候変動と文明史との関連 (種々の資料による)。
 T₁ ~ T₄: 小氷期に匹敵するような寒冷気候期。YD: 新ドリラス期。HT: ヒプシサーマル期。BC: 紀元前。
 AD: 西暦。

Fig. 5 Comparison of climatic variations based on atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ record (Stuiver and Reimer, 1993) with rises and falls in world history (based on various data) during the Holocene.

T₁ T₄ denote the triple events comparing to Maunder and Sporer perturbations. YD: Younger Dryas. HT: Hypsithermal.

返してきた (吉野・安田, 1995)。人類文明史における大きな変換期は、いずれも気候が寒冷・乾燥化した気候悪化の時期に起こっており、寒冷化気候による環境悪化に挑戦し、創造的に応戦したところのみ文明の改革が成し遂げられたが、環境が人間の在り方を一方的に決めたのではない (伊東, 1996)。

1-1) 寒冷・乾燥化気候と文明の四大革命期

暦年代の紀元前 11,000 年から紀元前 10,000 年までの新ドリラス寒冷期 (YD) は、食糧を狩猟採集に依存していたパレスチナ地方の人びとに、エリコヤアスワドなどの森と草原の間に定住し野生植物を栽培することを促したために、コムギやオオムギのムギ類とマメ類などの食糧を人為的に獲得する「農業革命」を開始させた (伊東,

1990; 安田, 1995)。従来、人類の農耕はメソポタミアの「肥沃な半月地帯」と呼ばれるチャヨニュー、アリ・コシュ、ジャルモなどの地域において 8500 年前に開始されたとされてきたが、もっと古いパレスチナ農耕が伝播された可能性が高い (伊東, 1996)。

紀元前 3500 年頃の寒冷・乾燥化気候 (Stuiver *et al.*, 1991 の T₂ に相当) は、紀元前 3500 年にシュメールに「都市革命」をもたらした (鈴木, 1976; 安田, 1988)。乾燥化に伴い、人びとは大河のほとりて灌漑による大規模な農耕を発達させ収穫量を高めた。大規模な治水と灌漑のための共同作業には強力な統率者が必要であり、初めは豊作や天候を占う宗教的権威としての巫者であったが、やがて政治的な王が統率者となった。農作物

の収穫量を高めて得た社会的余剰が、農耕に携わらない王や僧侶、書記や戦士、また職人や商人などを社会集団者として養い得るようになり、人びとの階層化による統治体制と宗教の組織化、手工業の発達が起こり、富の蓄積と交換機能をもつ都市的文明が成立した（伊東，1990）。同じことが、紀元前 3000 年にエジプトと良渚，紀元前 2500 年にインダスなどにおいて成立した（金関・川西，1996）。

紀元前 1000 年頃の地中海地域や東アジア地域、ヨーロッパ北部における寒冷・乾燥化気候（ T_3 ）は、気候難民としての大規模な民族移動を引き起こし（鈴木，1978，1990；安田，1993），定住農耕共同体であった都市生活者に遊牧民が入り交じることによって、農耕民の呪術的・儀礼的思惟が遊牧民の合理的・統一的思索に変革し、思想が合理化されて、紀元前 8 世紀から紀元前 4 世紀にかけて高度な宗教や哲学を誕生させたことから、心の内部，すなわち精神の改革を「精神革命」と呼んでいる（伊東，1990，1996）。例えば、パレスチナでは、都市における土着の天候神バアル信仰に対し、イスラエル民の遊牧的な天の唯一神ヤハウェの信仰が、旧約の予言者たちによって布教された。ギリシアでは、農耕の神々と遊牧の神々からなる二重構造から脱神話化することでギリシア哲学が誕生した。インドでは、ウパニシャドから六師外道の哲学を経て、釈迦の出現に至るインド哲学や仏教が始まった（伊東，1996；安田，1996）。

西暦 1500 年頃を最盛期とする小氷河期（ T_4 ）には、ヨーロッパにおける気候悪化が農業生産力の低下と疫病ペストの蔓延、戦争の多発などを引き起こしたために、人口は激減して、ヨーロッパ社会は崩壊寸前になった。ヨーロッパの窮乏を、自然に従属するのではなく、それを人為的に改変し再組織化することで克服しようとした試みが、デカルトの「機械論的自然観」やバイコンの「自然支配の理念」であり、「力としての知」の獲得によって自然の上に人間の王国を構築しようとしたのである（伊東，1996）。17 世紀のヨーロッパで生じた「科学革命」と呼ばれた近代科学は、中世温暖期の「産業革命」や「動力革命」の延長

線上にあり、さらに 18 世紀後半に起こったイギリスの「第一次産業革命」を駆動した。

1-2) 古代社会の灌漑と治水による水利

メソポタミア南部では、紀元前 3500 年頃から人口が急増したために、各地の都市国家は大河の治水や灌漑によって生産力を高め、交易によって必需品を入手して覇権を争った。ティグリスとユーフラテスの両河川は、ナイル川の 2 ～ 4 倍の泥を含んでいて、泥の沈殿によって天井川となり、大洪水が収穫を損なうばかりでなく、水路の埋没や閉鎖を引き起こした（湯浅，1993）。紀元前 2250 年に、最初の統一国家を形成したアッカド王国は、ユーフラテス川流域に点在するオアシスに導水口と排水口を設けて、メソポタミア全土に灌漑網を張り巡らした。幅 25 m，深さ 2 ～ 3 m の幹線水路から幅 7 ～ 14 m で深さ 2 ～ 3 m の支線水路を多数分岐させたが、水路に堆積する泥土を絶えず浚渫する必要があった。また、メソポタミア中南部の灌漑耕地において、紀元前 2400 年頃から始まっていた塩化現象が農産物の収穫量を著しく低下させていたが、バビロン第一王朝ハムラビ王（在位紀元前 1792 ～ 1750 年）の時代には、首都バビロンの北のユーフラテス川とティグリス川が接近している中間地帯において、両河川の河床の高低を利用して河床の高いユーフラテスの河川水をティグリス川に排水することによって、農地を灌水するのみならず、残留水の停滞とこれによる農地の塩化を防止することに成功した（湯浅，1993）。

一方、エジプトにおいては、“ナイルの賜物”の言葉どおり、ナイル川の水源であるエチオピア地方の雨期がナイル川を氾濫させ、7 ～ 10 月に増水した河川水が上エジプトの河谷沿いの堤防の下に開けられた穴からナイル川流域の氾濫原に溢水し、減水するまでの 40 ～ 60 日間に肥沃な泥を堆積させると共に、土壌に十分な水分を供給した。減水後の氾濫原が耕され、種がまかれて翌年の 3 ～ 6 月に収穫される冬作が行われた（安田，1987）。紀元前 1570 年のアマルナ時代にシャドーフ（はねつるべ）が考案されて、低水位の冬季にも揚水ができるようになり、エジプトでは周

年灌漑による二毛作が行われるようになった。さらに、紀元前 304 ~ 30 年のプトレマイオス朝時代には、ベルシャ式揚水車が導入されて、生産力はさらに増加したが、灌漑設備の新設や維持管理、揚水労働力の確保などの問題のほかに、灌水の蒸発による農地の塩化が起こった（湯浅，1993）。

地中海沿岸には、ナイル川を除いて、大河や大平野がないので、農業は小規模で各地に分散した天水農耕である。そこでは冬雨で生育したオオムギやコムギを初夏に収穫した後、農地を放置して冬雨を吸収させる二圃制をとり、これに果樹栽培と牧畜を組み合わせた農耕が行われた。

古代中国においては、“水を治める者は天下を制する”と言われてきたほど、治水は国家政策の重要な課題であった。治水灌漑農耕は、紀元前 4000 年頃から始まっている（安田，2000）。特に、黄河は有史以来大規模な流路変更が 26 回あり、洪水も 1500 回を超えている（斉藤・楊，1994）。黄河の治水灌漑は、氾濫を防止し、人口増大による食糧の需要に対処するための農地拡大の手段として発達した。紀元前 770 ~ 403 年の春秋時代には溜池が設けられるようになり、その後水路をめぐらして灌漑する方法へと規模が拡大された（湯浅，1993）。

イスラム文明は、多様な自然環境に柔軟に対応すると同時に、有益な新作物や新技術の導入に積極的であった。例えば、熱帯やモンスーン地帯の夏作物であるサトウキビや木綿など経済的に重要な作物を、冷涼かつ乾燥した冬雨の西アジアや地中海沿岸に導入して収益を上げるために、7 ~ 8 世紀にはダムによる貯水池の建設、山麓の伏流水を集めた地下水路カナートの普及、揚水機の動力化などによって農業革命を起こした（小堀，1989）。また、先行した文明が支配した地域を受け継いだとき、戦乱や災害で荒廃した灌漑用水の補修、新たな水路の開発など農地や農場の復興を積極的に行った。イスラム文明は水の管理に積極的であった。1 日 5 回の祈りの前に身を浄めるために、モスクには泉水が必ず設けられたし、商業施設の中庭にも泉水が設けられた。またイスラム

都市には公衆浴場が多数設けられていた（湯浅，1993）。

イスラム文明は、オリエント文明と地中海文明の遺産を継承し、西ヨーロッパ文明へ人類の叡智を受け渡した。メソポタミア、エジプト、シリア・パレスチナなど中東のオリエント文明や地中海沿岸の地中海文明は、風土が乾燥地帯であったことから水の確保が生存と発展の鍵であったのに対し、西ヨーロッパ文明のそれは湿潤で冷涼な環境下において森を征服することであった。

2) 歴史時代の気候変動と文明との関連

2-1) 中世温暖期

8 世紀から 13 世紀末まで続いた中世温暖期を通じて、ゲルマン人は湿潤かつ冷涼な気候のもとで、西ヨーロッパに広がる森林を鉄斧で伐採し、粘り気のある重い粘土質土壌を 4 頭以上の牛や馬に引かせたゲルマン犁で掘り起して耕地とした（湯浅，1993）。春蒔きと秋蒔き、休作地に放牧する共同耕地の三圃制農業は、主従関係による階層制社会を 11 ~ 13 世紀に成立させた。封建社会の成立と相まって、ローマ・カトリック教会の修道院は自己の精神的エネルギーを西ヨーロッパ農地の開墾に集中させた。また文化の中心として技術革新と水車や風車の利用を普及させて、西ヨーロッパに新たな固有の農業を発達させた。農業技術の開発と動物エネルギーの重用は、新しい工業技術の開発を促した（湯浅，1993）。

11 世紀末のイングランドでは 5624 台の水車が働いており、中国では機械時計が動いていた（橋本，1989）。12 世紀前半には中国で磁石の原理によって方向を知る道具（羅針盤）が発明され、フランスでゴシック建築が始まった。12 世紀後半にはミラノ運河や北イタリア諸運河の着工、カンタベリー修道院の水道工事やノルマンディーにおける風車の出現、13 世紀には技術革新が自然を支配する西欧近代文明への方向付けがなされたことから、この時代は「中世の産業革命」とも呼ばれる（坂本，1989）。中世はまた、水車の用途が製粉や揚水以外にオリーブ油や砂糖を搾り、あるいは刀剣や刃物を研磨するなど多様化した時代であった（末尾，1989）。水車は回転運動だけで

なく、カムやクランクを介して往復運動の作業にも進出した。11世紀には撥ねハンマー水車が毛織物をたたいて、素材をからめ、強くし、洗浄する縮絨作業に使われたので、毛織物工業は水力の得られる川辺へと移動した。水力撥ねハンマーは、製鉄業にも導入されて鉄の鍛造作業にも革命をもたらした。13世紀には、水力ふいごが溶鉱や鍛造の際の火力を向上させて、製鉄業を燃料の木炭が得られる森から水力の川辺へと移動させた。水の力を動力とした水車や風の力を利用した風車が中世に最大限に採用された。水車がさまざまな鉱工業分野で採用されたことで「中世の動力革命」と言われる（末尾、1989）。

封建社会が安定し、荘園内の農業生産が高まるにつれて、余剰物資の交換を行う定期市は、イスラム商人やヴァイキングの商業活動による貨幣経済の影響を受けて都市化を押し進めた。都市化とは換言すれば文明化であるから、西ヨーロッパ文明の誕生である（湯浅、1993）。商工業者の市民はブルジュアとして組合ギルドを結成し、自衛と自治の権利を獲得したことが、近代都市文明の始まりとなった。

2-2) 小氷期

13世紀後半から始まった寒冷化気候（小氷期）は、悪天候を伴って、ヨーロッパにおける開墾を不可能にし、穀物の収穫量を著しく低下させた（Lamb, 1982）。14世紀初頭から起こった食糧不足は、3度の大飢饉を引き起こした。これに加えて、14世紀と15世紀の西ヨーロッパでは、百年戦争やバラ戦争など戦争の多発とペストの流行が人口の減少をもたらした。社会全体が崩壊するような状況に陥った（桜井、1987）。

しかし、西ヨーロッパにおける人口の減少は15世紀に新しい社会改革をもたらした。労働力不足は、牧畜を発達させ、農業や工業における労働の生産力を機械化させ、労働地帯を貨幣地帯に切り換えさせた（湯浅、1993）。これは来るべき産業革命と貨幣経済の先駆けであると考えられる。

14世紀から16世紀にかけてイタリアで生まれたルネサンスの気運は、アルプスを越えて西ヨー

ロッパ一帯に広がった。これは、中世カトリック教会の権威や封建社会の殻から脱皮し、人間本位の立場をギリシャ・ローマの古典文化に再発見しようとする精神の高まりである。ルネサンスは、文芸や思想の分野のみならず、科学や技術の面においても火砲（火薬）・羅針盤・活版印刷の三大発明を生みだし、ヨーロッパ社会の発展を促す原動力となって、ヨーロッパ近代文明が誕生したと言われるが、火薬と羅針盤は中国に起源をもち、イスラム世界を経てヨーロッパに伝えられた。

イベリア半島は、8世紀以来イスラム教徒によって支配されていたが、キリスト教徒による国土回復運動は、12世紀後半に十字軍の援助を受けて半島の北半分を確保し、15世紀後半にスペインとポルトガルを奪回したが、その間に両国はイスラム文明の航海術、天文や地理の知識を吸収して、大航海時代の幕を開けた。

厳しい小氷期の寒冷・乾燥化気候の試練を受けて、西ヨーロッパ文明は崩壊寸前までに至ったが、その基底精神は14世紀以降も継続されて、16世紀はポルトガル、17世紀はオランダ、18世紀と19世紀はイギリスへとバトンタッチされながら、16世紀以降のヨーロッパ近代文明を堅固に進化させた（湯浅、1993）。

2-3) 20世紀の気候変動

20世紀における世界の平均気温は、1910年から1940年にかけて約0.4℃上昇しているが、それ以降1970年代後半までは0.1℃の低下か、もしくはほとんど変化していない（松本・井上、2005）。1970年代後半以降になると、気温は急速な上昇傾向となり、現在まで一途に0.6℃上昇している。この時以来、地球温暖化が主として二酸化炭素による地球の温室効果の現れであることが目に見える形で明らかになり、汎世界的な社会問題となった。

温暖化の主要な原因とされる二酸化炭素は、石炭や石油などの化石燃料を大量に燃焼させることによって発生する。南極氷床コアの気泡に含まれる二酸化炭素の濃度は、10,000年前から5000年前までは約260 ppm、産業革命までは280 ppmであり、グリーンランド氷床コア中の二酸化炭素

濃度も 1850 年頃に 270 ppm であったことを示している（阿部・千喜良, 1999）。一方、ハワイ島マウナロアで観測し続けられている大気中の二酸化炭素濃度は、観測開始時の 1958 年にすでに 315 ppm であったが、2000 年には 370 ppm に達し、確実に増加の一途をたどっている。

18 世紀後半のイギリスにおける第一次産業革命は、19 世紀半ばにヨーロッパ大陸諸国やアメリカ合衆国にも波及して、第二次産業革命に発展した。近代物質文明は、20 世紀のアメリカにおける大量生産方式によって実現した。この大量生産を支えたエネルギー源が液体燃料としての石油であり、全てのエネルギーを電気に変換し、電線によって瞬時に輸送できる電気エネルギーである。

石油生産の需要を引き起こし、その生産に拍車をかけたのが自動車である。20 世紀前半以降に大衆化した自動車は、速さや便利さと引き換えに交通事故、騒音、石油の大量消費によるエネルギー損失、排気ガスによる大気汚染などを発生させた。

さらにアメリカは航空機を発明・生産し、第二次世界大戦後は航空機が旅客移動の一般的な手段となり、航空機もプロペラ機からジェット機へと進歩した。

IV . 近未来の気候変動と水資源

日本近海の下底堆積物から復元した過去 6500 年間の Td 値²⁾を 1000 年後まで延長して、近未来の気候変動を予測すると、現在、黒潮と対馬暖流の勢いは弱まりつつあり、現在の温暖期が今後 250 年で終わることを示した（小泉, 1994）。また最近の高分解能分析で求めた Td' 値の時系列解析によれば、 Td' 値は第二小氷期の西暦 1650 ~ 1750 年（約 300 ± 50 年前）で最低となった後に増加に転じたが、この温暖化は現在終了したか、あるいは終了しつつあり、約 300 年後に第二小氷期並になる傾向にある（図 2）。土屋（1975）、鈴木（1975）やグリピン（1984）は、小氷期の気象的特徴を偏西風帯の拡大ないしは南下によるヨーロッパ各地の降水量の増加、雨の多

い夏と厳寒の冬、ブロッキング現象による高気圧と低気圧の緯度的並列などとし、現在の気候が 18 世紀の小氷期に酷似していることを指摘している。

この寒冷化をもたらす動因の一つとして、示唆されるのは地球軌道要素の変動に基づいて計算された北緯 37°における日射量が、主として離心率と歳差の関数として変動していて、現在減少しつつあることである（Koizumi and Ikeda, 1997）。過去数万年間ににおける地球軌道要素の変動と、海底堆積物中の有孔虫殻（Martinson *et al.*, 1987）や石筍の酸素同位体比（Wang *et al.*, 2001）、花粉量（Heusser, 1998）、黄砂量（長島ほか, 2004）などが同調した変動パターンを示しており、地球軌道要素に基づく未来予測は、これからの数 1000 年にわたって全地球の氷河化作用が強まってくることを予言している（グレーデル・クルッセン, 1997）。

すなわち、現在の地球表層は非常に不安定な気候状態にある。人間活動が放出する二酸化炭素などの温室効果ガスや廃棄物が地球の自己浄化能力をこえてしまい、その影響で地球温暖化が生じて、自然環境の変動周期のリズムを乱れさせ、気候システムに変調をもたらしつつある。近年に多発している地球の異常気象、気象現象の局所化と変動幅の増大は、このような不調和の現れであると考えられる。この地球環境の危機は、人類が自ら仕掛けたという意味で、人類史上かつてなかったことである。伊東（1996）はこれを環境革命と名付けている。

地球上の水は、降水・河川水の流出・海水の流れ・蒸発・大気中の水蒸気の移動と循環しているが、水の循環には、地表に吸収された太陽エネルギーの半分が使われているので、水循環は太陽エネルギーの副産物であると言える。水は、家庭用水、工場用水、農業用水として使用され、その種別は地域の経済発展の段階に依存するが、世界中で一番多く使用されるのは農業用であり、使用される水の 69% を占める（Spiro and Stigliani, 2000）。農業における水の需要は、人口が増加し続けるかぎり増加するが、農業における灌漑効率

は世界平均で 37% と極めて効率が悪いので、改善が必要である。

さらに世界中の多くの人びとは、家庭用水の慢性的な不足に悩んでいる。特に、人口の増加が著しいアジアやアフリカでは新たに水源を開発して確保しないかぎり、2025 年までに水不足になると言われている。20 世紀は石油の時代であったが、21 世紀は水の時代である (ブラウン, 2002)。

V. おわりに

1900 年から始まった小氷期後の温暖期が終わりつつある現在、自然環境の寒冷化傾向のなかで、人間活動が放出する二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化が加速されることで、異常気象が生じ、大きな社会問題となっている。地球環境の過去から現在への経過を精密に復元し、生成の機構と周期性を明らかにすることによって、近未来の予測と対策を確かなものにすることが、歴史科学の使命となっている。

謝 辞

丸山茂徳氏からは本論文を公にする機会と文意表現の適切な指示をいただいた。匿名査読者と編集委員会からは適切な修正をいただいた。入野智久氏にはパワースペクトル解析を試行していただいた。以上の方々に厚く御礼申し上げる。

注

- 1) 海洋 ocean は外洋、大洋、大海を指し、海 sea は海洋の一部で河口を含む陸地に接する浅海や海辺を指すとした。
- 2) 珧藻温度指数 ($Td = [Xw / (Xw + Xc)] \times 100$, Xw と Xc は暖流系および寒流系種の産出個体頻度) は、珧藻化石を使って海洋表層水温を復元するために、Kanaya and Koizumi (1966) によって提案された。Koizumi *et al.* (2004) は、暖流系および寒流系種の分布に関するその後の資料に基づきそれらの産出個体頻度を新たに XW と XC とすると共に、生存の全期間を浮遊性で過ごす外洋種に限定して、 Td を $Td' = [(Xw + XW) / (Xw + XW + Xc + XC)] \times 100$ と再定義した。

文 献

- 阿部彩子・千喜良 稔 (1999) 過去 1 万年の気候はいかに変化したか. 科学, **69**, 697-705.
Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Janschik, R.,

- Clasen, S., Bond, G., Showers, W., Chezebiet, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G. (1997) A pervasive millennial scale cycle in North-Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, **278**, 1257-1266.
Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani, G. (2001) Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, **294**, 2130-2136.
ブラウン, L.R. 著, 福岡克也監訳, 北濃秋子訳 (2002) エコ・エコノミー・家の光協会.
Campbell, I.D., Campbell, C., Apps, M.J., Rutter, N.W. and Bush, A.B.G. (1998) Late Holocene ~ 1500 yr climatic periodicities and their implications. *Geology*, **26**, 471-473.
ダイヤモンド, J. 著, 倉骨 彰訳 (2000) 銃・病原菌・鉄. 草思社.
Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z. and Revenaugh, J. (2005) A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 71-86.
Eddy, J.A. (1976) The Maunder minimum. *Science*, **192**, 1189-1202.
Gasse, F. (1977) Evolution of lake Abhé (Ethiopia and T.F.A.I.) from 70000 B.P. *Nature*, **2**, 42-45.
Gasse, F., Arnold, M., Fontes, J.C., Fort, M., Gilbert, E., Huc, A., Bingyan, L., Yuanfang, L., Qing, L., Melieres, F., Van Campo, E., Fubao, W., Qingsong, Z. (1991) A 13,000-year climate record from western Tibet. *Nature*, **353**, 742-745.
Gillespie, R. and Street-Perrott, F.A. (1983) Post glacial arid episodes in Ethiopia have implications for climate prediction. *Nature*, **306**, 680-683.
グレーデル, T.E.・クルツシェン, P.J. 著, 松野太郎監修, 塩谷雅人・田中教幸・向川 均訳 (1997) 気候変動—21 世紀の地球とその後. 日経サイエンス社.
グリビン, J. 著, 平沼洋司訳 (1984) 夏がなくなる日—明日を襲う気象激変と「温室効果」. カッパ・サイエンス, 光文社.
Gupta, A.K., Anderson, D.M. and Overpeck, J.T. (2003) Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **421**, 354-357.
橋本敬造 (1989) 「動力」をつくる—先進の中国技術. 週刊朝日百科 世界の歴史, **45**, E-268-E-271.
Heusser, L. (1998) Direct correlation of millennial-scale changes in western North American vegetation and climate with changes in the California Current system over the past ~ 60 kyr. *Paleoceanograpy*, **13**, 252-262.
Hu, F.S., Kaufman, D., Yoneji, S., Nelson, D., Shemesh, A., Huan, Y., Tian, J., Bond, G., Clegg, B. and Brown, T. (2003) Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Sci-*

- ence, **301**, 1890 1893.
- 伊東俊太郎 (1990) 比較文明と日本. 中公叢書, 中央公論社.
- 伊東俊太郎 (1996) 総論 1 文明の画期と環境変動. 伊東俊太郎・安田喜憲編: 地球と文明の画期 (講座「文明と環境」第2巻) 朝倉書店, 1 10.
- Ji, S., Xingqi, L., Sumin, W. and Matsumoto, R. (2005) Palaeoclimatic changes in the Quinghai Lake area during the last 18,000 years. *Quat. Int.*, **136**, 131 140.
- Kanaya, T. and Koizumi, I. (1966) Interpretation of diatom thanatocoenoses from the North Pacific applied to a study of core V20 130 (studies of a deep-sea core V20 130, part) *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 2*, **37**, 89 130.
- 金関 恕・川西宏幸編 (1996) 都市と文明. 講座「文明と環境」第4巻, 朝倉書店.
- Kitoh, A. and Murakami, S. (2002) Tropical Pacific climate at the mid-Holocene and the Last Glacial. *Paleoceanography*, **17**, 19-1 19-13.
- 小堀 巖 (1989) 古代社会の灌漑と治水. 週刊朝日百科 世界の歴史, **15**, E-68 E-72.
- 小泉 格 (1994) 海洋環境の変動性と周期性. 学術月報, **47**, 129 139.
- Koizumi, I. and Ikeda, A. (1997) The Plio-Pleistocene diatom record from ODP Site 797 of the Japan Sea. in *Proc. 30th Int. Geol. Congr.* edited by Wang, N. and Remane, J., VSP., **11**, 213 230.
- Koizumi, I., Irino, T. and Oba, T. (2004) Paleooceanography during the last 150 kyr off central Japan based on diatom floras. *Mar. Micropaleontol.*, **53**, 293 365.
- Koizumi, I., Tada, R., Narita, H., Irino, T., Aramaki, T., Oba, T. and Yamamoto, H. (2006) Paleooceanographic history around the Tsugaru Strait between the Japan Sea and the Northwest Pacific Ocean since 30 cal kyr BP. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **232**, 36 52.
- Lamb, H.H. (1982) *Climate, History and the Modern World*. Routledge, London.
- Liu, K., Yao, Z. and Thompson, L.G. (1998) A pollen record of Holocene climatic changes from the Dundee ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau. *Geology*, **26**, 135 138.
- Magny, M. (1993) Solar influences on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and their atmospheric ^{14}C record. *Quat. Res.*, **40**, 1 9.
- Magny, M. (1995) Successive oceanic and solar forcing indicated by Younger Dryas and early Holocene climatic oscillations in the Jura. *Quat. Res.*, **43**, 279 285.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C., Jr. and Shackleton, N.J. (1987) Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Res.*, **27**, 1 29.
- 松本 淳・井上知栄 (2005) 異常気象と地球温暖化. 科学, **75**, 1142 1145.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twickler, M.S., Morrison, M.C., Bloomfield, P., Bond, G.C., Alley, R.B., Gow, A.J., Grotes, P.M., Meese, D.A., Ram, M., Taylor, K.C. and Wumkes, W. (1994) Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover the North Atlantic during the last 41,000 years. *Science*, **263**, 1747 1751.
- 長島佳菜・多田隆治・松井裕之 (2004) 過去 14 万年間のアジアモンスーン・偏西風変動—日本海堆積物中の黄砂粒径・含有量からの復元—. 第四紀研究, **43**, 85 97.
- Neff, U., Burns, S.J., Mangini, A., Mudelsee, M., Fleitmann, D., Matter, A. (2001) Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, **411**, 290 293.
- O'Brien, S.R., Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Meese, D.A., Twickler, M.S. and Whitlow, S.I. (1995) Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, **270**, 1962 1964.
- Rampino, M.R., Sanders, J.E., Newman, W.S. and Königsson, L.K. (1987) *Climate History, Periodicity, and Predictability*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- 斉藤文紀・楊 作升 (1994) 黄河: 河川流量, 浮遊堆積物運搬量と堆積物収支. 堆積学研究, **40**, 7 17.
- 坂本賢三 (1989) 中世の技術. 週刊朝日百科 世界の歴史, **45**, E 258.
- 桜井邦朋 (1987) 太陽黒点が語る文明史—「小氷河期」と近代の成立. 中公新書 845, 中央公論社.
- Spiro, T.G. and Stigliani, W.M. 著, 岩田元彦・竹下英一訳 (2000) 地球環境の化学. 学会センター.
- Stuiver, M. and Braziunas, T.F. (1989) Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillations. *Nature*, **338**, 405 408.
- Stuiver, M. and Braziunas, T.F. (1993) Sun, ocean, climate and atmospheric $^{14}\text{CO}_2$: An evaluation of causal and spectral relationships. *Holocene*, **3**, 289 305.
- Stuiver, M. and Reimer, P.J. (1993) Radiocarbon calibration program 1993. *Radiocarbon*, **35**, 215 230.
- Stuiver, M., Braziunas, T.F., Becker, B. and Kromer, B. (1991) Climatic, solar, oceanic, and geomagnetic influences on late-Glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change. *Quat. Res.*, **35**, 1 24.
- 末尾至行 (1989) 水車・風車—中世を支えた水と風. 週刊朝日百科 世界の歴史, **45**, E-260 E-265.
- 鈴木秀夫 (1975) 氷河時代—人類の未来はどうなるか. 講談社現代新書 414, 講談社.
- 鈴木秀夫 (1976) 超越者と風土. 大明堂.
- 鈴木秀夫 (1978) 気候と文明. 鈴木秀夫・山本武夫編: 気候と歴史, 朝倉書店, 1 69.
- 鈴木秀夫 (1990) 気候の変化が言葉をかえた—言語年代学によるアプローチ. NHK ブックス 607, 日本放送出版協会.
- 鈴木秀夫 (2000) 気候変化と人間—1 万年の歴史—.

- 大明堂 .
- 土屋 巖 (1975) 地球は寒くなるか . 講談社現代新書 400, 講談社 .
- Van Campo, E. and Gasse, F. (1993) Pollen- and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co basin (western Tibet) since 13,000 yr B.P. *Quat. Res.*, **39**, 300-313.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.-C. and Dorale, J.A. (2001) A high-resolution absolute-dated late Pleistocene Monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345-2348.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A. and Li, X. (2005) The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, **308**, 854-857.
- Wu, W. and Liu, T. (2004) Possible role of the " Holocene Event 3 " on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China. *Quat. Int.*, **117**, 153-166.
- 安田喜憲 (1987) 世界史のなかの縄文文化 . 考古学選書 26, 雄山閣出版 .
- 安田喜憲 (1988) 5000 年前の気候変動と古代文明 . 科学, **58**, 468-476.
- 安田喜憲 (1990) 気候と文明の盛衰 . 朝倉書店 .
- 安田喜憲 (1993) 気候変動と民族移動 . 埴原和郎編 : 日本人と日本文化形成, 朝倉書店, 231-279.
- 安田喜憲 (1995) 農耕の起源と環境 . 梅原 猛・安田喜憲編 : 農耕と文明 (講座「文明と環境」第 3 巻) , 朝倉書店, 116-126.
- 安田喜憲 (1996) 3000 年前の気候変動と宗教革命 . 安田喜憲・林 俊雄編 : 文明の危機—民族移動の世紀 (講座「文明と環境」第 5 巻) , 朝倉書店, 20-34.
- 安田喜憲 (2000) 大河文明の誕生 . 角川書店 .
- 安田喜憲 (2004) 文明の環境史観 . 中公叢書, 中央公論社 .
- 吉野正敏 (1993) 東アジアにおける歴史時代の気候と人間活動 . 愛大史学, 21-45.
- 吉野正敏・安田喜憲編 (1995) 歴史と気候 . 講座「文明と環境」第 6 巻, 朝倉書店 .
- 湯浅赳男 (1993) 環境と文明—環境経済論への道 . 新評論 .
- (2006 年 8 月 28 日受付, 2007 年 4 月 19 日受理)