

2. 気候変動と太陽活動の相関

2.2 古気候変動と太陽活動

2.2.1 太陽活動と小氷期(LIA), 中世温暖期(MWP)

2.2.2 黒点の11年周期とダストフラックス変動

2.2.3 Holoceneにおける100～1000年スケールの
気候変動と太陽活動変動

2.2.4 最終氷期における100～1000年スケールの
気候変動と太陽活動変動

2.2.1 太陽活動と小氷期(LIA), 中世温暖期(MWP)

(Frozen Themes, 1677年)



20100223-24森羅万象学校

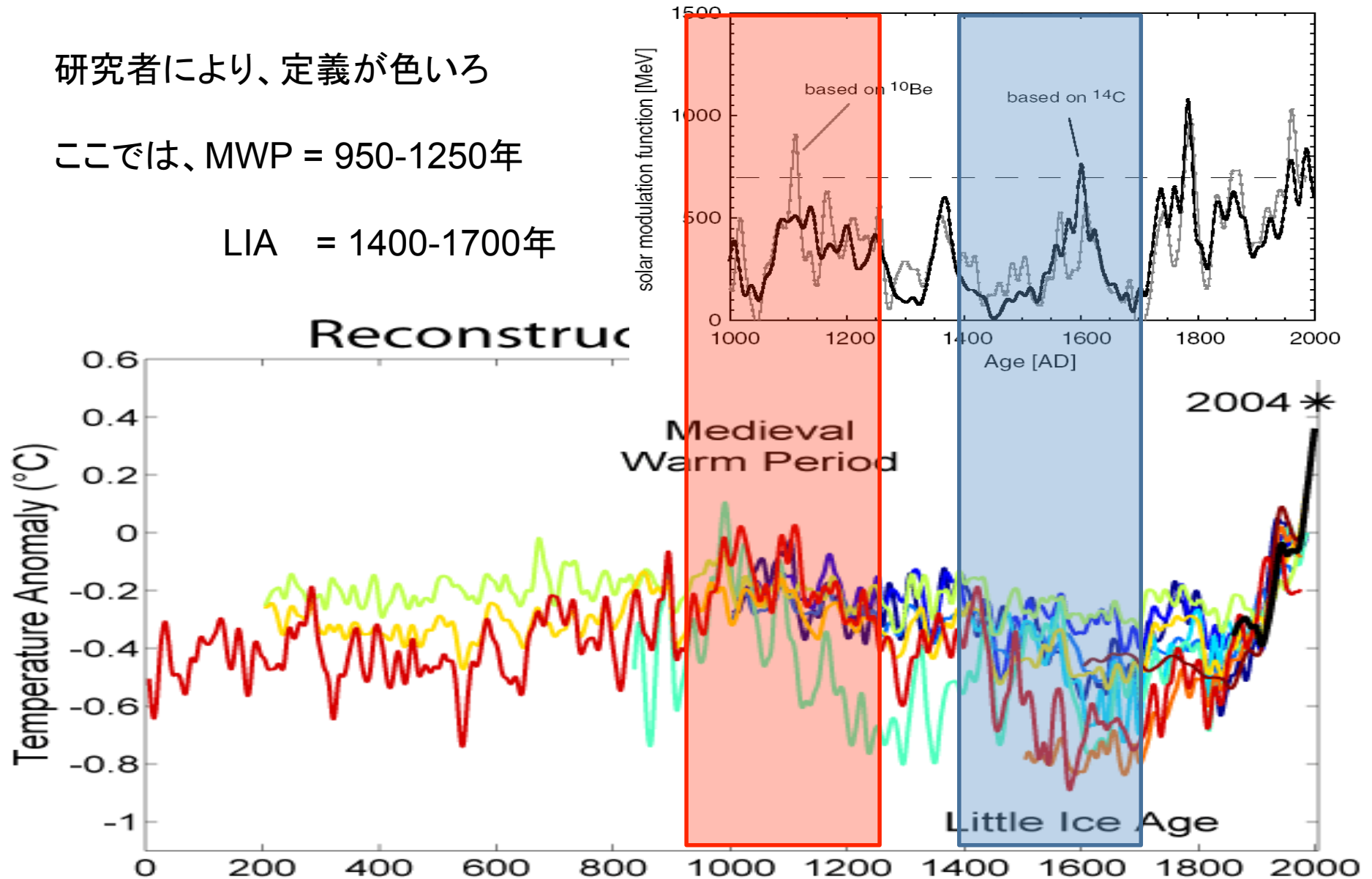
(from Wikipedia)

中世温暖期(MWP)と小氷期(LIA)の時期

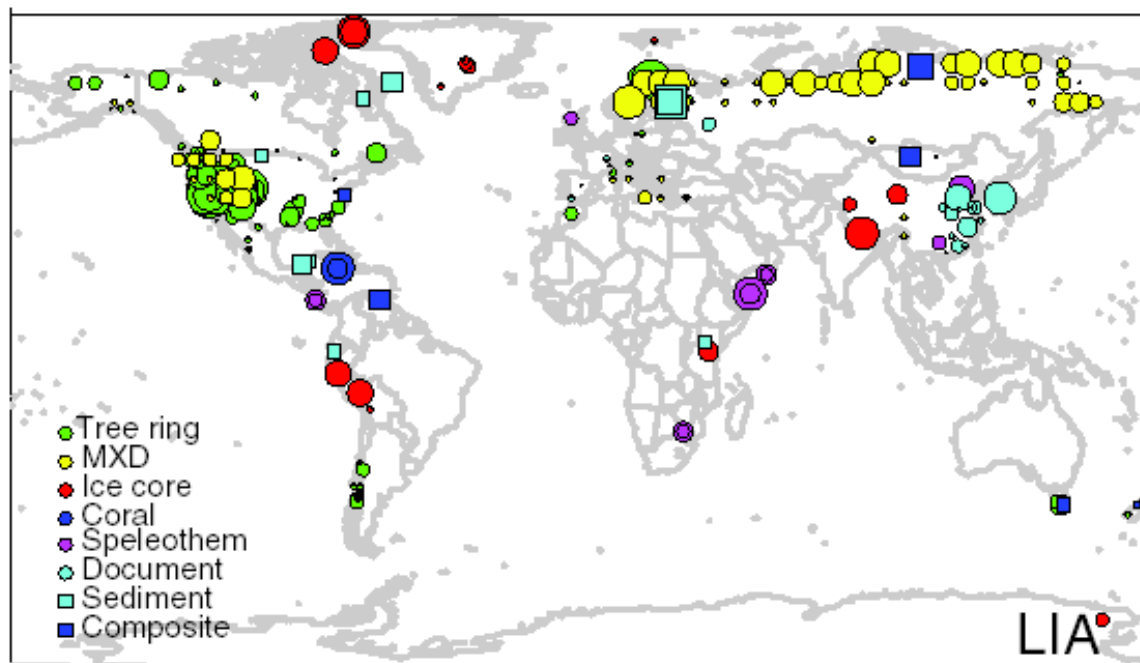
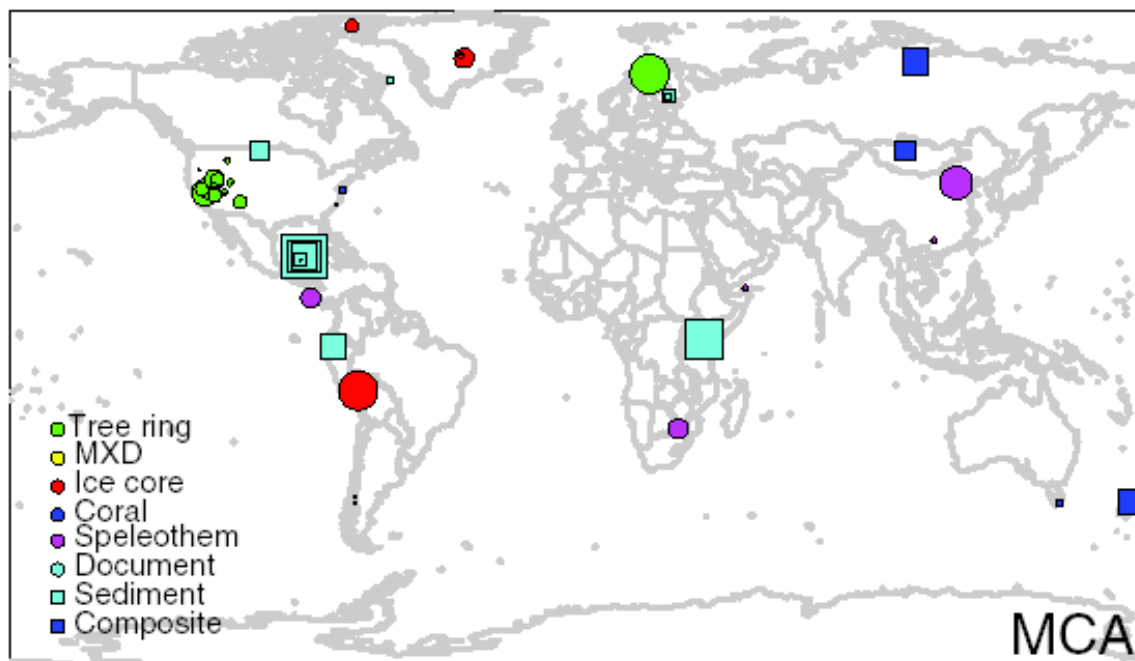
研究者により、定義が色いろ

ここでは、MWP = 950-1250年

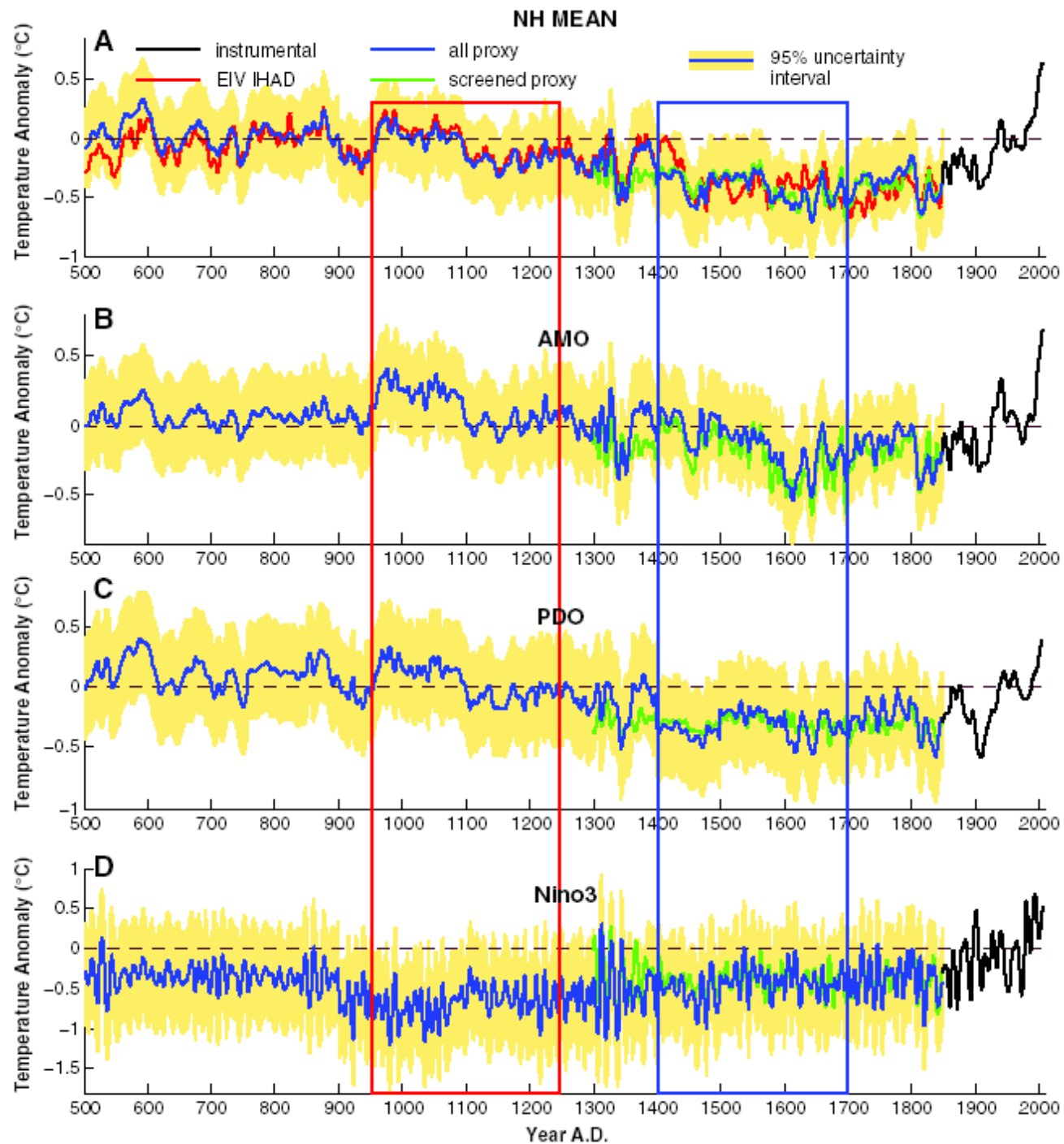
LIA = 1400-1700年



復元に使用した 様々な代替 指標



(Mann et al., 2009 Science)

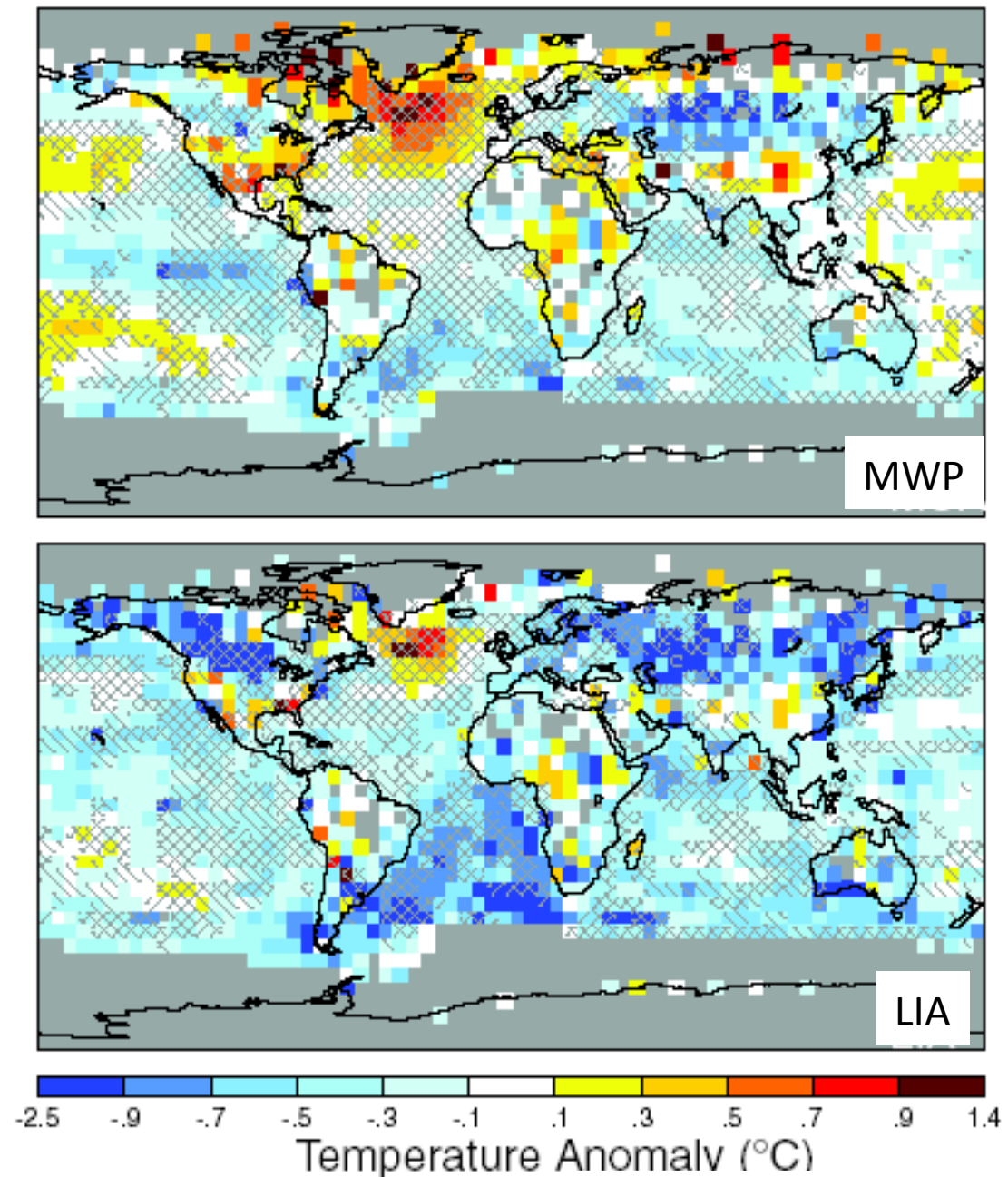


1961-1990年の平均値を基準

(Mann et al., 2009 Science)

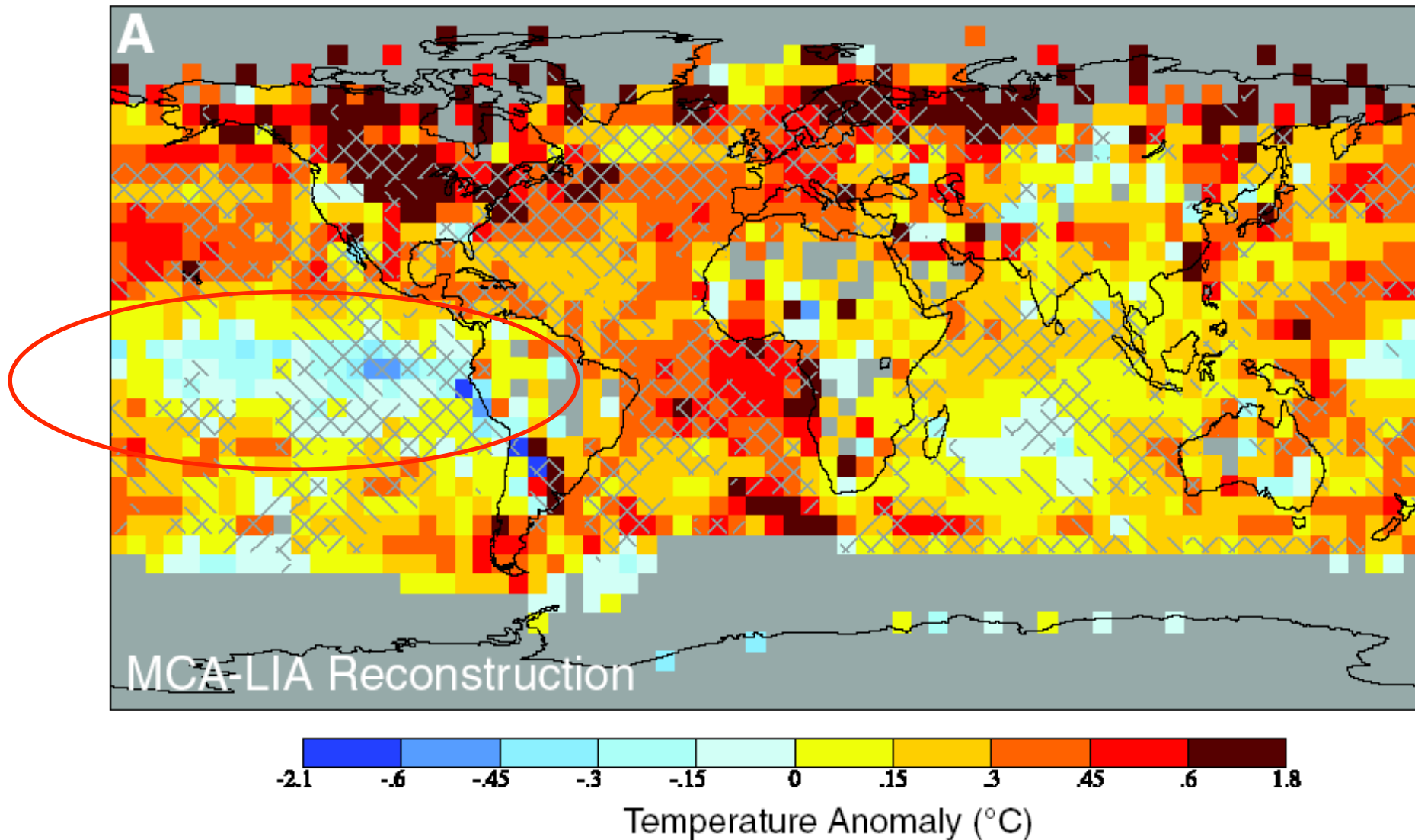
中世温暖期(MWP)および小氷期(LIA)の気温アノマリの空間分布

Fig. 2. Reconstructed surface temperature pattern for MCA (950 to 1250 C.E.) and LIA (1400 to 1700 C.E.). Shown are the mean surface temperature anomaly (left) and associated relative weightings of various proxy records used (indicated by size of symbols) for the low-frequency component of the reconstruction (right). Anomalies are defined relative to the 1961–1990 reference period mean. Statistical skill is indicated by hatching [regions that pass validation tests at the $P = 0.05$ level with respect to RE (CE) are denoted by / (\) hatching]. Gray mask indicates regions for which inadequate long-term modern observational surface temperature data are available for the purposes of calibration and validation.

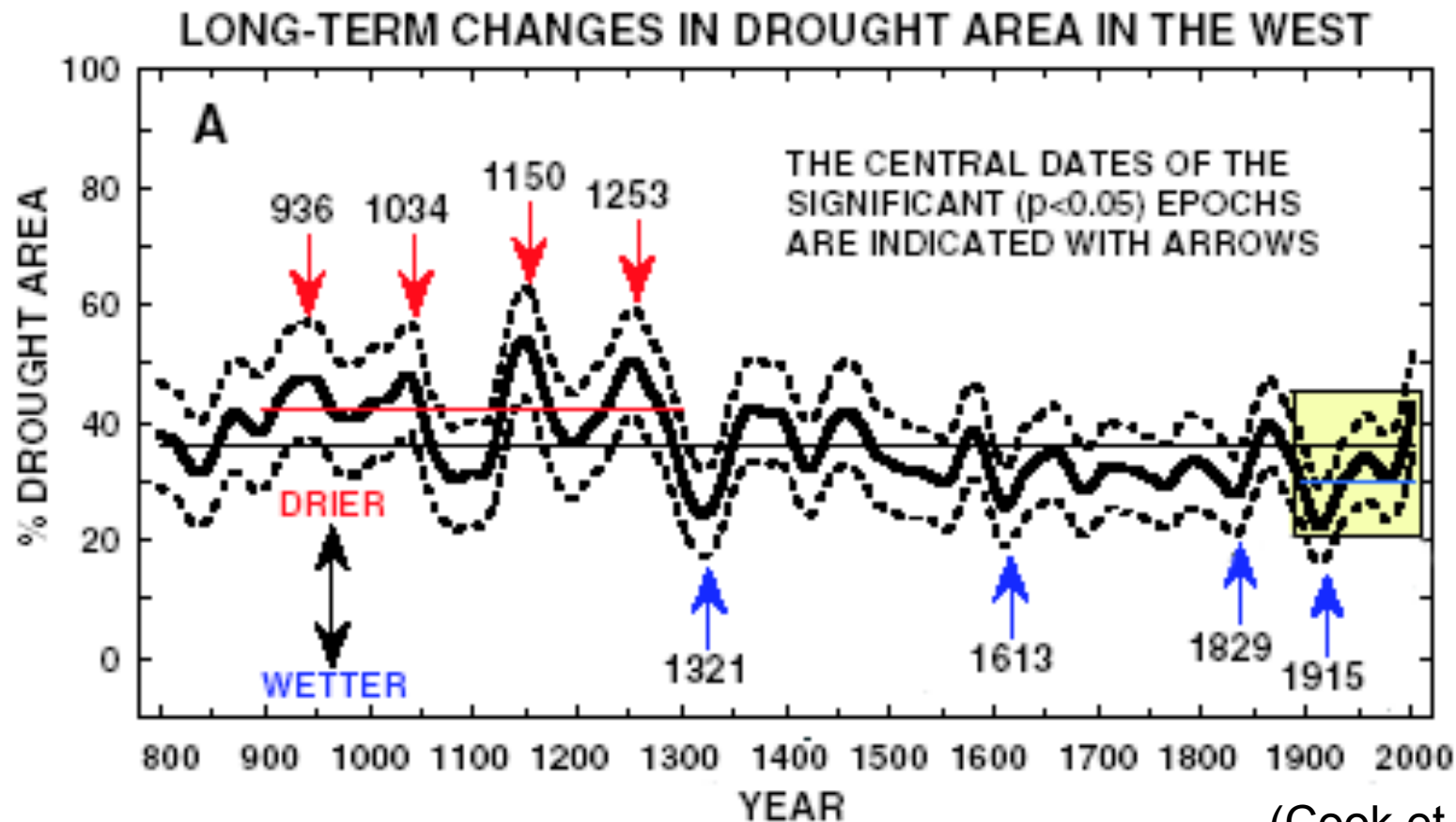
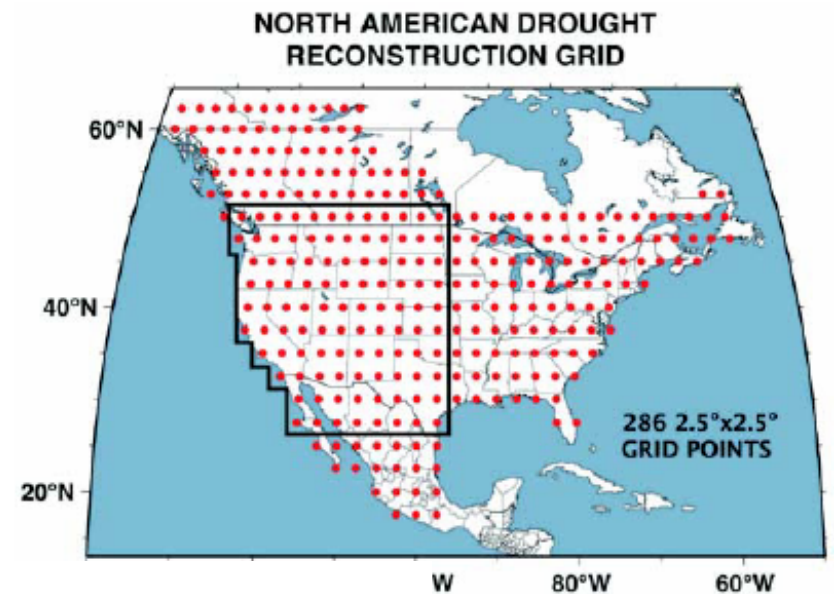


(Mann et al., 2009 Science)

(MWP – LIA) 古気候データ

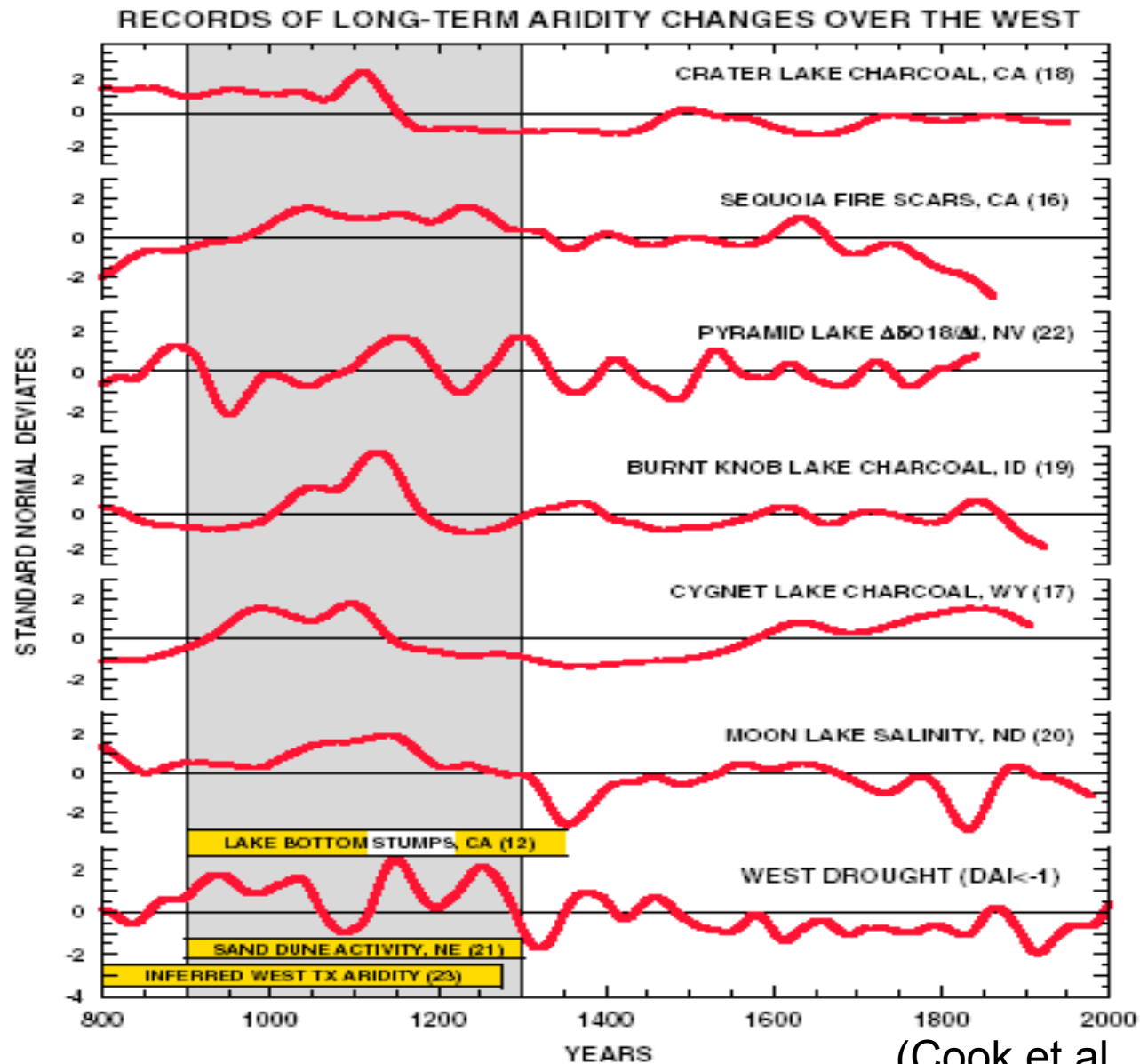


年輪を使った乾燥—湿潤度推定に基づく、アメリカ西部における過去1200年間の干ばつ史復元



(Cook et al., 2004 Science)

様々な古環境指標に基づいたアメリカ西部における MWPの干ばつの検証

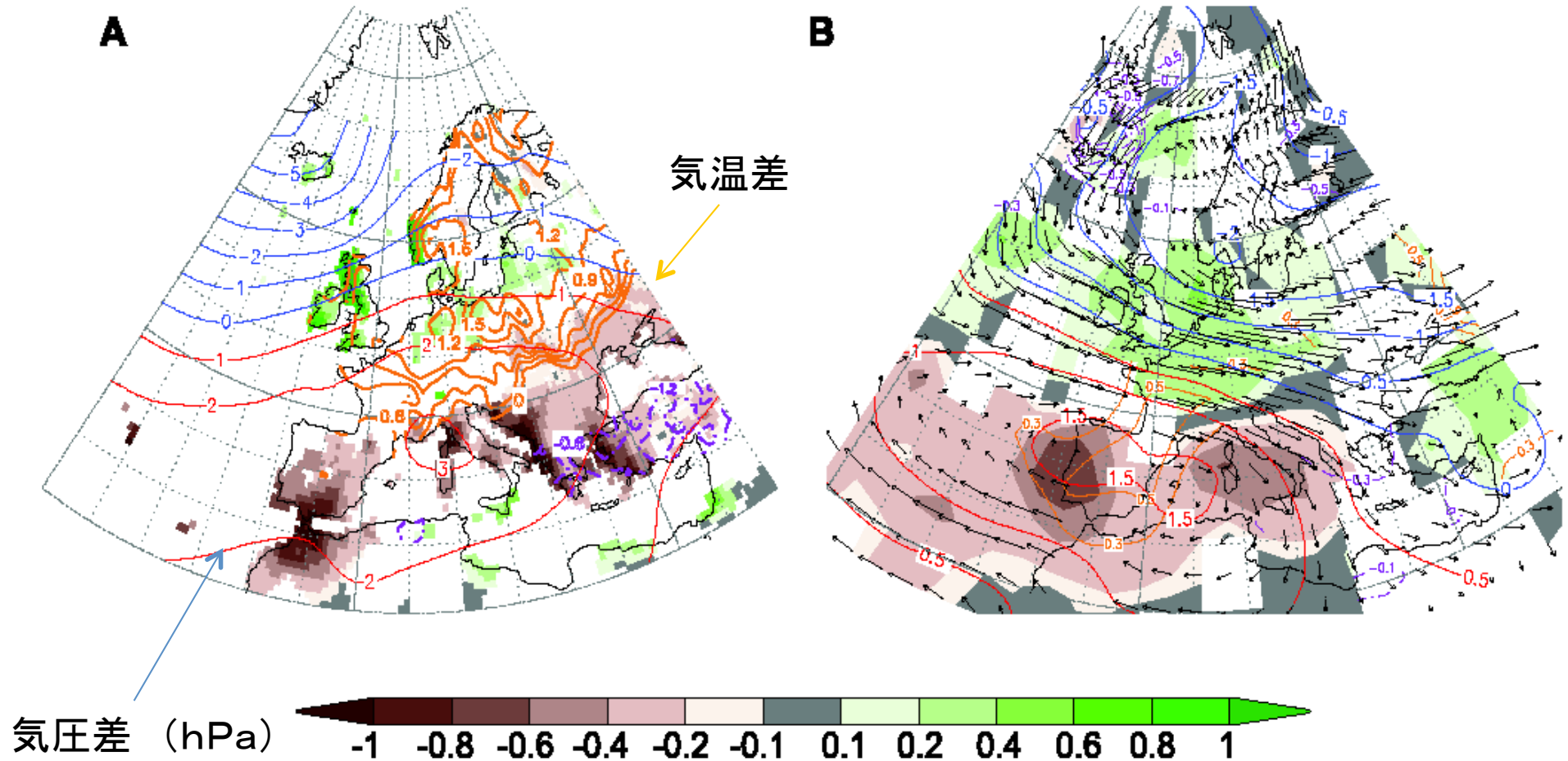


(Cook et al., 2004 Science)

MWPにおけるNAO+的気候パターン

NAO⁺ - NAO⁻

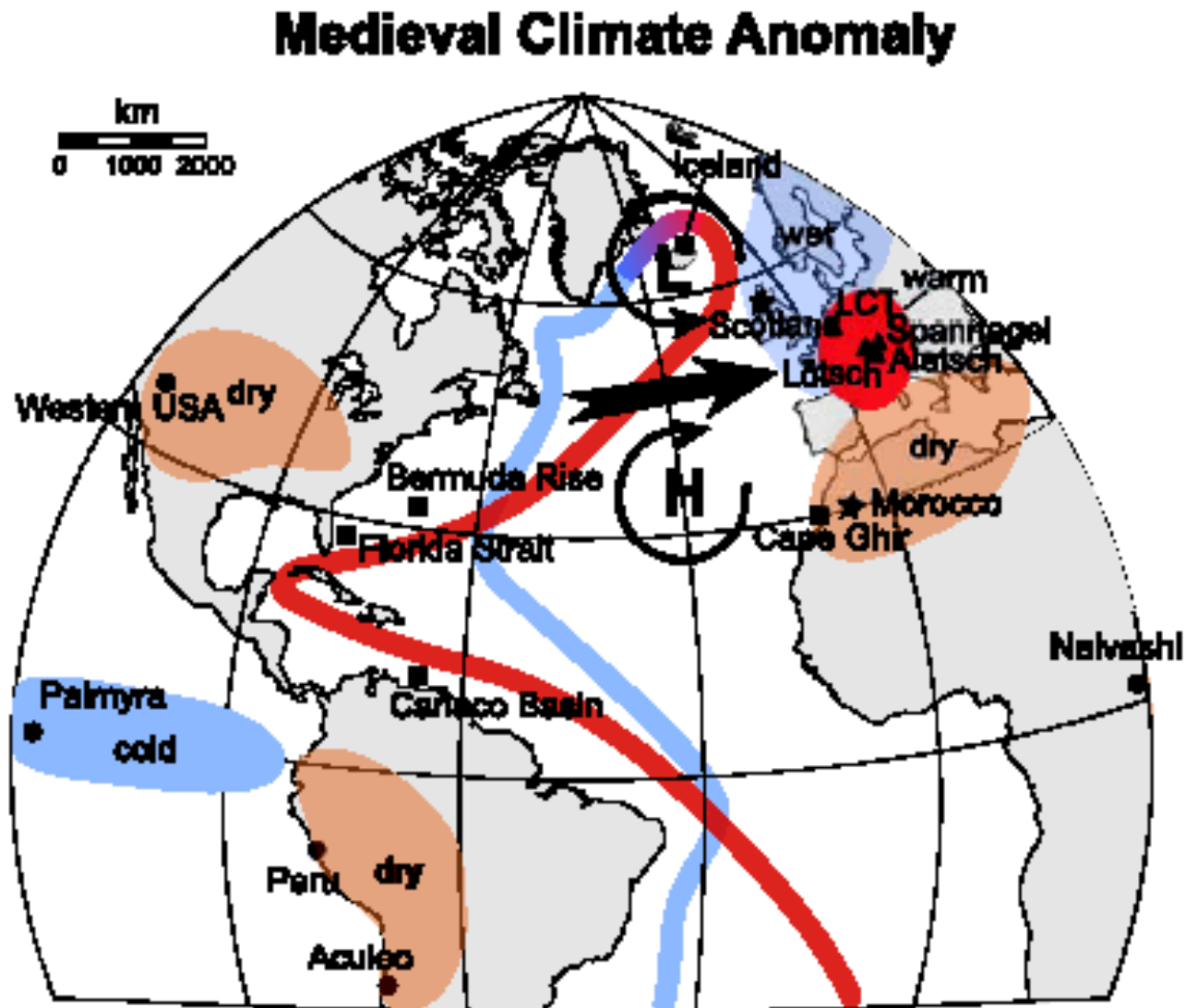
MWP - LIA



降水量差 (mm)

(Trouet et al., 2009 Science)

MWPにおける大西洋とその周辺の気候パターン



2.2.2 黒点の11年周期とダストフラックス変動



20100223-24森羅万象学校

NGRIP Dome

グリーンランドおよび南極の主な掘削地点

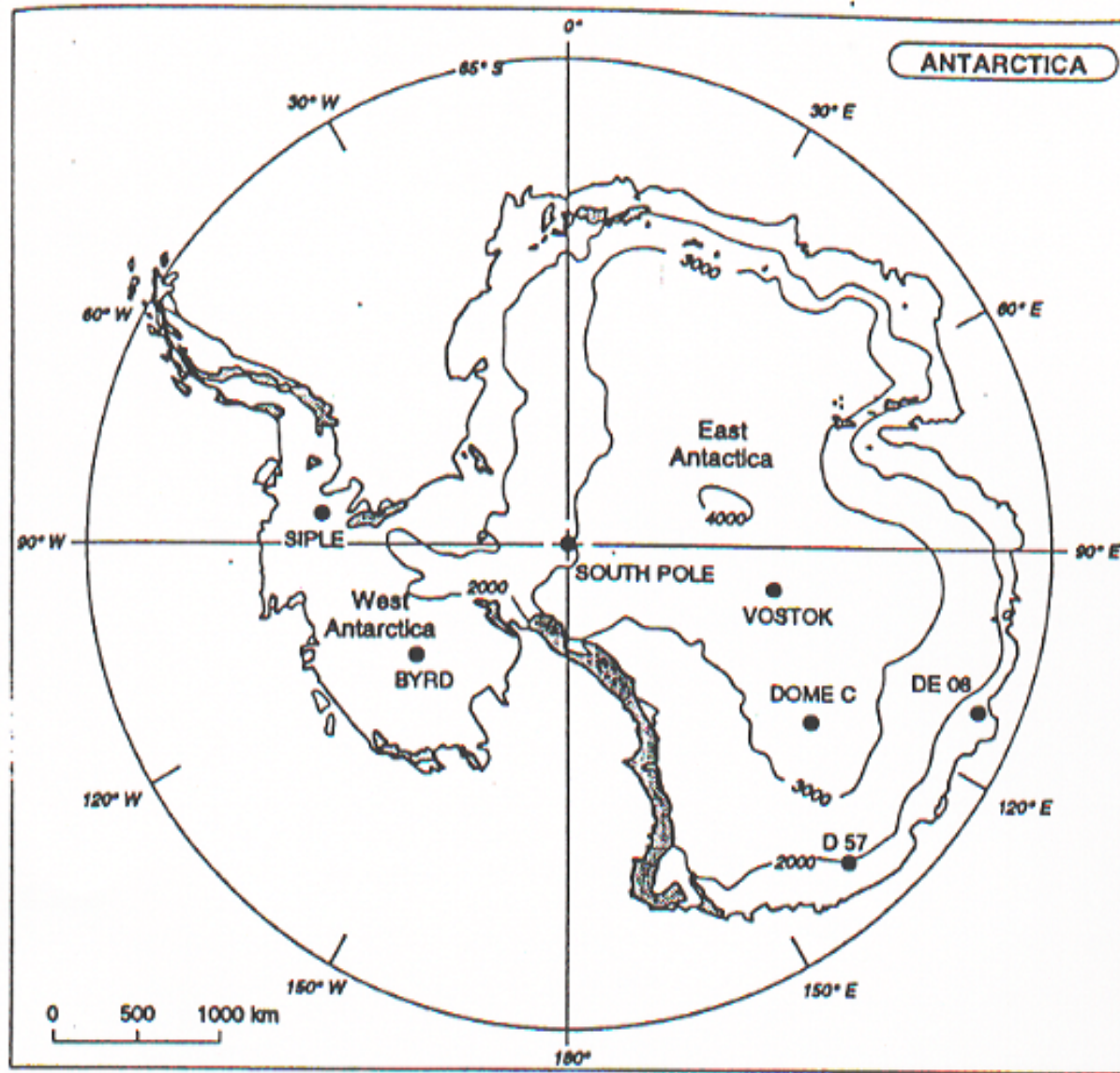
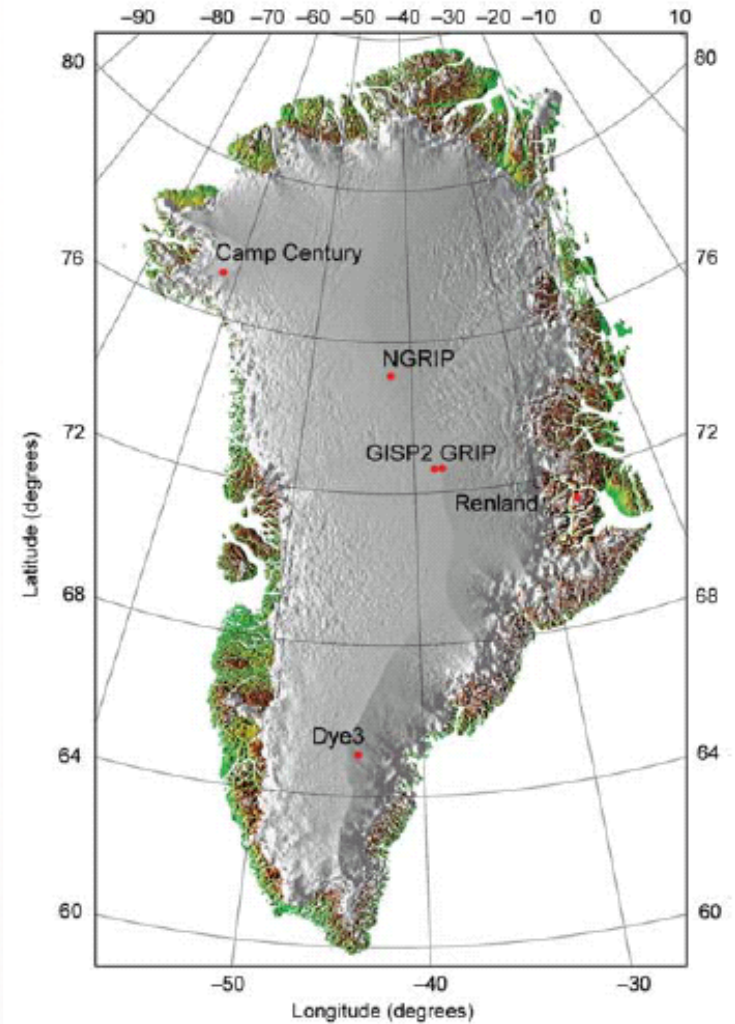


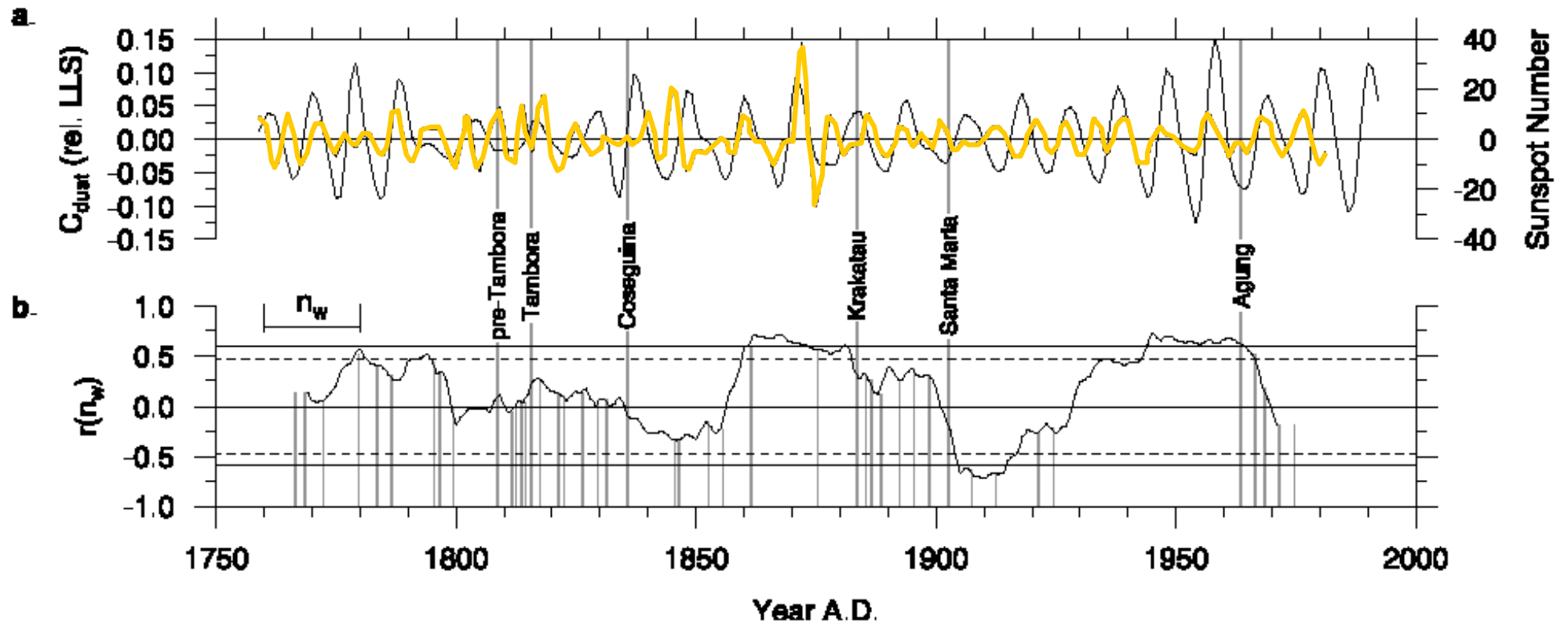
Fig. 1. Locations of ice cores in Greenland and Antarctica.

(from Raynaud et al., 1993)



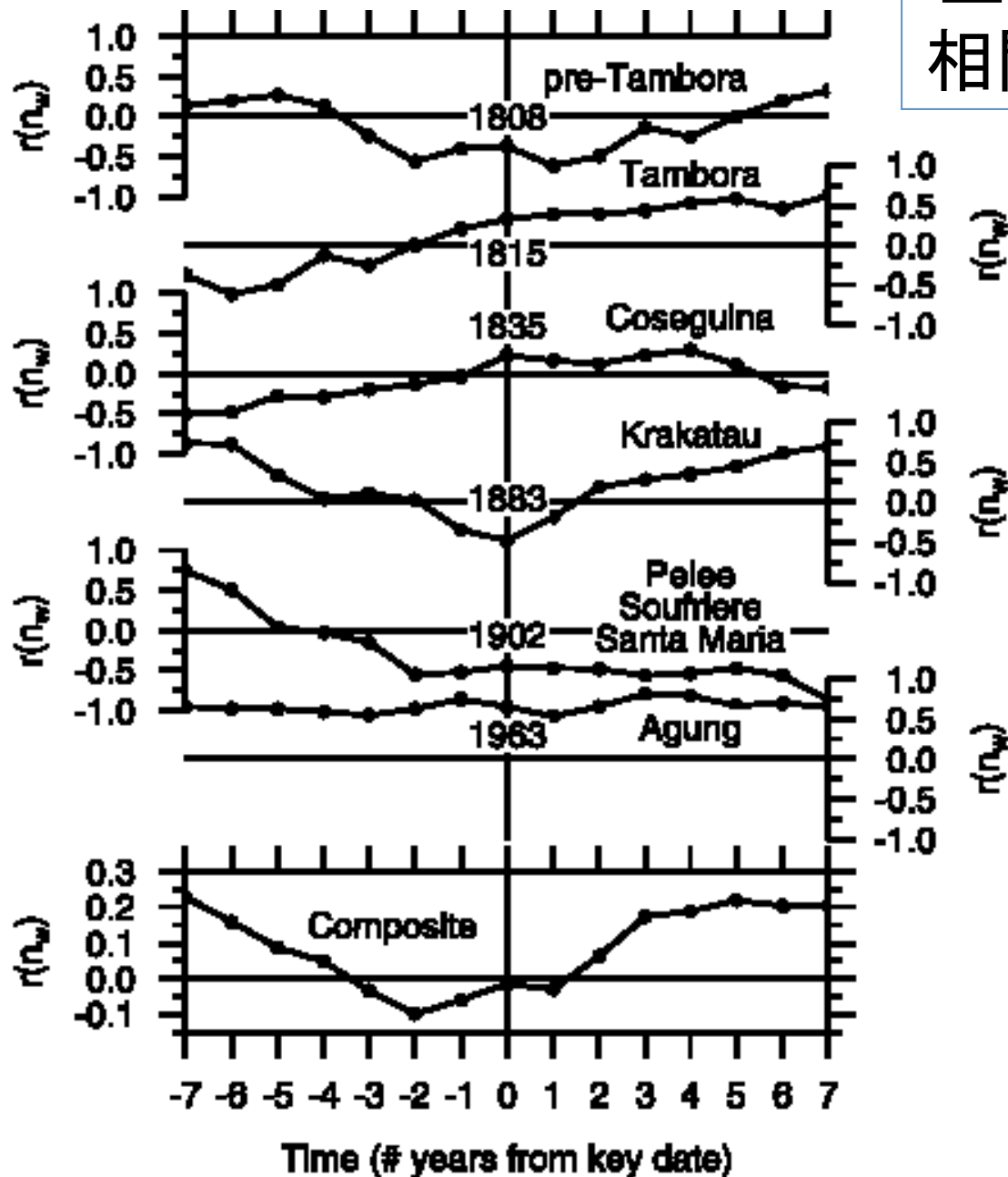
(NGRIP Members, 2004)

歴史時代におけるGISP2アイスコア中の ダスト濃度と黒点数の相関



C_{dust} (黄線), SSN (黒線) はそれぞれ、Gaussian filter でスムージングしてある。
 $r(n_w)$ は、20年間の移動相関係数

主要な低緯度火山の噴火と、 相関係数低下の時期の関係



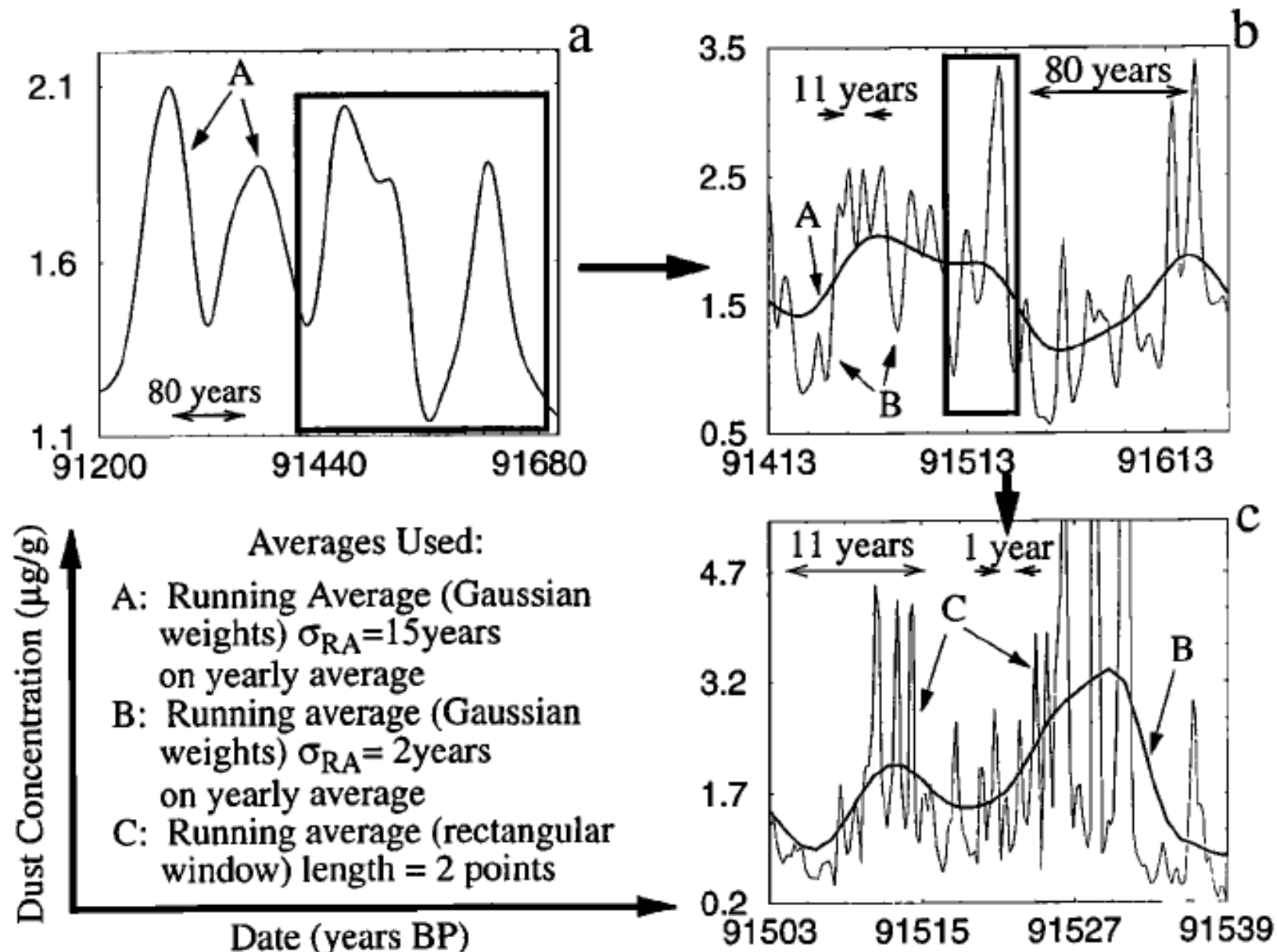
火山噴火の時期に相関が低下している。噴火の2年前に相関が最低になるのは、年代対比の問題と考えられる

火山活動の影響を除くと、太陽活動とダスト濃度には、強い相関がみられる。

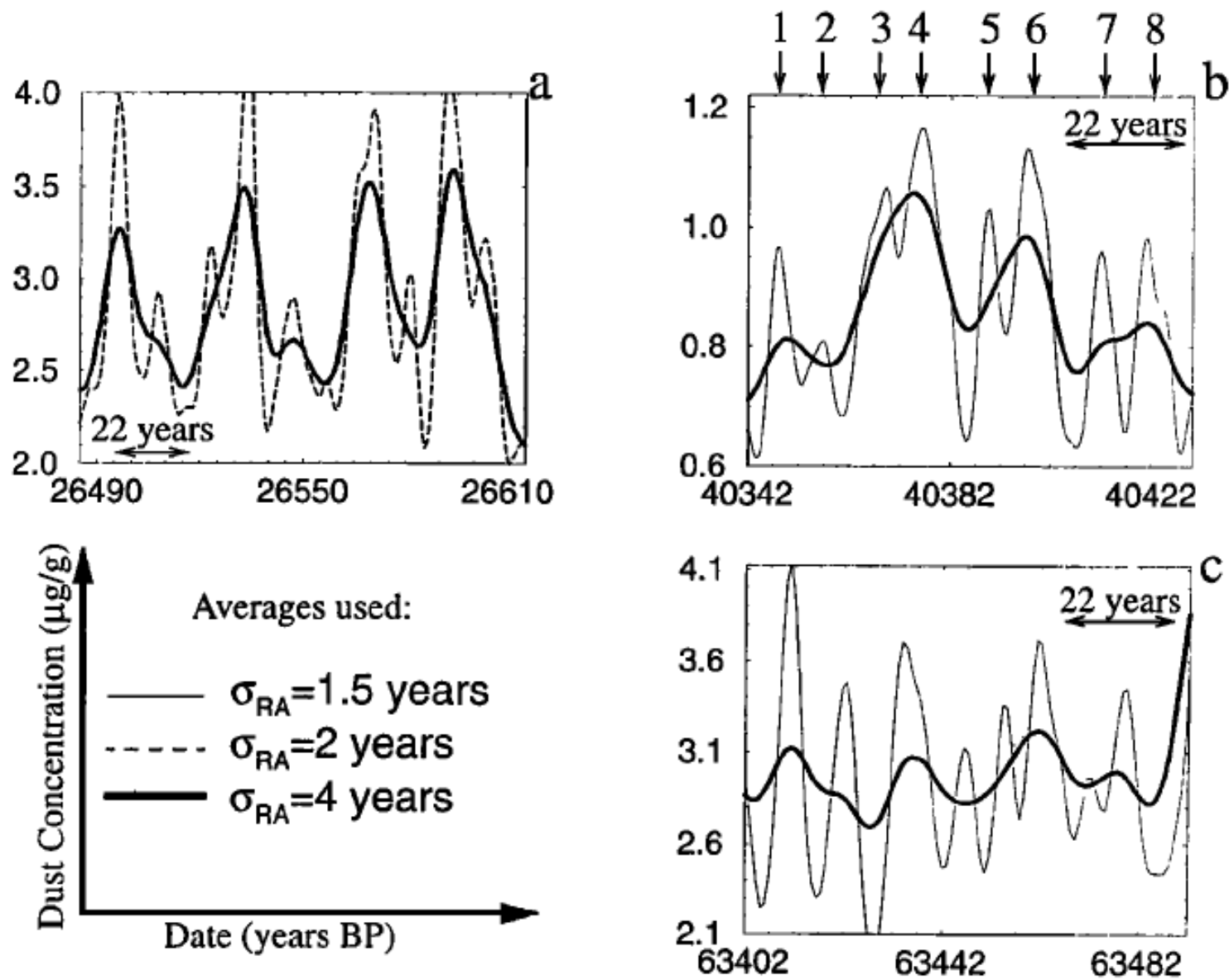
$R(n_w)$: 前後7年間の相関

(Donarummo et al., 2002 GRL)

Holoceneにおけるdust濃度変動周期



22年周期の特徴



太陽活動に似た周期 の階層性の存在

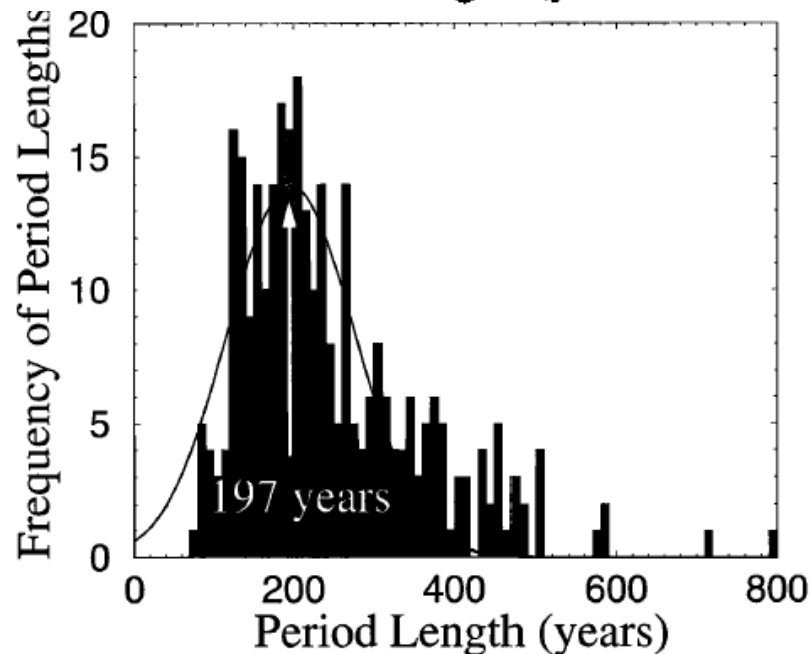
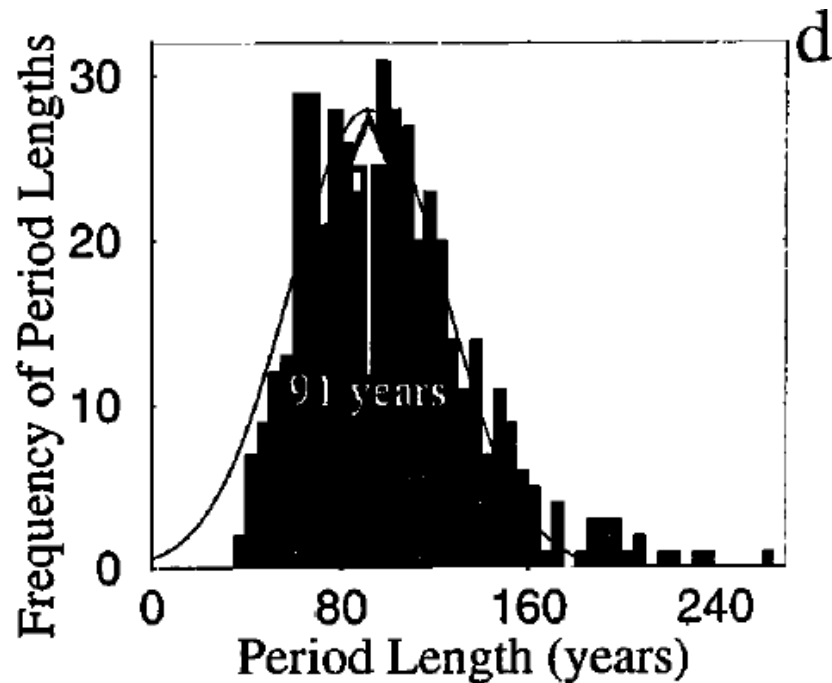
11 (7 to 17) year cycle

91 year cycle

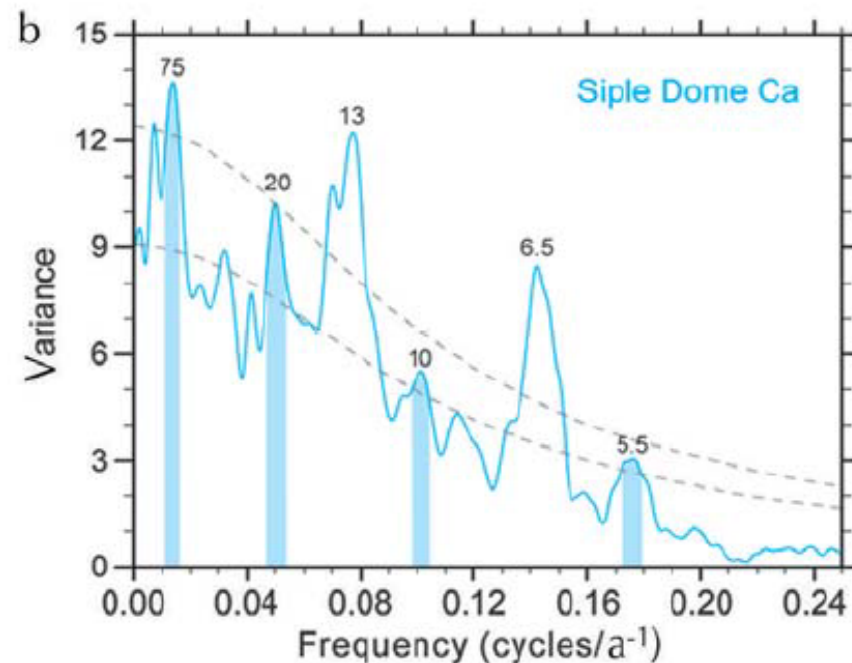
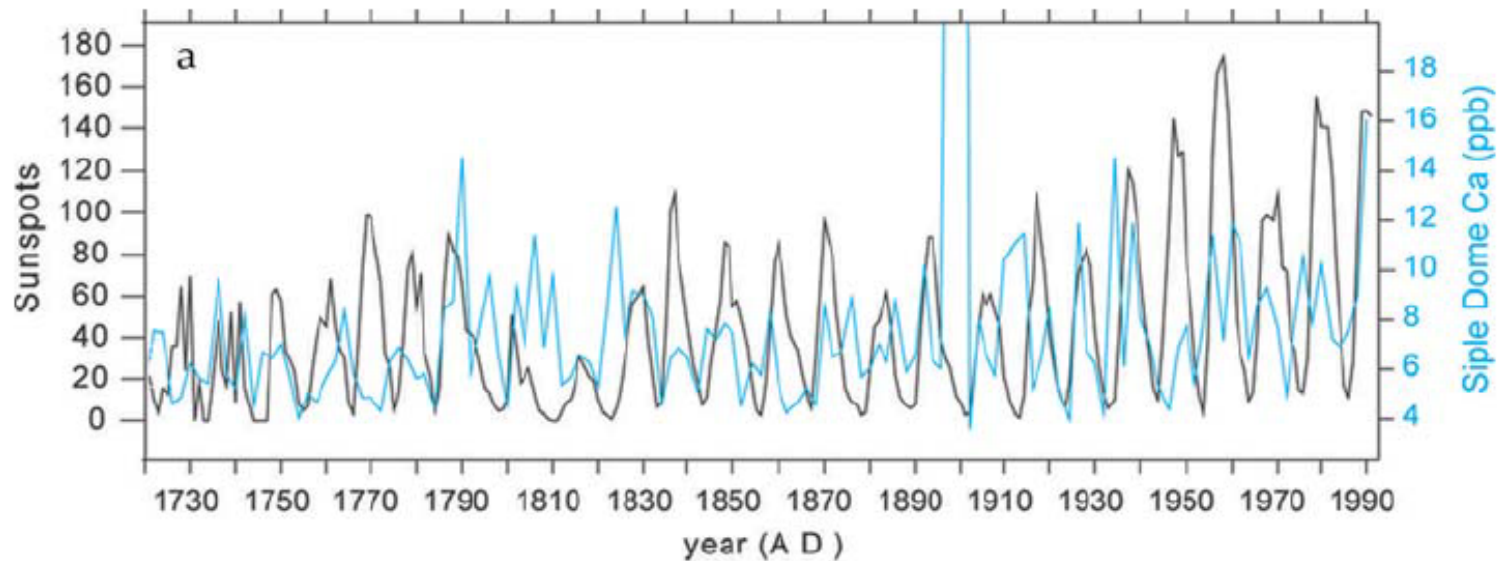
197 year cycle

+

特徴的な22年周期の存在



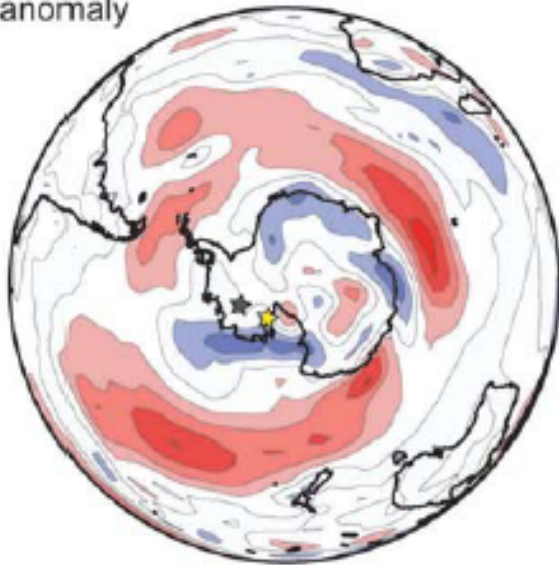
南極Siple Dome Core における Ca^{2+} 濃度(ダスト起源)と太陽黒点周期



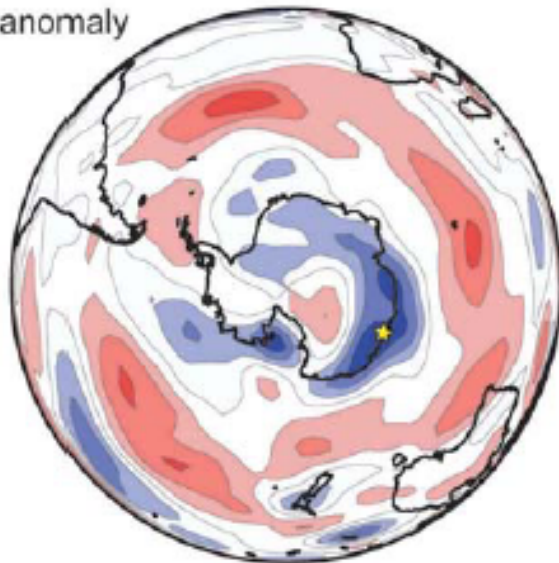
(Mayewski et al., 2005)

Ice core中の Ca^{2+} , NO^{3-} , Na^{+} の意味付け

a surface zonal wind anomaly

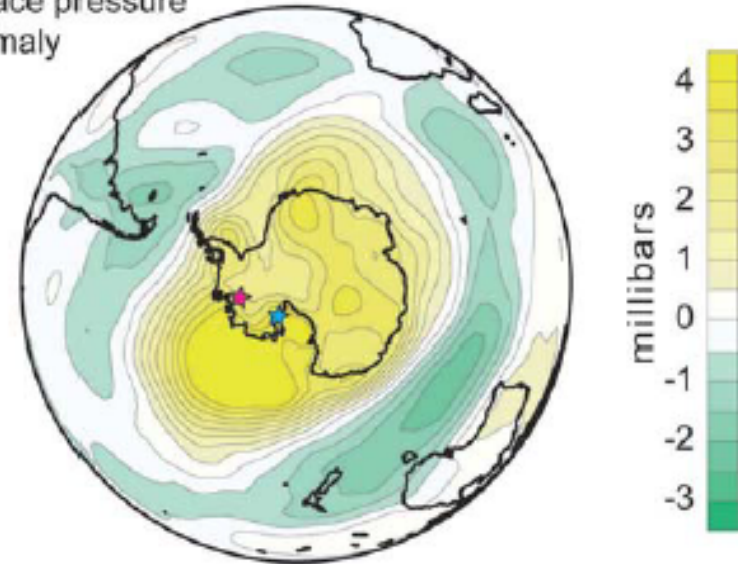


b 850mbar zonal wind anomaly



meters per second

c surface pressure anomaly

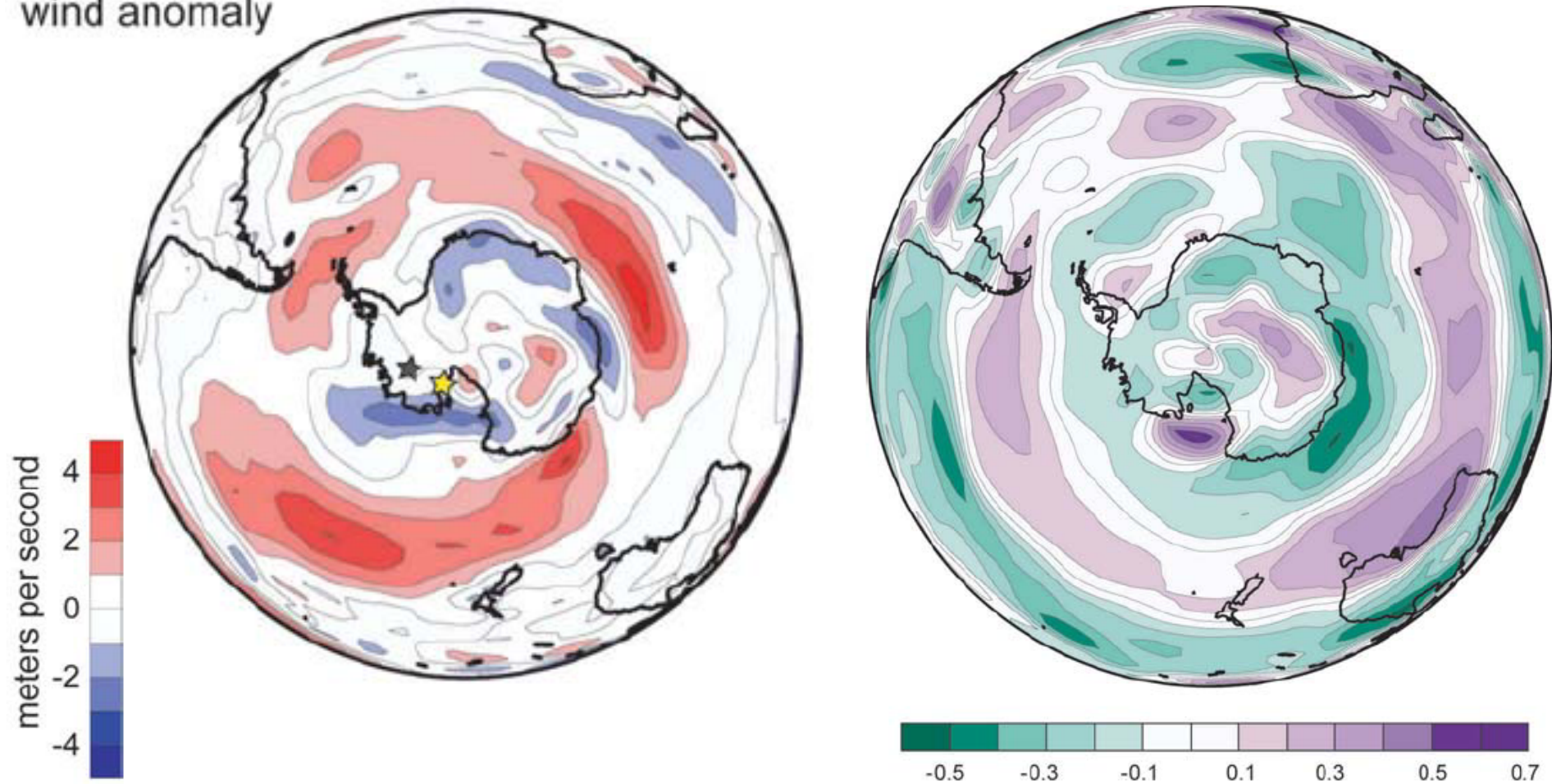


millibars

- a) SON zonal wind anomalies:
year of Ca^{2+} max – Ca^{2+} min
- b) JJA zonal wind anomalies:
year NO^{3-} min – NO^{3-} max
- c) SON surface pressure anomalies:
 Na^{+} max – Na^{+} min

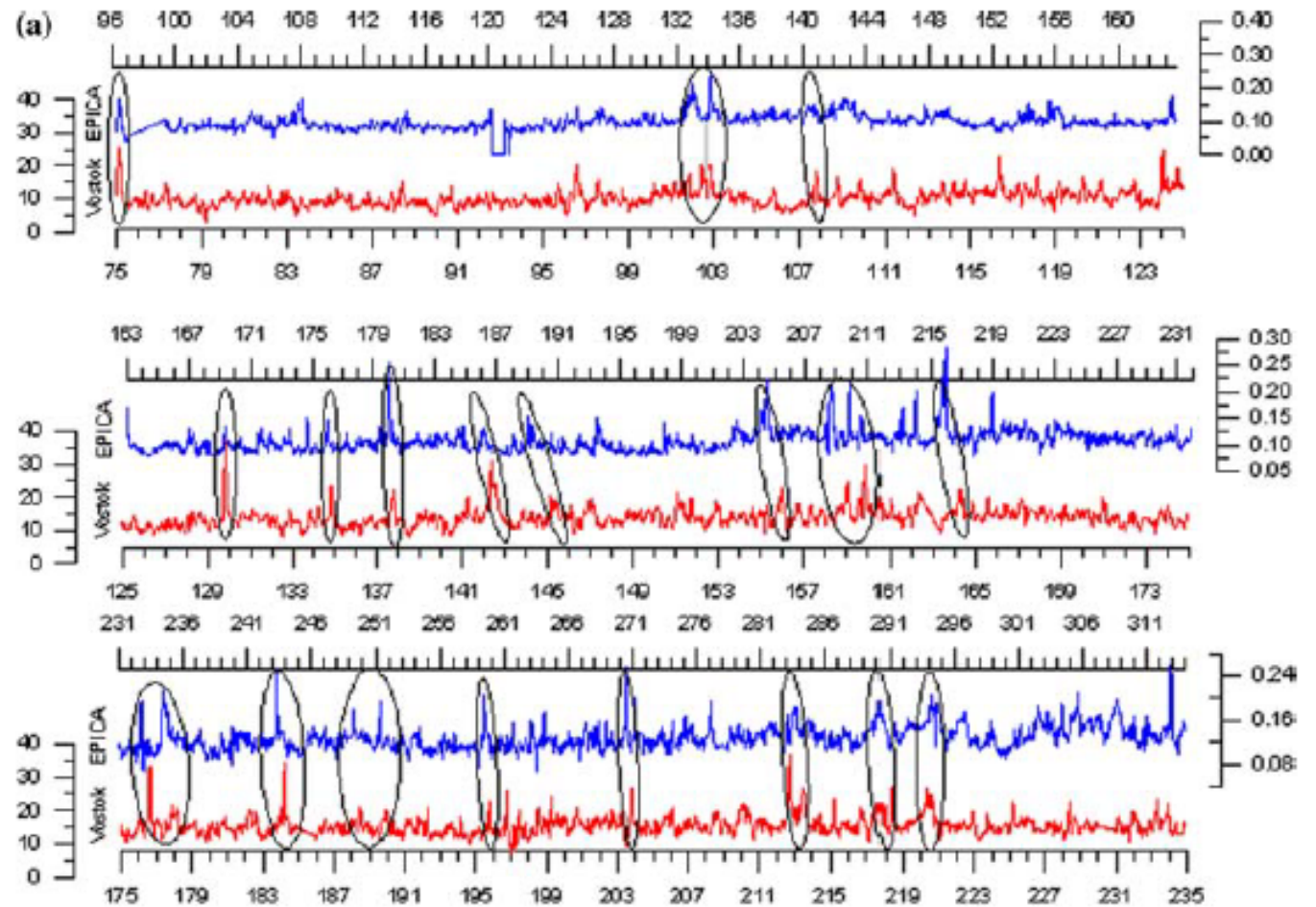
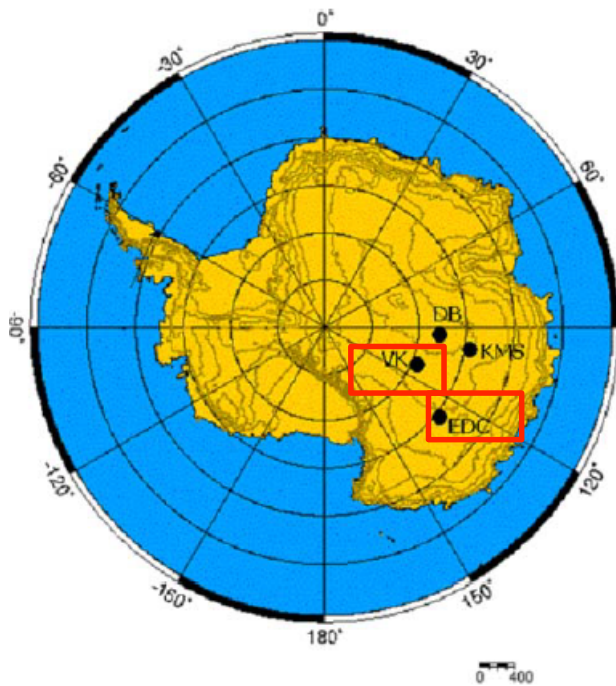
9-11月の surface zonal windとsolar fluxの相関 (右図)

surface zonal
wind anomaly

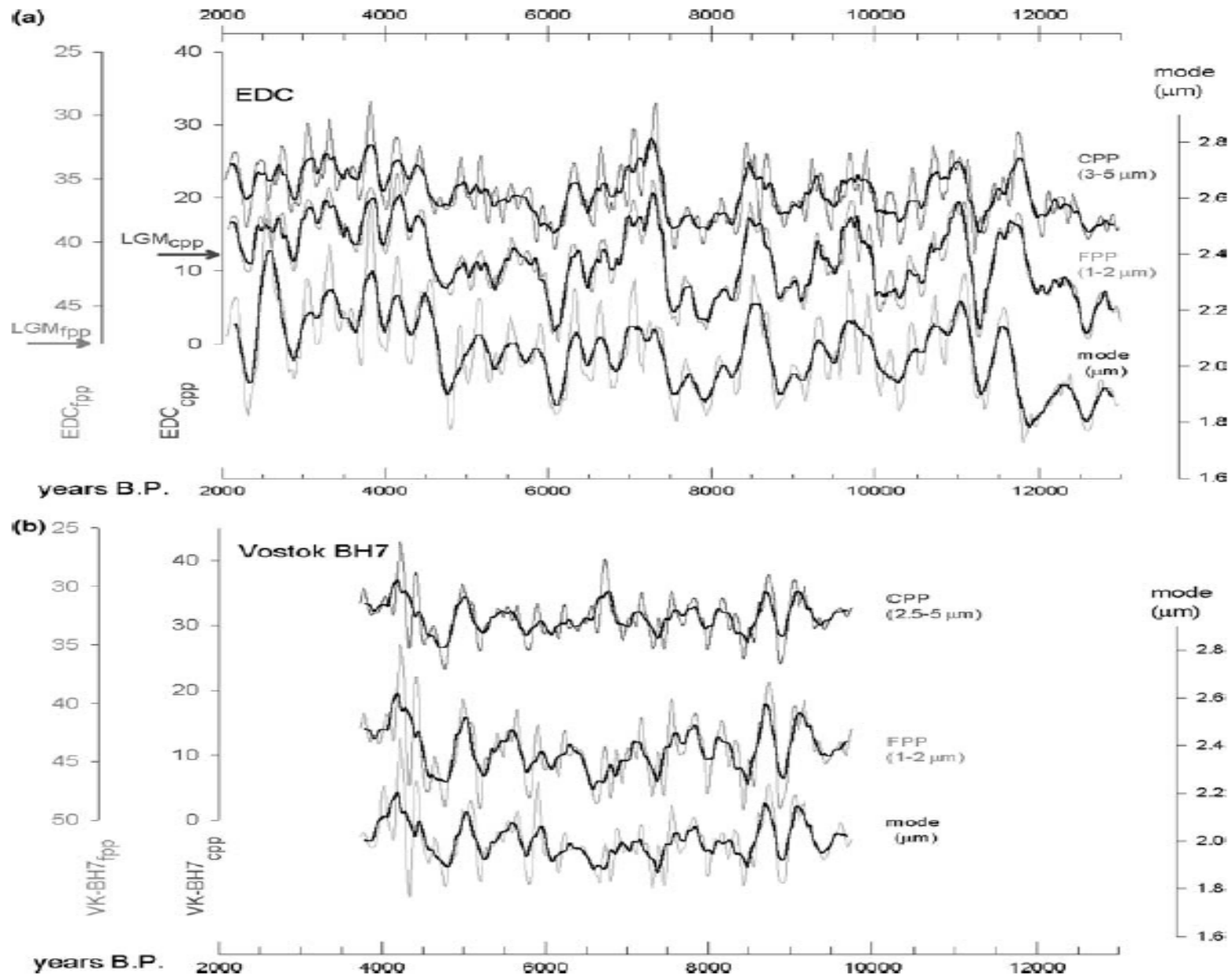


AAOのパターンと類似

東南極2地点のコアのHolocene部分について dustの粒径変動を比較



南極2地点のHoloceneにおけるダスト粒径変動



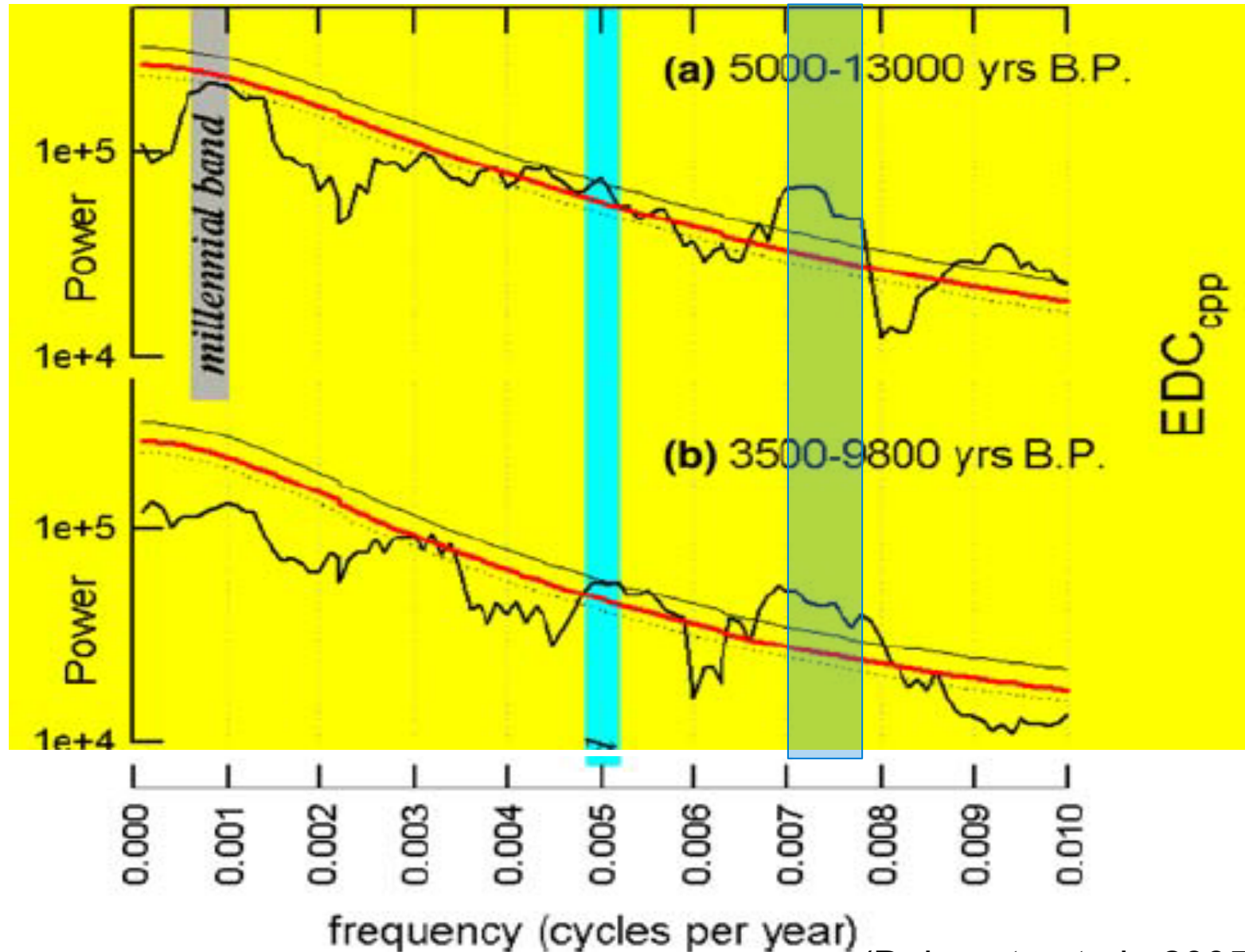
(Delmonte et al., 2005 Clim Dyn)

アイスコア中のダストの粗粒要素含有量変動の周期性

1000-1500 yr

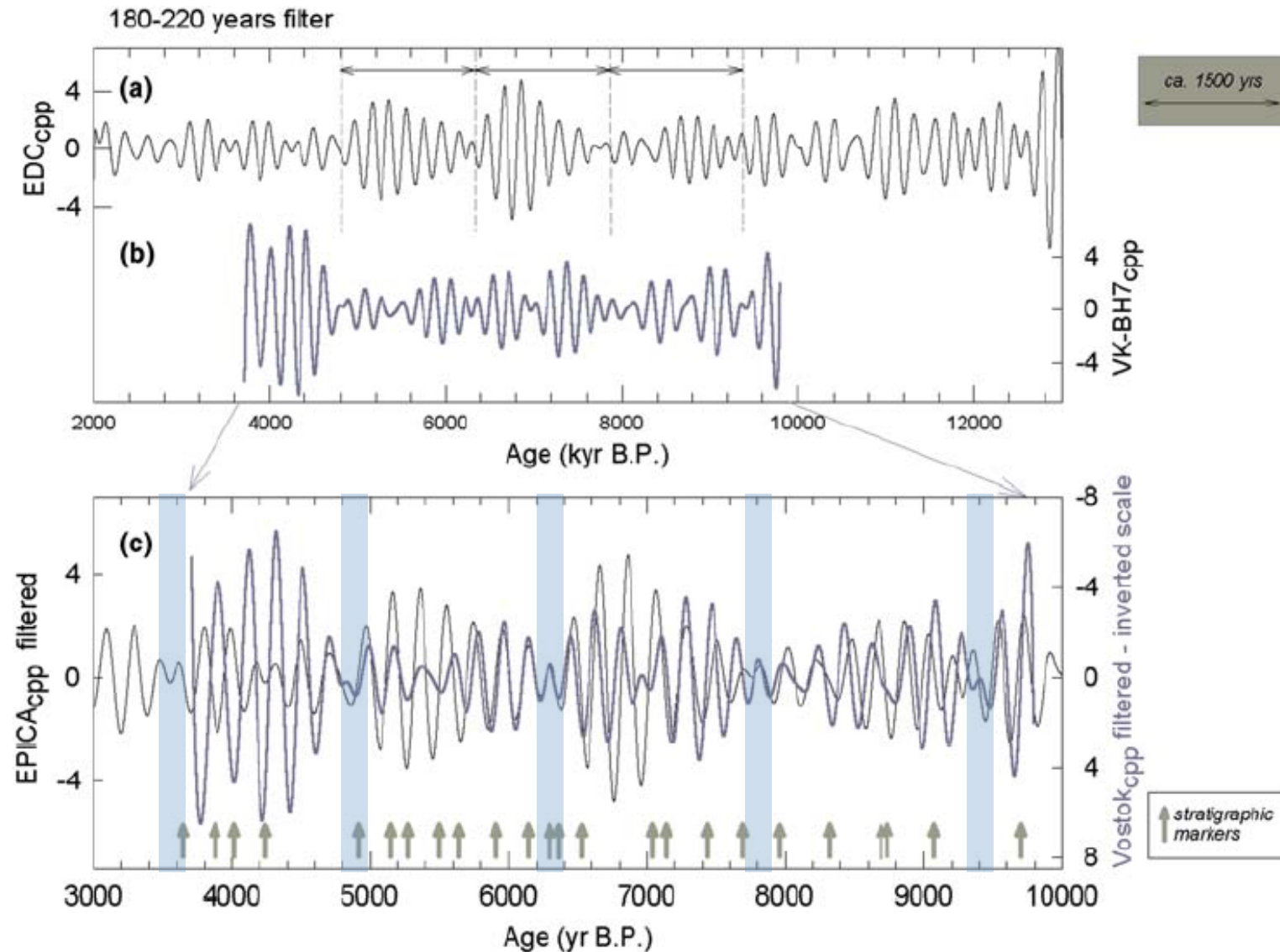
200 yr

130-140 yr

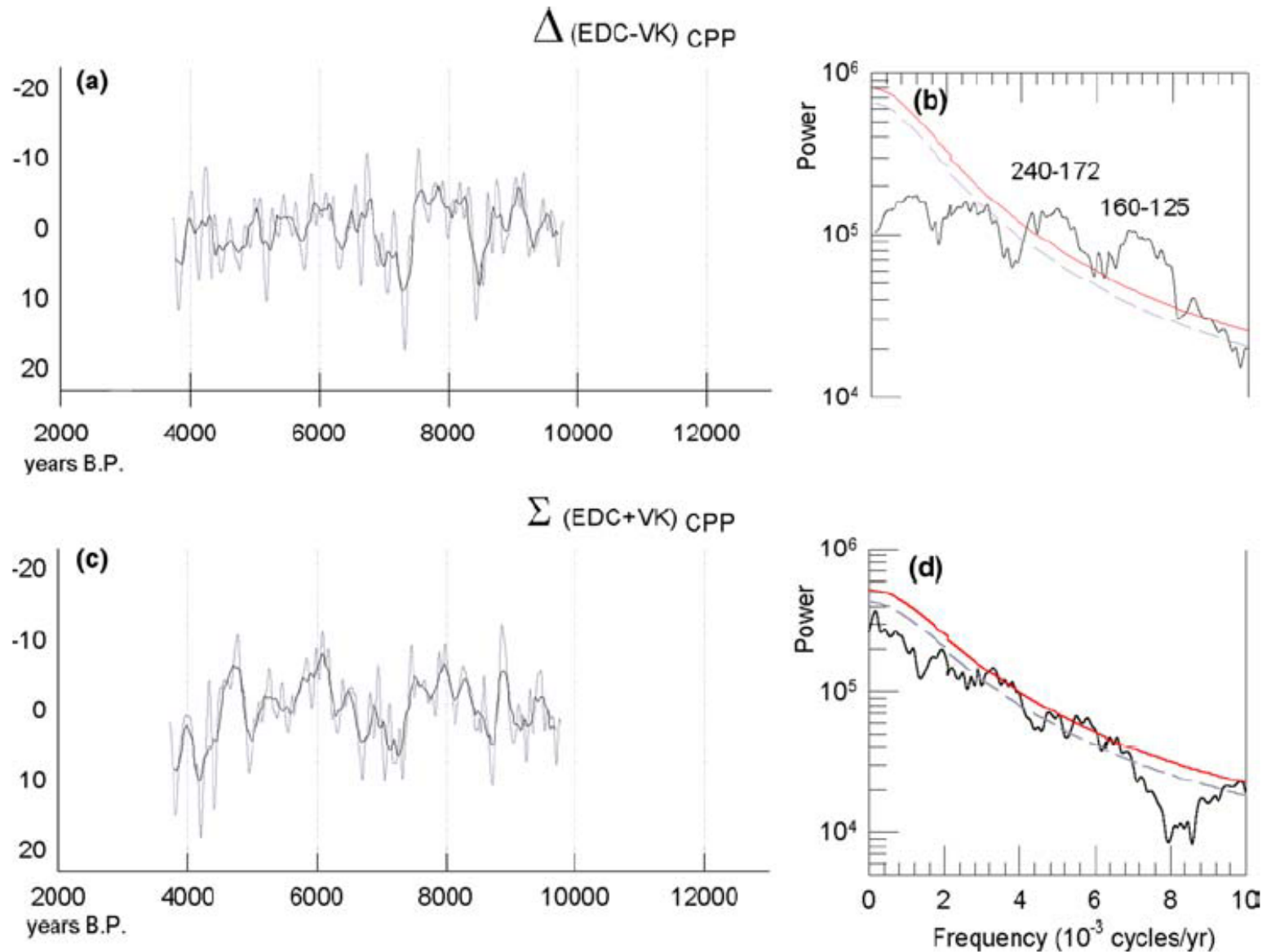


(Delmonte et al., 2005 Clim Dyn)

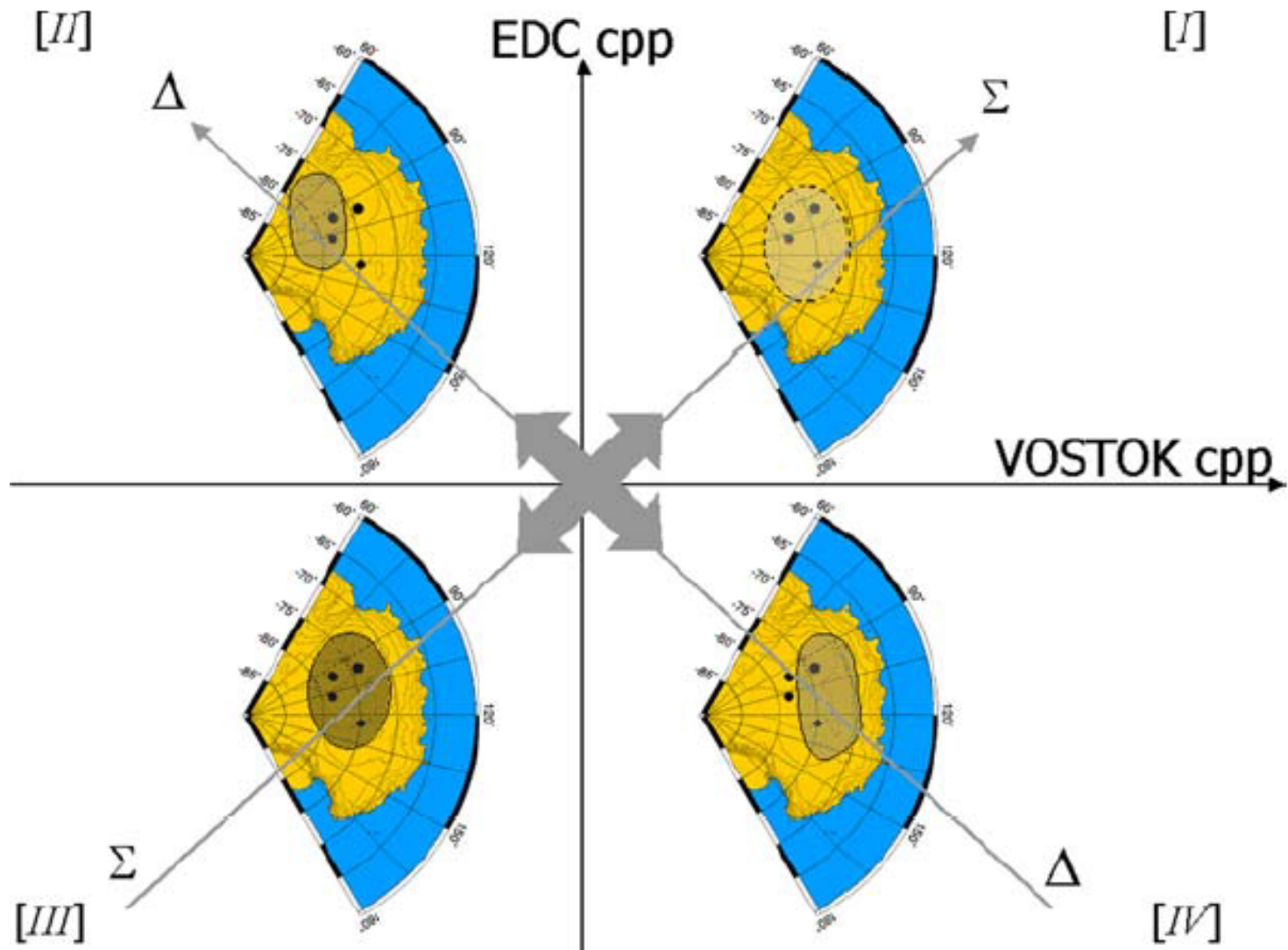
～200年周期変動の振幅変調



2地点間のCPPの差にも、～150年、220年周期が見られた

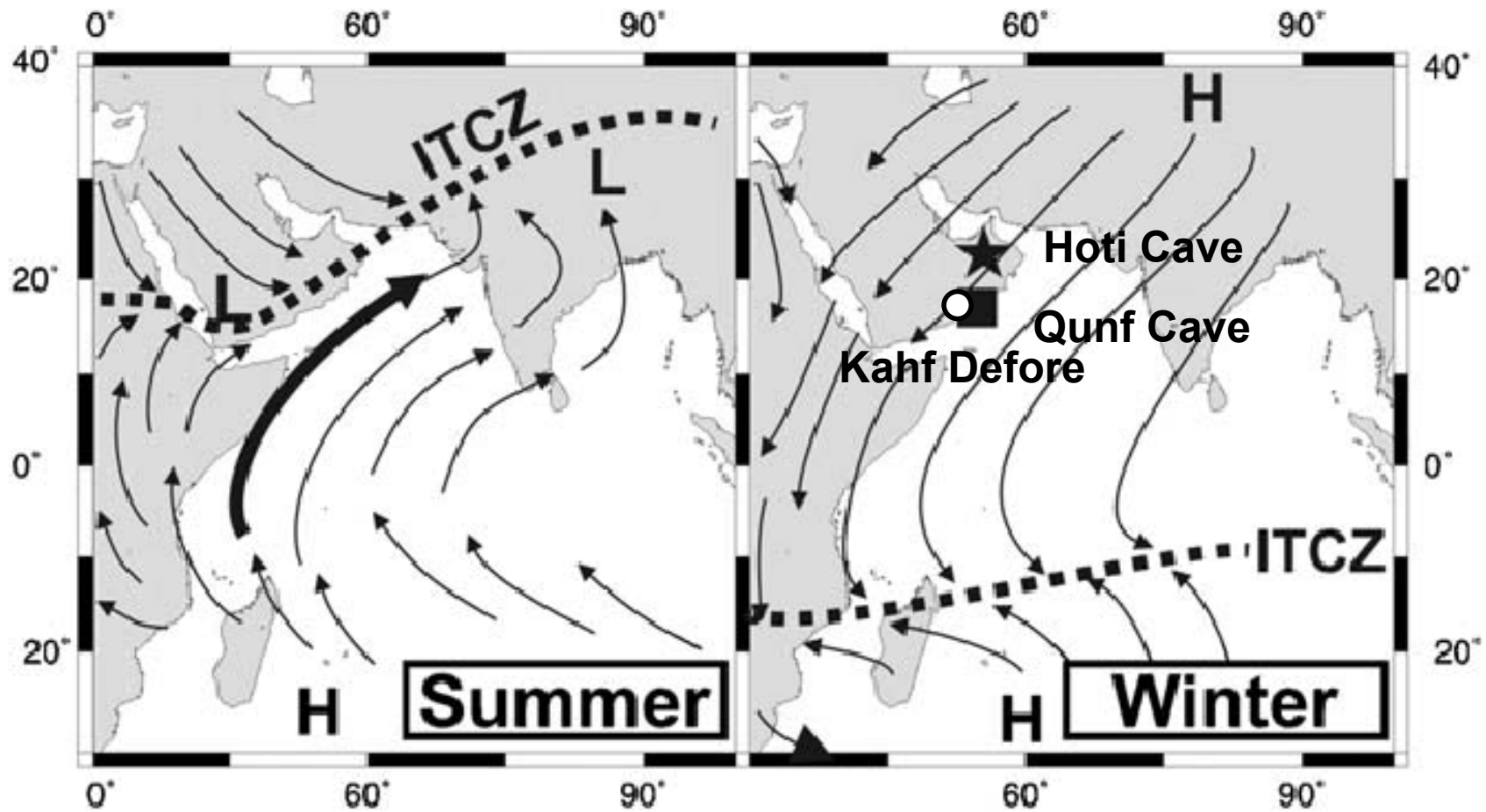


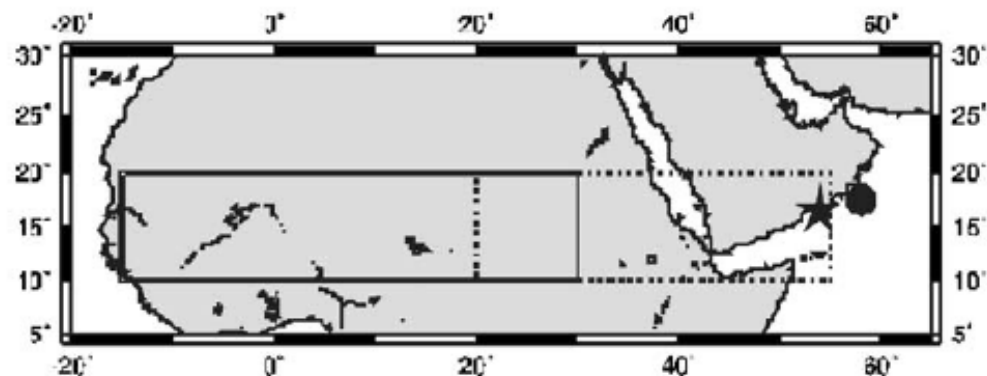
考えられるメカニズム



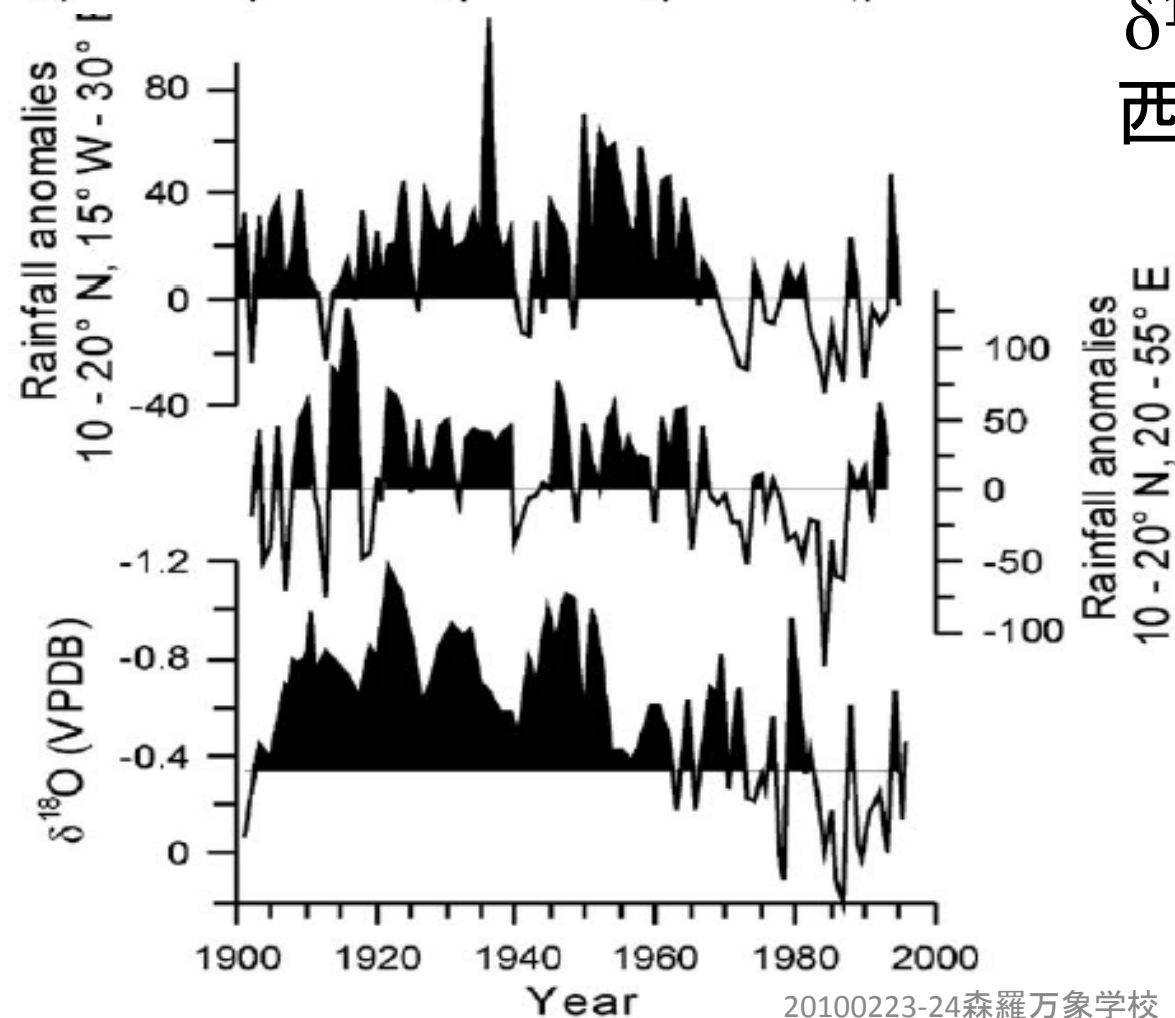
2.2.3 Holoceneにおける100～1000年スケールの気候変動と太陽活動変動

Stalagmite Recordから読み解くITCZの動き





オマーンにおける降水の $\delta^{18}\text{O}$ と北アフリカ東部、 西部の降水量との関係



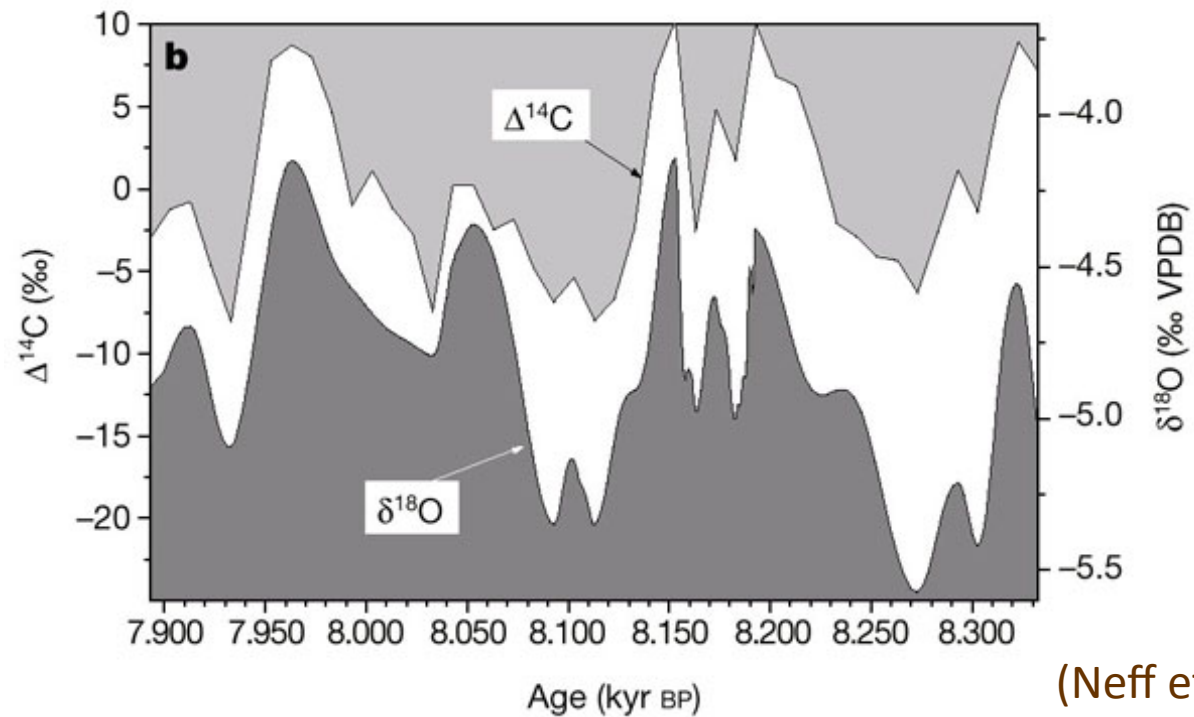
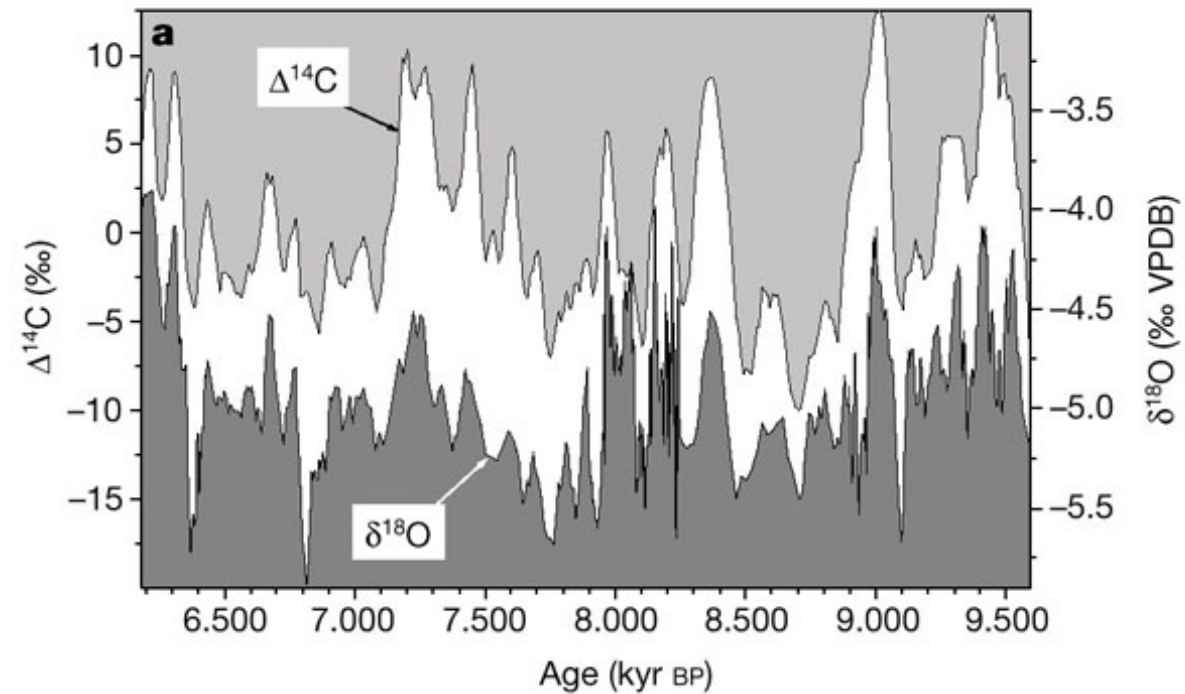
降水の $\delta^{18}\text{O}$ は、降水量の増加
と共に軽くなる傾向がある

(Fleitmann et al., 2004 QSR)

Hoti Cave

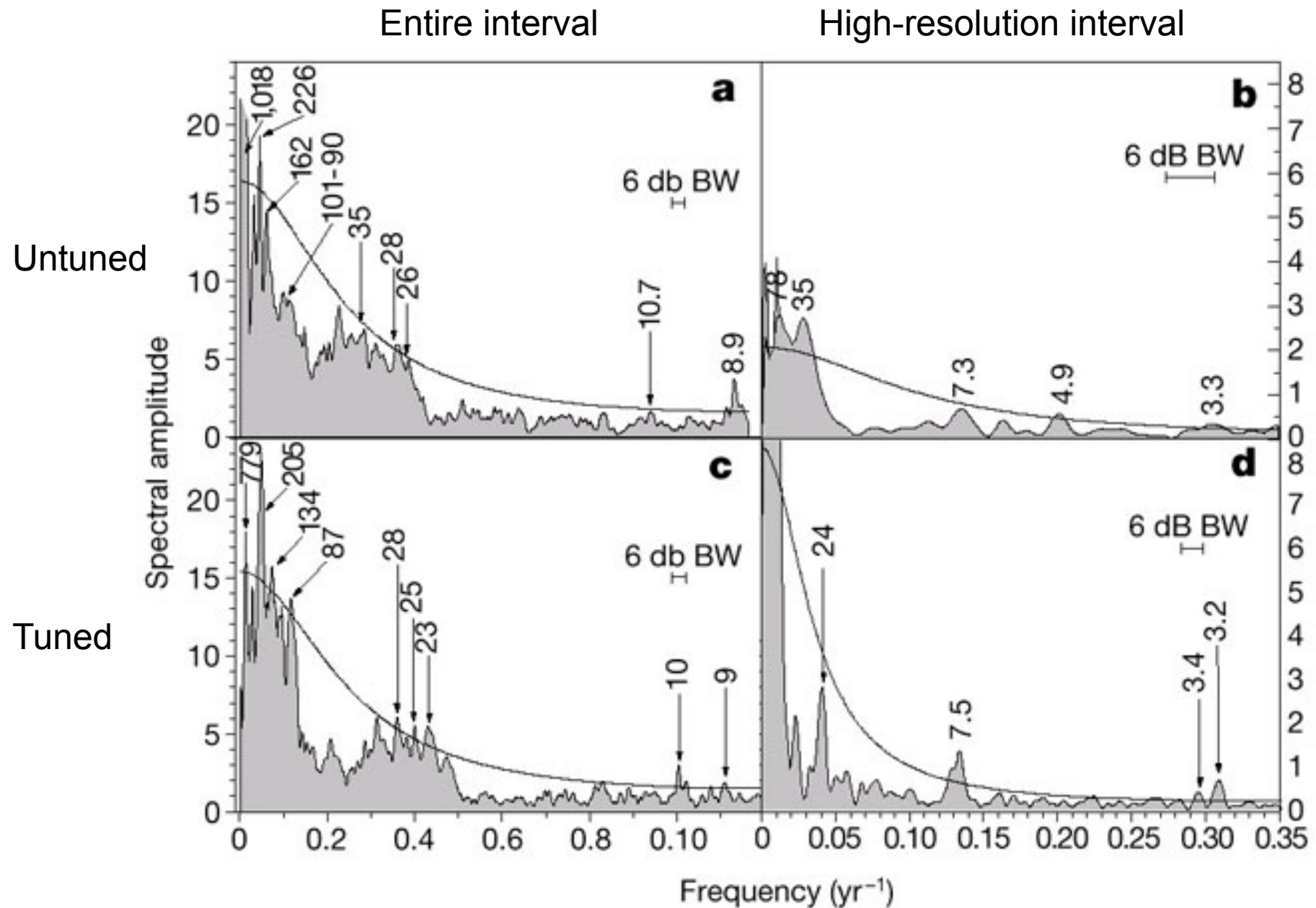
炭素14初期値||太陽活動の指標

鍾乳石の酸素同位体比||降水の供給源



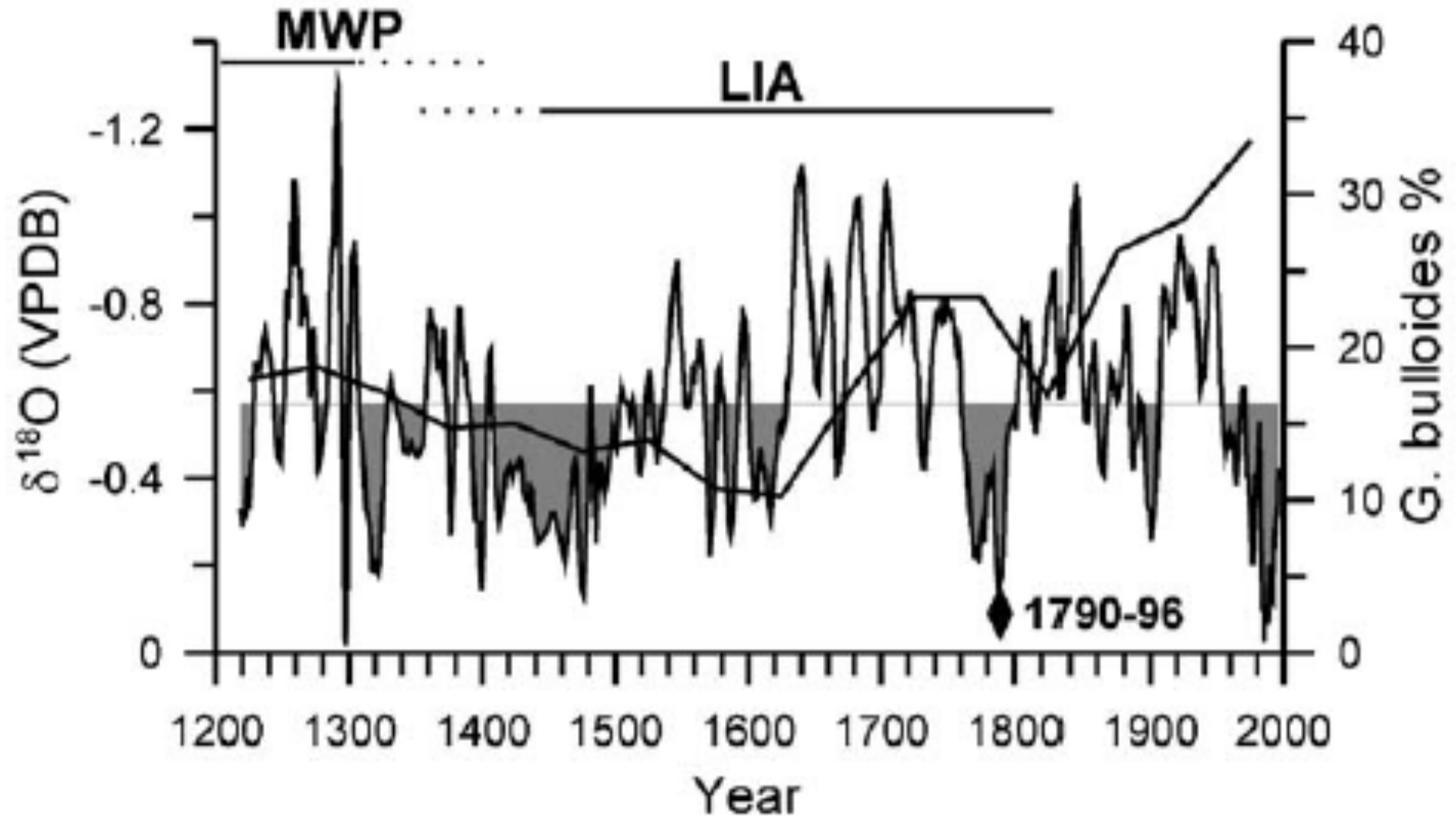
(Neff et al., 2001 Nature)

Hoti Cave

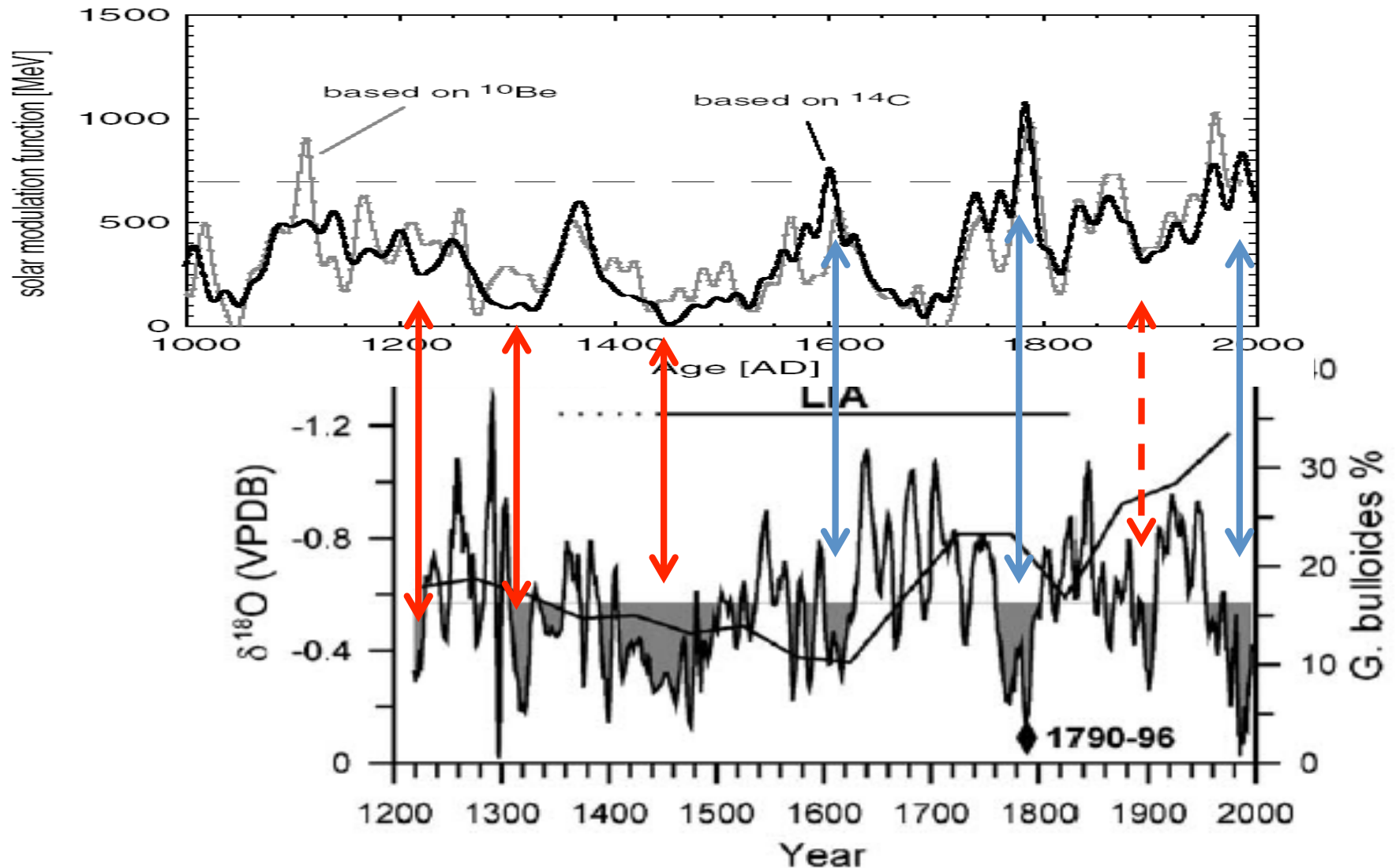


(Neff et al., 2001 Nature)

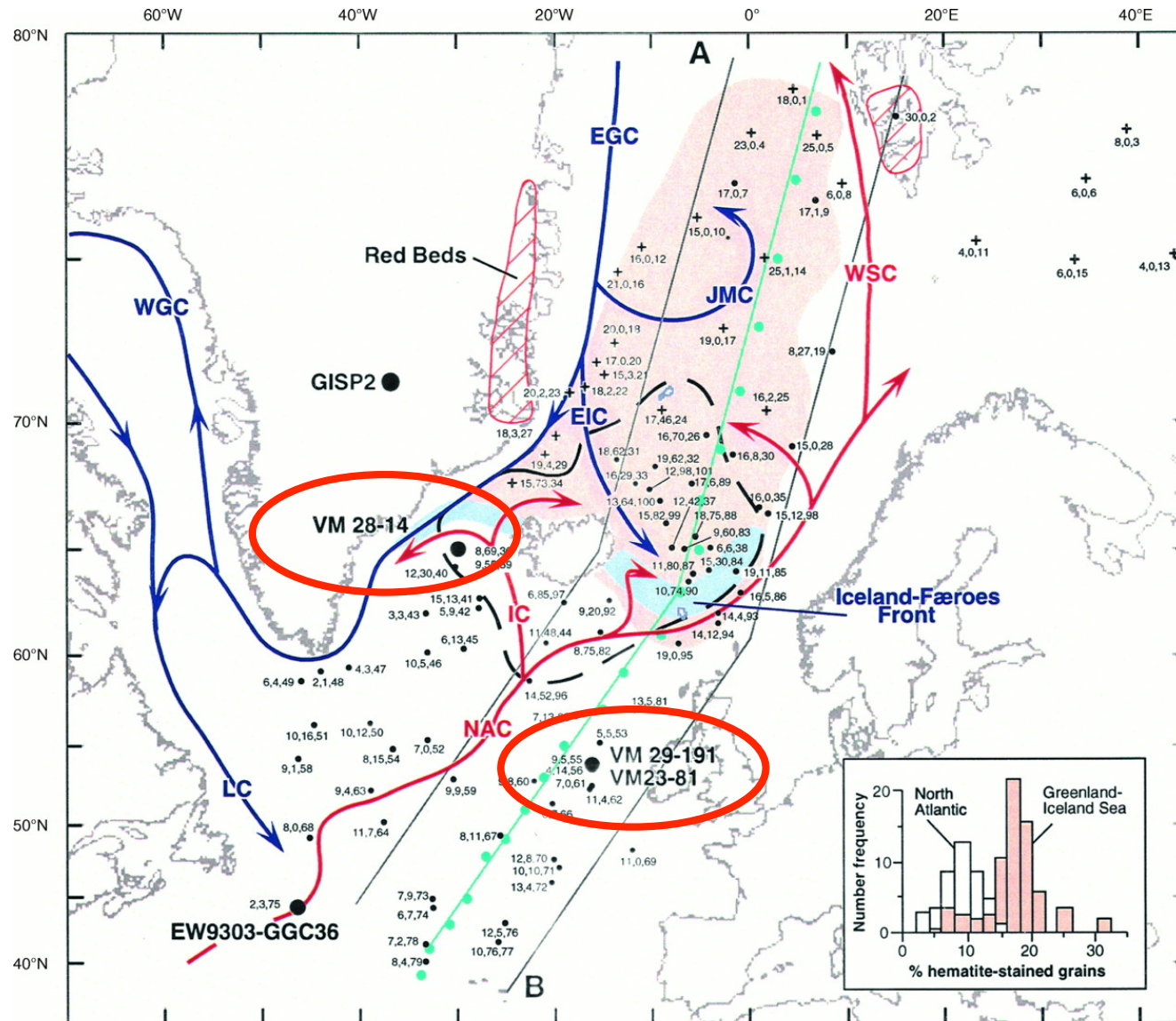
MWP後半には湿潤化(ITCZ北上)、LIAの前半には乾燥化(ITCZ南下)したことを示唆



$\Delta^{14}\text{C}$ の変動と比べると、途中で位相が逆転している様にも見える



Holoceneにおける北大西洋IRDイベント(～1000年スケール)と太陽活動

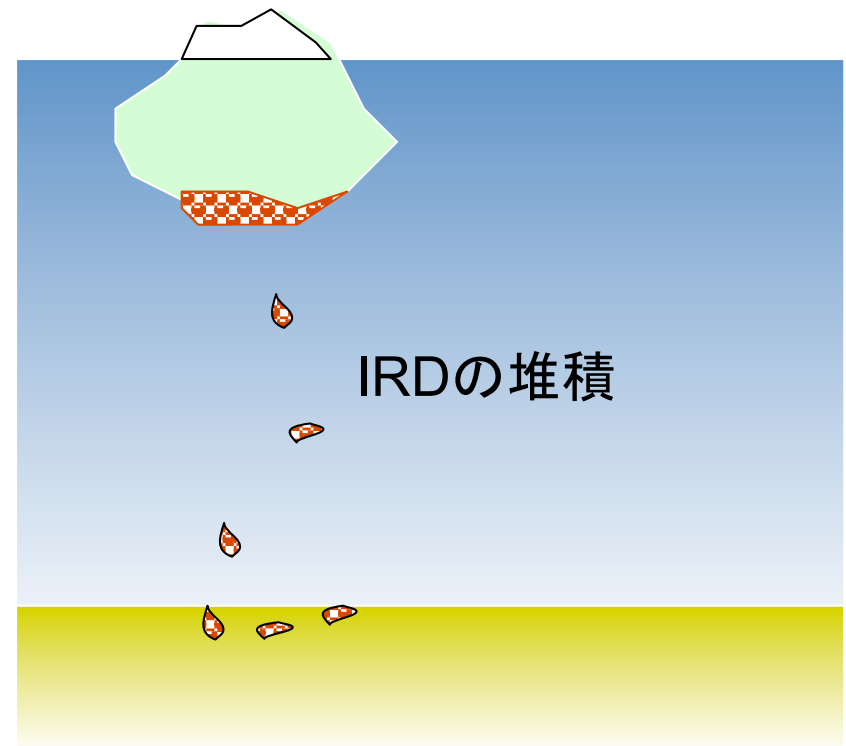
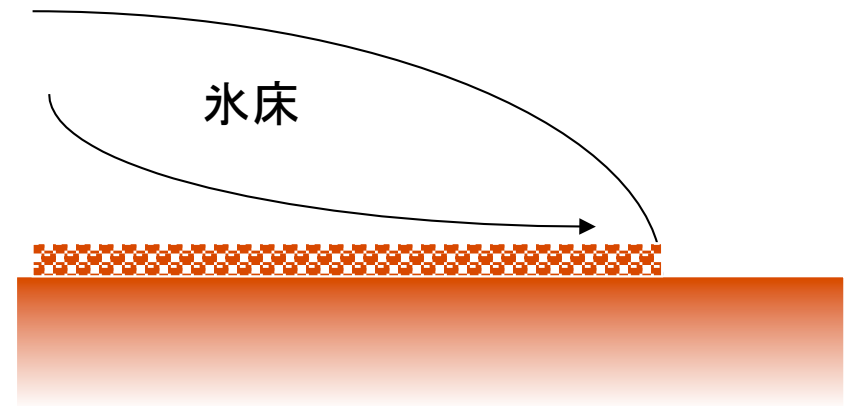


(Bond et al., 1997)



From Skinner et al. (1999) The Blue Planet, Wiley

IRDの形成と堆積



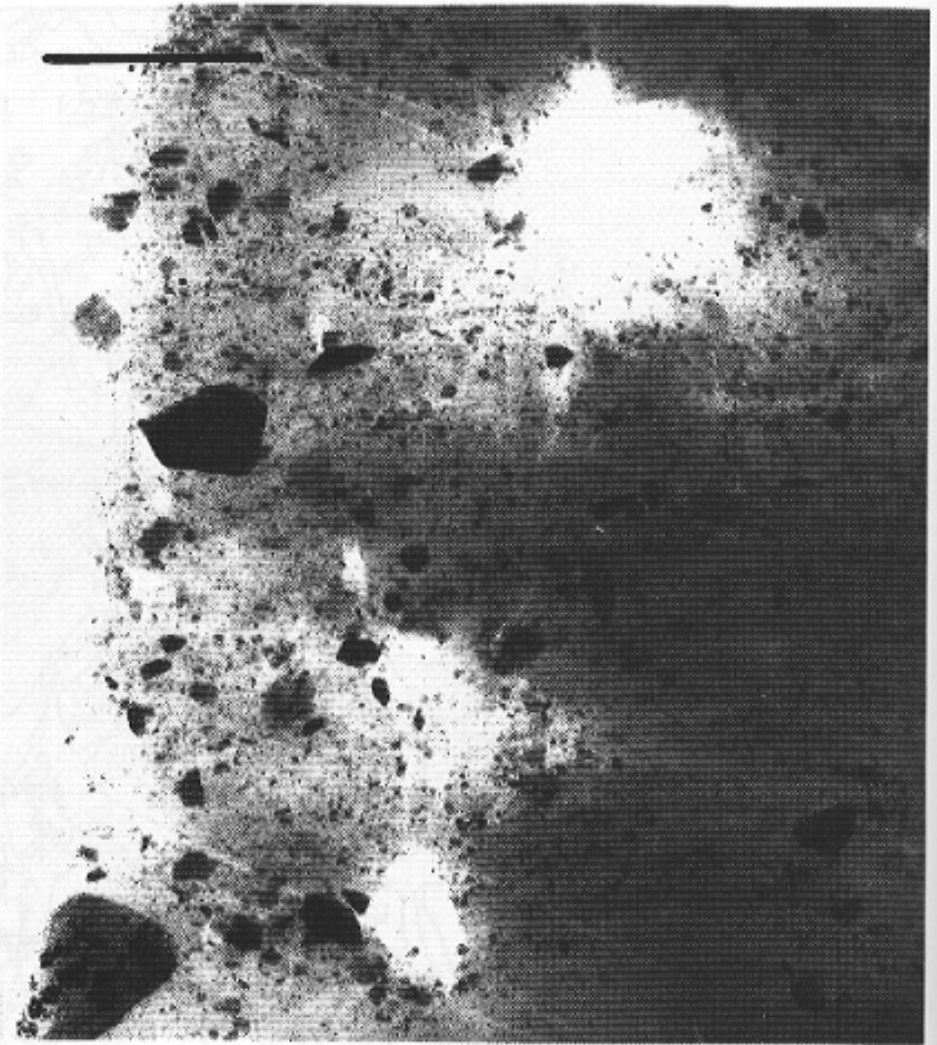
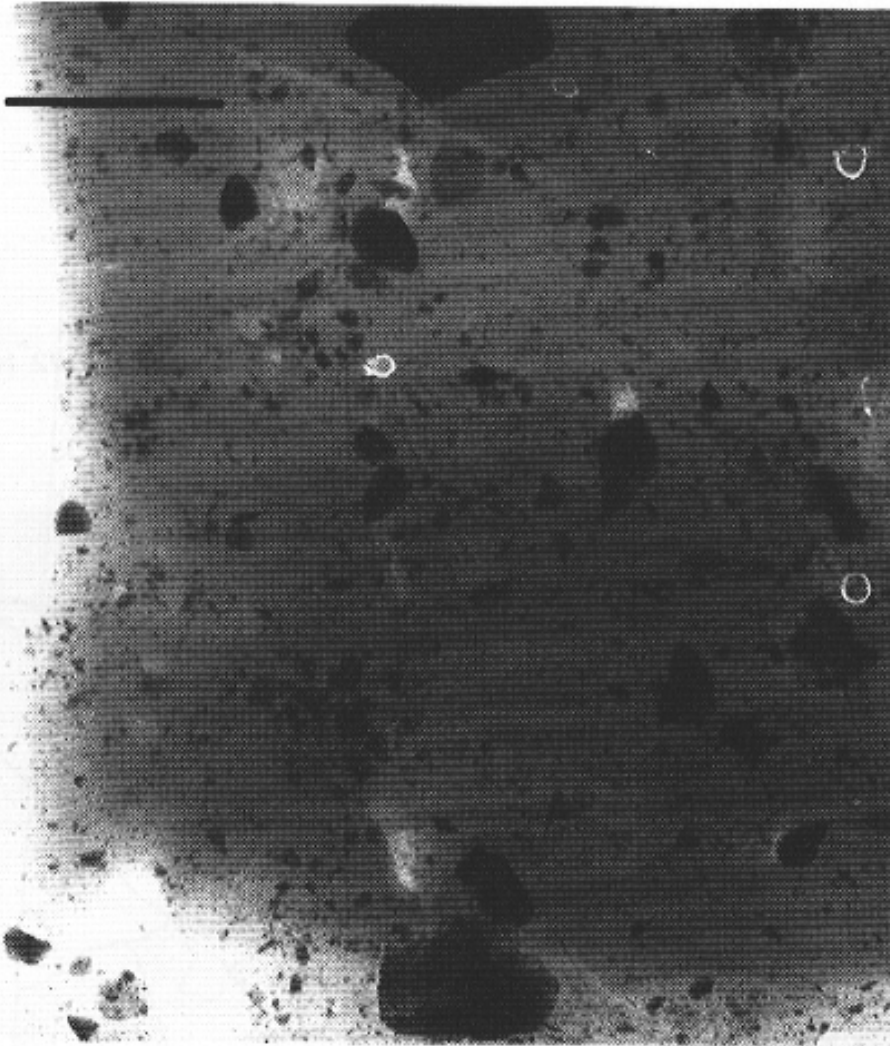
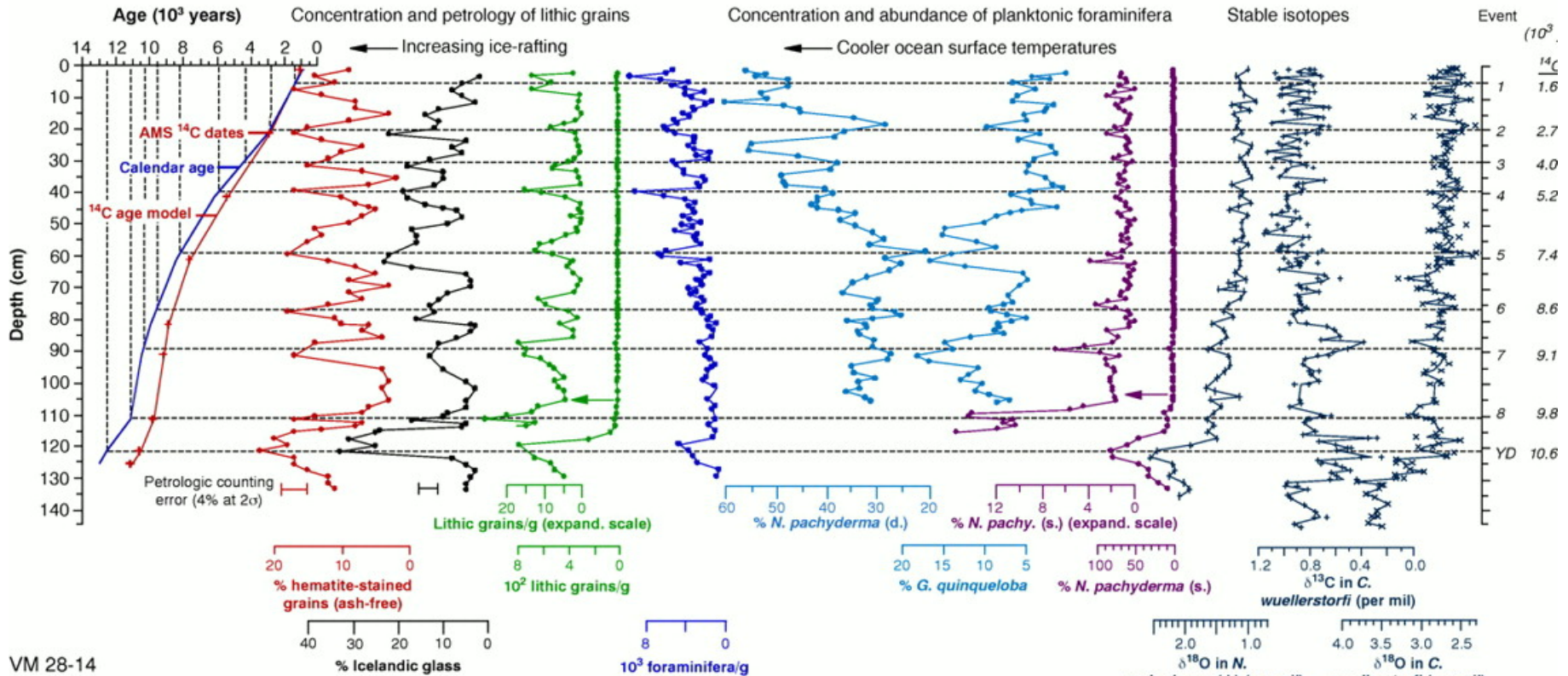


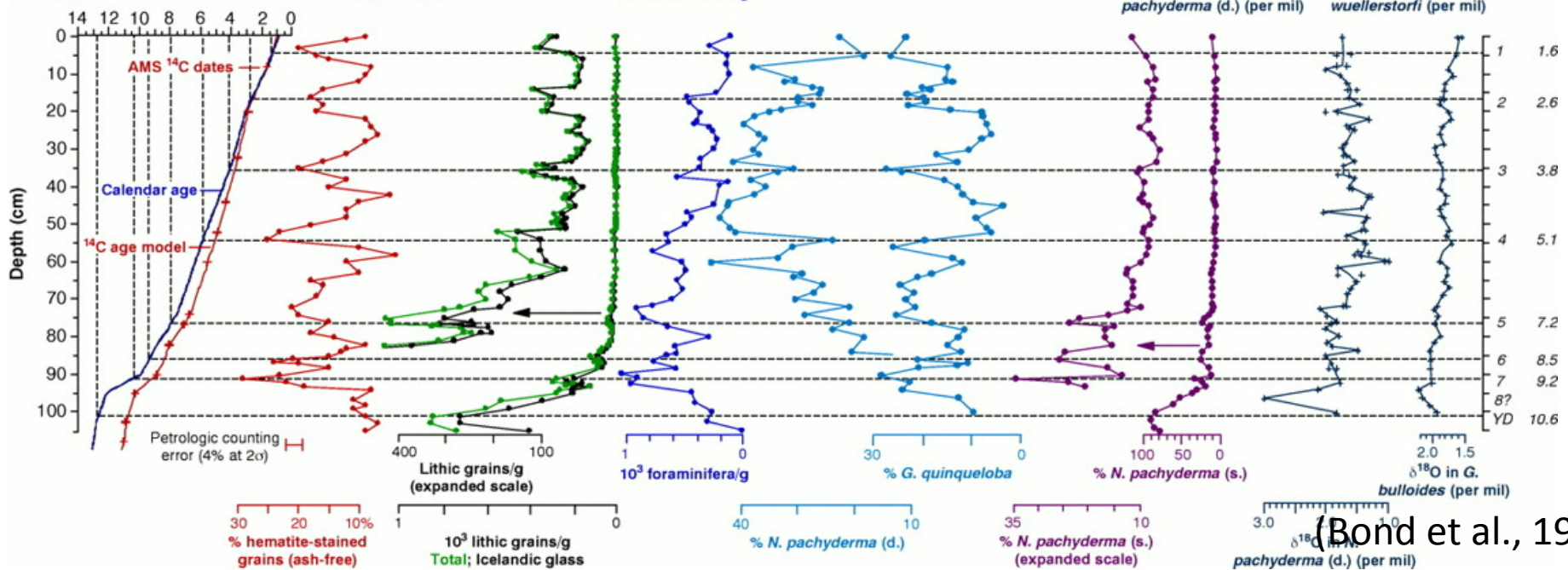
Fig. 18.13. Radiographs of two sections of core from Scoresby Sund, East Greenland. (a) Massive diamicton between 200 and 210 cm down-core taken in 512 m water depth. (b) Massive diamicton between 155 and 165 cm down-core taken in 386 m water depth. Scale bars are 2 cm long. The location of the cores is shown in Fig. 18.12.

IRD, dropstone

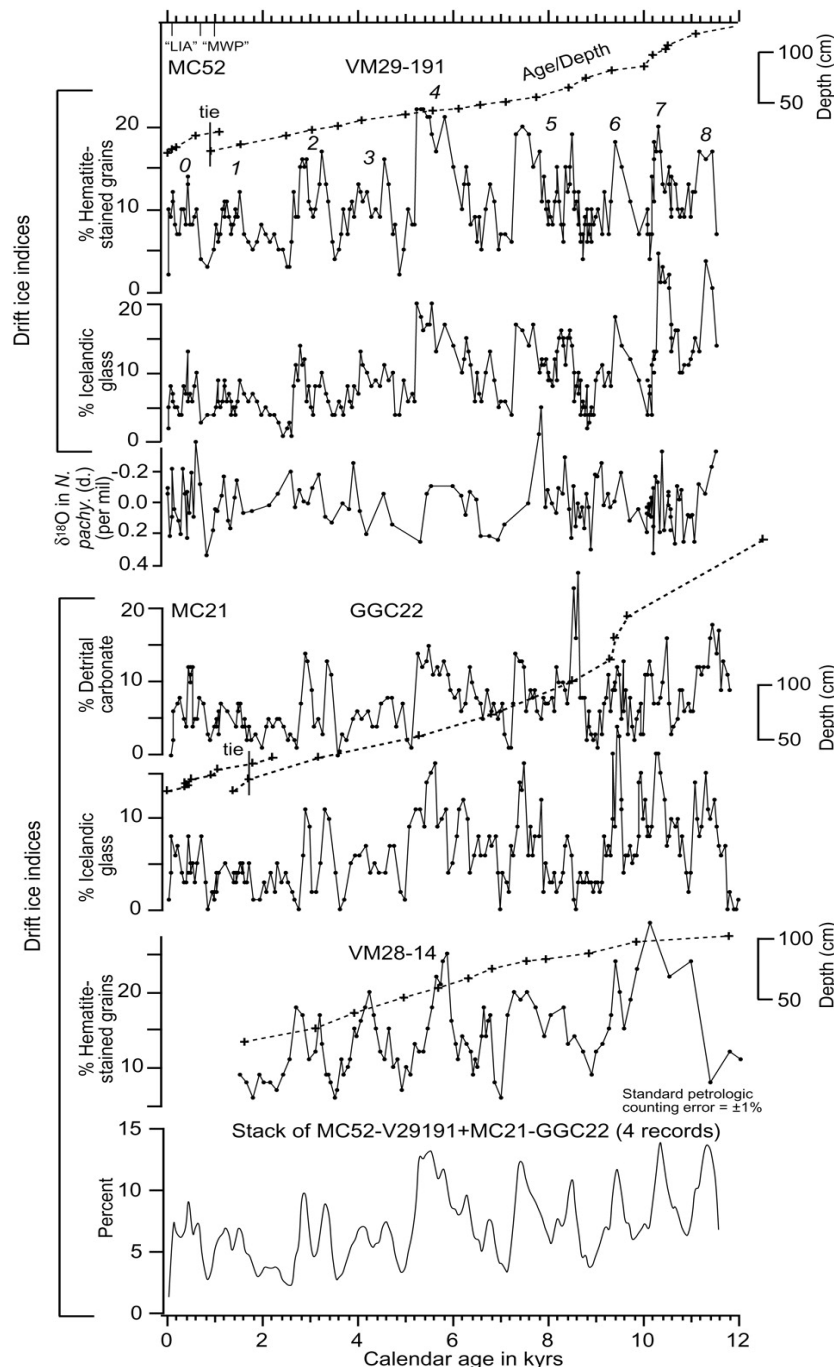
(from Woodworth-Lynas and Dowdeswell, 1994)



VM 28-14



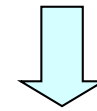
(Bond et al., 1997)



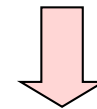
振幅は弱いですが、後氷期にも1~2千年周期のIRDの変動が見られる

周期はD-O Cycleに似ている

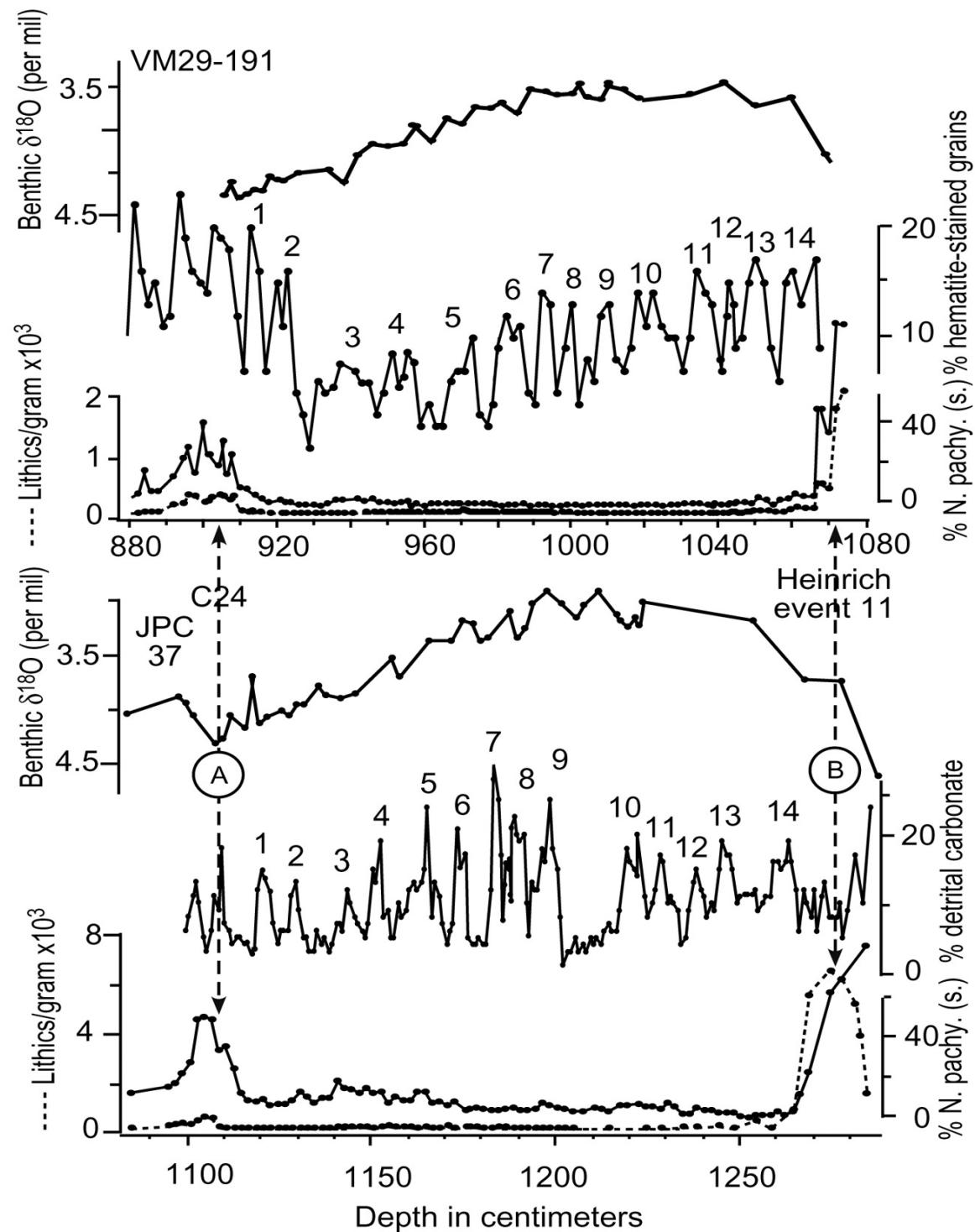
北大西洋深層水には、これに対応した変動は見られない



塩分振動子仮説では説明できない

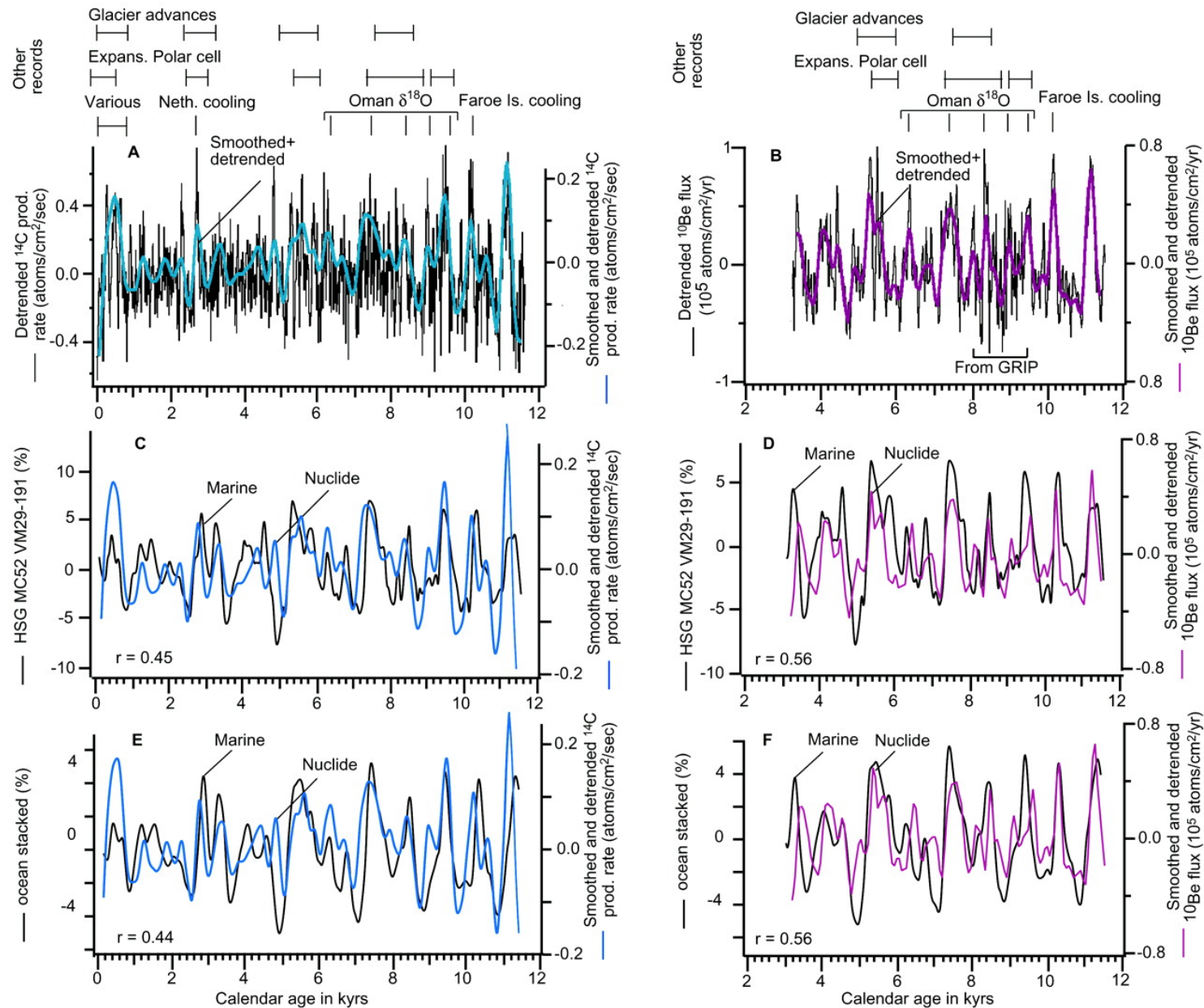


ペースメーカーの存在?



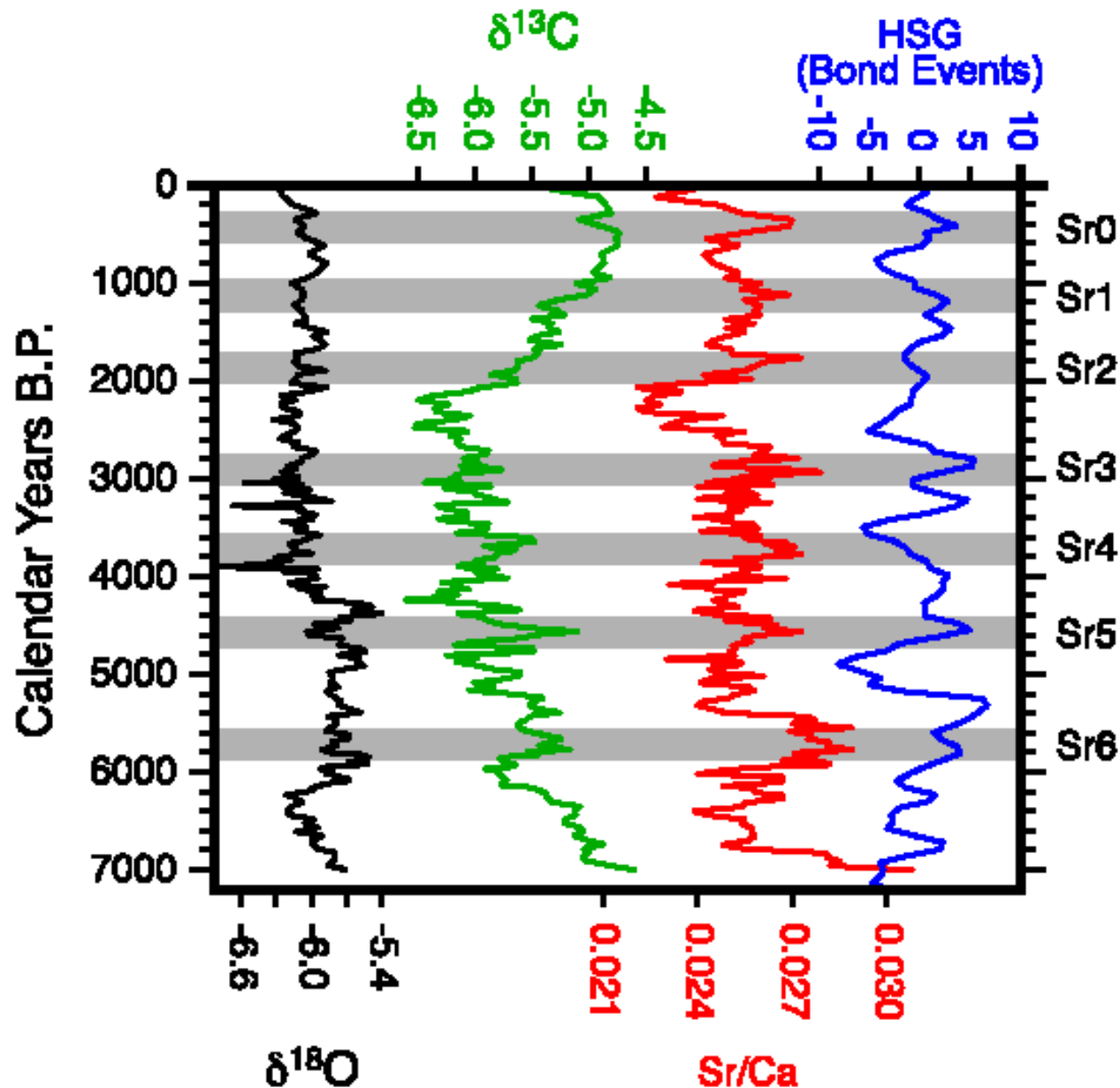
同様な変動は、一つ前の
間氷期にも見られる。

後氷期北大西洋のIRD記録は、太陽活動記録と良く一致する



From Bond et al. (2001) Science, 294

Holocene stalagmite record from east-central N. America

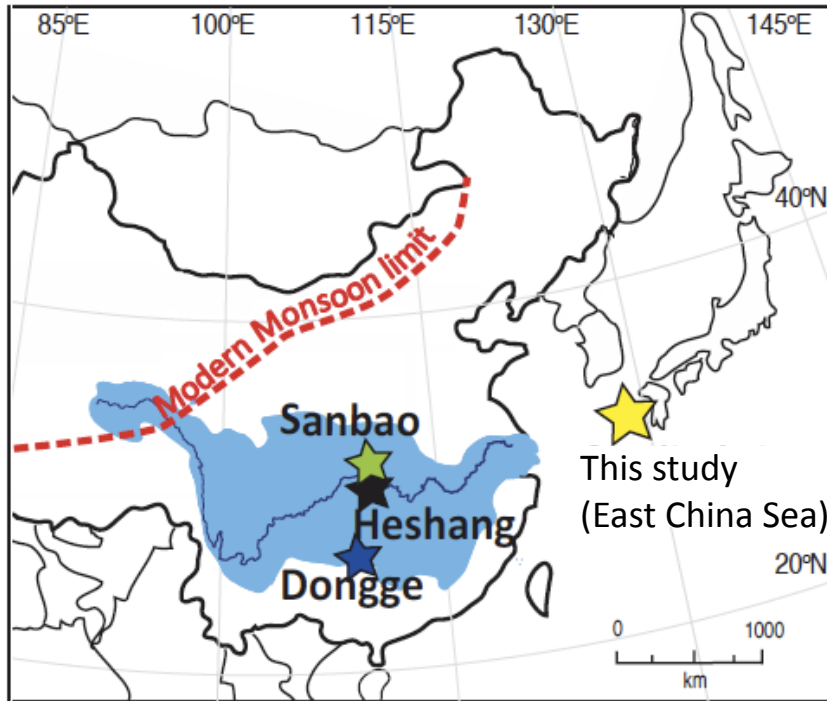


Dry events の時地下水面上部でcalciteが沈澱し、Sr/Caが増加

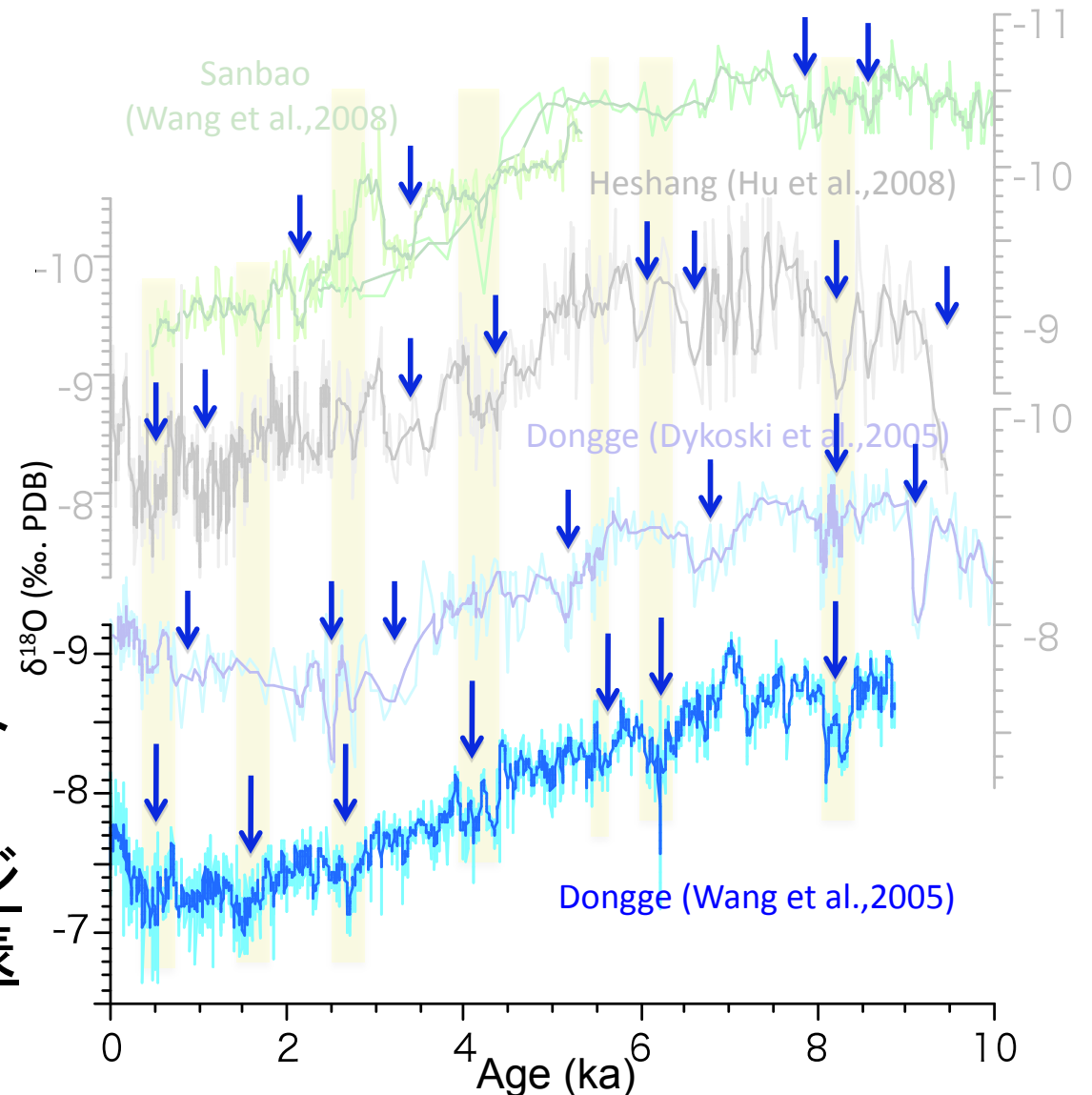
土壌中での植物の呼吸が減少して $\delta^{13}\text{C}$ は増加

E-C N. America のdry events
と N. Atlantic IRD eventsが
同期

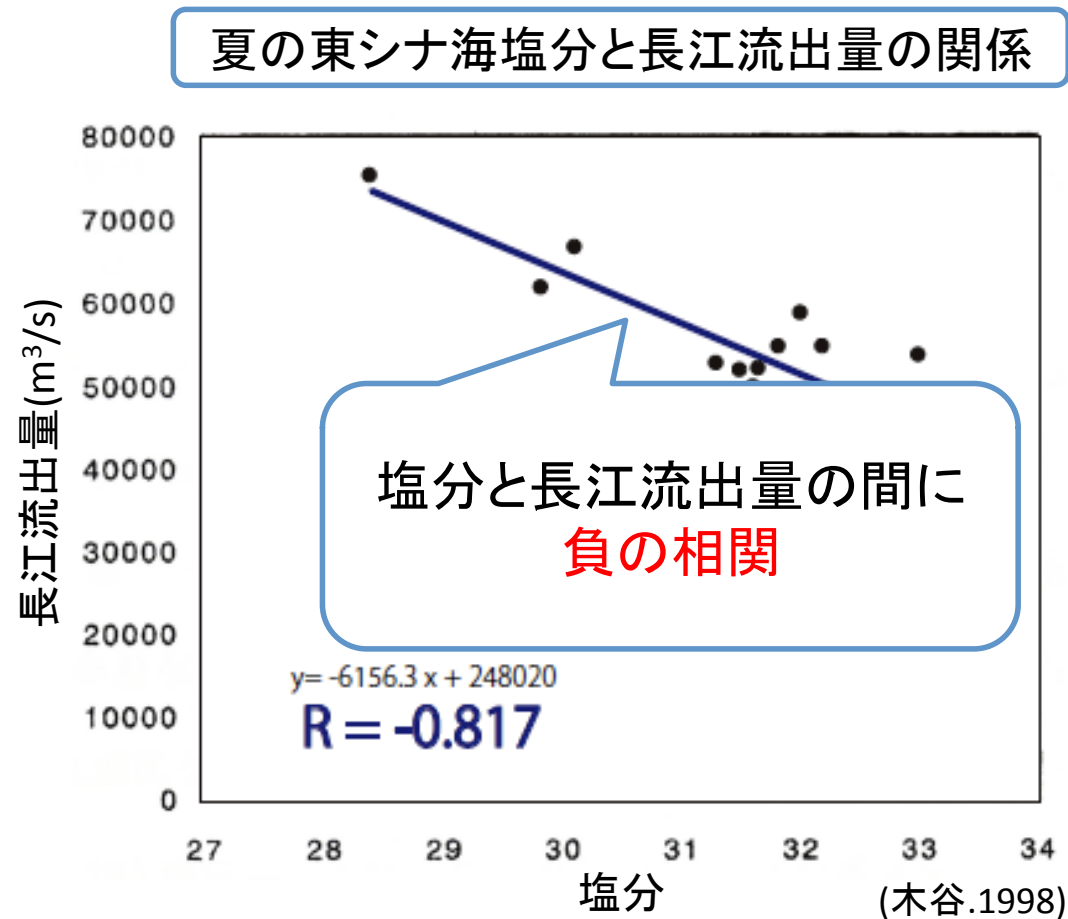
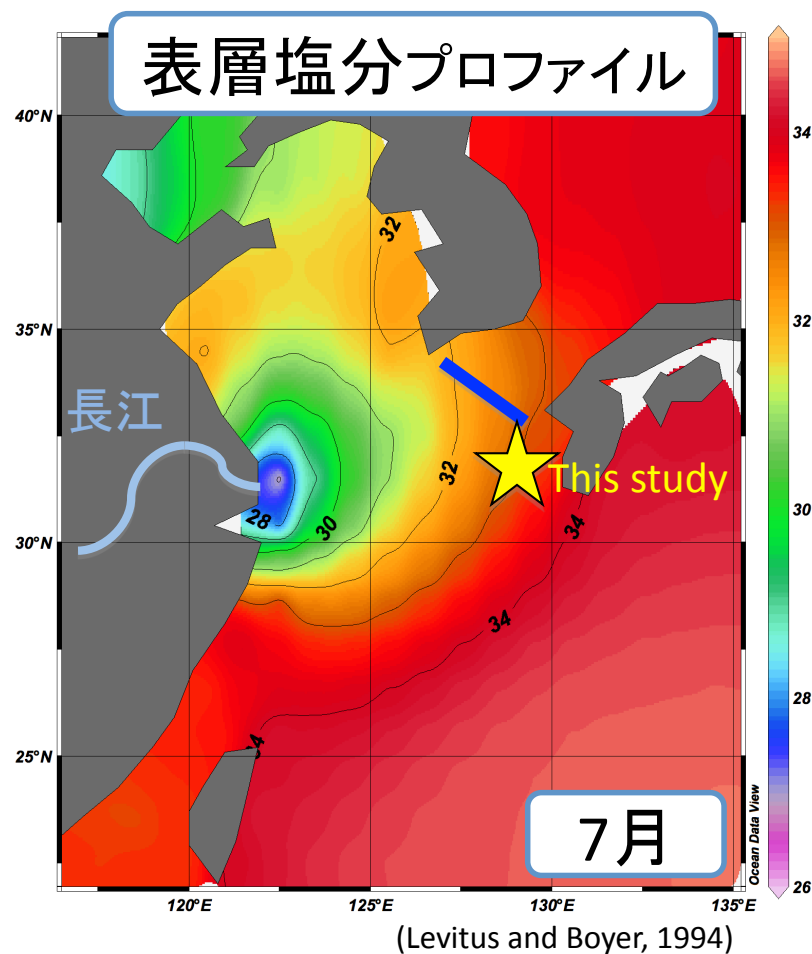
完新世の東アジア夏季モンスーン変動 : 中国の石筍の酸素同位体比記録



• 夏季モンスーン弱化イベントは地域ごとに時代や規模が異なっており、広域的に東アジア夏季モンスーン変動を代表しているのか疑問

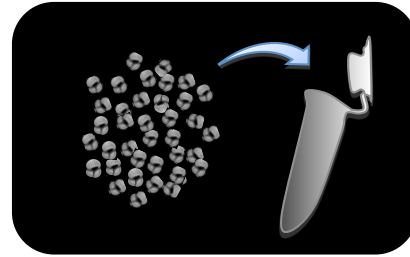


現在の東シナ海の表層海洋環境



夏の東シナ海の塩分変動は長江の流出量(集水域の降水量)を表しており,長江集水域の広域的な降水量変動のプロキシとなりうる

古水温・古塩分推定法



Mg/Ca分析

Mg/Ca : SST

$$SST = \ln (Mg/Ca/0.38) / 0.089$$

(Hastings *et al.*, 2001. South China Sea)

$\delta^{18}O_{\text{calcite}}$ 分析

$\delta^{18}O_{\text{calcite}}$: SST, $\delta^{18}O_{\text{sw}}$

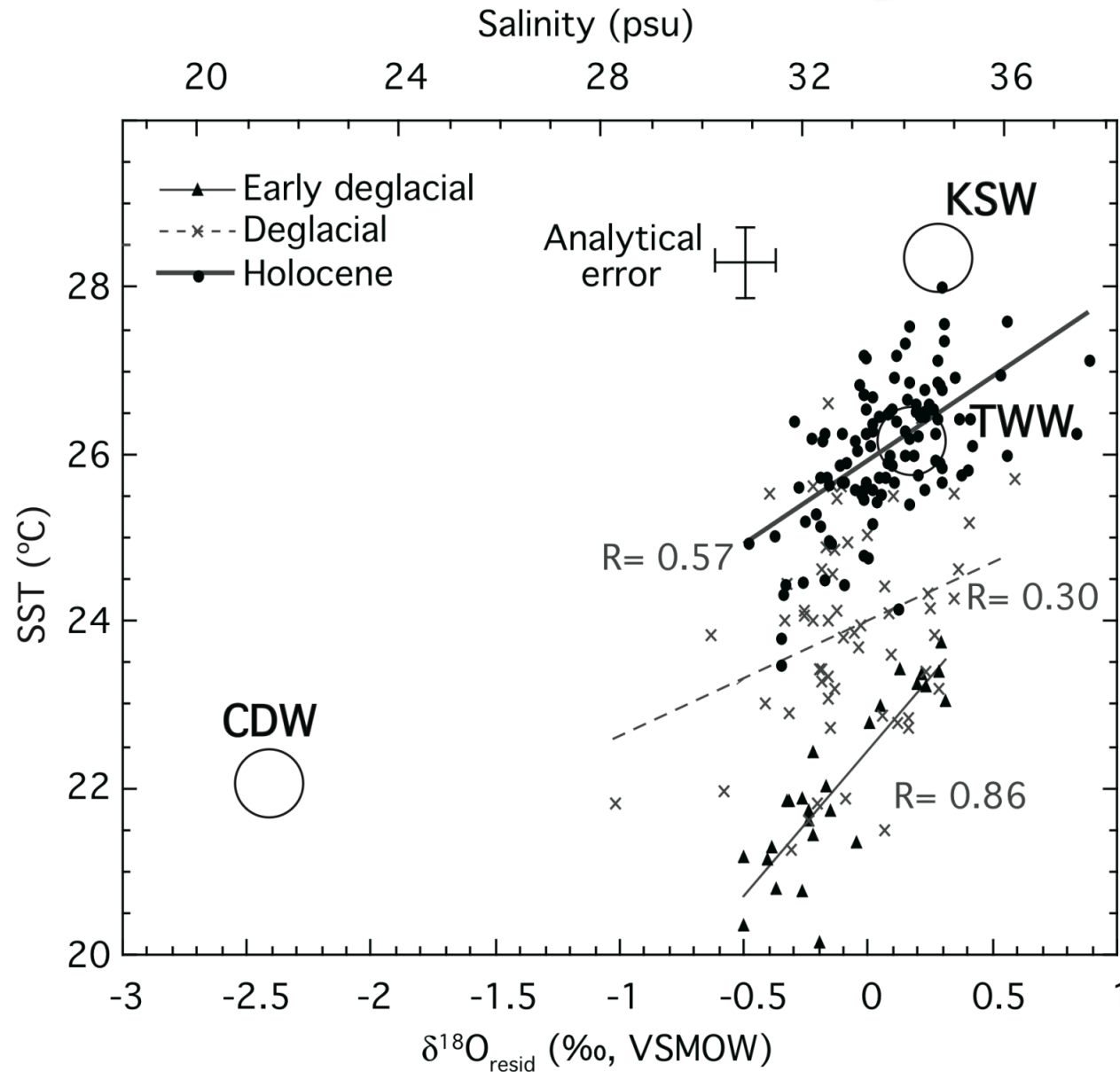
$$\delta^{18}O_{\text{sw}} = \delta^{18}O_c + SST/4.8 - 3.1$$

(Bemis *et al.*, 1998. culture experiment)

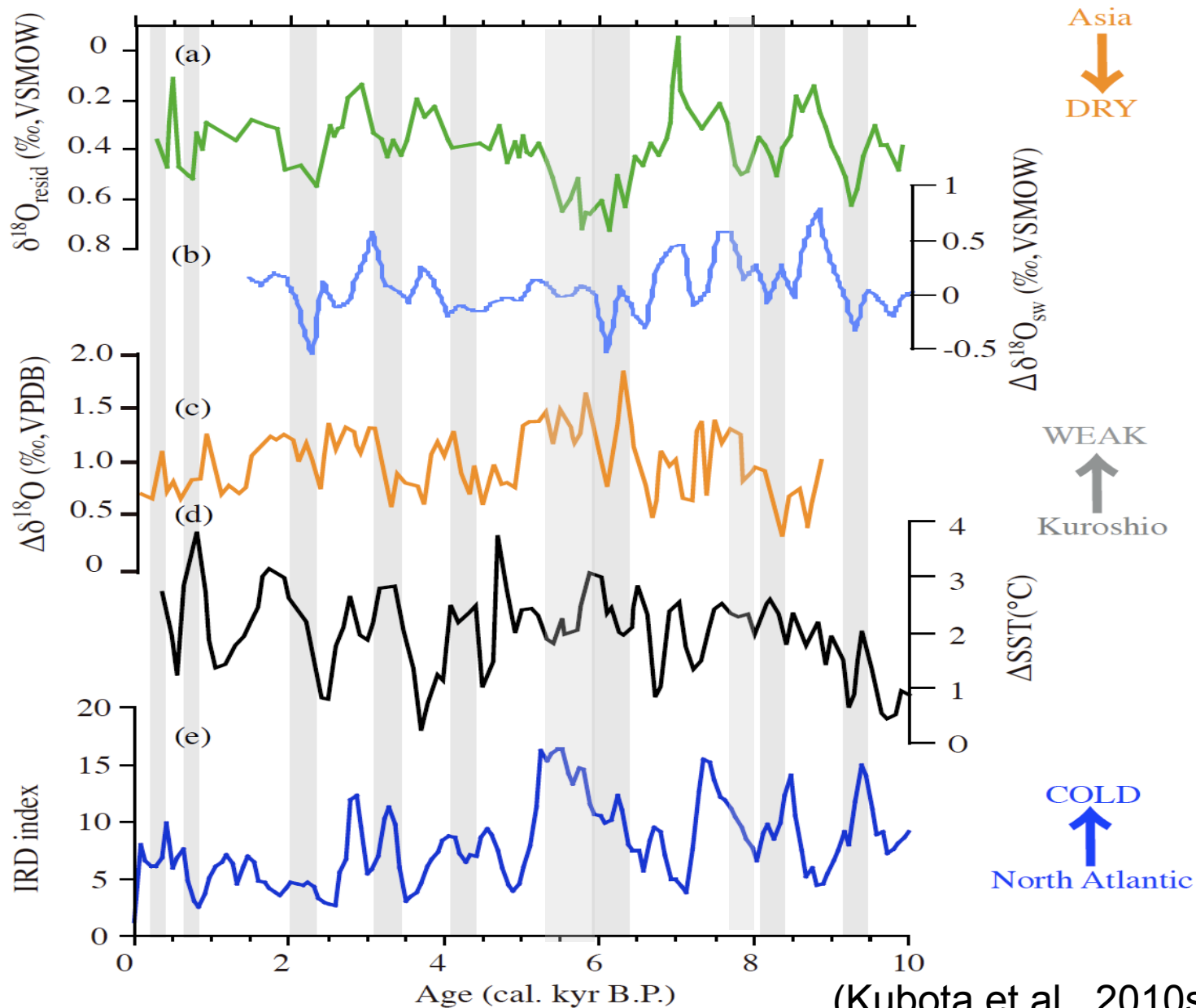
$\delta^{18}O_{\text{sw}}$: SSS, global ice volume

全球的な氷床量の効果を除くことでSSSが復元できる

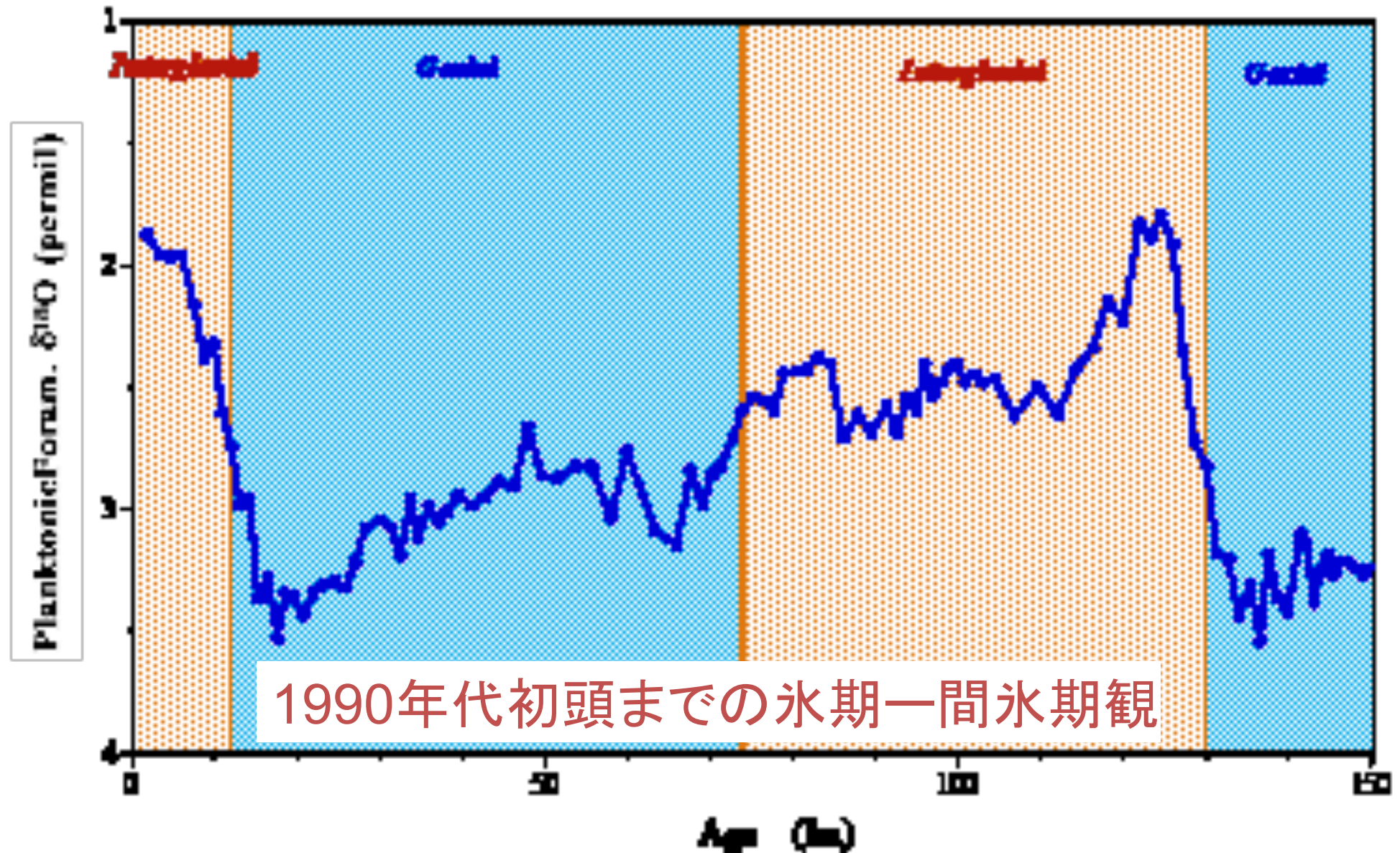
Holoceneの東シナ海北部におけるSST, SSS は、黒潮と長江希釈水のmixingで説明できる



東アジア夏季モンスーン弱化イベントは、北大西洋のIRDイベントと一致する傾向がある

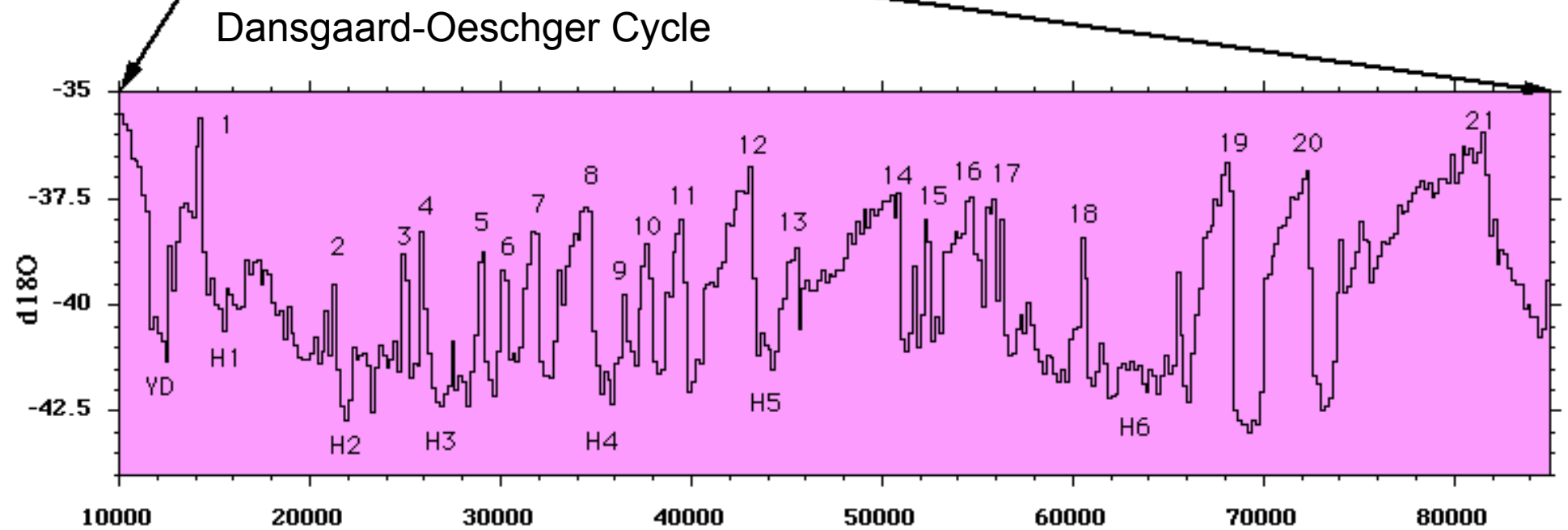
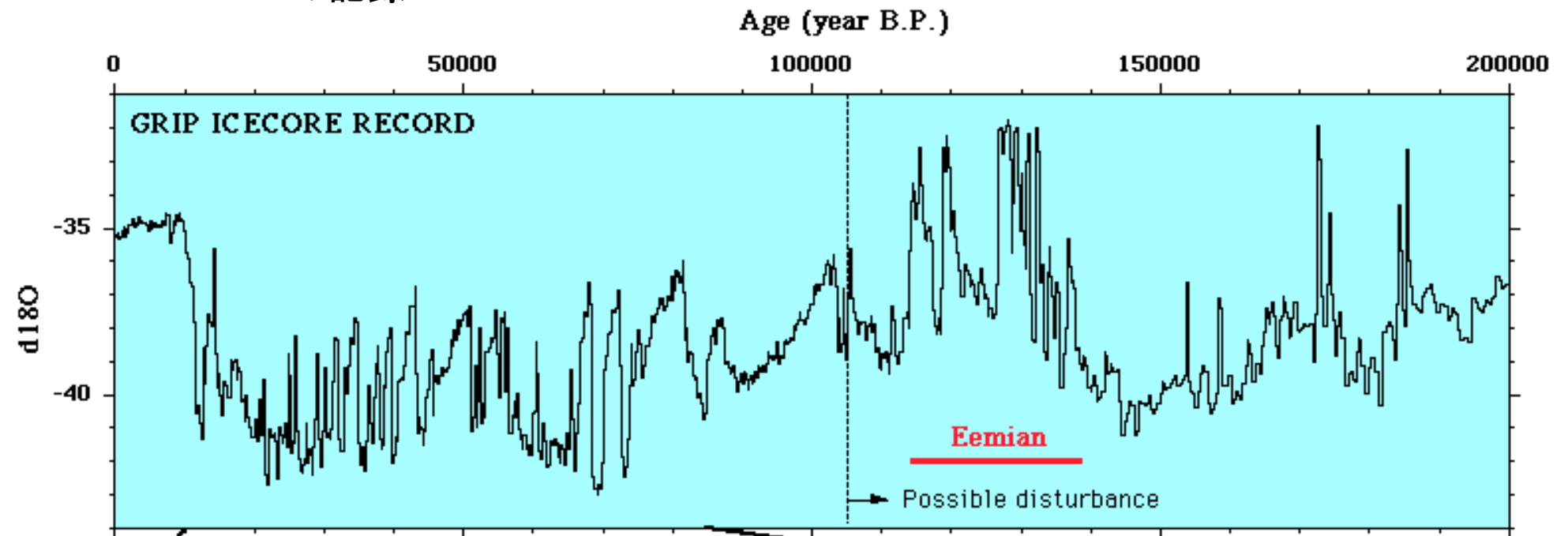


2.2.4 最終氷期における100～1000年スケールの 気候変動と太陽活動変動



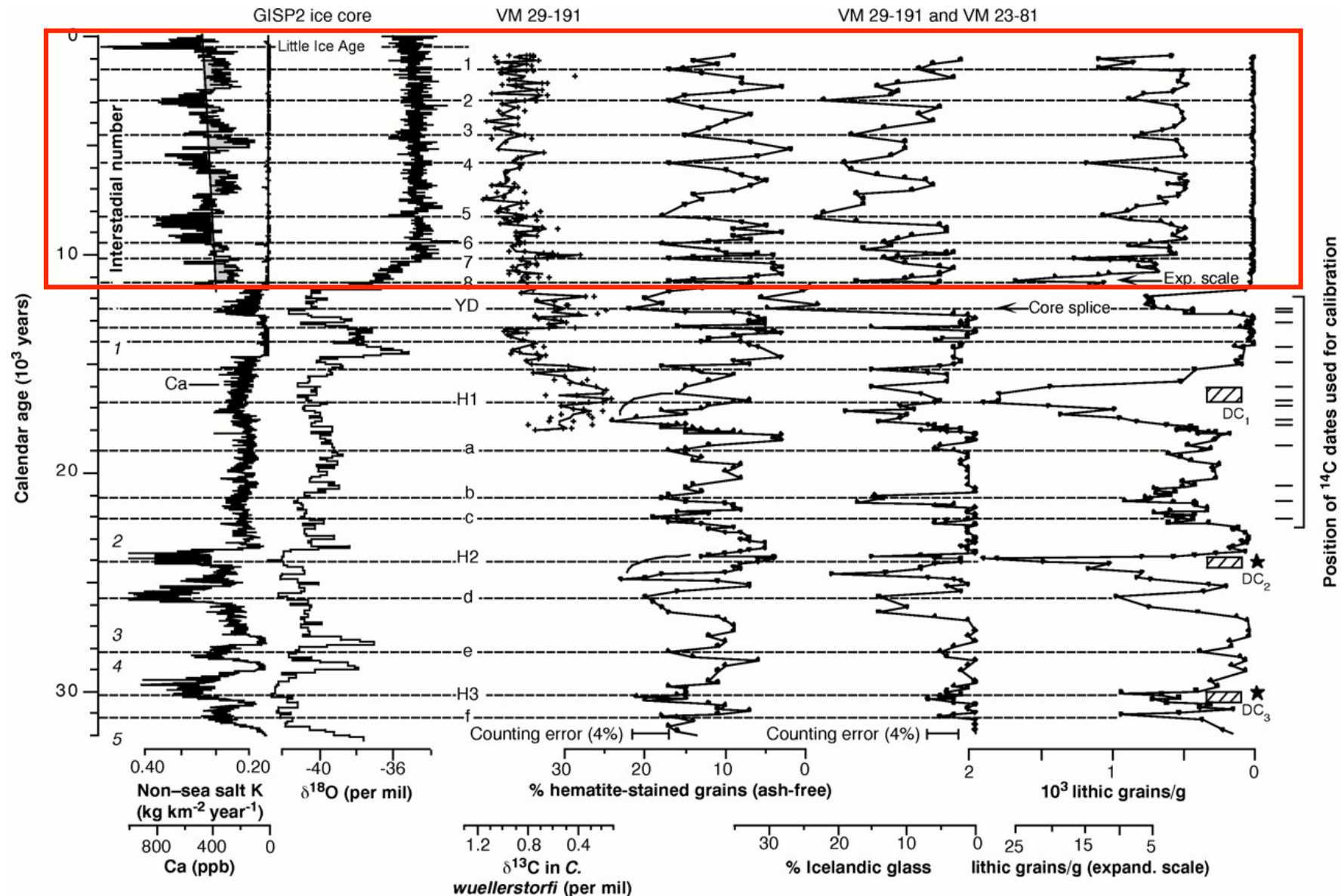
(from Martinson et al., 1987)

GRIP Ice Coreの記録



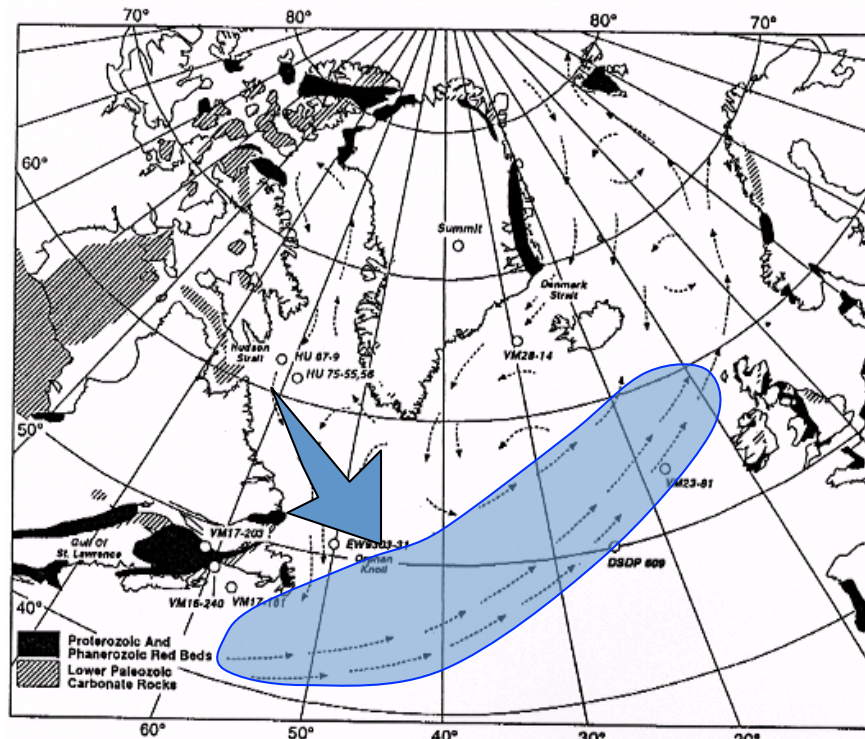
(Dansgaard et al., 1993)

最終氷期においては、IRDがHoloceneの100倍の振幅で変動

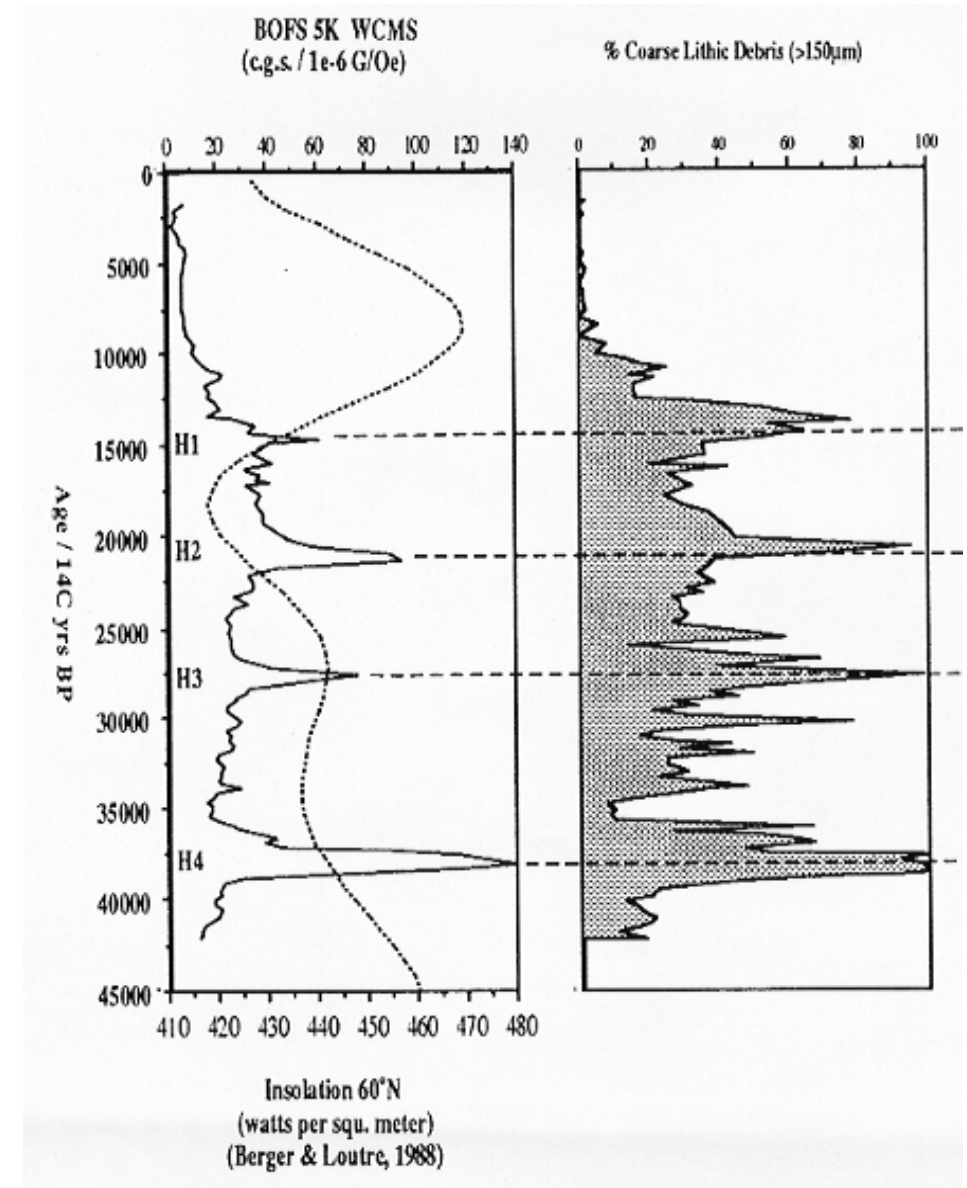
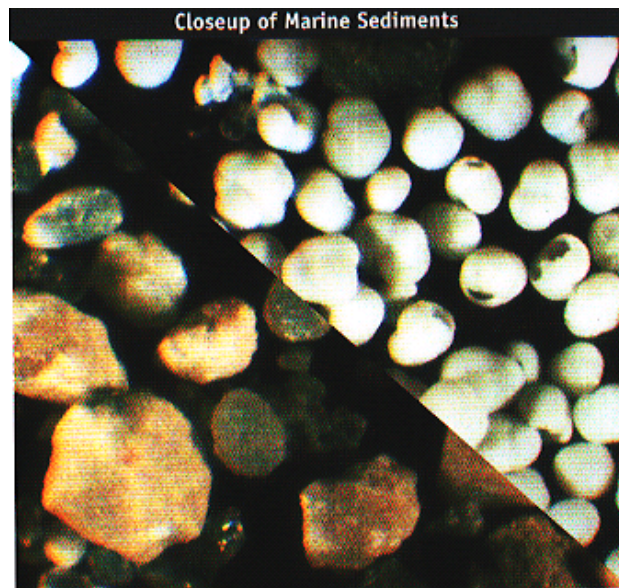


(Bond et al., 1997)

ハインリッヒ・イベント とは？

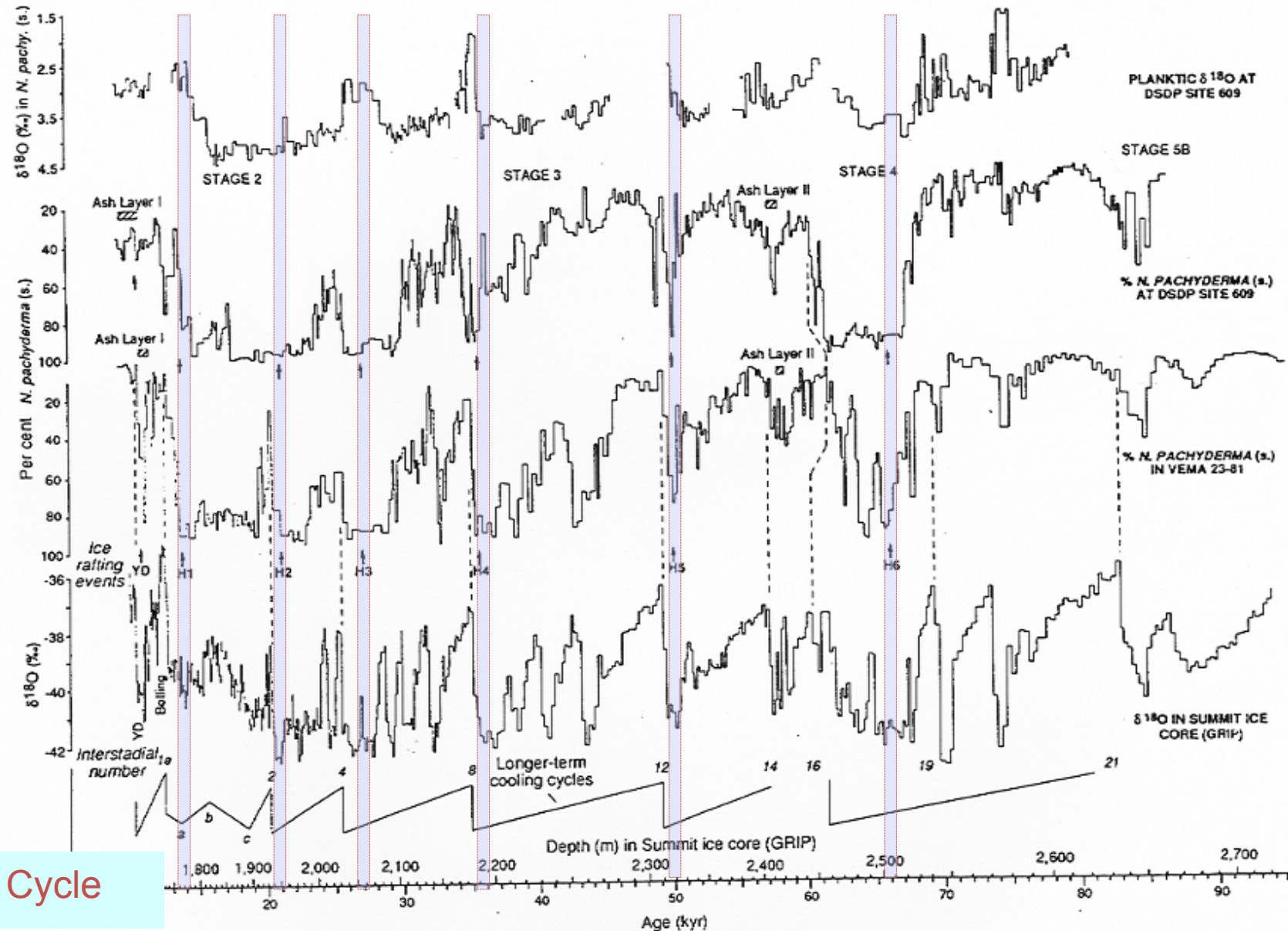


From Bond et al.(1993)



(from Maslin et al., 1995)

ハインリッヒ・イベントとD-O サイクル

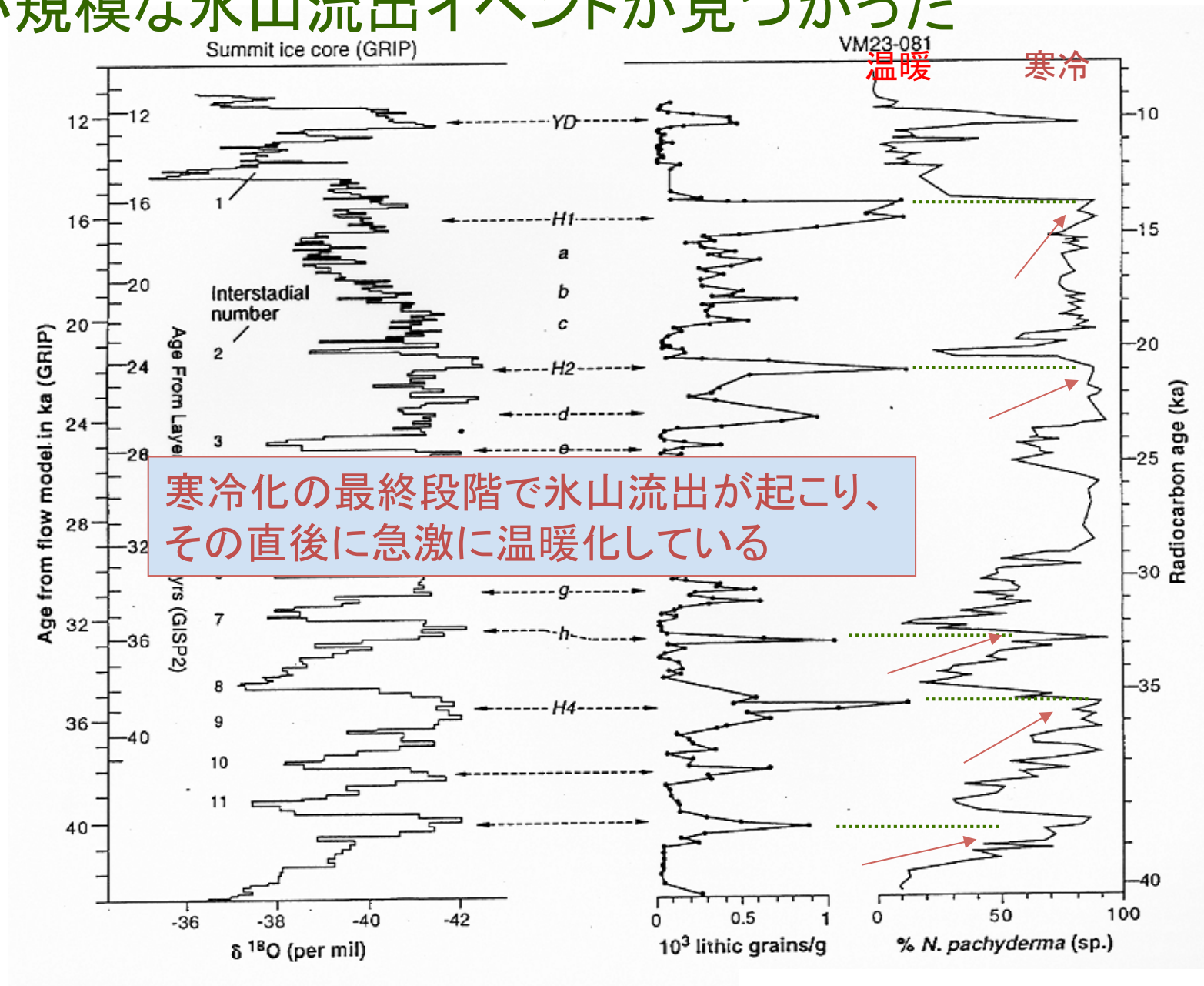


Bond Cycle

D-O サイクルの変動の振幅および周期は、ハインリッヒ・イベントで束ねられているように見える

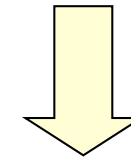
(Bond et al., 1993)

より詳しく調べると、D-O Cycle一つ一つに対応した小規模な氷山流出イベントが見つかった

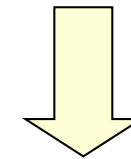


IRDの供給源

礫の種類は、ハドソン湾起源を示唆



ローレンタイド氷床北部セクターの崩壊とそれに伴う氷山の大量流出



では、氷床崩壊の繰り返しは、どう
いう原因？

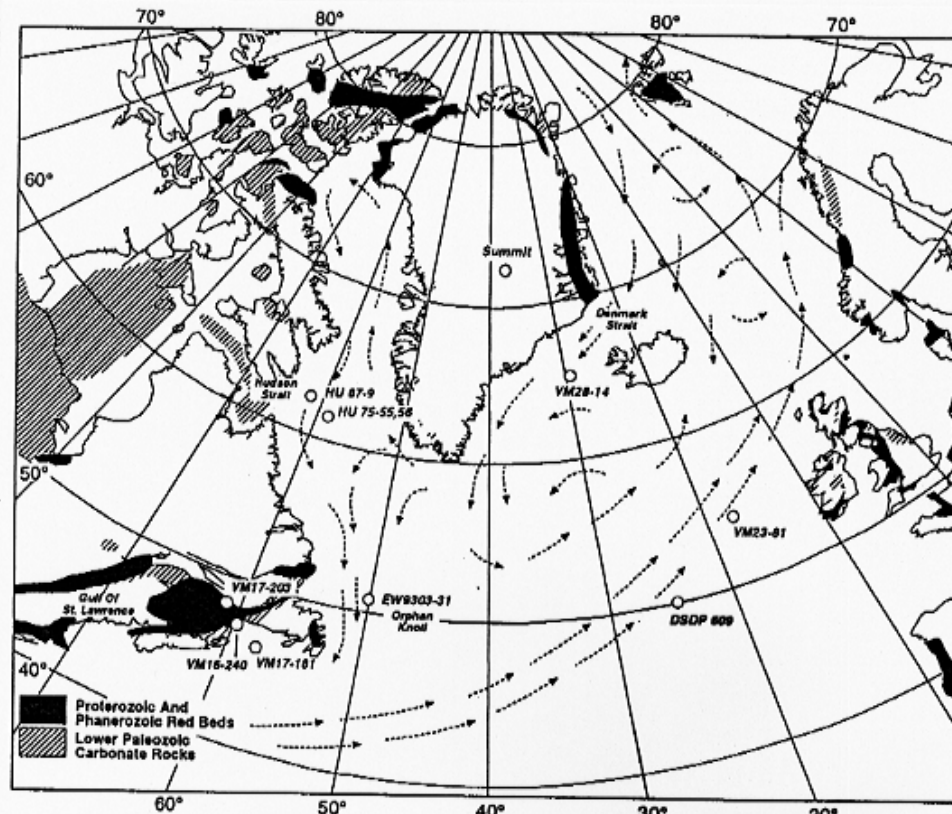
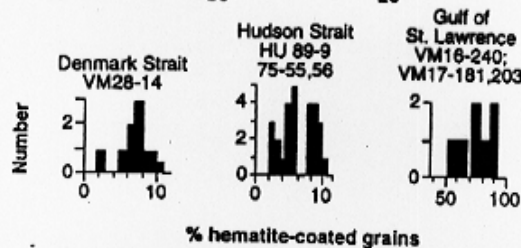


Fig. 1. Map showing the modern circulation in the North Atlantic Ocean and Nordic and Labrador Seas (dashed arrows), locations of cores discussed, and the distribution of rock types that are potential sources of detrital carbonate and hematite-coated grains (data from 28) that we have identified in the lithic cycles in Fig. 4. The histograms show the number frequency of percentages of hematite-coated grains from 63 to 150 μ m across in samples from the indicated cores. For VM28-14, grains were counted in samples containing each of the peaks in basaltic glass (Fig. 5). For the cores near Hudson Strait, grains were counted in samples every 10 cm beginning 60 cm above H1, then from between H1 and H2, and from between H2 and H4(?). In cores from the Gulf of St. Lawrence, grains were counted in samples from within and between the "brick red layers" (29); the uppermost of those layers has an AMS radiocarbon age of 13,300 years (24). The sampled interval probably extends to close to Termination 1. As explained in the text, we measured the abundances of hematite-coated grains in these places as an aid in identifying possible sources of those grains in ice-rafted sediment in the eastern North Atlantic.



From Bond et al.(1993) Nature

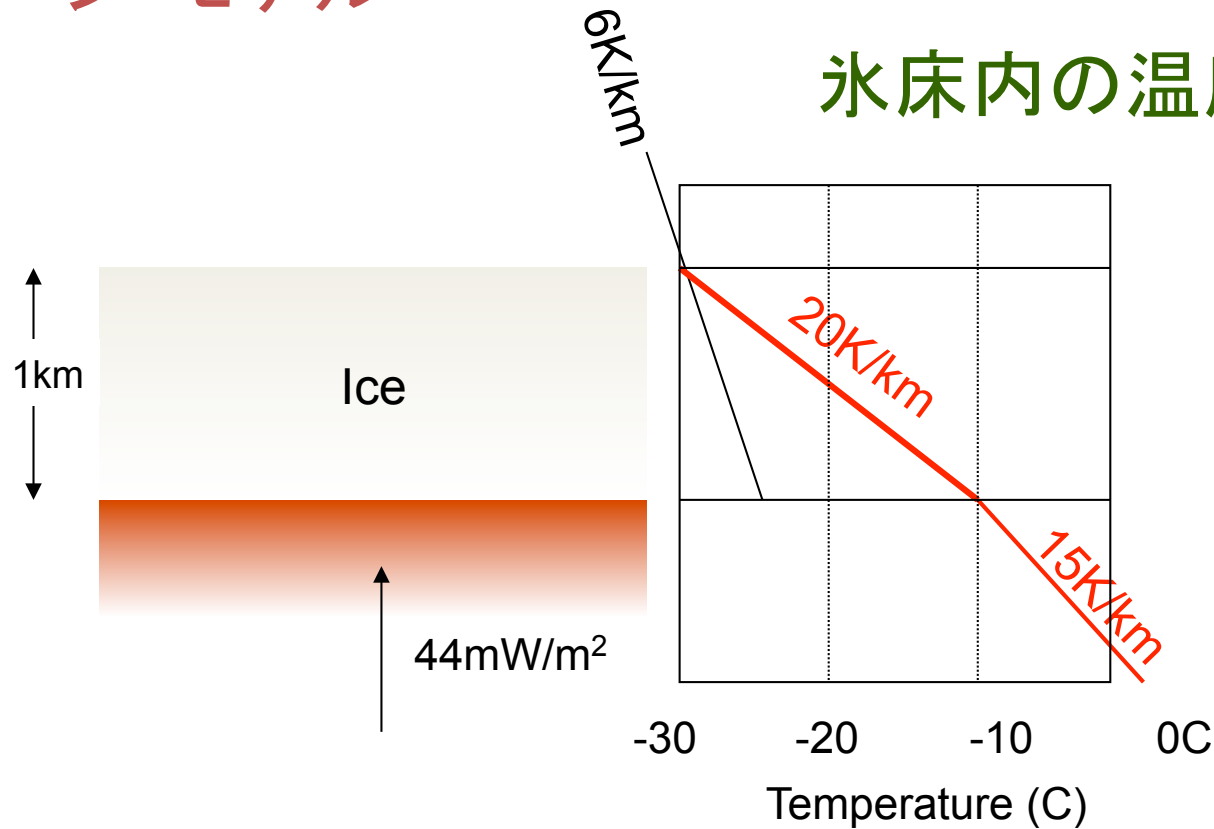
ハインリッヒ・イベントのメカニズム

ビンジ・パージ・モデル

- 氷床の厚さがある程度以上に成長すると、氷床基底の温度が融点を超えてwet baseとなり、氷山が急速に流出して、ハインリッヒ・イベントを引き起こす。
- 氷河が流動し、氷床の厚さが減少するにつれ、氷床基底温度が低下し、dry baseとなって氷河の急速な流動が止み、氷床が再び成長しだす。

ハインリッヒ・イベントのメカニズム

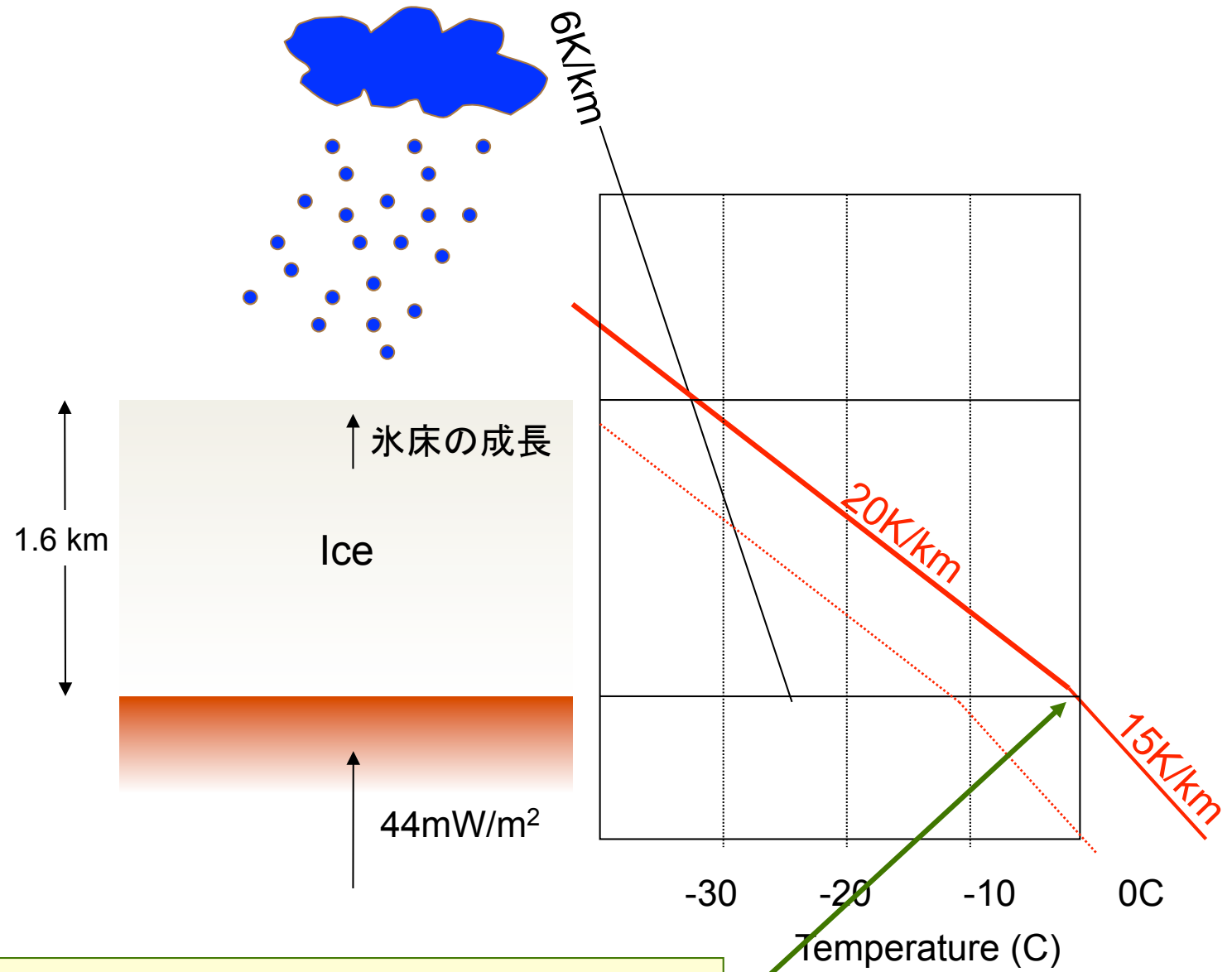
ビンジ・パージ・モデル



岩石の熱伝導率=3W/mK
氷の熱伝導率=2.2W/mK
地殻熱流量=44mW/m²

地(氷)温勾配

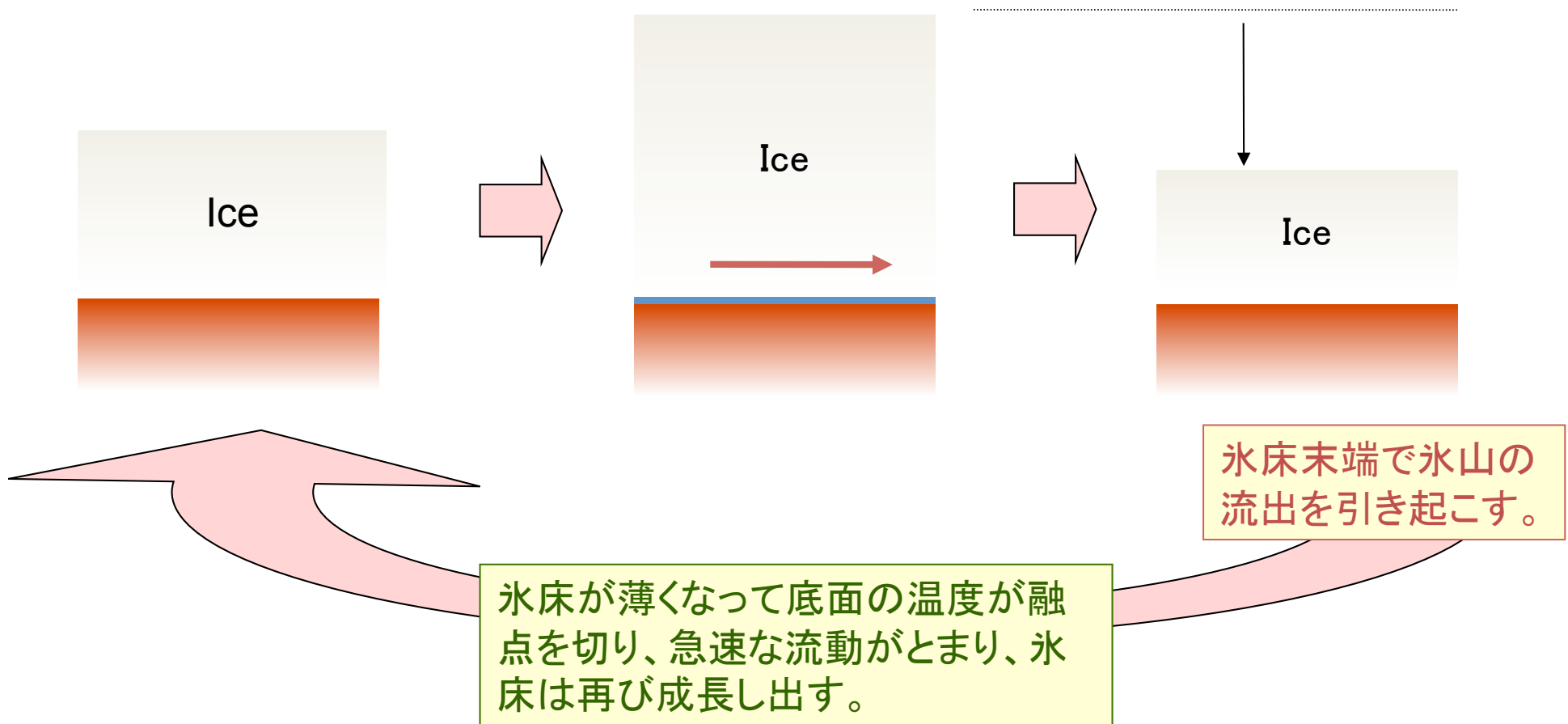
$$\begin{aligned} 44/3000 &= 0.015\text{K/m} \\ &= 15\text{K/km (地殻)} \\ 44/2.2 &= 20\text{K/km (氷床)} \end{aligned}$$



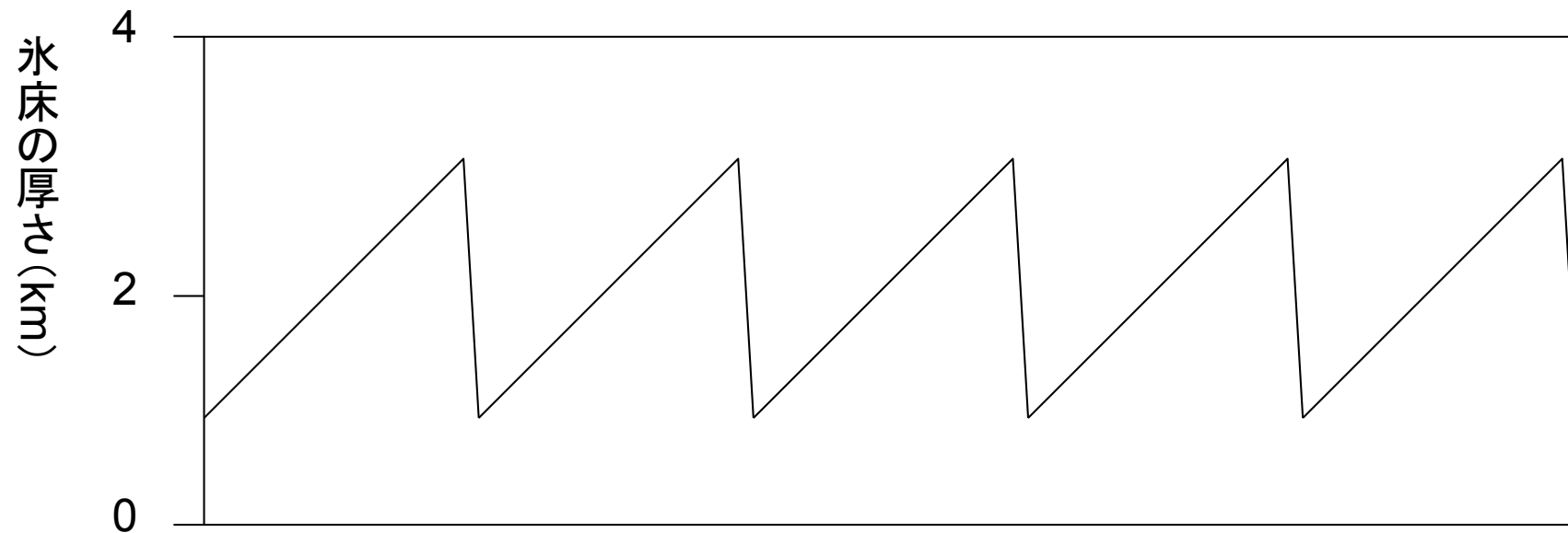
氷床が成長するにつれ、氷床基底面の温度が上昇し、ついには融点を超える。

氷床が成長するにつれ、
氷床基底面の温度が上昇
し、ついには融点を超える。

氷床基底面の温度が融点
を超えると、融けた部分が
潤滑油の役割を果たし、氷
床が急速に流動してその厚
さを減ずる。



氷床は、自励振動で成長、崩壊をくり返す



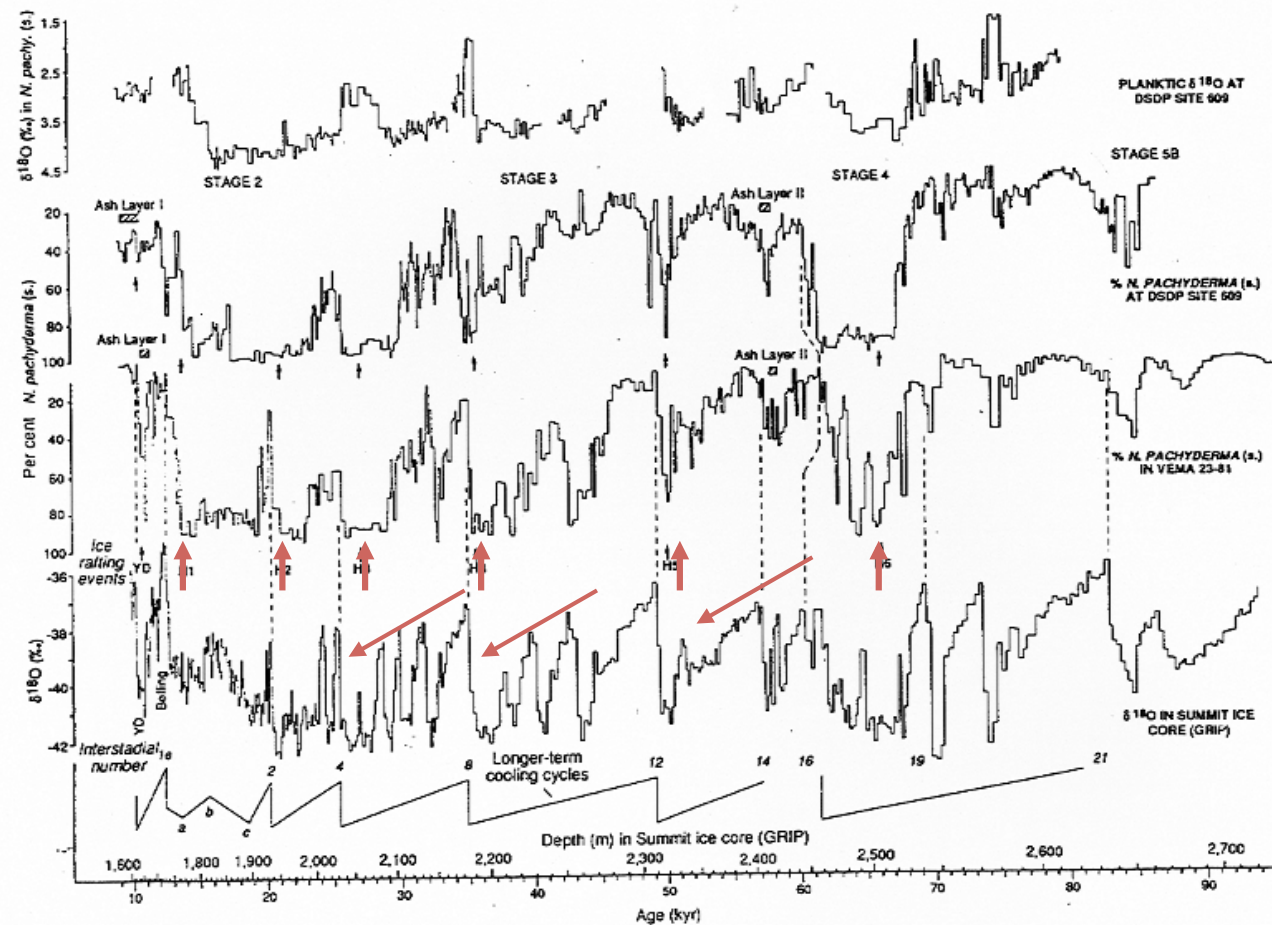
では、周期は何で決まるか？

地表温度

周期 = _____

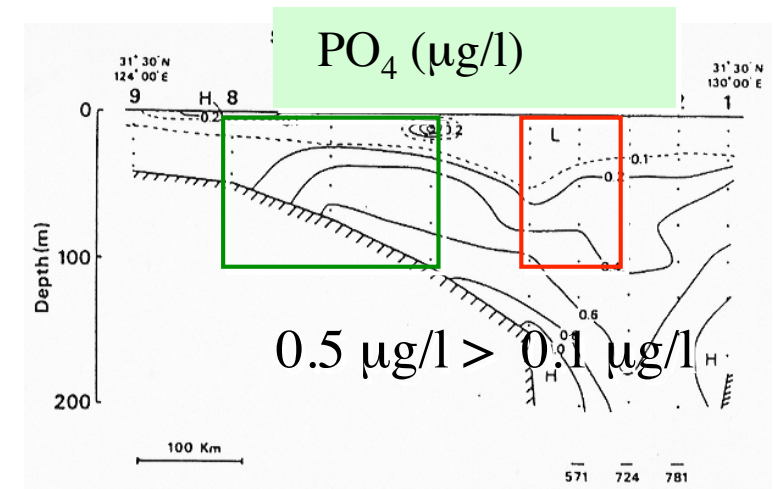
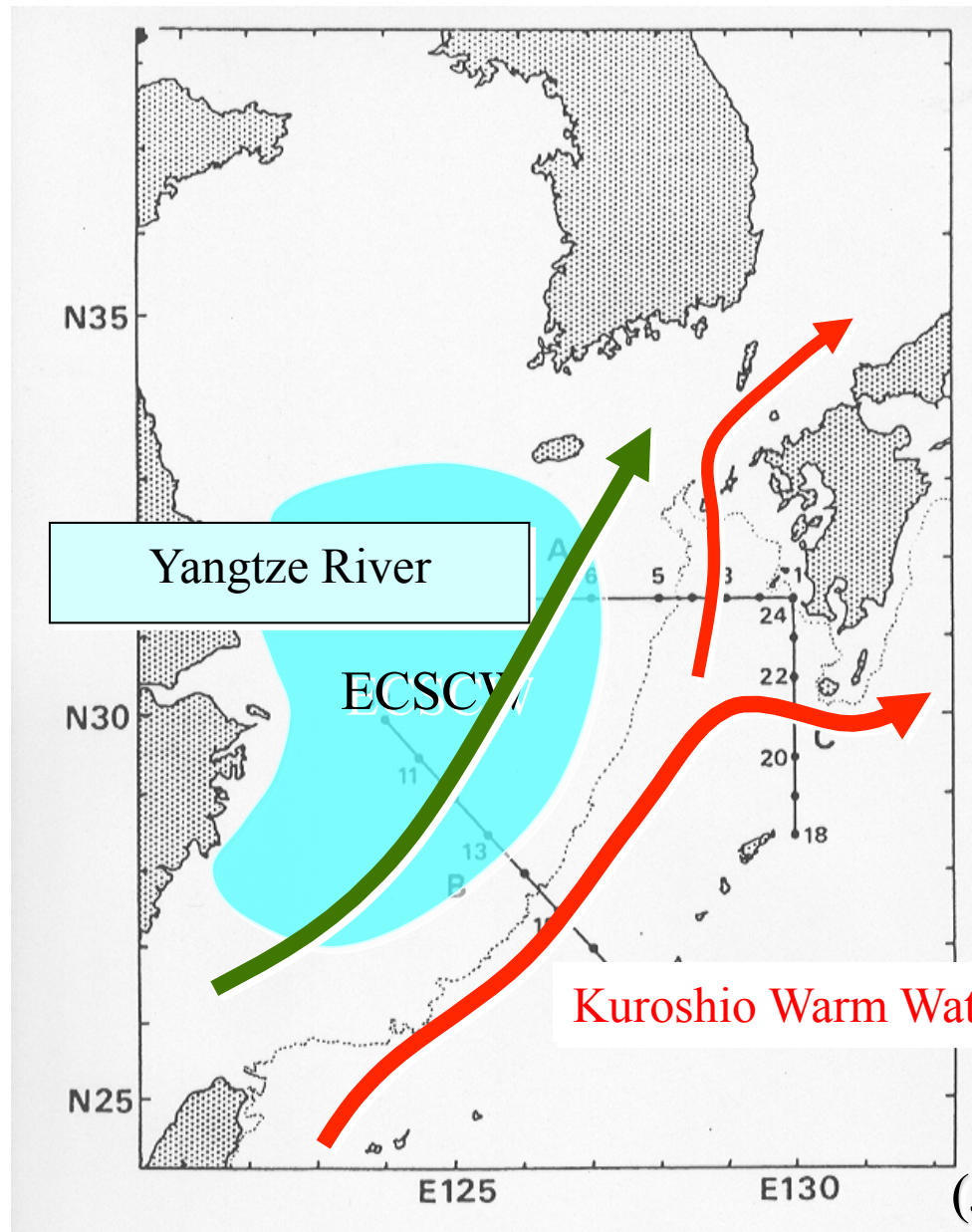
(降雪速度－流動による薄化速度) × (地殻熱流量)

ハインリッヒ・イベントと DOC の関係



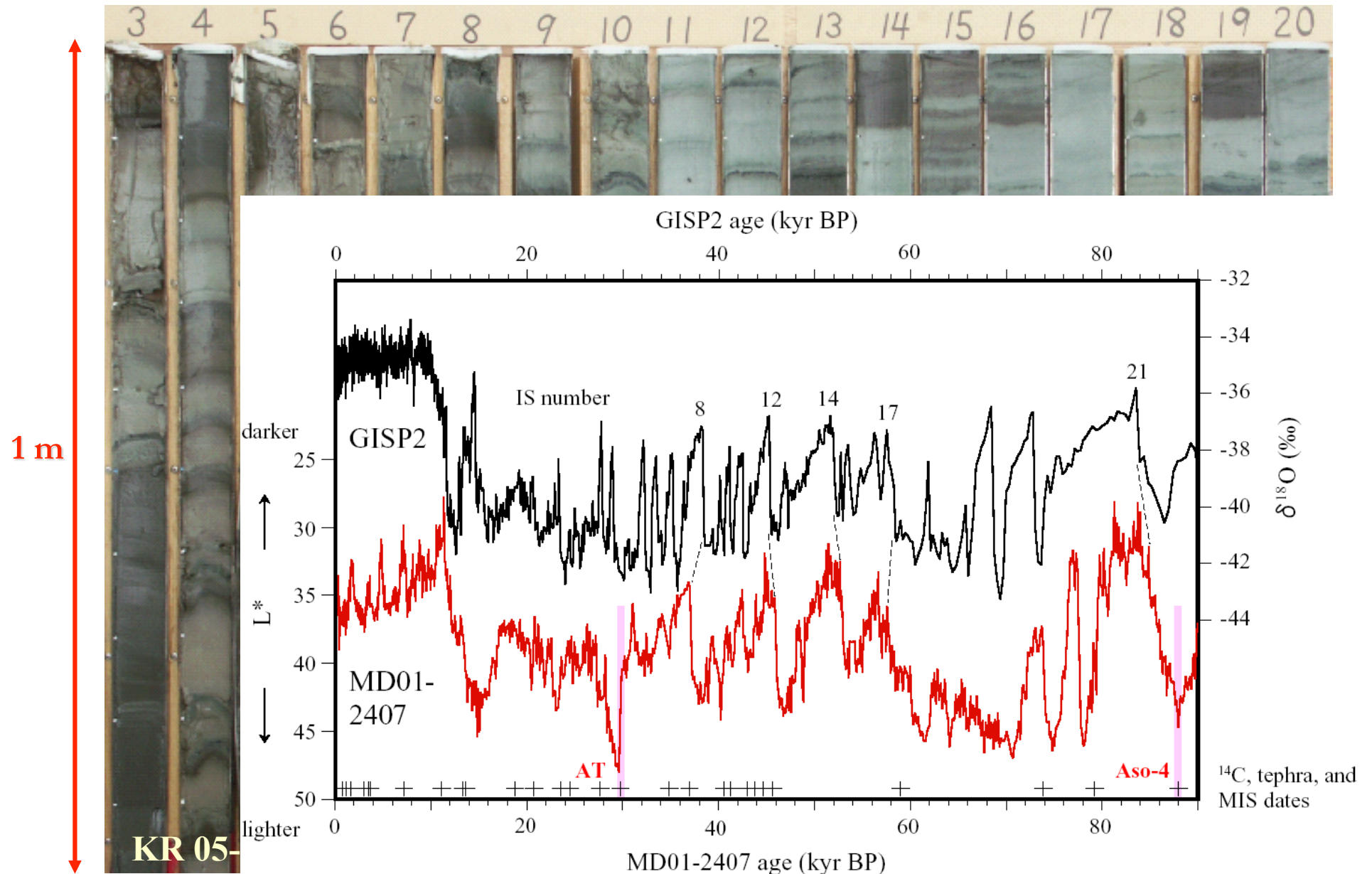
Heinrich Events は、Dansgaard Cycleの
振幅変調を引き起こしている

日本海への栄養塩の流入量は、栄養塩に富む東シナ海沿岸水の対馬暖流への寄与率で決まり、それは、揚子江河川流出による東シナ海沿岸水の張り出しの程度で決まる

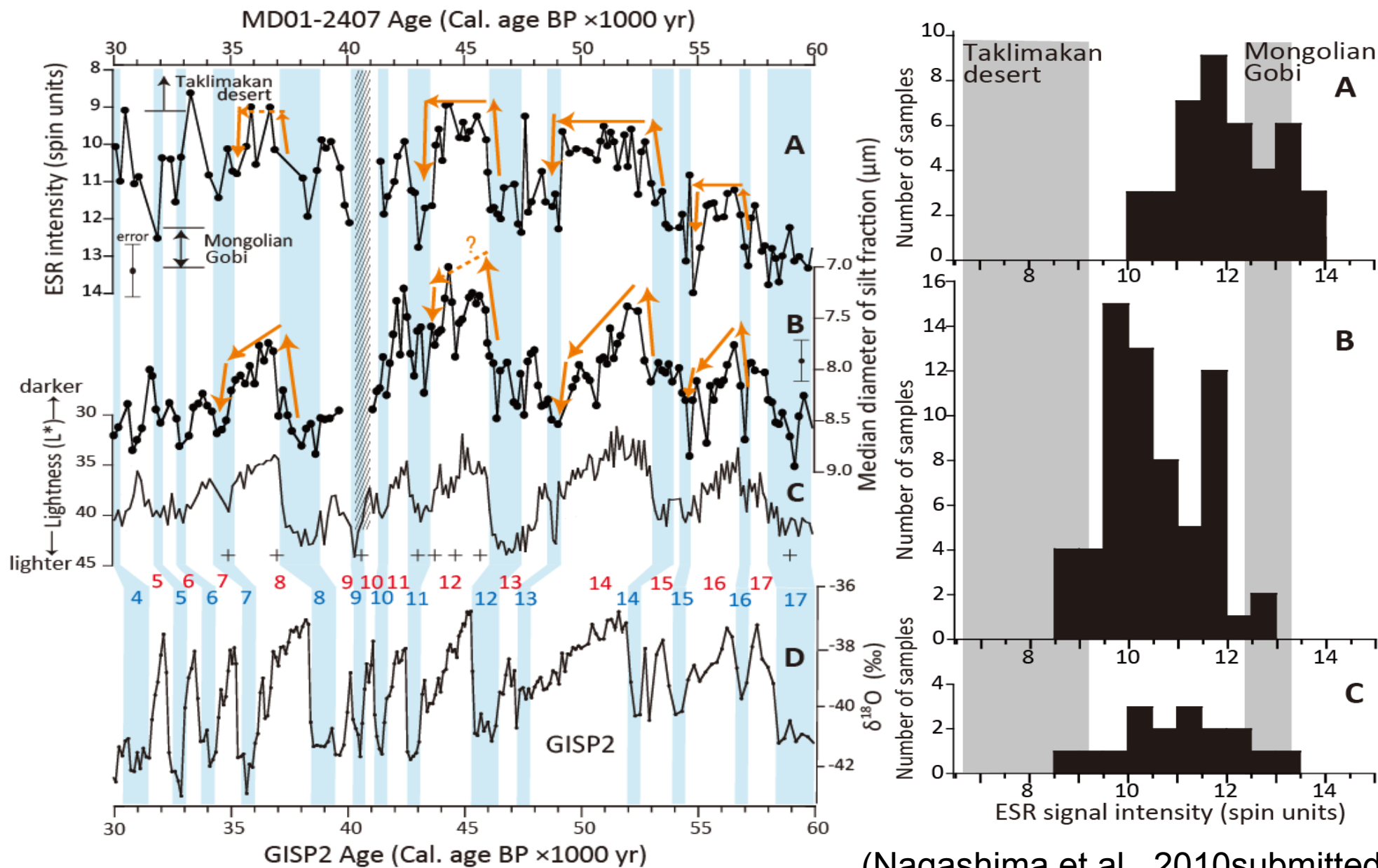


(June-July 1991; from Watanabe, 1994)

日本海堆積物は、DOCに連動したアジアモンスーン変動を忠実に記録している

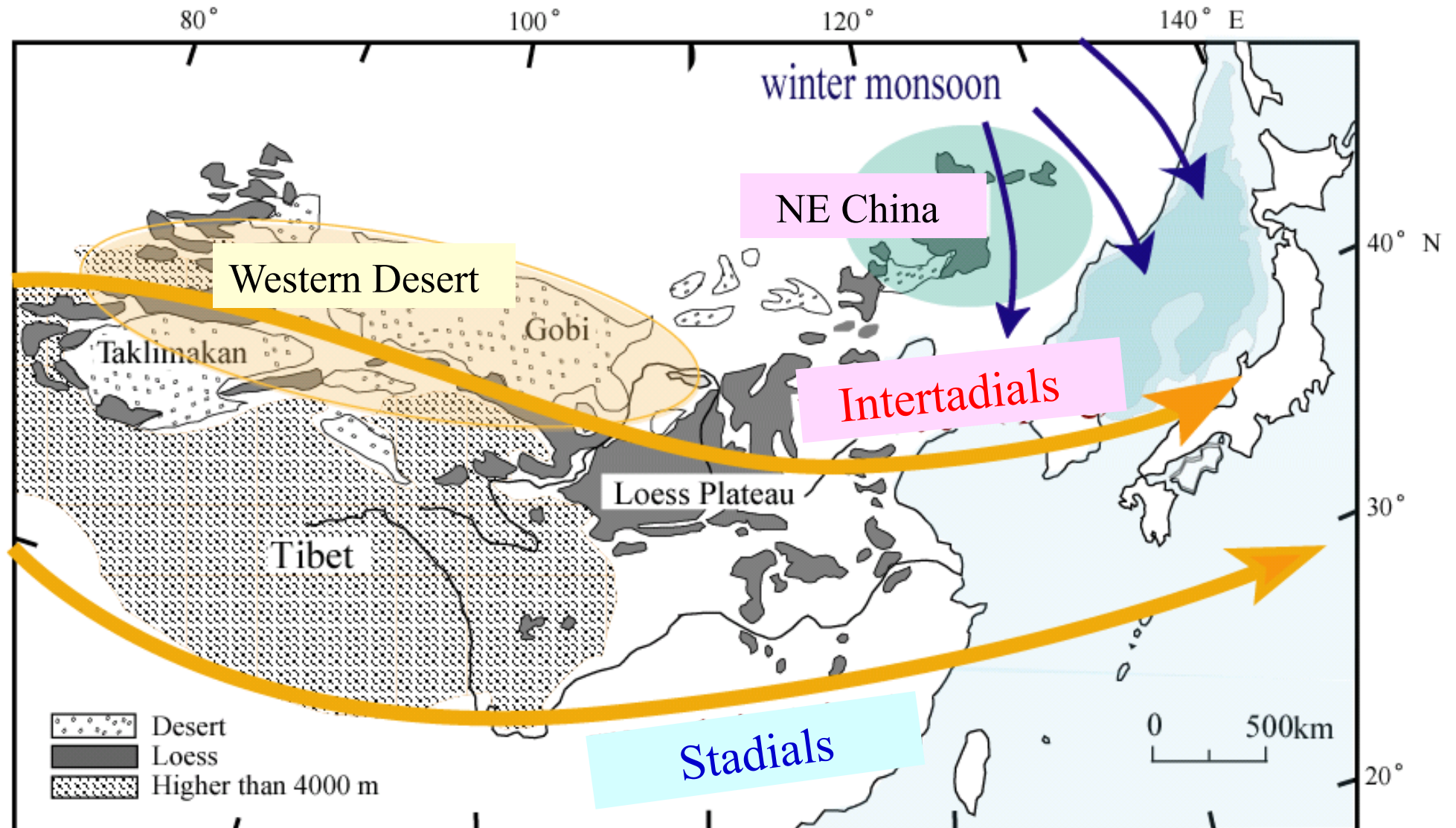


日本海堆積物中の風成塵の供給源は、DOCに連動して変動している。

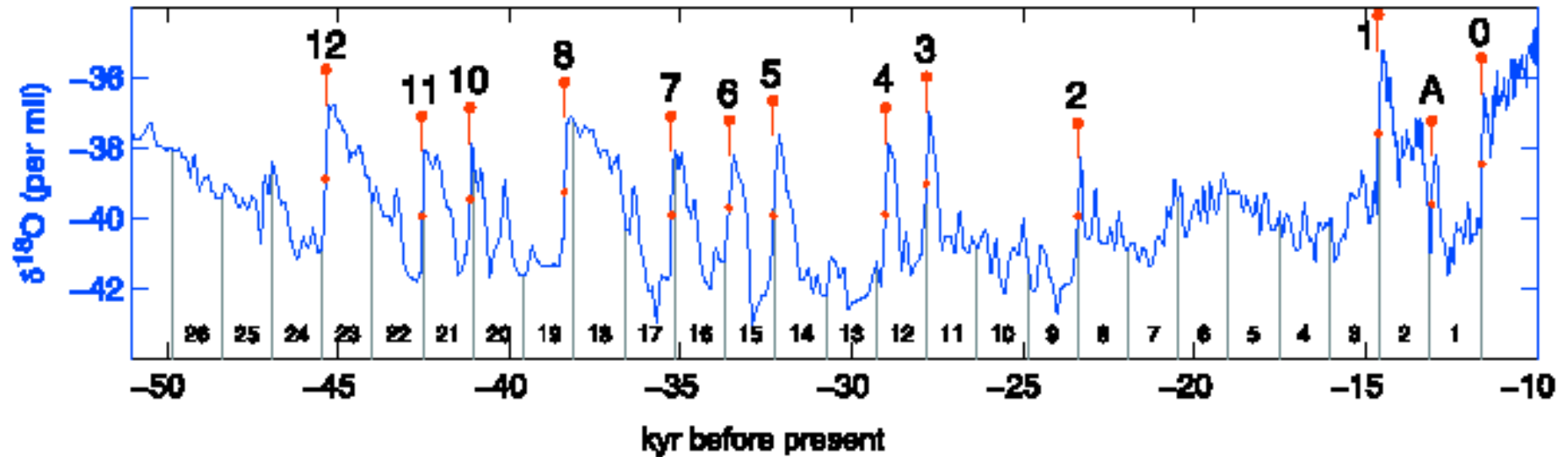


(Nagashima et al., 2010submitted)

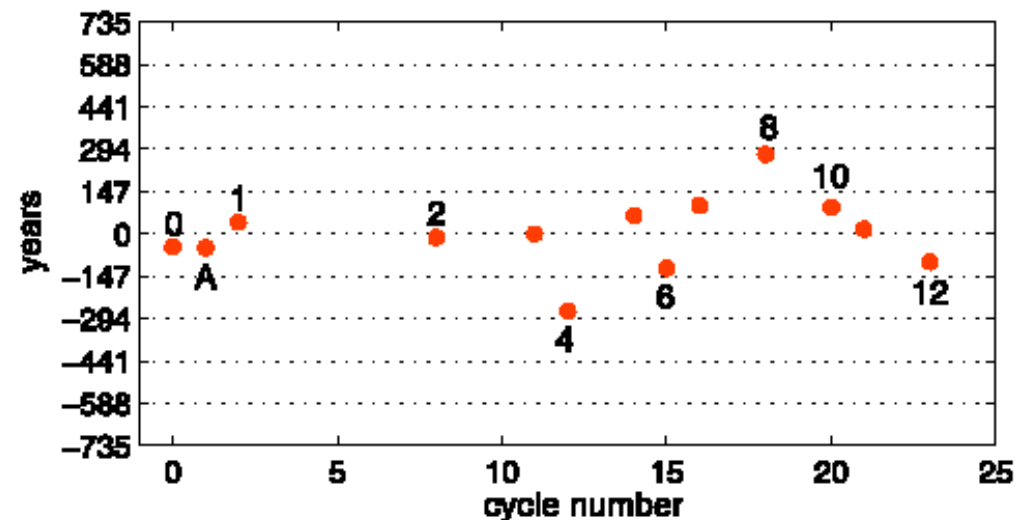
DOCに連動した風成塵の供給源変動は、偏西風経路の南北振動を反映している

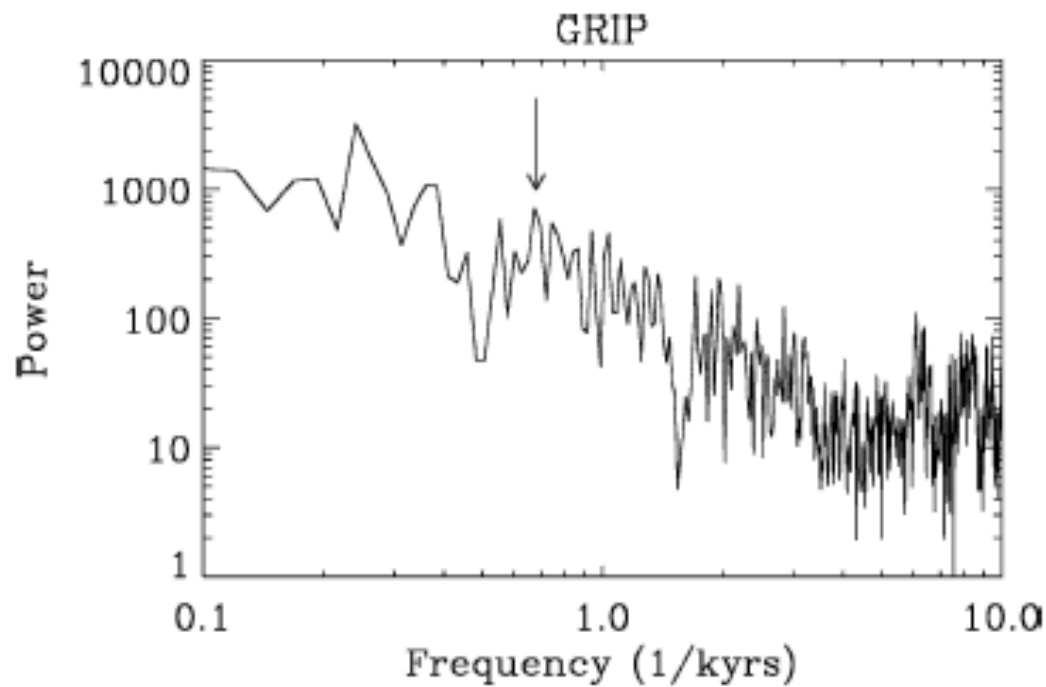


DOCには、1470年の周期が存在する？

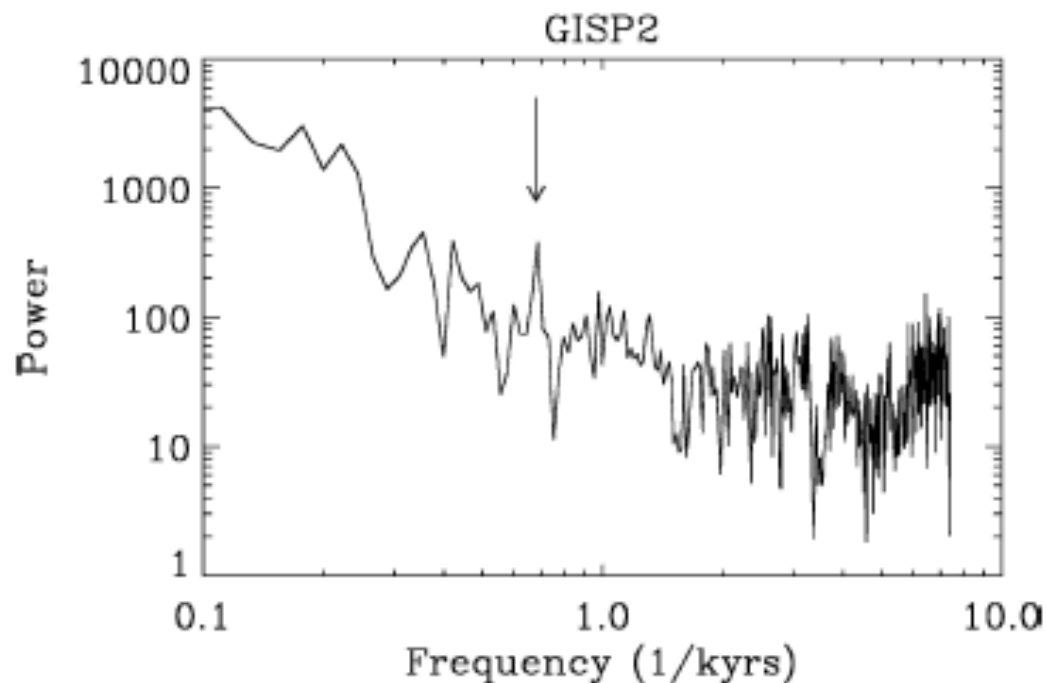


GISP 2のAge Modelに基づく。

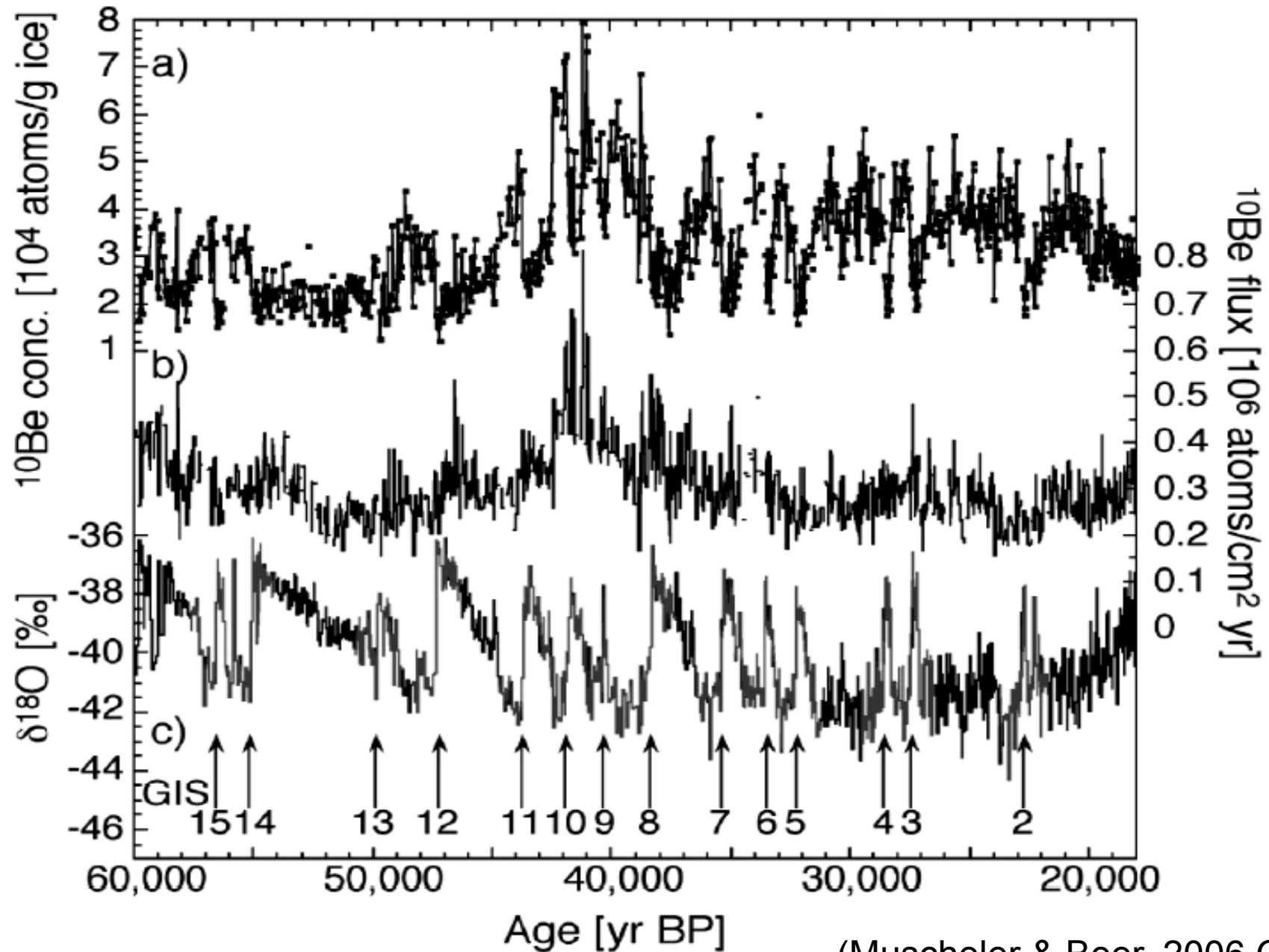




1470年周期は、GISP
2の年代モデルに
依存、GRIPの年代モ
デルに基づく、認め
られない。

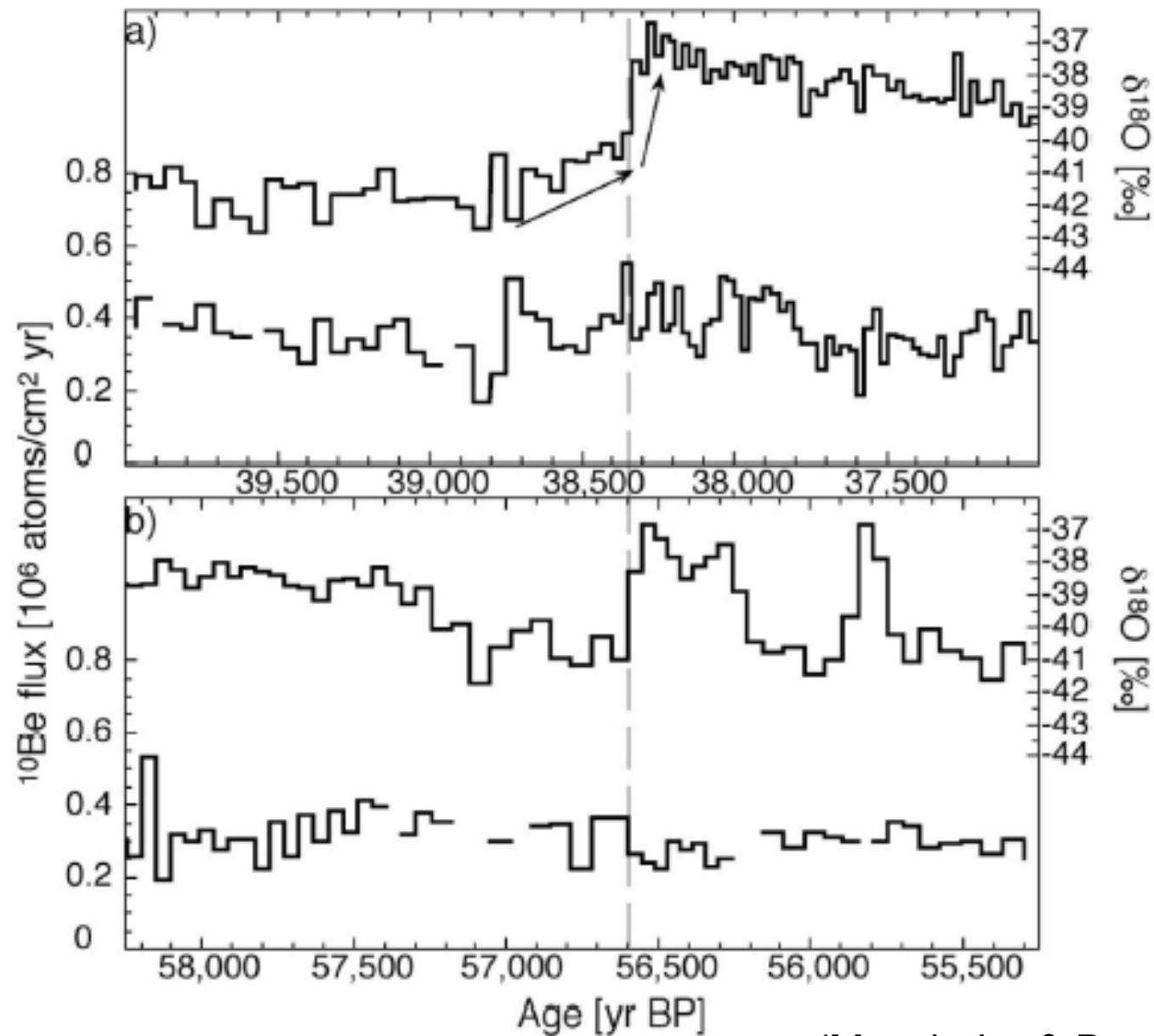


DOCと ^{10}Be フラックスの関係



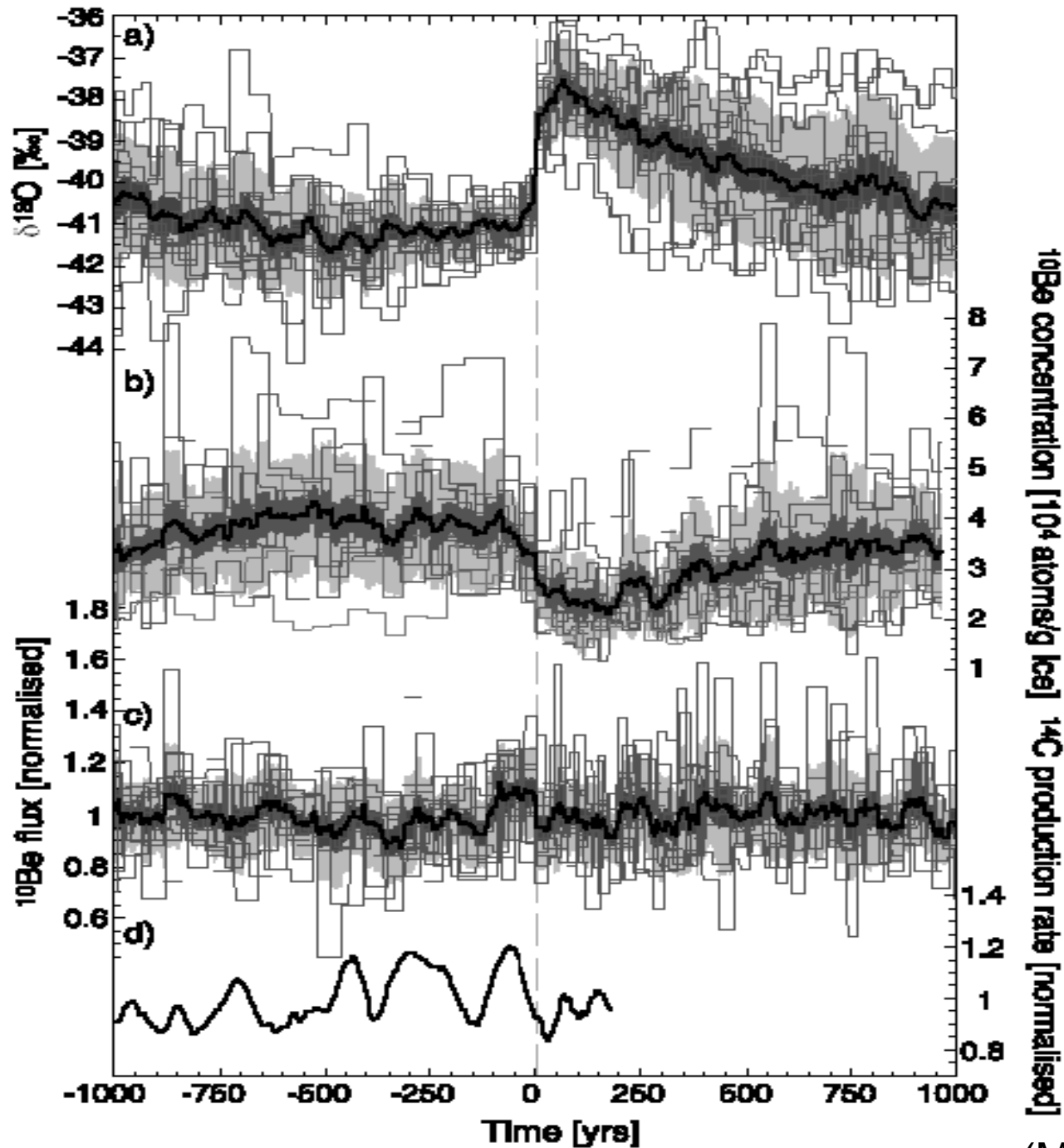
(Muscheler & Beer, 2006 GRL)

DOCイベント8, 15における ^{10}Be フラックス変化の有無



(Muscheler & Beer, 2006 GRL)

14のDOCイベント の重ね合わせ

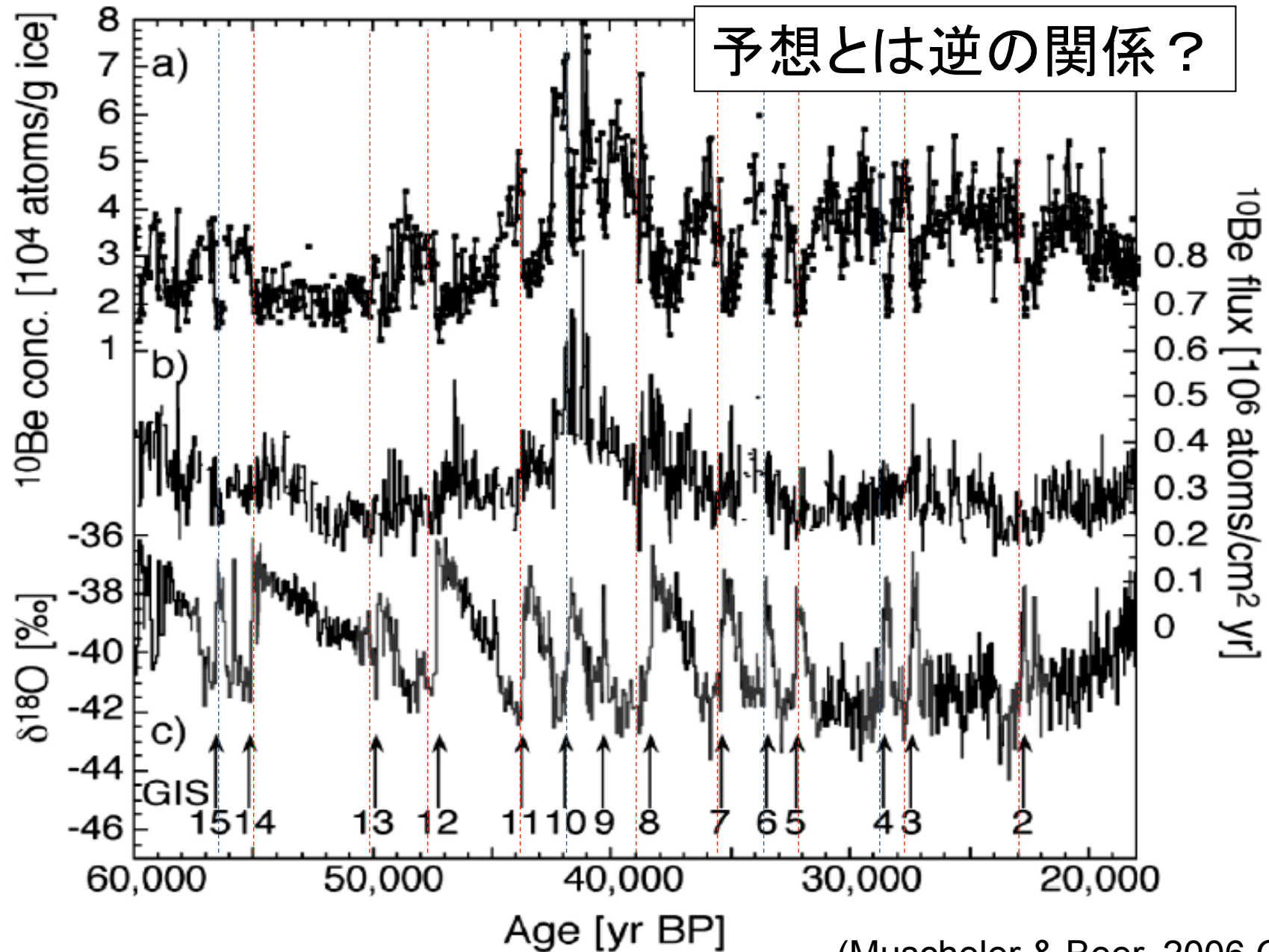


Muschelerらは、DOCと
太陽活動の関係は見ら
れないと結論。

しかし....

(Muscheler & Beer, 2006 GRL)

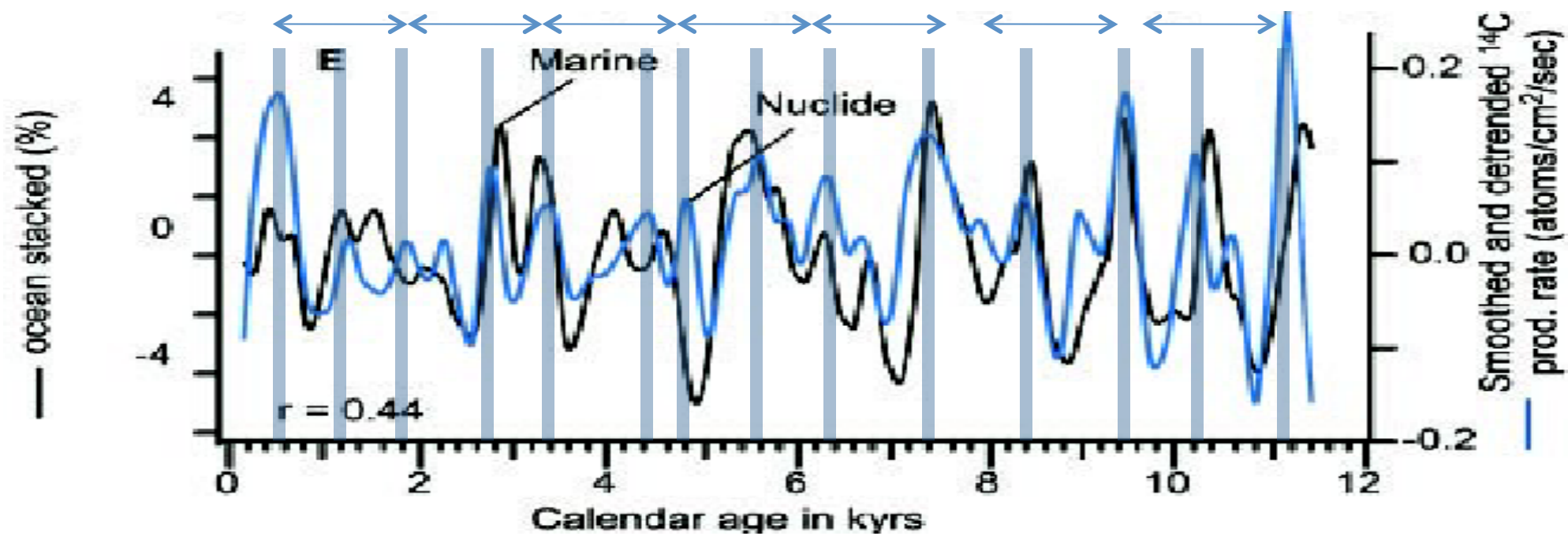
DOCの温暖化と ^{10}Be フラックス増加が関係？



(Muscheler & Beer, 2006 GRL)

まとめ

- MWPやLIAの気温変化は、グローバルに一様な温暖化、寒冷化というより、空間パターンの変化といった要素が強く、特にMWPに、ラニーニャ的パターンが見られる。また、NAO/AO +的パターンも見られる。
- 極域のダスト・フラックスは、太陽活動の影響を強く受けており、それはAO, AAOに関係した大気循環様式や強度変化を反映している可能性が高い。
- また、ITCZ, Monsoon, Westerly jetの変動と拘わっている可能性が高く、ca. 1500年周期の存在が示唆される。
- 最終氷期にも、類似した振動が、より大きい振幅で存在するが、それが、太陽活動と関係するかは不明である。(1500年周期のなぞ)



11-3. 気候変動と太陽活動変動

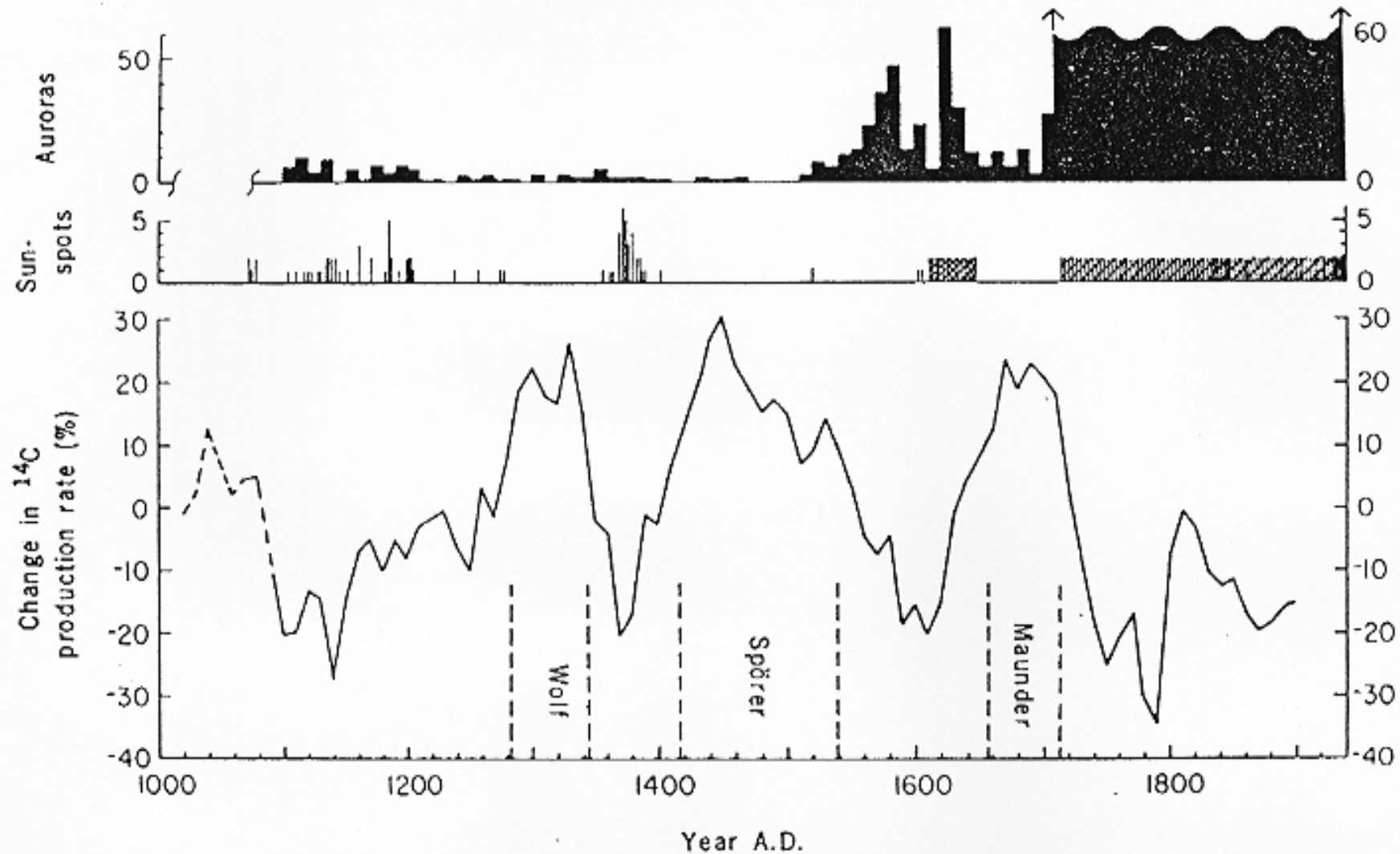
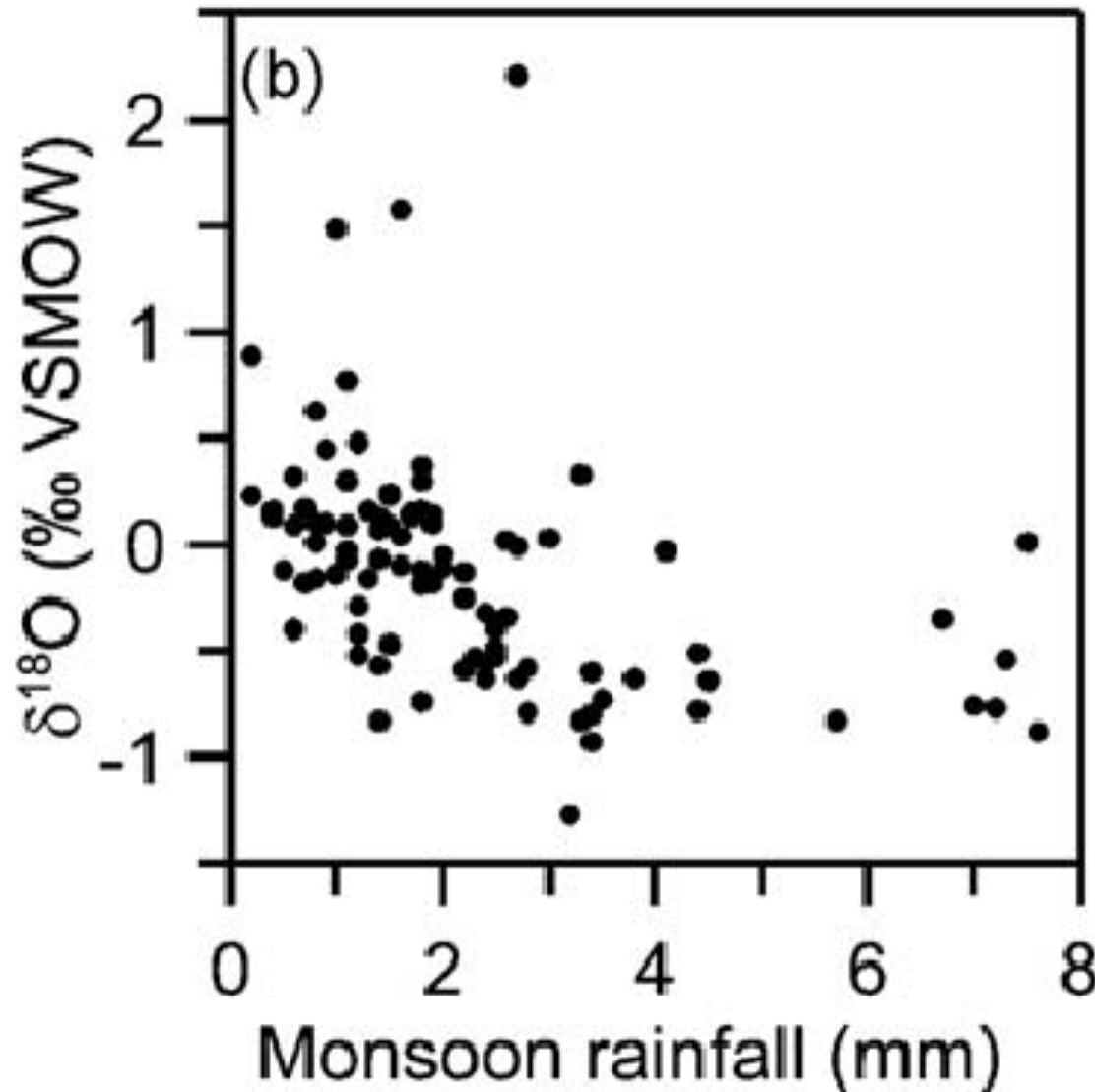


Fig. 8. Frequency of auroral observations (3) and sunspots (3, 32) and changes in ^{14}C production rate (ΔQ_M) calculated from the reservoir model, relative to the average 1000-1860 production level. The calculated ΔQ_M values are for a 60-year biospheric residence time. The number of naked-eye sunspot observations per decade before 1610 is given by the vertical bars. The cross-hatched area denotes the existence of sunspots, as observed by telescope.

(Stuiver and Quay, 1980)

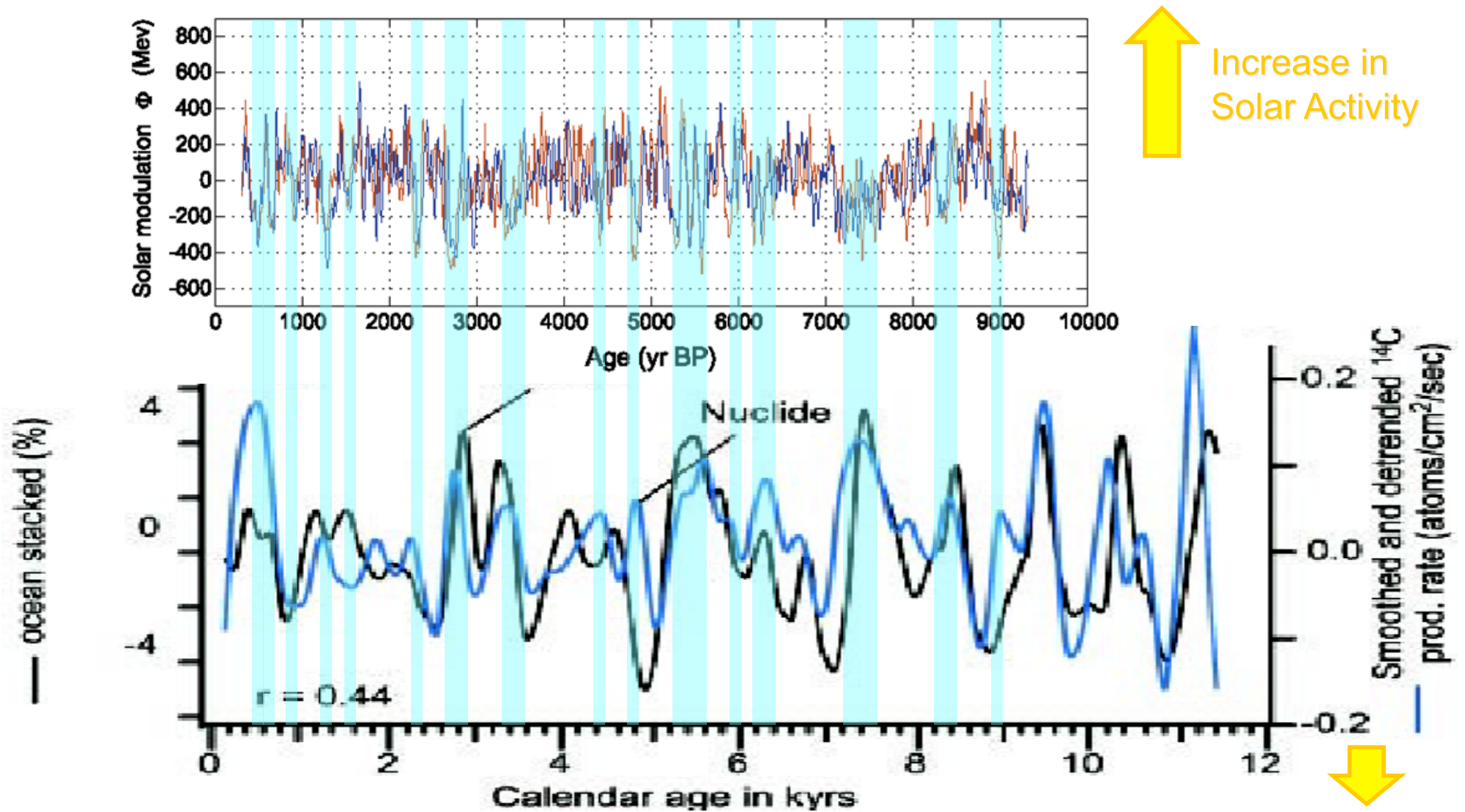
参考

オマーンにおける降水の $\delta^{18}\text{O}$ と 夏季モンスーン降水量の関係

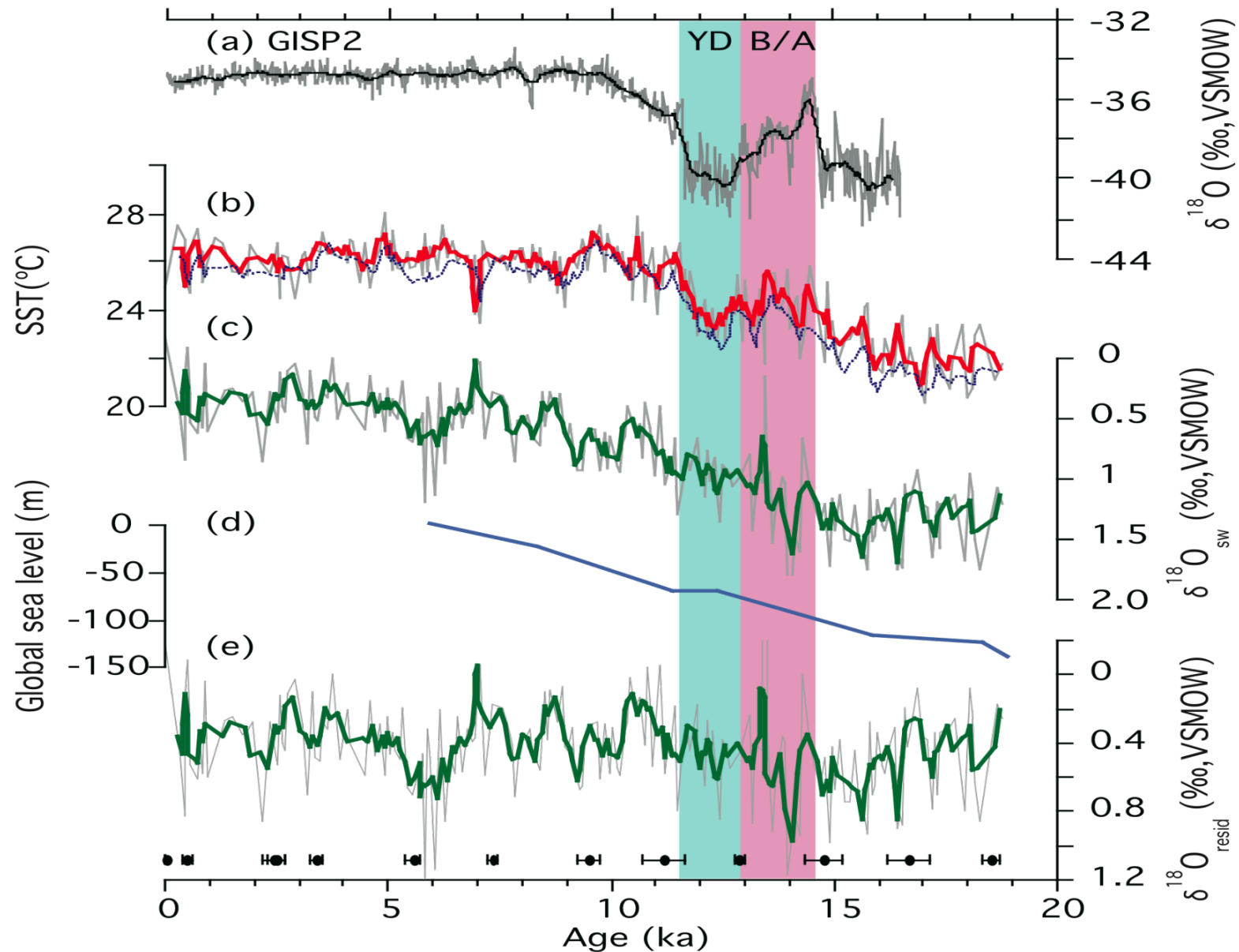


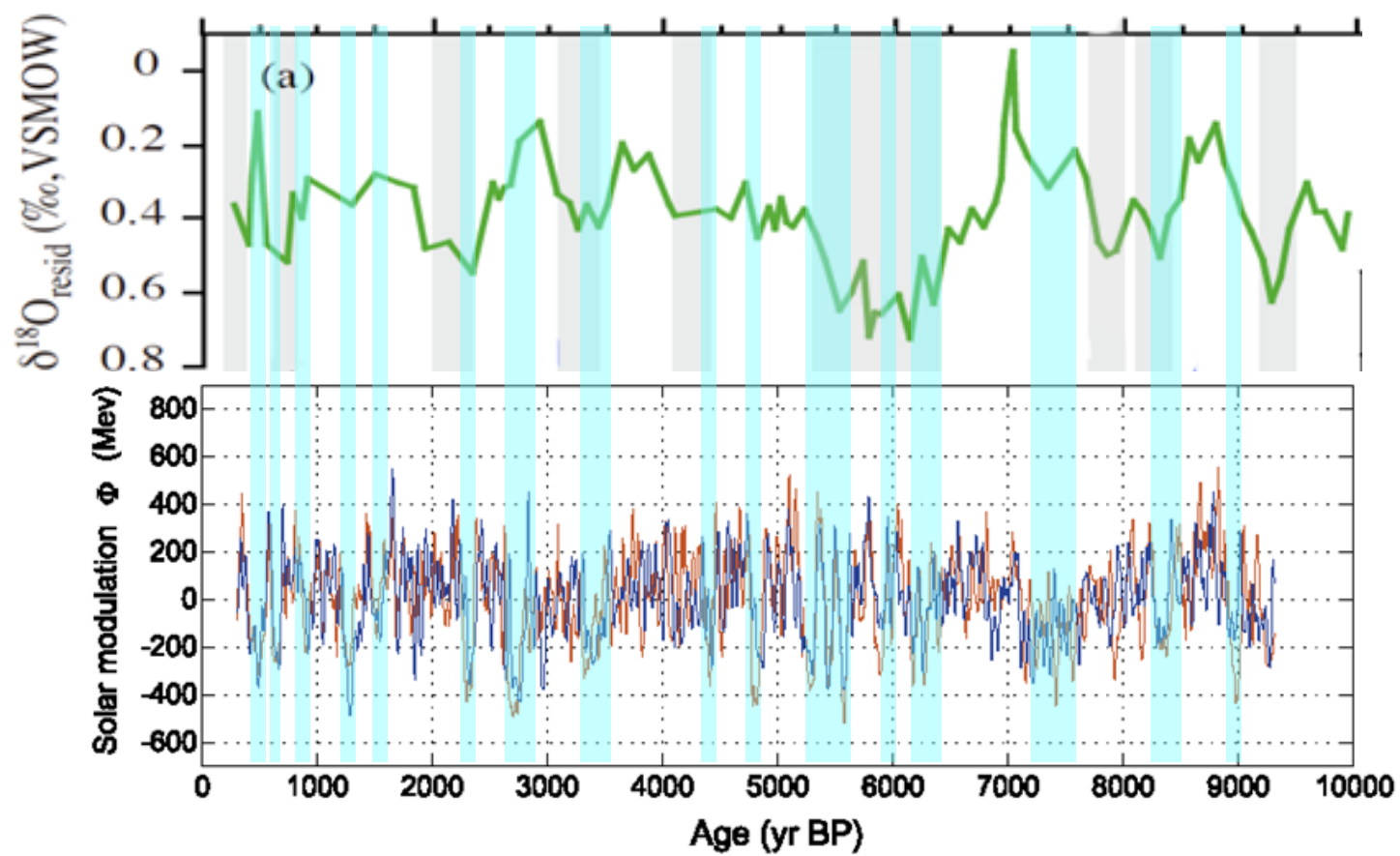
参考

太陽活動とIRD events



Mg/Ca-SST and $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ reconstruction in the northern part of East China Sea during deglaciation and the Holocene





↑ Increase in Solar Activity

参考文献

Mann et al., 2009: Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly., Science, Volume 326, Issue 5957, pp. 1256

Cook et al., 2004: Long-Term Aridity Changes in the Western United States., Science, Volume 306, Issue 5698, pp. 1015-1018

Trouet et al., 2009: Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly., Science, Volume 324, Issue 5923, pp. 78

Donarummo et al., 2002: Sun/dust correlations and volcanic interference., Geophysical Research Letters, Volume 29, Issue 9, pp. 75

Ram and Stolz, 1999: Possible solar influences on the dust profile of the GISP2 ice core from Central Greenland., Geophysical Research Letters, Volume 26, Issue 8, pp. 1043-1046

Mayewski et al., 2005: Solar forcing of the polar atmosphere., Annals of Glaciology, Volume 41, Issue 1, p.147-154

Delmonte et al., 2005: Ice core evidence for secular variability and 200-year dipolar oscillations in atmospheric circulation over East Antarctica during the Holocene., *Climate Dynamics*, Volume 24, Issue 6, pp.641-654

Fleitmann and Matter, 2009: The speleothem record of climate variability in Southern Arabia., *Comptes Rendus Geoscience*, Volume. 341, issue. 8-9, pp. 633-642

Fleitmann et al., 2004: Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope, *Quaternary Science Reviews*, Volume 23, issue 7-8, pp. 935-945

Neff et al., 2001: Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6kyr ago, *Nature*, Volume 411, Issue 6835, pp. 290-293

Bond et al., 1997: A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates, *Science*, Volume 278, Issue 5341, pp. 1257

Skinner et al., 1999: Simultaneous Radio and X-Ray Observations of the Wolf-Rayet Star WR 147, *The Astrophysical Journal*, Volume 524, Issue 1, pp. 394-405

Bond et al., 2001 Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene, Science, Volume 294, pp.2130

Levitus and Boyer, 1994: Interannual Variability of Temperature at a Depth of 125 Meters in the North Atlantic Ocean, Science, Volume 266, Issue 5182, pp. 96-99

Martinson et al., 1987: Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy, Quaternary Research, Volume 27, issue 1, pp. 1-29

Dansgaard et al., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, Nature, Volume 364, no. 6434, pp. 218-220

Maslin et al ., 1995: Surface water temperature, salinity, and density changes in the northeast Atlantic during the last 45,000 years: Heinrich events, deep water formation, and climatic rebounds, Paleoceanography, Volume 10, Issue 3, pp. 527-544

Bond et al., 1993: Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice, Nature, Volume 365, Issue 6442, pp. 143-147

Bond and Lotti, 1995: Iceberg Discharges Into the North Atlantic on Millennial Time Scales During the Last Glaciation, Science, Volume 267, Issue 5200, pp. 1005-1010

Rahmstorf, 2003: Timing of abrupt climate change: A precise clock, Geophysical Research Letters, Volume 30, Issue 10, pp. 17

Ditlevsen et al., 2005: The Recurrence Time of Dansgaard-Oeschger Events and Limits on the Possible Periodic Component, Journal of Climate, vol. 18, Issue 14, pp.2594-2603

Muscheler and Beer, 2006: Solar forced Dansgaard/Oeschger events?, Geophysical Research Letters, Volume 33, Issue 20

Stuiver and Qua, 1980: Changes in atmospheric Carbon-14 attributed to a variable sun, Science, Volume. 207, pp. 11-19

Fleitmann and Matter, 2009: The speleothem record of climate variability in Southern Arabia, Comptes Rendus Geoscience, Volume 341, issue. 8-9, pp. 633-642