

われているプロジェクトで、世界の主な気候モデルグループが同一境界条件（ただし現在とは大きく異なる境界条件）下での感度実験を行い、モデル間の相互比較及び地質データ解析等との比較を行うことで、気候変動メカニズムの理解と古気候再現の精度向上を目指している。当初は、他の時期と比べて古気候データが豊富に収集されている6,000年前の完新世中期（6ka実験）と21,000年前の最終氷期最盛期（21ka実験）をターゲットとし、モデルによる気候再現を定量的に評価する上で、大気・海洋・植生の3圏間の相互作用が重要であることなどが示されてきた。2009年からは、最終間氷期（約13万年前）、鮮新世中期（約300万年前）、過去千年紀（850-1850AD）を追加対象としたPMIP3が行われている（Otto-Bliesner *et al.*, 2009）。古気候実験に用いられるモデルは、温暖化予測モデルと基本的に同じであり、21ka, 6ka実験はCMIP5のtier-1実験、過去千年紀実験はtier-2実験でもある（図2）。

規模山岳がモンスーンやエルニーニョ南方振動現象（ENSO）をはじめとする大気・海洋システムをどう規定してきたかを一連の実験で調べてきた。日本付近の梅雨の形成にはチベット高原の存在が必須なことが先行研究で示されていたが、その追試による確認を行い閾値を示すとともに、大規模山岳の高度上昇により、アジアモンスーンによる降雨域の大陸内部への侵入と強化、インドネシア海洋大陸での暖水域の形成、ENSOの系統的变化（強度が弱く、周期が短く、より不定期になる）などを議論してきた（Kitoh, 2007）。また研究コミュニティでは、チベット・ヒマラヤの隆起のタイミングが話題となっている（JGL Vol.4 No.4の酒井治孝氏の解説参照）。東南アジアでは、チベット高原南東部の山岳の上昇により、それまでの紅河（ソンコイ川）から南シナ海へと起こっていた河川流出が、長江を経て東シナ海へと流路変更が生じたことが大きなイベントである。その時期と影響については、南シナ海での深海掘削がその回答を与えてくれるであろう。

水平解像度は粗すぎた。最終氷期のシミュレーションを行うには海水準変動による海陸分布の変化を考慮することが必須であるが、インドネシア海洋大陸の島嶼や海峡等の表現は不十分であったし、日本列島や日本海の表現においても同様である。また気候システムを構成する諸要素の一部しか取り入れることができなかった。人為的な土地利用変化が気候に及ぼす影響の解明と、気候と植生の相互作用の研究も端緒についている。

いまや気候モデルの解像度は格段に向上し地形を詳細に表現することができるようになり、かつ気圏・水圏・地圏・生物圏にまたがる諸圏の変動を再現・予測するための基礎ツールとしての地球システムモデルをわれわれは手に入れた。IPCC AR5をにらんだ（いわば義務的な）CMIP5実験の終了後には、サイエンスとしての地球システムモデルによる過去・現在・将来気候の研究を行える。皆さん、一緒にやりましょう。

—参考文献—

Otto-Bliesner, B. *et al.* (2009) *Eos*, 90, 93.

Kitoh, A. (2007) *Clim. Dyn.*, 28, 781-796.

■一般向けの関連書籍

酒井治孝 (2003) *地球学入門 —惑星地球と大気・海洋のシステム*, 東海大学出版会.

**チ** ベット高原による気候の形成

百万年を単位とする過去の気候研究には、大陸移動による海陸分布の変化（パナマ地峡の開閉やインドネシア通過流の変化など）ならびに大規模山岳の変化が、温室効果ガスの変化と相まって気候システムを形成する要素となる。チベット・ヒマラヤの隆起は東アジアの気候形成に支配的な役割を及ぼしてきた。筆者は大気海洋結合モデルを用いて、チベット高原などの大

**地** 球システムモデルは研究の宝庫

山岳・海峡地形がモンスーンやENSOなど海洋環境変動に及ぼす影響を調べることは、大気海洋・環境科学と地球人間圏科学にまたがる課題である。これまで大気大循環モデルや大気海洋結合モデルによる多くのシミュレーションが行われてきたが、地形の影響を十分に表現するにはモデルの

TOPICS 太陽地球系

現太陽活動極小期における特異な太陽風

名古屋大学 太陽地球環境研究所 徳丸 宗利

太陽黒点は約11年周期で増減し、現在はその数の最も少ない極小期にあたる。ただ、今回の極小期は従来とは異なるいくつかの特徴が観測されている。その一つが、長期にわたる無黒点状態である。これに伴って、太陽から吹き出している太陽風にもこれまでの極小期では見られなかった特徴があることが、名古屋大学太陽地球環境研究所の観測から明らかとなった。太陽風は、地球周辺の宇宙環境や超高層大気（宇宙天気）に大きな影響を与えることが知られている。特異な太陽風の出現は宇宙天気にどのような影響があるか、また今後の太陽活動は如何なる発展をするかについて、今研究者たちの注目が集まっている。

黒点がほとんどないのは当然なのだが、今回の極小期は前回、前々回とは異なる特徴を持っていることが徐々に明らかとなってきた。その一つが、太陽面上に全く黒点が見られない日（無黒点日）の多さである。

2008年の無黒点日数は266日（1年の73%）にも達した。これは311日もの無黒点日があった1913年以来のことである。無黒点日は2007年にも163日あり、また2009年もその傾向は続いていること、前極小期の1996年における無黒点日数は165日だったことを合わせると、今回の極小期における無黒点状態が如何に長いかがわか

**過** 去100年で最低レベルの太陽極小期

太陽黒点の出現は約11年の周期で大きく変化することが、長期にわたる観測から

知られている。この周期には1755年を起点に太陽黒点数が極小となる時期を区切りとして通し番号がつけられており、現在は第23サイクルから第24サイクルへ切り替わる極小期にあたる。よって、太陽面上に

る。このような過去 100 年なかった長い極小期が到来したことに呼応して、惑星間空間を流れる太陽風にも過去の極小には見られなかった様相が観測されはじめた。太陽風は超音速（約 300 ~ 700 km/s）のプラズマ流であり、地球を含めてすべての惑星を包み込んで流れている。

本稿では、名古屋大学太陽地球環境研究所（以後、名大 STE 研と省略）で実施している地上観測データに基づいて、現極小期における太陽風の特異性について紹介する。なお、太陽風の初観測は 1962 年であり、黒点に比べ観測の歴史は短い。本稿で述べる私たちの観測が開始されたのも 1970 年代からなので、ここで述べる特異性は 3 回の黒点サイクルについてみた場合のものであることに注意されたい。

## 太陽風の遠隔測定

天体電波源からの電波が太陽風プラズマを通過する際、プラズマ密度の不均一により散乱されることによって生じる電波強度の“またたき”が地上から観測できる。この現象は惑星間空間シンチレーション（Interplanetary Scintillation; 以下では IPS と省略）と呼ばれ、英国ケンブリッジ大学の Hewish 博士が発見して以来、太陽風を遠隔測定する有効な手段として使われてきた（Dennison & Hewish, 1967）。IPS による太陽風観測の最大の特徴は、太陽風の全球的な探査が可能なことである。すなわち、高感度の観測システムを用いれば、見かけ上、太陽周辺に分布した多数の電波

源について IPS データが得られる。そのデータを使って、飛行体では探査が困難な領域を含む様々な場所を流れる太陽風の情報を同時に知ることができる。また、IPS 観測のもう一つの利点は、地上観測なので長期にわたるデータの取得が可能なことである。本稿で紹介する IPS 観測は 30 年以上にわたって継続され、それによって初めて現サイクルの特異性を明らかにすることができた。

名大 STE 研の IPS 観測には、4 基の大型アンテナを用いる。設置場所は、愛知県豊川市、山梨県富士山麓、長野県菅平と木曽町である。図 1 には、木曽にある IPS 観測用アンテナを示す。このアンテナの大きさは東西約 75 m、南北約 27 m あり、開口面積約 2000 m<sup>2</sup> は我が国で最大クラスである。富士、菅平のアンテナは、木曽とほぼ同型をしている。豊川のアンテナは異なる形状をしているが、これは一層の高感度を達成するため開口面積を約 3500 m<sup>2</sup> に増大させたためである。このような大きな開口面積を持ったアンテナを用いることで、非常に微弱な電波源を含めて多くの電波源について“またたき”（IPS）が検出可能になっている。

これらのアンテナの受信周波数は 327 MHz であり、これは電波天文観測のために保護されたバンドである。UHF 帯は太陽から地球軌道までの間で発生する IPS を観測するのに適しているため、この周波数が選ばれた。

各観測点は、互いに 100 km 程度離れて

いるが、この距離が太陽風の測定に重要な意味を持つ。それは、多地点で同時に同じ電波源について IPS を観測すると、各点の強度変動には太陽風の流れに対応した時間差を検出できるからである。この時間差から、太陽風の流れの方向と基線ベクトルの関係を考慮して、太陽風速度が求められる。ここで注意すべきは、この速度は視線に垂直な成分を重ね合わせた量であること。重ね合わせる際、視線上の場所による電波散乱強度の変化を反映して異なる重みがつく。私たちは、計算機トモグラフィ（CAT）を応用して IPS データから重ね合わせの効果を補正し、太陽風速度の精密な空間分布を求めることに成功した（Kojima *et al.*, 1998）。

次節以降では、この計算機トモグラフィ解析法を使って IPS データを解析した結果、明らかとなった太陽風の長期変動について述べる。

## 激変する太陽風の 3 次元構造

図 2 上段は 1986 ~ 1996 年の期間（第 22 サイクル）における太陽黒点数の変化を示し、下段は極小期（1986）・上昇期（1988）・極大期（1990）・下降期（1993）・極小期（1996）において私たちの IPS 観測から得られた太陽風速度のマップを示す。このマップは太陽の全表面（緯度：南緯 90 度から北緯 90 度、経度：0 度から 360 度）についてモルワイデ図法で描かれており、青色は高速風、赤色は低速風を表している。図からわかるように、極小期には高速太陽風が南北極域を中心にして発達し、低速風は赤道付近に細い帯となって存在する。

一方、極大期には高速風が衰退し、太陽全面から低速風が吹き出している。ここで、地球軌道は太陽赤道近くにあるので、太陽活動サイクルの全期間を通じて地球へ到来するのは主に低速風であることに注意されたい。

図 2 に示すような太陽風速度分布の変化は、大規模な太陽磁場特性の変動、すなわち太陽のダイナモ活動を反映したものと考えられる。極大期に太陽極域の磁場極性は入れ替わり、極小期に極域の磁場強度は強くなる。この極域磁場強度の増大に対応して、コロナホールと呼ばれる領域が高緯度を中心して発達するが、それが高速風の源になっている。

## 現 極小期における太陽風の特異性

第 22 サイクルで見られた太陽風構造の変化（図 2）は、第 21 サイクルと酷似して

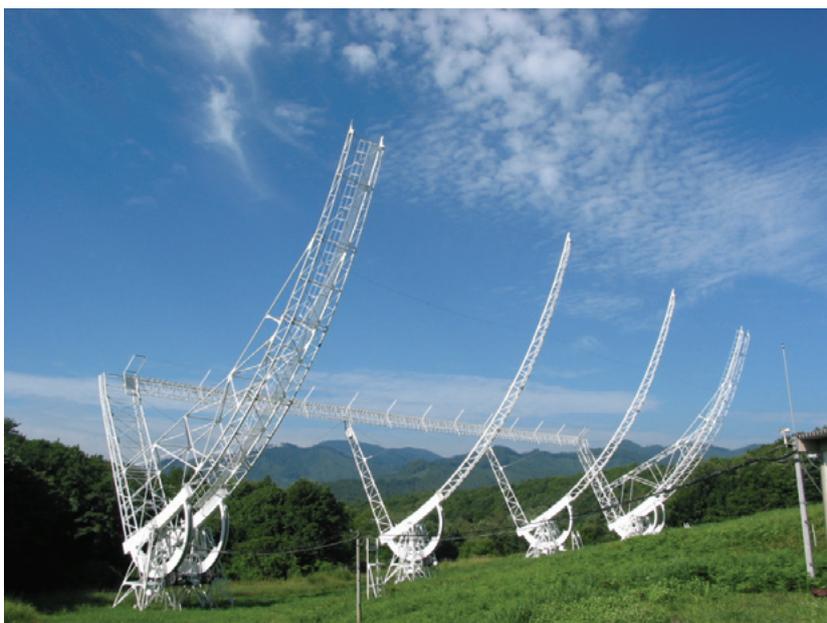


図 1 名古屋大学木曽観測所の IPS 観測用アンテナ。

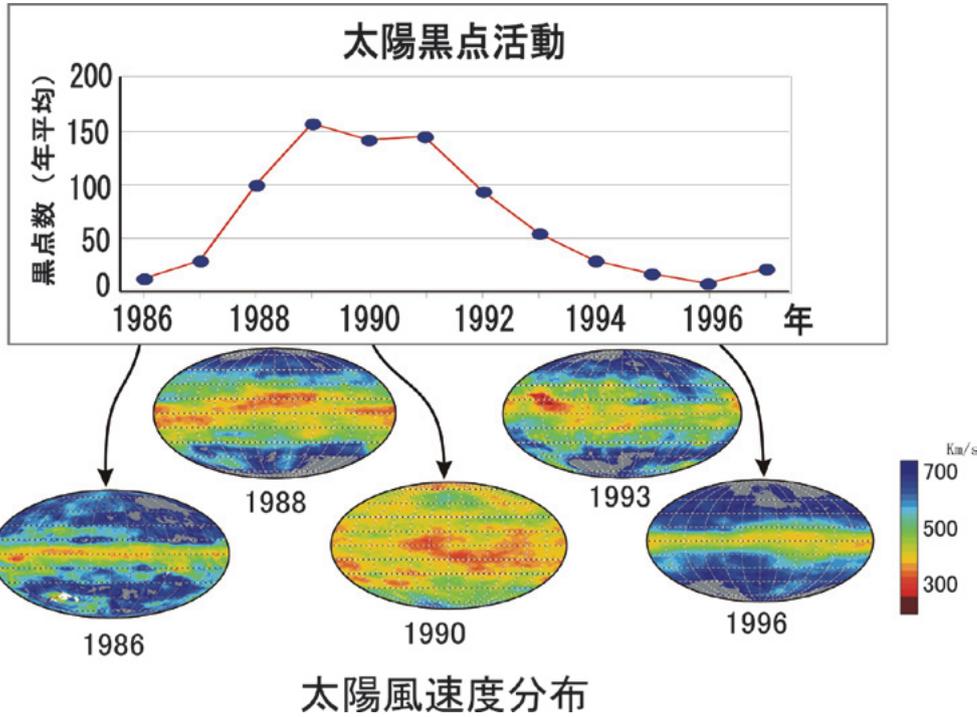


図2 1986～1996年における太陽風速度分布の11年周期変動。(上)太陽黒点数年平均値の変化、(下)IPS観測から得られた太陽風速度マップ。

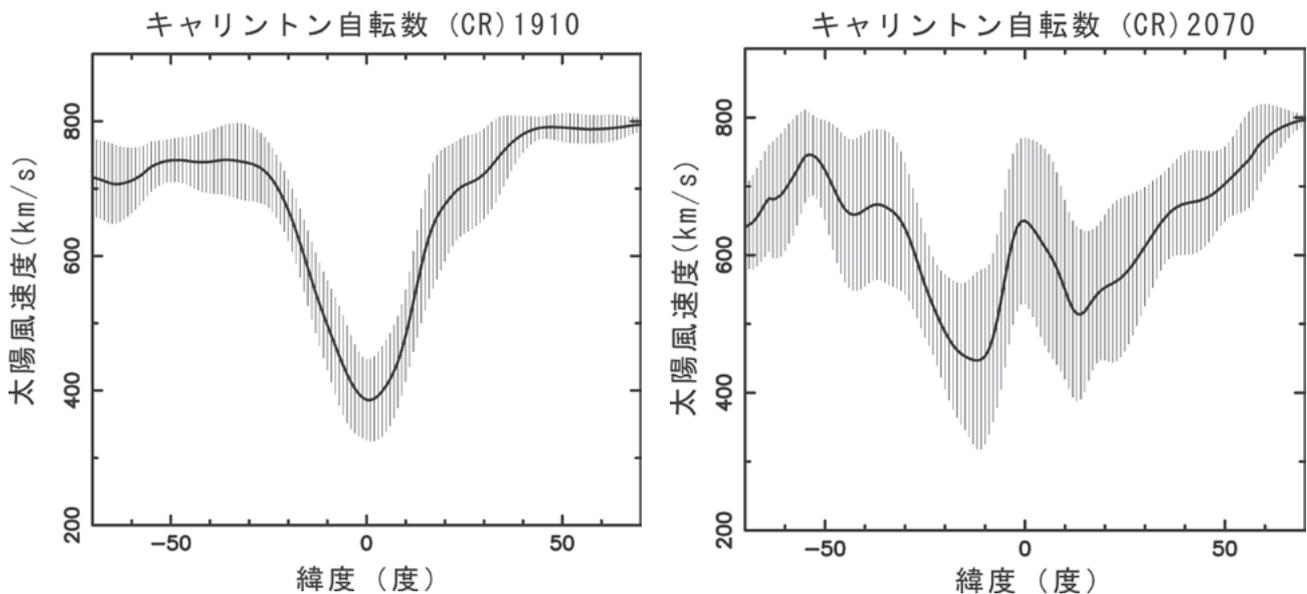


図3 (右)2008年、キャリントン自転数(CR)2070、(左)1996年、CR1910におけるIPS観測から求めた太陽風速度の緯度変化。キャリントン自転数は太陽が自転した回数を示すもので、1853年11月9日を起点としている。グラフの太線は各緯度について全経度の速度の平均値、縦の細線は標準偏差を示す(Tokumaru *et al.*, 2009より)。

おり、第23サイクルも同様に経過すると思われた。事実、第23サイクルの極大期までは、この予想通りに推移している。しかし、第23サイクルから次のサイクルに

移行する極小期になって、太陽風は過去の極小期には見られなかった特異な様相を示すようになった。その特異性の一つが、赤道付近における高速風の発達である。

図3に、私たちのIPS観測データから作成した太陽風速度の緯度変化を示す(Tokumaru *et al.*, 2009)。右が2008年(現極小期)、左が1996年(前回の極小期)に

対応する。2008年のデータでは南北の高緯度帯に加えて赤道付近で速度が上昇しており、低速風は中緯度帯に2つに分かれて分布していることがわかる。これは、1996年における高緯度に高速風、赤道に低速風という分布と比べると、その違いが際だっている。地球軌道付近における飛翔体による太陽風観測からも、この結果を裏付けるデータが得られている。

もう一つ私たちのIPS観測から判明した現極小期の相違点がある。それは構造が安定せず変化を続けていることである。これまでの極小期では、太陽風の構造はいくつもの自転周期にわたって安定して存在していた。これらの相違は、現極小期における太陽ダイナモ活動の特異性に起因していると考えられる。米国Wilcox太陽観測所における観測からは、現在の太陽極磁場は前回、前々回にくらべ約1/2しかないことが報告されている。このような弱い磁場がなぜ生じたかは謎であるが、極磁場が弱い極小期において太陽風で何が起るかを我々

の観測は明らかにしたものと見える。

現極小期の太陽風の特異性については、飛翔体観測からも続々と報告が届いている。たとえばUlysses探査機は極域高速風の密度が前回の極小期に比べ大幅に減少し、低温になっていること示した。また、Ulysses探査機の観測データから、前回の極小期に比べ太陽風の磁気フラックスも減少していることがわかった。これらは、すべて現極小期の太陽ダイナモ活動の反映と解釈されている。

## ◆ 後の太陽活動の発展には目が離せない

このように、過去100年で最低レベルの極小期の到来に伴って、目下、太陽風には大きな異変が進行中のようだ。これは太陽風生成の謎を解明していく上で絶好の機会といえる。なぜなら、従来とは異なる条件下での太陽磁気活動に対する太陽風の応答が観測できるからだ。今後の太陽活動の発展に伴って、太陽風がどの様に変化してい

くかを注意深く調査していく必要があるだろう。また、太陽風は宇宙天気と大きな影響を与えていることが知られており、すでに発生している特異な太陽風の効果や今後の太陽活動の発展に伴う宇宙天気の変動も興味ある研究課題になるであろう。

—参考文献—

Dennison and Hewish (1967) *Nature*, **213**, 343-346.

Kojima *et al.* (1998) *J. Geophys. Res.*, **103**, 1981-1989.

Tokumaru *et al.* (2009) *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L09101, doi:10.1029/2009GL037461.

### ■ 一般向けの関連書籍

桜井 隆ほか編 (2009) シリーズ現代の天文学第10巻「太陽」, 日本評論社.

# 雪氷上の生物群集 ～生態系として見る氷河～

千葉大学 大学院理学研究科 竹内 望

氷河や積雪の表面には、氷点に近い環境で活動できる特殊な生物が生息している。雪氷生物と呼ばれるこの生物は、南極氷床からヒマラヤの氷河まで、世界各地の氷河上にほぼ例外なく存在する。近年、雪氷生物に関する研究論文は徐々に増え始めてきた。寒冷な環境に彼らはなぜ生きているのか、雪氷生物は極限環境生物として生物学的に興味深いだけでなく、雪氷圏の変動との関係や古環境指標としてのアイスコア研究への応用など地球科学的にも重要な側面をもっている。ここでは、雪氷上の生物の研究からいったい何がわかるのかについて述べ、雪氷生物から氷河を理解するという新しい視点を紹介する。

## 氷 上の生物を探す

今年2009年の夏、私はパミール高原のフェドチェンコ氷河を初めて訪れる機会を得た。タジキスタンの東部に位置するフェドチェンコ氷河は、7千メートル級の山々に発し長さは70 kmにおよぶ氷河で、アジア最大の山岳氷河として知られている(図1)。旧ソ連の時代から氷河の物理的観測は行われてきたが、生物に関する情報はこの氷河を含めてパミールでは全くない。この氷河にはいったいどんな雪氷生物が生息しているのか、はじめての氷河に足を踏み入れる瞬間、好奇心による私の興奮は頂点に達する。

まず氷河上に這いつくばって氷表面の生

物をくまなく探す。この氷河でまず目に付いたのは氷の上を動く0.3ミリほどの黒い物体、クマムシである(図1)。さらに氷の解け水がたまった場所を見ると、茶色い有機質の物質が沈殿している。クリオコナイトと呼ばれる雪氷微生物に由来する有機物を含む物質である。また氷河上の残雪を見ると雪が赤いことに気がつく。雪氷藻類と呼ばれる光合成微生物の大繁殖による雪の着色現象で、赤雪とよばれる。一日氷河の上を歩くとその氷河の大まかな生物群集を把握することができる。

以上のような生物の特徴から、私はこのフェドチェンコ氷河が、アジア南部のヒマラヤの氷河とは異なり、アジア北部天山山脈の氷河に近いと判断する。私がこのよう

に判断できるのは、氷河上の生物群集は氷河によって大きく異なり、地域ごとに特徴があるためである。

雪氷生物とは、ここでは雪氷上で生活史の大部分をついやす生物のことをいう。雪氷上といっても氷点下数十度の厳冬期には活動することはほとんどなく、彼らは主に氷河表面が融解し液体の水が存在する季節である夏期に活動する。動物では、先ほどのクマムシのほか、ユスリカやカワゲラ、トビムシなどの昆虫類、ミジンコやコオリミミズ、ワムシなどが、氷河上の雪や融解水中に生息している。これら動物のえさとなっているのが、光合成微生物である雪氷藻類である。雪氷藻類は雪氷上で繁殖する特殊な藻類で、主に緑藻とシアノバクテリアの仲間が世界中の雪氷上に百種近く報告されている。さらに、これらの生物遺体等の有機物を分解するバクテリアも生息している。バクテリアもまた低温で活動できる好冷菌または耐冷菌とよばれる特殊なグループのものである。氷河上ではこれらの生物によって独立した食物連鎖が成り立っている(幸島, 1994)。