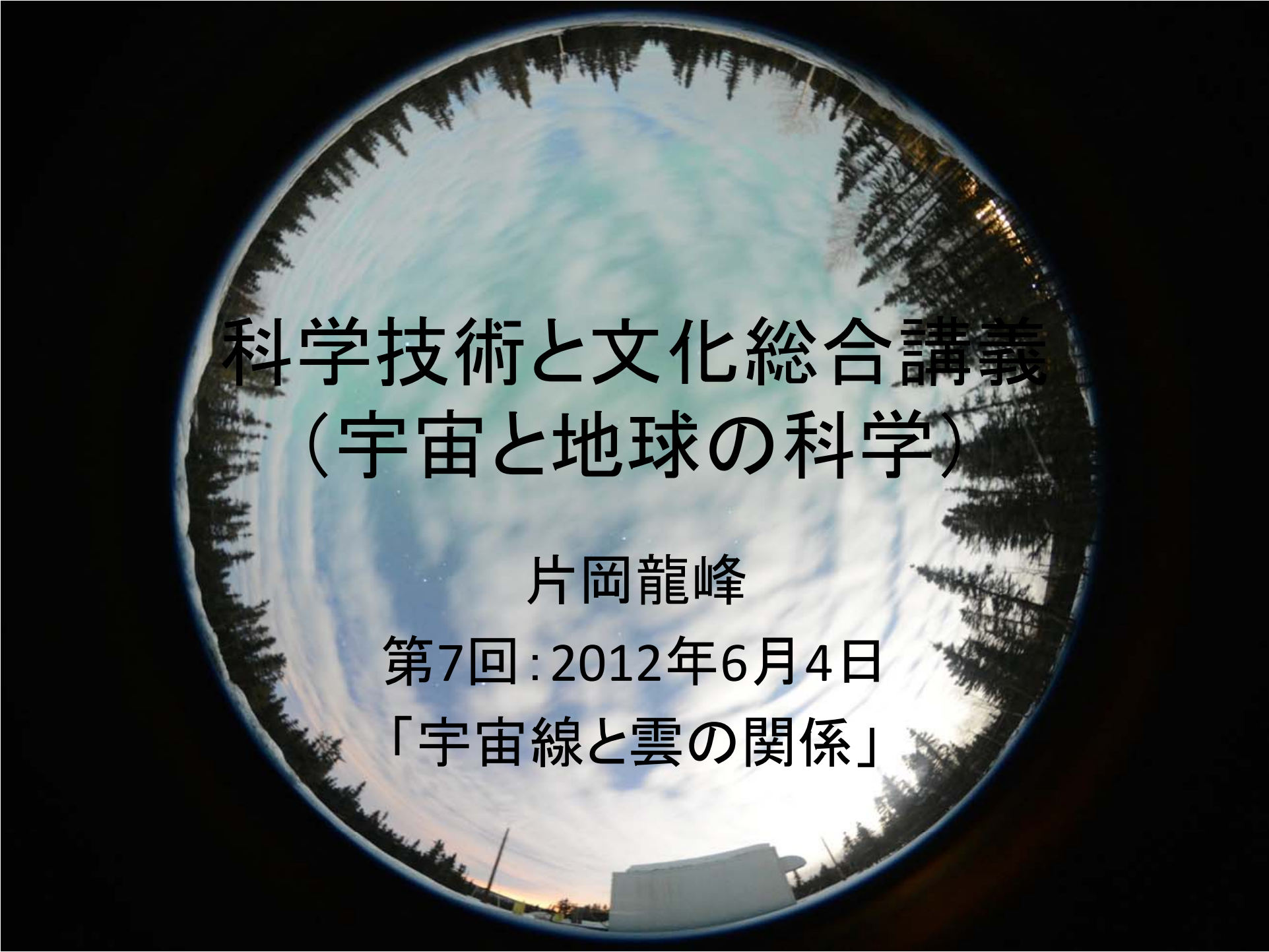




科学技術と文化総合講義 (宇宙と地球の科学)

片岡龍峰

第7回: 2012年6月4日

「宇宙線と雲の関係」

授業内容

- 1. 授業ガイダンス(オーロラ上映あり) 4月16日
- 2. 太陽地球環境1(大地から太陽系の果てまで)
- 3. 太陽地球環境2(生命を守る3つの盾「太陽風・地磁気・大気」) 4月23日
- 4. 太陽地球環境3(生命を脅かす3つの槍「宇宙線、宇宙塵、太陽紫外線」) 4月30日
- 5. 宇宙災害1(磁気嵐と大停電) 5月7日
- 6. 宇宙災害2(放射線帯と人工衛星障害) 5月21日(休講) 5月14日
- 7. 宇宙災害3(銀河宇宙線と太陽放射線被ばく) 5月28日
- 8. 宇宙天気予報1(世界の宇宙天気モニター) 6月4日
- 9. 宇宙天気予報2(宇宙天気の数値予報) 6月18日(休講) 6月11日
- 10. 太陽気候関係1(マウンダー極小期と魔女狩り) 6月25日(休講)
- 11. 太陽気候関係2(宇宙線雲仮説) 7月2日
- 12. 宇宙史と地球史1(暗い若い太陽のパラドックス) 7月9日
- 13. 宇宙史と地球史2(超新星と大絶滅) 7月16日
- 14. 宇宙史と地球史3(暗黒星雲と雪玉地球) 7月23日
- 15. まとめ

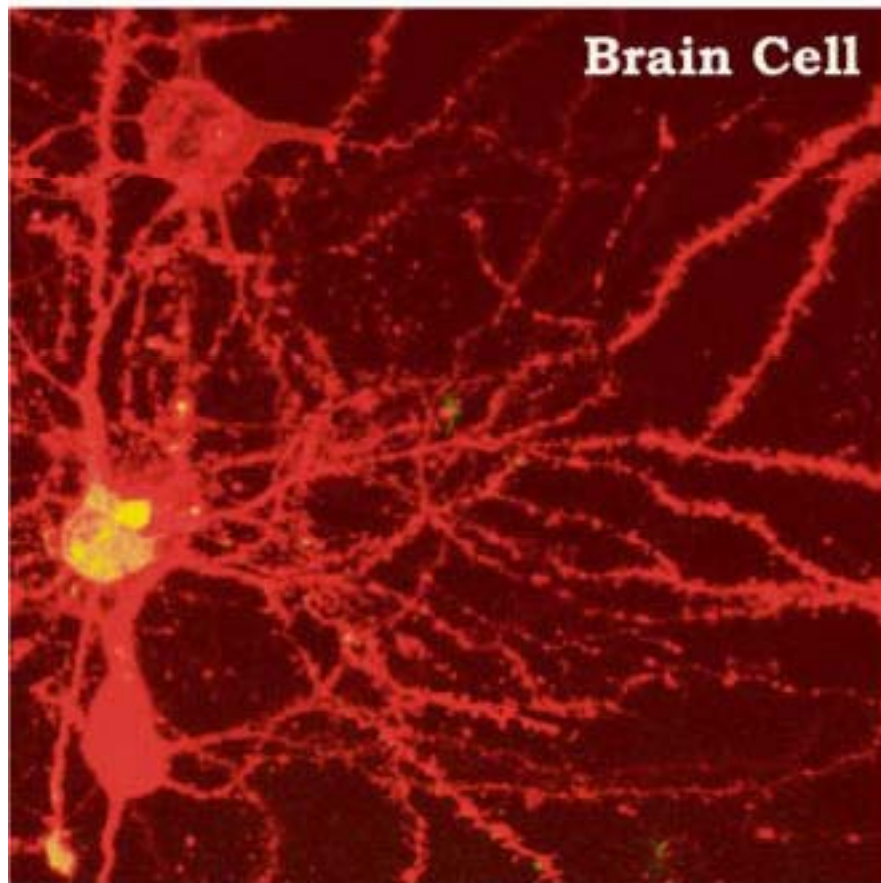
* 授業の内容は進み具合や最新の話題に合わせて適宜調整します。

前回よりも優れたレポートを書く人が桁違いに増えました。レベルアップはあからさまで急速。

脳と宇宙、というレポートに注目

<http://www.brain-book.com/report/cell-brain.html>

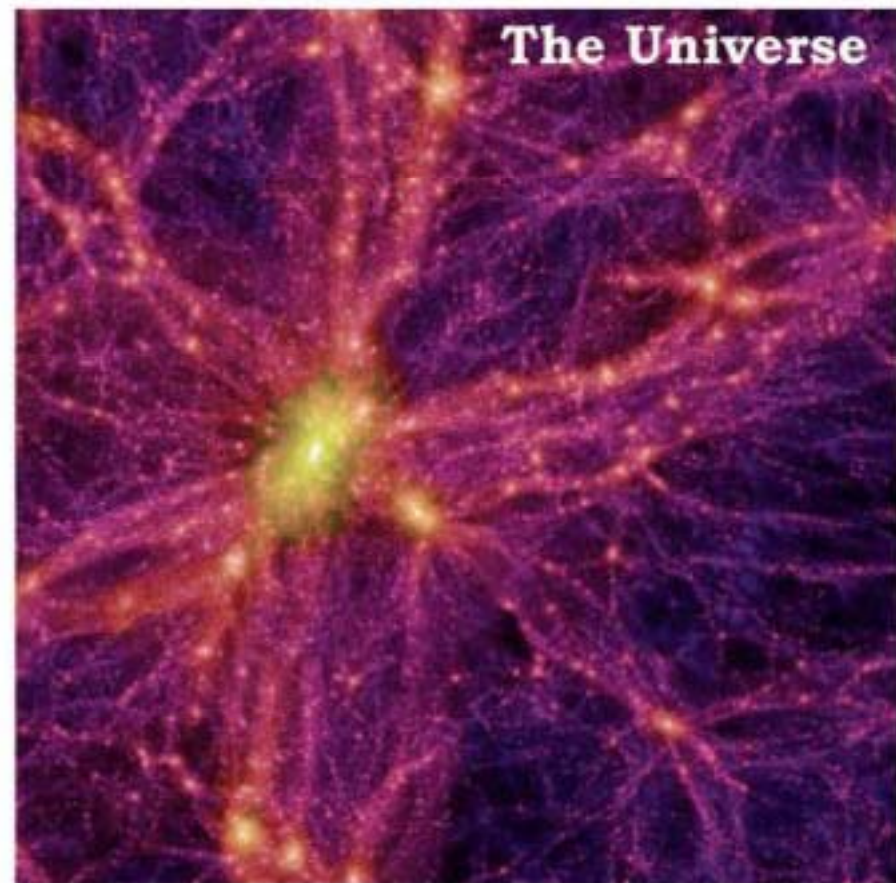
One is only micrometers wide. The other is billions of light-years across. One shows neurons in a mouse brain. The other is a simulated image of the universe. Together they suggest the surprisingly similar patterns found in vastly different natural phenomena. *DAVID CONSTANTINE*



Mark Miller

Mark Miller, a doctoral student at Brandeis University, is researching how particular types of neurons in the brain are connected to one another. By staining thin slices of a mouse's brain, he can identify the connections visually. The image above shows three neuron cells on the left (two red and one yellow) and their connections.

Source: Mark Miller, Brandeis University; Virgo Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations; www.visualcomplexity.com



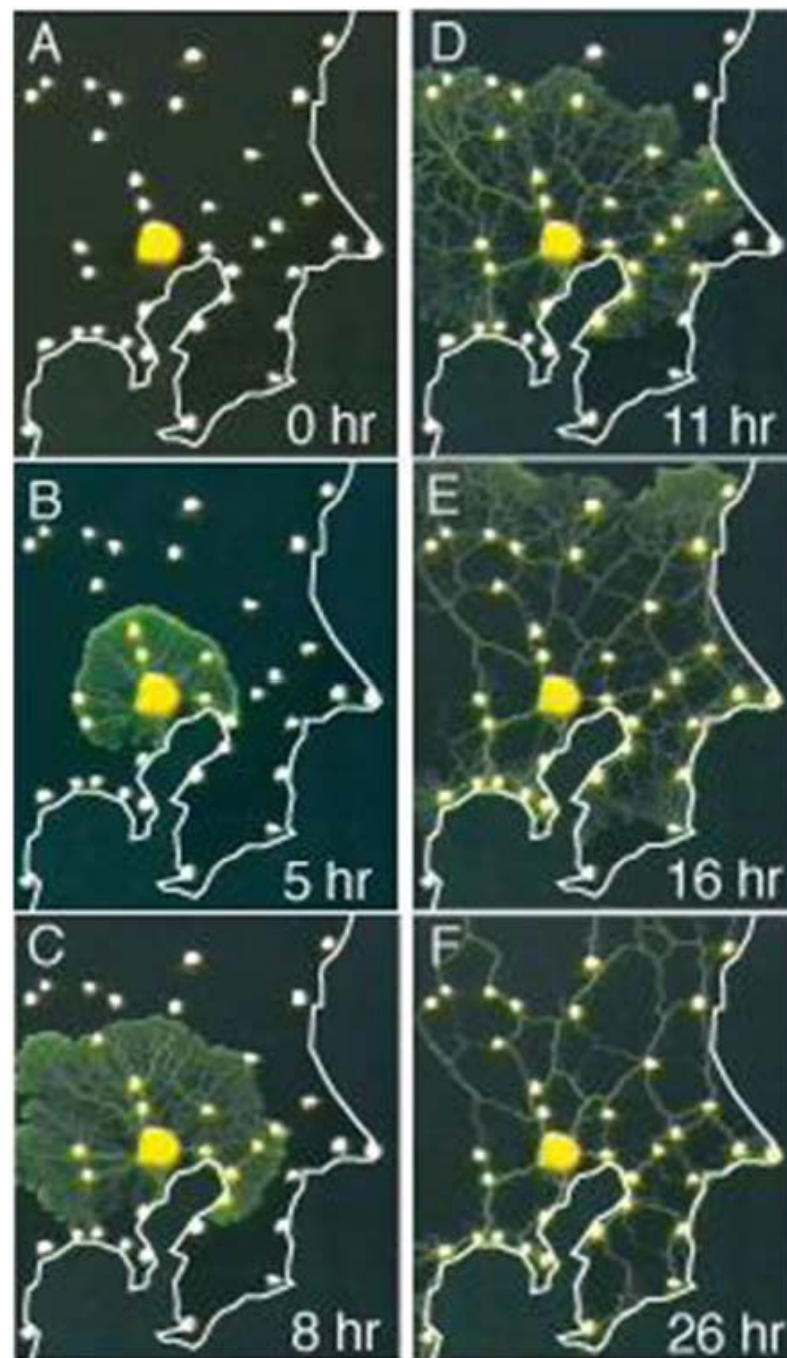
Virgo Consortium

An international group of astrophysicists used a computer simulation last year to recreate how the universe grew and evolved. The simulation image above is a snapshot of the present universe that features a large cluster of galaxies (bright yellow) surrounded by thousands of stars, galaxies and dark matter (web).

The New York Times

粘菌で鉄道網整備

- 関東の形状をした容器。
- 主要都市の場所に餌。
- 山手線内を1つの大きな餌とし、そこに粘菌を置く。
- しばらくすると餌の周りに集まった粘菌同士はお互いを管状の輸送ネットワークでつなぐ。
- 最終的には、主要駅を結ぶ粘菌の最適ネットワークが完成。
- イグノーベル賞



チャールズ・ウィルソン(1869-1959)

- 1927年にノーベル物理学賞。
 - イオンや放射線の飛跡が発生する霧箱の発明。放射線の研究者たちの重要な道具として用いられた。
- 気象学に興味を持ち1893年に雲とその性質の研究を始めた。しばしばベン・ネビス山の気象観測所において、雲の発生を観察を行った。
- ケンブリッジの実験室で、実験装置を使って雲を発生させる実験を始め、密封した容器に湿った空気をいれて減圧(断熱膨張)させることによって霧を発生させた。



チャールズ・ディケンズ(1812-1870)

- ビクトリア朝(1837-1901)を代表するイギリスの小説家。工業国であり空気汚染国だった英国。
- 「どこもかしこも霧。霧は川上では、川中の緑の小島や牧草地帯の間を流れていく。反対に川下では、乗船用の階段の間を汚しながら流れ、大きい都市の港湾を汚染していく。・・・たまたま端を通りかかった人は、霧の空の下を欄干越しに垣間見て、周囲全てが霧なので、あたかも、気球で上空まで上がり、霧状の雲の中をさまよっているかのよう感じた。」荒涼館(Bleak House)



クロード・モネ(1840-1926)



The Thames Below Westminster (1871)

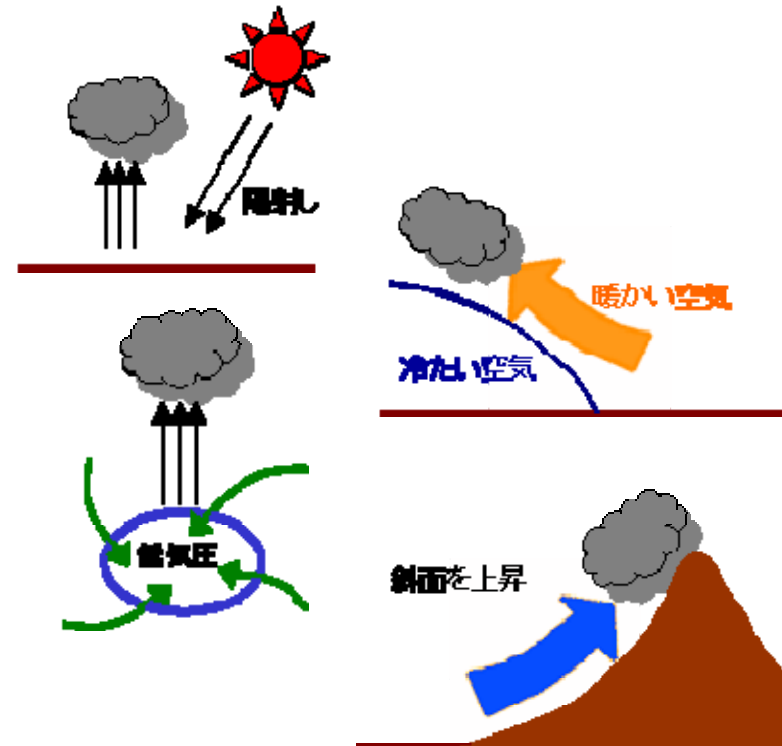


宇宙線と雲 → 地球が霧箱？

@nobi パリ上空雲の上に抜けたら飛行機雲だらけでビックリした。yfrog.com/kl1sbmqj

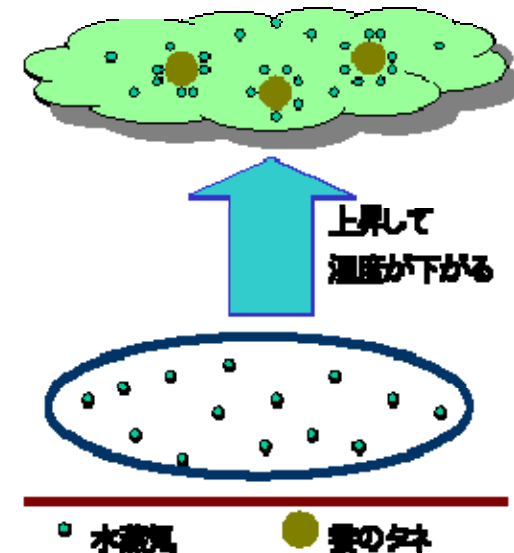
雲のできる仕組み1

- 雲は、水蒸気を含む空気が上昇し冷やされることによってできる。
- 上空ほど気圧が低く、上昇した空気は膨張して温度が下がる。
- 空気が上昇するパターンには次のようなものがある。
 - 太陽の熱で暖められて、空気が軽くなるために上昇する。
 - 冷たい空気と暖かい空気がぶつかり、暖かい空気が上昇する。
 - 低気圧に向かって空気が流れ込み、上昇気流が起こる。
 - 風の影響で、空気が山の斜面を昇る
 - 上空へ寒気が流入し、大気の状態が不安定となり上昇気流が発生する。



雲のできる仕組み2

- 水蒸気を含んだ空気の温度が下がる。
 - 水蒸気として含むことのできる水分の限界＝飽和水蒸気量が少なくなる。
 - 非常に空気が澄んでいる場合には、露点より温度が下がっても、限界より多い水分を含む状態になる。この状態を「過飽和」という。
- 気体である水蒸気から液体である水の粒（雲）への変化には、空気中にある海水のしぶきからできた塩の小さな粒や火山の噴煙及び工場からの煤煙などの雲のタネ(核)が必要。
- 雲核に水蒸気が付着し、次第に大きくなって水の粒となり、雲が出来る。



南極は、吐く息が白くならない

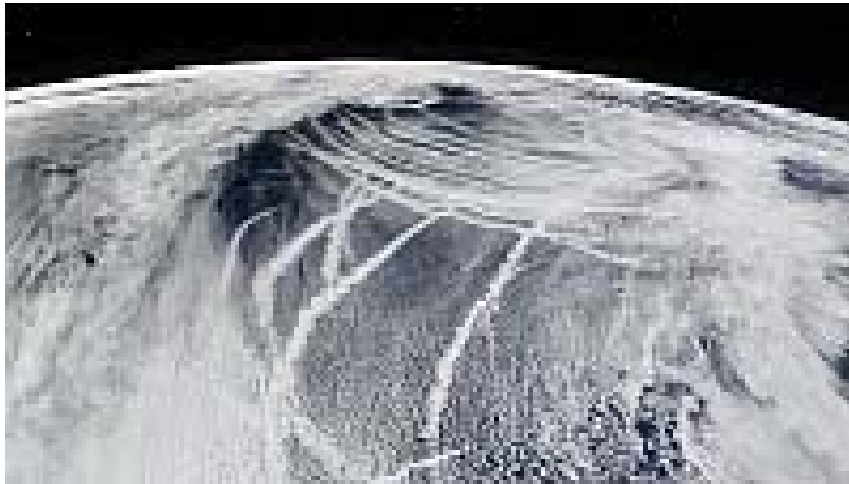
- 理由は、南極のきれいな空気。
 - 気温が低いと息が白く見えるのは、息の中にふくまれる水蒸気が、冷たい空気に冷やされて水滴になるため。
 - 水蒸気は小さなチリやホコリを核にして、水滴になる。ところが、南極の空気にはチリやホコリがないから、水蒸気がくっつかず、水滴もできない。
 - 気温がマイナス50℃になると、かすかにソーダ水のようなシュワーという音がして、息の中の水蒸気がそのまま凍る。
 - この音を「星のささやき」と言う。



▲カニクイアザラシ

宇宙からはっきり見える

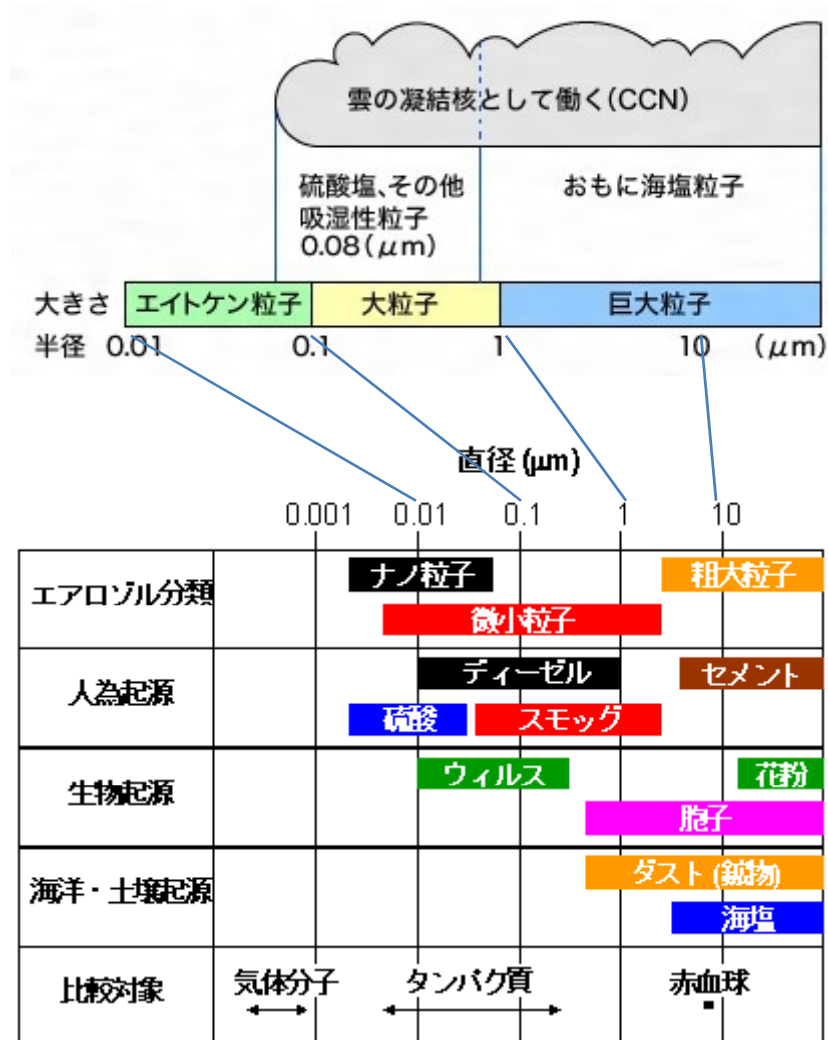
船舶の排気ガスが作る雲



船舶の排気ガス中の硫黄酸化物に水蒸気が凝集

雲が浮いているのはなぜ？

エアロゾルと雲



雲の反射率が増加し冷却に作用

エアロゾル数の増加により雲粒数が増加

エアロゾルが雲凝結核となって雲粒が生成

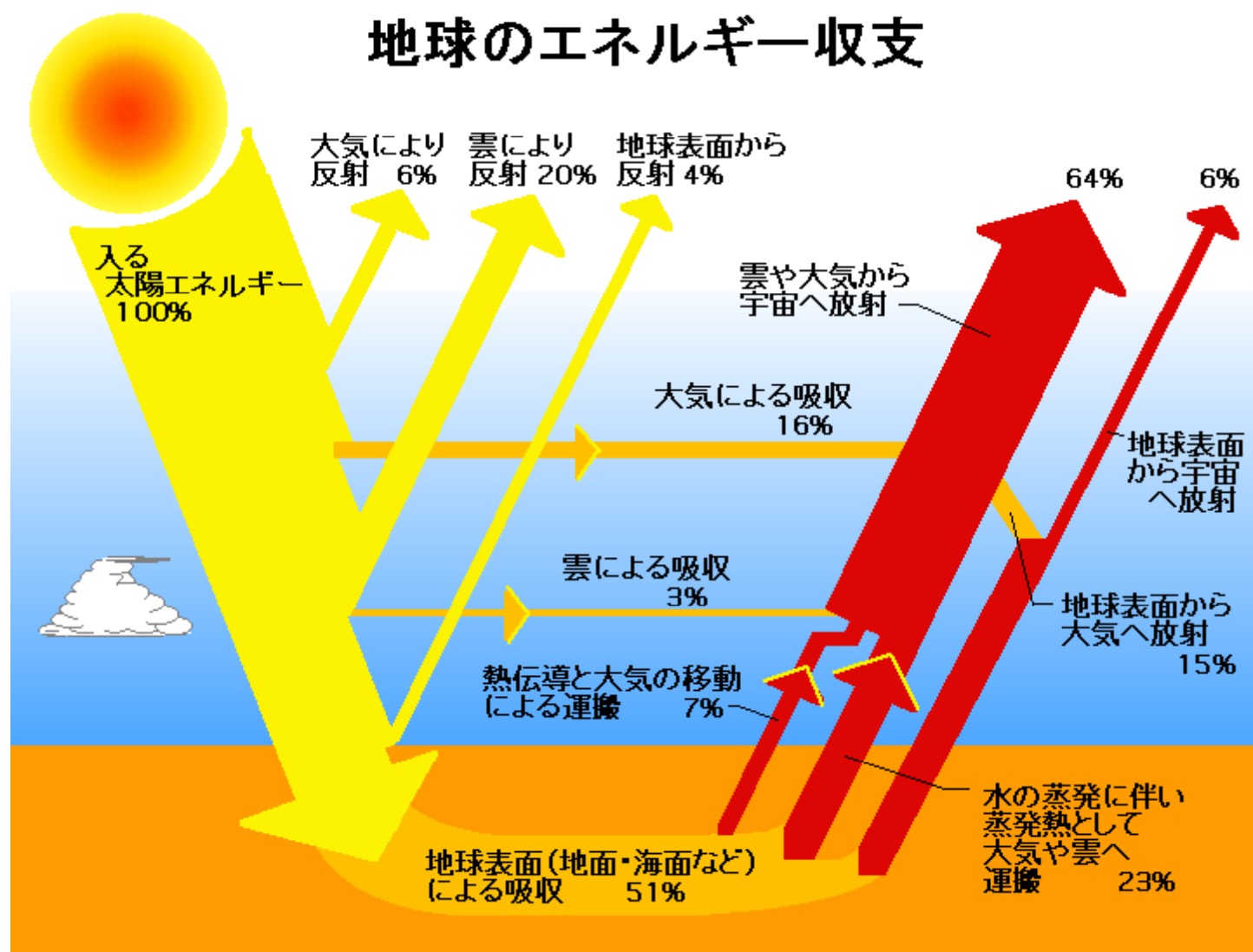
上昇流

エアロゾル

雲粒の直径は3～10 μm で、ヒトの赤血球の直径(6～8 μm)と同じくらい。

最も速い終端速度で秒速1cmで落下するが、普通の上昇気流は平均風速が秒速1m以上であるため、風が斜め方向に吹くことを考慮しても十分空中に浮く。

雲の変化は地球のエネルギー収支を大きく変える





低い雲は光を反射して地球を冷やす(日傘効果)

宇宙線雲仮説

- 宇宙線が増える。
 - 低い雲が増える。
 - 地球が寒くなる。
- Svensmark (1997)



3%の雲量変化は地表に届く放射エネルギーを0.8-1.7W/m²ほど変化させる。

高層雲

中層雲

低層雲

赤は宇宙線

Marsh & Svensmark 2000

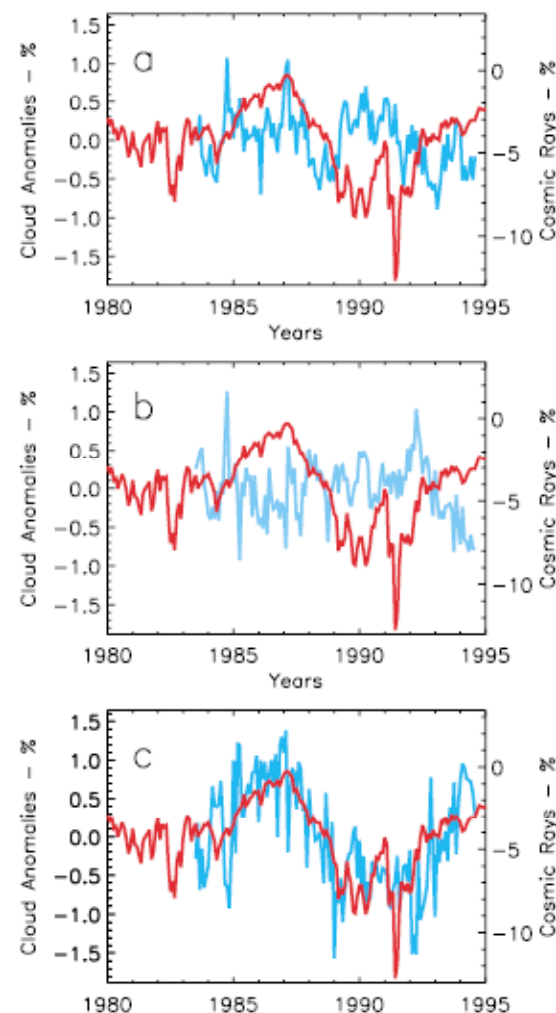
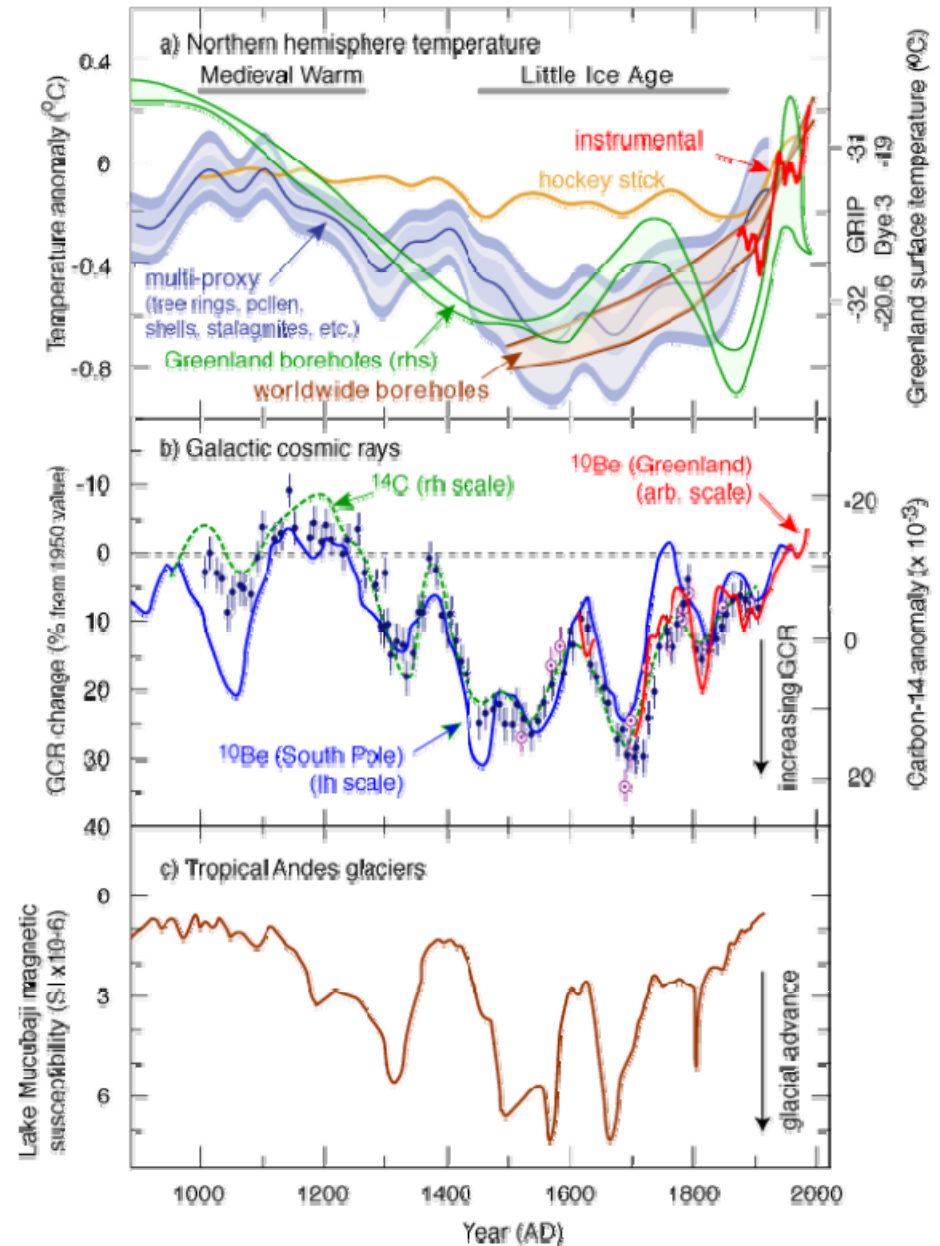


FIG. 1 (color). Global average of monthly cloud anomalies for (a) high (<440 hPa), (b) middle (440–680 hPa), and (c) low (>680 hPa) cloud cover (blue). To compute the monthly cloud anomalies the annual cycle is removed by subtracting the climatic monthly average (July 1983–June 1994) from each month on an equal area grid before averaging over the globe. The global average of the annual cycle over this period for high, middle, and low IR detected clouds is 13.5%, 19.9%, and 28.7%, respectively. The cosmic rays (red) represent neutron counts observed at Huancayo (cutoff rigidity 12.91 GeV) and normalized to October 1965.

太陽活動と気候

- 黒点の周期的活動に同期した気候変動成分がある。
- 黒点活動が活発になると太陽面に白斑と呼ばれる明るい領域も増えるため、平均的に全太陽放射量が僅かに増える。
- しかし、その変化は非常に小さい(0.2W/m^2)ため、11年周期に伴う地球表面温度の変化(0.1°C)を説明することはできない。
- マウンダー極小期には宇宙線が増大していた。雲が増えて、寒冷化した可能性がある。



Kirkby 2007

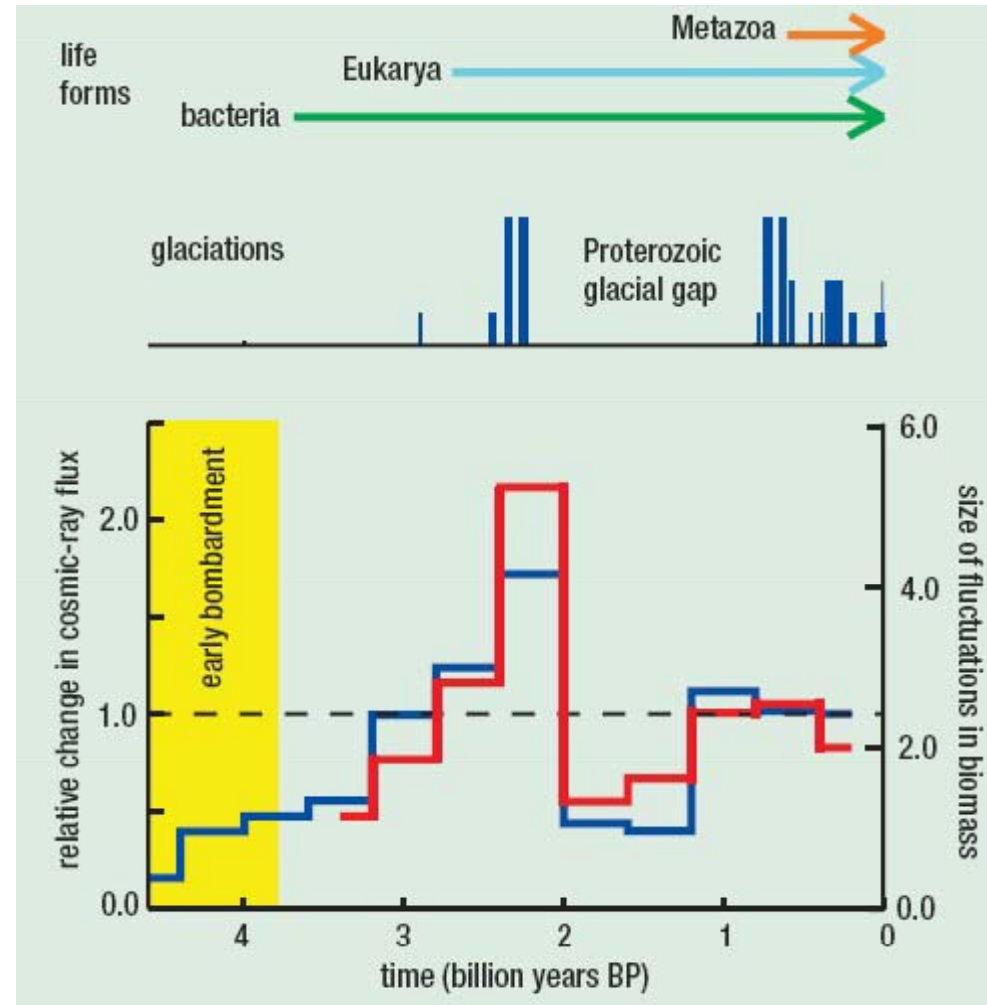
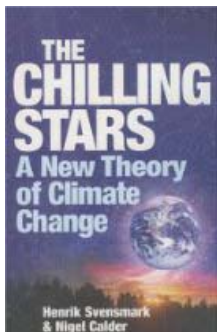
宇宙線と雲と46億年

- 銀河の星形成率が高まる
 - Rocha-Pinto et al. (2000)
 - Marcos & Marcos (2004)

- 宇宙線が増えて全球凍結
 - Shaviv (2003)
 - Svensmark (2007)



- *'Snowball Earth occurred only when star-making peaked. The Galaxy's baby booms intensified the cosmic rays.'*
 - *"The Chilling Stars" by Svensmark and Calder*



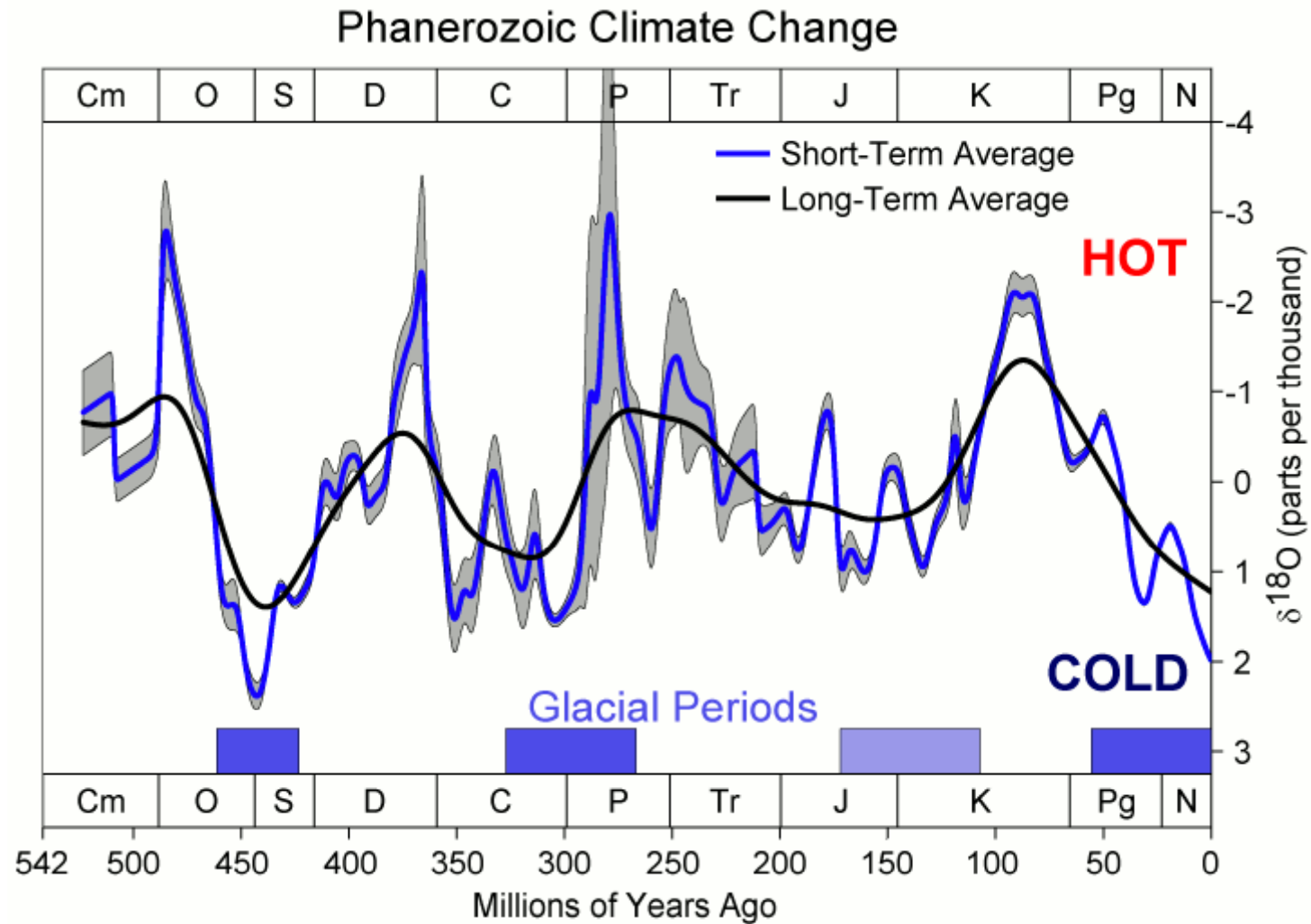
Svensmark (2007)

原生代から顕生代へ

カンブリア大爆発(5.42億年前)

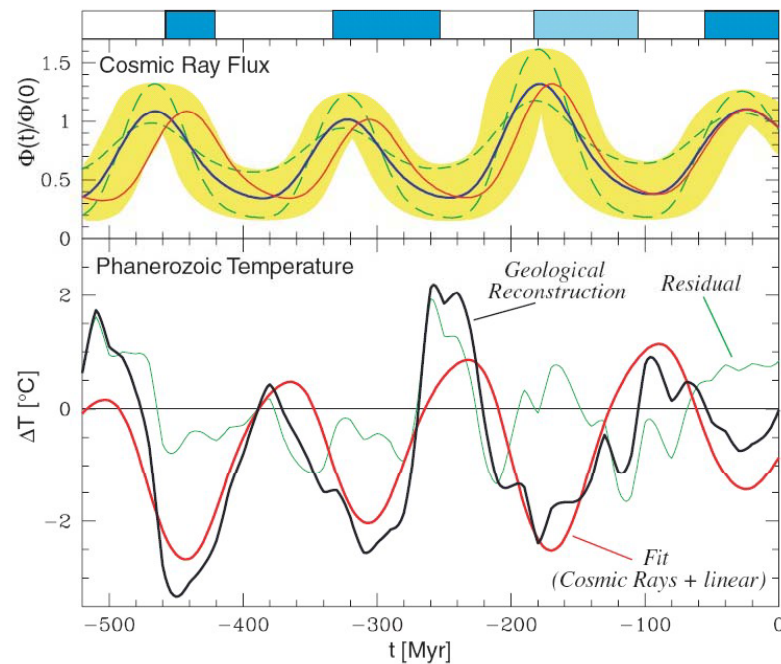


顕生代に繰り返した氷河期

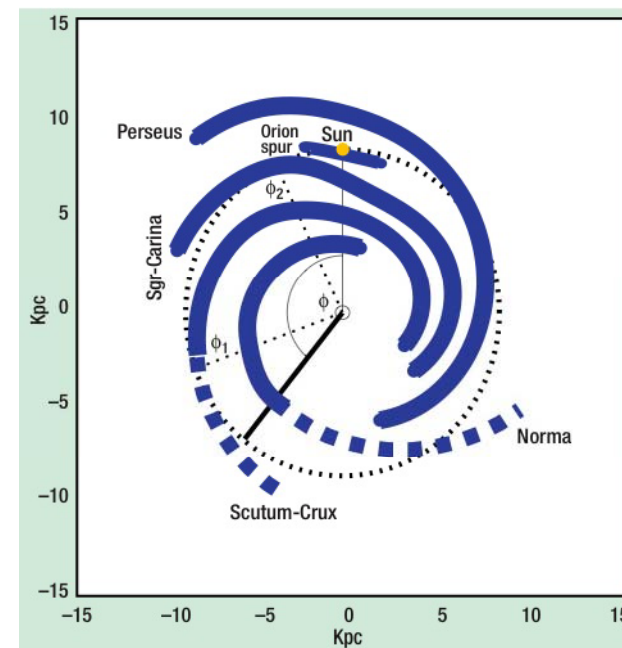


宇宙線と雲と5億年

- 顕生代の氷河期はアーム通過と一致？
 - 銀河の腕では超新星が近くで多発。
 - 宇宙線が増える、氷河期になる。



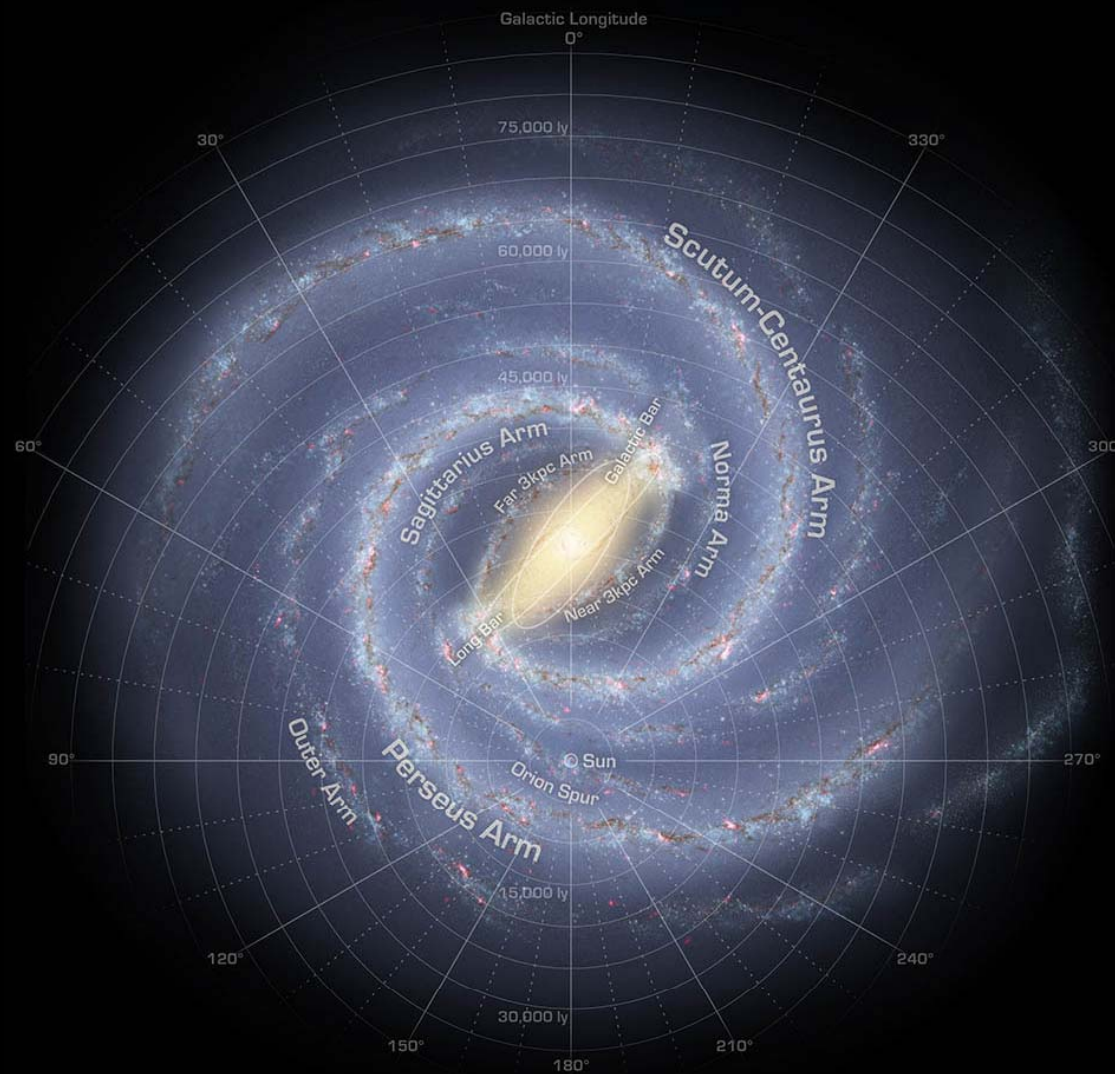
(Shaviv & Veizer, 2003)



(Svensmark, 2007)

腕のパターンが一定だとしているが...

アームの想像図。実際は、億年単位で腕が変化しているかもしれない。



Annotated Roadmap to the Milky Way
[artist's concept]

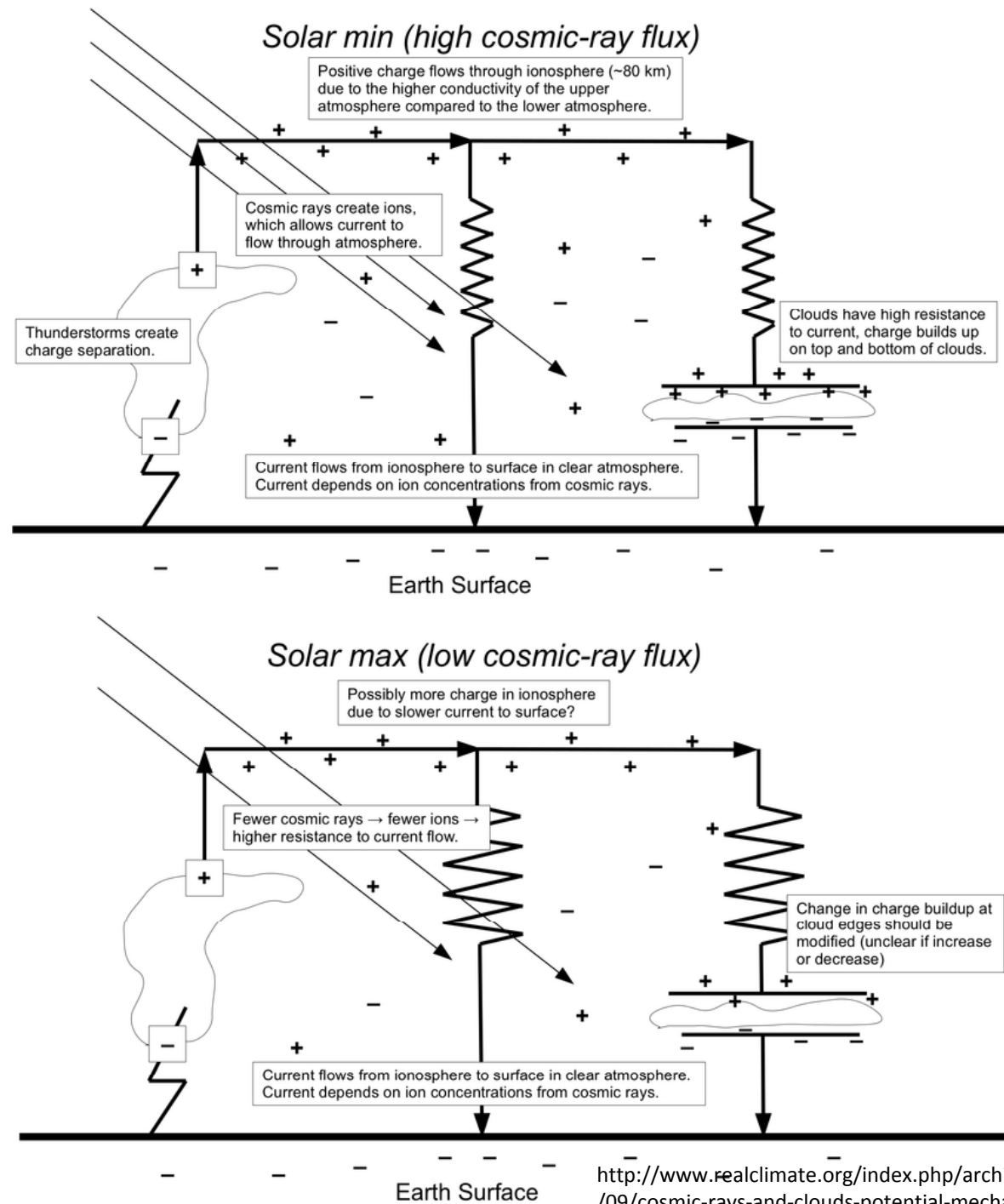
Near-cloud仮説

宇宙線で生じるイオンは大気中の下向き電場で移動している。

イオンは雲粒に吸収されるため雲の上部にはプラスの電荷、下部にはマイナス電荷が溜まっている。

雲中に溜まった電荷は小さな雲粒を引きつけたり、氷結を促したりすることによって、雲の成長を促進するかもしれない。

(Tinsleyのグローバル・サーキット仮説)



Clear-sky 仮説

エアロゾル (雲の種の種)

~ 1 nm



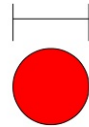
Freshly nucleated particle

Source: Sulfuric acid, organic, ammonia and water molecules in gas phase collide and stick together as a particle. A gas-phase ion may aid in this process

Composition: Mostly sulfate, organics and water. ~10s-100s of individual molecules.

雲核 (雲の種)

> 50 nm



Cloud Condensation Nuclei (CCN)

Sources: (1) Growth of freshly nucleated particles by condensation of sulfuric acid and organic vapors. (2) Primary emissions from combustion, sea spray or dust.

Composition: Mostly sulfate, organics and water if formed from growth of nucleated particles. Also includes soot, sea salt and dust if formed from primary emission. >100,000x the mass of a freshly nucleated particle.

雲粒

> 10 μ m

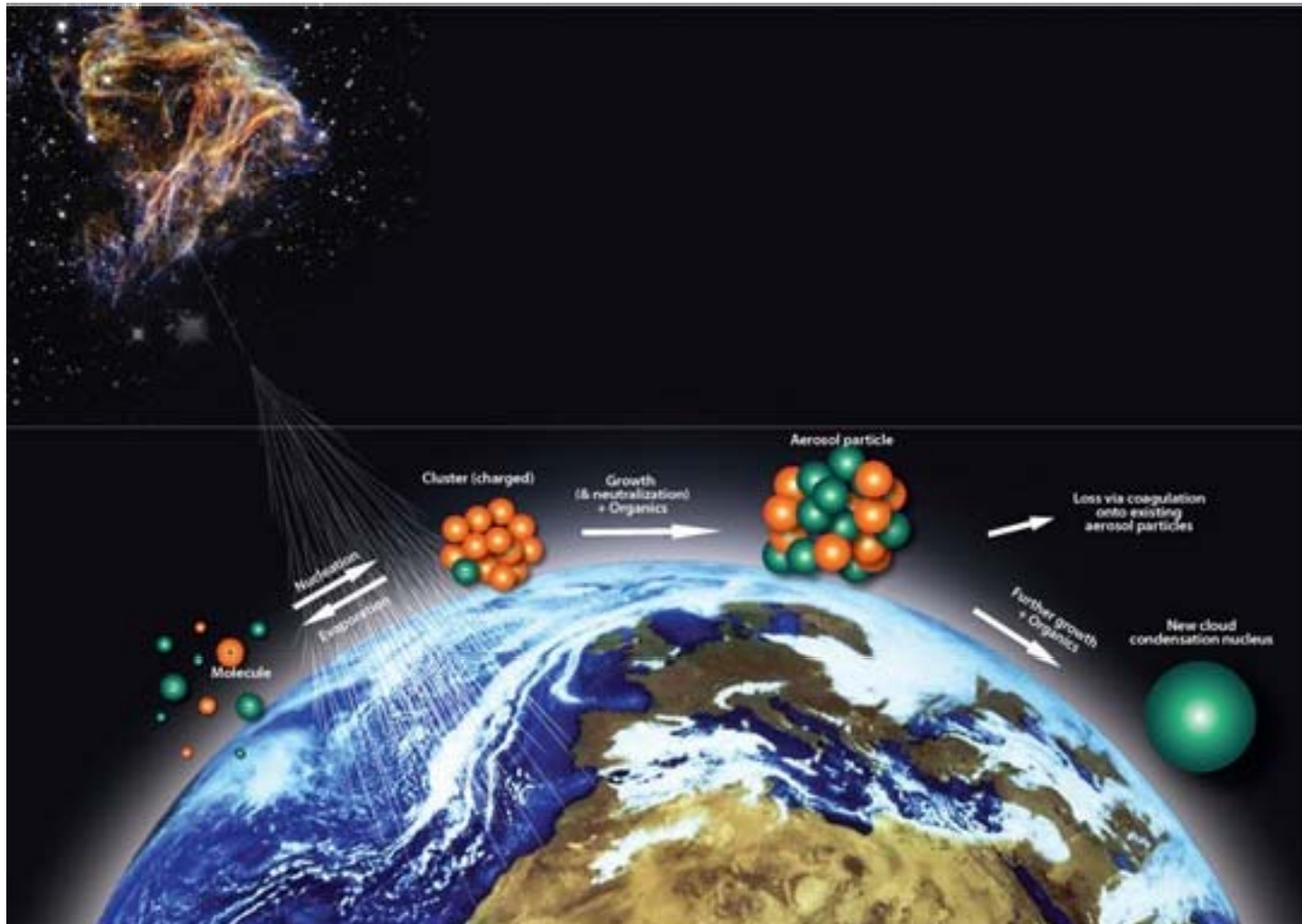
Cloud droplet

Source: Fast condensation of water vapor onto CCN when atmospheric relative humidity exceeds 100%.

Composition: >99.9% water. >1,000,000x the mass of a CCN.

硫酸分子(気体)がイオン化して集まり、硫酸エアロゾル(nm微粒子)を形成する

雲の種の種を宇宙線が作る イオン・シーディング

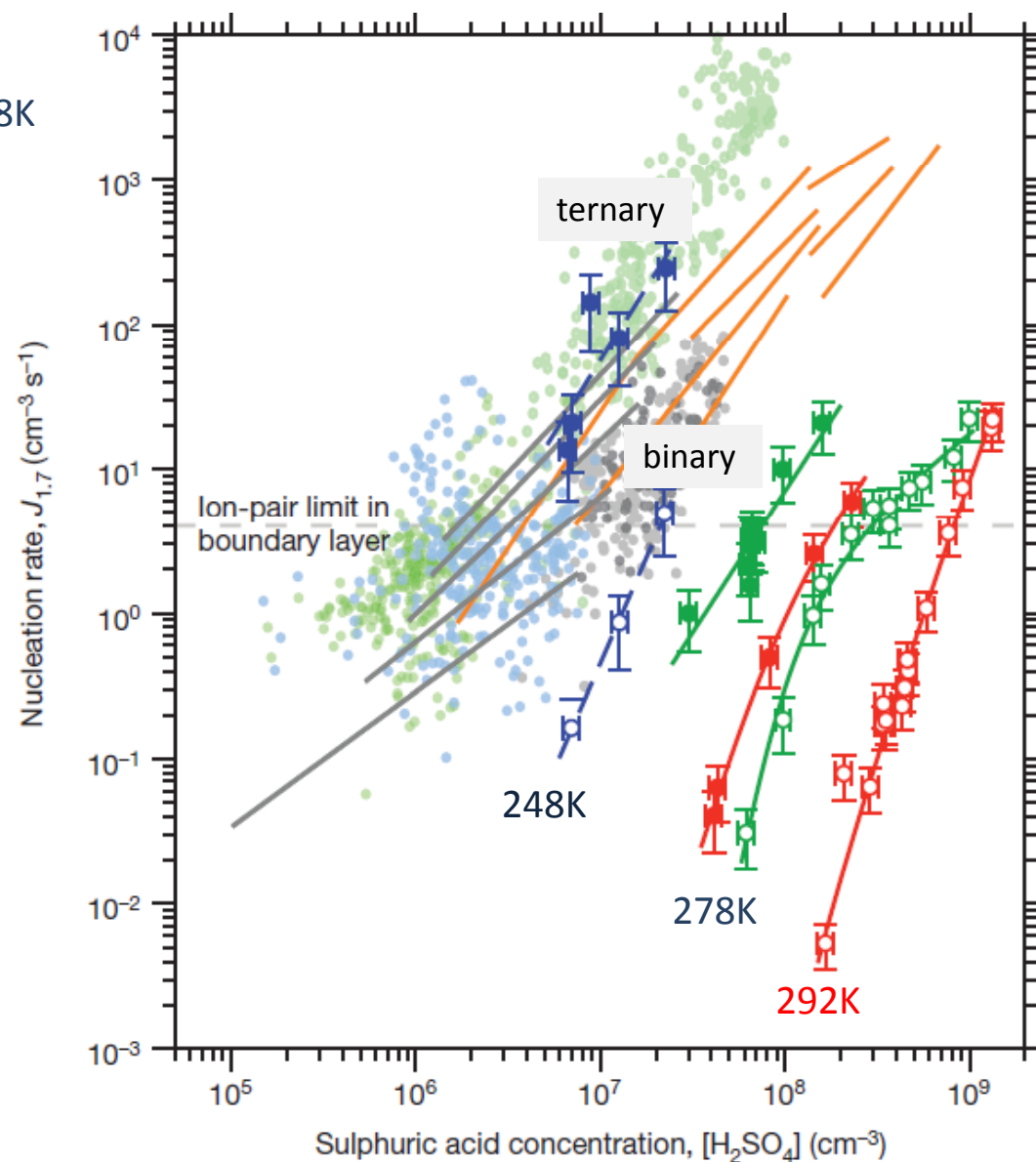
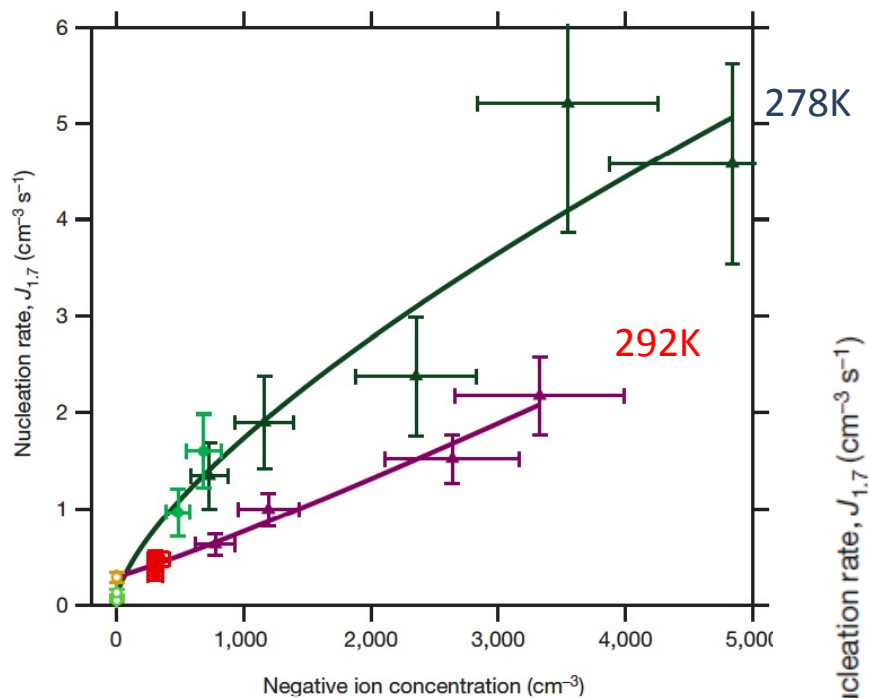


CLOUD実験



Kirkby+2011

実験による検証が進んでいる。



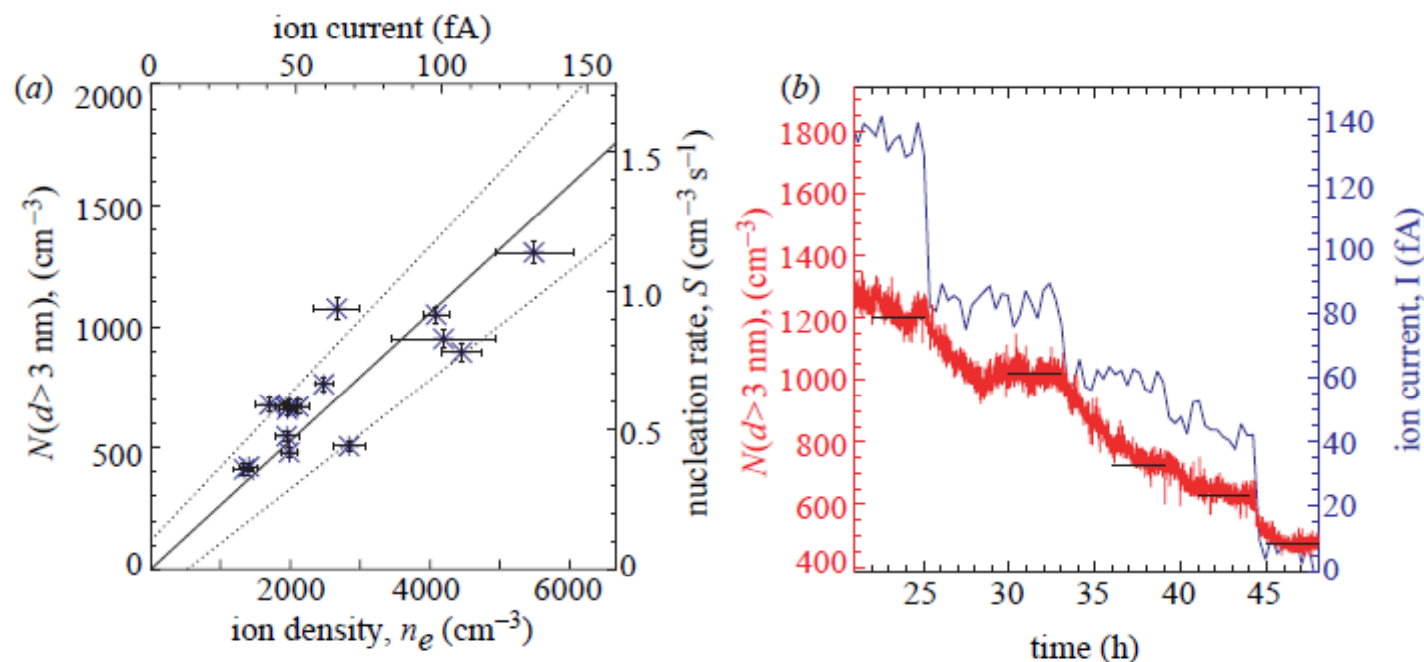


Figure 4. (a) $N(d > 3 \text{ nm})$ as a function of ion density, n_e , under steady state with environmental conditions corresponding to SO_2 (155 p.p.t.), H_2O (RH 35%) and H_2SO_4 ($2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$). The model response for a range of nucleation rates, S (black solid, right-hand scale), together with 1 sigma uncertainties (dotted) are also included. (b) The evolution of ion current (blue) and $N(d > 3 \text{ nm})$ (red) over a 2 day steady-state experiment.

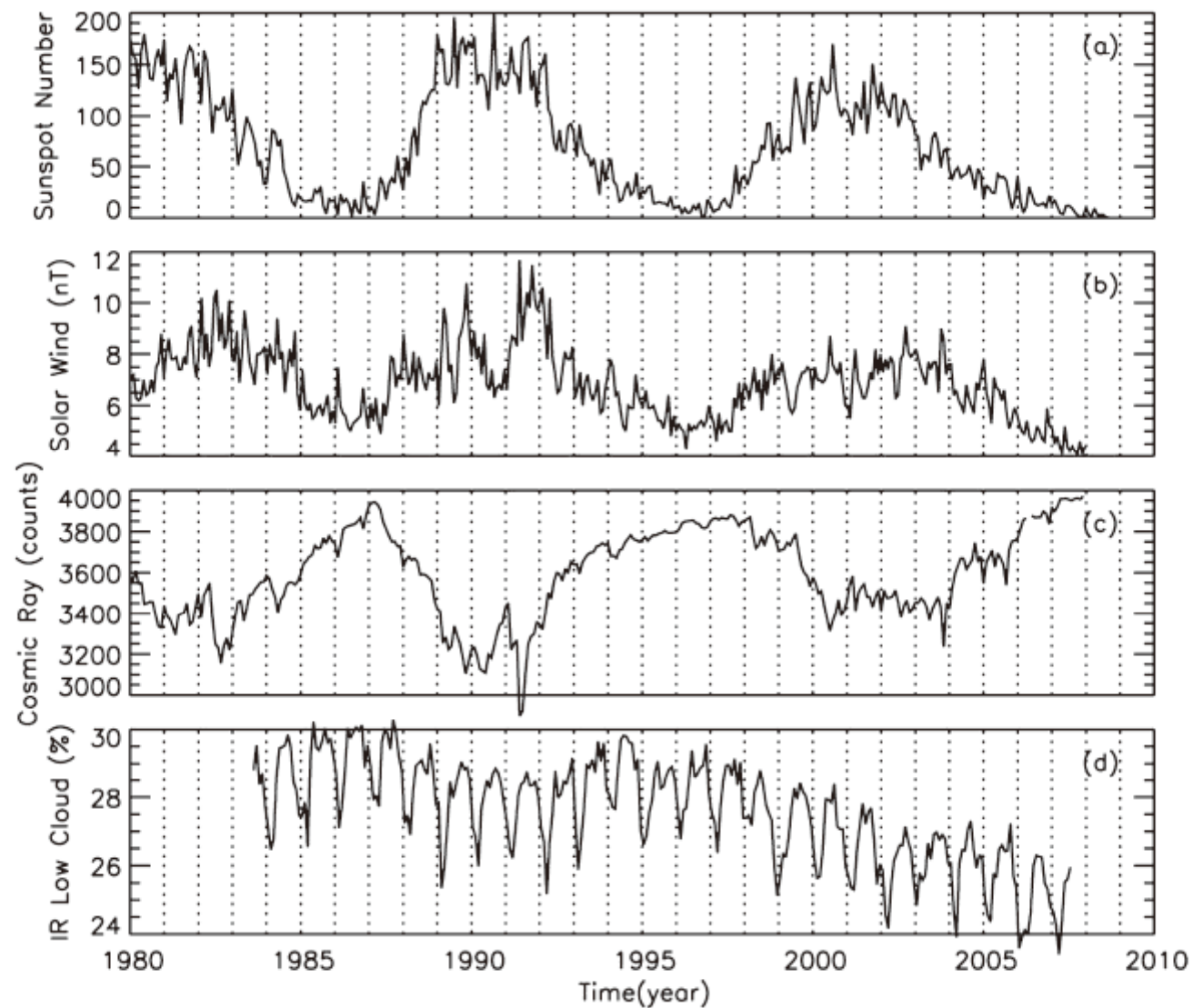


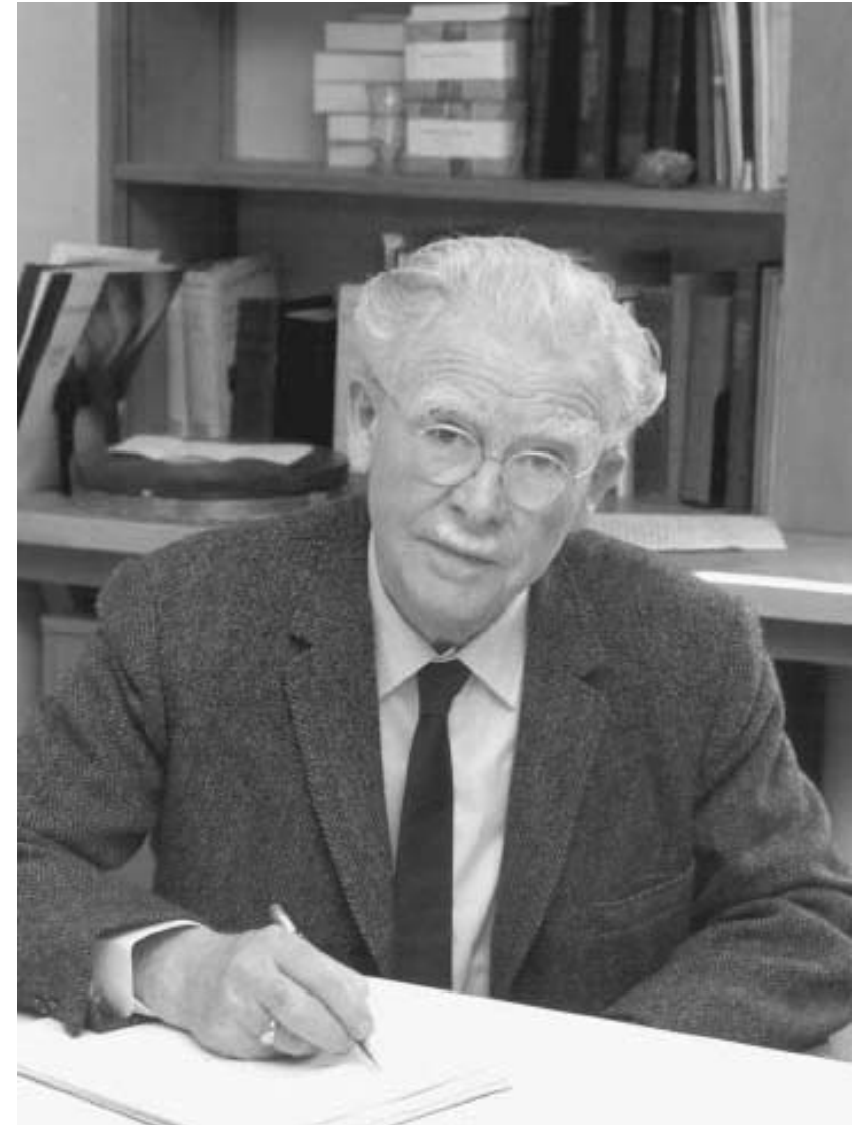
図 1 (a) 太陽黒点数, (b) 太陽風磁場強度, (c) 宇宙線フラックス, (d) 全球平均低層雲量の太陽周期変化.

覚えてますか

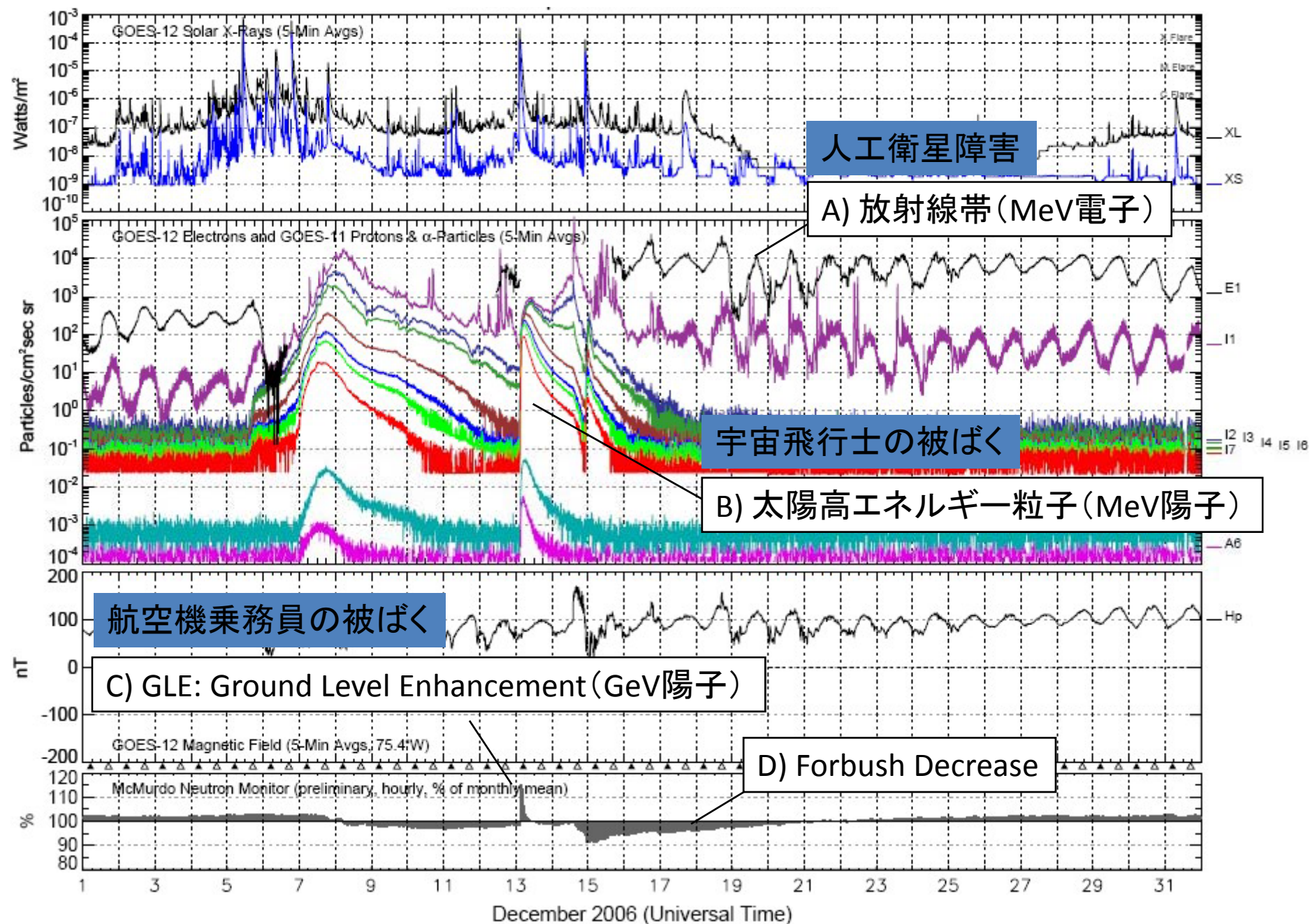
スコット・フォーブッシュ(1904-1984)

- 宇宙線嵐のパイオニア
- SEPとGLE
 - 太陽フレアで放出される高エネルギー荷電粒子
- 宇宙線が数日弱くなる
 - Forbush Decrease
 - 地球を包むコロナ質量放出が銀河宇宙線の磁気バリアになる

宇宙線が数日減る。雲は減るか？



フォアブッシュと同時に起きる様々な現象。磁気嵐も起きる。



フォーブッシュ現象トップ5の平均プロファイル

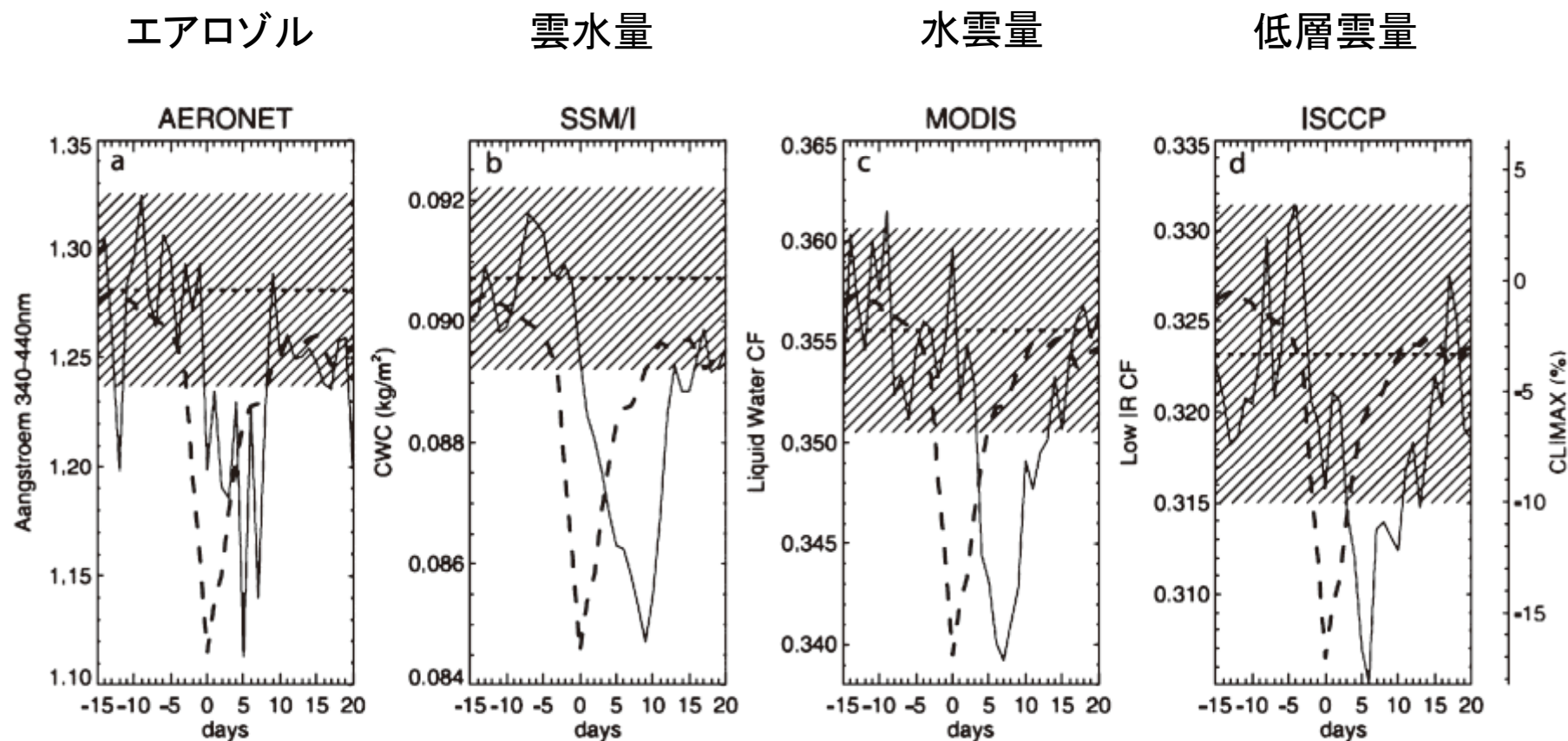
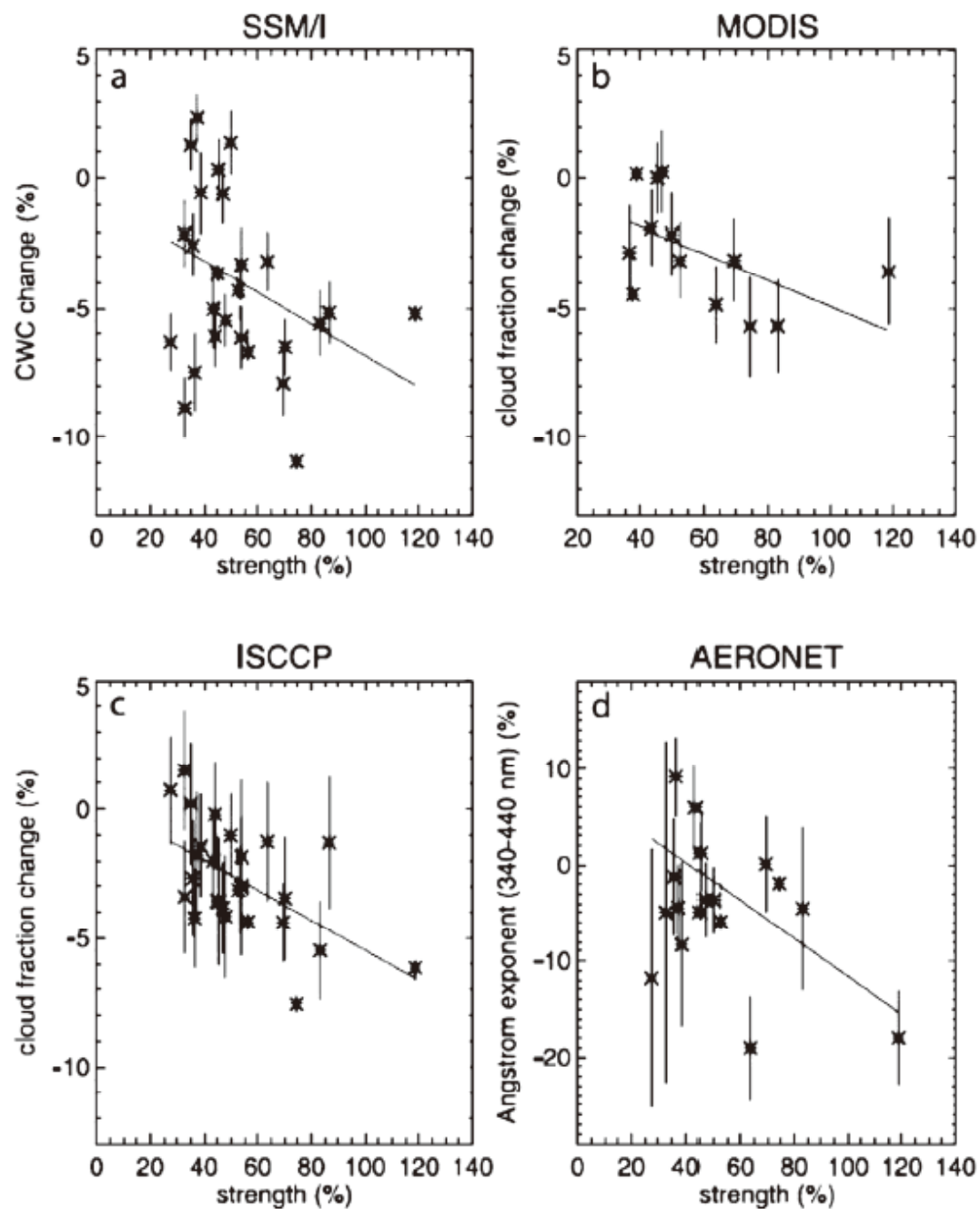


図 5 フォーブッシュ現象前後における雲パラメタの平均プロファイル. 左からそれぞれ, (a) エアロゾル, (b) 雲間水量, (c) 水雲の割合, (d) 低層雲量 (after Svensmark *et al.*, 2009).



フォーブッシュ現象の規模(横軸)
に応じて雲パラメタ(縦軸)が変化する。

図 6 大気電離度と雲パラメタの相関図. (a) 水量, (b) 水雲の割合, (c) 低層雲量, (d) エアロゾル量 (after Svensmark *et al.*, 2009).

Fig. 6 Correlation plot between cosmic-ray induced ionization rate and cloud parameters as shown in Figure 5 (after Svensmark *et al.*, 2009).

フォーブッシュ現象による検証は論争中

- フォーブッシュ現象で、雲の反応なし
 - Sloan and Wolfendale (2008)
 - Laken et al. (2009)
 - Calogovic et al. (2010)
- フォーブッシュ現象で、雲の反応(微妙に)あり
 - Todd and Kniveton (2004)
 - Kristjansson et al. (2008)
 - Rohs et al. (2010)
 - Dragic et al. (2011)

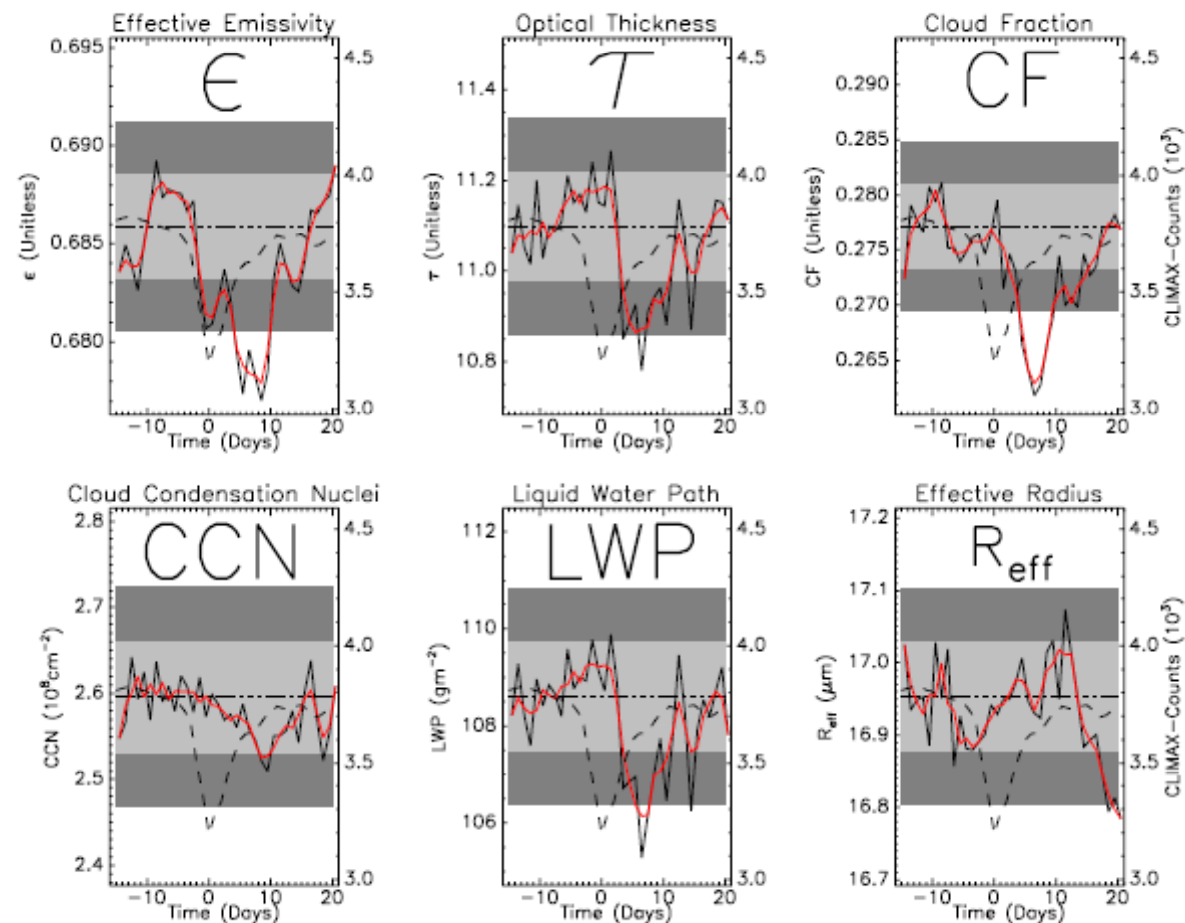


Fig. 1. Global daily means of the parameters ϵ , τ , CF, CCN, LWP, and R_{eff} averaged for Forbush decreases 1 to 5 (Table 1). The dashed line shows the averaged cosmic ray neutron counts from the Climax neutron monitor. The black curve is the response in the cloud parameter and the red curve shows a 3-day smoothed version of the black curve. The light and dark grey bands represent 1 and 2 σ centered around the base level (days -15 to -5).

反論への反論

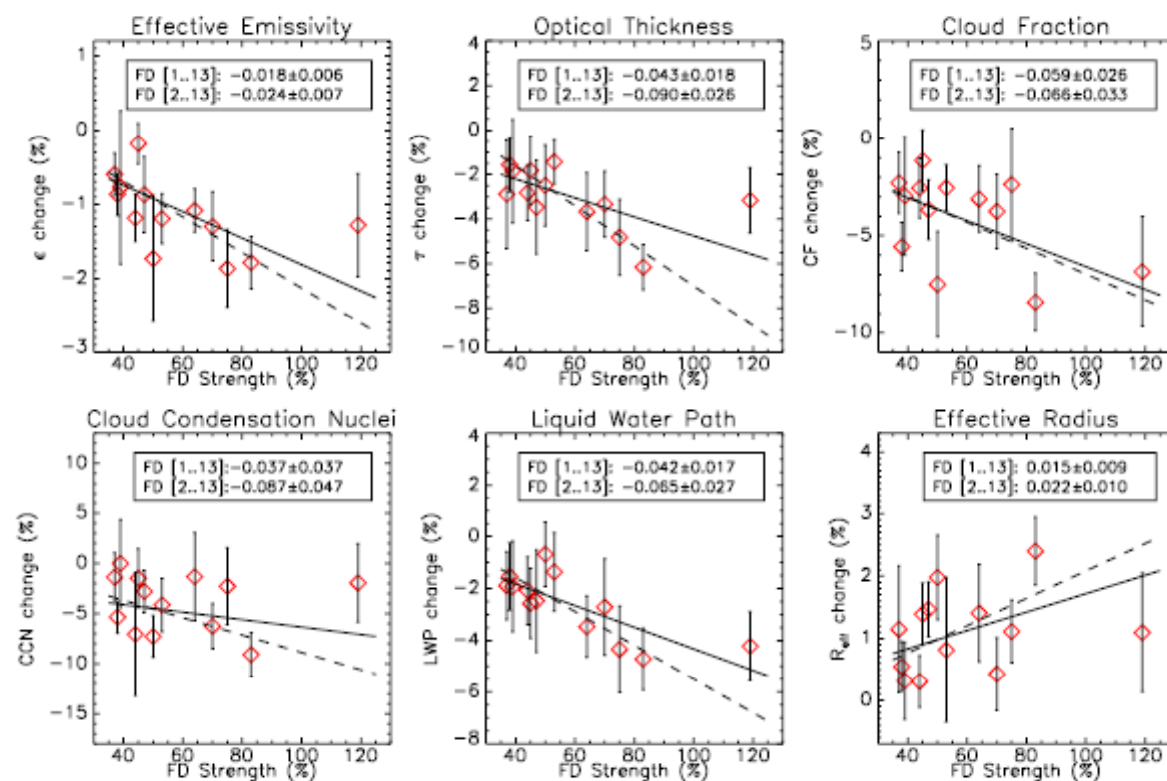
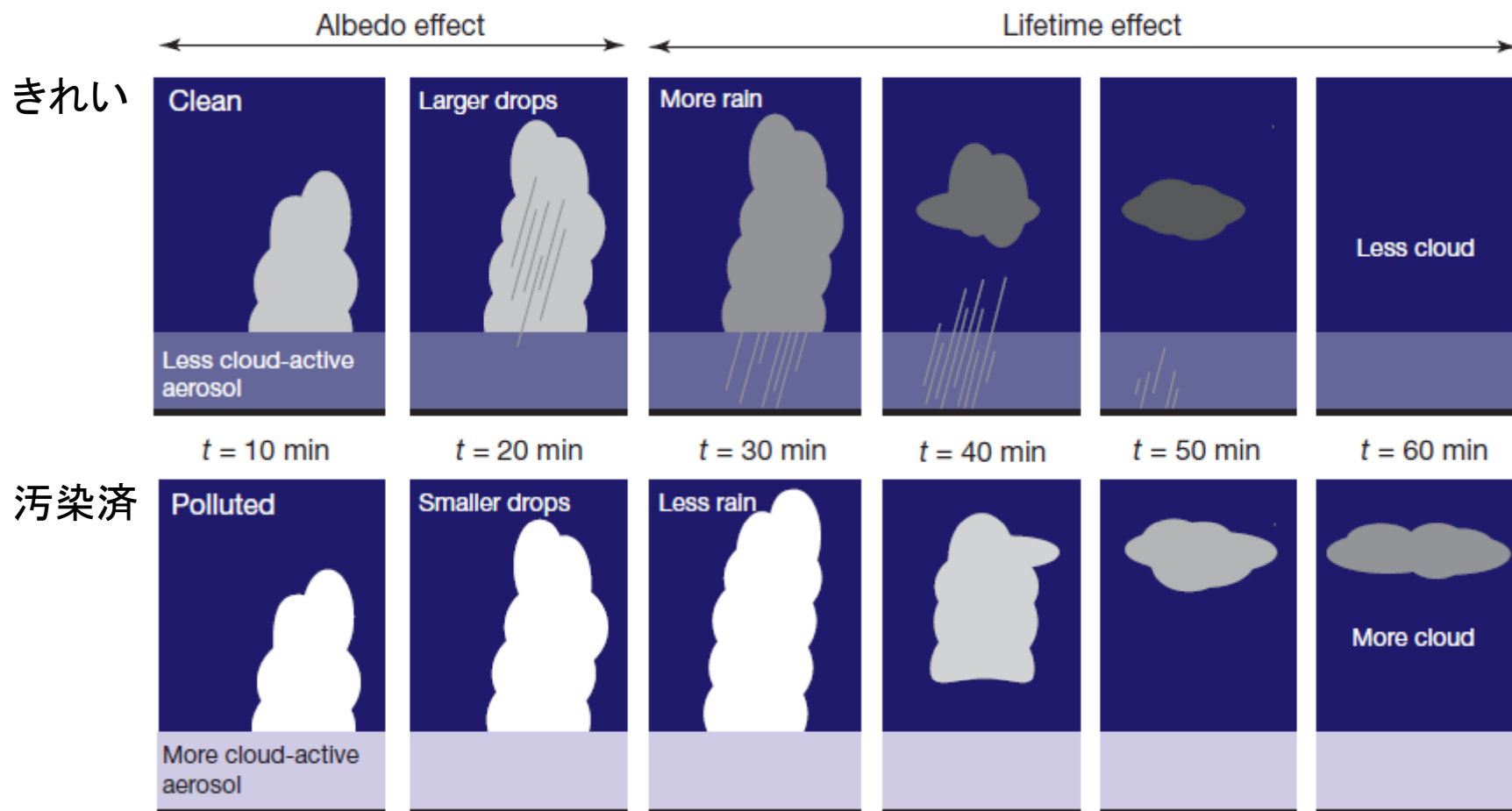


Fig. 2. Comparison of the Forbush decrease magnitude and its impact in each of the six parameters. Black lines indicate the weighted linear trends of the data points, with slope values and their standard deviation written on each plot. Broken lines indicate the linear trends with the exceptional 119 % Halloween Event (FD 1) excluded. Note that the x-axis starts at 30 %.

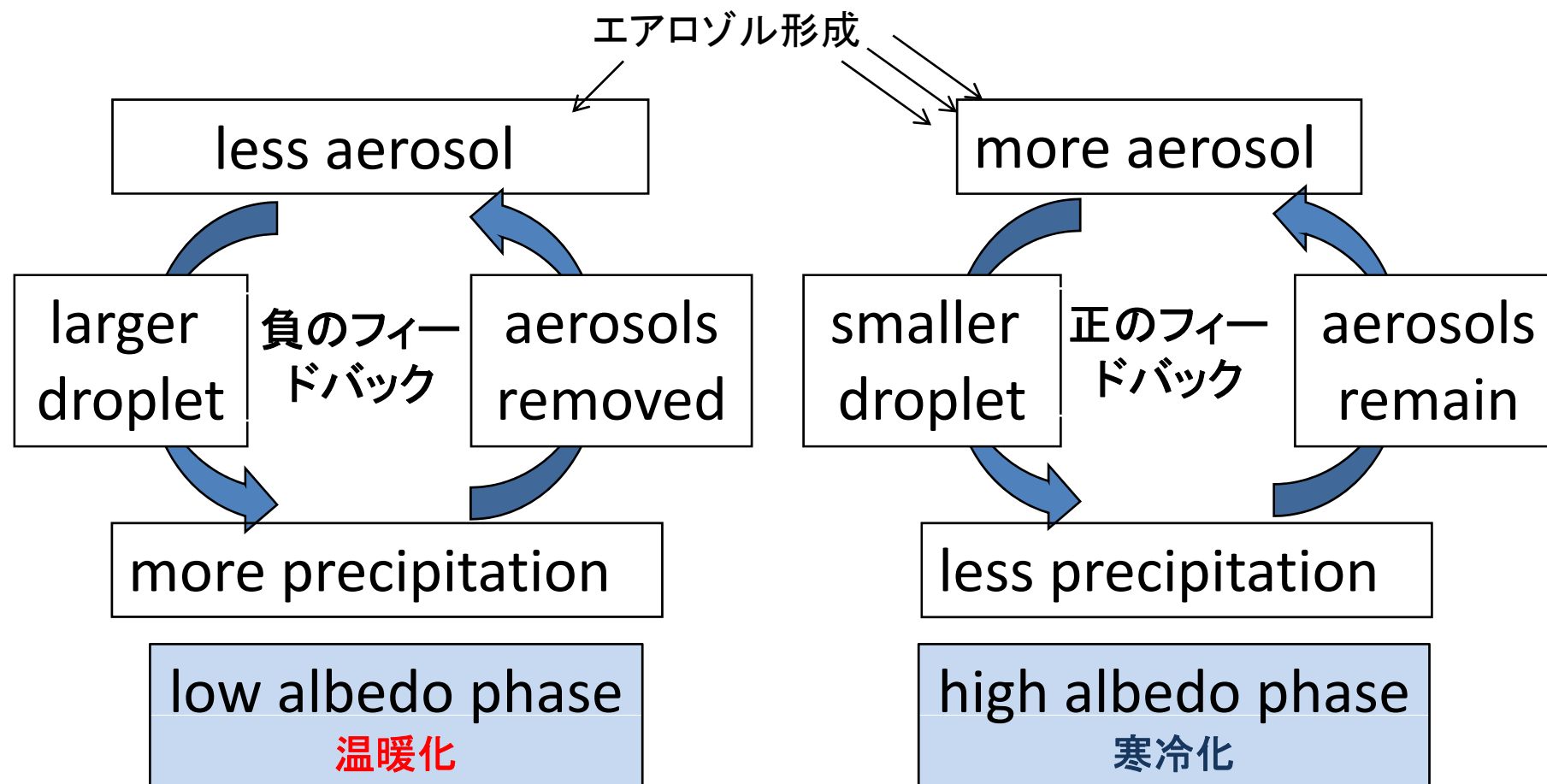
雲核や雲粒が出来てからの変化も重要。

エアロゾルが雲のアルベドと寿命を変える



Stevens and Feingold 2009 Nature

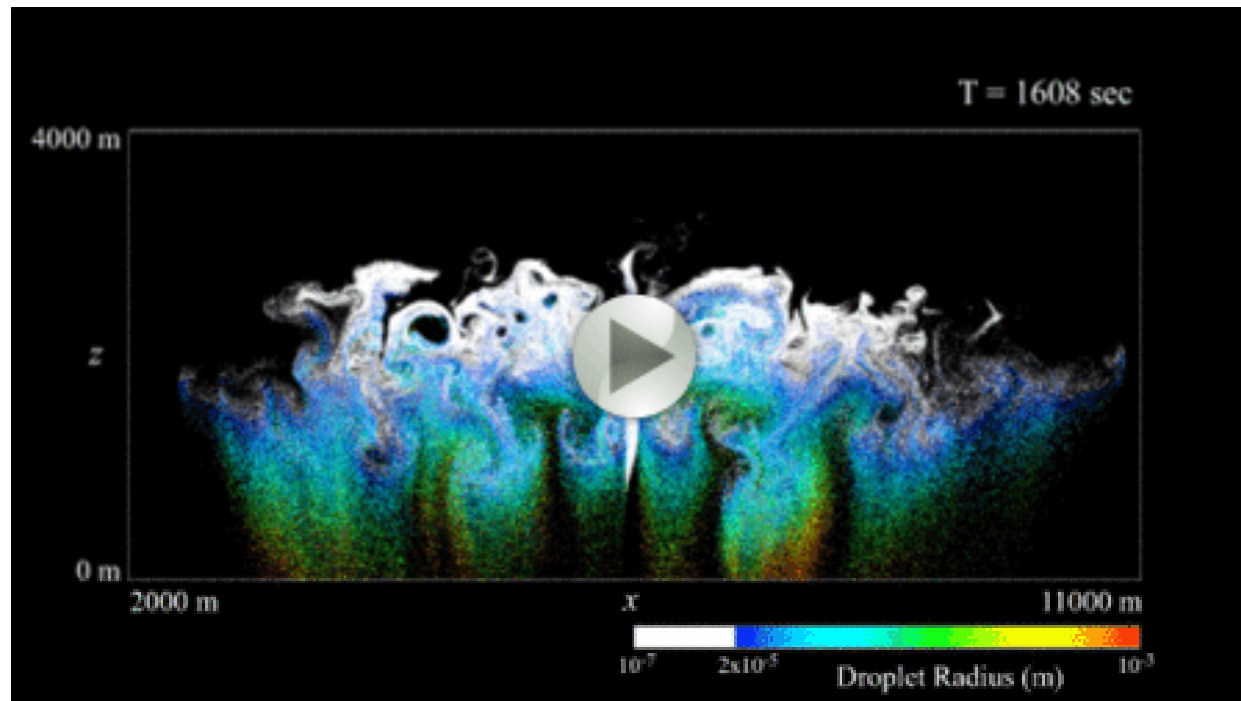
雲降水システムの双安定状態



雲核生成率の違いによる気候の双安定構造の可能性(Baker & Charlson, 1990)

雲の連結階層シミュレーション

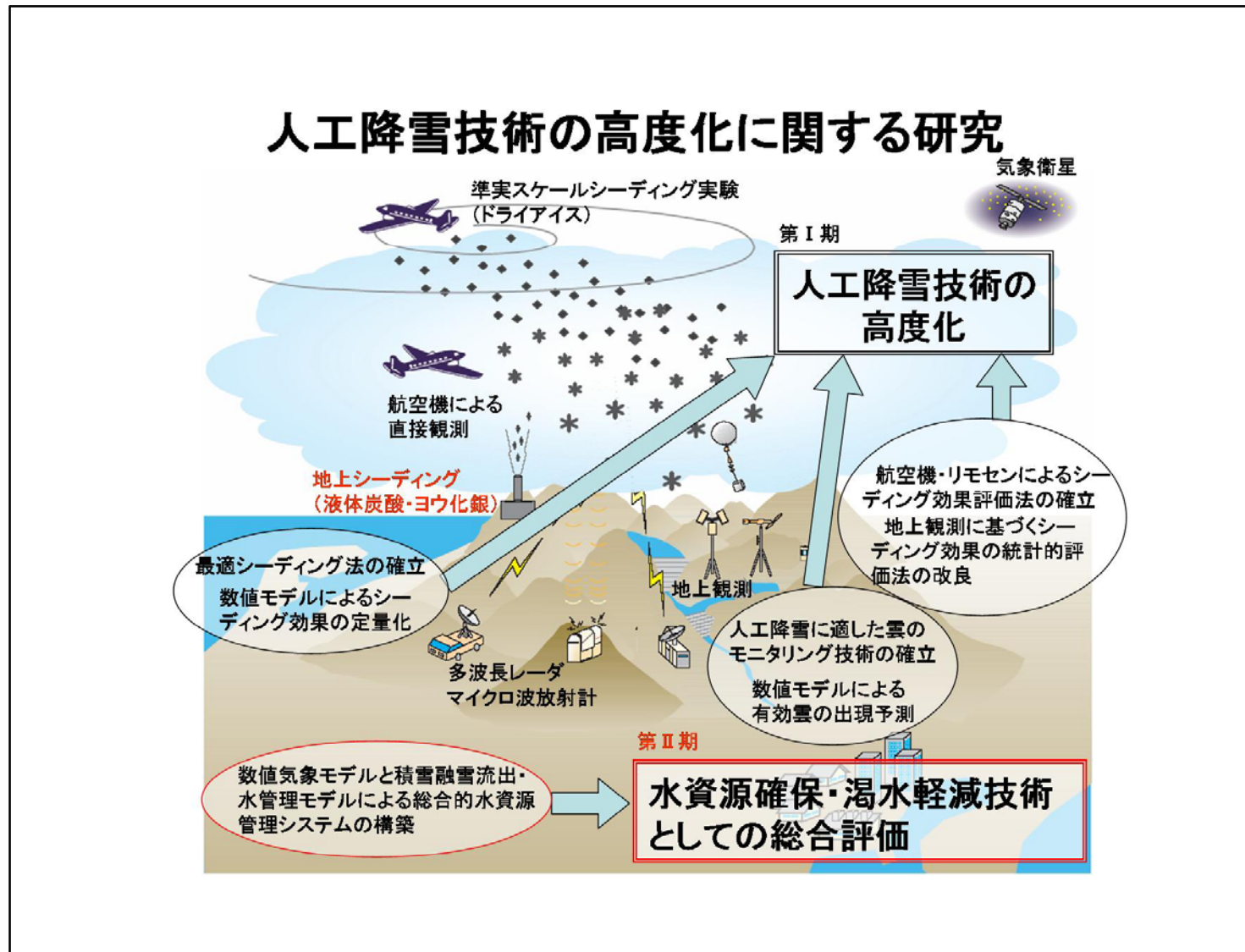
- スパコンで雨を降らせる「超水滴法」



http://www.jamstec.go.jp/less/space_earth/ja/research-introduction/cloud-formation.html

人工的に「雨の種」をまいて結合させ、雲粒サイズを大きくすれば自重で落下し雨になる。

文科省科振費「人工降雨・降雪」計画



生物・雲フィードバック

(B) CO₂を4倍にしても白亜紀の温暖期は説明できない。

(C) 雲粒径を2.2倍にすることで温暖期を説明できた。

生物起源のエアロゾルが無いために雲粒が大きくなる、と仮定した結果。

全球雲量: 64% → 55%
アルベド: 0.3 → 0.24

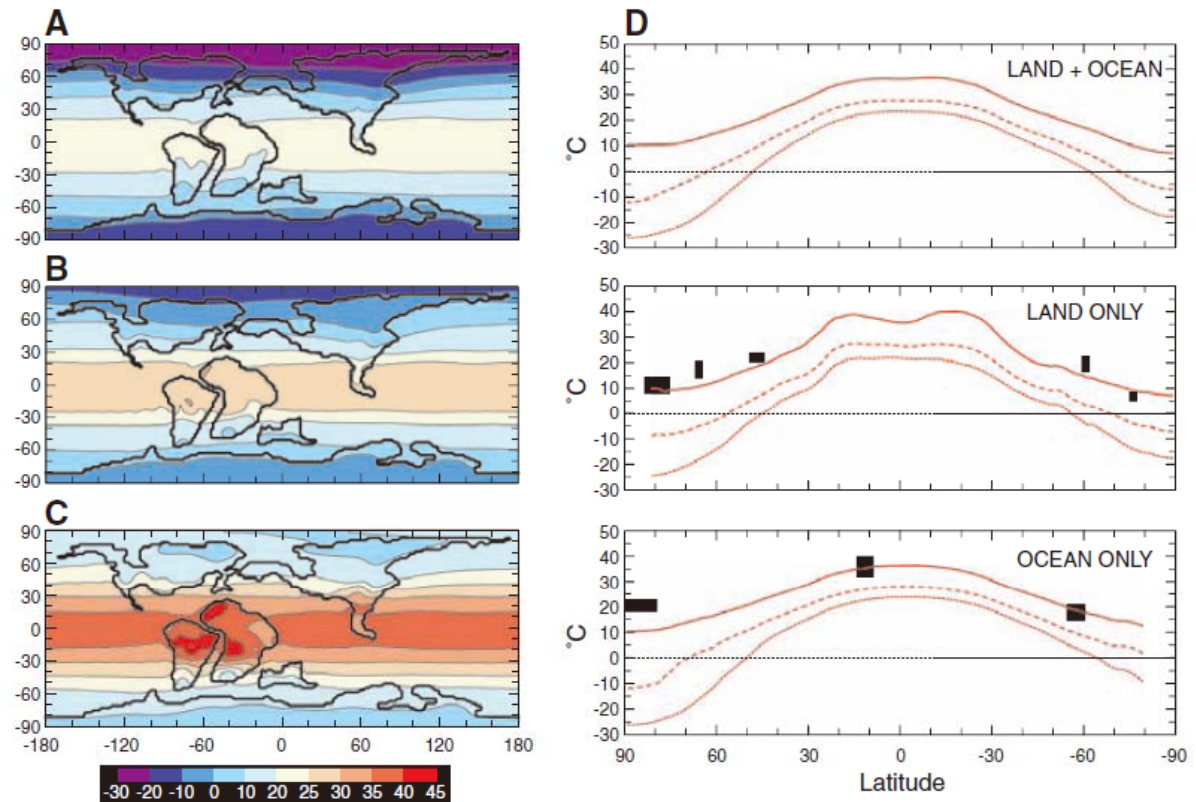


Fig. 1. Annual mean surface-air temperatures (°C) in GCM simulations of Middle Cretaceous (~100 Ma, low sea-level stand) and zonal averages (A) with CO₂ concentration 1× PAL (280 parts per million by volume), (B) with 4× PAL CO₂, and (C) with 4× PAL CO₂ and increased liquid-cloud r_e and P_e . (D) Zonal average temperatures for land and ocean, land only, and ocean only, with ocean (1) and terrestrial (6, 7) proxy temperature data for the Middle Cretaceous shown as solid rectangles. Dotted line indicates data from simulation with 1× PAL CO₂; dashed, with 4× PAL CO₂; and solid, with 4× PAL CO₂ and increased liquid-cloud r_e and P_e .

「宇宙線と雲」まとめ

- 雲は未解明で面白い問題である。
 - 雲は気候を変える。気候が雲を変える。
- 宇宙線と雲の相関関係が報告されている。
 - 雲が宇宙線の影響を受けて気候を変えている？
 - 相関は他の何かが作っていたりしないか？
- 宇宙線と雲をつなぐ物理的な仕組みは未解明。
 - Clear-air仮説が実験的にも検証されつつある。
 - 宇宙線が雲の種を作る。定量的な課題が残っている。
 - Near-cloud仮説は検証が比較的進んでいない。
 - 宇宙線が雲の電場を変える？

第7回アンケート

- 感想はご自由に。
 - 授業資料は私のウェブサイトで公開しています。
 - <http://sites.google.com/site/ryuhokataoka/>
 - ファイナルレポートを、インターネットで公開してもよいかどうか教えてください。
 - 自分のブログに公開する場合も教えてください。