

# 中世の温暖期と近世の小氷期における 太陽活動と気候変動

— 樹木年輪中の炭素同位体の分析から —

宮原 ひろ子

東京大学 宇宙線研究所

[hmiya@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:hmiya@icrr.u-tokyo.ac.jp)

*~7000 year old cedar tree*

# topics

## ◇ Introduction

太陽活動は気候に作用するのか？

太陽活動の長期変動と小氷期

太陽活動、太陽黒点数、宇宙線の11年変動

## ◇ Measurements and Results

樹木年輪中の炭素14濃度測定による太陽活動の復元

太陽活動11年周期の変遷と気候変動への影響 — 小氷期と中世温暖期を例に —

## ◇ Appendix

太陽活動度の長期変動を正確に理解するために

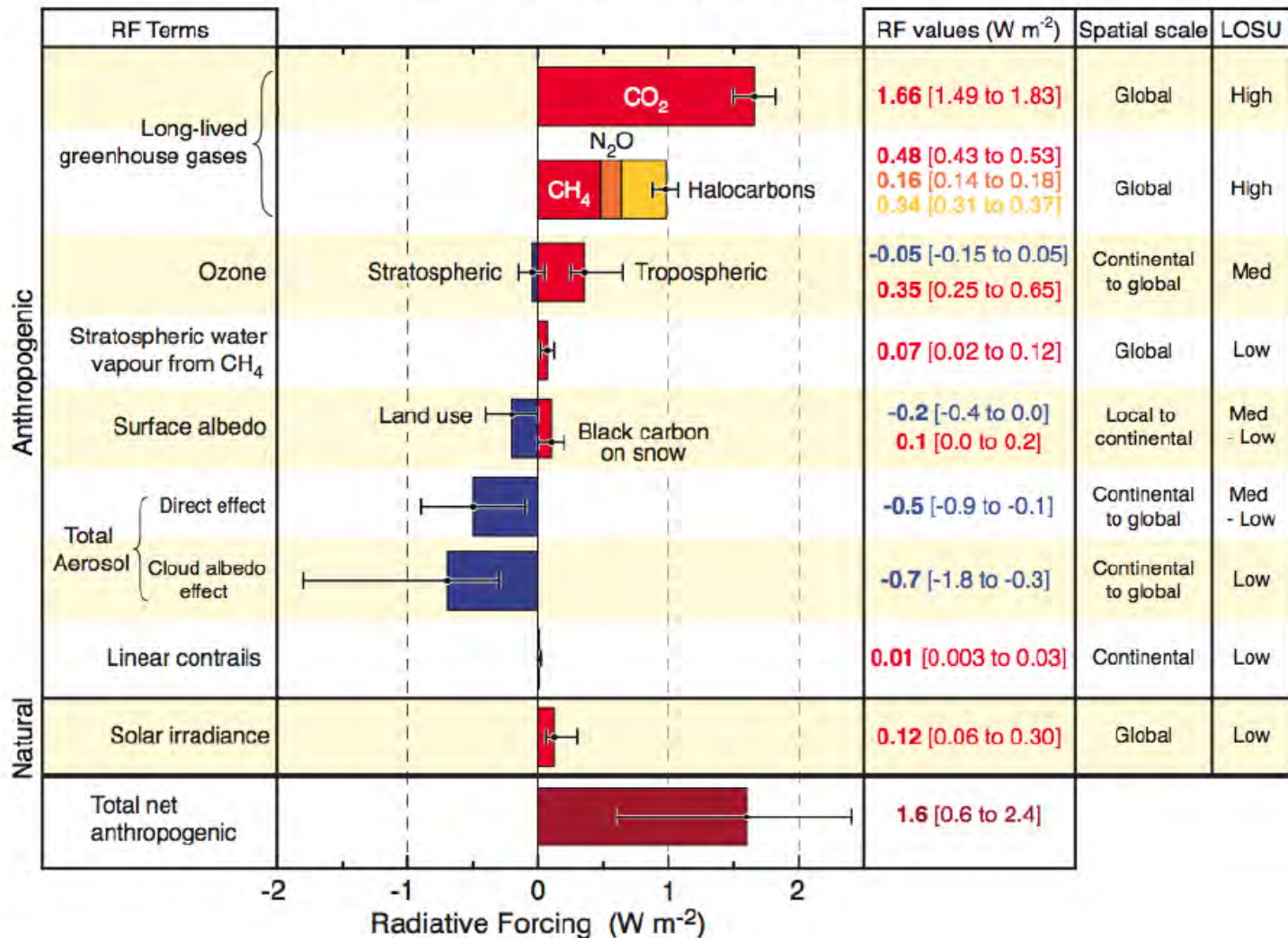
日射量の可変性を正確に理解するために

太陽活動の予測に向けて

# 太陽活動は気候に作用するのか？

IPCC第4次報告書(2007年)より

## Radiative Forcing Components



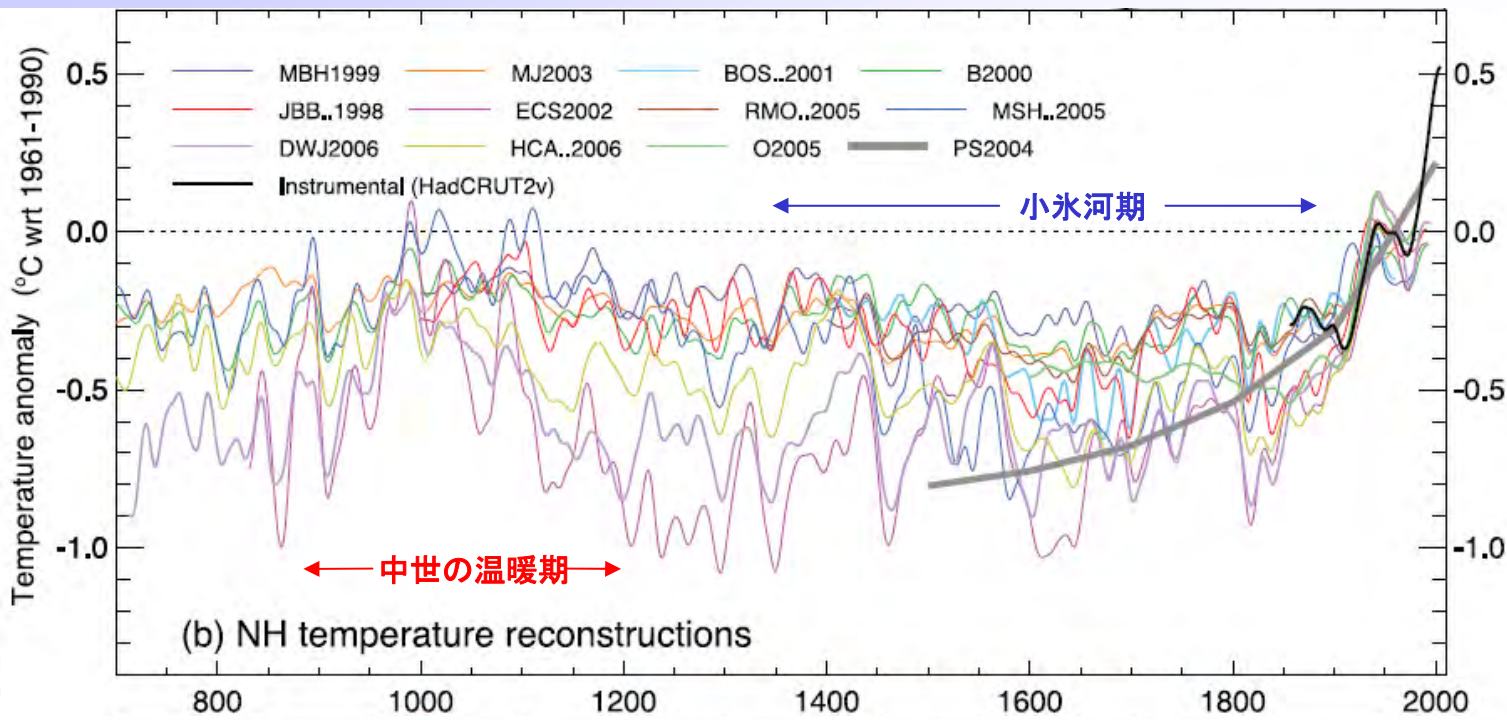
※ただし、1750AD以降の日射量変動分しか含まれていない

# 気候変動に見られる周期 (赤枠: 太陽周期と近似しているもの)

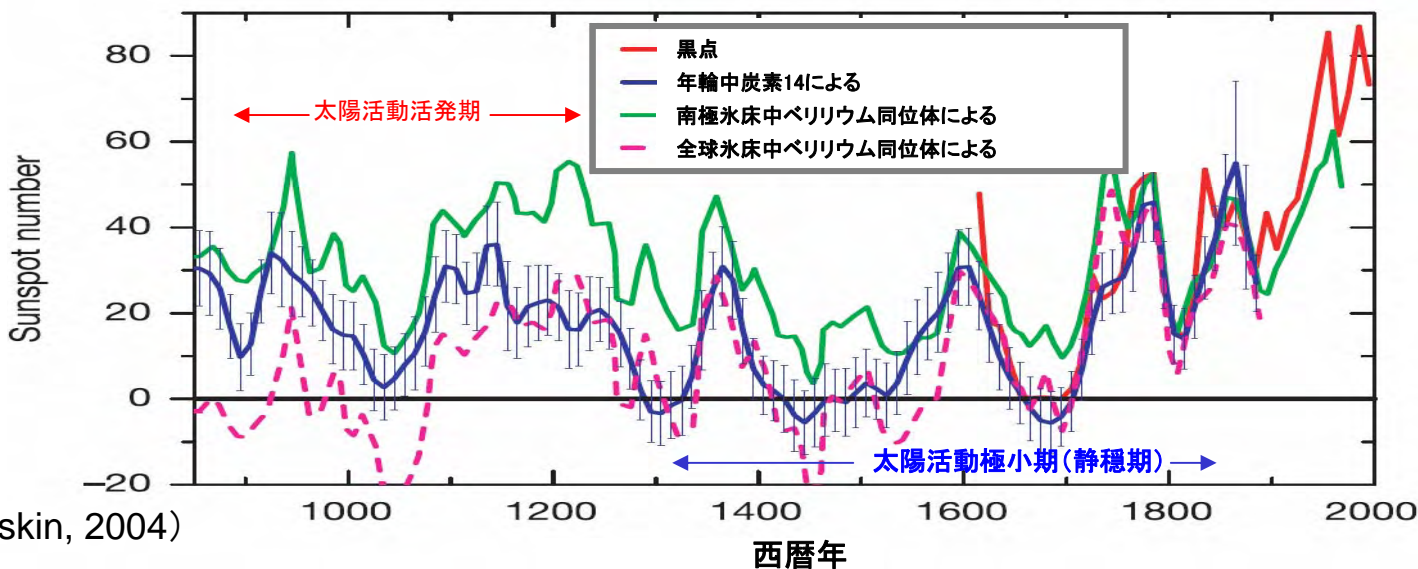
From Hoyt and Schatten, 1998  
The role of the Sun in Climate Change

<i>Cycle Length</i>	<i>Parameter(s)</i>	<i>Cycle Length</i>	<i>Parameter(s)</i>
6.6456 days	Temperature	11 years	Many
6-7 days	Temperature	11-12 years	Many
7 days	Precipitation	13 years	Thunderstorm frequency
25 days	Temperature/pressure	18 years	Norwegian glaciers
27 days	Many	20 years	Temperature
28 days	Halos	21 years	Thunderstorm frequency
5 months	Temperature	22 years	Many
9 months	Several	22.75 years	Many
355 days	Cyclogenesis	23 years	Several
2.5 years	Many	46 years	Climate
3 years	Pacific cycle	50 years	Varves
3.2 years	Climate	80 years	Interdiurnal temperature
5.25 years	Climate	89 years	Budapest climate
5.6 years	Climate	92 years	Climate
7 years	Pacific cycle	100 years	Climate
8 years	Thunderstorm frequency	300 years	Climate
		334 years	Climate

# 過去1200年間における気温変化と太陽活動



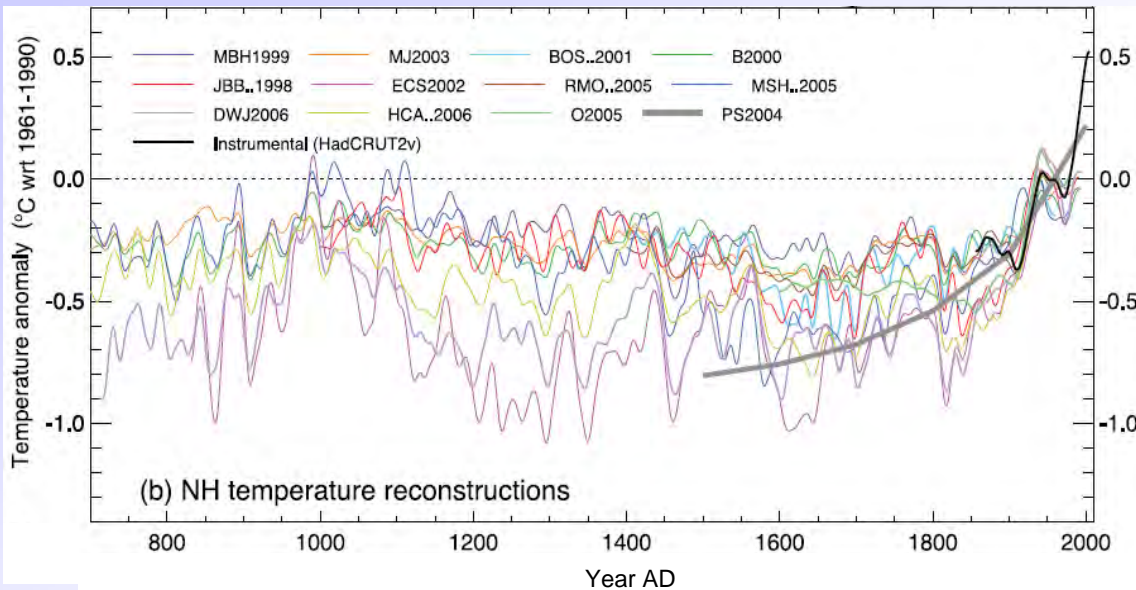
(IPCC2007より)



炭素14は太陽活動の指標であるが、気温との相関が良いため、歴史的に気温の指標として用いられていたこともある

(Usoskin, 2004)

# 日本における中世温暖期と小氷期

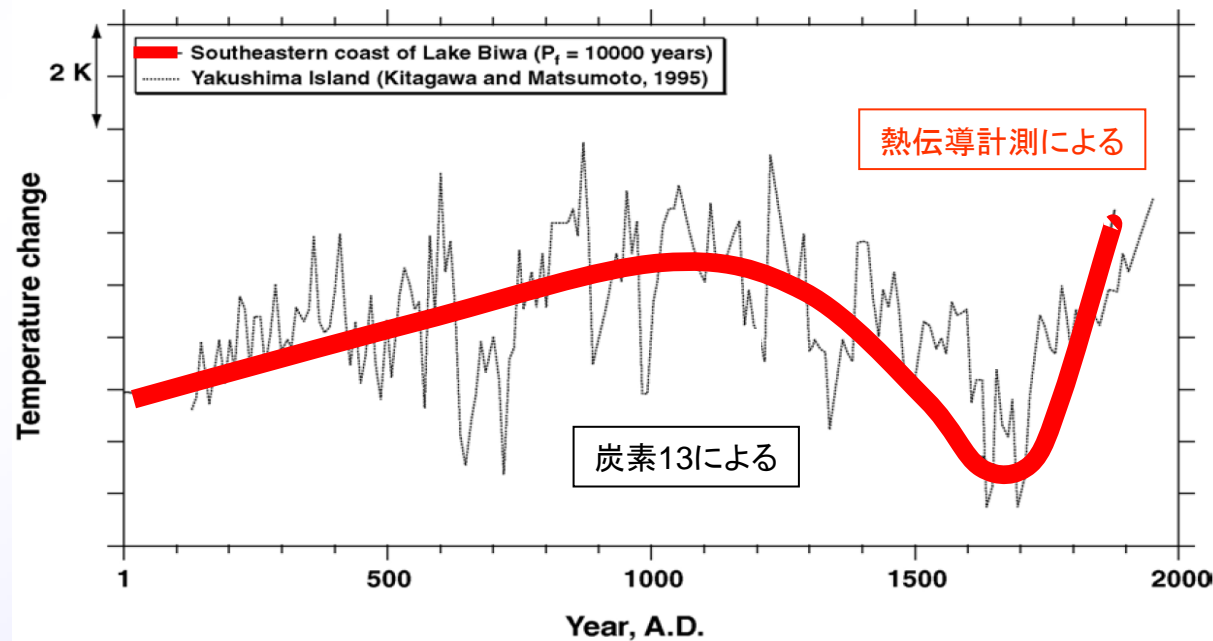


←北半球の気温  
(IPCC 2007より)

日本のローカルな気温の復元値⇒

屋久杉年輪中炭素13による気温復元値  
(Kitagawa and Matsumoto, 1995)

琵琶湖沿岸の熱伝導計測による気温復元値  
(Goto et al., 2005)



# 気候の十年変動を駆動しているのは何か？

日射量, 紫外線

0.1%

3%

銀河宇宙線

15%

あるいは  
気候システムの内的要因

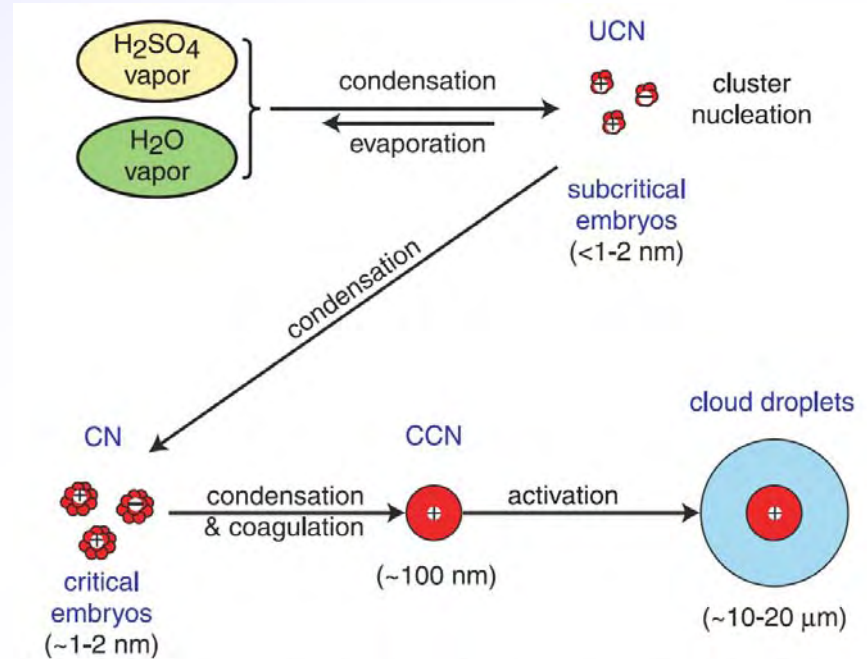
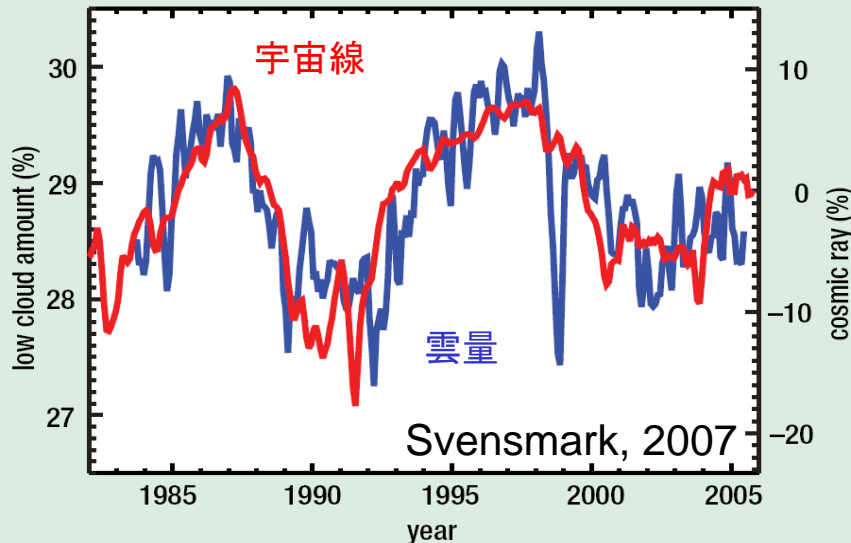
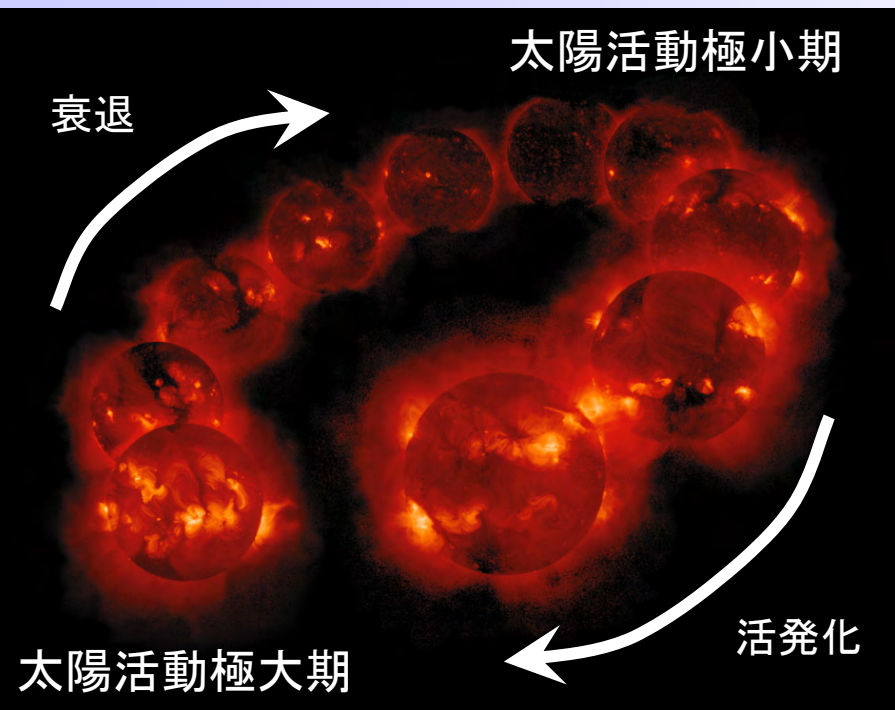


Fig. 3. An "ion-aerosol clear-air" mechanism proposed to link variations in cosmic ray intensity with cloudiness. The diagram shows the ion-catalyzed nucleation of new ultrafine condensation nuclei (UCN) from trace condensable vapors in the atmosphere, which may then grow into new cloud condensation nuclei (CCN).

銀河宇宙線(宇宙から飛来する荷電粒子)

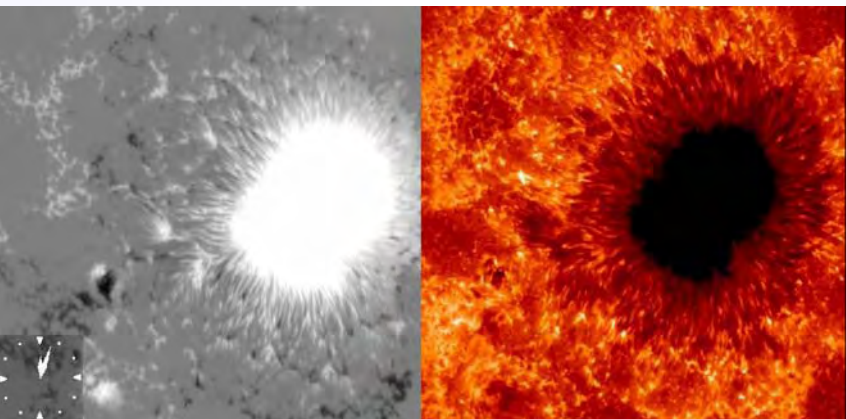
【大気をイオン化し、雲凝結核の生成を促進する】という間接的な影響を持つと考えられているが、  
詳細なメカニズムはまだ解明されていない

# 太陽活動の11年周期

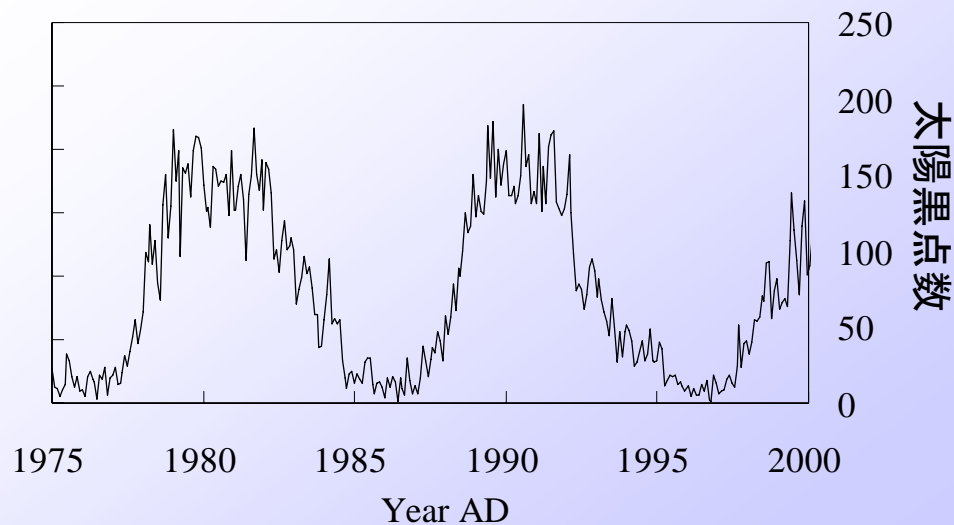
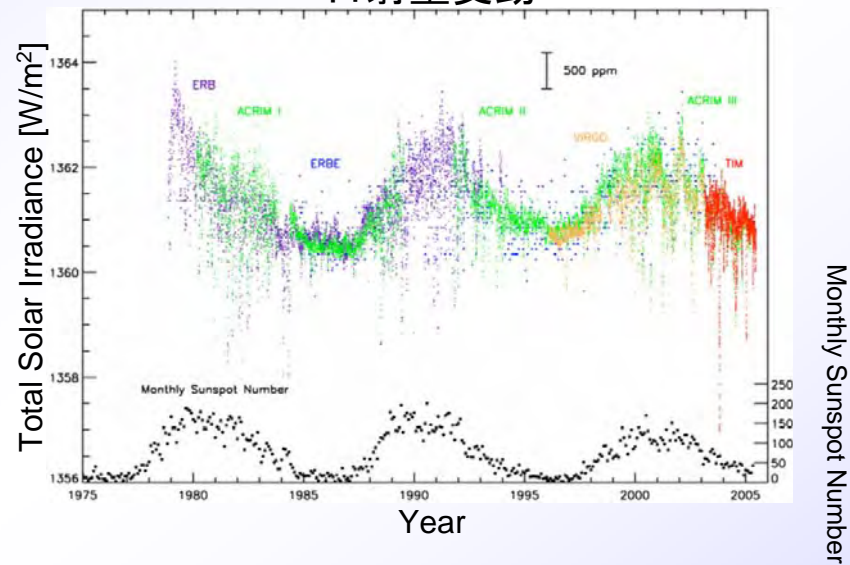


ようこう衛星による太陽のX線画像

ひので衛星がとらえた巨大黒点



ACRIM TSI composite  
日射量変動

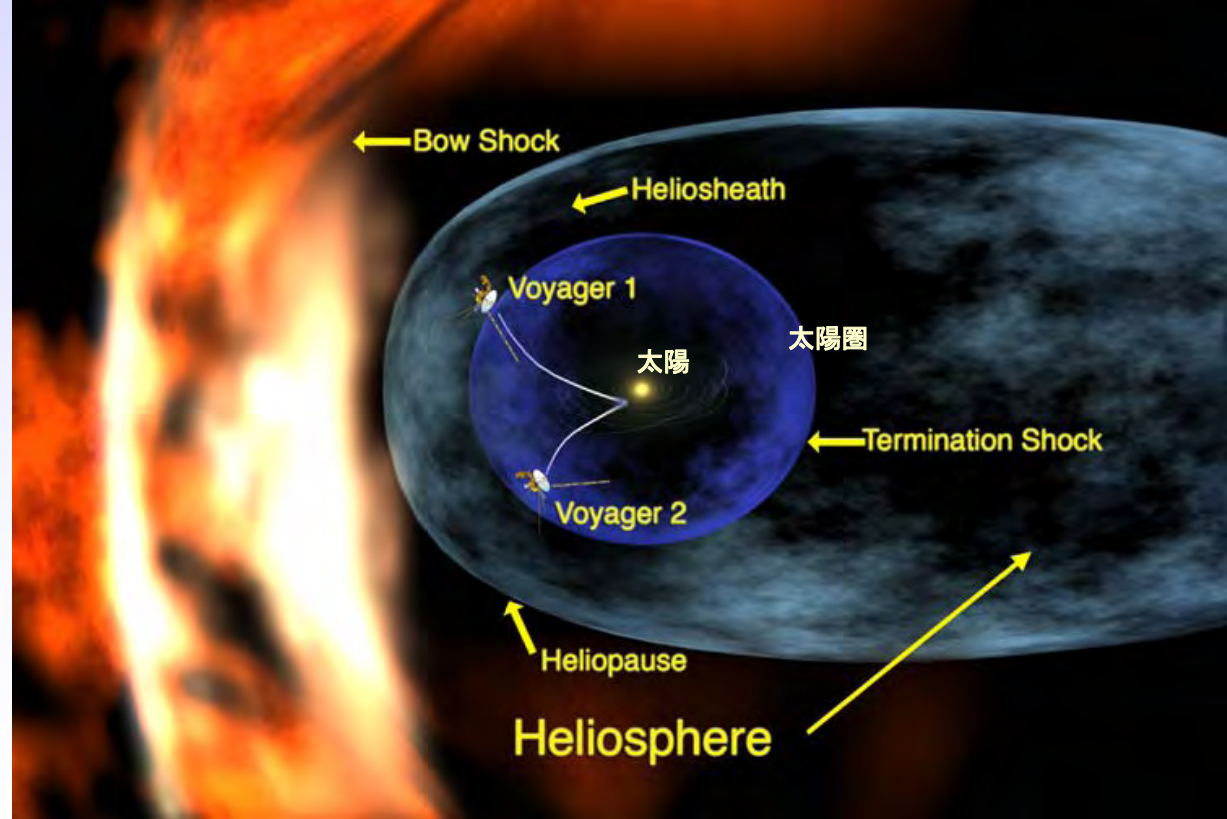
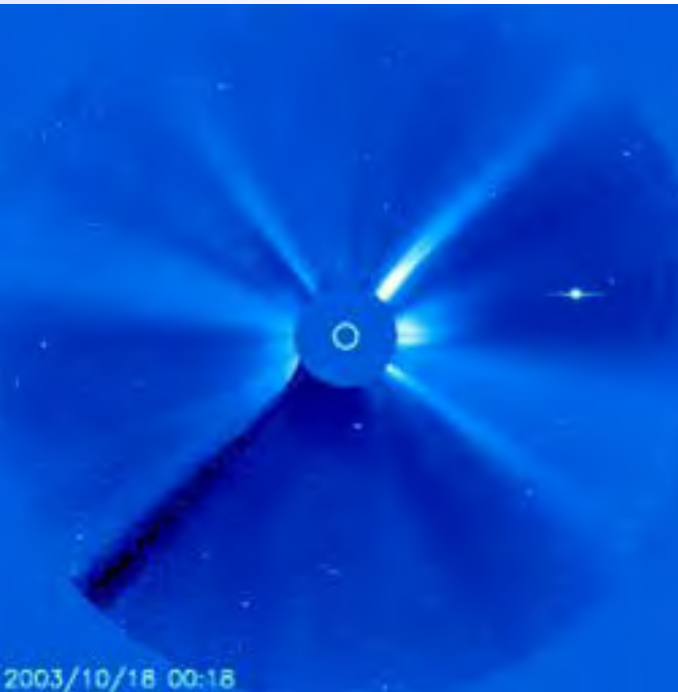




# 太陽圏

太陽から噴き出した  
磁場とプラズマの風の  
ひろがり

↓コロナグラフでみた太陽風



太陽圏の磁場は宇宙を飛びかう放射線(荷電粒子)から地球を防護する役割を果たしている。

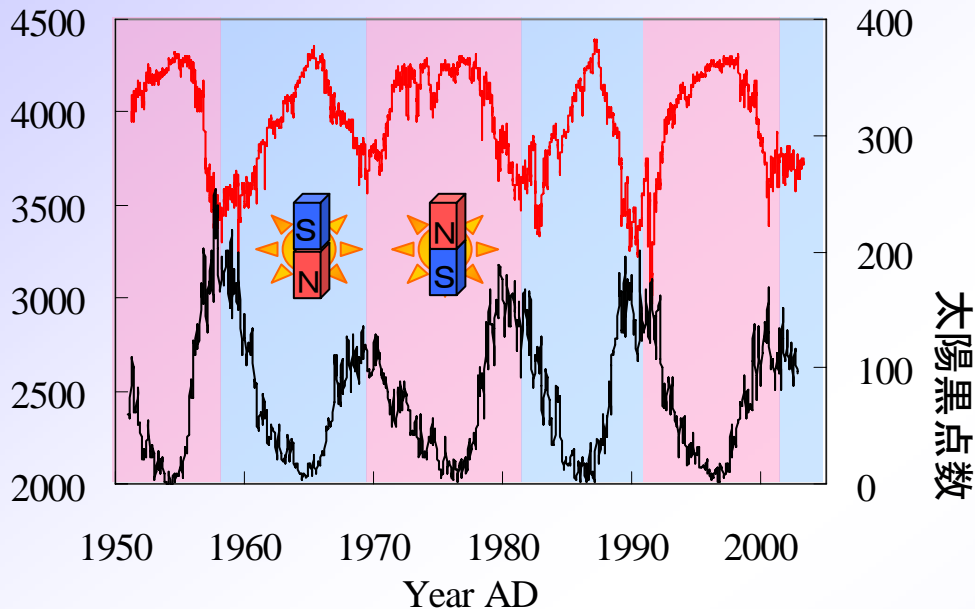
しかし、そのバリアの強度は、太陽活動度に依存して変化する

⇒ 地球に飛来する宇宙線は時間とともに変化する  
(たとえば太陽の11年周期変動にともなう増減)

# 日射量変動と根本的に異なる宇宙線量の振る舞い … 太陽の磁場の影響

地球に飛来する  
宇宙線量

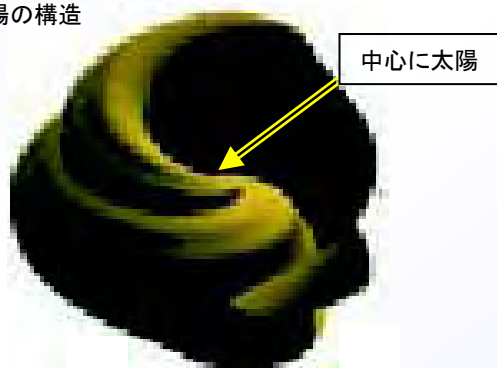
## 黒点数と宇宙線量



太陽は双極子磁場を持ち、  
11年に一度、黒点数の極大で  
正⇒負、あるいは負⇒正に反転する

太陽活動度、日射量、黒点数には  
11年周期しか見られないが、  
太陽磁場の向きと宇宙線変動には  
22年周期が見られる

### 太陽圏磁場の構造



太陽圏の磁場は複雑な構造をしているため、  
太陽の双極子磁場の向きが上向きの時と下向きの時では  
宇宙から飛来する荷電粒子(宇宙線)に対する遮蔽効果が変わってくる

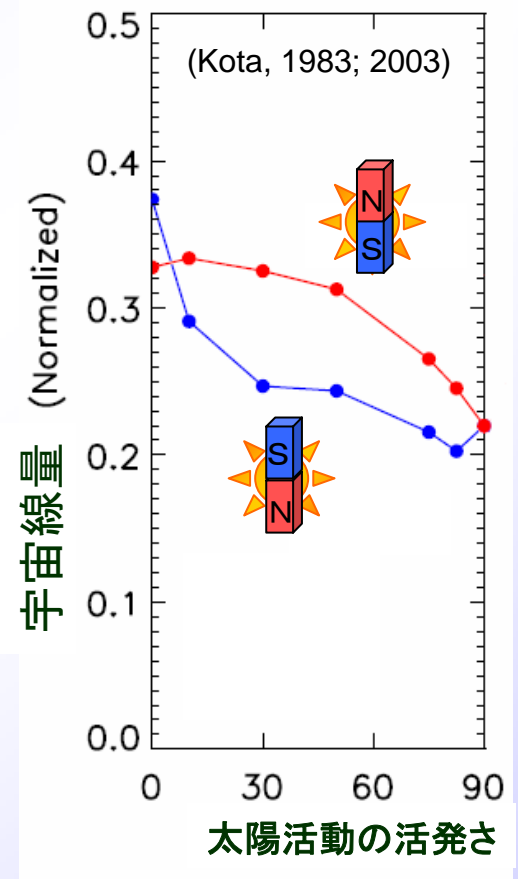
そのため、地球に飛来する宇宙線の量には  
11年周期に加えて22年周期(太陽磁場の反転の周期)も見られる

大きさ: 100AU (天文単位)

1AUは、太陽から地球までの距離

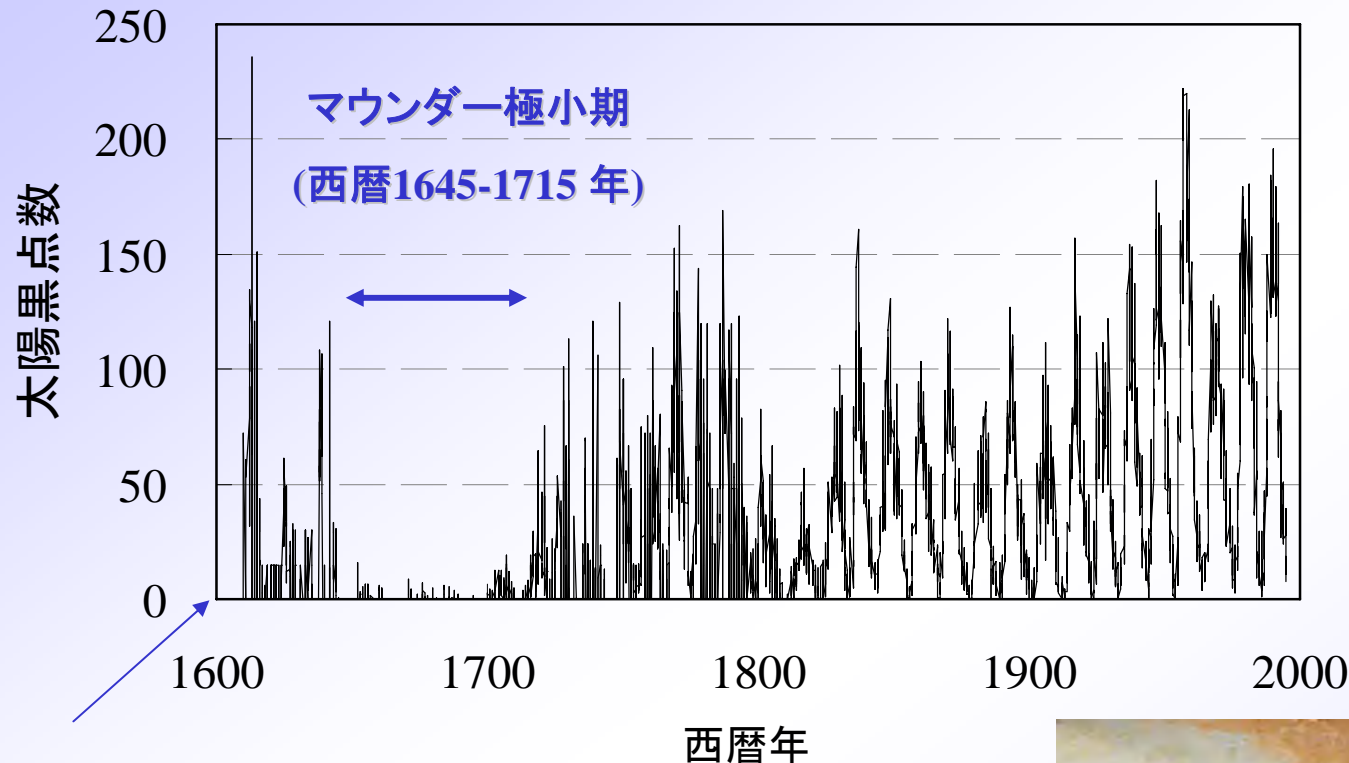
太陽圏の磁場の形 & 太陽の磁場の向き が宇宙線の来やすさに与える影響

	太陽の磁石が上向き	太陽の磁石が下向き
太陽活動が静穏なとき	<p>太陽圏磁場 100AU</p>	<p>太陽圏磁場 100AU</p>
太陽活動が活発なとき	<p>太陽圏磁場 100AU</p>	<p>太陽圏磁場 100AU</p>



太陽活動が静穏なほど宇宙線は来やすい。太陽の磁石が上向きの方が宇宙線は来やすい。

# 太陽黒点数の長期変動とマウンダー極小期



太陽活動の  
長期変動周期

~88年周期  
~208年周期

テムズ川が凍ったとされる  
小氷期の絵画

望遠鏡の発明

マウンダー極小期のような黒点の消失は過去に度々発生していたことが年輪中炭素14により明らかになっている

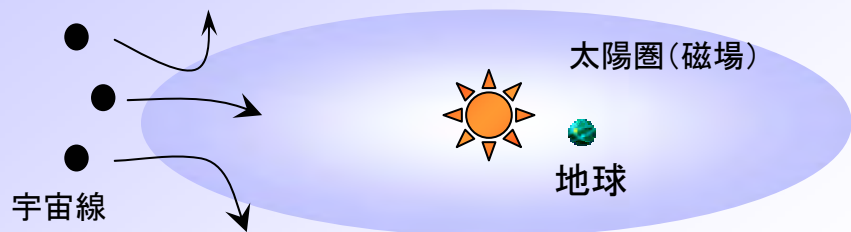
たとえば

シュペラー極小期 (西暦1416-1534年)  
ウォルフ極小期 (西暦1282-1342年) など

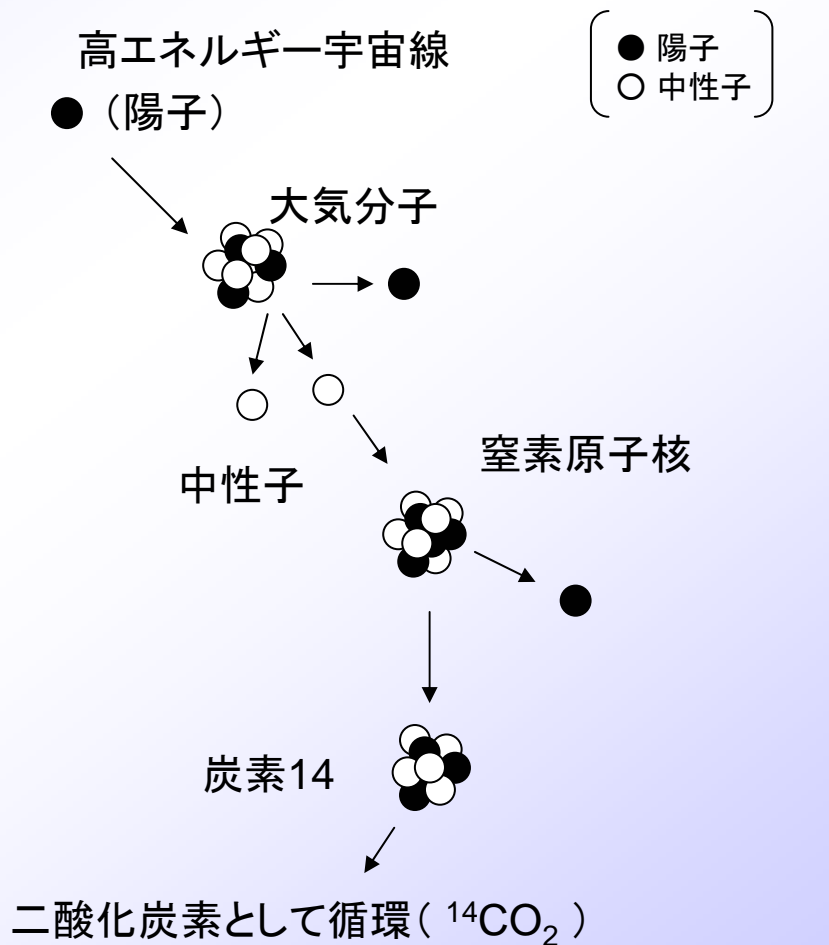


# 太陽活動の復元方法 (炭素14を指標とする手法)

(a) 太陽圏(太陽の磁場が広がる空間)が宇宙を飛びかう高エネルギー粒子をさえぎる

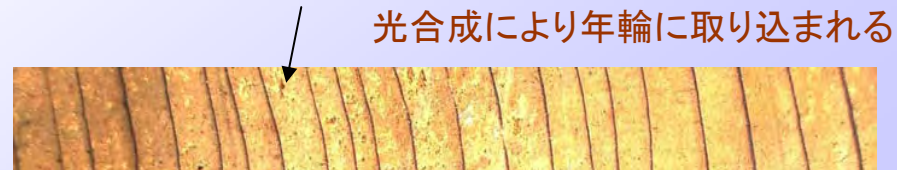


(b) 宇宙線によって炭素14が生成される



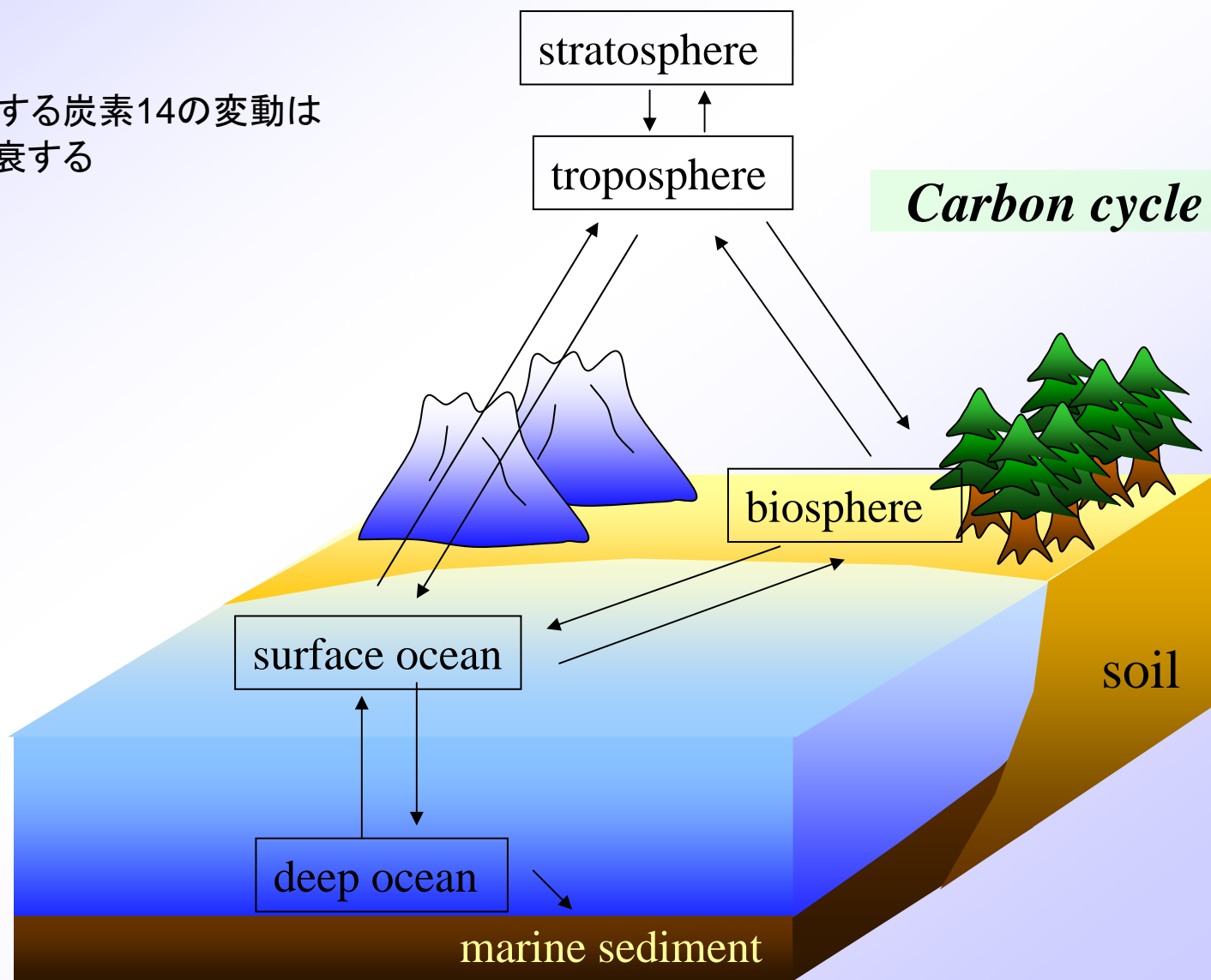
## 太陽活動が活発化

- ⇒ 太陽(圏)の磁場が宇宙線をバリア
- ⇒ 地球に飛んでくる宇宙線(陽子)量が減少
- ⇒ 宇宙線(陽子)が作る炭素14の量が減少
- ⇒ 樹木年輪に取り込まれる炭素14の濃度が減少



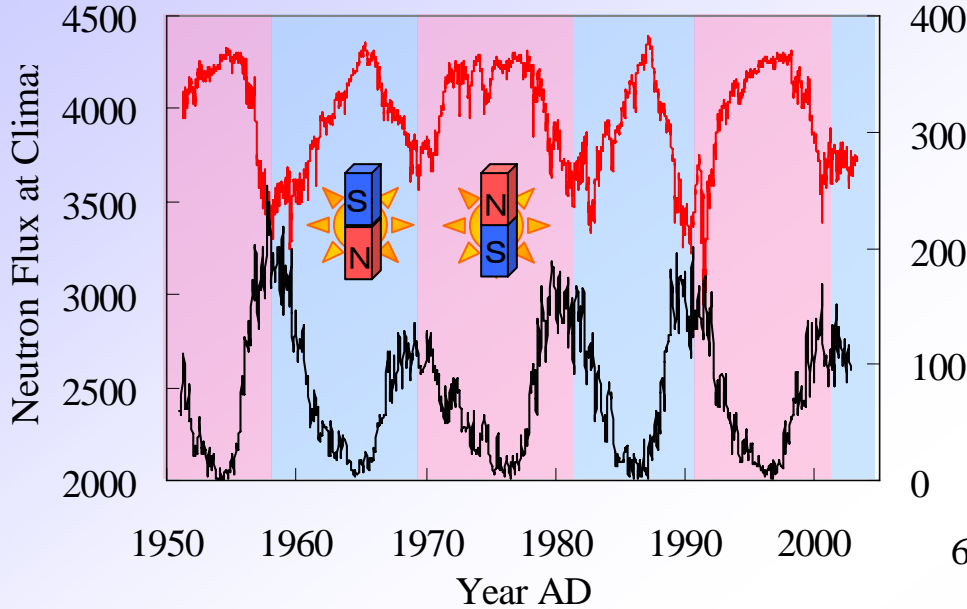
# 炭素14の循環

宇宙線の変動に起因する炭素14の変動は  
炭素循環のなかで減衰する



# 黒点数⇒宇宙線量⇒年輪中炭素14

## 黒点数と宇宙線量



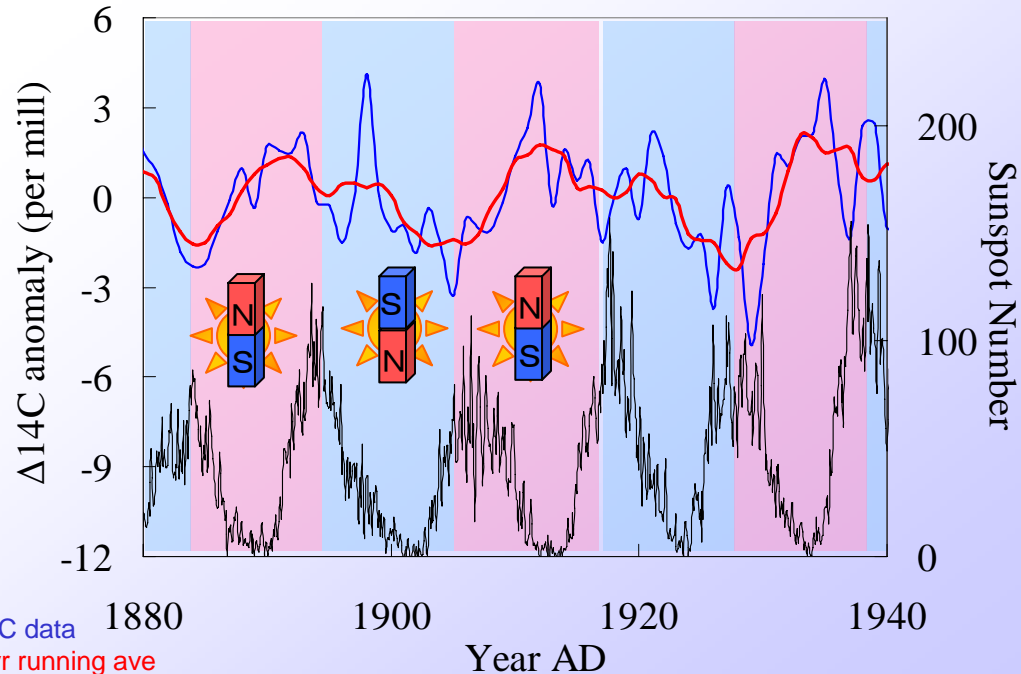
年輪中炭素14濃度を測定すると太陽活動の変動の周期性を復元することができる。

しかし、濃度自体は活動度レベルの正確な指標とはならない。

ただし、周期長が太陽活動度の指標として使える可能性がある。

## 黒点数と炭素14濃度

(大気循環による3年のタイムラグ補正済み)



太陽活動活発(黒点数増)  
=  $^{14}\text{C}$ 濃度低下

太陽活動静穏(黒点数減)  
=  $^{14}\text{C}$ 濃度上昇

Blue :  $^{14}\text{C}$  data  
Red : 3-yr running ave

樹木年輪中の炭素14濃度を1年ごとに測定し、  
黒点数のデータの無い中世の太陽活動活発期やマウンダー極小期  
における太陽活動周期(～11年周期)、磁場反転周期(～22年周期)  
の特徴を明らかにすれば、  
太陽活動と気候変動の関係性とそのメカニズムを過去にさかのぼって  
調べることができる

- ◇ 太陽活動の11年周期は本当に気候に影響するのか？
- ◇ 太陽活動と気候変動を媒介しているものは何なのか？  
日射量？ 宇宙線？ あるいは・・・？



# 炭素14濃度測定法

# 年輪の剥離から炭素14濃度測定まで

## 1. 年輪の絶対年代の決定

年輪数のカウント

核実験による炭素14濃度のピーク(西暦1964年)の検出

年輪幅パターンによる年代決定

## 2. 年輪の剥離

## 3. セルロース抽出 (年輪間を移動しない成分)

酸、アルカリによる洗浄

亜塩素酸ナトリウムによる漂白

## 4. セルロース試料からグラファイトを合成

セルロース燃焼 ⇒ 二酸化炭素 ⇒ 水素還元 ⇒ グラファイト

## 5. グラファイト中の炭素14濃度を測定

加速器質量分析計による高精度分析 (東大、名古屋大ほか所有)

0. 試料採取

128E

136E

144E



室生寺杉  
1998年の台風  
により倒木

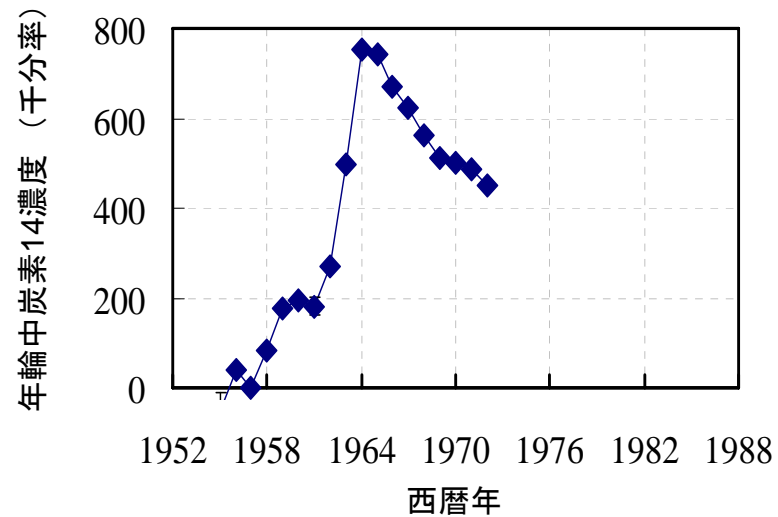


樹齡~1950年の  
屋久杉の切り株

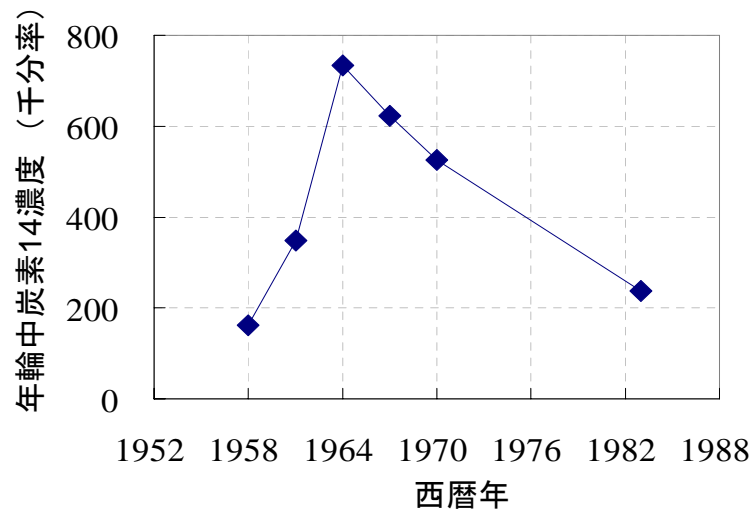
# 1. 年輪の絶対年代の決定 – 核実験による炭素14濃度ピークの検出 –

1963年の部分的核実験禁止条約の施行を前に、各国により相次いで大気圏内での核実験が行われ、その結果、大気中の炭素14濃度は、1964年に従来の約2倍に達した。そのピークの痕跡は年輪中に残されている。

樹齢712年の屋久杉



樹齢382年の室生寺杉



## 2. 年輪の剥離 & 3. セルロース抽出

木材ブロック  
(2cm × 2cm)

年輪幅 ~1mm

年輪



セルロース

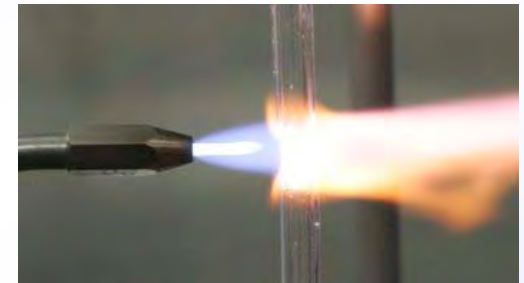


カッターを用いて  
年輪を1枚ずつ剥離

薬品による洗浄・漂白

木材からの収率 約40%

# 4. セルロース試料からグラファイトを合成 (セルロース燃焼 ⇒ 二酸化炭素)

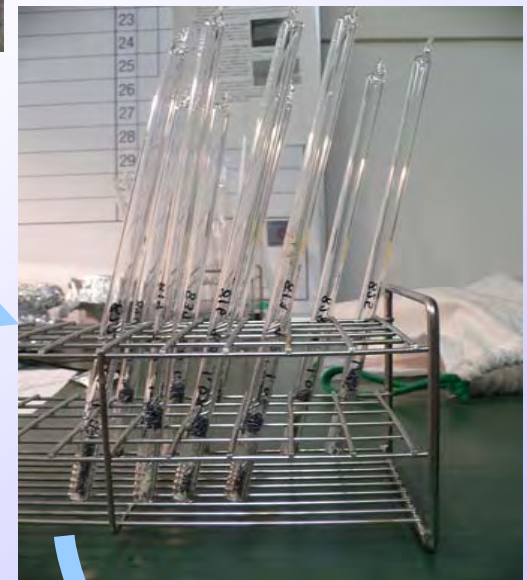


酸化剤

セルロース

計量し  
酸化剤とともに  
ガラス管へ

真空ラインを用いて  
ガラス管内を真空に引き  
バーナーでシーリング



950°Cのオーブンで燃焼

#### 4. セルロース試料からグラファイトを合成

(二酸化炭素 ⇒ 水素還元 ⇒ グラファイト)



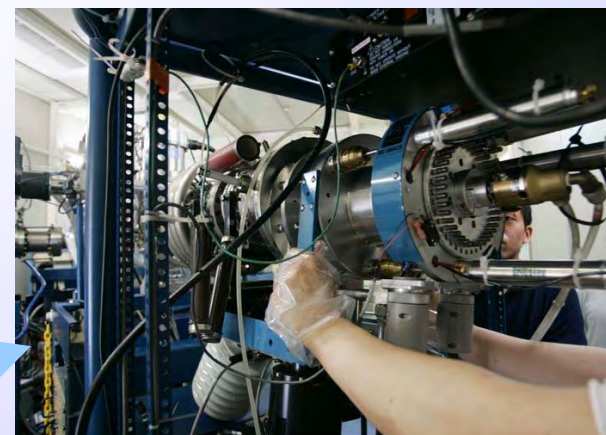
二酸化炭素を  
真空ラインへ導入



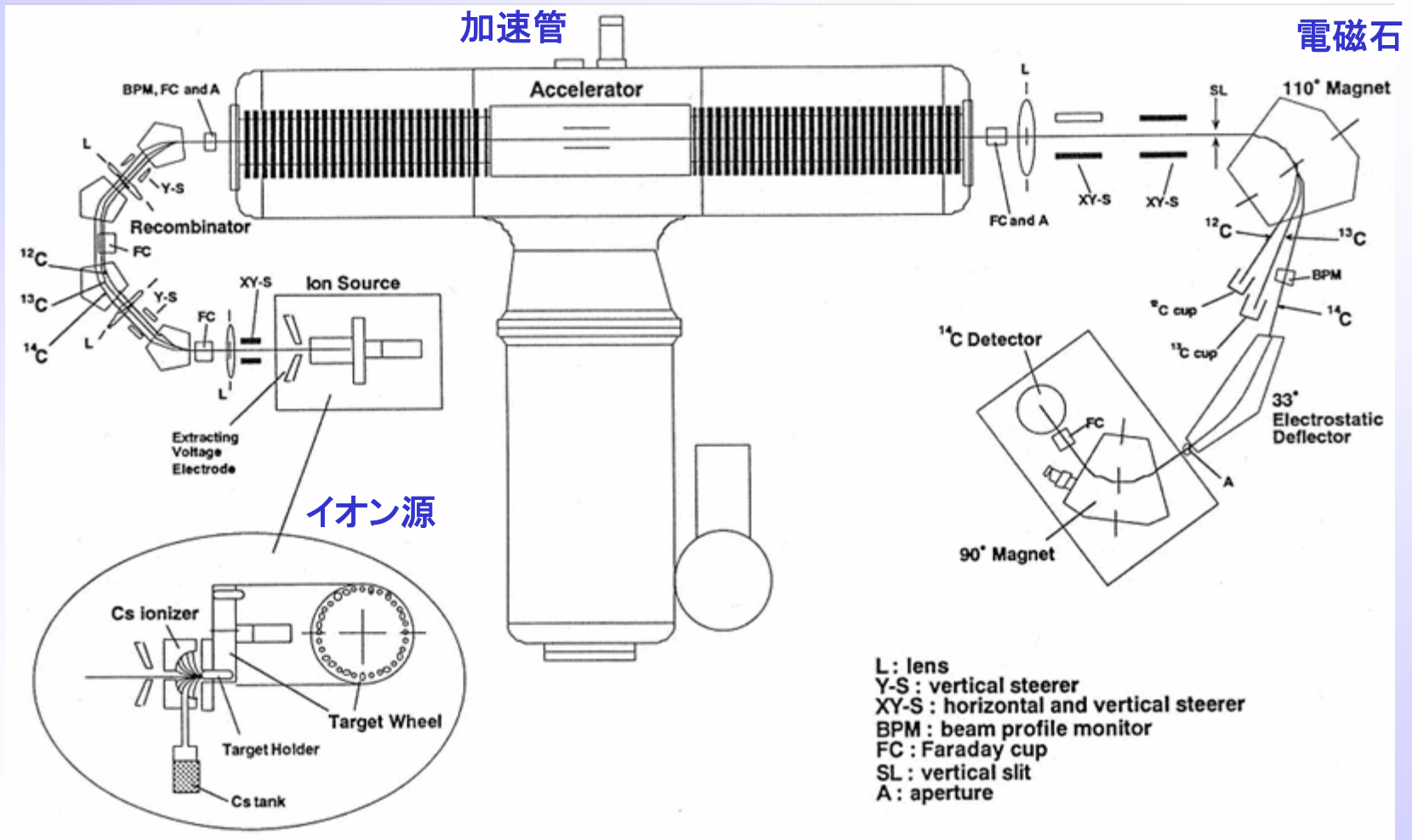
二酸化炭素に水素ガスを足して  
630°Cに加熱し、水素還元  
⇒グラファイト(炭素)の完成



1.5mgのグラファイトを  
ターゲットホルダーに詰めて  
加速器のイオン源へ



## 5. 加速器質量分析計によるグラファイト中の炭素14濃度の測定



グラファイトをイオン化 ⇒ 炭素イオンの電流を加速器へ  
電磁石で軽い炭素12と重い炭素14を分離 ⇒ 14C量、12C量を測定



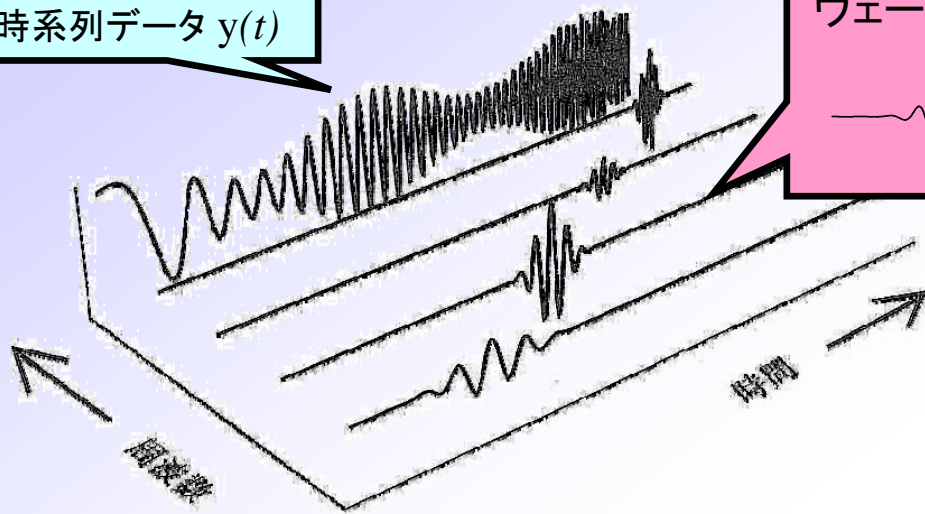
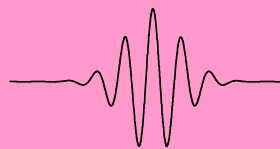
# 測定結果

太陽活動11年周期の変遷と  
気候変動への影響

# ウェーブレット変換とは

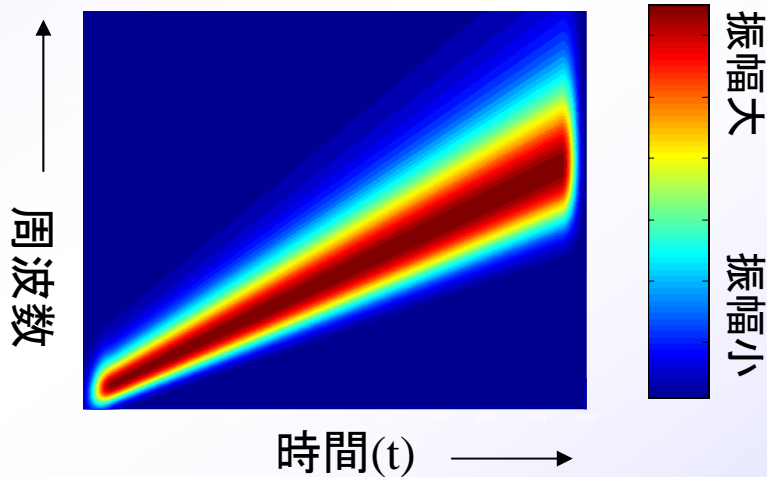
時系列データ  $y(t)$

ウェーブレット  $\phi(x)$



フーリエ変換は平面波を用いた周波数解析であるため時間方向の情報を失うが、ウェーブレット変換は波束を用いているため、**周波数が時間とともに変化する様子をとらえることができる**

$$W(f, t) = \int y(t) \cdot \phi(x) dx$$

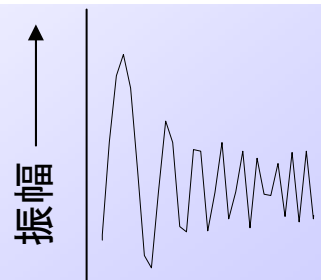


フーリエ変換とは

平面波  $\phi^*(x)$

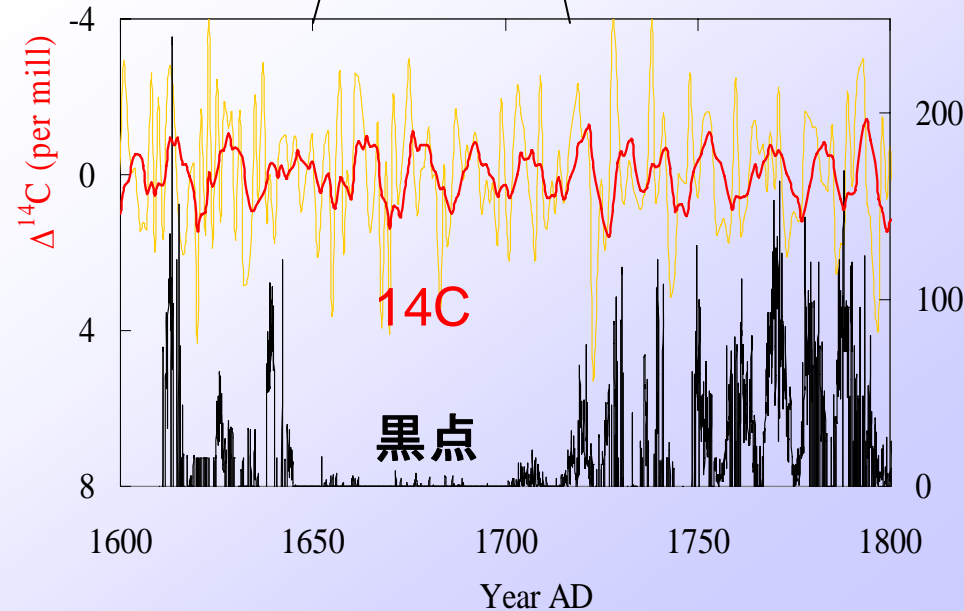
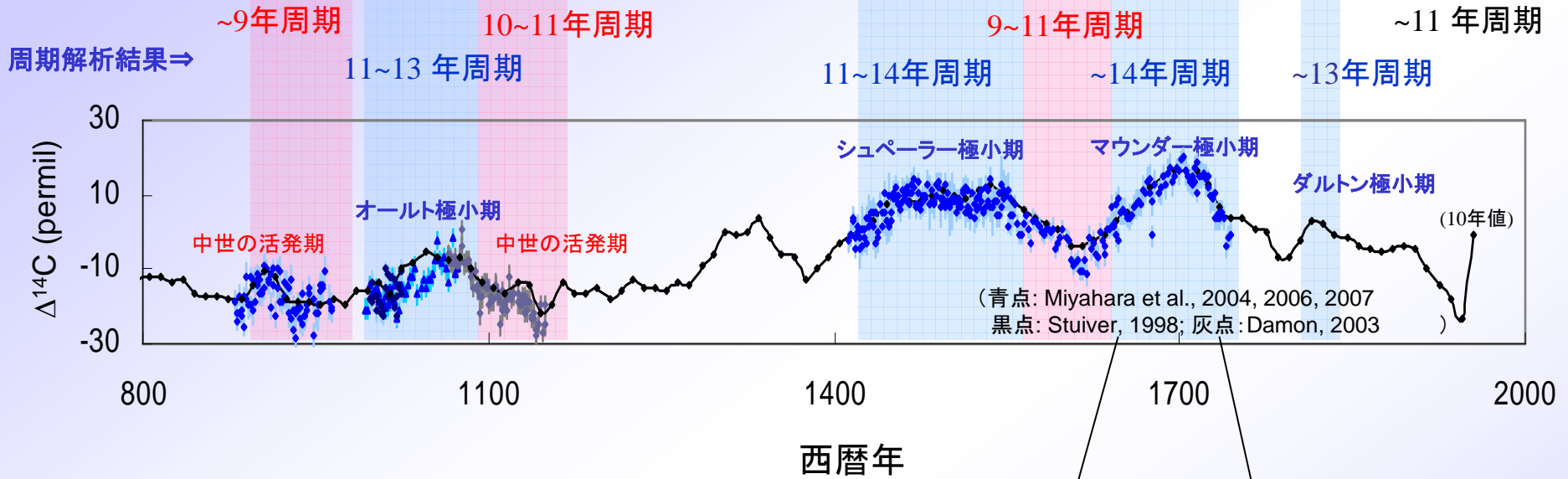


$$F(f) = \int y(t) \cdot \phi^*(x) dx$$



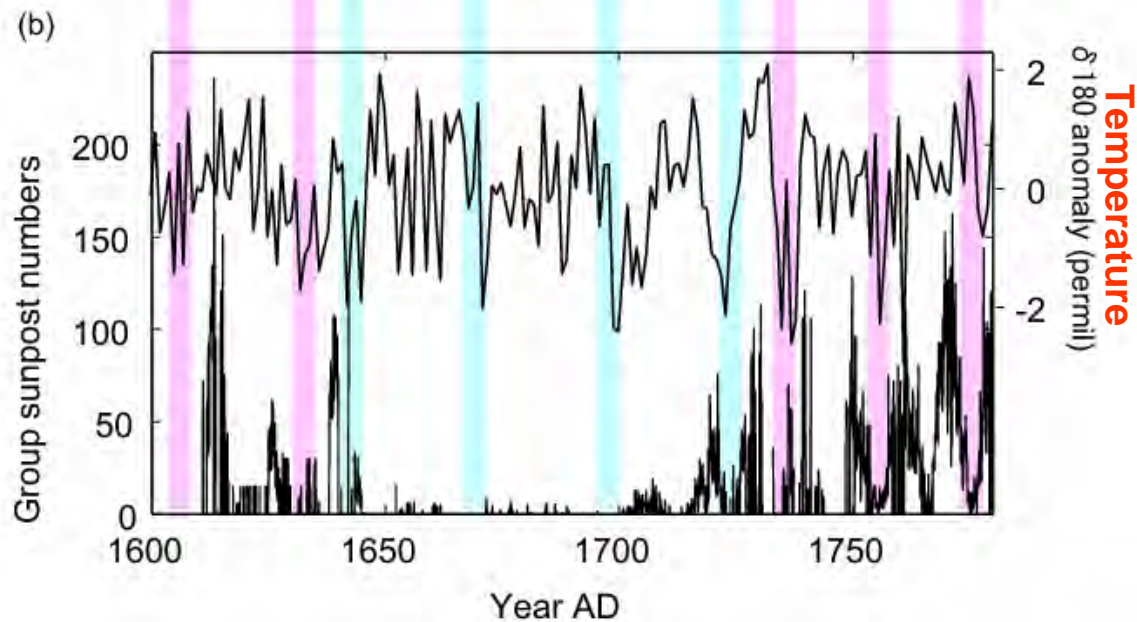
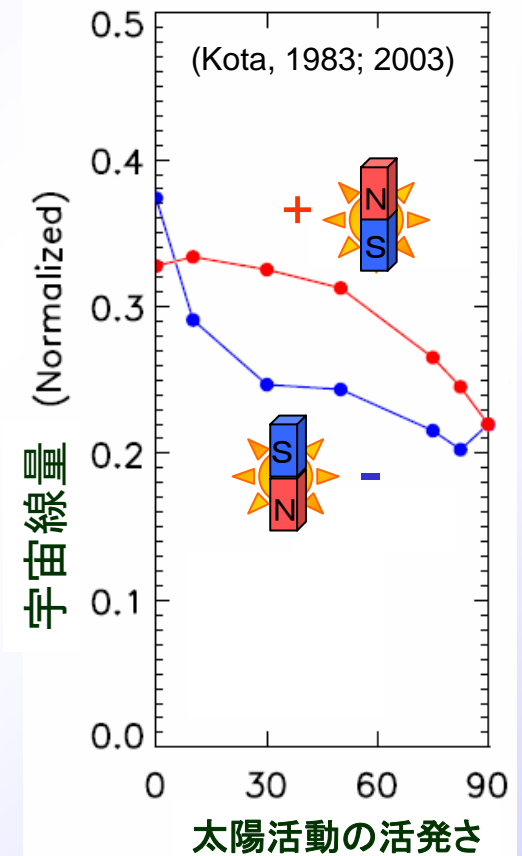
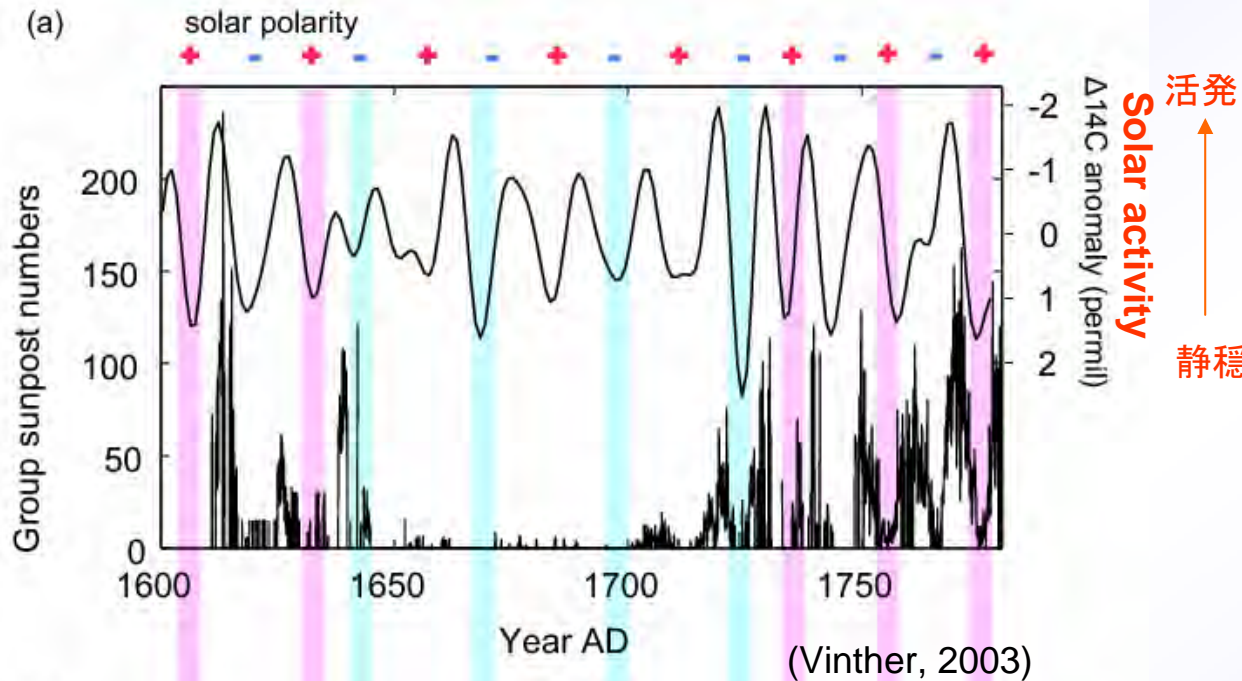
周波数 →

# 測定結果と周期解析結果： 過去1100年間における太陽”11年”周期の変遷



Miyahara et al., Sol. Phys. 2004,  
JGR, 2006,  
EPSL, 2008

# マウンダー極小期における太陽活動11年周期の気候への影響 (Miyahara, et al., EPSL, 2008)



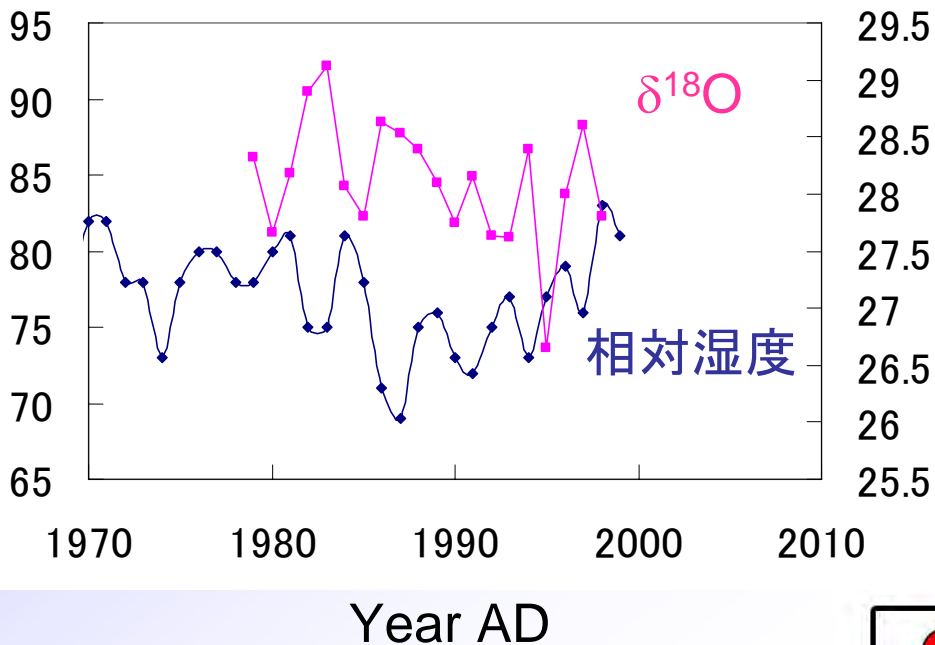
## 通常時

太陽極性が**正**のときのほうが  
寒くなりやすい

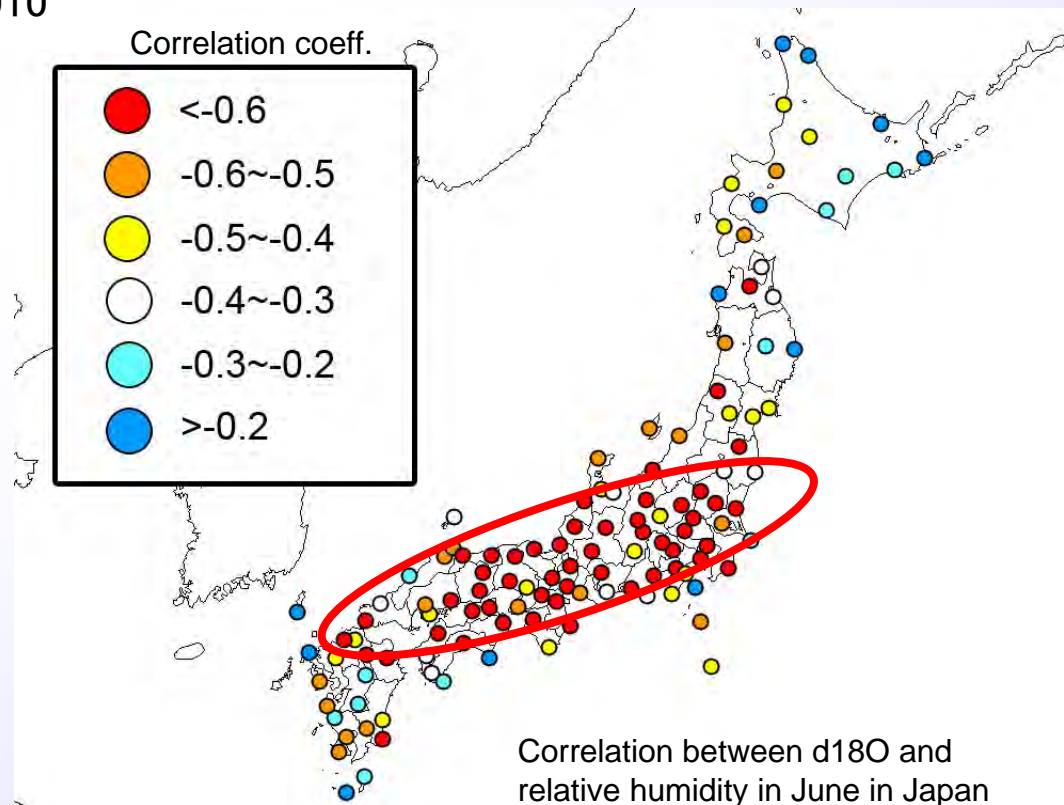
## マウンダー極小期

太陽極性が**負**のときのほうが  
寒くなりやすい

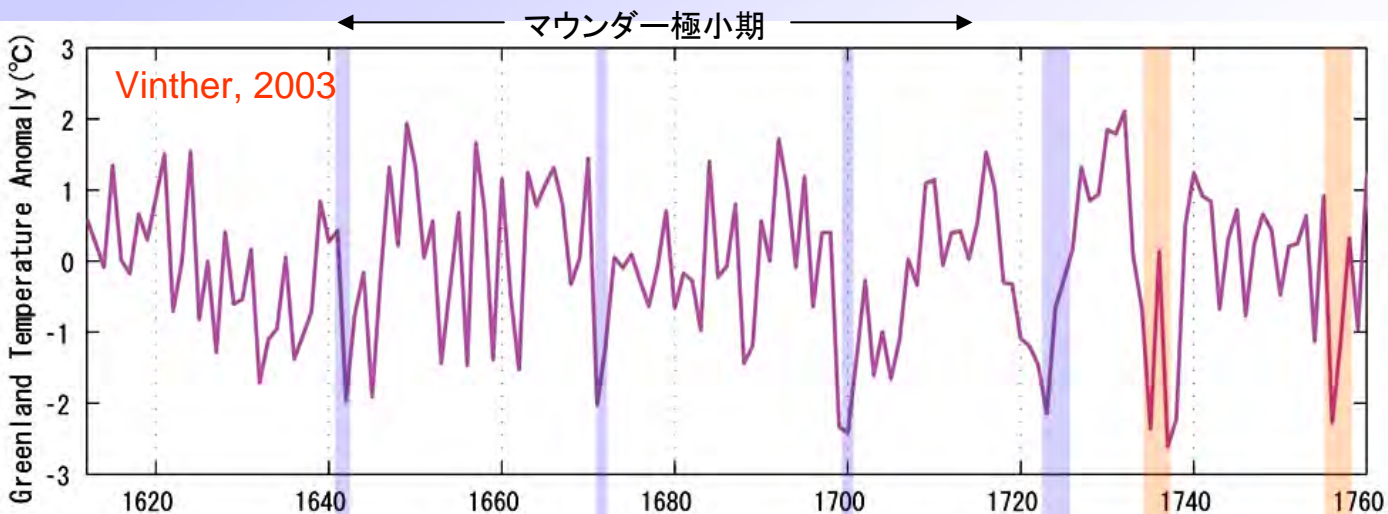
# 年輪中 $\delta^{18}\text{O}$ による 日本の相対湿度の復元



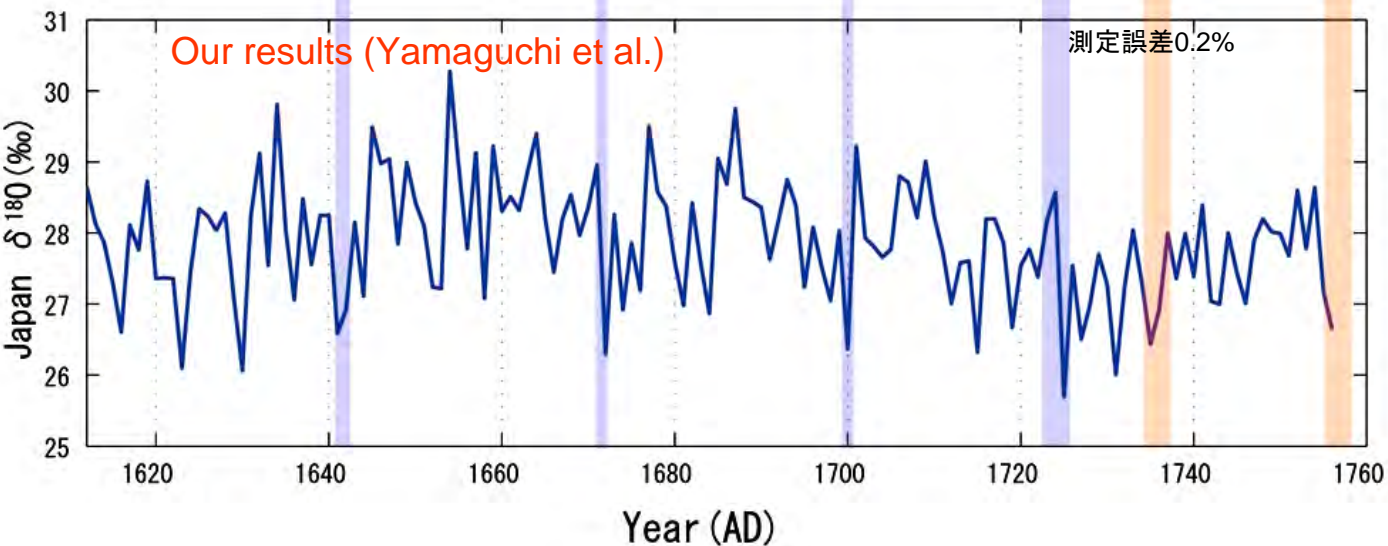
・梅雨前線の活発度  
(= 相対湿度)に依存した  
蒸散時の同位体分別



# グリーンランドの寒冷化と日本の湿度変化の比較



グリーンランドの氷床  $\delta 18O$   
 による北半球の気温  
 (Vinther et al., 2003)

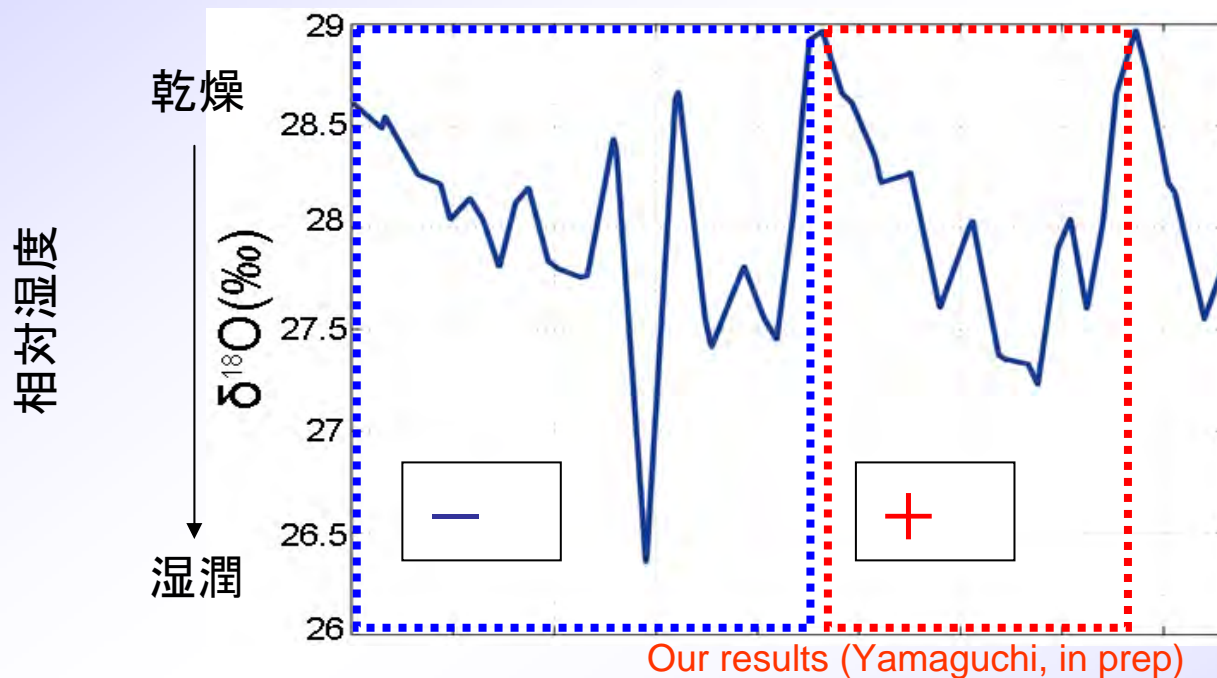
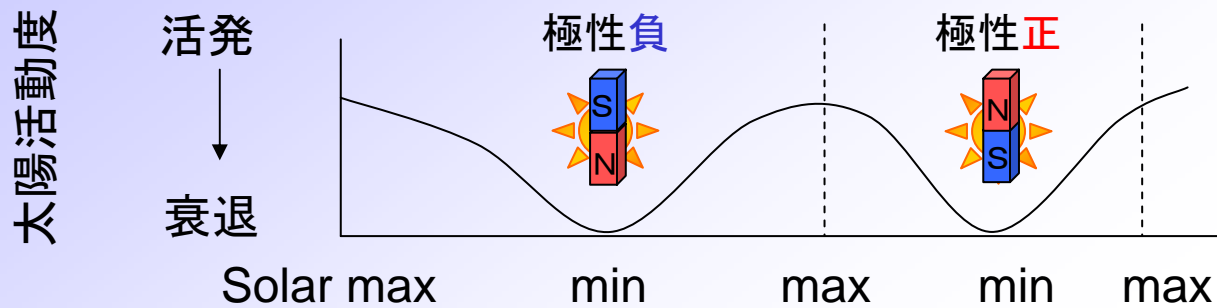


室生寺スギ中  $\delta 18O$   
 による奈良の湿度  
 (≒降水量?)  
 (Our results, 2008)

青: 太陽11年周期の極小 + 太陽極性負  
 赤: 太陽11年周期の極小 + 太陽極性正

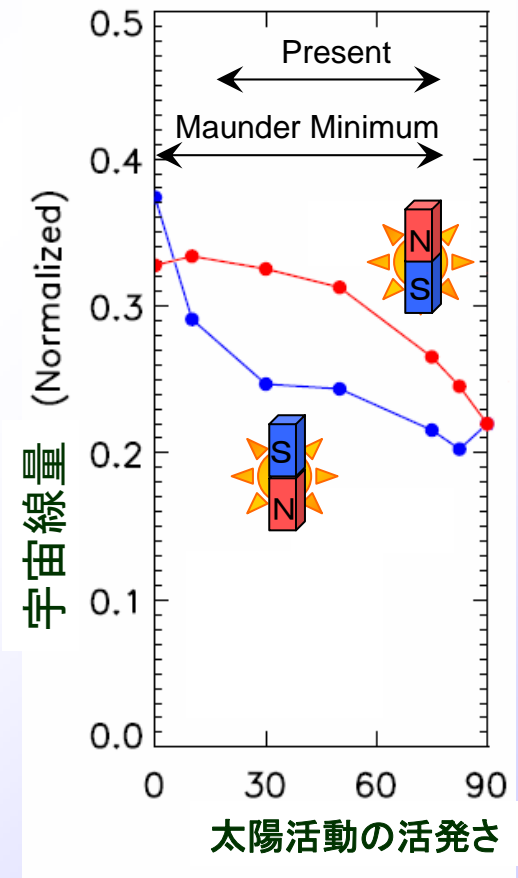
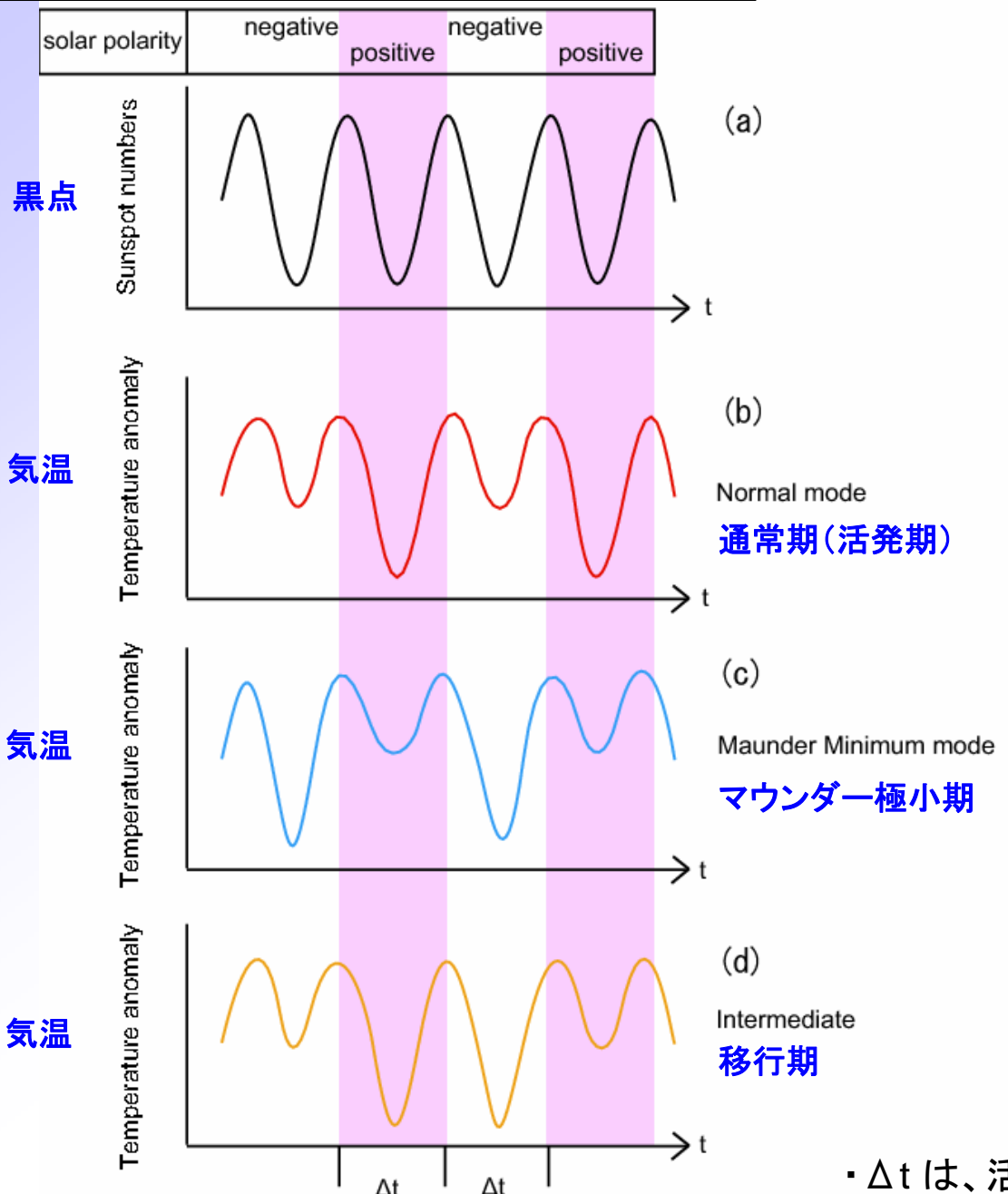
グリーンランド、日本とも、気候変動に  
 太陽磁場極性依存がみられる

# マウンダー極小期における湿潤イベントの太陽磁場極性依存



太陽の磁石の向きが変わるだけでも、地球の気候は変わる  
= 太陽の磁場が地球に飛来する宇宙線の量を左右することで、  
地球の気候に影響している可能性が大きい

# 気候の"11年/22年"周期のモード

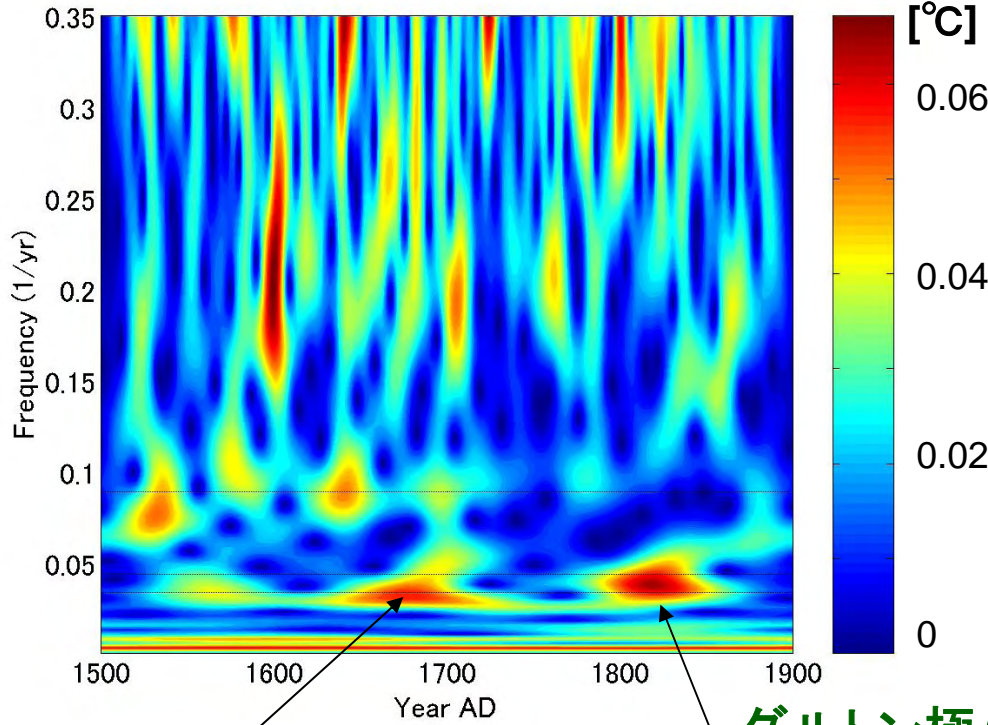


(Kota, 1983; 2003)

・  $\Delta t$  は、活動度が低いほど長くなる



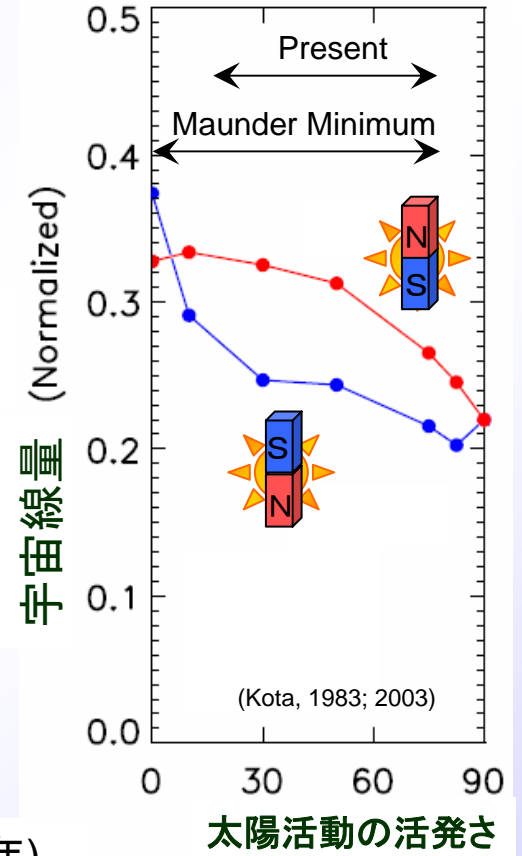
# 気温(年輪幅)変動にみられる"22年"周期 – 太陽の双極子磁場の向きの影響 –



**ダルトン極小期**

気候の周期 = ~26年

(太陽11年周期 = ~13年)



(Kota, 1983; 2003)

**マウンダー極小期**

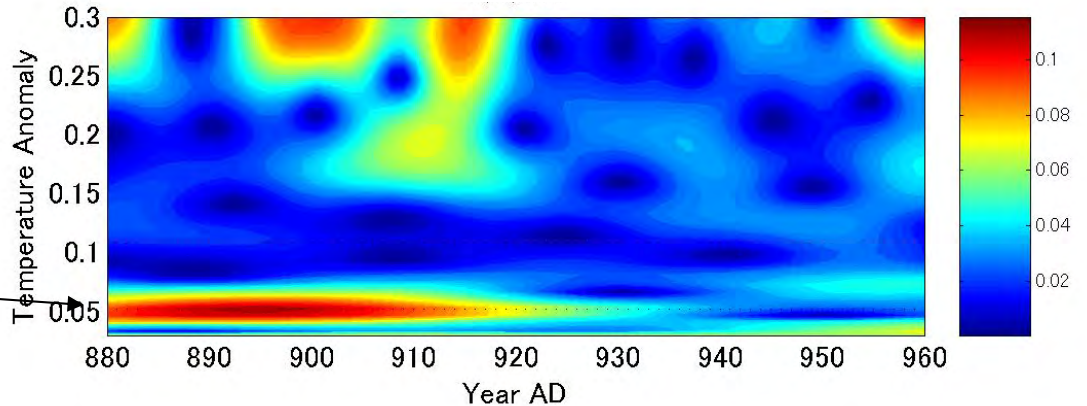
気候の周期 = ~28年

(太陽11年周期 = ~14年)

**中世の温暖期**

気候の周期 = ~19年

(太陽11年周期 = ~9年)



太陽活動レベルの長期変動を  
正確に理解するために

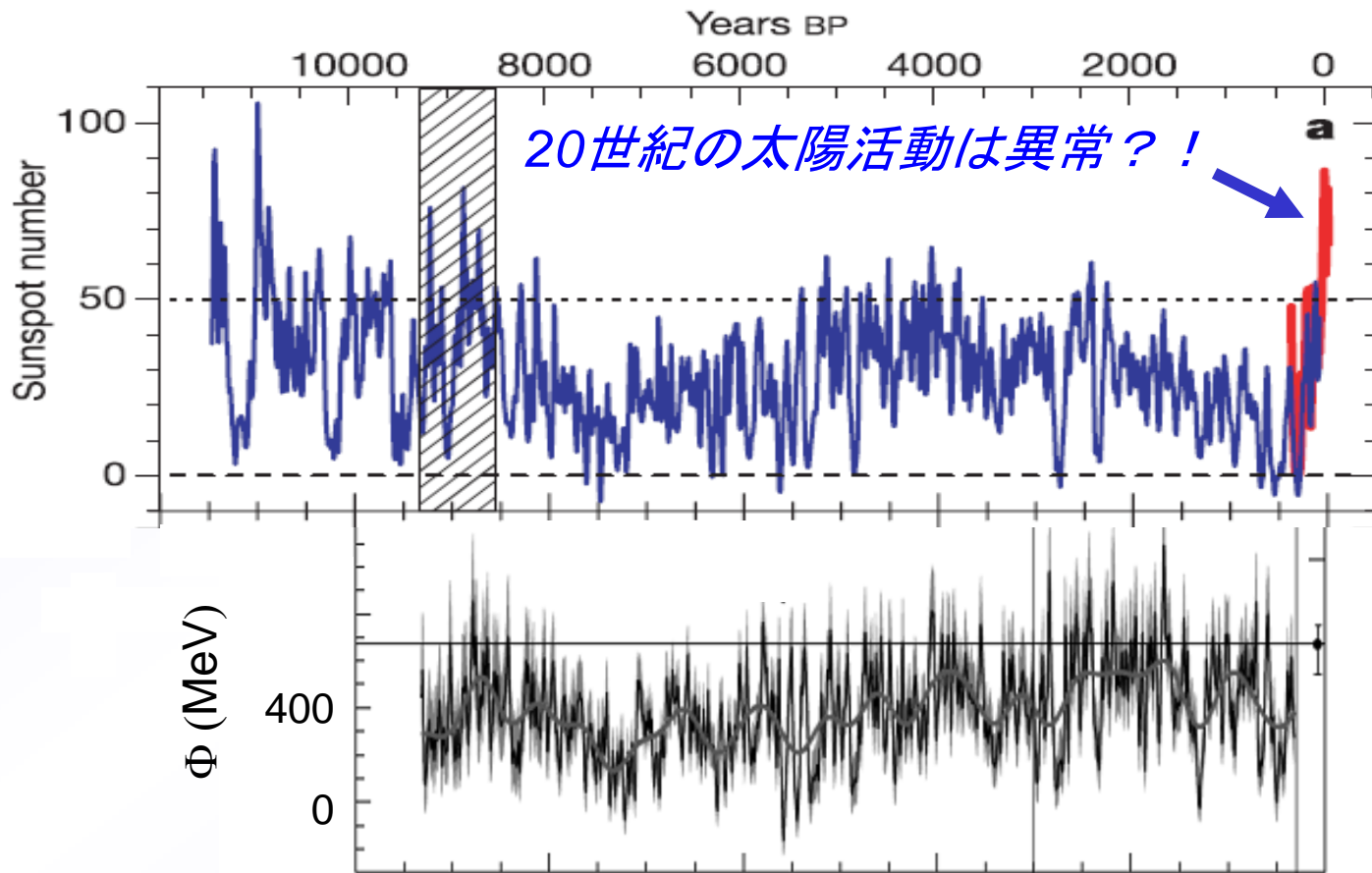
# 20世紀の太陽活動は異常なほど活発だったのか？

用いる核種によって異なる太陽活動の長期変動に関する見解

$^{14}\text{C}$ による



(Solanki, 2004;  
2005)



$^{10}\text{Be}$ による

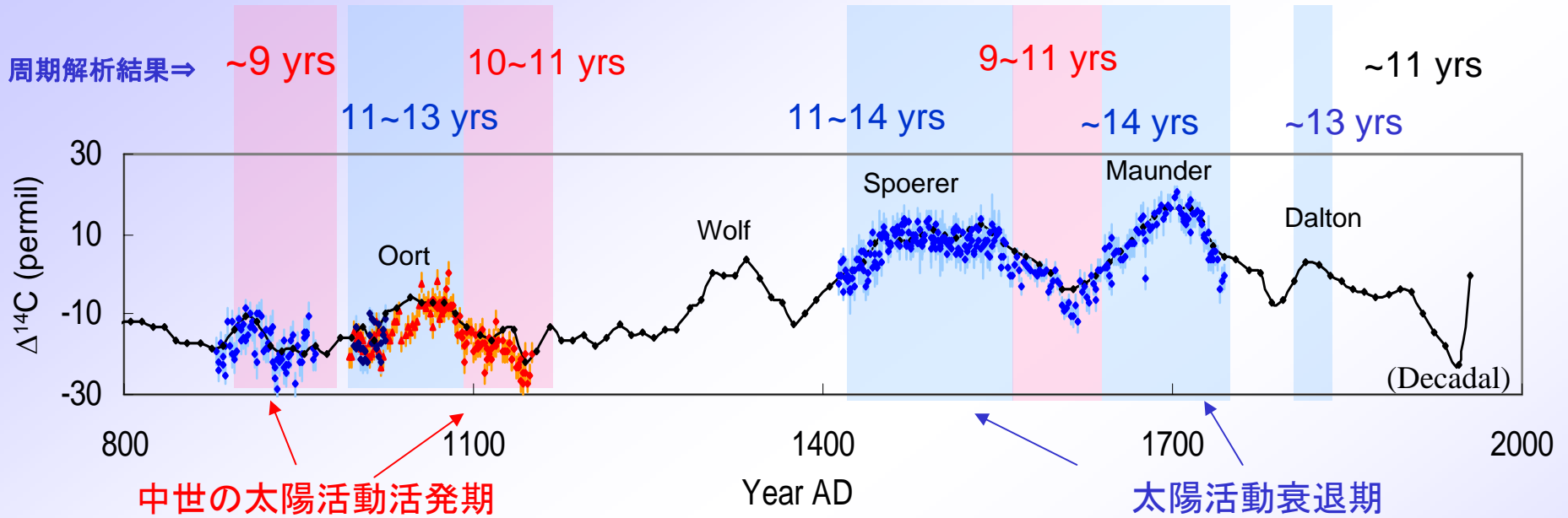


(Vonmoos, 2006)

年輪中炭素14濃度(データ) → [炭素循環] → 宇宙線による炭素14生成量 → 太陽活動度の推定

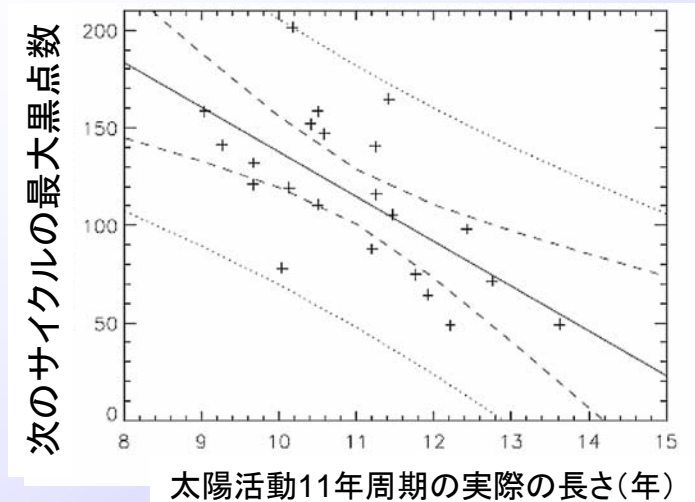
気候変動による炭素循環の変化は考慮されていない  
人為起源CO<sub>2</sub>放出による炭素14の希釈効果が完全には補正できない

# “11年周期変動の伸び縮み”に基づいた太陽活動度レベルの復元の可能性



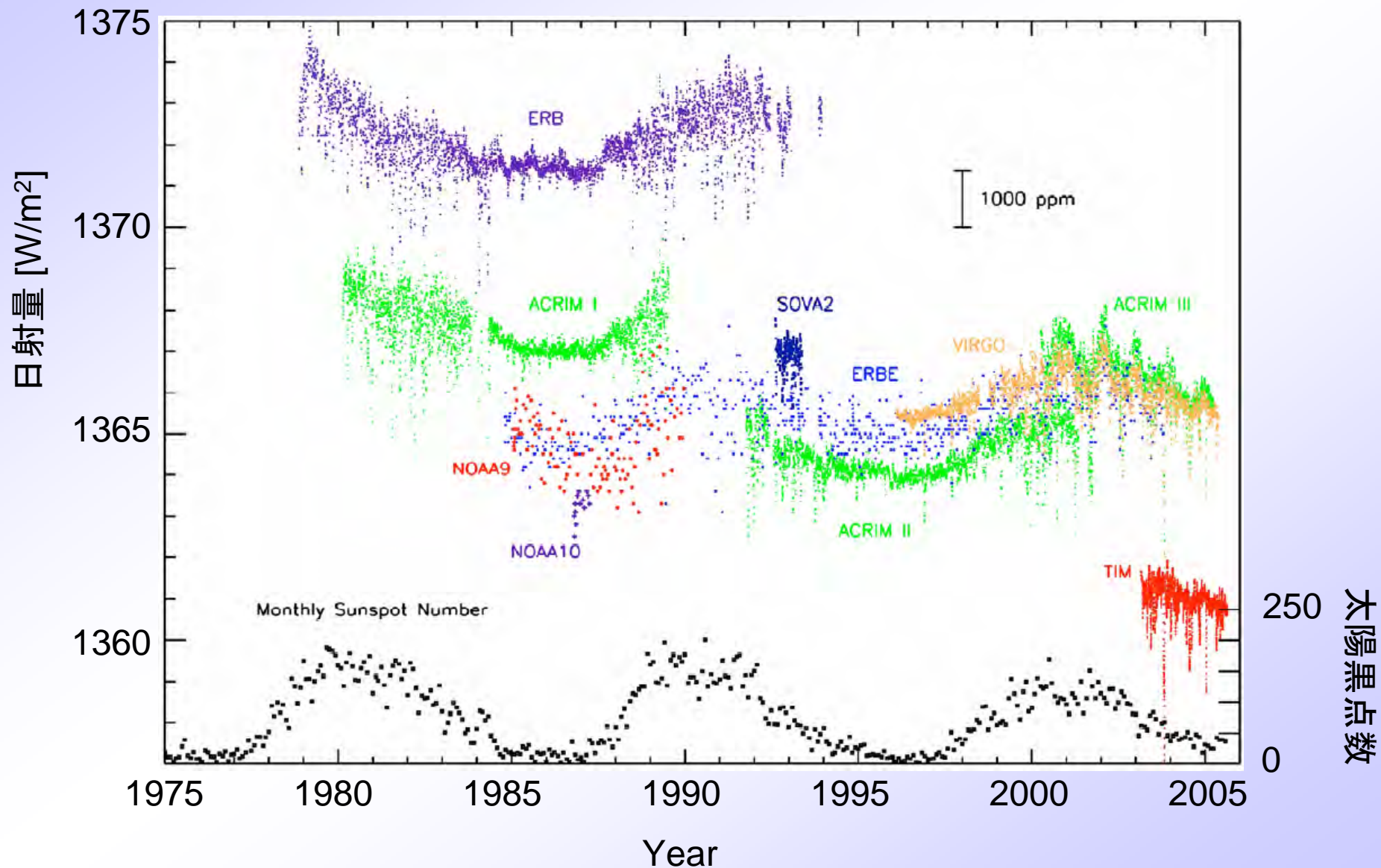
中世の太陽活動活発期では太陽周期は約9年であった。  
20世紀の太陽活動よりも活発であった可能性が高い。

人為起源の温暖化ガスやヒートアイランド現象等に加えて  
どの程度太陽が温暖化に起因したのかを探るには  
中世と現代との気候の比較がカギ。

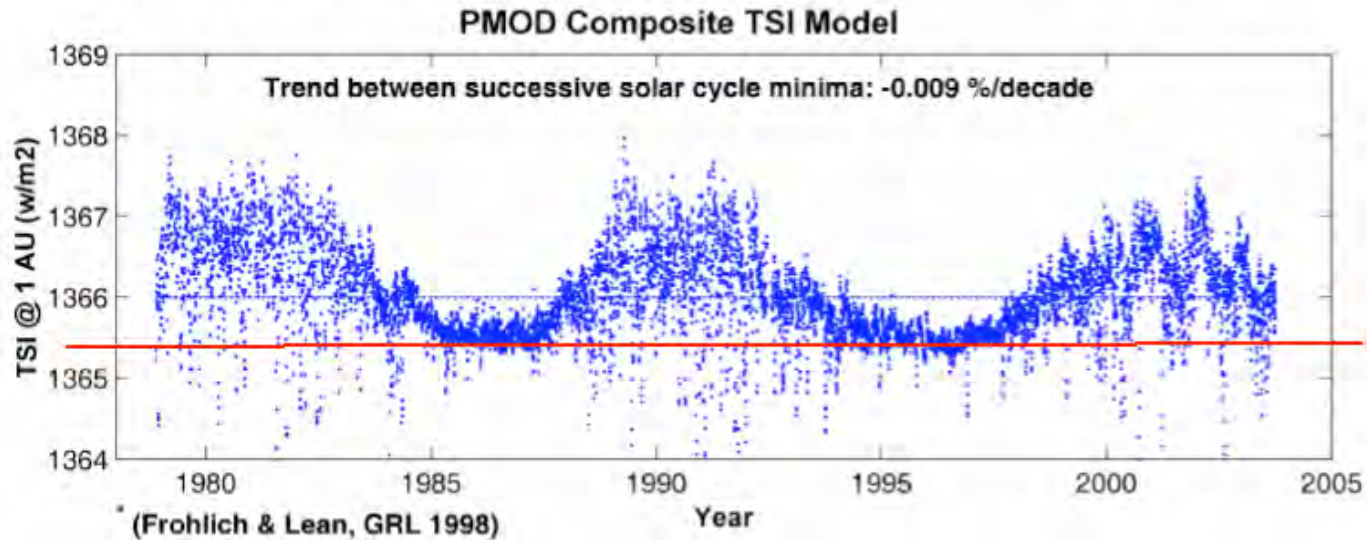
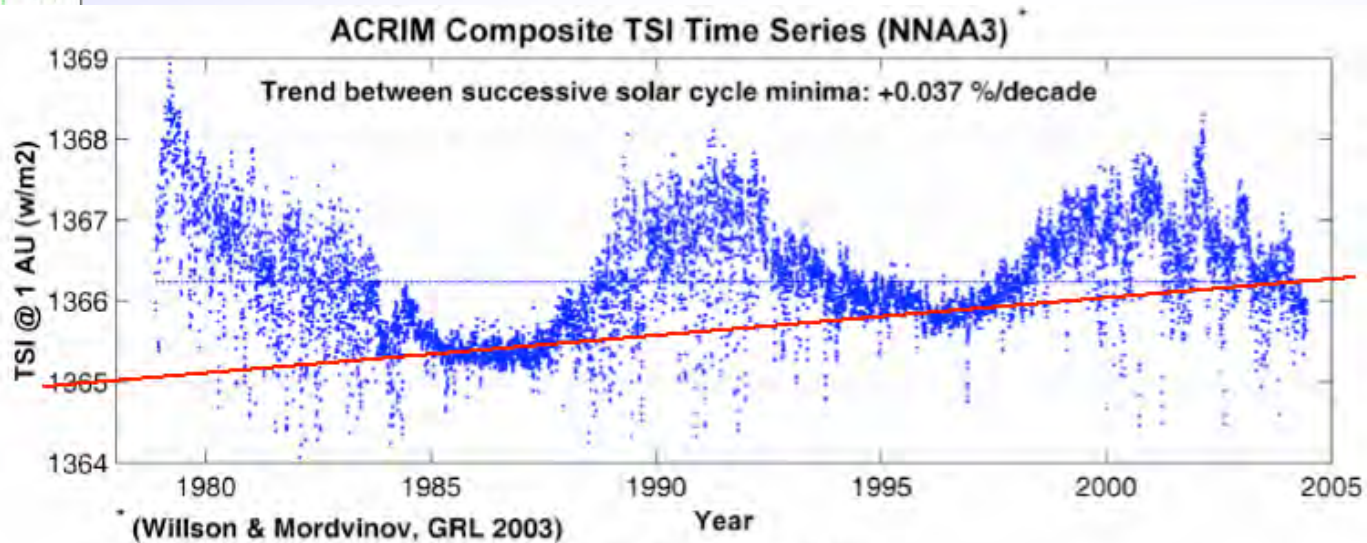
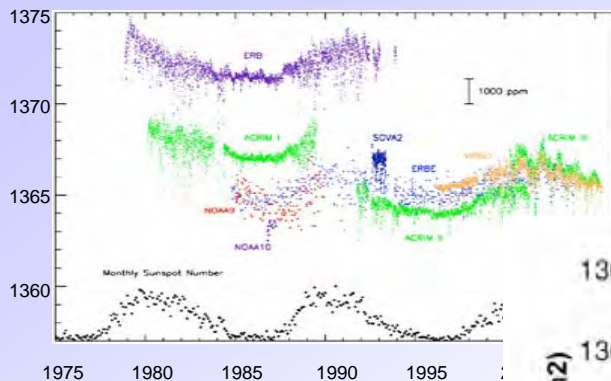


日射量の可変性を  
正確に理解するために

Total Solar Irradiance Database

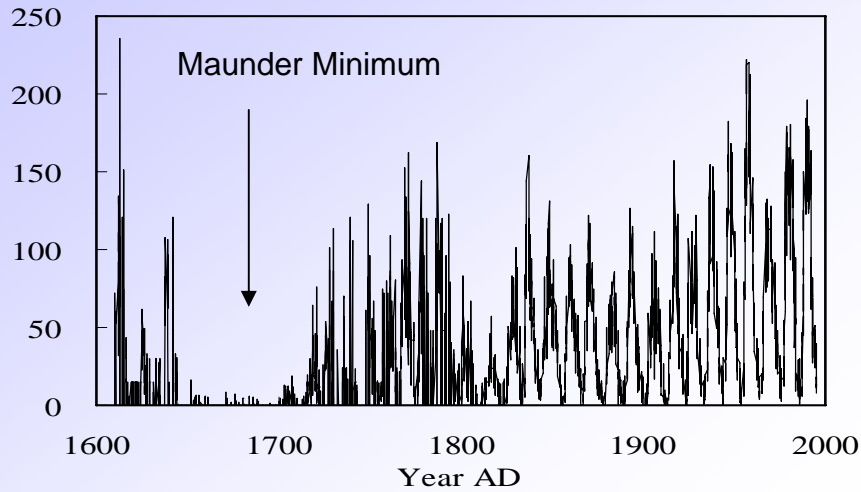


# 日射量に長期トレンドはあるのか？

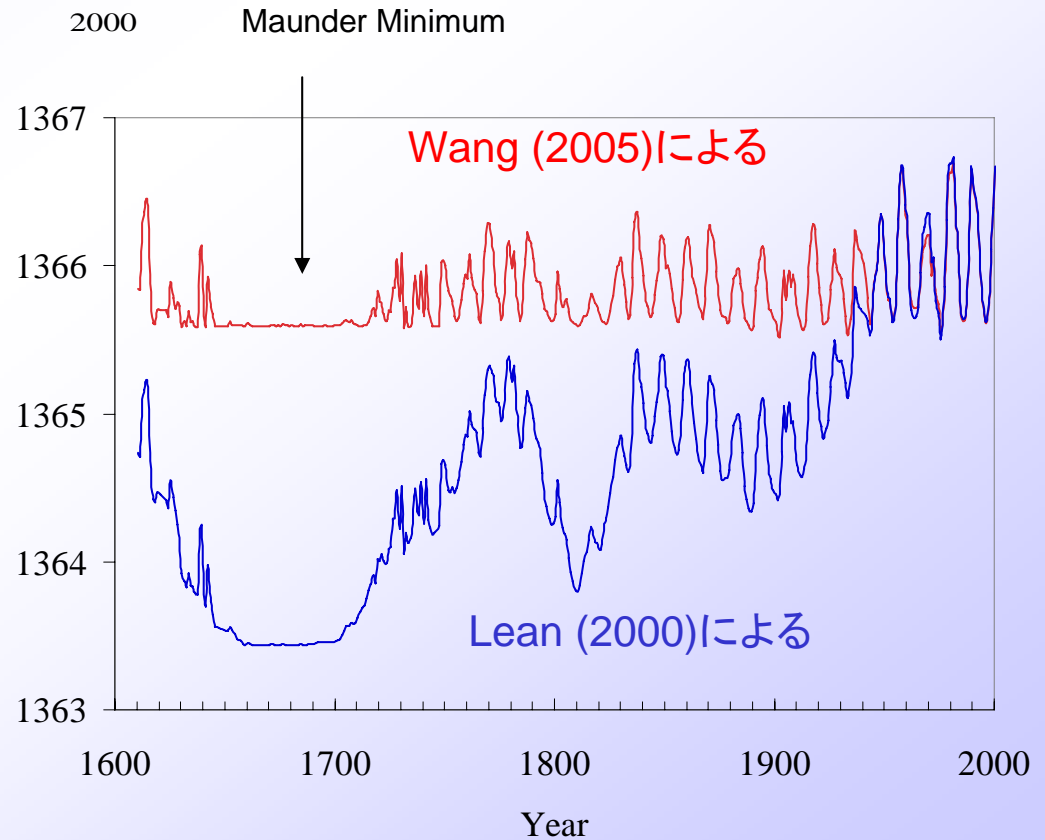
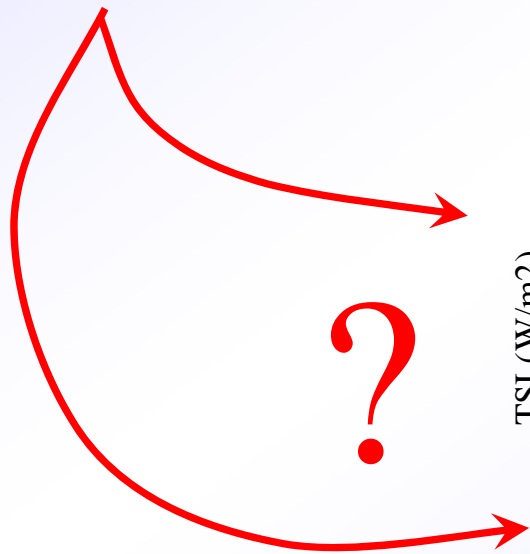


# 日射量に長期トレンドはあるのか？

太陽黒点数

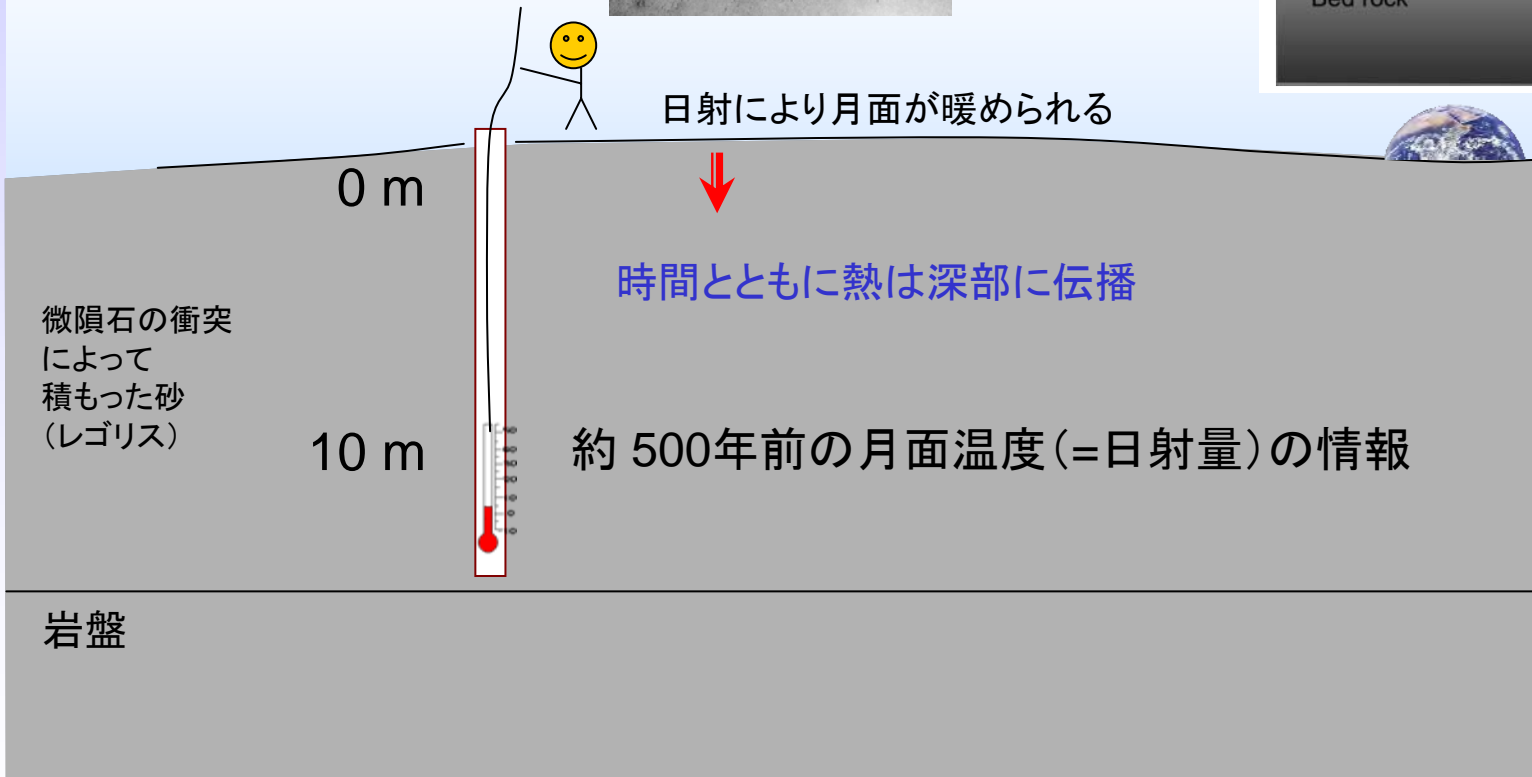
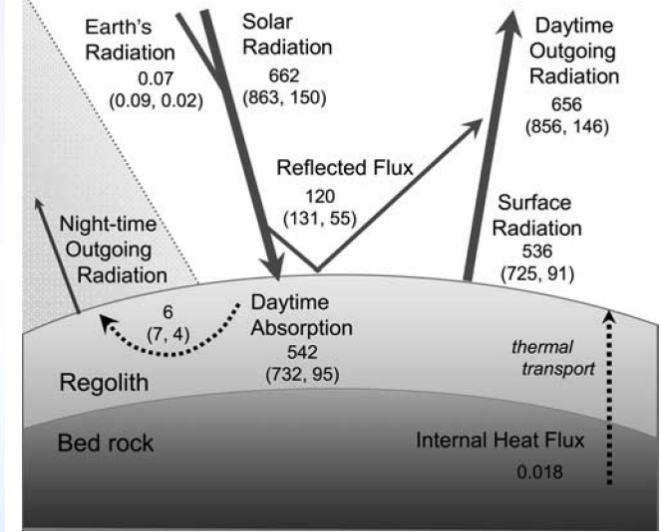
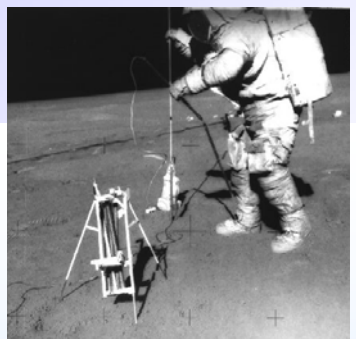
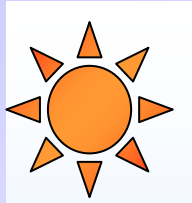


400年前のマウンダー極小期では  
日射量はどれだけ減っていたのか？





# 月面10mの温度測定による過去500年間の日射量復元

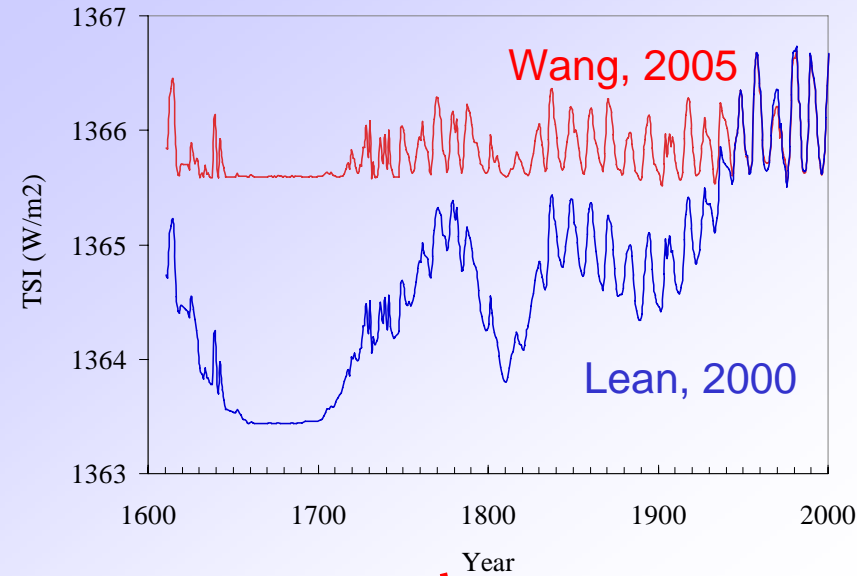


↑ 月面の熱収支 (W/m<sup>2</sup>)

中緯度  
(赤道, 極域)  
について

大気がほとんどない月では、月面の温度は日射量のみによって決定される。月面の熱は拡散により深部に伝播する。そのため、深さ方向に順次、温度を測定していくことで、過去の日射量の変化を復元することができる。

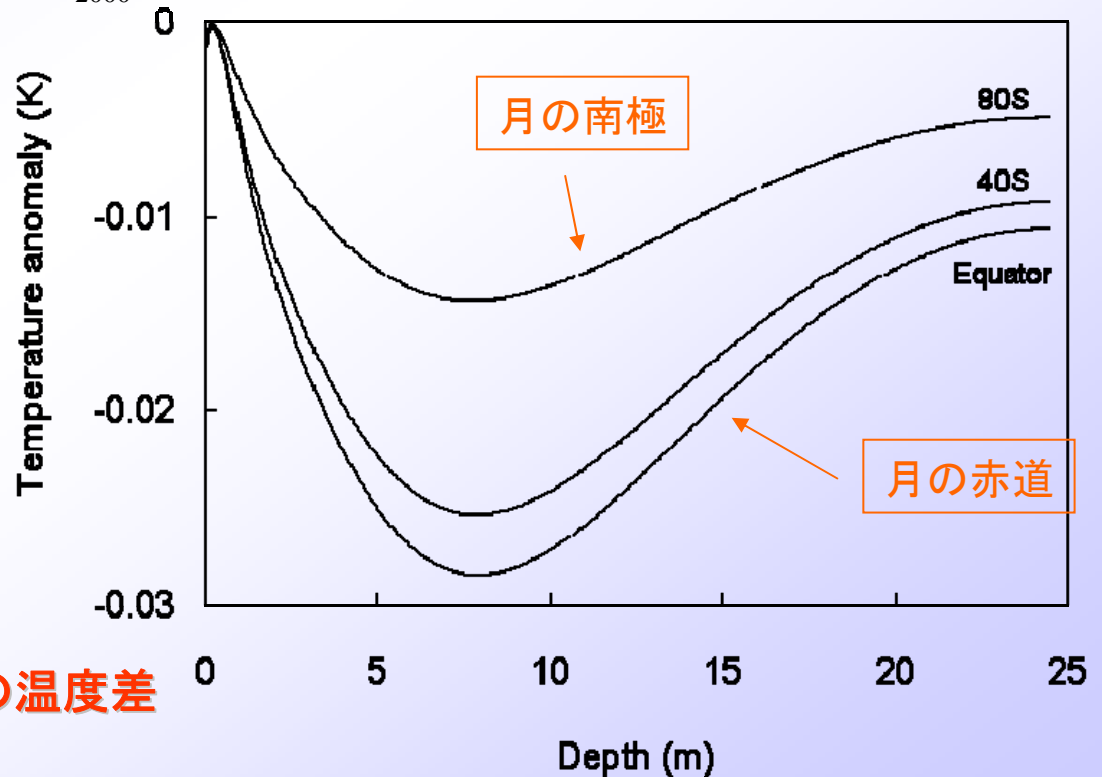
# 月面の熱伝導シミュレーション結果



(Miyahara et al.,  
Geophysical Research Letters, 2008)

温度偏差

Wangのシナリオ - Leanのシナリオ (K)

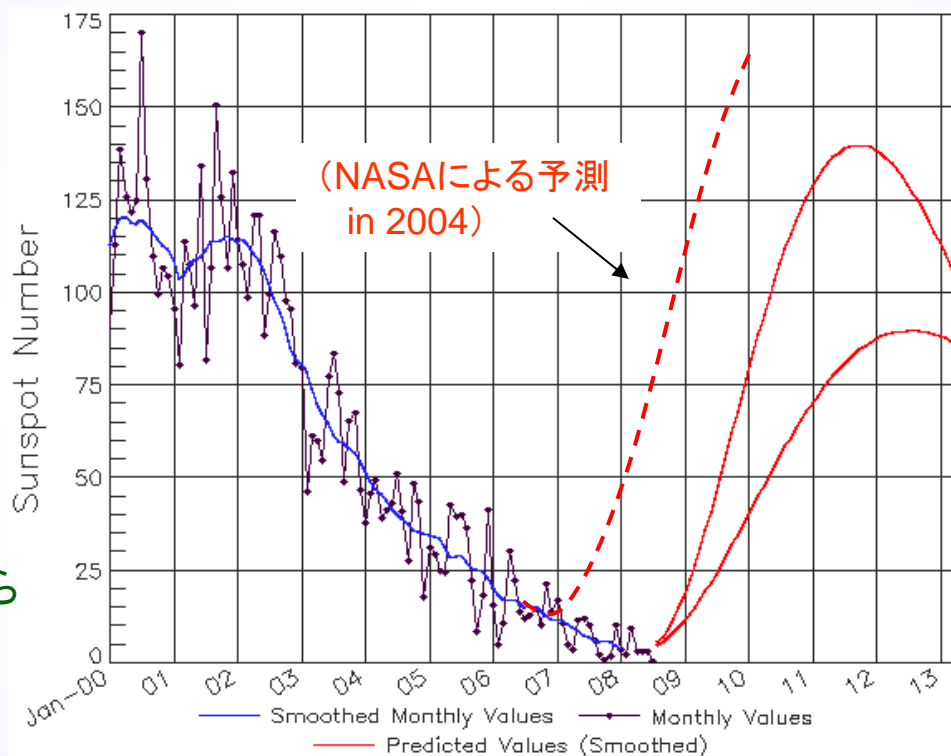
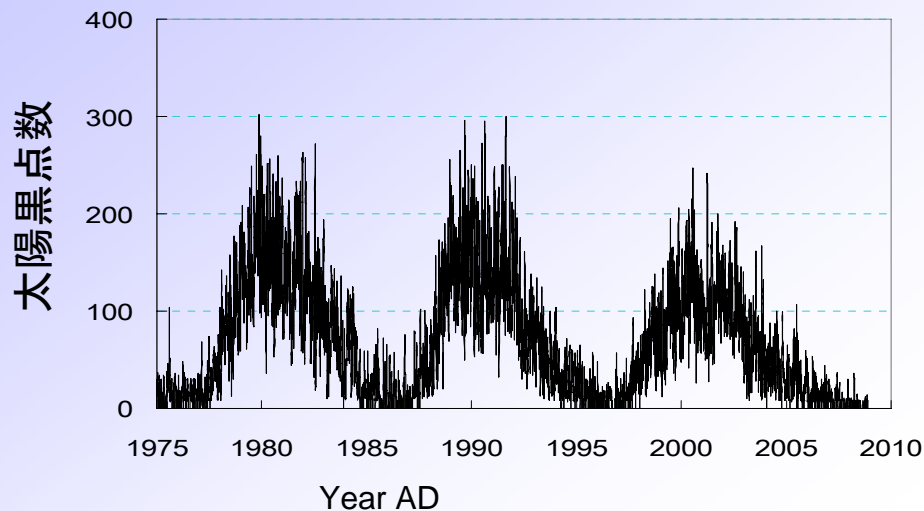


マウンダー極小期における  
日射量のモデルの差異  $\sim 2 \text{ W/m}^2$

→ 月面深度 $\sim 8\text{m}$ にて  $\sim 0.03 \text{ K}$  の温度差

# 太陽活動の予測に向けて

# 太陽はマウンダー極小期に向かっているのか？



1996年の最後の極小期から  
すでに12年が経過している

spaceweather.com

Daily Sun: 02 Feb 09



The sun is blank-no sunspots.  
Credit: SOHO/MDI

Sunspot number: 0

[What is the sunspot number?](#)

Updated 01 Feb. 2009

Far side of the Sun:

Jan. 26, 2009

farside Earthside

This [holographic image](#) reveals no sunspots on the far side of the sun.

Image credit: SOHO/MDI

# 太陽はマウンダー極小期に向かっているのか？

↓ science.nasa

NASA SCIENCE@NASA

- + NASA Home
- + Search NASA Web
- + Pagina en Español
- + Contact NASA

SEARCH SITE via Google + GO

- HEADLINE NEWS + SATELLITE TRACKING + ABOUT + MAILING LISTS + STORY ARCHIVES + OTHER LANGUAGES

## FEATURE

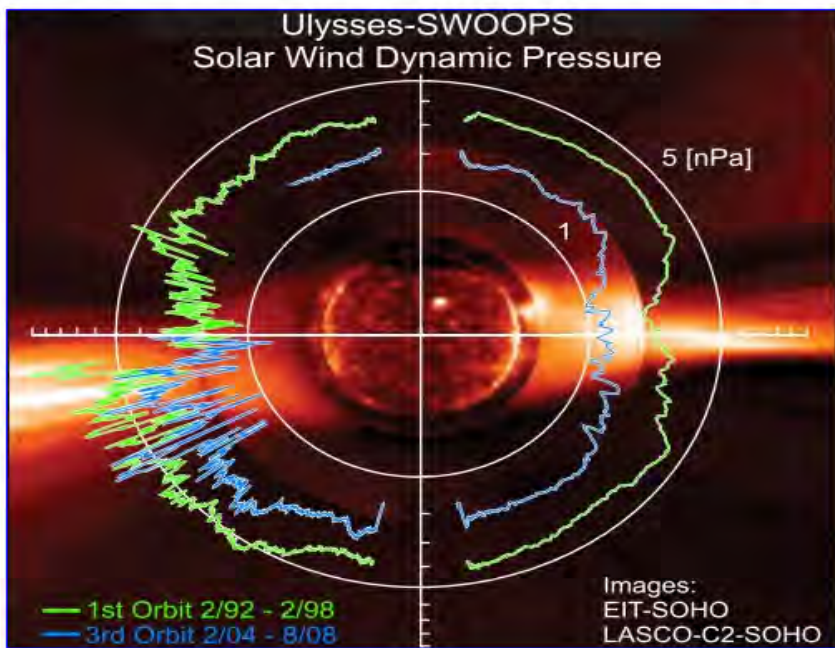
### Solar Wind Loses Power, Hits 50-year Low 09.23.2008

[+ Play Audio](#) | [+ Download Audio](#) | [+ Email to a friend](#) | [+ Join mailing list](#)

**Sept. 23, 2008:** In a briefing today at NASA headquarters, solar physicists announced that the solar wind is losing power.

"The average pressure of the solar wind has dropped more than 20% since the mid-1990s," says Dave McComas of the Southwest Research Institute in San Antonio, Texas. "This is the weakest it's been since we began monitoring solar wind almost 50 years ago."

McComas is principal investigator for the SWOOPS solar wind sensor onboard the Ulysses spacecraft, which measured the decrease. Ulysses, launched in 1990, circles the sun in a unique orbit that carries it over both the sun's poles and equator, giving Ulysses a global view of solar wind activity:

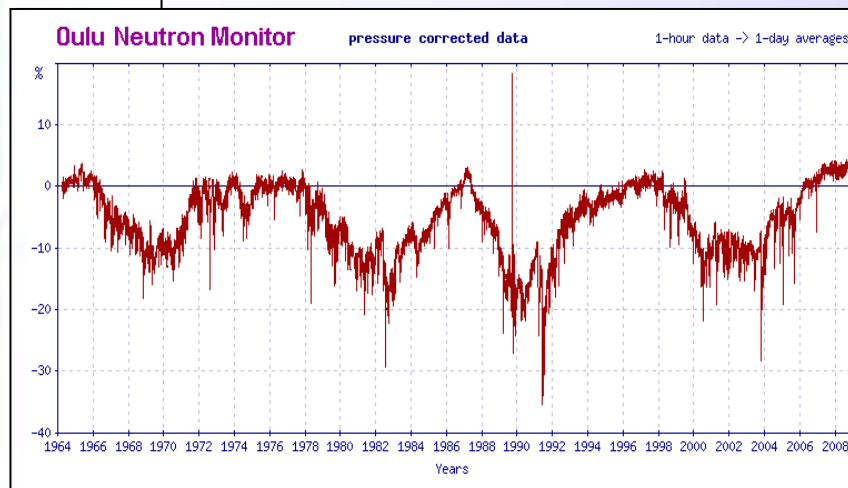


**Above:** Global measurements of solar wind pressure by Ulysses. Green curves trace the solar wind in 1992-1998, while blue curves denote lower pressure winds in 2004-2008. [Larger image]

←

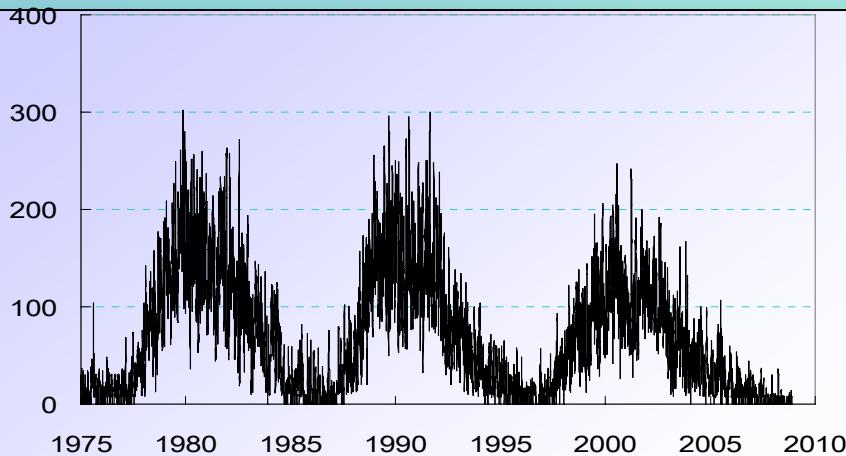
過去50年間で最低レベルの太陽風

↓ 宇宙線量の増加



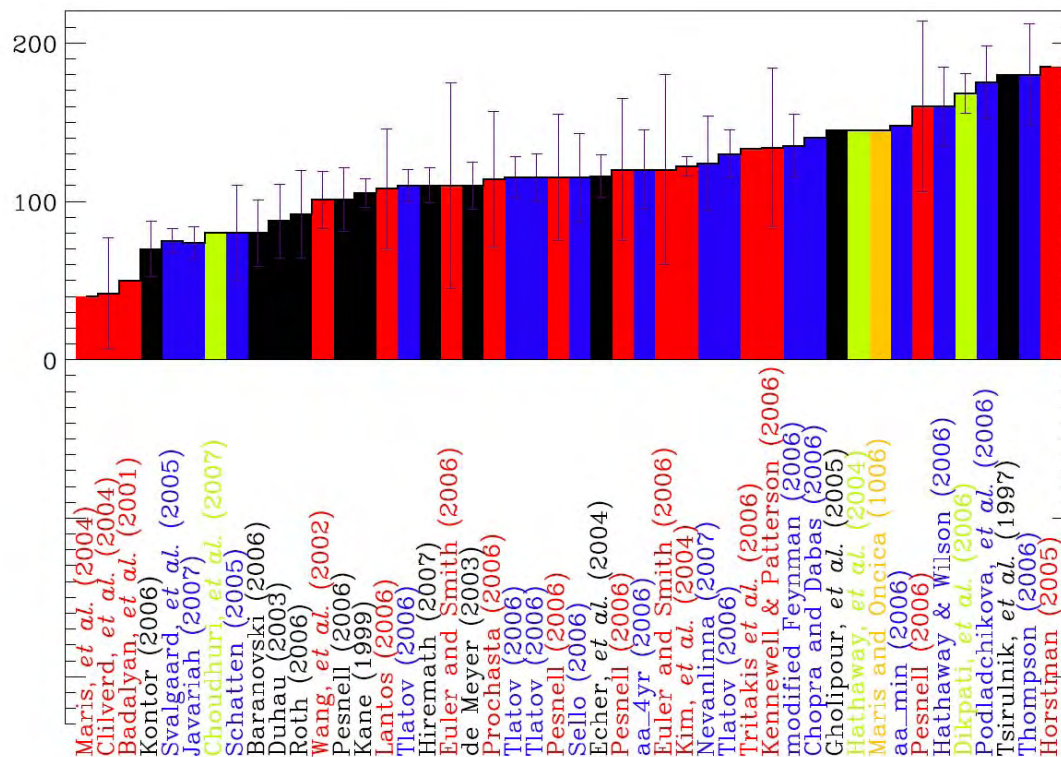
# 次の太陽活動周期における最大黒点数の予測

太陽黒点数



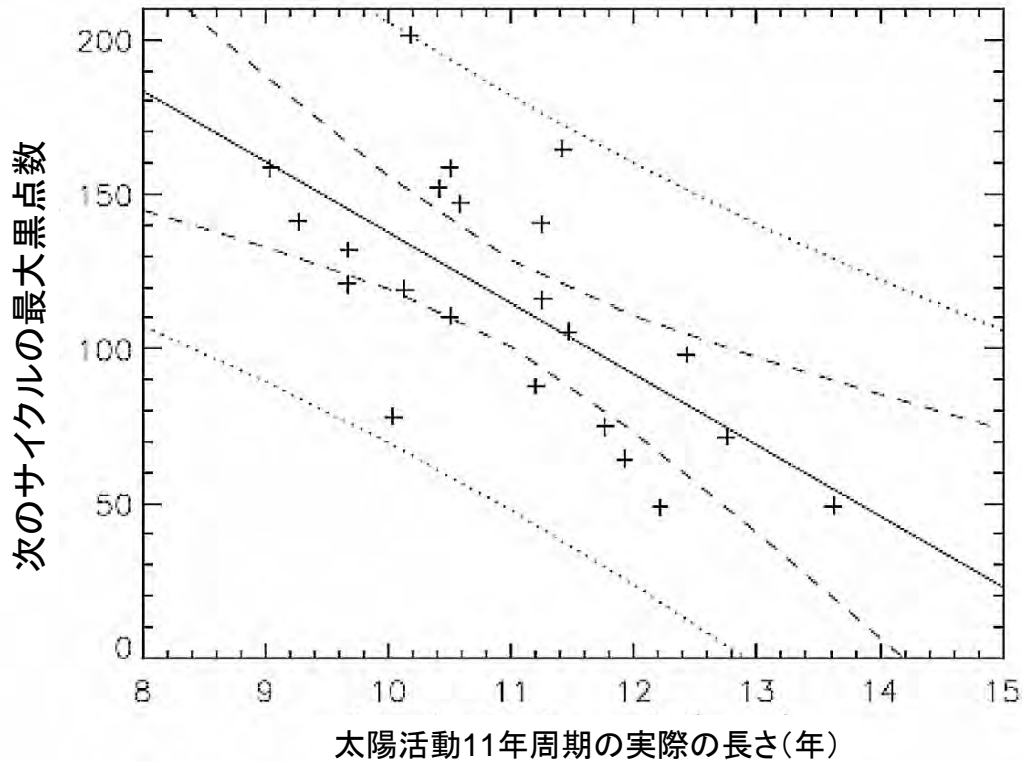
Pesnell, 2007 より

太陽黒点数の予測



太陽活動を予測する物理モデルは  
まだ確立されていない

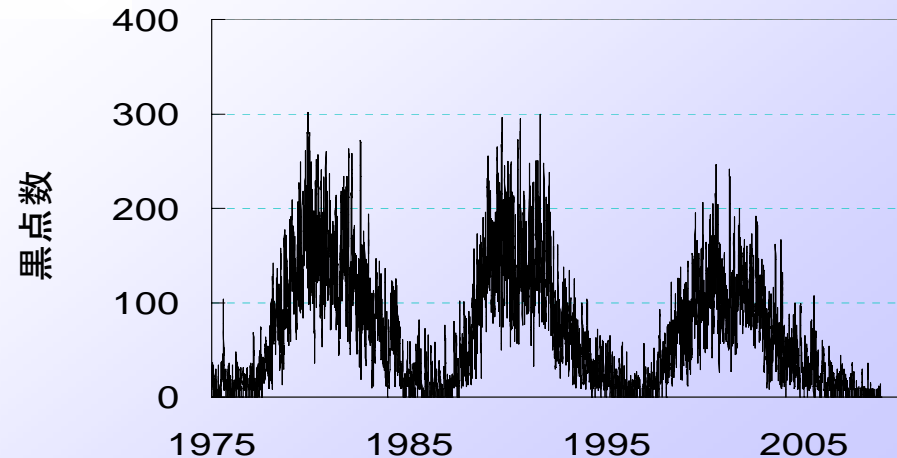
# 黒点データにより導出された黒点数と周期長の関係性



## 太陽活動度(黒点数)の増減の経験則

太陽活動の11年周期が伸びると  
次のサイクルの最大黒点数(振幅)  
が少なくなる(小さくなる)

1996年に始まった最後の太陽サイクルは  
終わるまでに12年以上かかった  
⇒ 次のサイクルは活動が弱くなる  
可能性が大きい?!



Watari, 2008

Hathaway, ApJ, 2003

Hathaway, Solar Physics, 2004

マウンダー極小期(継続時間: ~70年)の場合  
直前の2太陽サイクルが 12~13年程度に伸びる

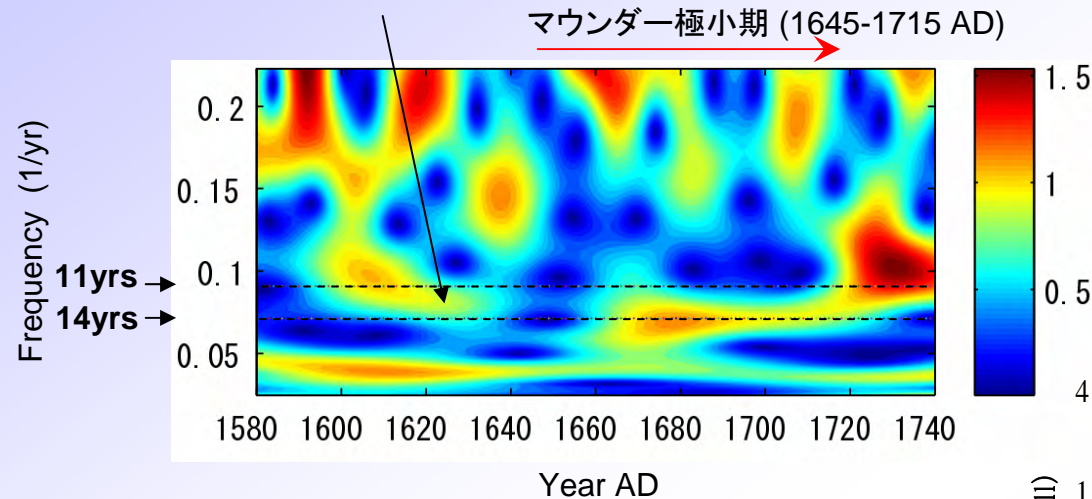
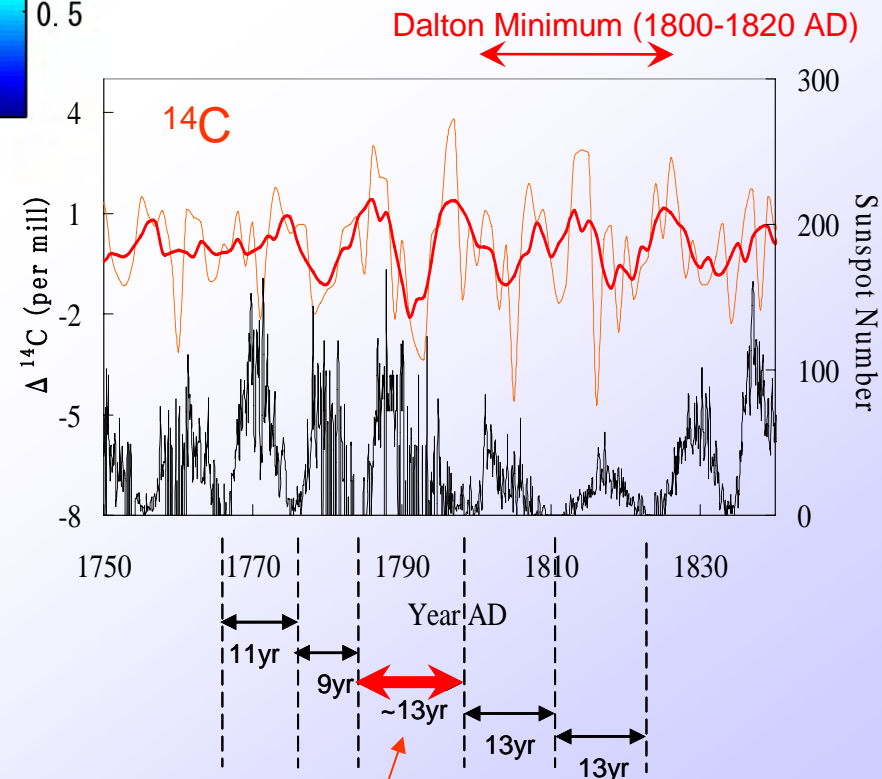


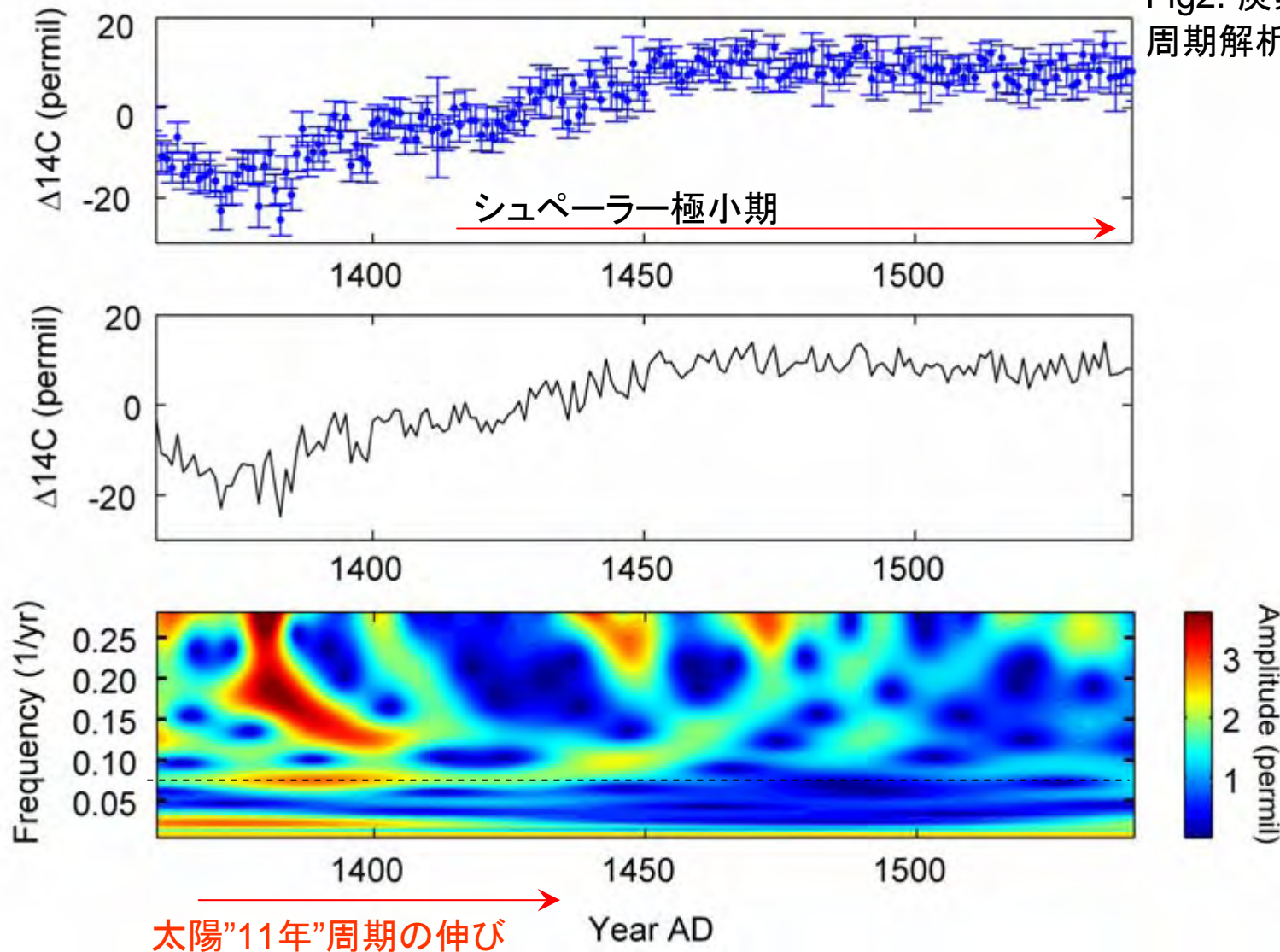
Fig1. Wavelet spectrum of carbon-14 content obtained by Stuiver et al. (1998)



ダルトン極小期(継続時間: ~20年)の場合  
直前の1太陽サイクルが ~13年程度に伸びる



Fig2. 炭素14データの  
周期解析結果



シュペーラー極小期(継続時間:120年)の場合、直前の2太陽サイクルが~13年程度に伸びる

## 結論

太陽サイクルの期間は通常11年程度であるが、1996年に始まった太陽サイクル23の期間は12～13年程度に伸びており、ダルトン極小期が発生する直前の様相に似ている。今後、黒点が増えていったとしても、通常の1/3程度の数の黒点しか現れない可能性がある。

太陽サイクル24の期間が再び12～13年程度に伸びた場合は、マウンダー極小期やシュペーラー極小期などのような70年以上の無黒点期が発生する可能性がある。

# まとめと展望

- 気候が持つ数十年スケールの複雑な変動は、太陽と宇宙線が持つ複雑な周期的変動の影響で説明できる可能性がある。

～200年スケールで変化する太陽活動の”11年”周期（9年～15年）  
太陽磁場反転の影響による”22年周期”（18～30年）

- 宇宙線が気候を左右するメカニズムは未だ解明されていない

- イオン化率の変化が雲形成に与える影響の素過程を調べる実験に期待

・スイスCERNでの基礎実験（SKY、CLOUD実験）

・国内でも名古屋大、甲南大などによりエアロゾル生成実験がスタート

- 気候モデルへのインプットとして

- 日射量の可変性に関する正確な理解

- 太陽活動度レベルの長期変動（周期長の復元にもとづく）