

1 **Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene**  
2 **Science, 294, 2130-2136. Bond et al.**

3  
4 **完新世の北大西洋の持続的な太陽の影響**

5 **Abstract**

6 北大西洋亜極地帯の風や海洋表層の挙動(hydrography)は、完新世全体を通じて  
7 太陽の出力の変動に影響されていると思われる。その根拠は、宇宙起源の放射  
8 性核種の  $^{14}\text{C}$  や  $^{10}\text{Be}$  の生産速度の変動と、深海堆積物コアから測定された流  
9 氷(drift ice)のプロキシ(proxies)の 100 年から 1000 年の時間スケールの変動と  
10 の間に見られる高い相関である。太陽の強制力(forcing)のメカニズムは、少なく  
11 とも完新世のセグメントにおける北大西洋の“1500年サイクル”の原因かもし  
12 れない。海洋表層の海洋循環は、太陽のシグナルを増幅し、シグナルを全球に  
13 伝播する北大西洋深層水(North Atlantic Deep Water)の生産に影響を与えてい  
14 るかもしれない。

15  
16 北大西洋の完新世気候の顕著な特徴は、海洋表層の一連の流水学的変動で、  
17 ノルディック海やラブラドル海において、流氷や冷たい海水が南方や東方へ前  
18 進を繰り返し、そのつど亜極循環のより温かい海流の奥部に入り込んだ。安定  
19 な気候の間氷期においては、それらのかなり劇的な出来事が繰り返すことを説  
20 明するのは難しいとされている。過去の研究で示された低分解能記録では、完  
21 新世前期の北大西洋の流氷は、太陽のエネルギー放出とリンクしている可能性  
22 があることが示された。太陽の変動に対する気候の強い応答の可能性は長い間  
23 議論されてきたが、それは太陽の強制力の規模が小さいためである。しかし、  
24 最近の大気循環(GCM)のモデリングの結果は、黒点の 11 年サイクルに伴う太陽  
25 活動のわずか ~0.1%の減少が、成層圏のオゾンと温度の変動への大気のダイナ  
26 ミックな応答を通じて、地表の気候の変化を引き起こす可能性があることを示  
27 している。ここで、我々は、太陽活動と気候とのつながりをテストするために、  
28 完新世全体を対象に、太陽放射のプロキシと、北大西洋の 3 本の深海コアに記  
29 録された流氷変動とを比較した。

30  
31 **The marine and nuclide records.**

32 完新世の流氷変動に関する我々のプロキシは、氷の運んだ少量の碎屑物中の 3  
33 つの岩石トレーサーの占有率で、それらは北大西洋亜極地帯の至る所にある。  
34 すなわち赤鉄鉱の付着した粒子(hematite-stained grains; HSG)、アイスランド  
35 起源の火山ガラス(IG)、そして炭酸塩岩の岩片である(DC)。すでに論じられた  
36 ように、これらのトレーサーは海洋表層で循環する氷河や海水の量や通過する

37 経路の変化に特に敏感である．Fig. 1 と(1)で説明したように，我々はトレーサ  
38 ーの占有率の増加を，氷が運ぶ冷たい表層海水がラブラドル海から東方へある  
39 いはノルディック海から南方へ張り出したことを反映すると解釈しており，こ  
40 のような冷水の張り出しには，アイスランド北の強い北風のシフトに伴われる  
41 のだろう．

42 3本のコアの採取地点からの流氷記録の年代は，質量加速器で測定した59の  
43 年代較正された $^{14}\text{C}$ 年代に基づく(Fig. 2とWeb table1；すべての年代は別の  
44 方法を示さない限り，現在よりさかのぼった暦年代である)．我々の研究におけ  
45 る解像度の最も高い記録はMC52-VM29-191で，平均500年毎に年代値が得ら  
46 れている．堆積物の生物攪拌は低いので，堆積速度が $10\text{-}15\text{cm}/10^3$ 年である  
47 ところでもコアの最上部は現在の放射性炭素(modern radiocarbon；負に較正され  
48 た $^{14}\text{C}$ 年代；核実験で大量の $^{14}\text{C}$ が生産されたため)を含む；我々は，サンブ  
49 リングの解像度を所々で20年にまで高め，70年程度の短期間のトレーサーの  
50 急変化を解明した．ほとんどの記録において試料の解像度は30-50年である．

51 宇宙起源の放射性核種の生産速度は，太陽風と太陽活動に関連している．生  
52 産速度が高い時は太陽風の弱い時で，太陽の放射度は減少している時である(6)．  
53 我々は，宇宙起源の放射性核種の生産速度のプロキシとして，グリーンランド  
54 氷床で測定された $^{10}\text{Be}$ の記録を $^{10}\text{Be}$ フラックスに変換したものと，さらに樹  
55 の年輪の $^{14}\text{C}$ を海洋リザーバーと陸上リザーバーの効果を補正した $^{14}\text{C}$ 記録  
56 を用いることとした．

57

### 58 **Linking records of drift ice and nuclide production rate.**

59 我々の流氷記録は，一連の急速な100年スケールのサイクル(たいてい  
60 200-500年のサイクル)からなり，それらは $^{14}\text{C}$ や $^{10}\text{Be}$ の生産速度の大規模な変  
61 化と非常に良く符合している(Fig. 3)(ただし，ここでいうサイクルとは，周期を  
62 示唆するものではない)．前期完新世(9000年前以前)には，複数の100年スケ  
63 ルのサイクルの集まりで，全体的には1つのピークとなる3つの顕著なピーク  
64 は，すべての記録でほぼ同じ年代に起きている．0から9,000年前の間には，100  
65 年スケールのサイクルがいくつか集まって，非反復的な周期(nonrepeating  
66 composite cycles)を示し，コア間で対比される．同様の周期的パターンは，北  
67 大西洋東部のMC52-VM29-191の，分解能の良い記録にも見られ，また北大西  
68 洋の東部や西部の4つの流氷の記録をスタックしたカーブ(Fig. 2の一番下 Fig.  
69 3のEとFのOcean standard(%))にも見られ，それらのパターンが北大西洋の  
70 流水変動の卓越した特徴であることを示す． $^{14}\text{C}$ と $^{10}\text{Be}$ の生産の記録と，個々  
71 のプロキシおよびスタックされた記録との間の相関係数は $r=0.44$ から $0.56$ で  
72 ある(Fig. 3)．トレンドを消し，平滑化した $^{14}\text{C}$ と $^{10}\text{Be}$ 記録の相関係数は， $r=0.6$

73 である．それらの記録の間に見られる調和は，年代誤差内において，コアの記  
74 録の時間シリーズを調整することによって改良できる．太陽活動と流氷のプロ  
75 キシとの間のコヒーレンス(波の干渉のしやすさの程度)は，クロススペクトル解  
76 析と単一スペクトル解析の 2 つの方法で見積もられ，300 年から 500 年と 900  
77 年から 1100 年のバンドに統計的に有意なコヒーレンスが検出された[(13 )Web.  
78 fig. 2] ．

79 我々が流氷のピークに符合させた平滑化した  $^{14}\text{C}$  と  $^{10}\text{Be}$  のピークは，平滑化  
80 する前の  $^{14}\text{C}$  と  $^{10}\text{Be}$  の記録では，100-200 年程度の急激で顕著な生産速度のピ  
81 ークが数個集まって，全体的に大規模な変動をなす部分にあたる．その良い例  
82 は 5000 年前から 6000 年前の時期である(Fig. 3) ．完新世の気候の強制力だけで，  
83  $^{14}\text{C}$  と  $^{10}\text{Be}$  の同時で，大規模かつ突然の生産速度の変動を引き起こす可能性は  
84 かなり低いと思われる．よって，我々の対比は，12,000 年間の北大西洋記録に  
85 示された流氷の数 100 年スケールの増加は，太陽放射の活動の変化が激しい時  
86 で(つまり振幅大きい)全体的にみると減少期に結びついていることの証拠で  
87 ある．

88 我々の証拠によって示された規模と一貫性を有した気候変化への太陽の影響  
89 は，北大西洋に限定されたものではない．事実，先行研究は，年輪の  $^{14}\text{C}$  の増  
90 加つまり太陽の放射量の減少と，スカンディナヴィアの完新世の氷河の前進  
91 (15)；グリーンランド上空の完新世の極域の大気循環の拡大(16)；2700 年前の  
92 オランダの突然の寒冷化(17)；そしてフェロー諸島の湖の記録(18)とを結びつけ  
93 ている．それらの出来事のすべては，北大西洋の流氷の顕著な増加と同時であ  
94 る(Fig. 3, A と B) ．多くの年代値が得られ，かつ高分解能のオマーンの石筍の  
95  $^{18}\text{O}$  測定は，雨量が著しく減少した時期が 5 回あり，それらは 6300, 7400,  
96 8300, 9000, 9500 年前を中心とした太陽活動の非常に弱まった時期に対応する  
97 (19) ．それらの出来事のそれぞれも，太陽放射の減少期で北大西洋の流氷の増加  
98 の時期と一致している(Fig. 3, A と B) ．最も最近の流氷サイクルは，およそ 100  
99 年前から 1100 年前の間で，サルガッソー海(20)と西アフリカの湧昇地域(21)で  
100 の水温サイクルと一致しており，これは北大西洋の亜極地帯と亜熱帯地域まで  
101 の広い地域の気候の応答を示唆する．また，この時期はカリヤコ海盆 (Cariaco  
102 Basin)の一連の表層海洋の湧昇の顕著な増加，赤道東アフリカの湖の顕著な水  
103 位の変動，ユカタン半島の著しい日照りの期間で，その事柄のすべてが太陽放  
104 射の減少とリンクしている(Fig. 3) ．

105 最後の流氷サイクルはいわゆる小氷期(LIA)と中世温暖期(MWP)に対比され  
106 る(Fig. 2) ．これら 2 つの出来事の地域的範囲や正確な年代には議論の余地がま  
107 だあるが，我々の記録は，両方とも太陽放射の変動に，部分的あるいはすべて  
108 関連しているという先行研究の示唆を支持する(25) ．しかし，補正年代の 2 の

109 誤差が大きいので(通常  $\pm 100$  から 150 年)(Web 表 1), 我々の流氷の指標, また  
110 は亜熱帯地域の北大西洋の水溫記録と, 数 10 年間のウルフ(Wolfe), シュペーラ  
111 ー(Spörer), マウンダー - (Maunder), ダルトン(Dalton)極少値との直接の比較を  
112 妨げる. しかしながら, 我々の記録によって示された太陽と気候の関連は,  
113 12,000 年間にわたり優勢で, マウンダー極小期(1645-1715 年)と LIA の寒冷な  
114 時期(1315-1870 年頃)との間の広く知られた関連は, 偶然の一致ではないのは確  
115 かである.

116 我々が概要を示した比較は, 気候への太陽のインパクトの痕跡は, 極域から熱  
117 帯地域まで及んでいたことを示す. さらに, オマーンの記録との比較によって  
118 示唆したように, 太陽活動の極小期に対する広範囲のテレコネクション的な応  
119 答は, 北大西洋高緯度の氷を運ぶ海洋表層水の寒冷化とモンスーンの弱体化,  
120 そして低緯度の少なくとも一部における降水量の減少とリンクしているよう  
121 である.

122 100 年サイクルのいくつかの集まりである 1000 年の継続期間を持つサイクル  
123 は, より分解能の低い先行研究で提示された 9 つのサイクルに対応し, それら  
124 は Fig. 2 において番号を付けたものである. これらの流氷サイクルは, 不可解  
125 で, 準周期的な “1500 年” サイクルをなしており, また氷期のターミネーショ  
126 ンを超え最終氷期にも起こっているようであり, 気候システムの普遍的な特徴  
127 である (12, 27). よって, Denton や Karlen(15)によって 20 年以上前に予想さ  
128 れたように, 少なくとも完新世の北大西洋の “1,500” 年サイクルは, 太陽放射  
129 の変動にリンクしていると思われる. もしこれが正しければ, 北大西洋完新世  
130 気候の 100 年から 1000 年スケールの変動の主な強制メカニズムとして, 海洋深  
131 層水循環の内的強制振動あるいは, エル・ニーニョ南方振動や北大西洋振動  
132 (NAO)といった内因そして地球軌道の強制に変調を受けた大気変動を考える必  
133 要はない. ただし, 太陽の強制がそれらの大気の変動を刺激する可能性を除外  
134 していない.

135 我々は, 最終間氷期 5e の記録から, 完新世のものと著しく類似した一連の変  
136 動を検出した. 2 本のコアの流氷の指標の測定は, 2 枚の同時断面の間で同じ数  
137 のイベントのあったことを示し, それらは完新世のカウンターパートであり,  
138 北大西洋の極域で対比できることを示唆する. SPECMAP 年代に基づくと, Fig.  
139 4 の A と B の間は 20,800 年であり, ステージ 5e のサイクルの平均持続時間は  
140 1480 年で, 完新世サイクルの平均持続時間 1340 年に匹敵する. これらの発見  
141 が完新世や MIS5e の流氷記録が共通の起源であることを証明し, それらは過去  
142 の間氷期にも見られる 100 年-1000 年スケールの変動に太陽の強制力が影響を  
143 及ぼした可能性を提起する.

144 太陽の強制力が, 完新世の 100 年-1000 年スケールの北大西洋の流氷の変動

145 の原因ならば、どのように太陽活動の変動が気候変動を引き起こすのかという  
146 問題に対して、付加的で、検討されていない次元が加わる。増幅メカニズムに  
147 関する GCM のモデリングは、太陽の強制力に対する大気のダイナミックな応  
148 答に注目している(4, 5)。そのモデルは太陽放射の減少時に、成層圏のオゾンの  
149 変動によって引き起こされる下方伝播効果が、北半球高緯度の大気の寒冷化、  
150 北半球の亜熱帯のジェット気流のわずかな南下、北半球のハドレー循環の弱体  
151 化をまねくとする。Fig. 3 の我々の発見によって示されたように、太陽放射の減  
152 少に対するこれらの大気の応答で、おそらく北大西洋の流氷の増加、表層海水  
153 やグリーンランド上の大気の寒冷化、低緯度地域の降水量の減少が同時に起こ  
154 るだろう。

155

### 156 **Potential feedback from changes in thermohaline circulation**

157 最近のモデルの結果は、70 年という短期間のマウンダー極小期には、太陽放射  
158 は ~ 0.25% 減少したと推定され、それに対する北大西洋の気候の応答は  
159 AO/NAO の弱体期に類似したものだたと示唆している(31)。しかし、最近の 3  
160 つの流氷のサイクルと、ヨーロッパ、グリーンランド、北大西洋亜極地帯の気  
161 温の変動との比較は、我々の記録のより長い数 100 年から 1000 年のタイムスケ  
162 ールにおいて、地域的な寒冷化は AO/NAO のダイポールアノマリーと一致しな  
163 いことを示唆する(Fig. 5A と B)。放射性炭素年代の較正の 2 以内の海洋記録  
164 の年代調整(Web 表 1)でも、温度の変動パターンを AO/NAO のそれに合わせる  
165 ことは無理である。その結論は、最近 1000 年で最もよく示され、データが利用  
166 できる先の 2 つのサイクル(1 と 2)でも示される(Fig. 5A)。

167 その代わりとして、最近の 3 つのサイクルの地域的な寒冷パターンは、北大西  
168 洋深層水の生産の低下に伴う寒冷化と似ており、その例としてヤングドライ  
169 アス期の NADW の生産の低下イベントと随伴するより大きな気温低下の分布  
170 が挙げられる(Fig. 5C)。いくらか未決定の部分もあるが、深層循環のプロキシ  
171 の測定は、少なくともいくつかの流氷のピーク期に北大西洋深層水の生産は減  
172 少したことを示す(1, 32)。さらに、MC52-VM29-191 の浮遊性有孔虫の  $^{18}\text{O}$   
173 の減少は、流氷の増加と(Fig. 2)、より寒冷な表層水温(1)と一致しているため、  
174 表層塩分は、おそらく 0.5-0.6 塩分ユニット減少したはずである(33)。北大西洋  
175 の対流地域内のそのような比較的大きい表層の塩分の減少は、北大西洋深層水  
176 の生産の減少を引き起こす可能性が十分ある(34)。

177 それゆえに、太陽活動がトリガーとなった北大西洋熱塩循環の減少が増幅機  
178 構である可能性はあり、特にノルディック海への海氷のフラックスの増加があ  
179 った場合には、その可能性が高くなる(34, 35)。実際に、1960 年代後半から  
180 1970 年代後半まで、フラム海峡を通過する風で運ばれる北極海からの流氷の増

181 加は，ノルディック海や北大西洋亜極海域の表層海水の 0.4-0.6 塩分ユニット  
182 (salinity units)の淡水化(freshening)の結果となった(大規模な塩分の異常値;  
183 Great Salinity Anomaly)が，その低下量は最も東の地点での浮遊性有孔虫の  
184  $^{18}\text{O}$  で示された塩分の減少の範囲内にある(fig. 2) .その淡水化はラブラドル海の  
185 対流を弱体化し(34, 36)，弱体化した AO/NAO の気温のダイポールアノマリー  
186 と対照的に，海洋表層の寒冷化はラブラドル海全域(basin wide)に及んだ(37) .  
187 グリーンランドにおける気圧の異常に高い状態が強まり，ノルディック海の流  
188 氷を北大西洋亜極海域へ南下させる北風を強める．これは，完新世の流氷のピ  
189 ーク時の最北の 2 つのコア採取地点において，我々の推定した流氷の南への移  
190 動と違ったものではない(Fig. 1) . 我々が完新世で推論したより劇的な状態とよ  
191 く似た現世のアナログは，20 世紀の太陽放射の増加期における最も規模の大き  
192 な一時的減少の期間であることは(補足；1980 年代の低下期で塩分も低下した)  
193 興味深い(Web fig.3)(38) .

194 このように北極海からノルディック海は，海氷や北大西洋熱塩循環へのイン  
195 パクトを通して，太陽の引き起こす大気変動が全球に拡大かつ伝播された重要  
196 な地域である可能性がある．さらに北方への熱の輸送の弱体化は，北大西洋の  
197 温度や水の状態(hydrologic)の緯度勾配に変化を与え，もしかすると低緯度気候  
198 の応答を高める潜在性がある(例えば，(39)) .

199 この研究の結果は，以前研究された 10 年スケールだけでなく，ここで述べた  
200 100 年から 1000 年スケールでも，地球の気候システムが太陽エネルギー出力の  
201 ごくわずかな変動に対しても感度がかかなり高いことを論証する．前期完新世に  
202 は，大陸氷床が融け残っており，それが気候へも影響を与えていたし，北半球  
203 高緯度の日射量はピークに達しており，最近 2, 3 千年間の日射量とはかなり異  
204 なっていた．そのような状況にも関わらず，北大西洋の太陽活動への応答は保  
205 持されていた．今までは，たった過去 1000 年間からの推定に基づいていたが，  
206 我々の発見は，太陽の変動が，将来も気候に影響を与え続けるという推定を支  
207 持する(25) . もし，北大西洋の流氷や表層水の動態の強制力が，基本的に太陽活  
208 動とリンクしており，その強制力が成層圏で始まったのならば，大気のダイナ  
209 ミクスや，それらにリンクした海洋循環は，100 年や 1000 年スケールでの気  
210 候変動を解釈するために，予想以上に重要である .

211

212 北村晃寿・森島 唯