# 3. 気候変動と太陽活動のリンケージ 太陽活動は、気候にどう影響するのか?

3.1 日射量変動は気候にどう影響するか?
3.2 UV変動は気候にどう影響するか?
3.3 銀河宇宙線強度は、気候にどう影響するか?
3.4 太陽活動は、気候変動にどの程度影響するか?

# 3.1日射量変動は気候にどう影響するのか?

# Zebiak-Cane Model

Regional model: Tropical Pacific atmosphere-ocean



入力データ:

14C生成率変動を0.2%にスケーリングした、太陽放射変動







# 1860-2000の観測データをNINO3 indexに 回帰した時の北大西洋の風の場



(Emile-Geay et al., 2007 PO)

# まとめ 1

- 0.2%の振幅で太陽放射照度変動を与えれば、太平洋赤道域は、それに応答して500~1000年周期の ENSO的気候変動を生み出す。(また、ca. 220年周期のの変動のca. 1500年周期での振幅変調も生み出す)
- Orbital-scale での日射量変動を加えると、その影響 が減ったHolocene後半に、ENSO variabilityや数百年 スケールの変動のしんぷくが大きくなる。
- ・こうしたENSO的パターン変動影響は、北大西洋にまで及ぶ。
- こうした、太陽放射照度変動に対する太平洋赤道域の応答は、微細な太陽活動の影響を増幅する役割を果たしていた可能性がある。



205 nm フラックスと1.5 hPa面でのオゾン含有率



Fig. 1. Superposition of high-pass filtered (35-day running mean removed) equatorial ozone mixing ratio at 1.5 hPa (heavy line) and solar 205 nm flux (thin line) as measured by the Nimbus 7 SBUV instrument near the maximum of solar cycle 21. (Reproduced from Hood, 1986).

20100223-24森羅万象学校

(Hood, 1999 JASTP)





Fig. 4. Two-dimensional model calculation of the response of total ozone to solar ultra-violet flux variations occuring on the 27-day solar rotation time scale. (Reproduced from Brasseur, 1993.)

(Hood, 1999 JASTP)

#### Maunder Minimumにおける寒冷化のシミュレーション結果 (太陽活動のオゾン濃度への影響を考慮)



Figure 1. Surface temperature change (in °C) from 1780 to 1680 in the GCM. NH annual average (left) and November to April NH extratropics (right)are shown. Nearly all points are statistically significant (not shown) because of the large number of model years.

(Shindell et al., 2001)



Fig. 2. The leading EOF of NH extratropical November-to-April SLP over the last 40 years of the 1680 and 1780 simulations (left), and the SLP change from 1780 to 1680 (right), both in mbar (mb). The SLP difference is filtered in EOF space by showing the projection onto the first 20 EOFs, which contain 70% of the total difference. This removes some of the high-frequency noise in the model induced by overly large energies at high wavenumbers. Hatched areas indicate statistical significance at the 90% level. (Shindell et al., 2001)

#### シミュレーションによる気候への影響評価



太陽活動がピークの時のDJF の降水量の平均値からのずれ (11のピークの平均)

Top down: 太陽活動に伴うUV変化 の成層圏オゾンへの影響 Bottom up: 亜熱帯域における加熱 →ITCZにおける降水強化→ハドレー 循環、ウォーカー循環強化→東赤 道太平洋における湧昇→東赤道太 平洋域の雲減少 の2つのメカニズムを入れたシミュ レーション結果

(Meehl et al., 2009 Science modified by Kerr)

#### 3.3銀河宇宙線強度は、気候にどう影響するか?



#### GCRはaerosol のイオン化を促進



空気のきれいな対流圏下部では、特にイオン化がこの過程を律速 Cloud dropretの濃度上昇は、雲の反射率を上げると共に、雨を抑制し、雲の生存期 間を増加させる

20100223-24森羅万象学校



20100223-24森羅万象学校

(Carslaw et al., 2002 Science)

#### 3.4太陽活動は、気候変動にどの程度影響するか?

#### 過去117年間の地表温度の変動

この変動を、ENSO、火山活動、太陽活動、人間活動の影響の線形結合で表現(重回帰)

 $T_{R}(t) = c_{0} + c_{E}E(t - \Delta t_{E}) + c_{V}V(t - \Delta t_{V}) + c_{S}S(t - \Delta t_{S}) + c_{A}A(t - \Delta t_{A})$ 

ただし、∆はlag で、それぞれ4, 6,2, 120 か月を仮定









まとめ

- 太陽総放射照度変動は、太平洋赤道域でBjerknes
   Feedbackにより増幅されている可能性がある。
- UVによる成層圏でのオゾンの生成と、オゾンによる 温室効果が、中低緯度における大気循環変動を通じて気候に影響を及ぼしている可能性が高い。
- GCRが、ionの生成を通じて、対流圏下部の雲量を 制御している可能性はあるが、まだ十分に検証さ れていない。

20100223-24森羅万象学校

#### 水惑星ステージの地球環境進化

一現在の地球環境は、必然か偶然か?一

# 暗い太陽のパラドックス

・地質記録によれば、38億年前以降、海はずっと存在し続けた。
・一方、恒星進化論によれば、44億年の太陽は、現在より30%暗かった。
・その場合、大気組成が現在と同じであれば、地球表面は全面凍結してそこから抜けだせない筈である。
・これは、現在の地球の状態と矛盾する。

## 44億年前の太陽は、現在より30%暗かった



地球が出来てからの時間(10臆年)

太陽の内部で、核融合反応により水素が燃焼してヘリウムが合成され、太陽中心部の熱、密度が上昇し、次第に明るくなる。(恒星進化論)

#### 太陽輝度と安定な地表状態との関係



南北一次元エネルギーバランスモデルによる安定解 (現在の大気組成を仮定) North (1981)に加筆

## セーガンは、~40億年前の地球大気 が強い温室効果を持っていたため、全 球凍結を免れたと考えた。

その後40億年間、海が存在し続けたなら、 なんらかのメカニズムが地球大気組成を調整し、 ~30%の太陽輝度の増加の影響を相殺する様に、 大気組成を変化させてきた事になる。 海が凍結したり蒸発したりせずに存続し続ける為には、太陽輝度の増大を打ち消す様に、大気中のCO2が減少しなければならない。



#### その様な自動制御メカニズムは、存在したか? 存在したとすれば、どの様なメカニズムか?

それを知るには、**水惑星ステージの地球の大気組成が、** どの様に維持されているのかを理解する必要がある。

|            | 地球(現在)                  | 地球*                         | 金星                   | 火星                  |
|------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| 大気組成(体積%)  |                         |                             |                      |                     |
| $N_2$      | 78.1                    | 1.0                         | 1.8                  | 2.7                 |
| $O_2$      | 20.9                    | —                           |                      |                     |
| Ar         | 0.9                     | 0.01                        | 0.02                 | 1.6                 |
| $CO_2$     | 0.035                   | 99.0                        | 98.1                 | 95.3                |
| 大気圧        | 1 気圧                    | ~80 気圧                      | 90 気圧                | 0.006 気圧            |
| 惑星アルベド A   | 0.3                     | >0.3****                    | 0.77                 | 0.15                |
| 入射太陽放射 S   | $1370 \text{ W/m}^2$    | $1370 \text{ W/m}^2$        | $2620 \text{ W/m}^2$ | $590 \text{ W/m}^2$ |
| 正味入射太陽放射** | $240 \text{ W/m}^2$     | $< 240 \text{ W/m}^2$       | $150 \text{ W/m}^2$  | $125 \text{ W/m}^2$ |
| 有効放射温度***  | $-18^{\circ}\mathrm{C}$ | $-18^{\circ}\mathrm{C}$     | $-46\degree C$       | $-56^{\circ}C$      |
| 全球平均温度     | 15°C                    | $\sim 200^{\circ} C^{****}$ | 450°C                | $-30^{\circ}C$      |
| 水の存在量      | 270 気圧相当                | 270 気圧相当                    | 極微量                  | (不明)                |
| 水の存在形態     | 海洋                      | 海洋,水蒸気                      | 水蒸気                  | 極冠,永久凍十             |

表 5.3 大気を持つ地球型惑星(地球, 金星, 火星)の表層環境の比較.

**地球大気進化**:大気は、地球環境進化過程で、CO<sub>2</sub>主体の大気から窒素、酸素 主体の大気へと変わって行った。 それは、主にCO<sub>2</sub>の固定とO<sub>2</sub>の放出による。

岩波「地球進化論」より

## 地球におけるCO2の固定とO2の放出過程

#### CO2の固定:

- 1) 岩石の化学的風化と石灰岩の堆積
- $(Ca_x, Mg_{(1-x)})SiO_3 + CO_2 \rightarrow (Ca_x, Mg_{(1-x)})CO_3 \downarrow + SiO_2$
- 2) 光合成による有機物の形成と堆積
- $CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O \downarrow + O_2 \uparrow$

O₂の放出:

2)の過程は、酸素の放出過程でもある

#### しかし、CO<sub>2</sub>が大気中から一方的に固定され、O<sub>2</sub>が 大気に一方的に放出されている訳ではない。

#### 炭素、酸素は地球システム内で循環している

そして、地表温度および大気中のCO2濃度が高まる程、化学風化速度も早くなる

## 地球規模での炭素循環



図 5.7 グローバル炭素循環の概要(Tajika and Matsui, 1992 にもとづく).





この様に大気組成が絶妙にコントロールされて、 地球環境が維持されてきた?







Fig. 4. Vertical exposure of a Late Proterozoic (~ 650 Ma) periglacial sand wedge 3 m deep (2) in brecciated mid-Proterozoic quartzite at the Cattle Grid copper mine, South Australia. A near-vertical, diverging lamination that parallels the wedge margins is discernible within the wedge. Deformed sand wedges of an earlier generation (1) occur within the breccia and a third-generation wedge (3) occurs within overlying Late Proterozoic aeolian sandstone (Whyalla Sandstone) and the uppermost part of the large wedge. Bedding in breccia and sandstone is turned upward adjacent to the wedges. Numerous such sand wedges formed near sea level in the area bordering the Adelaide Geosyncline during the Marinoan Glaciation at ~ 650 Ma. Identical sand wedges are forming today in the periglacial dry valleys of Antarctica and in the Arctic. The structures indicate a very cold, arid, strongly seasonal climate.

#### オーストラリア東部8.5億年前のSand Wedge (from Williams, 1993)



では、いかにして全球凍結状態から脱出できたのか?



南北一次元エネルギーバランスモデルによる安定解 (現在の大気組成を仮定) North (1981)に加筆

#### その鍵は、炭素循環にあった。

全球凍結が起こると、化学風化が停止する。 ↓ 一方、地球内部からのCO2脱ガスは続く。 ↓ その結果、大気中のCO2濃度は上昇し続け、 ついには氷床の融解が起こり、 全球凍結状態から脱出できる。





<sup>(</sup>田近、2000)

では、全球凍結のきっかけとなった 大気中CO,分圧の減少は、何故起こったのか?

超大陸の形成に伴なう火山活動の低下?

生物の進化に伴なう炭素固定効率の増加?

大気酸素レベルの上昇に伴なう風化効率の増加?

(まだ、明らかにされていない)

いずれにせよ、炭素循環境界条件の非可逆的変化により、 地球の気候モードがジャンプしたものと考えられる。 炭素循環モードの不可逆的変化によりCO2分圧が不連続的に減少



# ここまでのまとめ(1)

- ・地球表層の気候状態には、複数の安定モード が存在する。
- 各安定モードは、(炭素循環などの)負のフィードバックで維持されている。
- システムの境界条件(エネルギー供給速度、 CO2供給速度、CO2固定速度など)がある敷居値
   を越えると、システムは不安定になり、環境モードは別のモードへと急激にジャンプする。

# 顕生代の気候は、地球外要因で制御 されたのか?

20100223-24森羅万象学校



(from Veizer et al., 2000)



(from Veizer et al., 2000)





Figure 2. The cosmic ray flux  $(\Phi)$  and tropical temperature anomaly  $(\Delta T)$  variations over the Phanerozoic. The upper curves describe the reconstructed CRF using iron meteorite exposure age data (Shaviy, 2002b). The blue line depicts the nominal CRF, while the yellow shading delineates the allowed error range. The two dashed curves are additional CRF reconstructions that fit within the acceptable range (together with the blue line, these three curves denote the three CRF reconstructions used in the model simulations). The red curve describes the nominal CRF reconstruction after its period was fine tuned to best fit the low-latitude temperature anomaly (i.e., it is the "blue" reconstruction, after the exact CRF periodicity was fine tuned, within the CRF reconstruction error). The bottom black curve depicts the 10/50 m.y. (see Fig. 1) smoothed temperature anomaly  $(\Delta T)$  from Veizer et al. (2000). The red line is the predicted  $\Delta T_{model}$  for the red curve above, taking into account also the secular long-term linear contribution (term  $B \times t$  in equation 1). The green line is the residual. The largest residual is at 250 m.y. B.P., where only a few measurements of  $\delta^{18}O$  exist due to the dearth of fossils subsequent to the largest extinction event in Earth history. The top blue bars are as in Figure 1.

(Shaviv and Veizer, 2003)





Figure 4. pH-correction for shallow-marine  $\delta^{18}$ O carbonate curve. A: The blue curve corresponds to temperature deviations relative to today calculated by Shaviv and Veizer (2003) from the ''10/50''  $\delta^{18}O$  compilation presented in Veizer et al. (2000), where the original data (Veizer et al., 1999) were detrended and then averaged in 10 m.y. time-steps using a 50 m.y. moving window. In the two remaining curves, data from the blue curve have been adjusted for pH effects due to changes in seawater Ca++ concentration (after Horita et al., 2002), and CO<sub>2</sub> based either on GEOCARB III or proxies. A sensitivity analysis was performed on the GEOCARB + Ca++ curve by holding Ca++ levels constant (lower bound of orange band), or by allowing the saturation state of CaCO<sub>3</sub> in the ocean to vary through time ( $\Omega$ ; upper bound; see text for details). B: Cosmic ray flux (relative to the present day) as reconstructed by Shaviv (2002). C: Intervals of glacial and cool climates, as in Fig. 2B.

(Royer et al., 2004)

20100223-24森羅万象学校

# \*\*モデル結果と古気候記録の比較



古気候記録 (MWP-LIA)



モデル結果 (MWP-LIA)



Fig. 3. Estimated solar radiative forcing (top) and global surface temperature anomalies, from both GISS model simulations (29) and observations. One canonical view is that solar forcing provides a good match for the observations before 1800, volcanic forcing becomes important during the 19th century, and anthropogenic forcing begins dominating during the 20th century. [Figure courtesy of J. Lean.]

#### Arctic Oscillation at Sea Level during Winter (January through March)

From: North Pacific Climate Variability James E. Overland, PMEL Anne B. Hollowed, AFSC Jennifer Miletta Adams and Nicholas A. Bond, JISAO

Decadal difference: 1989 to 1998 - 1979 to 1988 (red contours are +, blue are -, 2 mb, no 0)

Composite for positive and negative AO phases, 1979-1998 (same contours)

Arctic Oscillation in the Zonal Wind at 300 mb during Winter (January through March)



Decadal difference: 1989 to 1998 - 1979 to 1988 (red contours are +, blue are -, 2 m/s, no 0) Composite for positive and negative AO phases, 1979-1998 (same contours) From: North Pacific Climate Variability James E. Overland, PMEL Anne B. Hollowed, AFSC

Jennifer Miletta Adams and Nicholas A. Bond, JISAO

# Aleutian Low Central Pressure Anomalies Arctic Oscillation (AO) Index Values Pacific/North America (PNA) Index Values 1960 1970 1980 1990

Timeseries of Three January-February North Pacific Indices

From: North Pacific Climate Variability James E. Overland, PMEL Anne B. Hollowed, AFSC Jennifer Miletta Adams and Nicholas A. Bond, JISAO

#### January-February Sea Level Pressure Climatology (1958-1997)



From: North Pacific Climate Variability James E. Overland, PMEL Anne B. Hollowed, AFSC Jennifer Miletta Adams and Nicholas A. Bond, JISAO



Fig. 1. Correlation of the disc-integrated Ca II solar emission, K, with a residual time series, S<sub>C</sub> =  $S - S_0 (1 + P_S)$ , obtained by removing the sunspot blocking effect [Foukal, 1981], Ps, and the quiet sun,  $S_0 = 1366.9 \text{ W/m}^2$ , from the ACRIM measurements of the total solar irradiance. S. This residual time series represents the contribution to the total solar irradiance of excess emission from bright sources. From linear regression,  $S_{C} = -(13.6 \pm 0.5) + (160 \pm 6) \times K$ with r = 0.9. The short dashed line indicates contemporary solar minima (1976 and 1986) values. The long dashed line indicates the values we estimate for the Sun in the absence of surface magnetism (sunspots, plages and network) and the dash-dot line is an estimate for the Maunder Minimum Sun from White et al. [1992].

TABLE 1. Solar Radiative Output During the Maunder Minimum

|                             | CaII Emission |             | Total Solar Irradiance |                             |
|-----------------------------|---------------|-------------|------------------------|-----------------------------|
| CASE                        | к             | нк          | S                      | $(s-s_A)/s_A^{\chi_{100}}$  |
| no spots, plage or network  | 0.0758        | 0.156       | 1365.43                | -0.15%                      |
| non-cycling stars (average) | 0.0686        | 0.145       | 1364.28                | -0.24%                      |
| minimum possible Sun        | 0.0588        | 0.130       | 1362.71                | -0.35%                      |
|                             |               | (Lean et al | 1992)                  | S <sub>A</sub> =1367.54 W/1 |



Emile-Geay et al., 2007: El Niño as a mediator of the solar influence on climate, Paleoceanography, Volume 22, Issue 3

Hood, 1999: Effects of short-term solar uv variability on the stratosphere, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 61, Issue 1-2, pp. 45-51

Shindell et al., 2001: Solar Forcing of Regional Climate Change During the Maunder Minimum, Science, Volume 294, Issue 5549, pp. 2149-2152

Meehl et al., 2009: Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing, Science, Volume 325, Issue 5944, pp. 1114

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

Carslaw et al., 2002: Cosmic Rays, Clouds, and Climate, Science, Volume 298, Issue 5599, pp. 1732-1737

Tajika and Matsui, Evolution of terrestrial proto-CO2 atmosphere coupled with thermal history of the earth, Earth and Planetary Science Letters (ISSN 0012-821X), vol. 113, no. 1-2, p. 251-266, 1992

Veizer et al., Evidence for decoupling of atmospheric CO2 and global climate during the Phanerozoic eon, Nature, Volume 408, Issue 6813, pp. 698-701, 2000

Shaviv and Veizer, Celestial driver of Phanerozoic climate, EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003,

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

Lean and Rind, How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006, Geophysical Research Letters, Volume 35, Issue 18, 2008