

第5回 環境サイエンスカフェ

テーマ 「気候変動の科学・その5」

～太陽活動と気候変動：太陽から黒点が消えた日～

講師 多田隆治 さん <古環境学者> 東京大学理学系研究科 教授

日時 2011年10月26日(水) 18:30～20:00

会場 サロン・ド・富山房 Folio

参加者 38名



多田先生：こんばんは。今回がシリーズ5回目の最終回です。このシリーズを始めたときは、2回目、3回目でお客さんがいなくなったらどうしようかなと、かなり不安だったのですが、こうして何とかお客さんの数も減らずに最後までたどり着きました。何となく名残惜しい気持ちもあるのですけれども、ほっとしている部分もあります。

早速、今日のお話に入っていきたいと思います。今日は「太陽活動と気候変動」のお話をします。

【図1】これはかなり皆さん興味がおありの方が多いため、アンケートでもかなり熱の入った質問がありました。

まず始める前に、太陽活動が気候変動を引き起こす可能性が十分あるのだと、要するに、太陽が気候変動を引き起こすのだということを信じていらっしゃる、そう思っている方、手を挙げていただけますか。半分以上ですね。では、逆に、そんなことはあり得ない、もしくは、ほとんど影響なんかないと思っている方は、どのぐらいいらっしゃるでしょうか？手を挙げていただけますか。一人、二人ぐらいですか。はい、どうもありがとうございました。今日の話の終わりまでに皆さんがわたしにどのように説得されるのかがちょっと楽しみです。まず、きょうのお話では、太陽のことを知らなければ始まりませんので、太陽の活動というのはどのように起こっていたのか、それがどのように観測されていたのかという話を最初に簡単にします。今から30年ぐらい前は、太陽活動が気候変動に関係しているということを言うと、その当時の気象学者の人に鼻でフンと笑われてしまい、まともな科学者はそんなことは考えない、という時代でした。それを徐々にひっくり返していったというか、太陽活動と気候変動の関係を世の中に知らしめてきたのは、実は現在の観測より

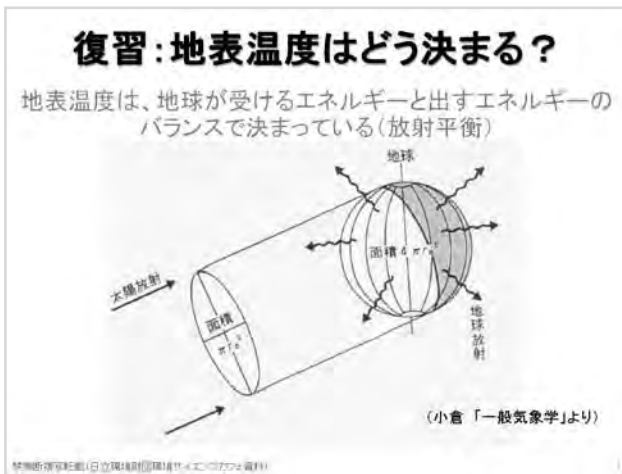
気候変動の科学 第5回 太陽活動と気候変動

1. 太陽活動はどの様に変動してきたか？
2. 過去の太陽活動変動をどの様に推定するのか？
3. 太陽活動と気候変動の関係を示す古気候記録
4. 太陽活動と気候変動の関係を示す観測記録
5. 太陽活動と気候変動をつなぐメカニズム

禁断新学舎転載(日立環境財団環境サイエンスカフェ資料)

【図1】

も古気候の記録をもとにしたいろいろな研究だったのです。過去の太陽活動がどうやって分かるの
 だろう？これは結構不思議な話なので、ちょっと
 難しいかもしれませんが、先ず、このお話
 をします。次に、観測衛星が 1979 年に最初に打
 ち上がってからもう 30 年以上たちますので、観測
 記録がだんだん積み上がってきた結果、太陽活動
 と気候との関係がだんだん見えてきたというお話
 しします。そして最後に、では、太陽活動と気候
 が具体的にどういうメカニズムでつながっている
 のかというお話をして終わりたいと思います。



【図 2】

いつもは、最初に復習をするのですが、
 きょうは前回の復習ではなくて、第 1 回目の復習
 をします。【図 2】それには理由があります。第 1
 回目に、地球の表面の温度はどうやって決まるの
 かという話をしました。具体的には、「太陽の光が
 地球に当たる面積は地球の断面積に等しく、太陽
 から地球に供給されるエネルギーは、太陽の明る
 さ（太陽定数）x 地球の断面積で与えられる。
 一方、地球は、こうして受けた太陽エネルギーを、
 黒体放射といって、自分の温度に対応した長波長
 の電磁波を地球の表面全体から放出する事により
 バランスさせて、地表温度を一定に保っている。」
 という放射平衡のお話です。地表温度というの
 は、地球が受けているエネルギーと出すエネルギ
 ーのバランスで決まっているのだということです。

つまり、地球が太陽から受けるエネルギーと地
 球が放射するエネルギーがイコールとして計算し
 てやればよい。それが次の式です。【図 3】

復習：放射平衡
 (地球が太陽から受けるエネルギー)=(地球が放射するエネルギー)

$$S_0(1-A)\pi r_e^2 = \alpha 4\pi r_e^2 I_e$$

$$S_0(1-A) = \alpha 4\sigma T_e^4$$

$$S_0(\text{太陽定数}) = 1380\text{W/m}^2,$$

$$A(\text{アルベド}) = 0.3,$$

$$\sigma(\text{ステファンボルツマン定数}) = 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$\alpha(\text{射出率}) = 0.62(\text{温室効果})$$

$$\rightarrow T_e = 288 \text{K}$$

* 射出率 = 地表から放射されたエネルギーのうち、
 地球外へ出てゆくエネルギーの割合

【図 3】

$$S_0(1-A)\pi r_e^2 = \alpha 4\pi r_e^2 I_e$$

ここで、左辺は地球が受ける太陽のエネルギーで、
 S_0 は太陽定数、 A は反射率（アルベドと言いま
 す）、 πr_e^2 は地球の断面積です。一方、右辺の α
 というのは、後で説明しますが、射出率です。そ
 して、 $4\pi r_e^2$ は表面積、 I_e は地球からの長波の放
 射です。この式の両辺を πr_e^2 で割って、 $I_e = \sigma T_e^4$
 T_e は地表面温度、 σ はステファンボルツマン定数で、
 $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ を代入すると、

$$S_0(1-A) = \alpha 4\sigma T_e^4$$

これに、 S_0 (太陽定数) = 1380W/m^2 、 A (アル
 ベド) = 0.3 、 α (射出率) = 0.62 (温室効果) を
 代入すると $T_e = 288 \text{K}$ (= 15°C) となります。

この式は、「地表面温度 (T_e) は、基本的には太
 陽の明るさと、アルベド (反射能：当たった光の
 何割を反射するかということです。)、それから、
 射出率 (α ：温室効果の程度を表します。) の三つ
 で決まっている。」と言う事を意味します。射出率
 について、もう少し説明しておきますと、地表か
 ら放射されたエネルギーのうちどのぐらいの割合
 が地球外に出ていくか、その割合を示しています。

これら 3 つの値は、変わり得る値です。 A や α
 が変わり得るといのは、よろしいでしょう。一
 方、太陽の明るさというのは、通常は一定だと
 しているわけですが、実は変わるのです。では、
 これがどのぐらい変わるのか、それがどのぐらい温
 度に影響を与えるのかというところから考えてい
 きたいと思います。

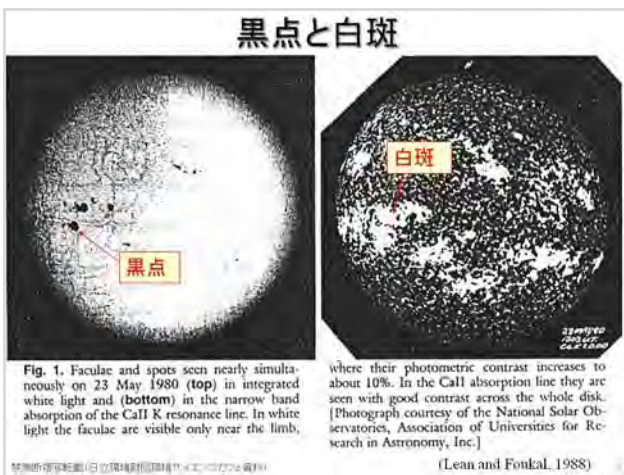
まず、太陽の活動は、どのように変わってきたのかという話から始めたいのですが、ここで質問をさせていただきます。太陽活動といえば、皆さんは太陽黒点の変化を思い浮かべられると思うのですが、では、黒点が多いときと少ないときで、どちらのほうが太陽は明るいのでしょうか？

会場：多いとき。

多田先生：多いときのほうが明るい。それは正解なのですけれども、でも、衛星が飛ぶ前の、今からたかだか40年ぐらい前には、どちらが明るいのかという議論があったのです。それは何故かという、黒点と言うからには黒いわけですよね。太陽の一部が黒くなっているということは、その分だけ太陽の明るさは低くなるのではないかという考えがあったのです。答えは「黒点が多い方が明るい」なのですけれども、では、何故、黒点が多いときのほうが太陽が明るいのか。それについてはいかがですか？

会場：黒点が多いときは、太陽の活動が活発になるときだと聞いたことがあるのですけれども。

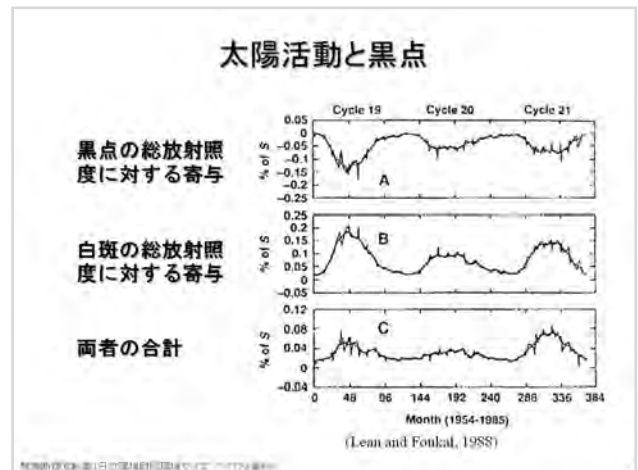
多田先生：そうなのですけれども。太陽活動が活発だと言う意味は？ほかにどなたか、ご意見ありませんか。



【図4】

答えは、「黒点が多い時には白斑も多く、それが、黒点の暗さを埋め合わせても余りある位明るい

ら」なのです。【図4】通常、黒点は、太陽を見ればすぐに見えるからご存じですよ。でも、実は黒点以外に「白斑」というものがあるのです。これは、よく見ると太陽の黒点の周りに存在する、太陽がより明るい部分。そういう意味で、黒点が多いということは太陽の活動が激しいと言える訳ですが、活動が激しいとはどういうことかという、太陽の表面付近でのガスの対流が強くなっていると言う事です。黒点の中心は温度が低くて暗いだけでも、その周りには、それを補って余りある大きさの白斑がある。【図5】で、黒点と白斑それぞれの、太陽の明るさに対する寄与を見てみると、黒点が暗くなっている時には白斑のほうが明るくなっている、この両方を足すとトータルでは明るくなっているということなのです。



【図5】

こういうことも最初のころはなかなかわからなかったのです。だから、その当時は本当に黒点が多いほうが太陽が明るいのか暗いのか議論になったのです。何でそれが分からなかったかというと、地球には大気があって、それが太陽光を散乱したり吸収したりするものですから、地表から測っている限りは、その影響のほうが太陽活動による明るさの変化より大きかったのです。それでなかなか分からなかった。

その後、1979年に衛星が打ち上げられて太陽の明るさの観測が始まって答えが出たのですが、太陽の黒点周期、いわゆる11年周期に対応して太陽の明るさは何パーセントぐらい変わっていると思

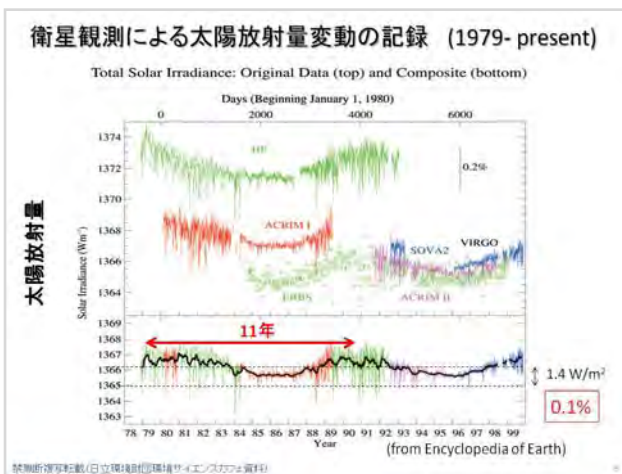
わかりますか？ 10%変わっていると思う人はいないでしょうね？ 1%より高いか低い。1%ぐらいだと思ふ人、手を挙げてください。

ああ、結構いらっしゃるね。

では、0.5%ぐらいだと思ふ方。はい。

では、0.1あるいはそれ以下と思われる方は。

大体三分されましたね。数としては1%ぐらいという方が3分の1ぐらいで、0.5%ぐらいというのが3分の1で、0.1というものが3分の1ぐらいですね。その答えはというと、これが先ほどお話しした衛星の観測の結果です。【図6】

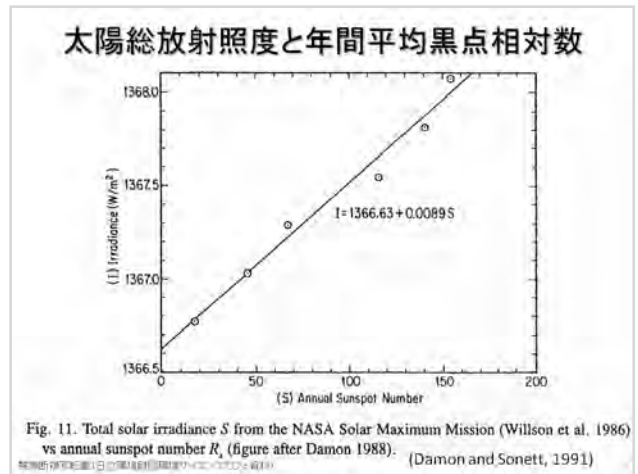


【図6】

衛星は寿命があって、数年ごとに新しい衛星を打ち上げるわけですが、それぞれの衛星が持っている測定器は、実は微妙に値がずれている。それをキャリブレーションすると言うのですけれども、要するにどのぐらいずれているかを補正して最終的に1つの太陽の明るさの変動曲線を描くわけです。図の曲線で細かくたくさんギザギザしているのは何が原因かというと、太陽の自転が原因なのです。太陽の黒点が地球に向かったほうに来るか、それとも裏側に隠れるか、そういったことが原因でこのギザギザ生まれます。このデータは1979年から2000年までの記録ですけれども、それをスムージングすると、いわゆる11年の周期で大体0.1%ぐらいの振幅で変化します。0.1%というのは大したことはないですよ。

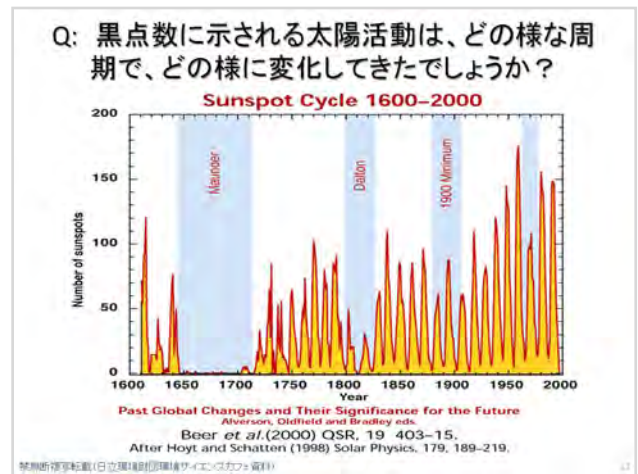
ついでにお話ししておくと、黒点数というのは、衛星が打ち上げられるずっと前から観測がされているわけです。それと太陽の明るさの間の関係を

確立してやれば、黒点を使って太陽の明るさの変化をもっと過去まで遡れる。そこで、黒点数と太陽の明るさの間の関係を求めると、そこそこきれいな関係があって、黒点が多いほど太陽は明るいという関係が導き出されたというわけです。【図7】



【図7】

これがヒントになるのですが、そうすると、黒点数の変化を調べることで太陽活動がどういう周期で変化したかのかが分かってくるわけです。では、太陽はどのぐらいのタイムスケールで変化したとお思いでしょうか？



【図8】

【図8】は、過去約400年間の太陽黒点数の変化です。図を見てお分かりだと思いますが、一番周期が短く、明確な黒点数変動が、11年周期の変化です。実は、一般に11年周期と言われていますが、その周期は正確には11年とは限らないのです。短い場合で8年から9年、長い場合で12年ぐらいです。実は、その周期の長さが太陽の活動に関係していると言われており、長い時期に太陽活動が

弱まっていることが分かってきました。

図を見ると、確かに11年周期というのは非常に顕著に見えますが、それ以外にももう少し長い周期が見えます。約11年周期の上に来るのが、大体88年ぐらい。これもぴったり88年というわけではなくて、88年を中心に80年から100年ぐらいの間で変化しているらしいのです。更に長い周期もあるように見えますが、記録が短すぎてはつきりしません。

さらに、西暦1650年～1700年ころにかけて、太陽の黒点がなかった時期が見られます。これを「マウンダー極小期」と呼ぶのですが、太陽から黒点が消えた時代として有名です。このマウンダー極小期が、実はヨーロッパの小氷期と呼ばれる時代と合っているのではないかと、そういう話を、少なくともちゃんとした科学誌に初めて書いたのが、ジャック・エディという方です。【図9】



【図9】

この方は天文学者、太陽物理学者なのですが、気候にも興味を持って、小氷期に関するいろいろな文書記録を調べた。実は先ほど、黒点数の記録は1600年までたどれるという話をしましたが、西暦1700年以前は記録が飛び飛びになり、あるところである期間、僧侶などが記録し、その人が死んでしまうと記録が途切れて、別のところでまたそういう記録がなされる。それらをつなぎながら一生懸命調べる。そうすると、西暦1650年～1700年ころにかけては、黒点の記録が見つからない。しかし、記録がないのは、たまたまそれを記録する人がいなかったのか、本当に太陽に黒点が

なかったのかとい事がなかなか分からないわけですね。それをエディさんが、一生懸命調べて、太陽を観測する人はいたのだけれども黒点がほとんどなかったのだということ突きとめたのです。

同時に、ヨーロッパの気候のいろいろな記録を調べると、例えばこれはテムズ川が凍ったと言われる時期の絵なのですが、どうもマウンダー極小期と合っているらしいということを見い出して、「サイエンス」というアメリカの有名な科学誌に論文を書かれたのです。これをきっかけに、太陽活動と気候変動の関係が話題に上り始めたのです。しかし、まだまだ反対する人のほうが多くて、彼は、その後何年もかかって、その考えを徐々に広めていったのです。

わたしも、この方が1990年ぐらいに日本に来られたとき、お会いしていろいろお話を聞きましたが、非常に熱心で、人のいろいろな話をよく聞かれる方でした。そうやって情報を集めながら一つ一つ証拠を固めていったのです。

先ほど太陽の明るさの変動幅は0.1%というお話をしましたが、よく考えれば、たかだか30年の衛星記録ですよ。一方、二つ前のグラフでは80年周期とか、ひょっとしたらもっと長い周期があって、太陽の黒点が全然ない時代もあった事を示しました。では、黒点が無くなった時には、太陽の明るさはどのぐらい減り得るのでしょうか。そういうことを考える人がやはりいるのです。これに関しては何のぐらい変わるとお思いますか？例えば、0.2%ぐらいは変わるのではないかとお思いの方は手を挙げてください。

3～4名ぐらいですか。では、0.3%ぐらいは？
では、0.5%ぐらいと思われる方はどうですか？
はい、どうもありがとうございます。

これも正解は、わからないのです。現在分かっている範囲でどういうことが言われているかをご紹介します。その一つが、太陽に似た星を見つけそれを観測し、それがどのぐらい明るさを変えるのか、その変えるときの様式がどうなっているのかというのを調べる研究です。【図10】

特に、太陽と質量、年齢も似た星を探してきて見ると、大抵はやっぱり太陽みたいに明るさを変

化させているのです。11年とは限らず、数年とか、短いになると数カ月ぐらいの周期で変化している星もあるのですが、そういう中でほとんどまたたきのない星があるわけです。では、そういう星がどのぐらい暗くなっているかという比較をして推定した値が0.24%ぐらい暗いのです。更に、それ以外の暗くなる理由ををいろいろ考えて全部足すと0.35%ぐらいになるのです。結局、妥当な値というのは多分0.24%くらい、どんなに頑張っても0.35%ぐらいよりも変動させるのは難しいというのが結論です。もちろんこれは比較恒星学、要するに太陽と似た星と比較してどうなっているかという類推ですが、ある程度は根拠があるということです。マウンダー極小期というのは活動がない状態に相当すると考えると、0.24%低下したとなるわけです。

**Q: 太陽の総放射量はどの位
変わり得るでしょうか？**

他の太陽に似た恒星の観測に基づく推定

TABLE 1. Solar Radiative Output During the Maunder Minimum

CASE	CaII Emission		Total Solar Irradiance	
	K	HK	S	(S-S _A)/S _A ×100
no spots, plage or network	0.0758	0.156	1365.43	-0.157
non-cycling stars (average)	0.0686	0.145	1364.28	-0.247
minimum possible Sun	0.0588	0.130	1362.71	-0.357

(Lean et al., 1992) S_A=1367.54 W/m²

【図 10】

実は、衛星観測データ、特に太陽の明るさの変動幅が0.1%しかないというデータが1980年代に出てきて、それが、「気象学者が太陽は気候にほとんど影響しない」という主張を強くした理由なのです。どういうことかと言うと、先ほどの放射平衡の式で、太陽の明るさが0.1%変わると地表温度がどのぐらい変わるのかという計算をしたわけです。さっきの放射平衡式に0.1%だけ増やした太陽定数を代入して計算した場合の、地表温度の増加はわずか0.07℃。ほとんど変わらないのです。太陽の明るさが0.1%変わっても、地表温度にはほとんど影響しない。では、大きめの値、0.3%で計算したらどうかと言うと、それでも0.25℃の上

昇です。無視はできないですが、とても大きい値とは言えないですね。

こうすることで、太陽の明るさが0.1%ぐらい変わっても、あうるいはマウンダー極小期のような無黒点状態になって明るさが0.24%下がっても、地表温度には余り影響しないという考え方が、1980年から1990年ぐらいには支配的だったのです。だから、太陽活動が気候変動を引き起こしているという主張をしても、なかなか受け入れられなかった。

まとめ(1)

- 太陽総放射量は、0.1%前後(どんなに大きく見積もっても0.3%程度)しか変動しない。
- 放射平衡から見ると、これは、0.07℃(最大で0.25℃)程度の変化を生むのがやっとである。

→ 「太陽活動が気候に影響を与える」という考えは、当時の気象学者たちには受け入れられなかった。

→ 一方、古気候学者は、Eddyの主張に耳を傾け、太陽活動と気候変動の関係を探り始めた。

- 古気候学者が太陽活動と気候変動の関心に興味を持ったもう一つの理由は、過去の太陽活動の変動を復元する方法がその頃開発されたことにある。

気象庁気象研究所(日本文学雑誌協会)編集(気象庁資料)

【図 11】

ここまでを一応まとめますと、太陽の明るさは、総放射量でいくと、0.1%ぐらいしか変わっていない。かなり多めに見積もったとしても0.3%ぐらいでしょうということです。放射平衡でこれを考えると、地表温度を0.07℃、最大で0.25℃ぐらいしか変化させることができないという事です。太陽活動が気候に影響を与えるという考え方は、このような理由で当時の気象学者の人たちには受け入れられなかったのです。

一方、古気候学者達はエディさんの主張に耳を傾けて、太陽活動と気候変動の関係を探り始めたのが、やはり1970年代からです。これにはいろいろ理由があって、堆積物の縞、年輪みたいなものですが、の厚さを測ると、どういうわけか11年周期がよく出てくるのです。そういうことが一つのきっかけなのですが、古気候学者が太陽活動と気候変動の関心に興味を持ったもう一つの理由は、過去の太陽活動の変動を復元する方法が開発されてきた事です。そういう方法が手に入ると、やは

りそれを使って、過去の気候変動と比べてみたくなるわけです。そういう研究が80年代ぐらいから始まりだしたわけです。

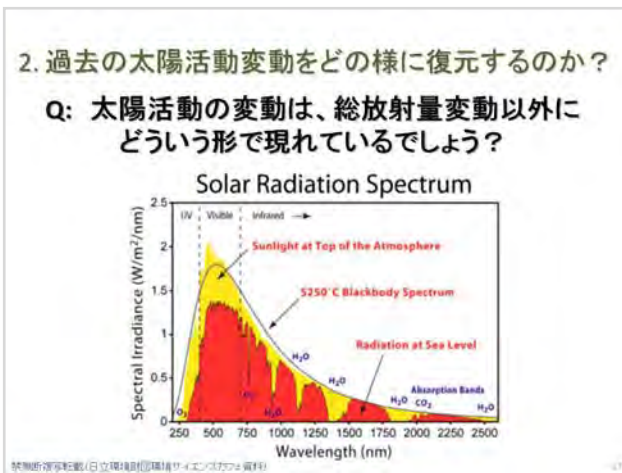
ということで、次に、過去の太陽活動の復元法のお話をします。過去の太陽の活動は、一体どのように復元するのでしょうか。質問が、あまりに漠然とし過ぎているので、その前に、太陽活動の変動というのは、先ほどは総放射量の変動としてお話ししましたがけれども、それ以外にどういう形で表れ得るのでしょうか、と言う質問をします。かなりマニアでないとご存じないかもしれないのですけれども、いかがですか？

会場：フレアとかプロミネンスみたいな形で、太陽から出てきたプラズマの流れ、太陽風の強さとか。

多田先生：いいですね。太陽風が出てきましたね。結構いい線をつけています。

会場：太陽の磁場が弱まったり強まったりして、ほかの星に影響がいくと思います。つまり、地球に異常が起きて、放射線量とかが増える。

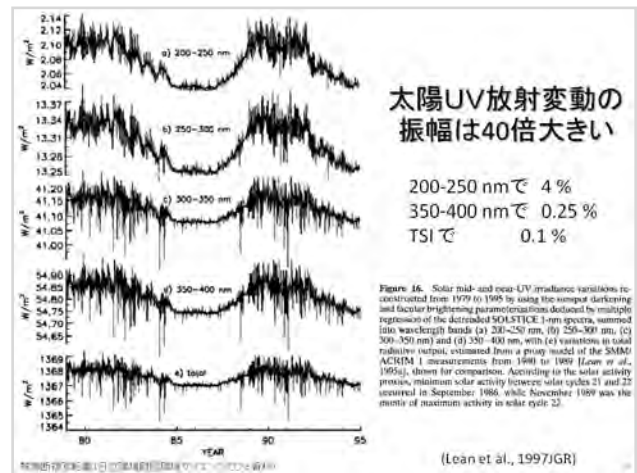
多田先生：そうですね。それが過去の太陽活動の変動を復元する原理の中核的な役割をするのです。では、ここでは、太陽活動に伴う重要な変動を二つお話しします。



【図 12】

先ず、一番目の変動ですが、それは、太陽光の

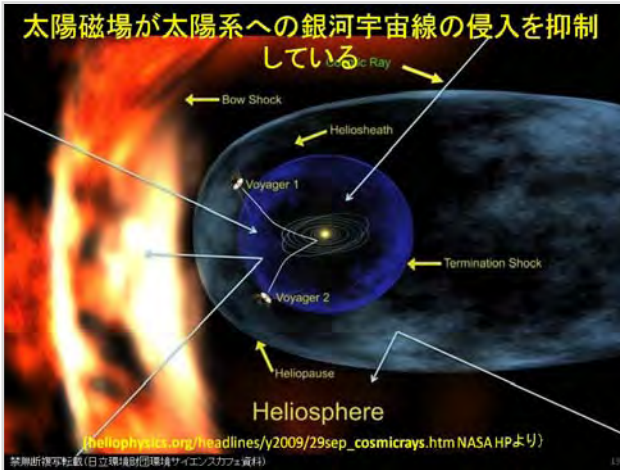
スペクトル分布の変動です。この【図 12】太陽光のスペクトルを示します。横軸が波長で、左側が紫外領域、右側が赤外領域、一番高いピークのところが可視領域です。縦軸がエネルギー、明るさを示します。現在の太陽というのは、この黒線で示したようなスペクトル分布を持っているわけです。地球に届くエネルギーの大半は、可視領域の光が担っています。では、太陽が明るくなると、これがどう変わるのでしょうか。最初は、どの波長も同じように、例えば0.1%強くなったり、弱くなったりというふうに考えていたのですけれども、そうではないということが分かってきました。それが1番目の点です。それはどういう意味があるのか、次に説明しましょう。



【図 13】

次の【図 13】は、横軸が1979年から1995年までです。いろいろなカーブがありますが、何かというと、色々な波長ごとの太陽の明るさ、スペクトルの強さの変動を示しているのです。光の波長が200から250ナノメートルというのは我々の目では見えない紫外線の領域です。図の下に行って400ナノメートルになると、ぎりぎりで見える領域に入ります。例えばこの200から250ナノメートルという領域では、太陽活動が最大のとときと最小のとときで光の強さが4%ぐらい違うのです。一方、トータルでは、さっきも話したように、0.1%ぐらい。そして、その中間の300~400ナノメートルの領域だと0.25%ぐらい。すなわち、太陽放射のエネルギーの大半を担う可視領域での変化はほとんどないのだけれども、紫外

領域、実は赤外領域もそうなのですけれども、では変化の割合が大きくなるのです。紫外領域の光の寄与は、エネルギーの総量としては微々たるものですが、今問題にしているのは、変動の割合なのです。紫外領域での変動は、割合としてはすごく大きい。それが実は重要なのです。



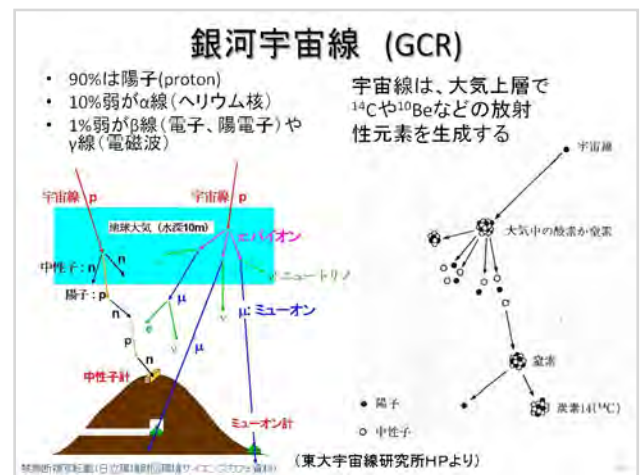
【図 14】

二番目の変動は、地球に到達する宇宙線の強度の変動です。実は、太陽にも磁場あり、その強さや空間パターンは、太陽活動に伴って変化します。その太陽の磁場が、太陽系外から太陽系に入って来ようとする宇宙線、「銀河宇宙線」というのですけれども、を防いでいるのです。【図 14】磁場が強いと、宇宙線を曲げて、太陽系の中に入って来ようとするのを妨げる効果が強まります。逆に弱くなると、銀河宇宙線がたくさん入ってくるようになる。この現象が、実は、過去の太陽活動を知る手がかりになるのです。

まず、銀河宇宙線とは何なのかというと、基本的に 90%が陽子、10%がα線、あとβ線、γ線がほんの少しずつというもので、超新星爆発などで作り出されるのです。それが太陽系外の宇宙から飛んでくるのですが、それが太陽系内に入ってくるのを、太陽磁場が防いでいるのです。完全に防いではいないのですが、太陽活動が強いとより防御が強くなり、弱くなると防御が弱くなるのです。その結果、地球に入ってくる銀河宇宙線の量が変わってくるのです。

では、銀河宇宙線が地球に入ると何が起こるのでしょうか？ 次の【図 15】にあるように、地球の

上層大気分子とぶつかって、それをこわすのです。



【図 15】

図では、宇宙線が大気中の酸素や窒素にぶつかって、これをバラバラにするのです。そして、そこで出た中性子がまた窒素とぶつかったりすると、炭素 14 などを作り出す。炭素は、普通は分子量が 13 か 12 ですよね。14 というのは放射性の炭素です。放射性ですからどんどん崩壊して数が減っていくわけです。炭素 14 は、何に使うので有名ですか。

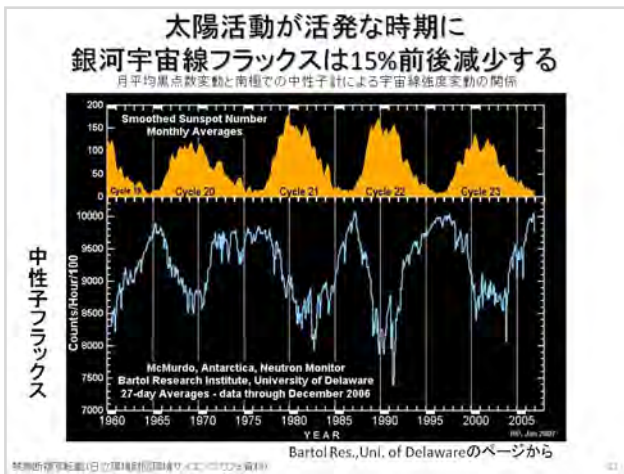
会場：古いものの年代測定に使う。

多田先生：そうです。年代測定に有効だということで、土器とか人骨とかの年代を測る道具に使われています。というわけで、実は宇宙線がたくさん入ってくると、大気中で炭素 14 がたくさんできるのです。ベリリウムという分子についても同じようなことが起こって、ベリリウム 10 という分子が作られます。それらが、過去の太陽活動を復元する際に利用できるのです。

ついでに、ここでもう一つお話ししておくと、地球の表面で銀河宇宙線が入ってくる量を測るという場合、実は中性子を計っているのです。それを基に、入ってくる宇宙線の強さを推定しているのです（【図 16】の左）。

先ほどから太陽活動が地球に入ってくる銀河宇宙線の量をコントロールしているという話をしていますが、その証拠は何かという話をします。

次の図の上のオレンジ色で書いたグラフが太陽黒点数の変化で、横軸が 1960 年ぐらいから 2008 年までです。そして、下のグラフが、中性子計で測っている中性子入射量です。この量が、宇宙線の入射量を反映しているのです。



【図 16】

2 つのグラフを比較すると、中性子入射量にも 11 年周期の変化が見えるだけでなく、そのピークの高さとか形も太陽黒点数変動とかなり似た形で変化しているのがお分かり頂けると思います。それから、その変動の幅というのは実は結構大きいのです。極大値が 1 万に対して極小値が 8,000 ですから、変動の割合としては 20%を越えます。実は宇宙線の地球への入射量の変化の割合は大きいのです。

さて、こうして、銀河宇宙線が入射して、大気の上層で大気分子に衝突して炭素 14 やベリリウム 10 などを生み出す事、地球に入射する宇宙線量が、太陽活動の影響を受けて変化する事が分かってきたわけです。では、過去の太陽活動の変化というのはどうやって復元することができるのでしょうかというのが次の質問なのですが、これを正確に答えるのはかなり難しいと思います。大まかな答えで結構ですが、いかがでしょうか。

先ほど、例えば炭素 14 の生成率というのは、太陽活動が強いときは少なく、弱いときは多いという話をしましたよね。だったら、過去に遡って、それを測ってやればいいわけです。過去のある時期の大気中の炭素 14 の濃度を測ることができ

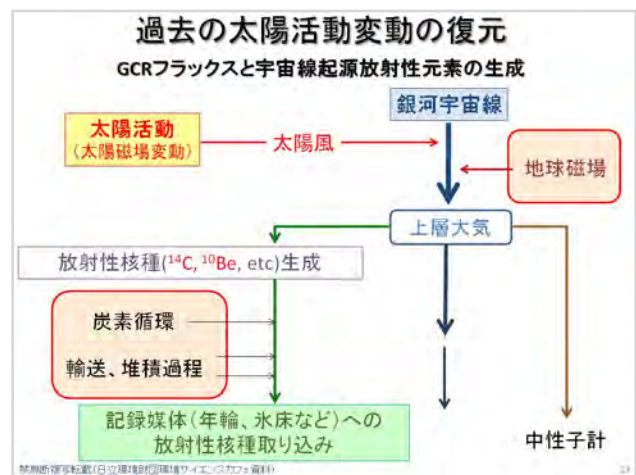
ば、その変化を調べることによって太陽活動の変化を見ることが出来る。それが原理なのですが、一つ問題があります。何かというと、炭素 14 にしてもベリリウム 10 にしても、時間とともに崩壊していくのです。例えば今ここに 1000 年前の木の年輪があるとしますよね。その中の炭素 14 の濃度を測っても、それは、その年輪ができたときの炭素 14 の濃度ではないわけです。では、どうしたら良いのでしょうか。

会場：半減期から逆算することはできないですか。

多田先生：逆算することができます。その為には何が分かればいいですか。

会場：別の方法で年輪の年代が分かっているならば、逆算して、その年輪が出来た時の濃度が求められる。

多田先生：そうです。正解です。年輪を数えれば、その年輪が何年前の年輪か分かりますよね。その現在の炭素 14 の濃度を測ってやって、その年輪が出来てから今までに崩壊した分だけ補正してもとの値に戻してやると、その年輪ができた当時の炭素 14 の濃度が分かるのです。そういう方法での炭素 14 濃度の初期値の推定が 1970 年ぐらいから始まりました。ベリリウムでも同じような方法が使えます。但し、ベリリウムは年輪には入っていないので、氷を使うのです。グリーンランドや南



【図 18】

極の氷床の氷の縞を使って年代を推定する方法を使います。【図 18】

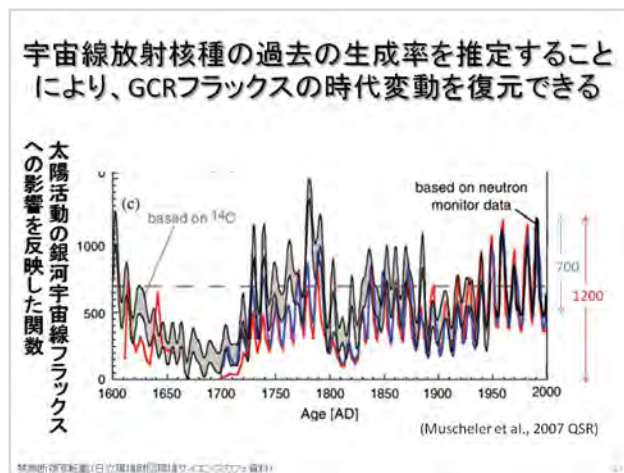
今お話ししたのはちょっと複雑な話なので復習を兼ねてもう一度ご説明しますが、銀河宇宙線というのは、基本的にはランダムに宇宙空間を飛んでいます。それが太陽系に入ってこようとするのですが、そのときに太陽の磁場活動や太陽風によってこれが防がれる。要するに、太陽活動が強いかがどうか、銀河宇宙線の入射量を決めているのです。

実は地球の磁場の变化も銀河宇宙線の入射量に影響します。ただ、地球の磁場というのは11年周期の様な短いタイムスケールでは余り変化せず、もっと長いタイムスケールで変化するので、数年～数百年という短いタイムスケールでは影響がないことが分かっています。数百年より長いタイムスケールになると、評価する必要が出てきます。

上層大気に銀河宇宙線が入ってくると、炭素14とかベリリウム10と言った「放射性核種」が大気の上層で生成されます。そのうち、炭素14のほうは、これはCO₂中の炭素となって、大気の中で拡散して均一化します。それを植物が光合成によって年輪に取り込んで固定するわけです。ベリリウム10のほうは、形成されるとすぐにエアロゾル（微小な液滴）に取り込まれて地表に落ちてきます。これが氷床中に不純物として混入しますので、それを測ることができます。だから、先ほどの原理で、ベリリウム10とか、炭素14の濃度を、年輪を1年1年、過去にさかのぼって測ってゆくことによって、過去の太陽活動を復元することができるというわけです。

そのためには、現在測られている太陽放射量や宇宙線入射量と炭素14やベリリウム10の濃度との間で換算式を立てる、要するに炭素14の濃度がどれくらい変化すると、それは太陽活動の明るさの変化にしてどのくらいに当たるのかという関係式を立てる必要があるわけです。それらの関係を示したのが次の【図 19】で、青が中性子の入射量の変化、つまり銀河宇宙線入射量の変化を示したものです。赤が黒点数の変化、グレーでシェードを掛けたのが、炭素14の濃度変化です。これら3

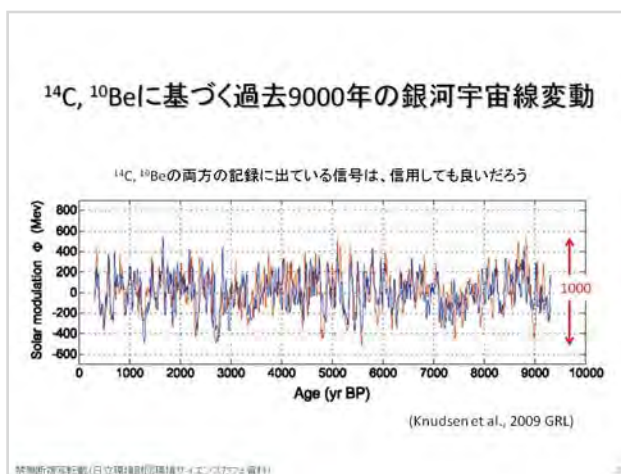
つを重ねてやると、完全ではないですが、そこそこ重なっているのが分かります。



【図 19】

こういうふうにして、炭素14の濃度がどのくらい変わるの、太陽の黒点数でいえばどのくらいに対応しているかを換算するのです。それがこの図の意味するところで、観測値が存在する期間で、炭素14やベリリウム10の濃度がどれだけ変わるの、太陽の明るさがどれだけ変わるのに対応しているかという比例係数を求めてやり、その関係を基に年輪や氷に記録された炭素14やベリリウム10の濃度変化から、過去の太陽活動の変化を復元するのです。

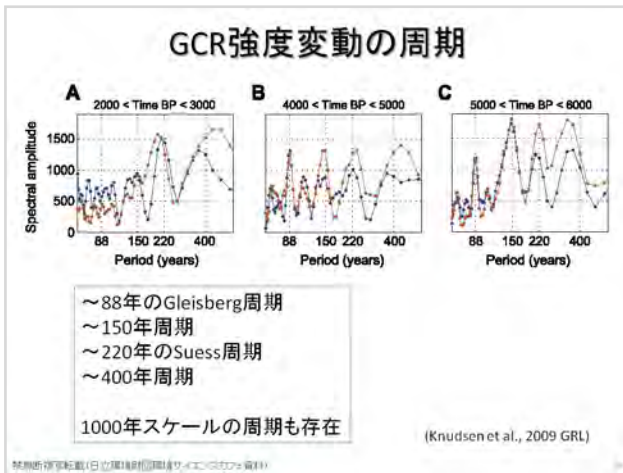
そういう目でもう一回この図を見てみますと、衛星での観測に対応した現在の振幅に対して、例えばマウンダー極小期の振幅は2倍弱です。先ほどご紹介した比較恒星学的推定では、2.4倍でしたので、そこそこ合っていることが分かります。



【図 20】

今では炭素14やベリリウム10の濃度変化が過

去 9000 年まで復元されています。【図 20】の赤線は炭素 14、青線はベリリウム 10 の濃度変化を示しています。図では、それぞれの長周期の変化は取り除いているのですが、両者の変動がよく合っていることが分かります。この様に二つの独立した指標で同じ変化が見えているということは、銀河宇宙線の入射量変動を表しているに違いないと考えられる訳です。



【図 21】

この結果を周期解析して、どういう周期があるのかを解析した結果が次の【図 21】です。図では、時代で幾つかに分けています。図では 2000 年から 3000 年前、4000 年から 5000 年前と、5000 年から 6000 年前に分けていますが、時代によって周期構造が若干は変わっています。大局的には、先ほどお話しした 88 年周期が明確に見えています。その次は 150 年ぐらい、それから 220 年ぐらい、そして 400 年ぐらいの周期がある事が分かります。

ですから、太陽活動の周期というのは、階層構造を持っているのです。そのうち、我々が明るさの変化幅まで含めて知っているのはせいぜい 400 年周期まで。それより長いタイムスケールでの変化はよく分かっていません。図の縦軸はソーラー・モジュレーション・ファンクションといって、濃度それ自体ではないのですけれども、それを規格化した関数なのです。図での過去 9000 年間の変動幅は 1,000 ぐらいで、マウンダー極小期の変動幅 1,200 とあまり変わりません。この記録を信用すれば、太陽活動の数百年スケールの変化は、

過去 9000 年を通じて 0.2%程度ということが推定できるわけです。

まとめ (2)

1. 黒点数変動に伴う太陽総放射照度の変動幅は**0.1%**程度だが、UV放射照度の変動幅は、200-250nmで**4%**に及ぶ。
2. 銀河宇宙線を反映する**中性子フラックス**も黒点数変動と良い相関を示し、その変動幅は**20%**に及ぶ。
3. ¹⁴Cや¹⁰Beなどの宇宙線放射核種を使って太陽活動の記録を8000年前まで延ばす試みがなされたが、その変動幅は、マウンダー極小期以降の変動幅と余り変わらない様である。
4. ¹⁴C初期濃度の時系列記録などから、88, 150, 220, 400 年などの周期が見出されている。更に約2500年の周期もみられる。

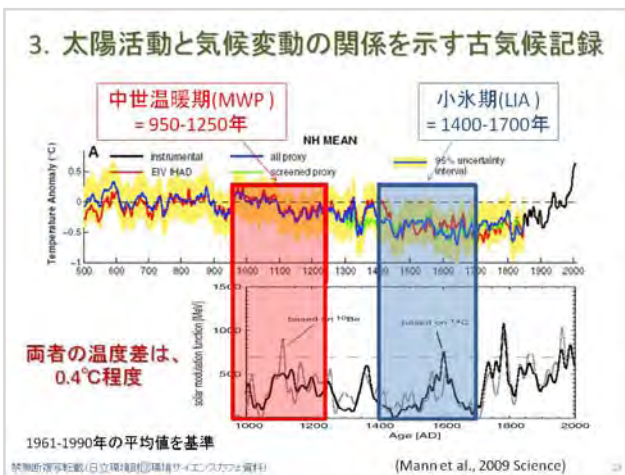
【図 22】

ここまでをまとめると、第一に、黒点の変動に伴う太陽の明るさ（全放射量）の変化は 0.1%ぐらいですが、紫外線領域のように放射スペクトルの裾野にいくと、その変動幅は増加し、例えば 4%ぐらい、40 倍にくらいになる。第二に、銀河宇宙線の入射を反映する中性子フラックスも、実は黒点数の変動と非常によい相関を示していて、その変動幅も 20%ぐらいある。第三に、炭素 14 やベリリウム 10 といった宇宙線放射核種を使って太陽活動の記録を 9000 年前まで伸ばす試みがなされていますが、その変動幅は、マウンダー極小期以降の変動幅とあまり変わらない。だから、マウンダー極小期の状態をちゃんと把握出来れば、太陽が一番暗くなった状態を把握したことになるだろうという事です。それから、今日は時間の関係でデータをお見せしませんでしたけれども、実はもっと長い 2500 年ぐらいの周期も存在します。

ということで、マウンダー極小期を知ることには結構意味があるということがご理解いただけたと思います。

それでは、そのマウンダー極小期の気候はどうなっていたのでしょうか。実は、マウンダー極小期の前に、中世温暖期、Medieval Warm Period と言いますが、という時期があって、この二つを寒い時期と暖かい時期というふうに対比させて議論することが多いのです。次の【図 23】に示すのも

そういった研究の一例です。上のグラフは、木の年輪の幅を基に過去 1500 年間の全球平均気温の変化を復元した結果です。グラフを見ると、全球気温は、西暦 1000 年以降徐々に下降していたのが、西暦 1800 年以降上昇しています。これがホッケーのスティックの格好に似ているので「ホッケースティックカーブ」と呼ばれるのですが、これが本当かどうかという事でいろいろな議論が巻き起こっているのです。



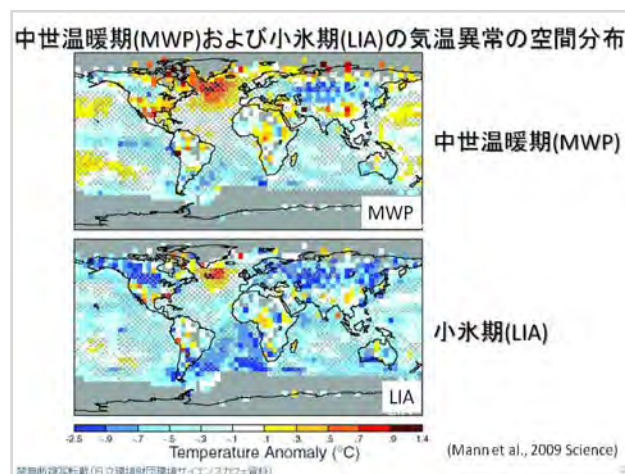
【図 23】

今回は、1800 年以降の温暖化の話はしないで、いわゆるマウンダー極小期と小氷期、「リトルアイスエイジ」と呼ばれている時期、の関係に関する話をします。小氷期の定義は、人によって違うのですが、図では 1400 年から 1700 年と広めにとってあります。図から明らかなように、小氷期の一番最後あたりがマウンダー極小期に対応します。また、中世温暖期、「メディーバルウォームピリオド」、というのは 950 年から 1250 年あたりです。下のグラフは太陽活動の指標の時代変化を示しています。図を見ると、中世温暖期というのは、どっちかという太陽活動が活発な時期に対応しています。一方、小氷期というのは、実は、その中ごろに比較的太陽活動が活発な時期が挟まっています、その前後に不活発な時期があるということです。

上のグラフから明らかなように、実は、中世温暖期と小氷期の間での全球平均気温の差というのは、たかだか 0.4°C ぐらいで、あまり大きくはないのです。しかし、いろいろな文書記録では、小氷

期と言われる時代は、ヨーロッパはとても寒かったと言われていました。

では、2 つの時代で、気温の空間分布はどうだったのでしょうか？従来は、ある特定の地域の古気候記録を基に、温度がどう変わったか、と言った議論が多かったのですが、データがどんどん増えていますから、空間的にどうなっていたかを示す事が出来るようになってきました。それを示したのが、次の【図 24】です。この図は基本的に年輪のデータを使って復元されたもので、中世温暖期と小氷期の気温が、平均からどれだけずれていたかを示しています。青色になるほど平均よりも寒かった、赤い色になるほど平均よりも暑かったことを示しています。



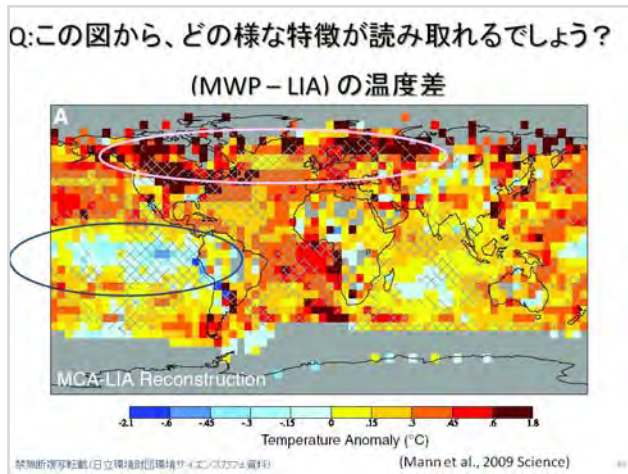
【図 24】

この図を見るとどういことが分かるでしょうか？

人によって見るところは違うかもしれませんが、全体で見ると、中世温暖期のほうが小氷期よりは黄色、赤が多い。つまり暖かいのが解ります。しかし、中世温暖期でも寒いところはあるし、小氷期といっても暖かいところはあるわけです。ですから、これが太陽活動に伴う変化であるとする、どうも単純に全体が暖まるとか寒くなるという変化ではなくて、パターンの変化と言った方が良いのではないかと思います。

それをもう少し明確にするために、上の図の温度偏差から下の図の温度偏差を引いた図を次にお見せします。【図 25】世界の各地点で、小氷期に対して中世温暖期がどの位暖かかったかを示した

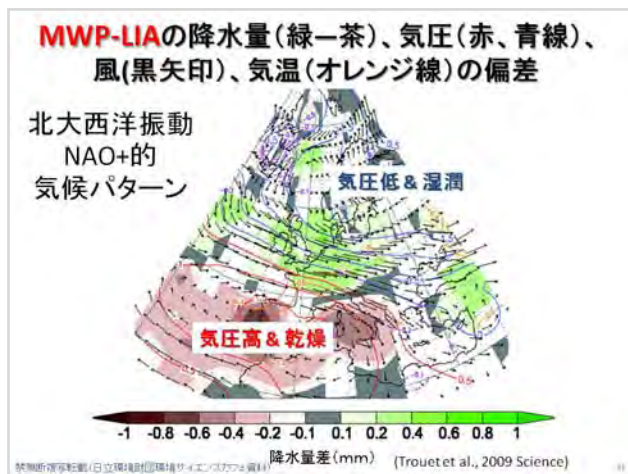
図です。図を見ると確かに中世温暖期のほうが全体に暖かくなっていますが、それ以外に、この図からどのような特徴が見えるでしょうか。



【図 25】

会場：北半球と南半球。

多田先生：そうですね。一つは、北半球高緯度域がやたらに暖かいですね。ヨーロッパの北とかカナダですね。もう一つは、青い部分が少ないけれども存在しますよね。どこにあるかという、東赤道太平洋域です。この二点が注目点になるのではないかと思います。

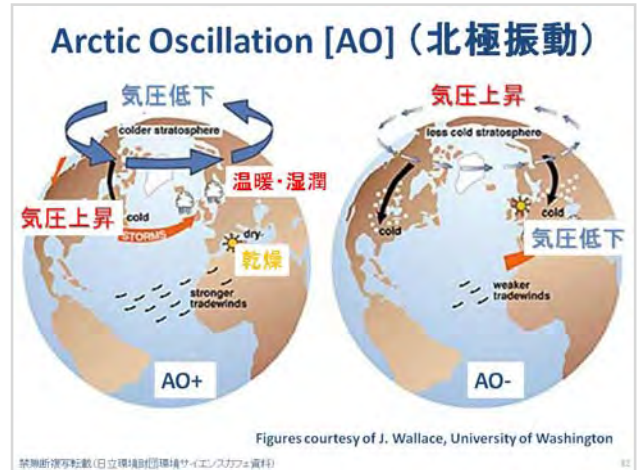


【図 26】

今の図は全球の図でしたけれども、ヨーロッパ周辺は、もっと細かい研究がされています。次の【図 26】は、ヨーロッパにおける中世温暖期と小氷期での、降水量、気圧、風、気温の差を示した図です。

図を見て分かる事の第一は、ちょうどスペイン

のあたりに気圧が高く乾燥した領域があり、スカンジナビアのほうは、気圧が低くて湿潤な領域があるということです。実は、このパターンというのは、北大西洋振動、NAO といいますけれども、の気候パターンに良く似ています。NAO というのは、大西洋周辺に住んでいる人たちがネーミングしたものですけれども、実は、これはヨーロッパだけの現象ではなくて、全球的に、特に北半球で強く起こっています。これを北半球全体について見たものが、北極振動です。【図 27】



【図 27】

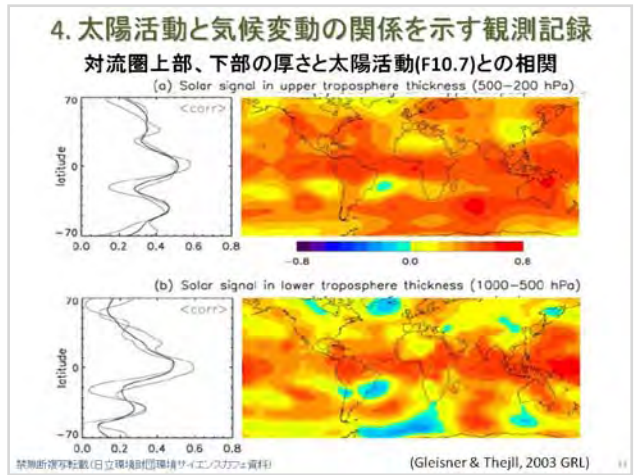
北極振動というのを、多分皆さん聞かれたことがあると思うのですが、特に去年あたり新聞を結構賑わしました。どういうものかという、南北半球の極域には低気圧がずっと存在します。そして、その周りには相対的に気圧の高い部分が分布します。極を真上から見ると気圧の高い所がドーナツ状の分布をしていて、低気圧域と高気圧域のコントラストが強くなったり弱くなったり振動しているのです。それを極振動と言います。北半球では北極振動と呼ばれ、南半球にも同じような振動があつて南極振動と呼ばれます。この北極振動のプラスのモードというのは、気圧のコントラストが強い時期の事を言います。北の極域は低気圧がより強くなって、南の中緯度域は高気圧があれば、それがより強くなっているという状態です。逆にそれが弱くなるのが、極振動がマイナスの時期です。先ほどの NAO というのは極振動と同じで、NAO プラスは北極振動のプラスに対応します。どうもこの北極振動が太陽活動と関係して

いるらしいというデータが、先ほどの中世温暖期と小氷期の気温偏差を取った図でも見えているし、ヨーロッパだけを詳しく調べた図でも結構きれいに見えています。

去年の冬が北極振動がマイナスの状態だったと思うのですが、ヨーロッパやアメリカで大雪が降って、新聞などでそれは北極振動のせいだという話が出たと記憶します。例えば大雪が降るようなところというのは北半球高緯度全域に広がっているわけではなく、ある特定の地域で起こっているのです。どちらかといえばパターンの変化なのです。全体が暑くなる、全体が寒くなるのではなく、パターンが変わってある特定の地域が非常に寒くなる。また別のところは、むしろ暖くなる、そういった変化なのです。

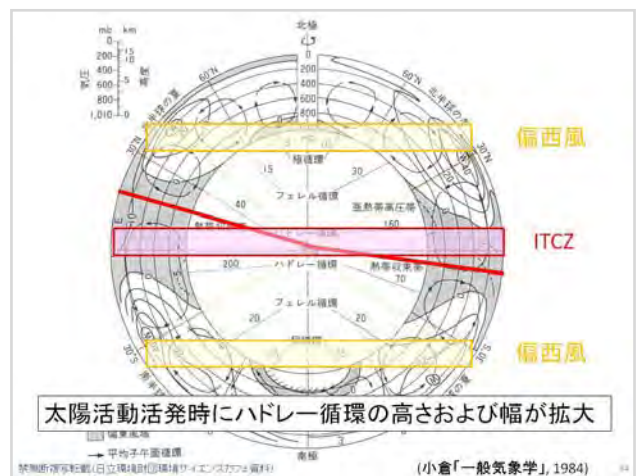
そういうわけで、どちらかという古気候学分野の研究から太陽活動と気候変動は関係しているらしいというデータがどんどん出てきたのです。それを追うような形で、現在の観測記録でもそういう関係が見えるという論文が 2000 年代に入ると出てきました。理由には、大きく分けて二つあって、気象学者たちは最初は放射平衡だけで考えていたのだけれど、どうもそれだけではないということがだんだん分かり始め、古気候学のほうから太陽活動と気候変動の関係が見えてきたので、そう目で観測記録を見直してみたら関係が見えてきたという部分の一つあるのですが、もっと大きい理由は、先ほども言いましたけれども、衛星記録がたまってきたことです。衛星観測が始まった当初は、太陽の黒点周期で 1 回分しか記録がありませんでした。そんな状態だと統計的に有意な違いというのはなかなか出せない。しかし、今やもう 30 年を超えましたから、黒点周期 3 つ分の記録を持っているわけです。そうすると太陽活動が極大の時期と極小の時期でどういう違いがあるかという事が観測記録から見えるようになってきました。それが一番大きいのです。

そうすると、観測記録からいろいろなことが見えてきます。【図 28】この図はその一例ですが、この図は、太陽活動と対流圏上部の厚さ（上図）および下部の厚さ（下図）の相関係数の地理的分



【図 28】

布を示した図です。太陽活動の指標として、F 10.7 という 10.7cm の長波での太陽の明るさを使っています。先ほどもお話ししましたが、可視領域では、太陽活動に伴う明るさの変動はほとんどないのですが、非常に波長が長い領域や短い領域では、太陽活動に伴う明るさの変動が見えてくるわけです。大気の影響を取り除いても十分見えるというので、昔からこの F 10.7 という長波長の光の強さを見ます。上の図を見ると、特に赤道付近と、中緯度域で高い相関が見られるのが分かります。対流圏下部の厚さとの相関を示す下の図でも特に赤道付近では相関が見えています。左側のグラフは、縦に緯度、横に相関係数をとったものですが、やはり赤道付近で相関係数が高くて、0.5~0.6 あります。また中緯度域で再び相関が増すのが見てとれると思います。



【図 29】

これは何を意味するのでしょうか？次の【図 29】は、地球の子午面方向の断面で、地球の大気循環がどの様に成り立っているかを示しています。基

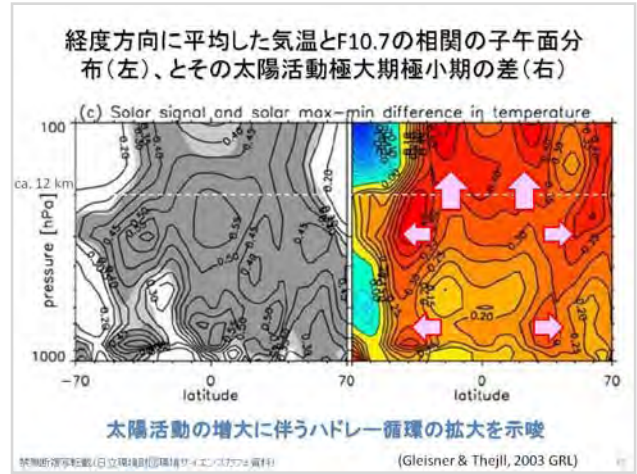
本的に大気の循環というのは赤道域で上昇流を起こして亜熱帯域で下降流を作るハドレー循環と、それとかみ合うように、中緯度域で下降して、高緯度域で上昇するフェレル循環、さらにそれとまたかみ合うように回る極循環があります。これらは、赤道を境に対称に両半球に存在します。

つまり、地球の大気循環というのは、緯度方向に三つの循環が歯車みたいにかみ合わさってできているのです。そして、両半球のハドレー循環がかみ合った赤道域では上昇気流が非常に強く、そこに雨をたくさん降らせませす。その結果、その下には熱帯雨林が分布する。一方、中緯度域では下降流が卓越しています。赤道域で上昇して雨を降らせて、カラカラになった空気をそこで吹きおろします。その結果、その下には砂漠が発達するわけです。

ひとつ前の図で、太陽活動と対流圏の厚さの相関が強いところというのは、一つはこの上昇気流が起こっている所、もう一つは、下降流が起こっている所です。一つ前の図が何を意味しているかという、太陽活動が強まると、赤道域（赤道収束帯と言います）の上昇流が強まって対流圏の厚さが増すとともに、ハドレー循環自体ももう少し高緯度まで広がると言う事です。要するに、ハドレーセル循環が拡大してフェレル循環を置き換えた部分では、気温も上がって、対流圏の厚さも厚くなるわけです。つまり、太陽活動が活発化したときに、ハドレー循環の上昇流も強くなるし幅も広がる、という傾向が見えてきたのです。

太陽活動が活発になると、ハドレー循環の高さと幅が拡大することは、観測事実としてかなり確立してきました。ここ数年、海外の学会でもこの話題を扱ったセッションが増えてきて、全体的にそれを肯定する論調になっています。

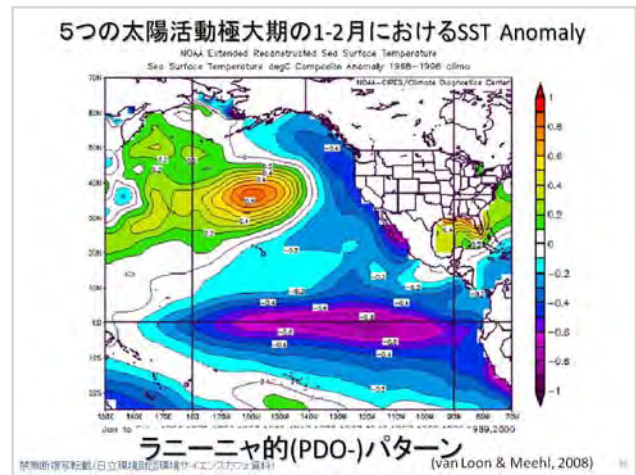
次の【図 30】は、今の言ったことを別の視点で見せた図です。左の図は、子午面方向の断面上で、気温と太陽活動の間の相関係数がどう分布しているかを示しており、右の図は同じく子午面方向の断面上で、太陽活動が極小の時期に比べて、極大の時期ではどこで温度が上がっているかを示しています。時間の関係で、右の図だけ説明しますが、



【図 30】

極大期の気温は、赤道付近の大気の上層と、ハドレー循環の外縁部分で上がっています。このパターンは、ハドレー循環自体が上にと横に伸びて広がっていると考えると、よく説明でき、先ほどの考えを支持します。

さらに、先ほども言いましたように、衛星データがたまってくるにつれ、太陽活動が最大のとくと最小のときの差として、どういうパターンが生まれるかを調べることもできるようになってきました。その一例が次の【図 31】です。これは太陽活動極大期と極小期の間での1、2月における地表面温度の差の空間分布を示したものです。図から、どの様な特徴が読み取れるか、お分かりですか？。



【図 31】

赤道のところで水温が下がっていますね。太陽活動が活発なときに東赤道太平洋の水温が下がっている。先ほど、中世温暖期と小氷期の地表面温度の差をとったときに、全体としては中世温暖期

の方が暖かかったけれど、東赤道太平洋だけ冷たくなっていましたよね。それと同じ傾向が見られるのです。このパターンを見て、あっ、あれだと思ふ人がいたらすごいだけでも、どうでしょう？

会場：ラニーニャのほう。

多田先生：そうです。ラニーニャのパターンです。ラニーニャ的なパターンが太陽活動が強いときに出るということが言えそうということが分かってきた。

実は、太平洋 10 年スケール振動 (PDO と呼ばれます) という気候モードが気象データ解析から提唱されているのですが、その PDO のパターンにも似ています。どういうことかということ、例えば太平洋という大きな海を考えたときに、それが振動をしているらしいのですが、その振動をどうも太陽活動が増幅する役割を果たしているらしいことが分かってきました。

まとめ (3)

古気候記録や観測記録によると、

1. 高緯度域においては、太陽活動に連動してAOに似たパターンの変動が起こっている。
2. 低緯度域では、太陽活動に連動してENSOに似たパターンの変動が起こっている。
3. 赤道域および中緯度域では、太陽活動に伴ってハドレー循環の強度や幅の変動が起こっている。
4. 地球全体の平均気温を変化させるというよりは、気候の空間的パターンを変化させている。

【図 32】

ここまでをまとめますと、古気候記録や観測記録を総合的に見ると、太陽活動に連動して、高緯度地域では北極振動に似たパターンが生まれている。低緯度地域では、エルニーニョ、ラニーニャに似た変動が起こっている。赤道域から中緯度域ではハドレー循環が強まったり弱まったりしているということになります。

実は、気温の話はあまりしなかったのですが、太陽活動が最大のとときと最小のときの温度差は、

あまり違っていません。そこがポイントです。太陽活動が気候に与える影響というのは、全体を暖かくするとか寒くするというよりも、パターンを変えている。それもランダムに変えているわけではなくて、ちゃんと規則性を持っていて、地球自体が持っている幾つかのパターンを強めたり、弱めたりというふうになっているらしいということが分かってきました。

今言ったようなことが、ここ 10 年ぐらいの間に急速に分かってきて、太陽の活動が気候に影響を及ぼしているという事を、今ではかなりの人が信じるようになってきました。ただ、それは単純に暖かくなる、寒くなるというものではなく、むしろパターンの変化として現れ、それには地球を構成するサブシステムがその振動を強めたり、弱めたりする事が関与しているらしい事も分かってきました。あとは、どういう物理化学メカニズムがそういうことを引き起こしているか、が分かれば、問題はかなり解決に近づくとおもいます。あと 5 年ぐらいで大体解明されるのではないかと思うのですが、有力なメカニズムとして 3 つ挙げられています。最後に、それらをご紹介します。

5. 太陽活動と気候変動をつなぐメカニズム

(1) ビジャークネス・フィードバックによる
太平洋赤道域における日射量変動の増幅

Bjerknes Feedback

赤道太平洋域全域加熱
→ 東側で赤道湧昇が起こっているため、W-Eの温度差発生
→ 貿易風(東風)強まり湧昇も強まる
→ W-Eの温度差より強まる
→ →ラニーニャ的パターン

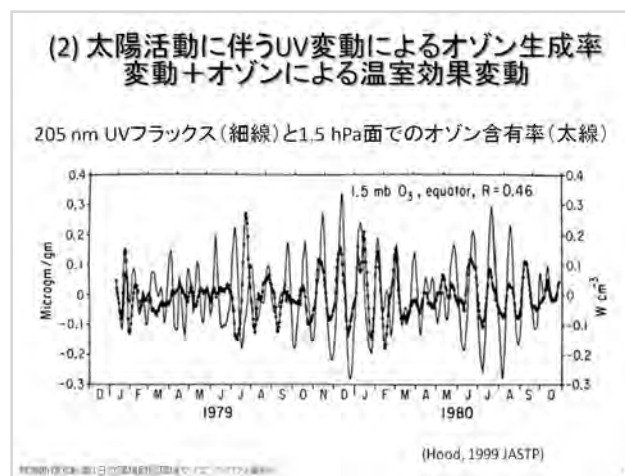
【図 33】

一つ目が、太陽の明るさの変化は微々たるものなのですけれど、それでも直接的な総放射量の変化が赤道域では効くのだという話です。【図 33】これは比較的単純化したモデルで行ったシミュレーションの結果に基づく解釈ですけれども、その話をしても訳がわからないだけだと思われるので、定性的な話だけをします。太陽活動が活発化する

と赤道の太平洋域は加熱されるわけです。先ほど太陽による加熱は 0.1℃に満たないというお話をしましたけれど、それは全球平均の話で、赤道の地域というのは、太陽に垂直に向かっているので、極域に比べると、無視できない程度には大きいのです。東赤道太平洋では、湧昇流が起こっているのですが、それはどうしてかという、貿易風が吹いて、それが沖合に表層の水を流す。そして、それを補うように下から冷たい水が上がってくるのです。その結果、ENSOを引き起こす赤道太平洋の西と東での温度差が発生するのですが、この温度差が一たん発生すると、さらに貿易風を強めて湧昇を強める。そうすると温度差がさらに強まるというわけです。そして、ついにはラニーニャ的なパターンを生み出す訳です。

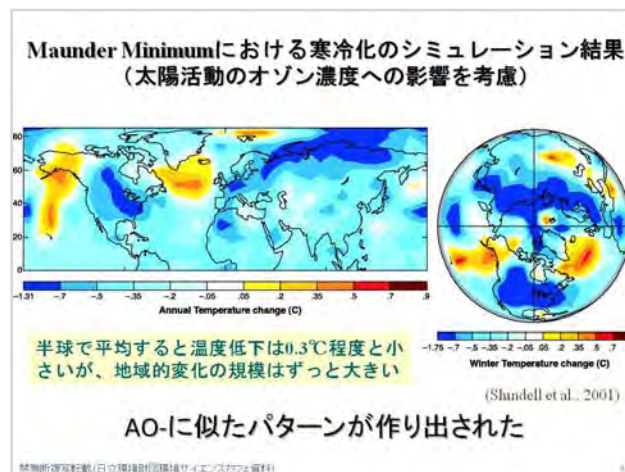
それからもう一つが、オゾンです。これが今、多くの人が一番重要だと考え始めているものです。大気中、特に成層圏、中間圏にはオゾンがたくさんあります。オゾンは、温室効果ガスです。しかも、オゾンを加熱するには紫外線 (UV) が最適なのです。先ほども言いましたが、太陽活動に伴う変動は、可視領域ではたかだか 0.1%ですけれど、紫外領域では4%も変わります。ですから、太陽活動に伴って、実は成層圏とか、その上の中間圏の温度というのは、すごく大きく変わります。今までは、そうした変化がどういうふうにして地表に伝わるかというメカニズムがあまり分かっていませんでした。何で分からなかったかという、よく気候変動予測や気象予報に使われるような大型コンピュータを用いた大気循環モデルは、通常、成層圏下部までしか考えていないのです。それより上は考えていない。成層圏上部まで組み込んで、更にオゾンの影響を組み込んだモデルを使うと、大気上層での加熱が下層に伝わる様子がだんだん見えてきたのです。要するに紫外線の変動が、オゾンによる温室効果を大きく変えているのです。太陽活動に伴って大気上層の温度が変わっていることはもう分かっているのですが、それがどう伝わるかが分かってきたことが一つ、もう一つは、紫外線がオゾンを作る反応を促進するのです。次の【図 34】の細い線が紫外線のフラックスの変動

です。それに対して、黒い点がオゾン濃度の変化です。だから、オゾン濃度というのは、実は太陽活動の 11 年周期に応答して変動している、しかも、太陽活動が活発なときにはより暖かくするほうに働いていることが分かってきました。



【図 34】

今言ったような効果を組み入れて、マウンダー極小期にどのような気候変化が起こるかというモデル実験が行われています。【図 35】これは、その例の一つですが、やはり暖かいところ、寒いところの分布パターンというのはモザイク状になっていて、全体が寒くなっているわけではないですね。

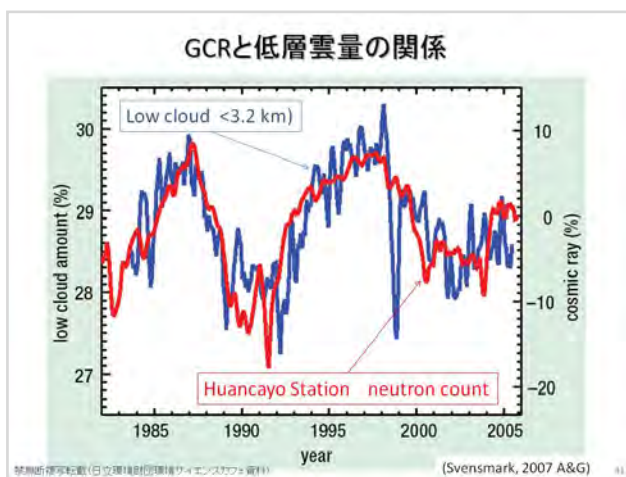


【図 35】

この図から言えることは、極域で寒くなっており、その周りは相対的に暖かくなっていると言う事です。これは先ほどお話しした北極振動のパターンです。実は最近、さらに高度なシミュレーションの研究が「ネイチャー・ジオサイエンス」という雑誌に出まして、その結果は、太陽活動の変化できれいな極振動を生み出す事が出来ることを

示しています。さきほども言いましたが、このときの半球平均の温度の変化というのはたかだか0.3℃ですが、その分布パターンが大きく変わります。北極振動のマイナスに似たパターンが、作り出されたことが示されたわけです。

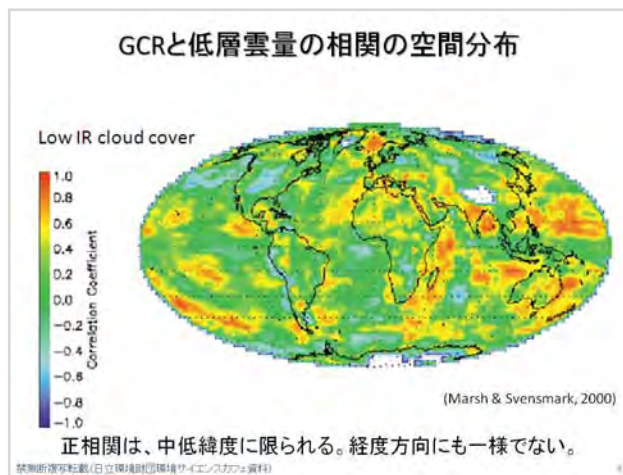
最後にもう一つ、それは宇宙線と雲の量の関係です。この説も今話題になっています。これは、ある一部の研究者が非常に熱意をもって宣伝しているもので、これが真理だと思っている方も多いようなのです。わたしは、この関係を100%否定するわけではないですが、実はまだ十分検証されていないと思います。元々、スベンスマークという人が主張したのですが、その根拠を示したのが次の【図36】です。図の赤線は、中性子フラックスの変化を表します。



【図 36】

これは銀河宇宙線の入射量の変化と見る事が出来ます。青線は、衛星写真の解析に基づく、地球を覆う低層雲の量です。彼らは、宇宙線フラックスと低層の雲の量がこれだけきれいに関係しているので、これは宇宙線が大気中で雲を作る事を示すと主張しています。実験をして、宇宙線が雲を作り出すことが可能という事を一応示しているので、全く根拠のない説と言う訳ではありません。しかし、例えば次の【図37】は低層雲の量と宇宙線の入射量の相関の空間分布を示した図なのですが、要するに全域で良い相関を示しているわけではありません。相関の高いところは中緯度域です。

先ほど気象データの話で、太陽活動が活発になると、ハドレー循環が大きくなるという話をしました。オゾンについても、オゾン生成の光化学反



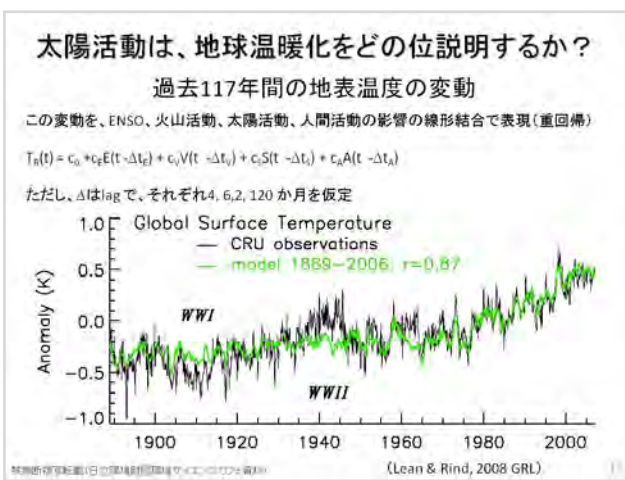
【図 37】

応を入れてシミュレーションをすると、やはり中・低緯度の気候パターンが変わるのです。スベンスマークは、宇宙線と雲の量の変動パターンが似ているから因果関係があるという論理を使っているのですが、実は、宇宙線の変動パターンと太陽活動のパターンも似ている。太陽放射量の変化により中・低緯度の気候パターンを変えれば、当然雲の量も変わりますよね。そういう過程でも説明できてしまうのです。だから、銀河宇宙線が雲を作って、それが気候を変えているという説は、因果関係をつなぐときに、論理が1つ抜けているのです。それを短絡的に結論に結びつけているところが問題なのです。その抜けているところをつながない限りは、ほかの2つの説と同じレベルには到達しないということです。

時間が来てしまいましたが、太陽活動が気候に影響を与えていることに関して、皆さんある程度は納得していただけたのではないかと思います。世の中でなされている議論は、往々にして、太陽活動が温暖化の原因でCO₂ではない、もしくはCO₂が原因で太陽活動は関係ない、そういう2者択一的議論が多いのですけれども、実際は恐らく両方が関係していると思われます。では、どのぐらい関係しているか。それがこれからの課題になってくると思うのです。これからお見せする最後の図は結論ではありません。【図38】現在進行中の地球温暖化を統計的にどう見ると一番うまく説明がつかかという、そういう試みの例です。

図の黒線が世界の平均気温です。太陽活動の変

化と人為的 CO₂ の変化、火山噴火、そして ENSO のすべてが、これにある割合で影響していると考え、其々にある係数を掛けて足し合わせてやるとすると、どういう係数を掛けた時に一番この変動に近い結果が出るだろうという、という試みです。だから、物理化学的な根拠は実は入っていないのです。ただ相関を見て行って、一番近い結果を出した係数の組み合わせが正しいのではないかという考えです。何か競馬の予想みたいで、当たればいいでしょうみたいなところがありますが、一応そういうことをやった例です。



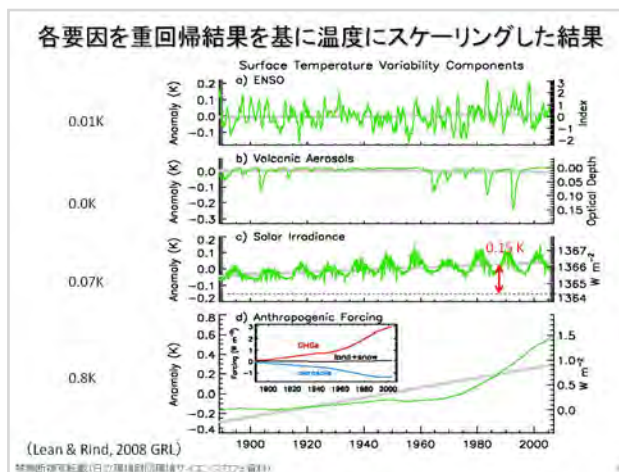
【図 38】

会場：すいません、ENSO というのはエルニーニョですか。

多田先生：そうです。先ほどお話しした様に ENSO も太陽活動とリンクしているので、ENSO を独立要因として入れたほうがいいのかという問題もあるのですが、ここでは、一応入れています。

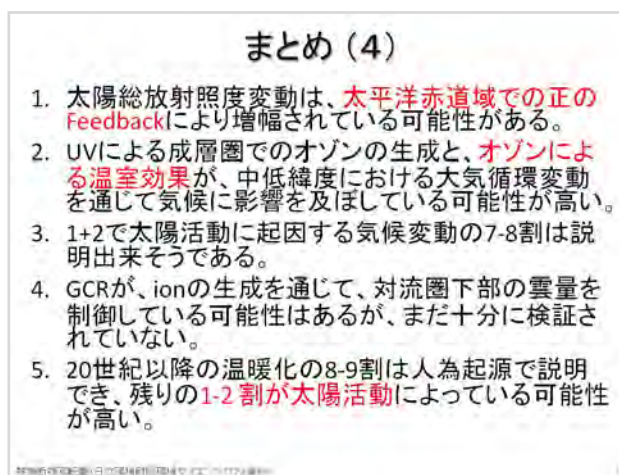
そうすると、図の緑線に示されるように、そこそこあった結果が得られます。次の【図 39】は、それぞれの要因が温度にするとどれぐらい影響しているかという内訳を示した図です。

そうすると、エルニーニョはせいぜい 0.1 ぐらいとほとんど効いていなくて、太陽活動は 0.07、温室効果ガスは 0.8 と一桁大きいというのが結果です。それから、太陽活動の 0.07 という値も、実は放射平衡を考えたときに妥当な値なのです。ただ、ここでもう皆さんお分かりだと思いますけれども、これは平均温度で議論をしているけれども、



【図 39】

太陽活動は平均温度を上げるよりも気候パターンを変えるほうの影響が大きいのです。それを考えないと、真の意味での太陽活動の影響の評価はできないと思います。



【図 40】

ということで、まとめますと、1) 太陽の総放射量変動は、赤道域で起こる正のフィードバックで増幅されている可能性があります。2) 多分一番大きい影響を与えていると思われるのが、紫外線による成層圏のオゾンの生成とオゾンを温める温室効果で、これが特に中・低緯度における大気循環を通じて気候に影響を及ぼしている可能性が大きいと思われます。これはシミュレーションでも再現できるようになってきていますので、かなり確実だと思います。それから、この 1 と 2 を両方考慮した実験も行われ始めており、実際観察される変動の大体 7～8 割ぐらいは説明できるということが言われています。3) 銀河宇宙線が雲量

を変える可能性は否定しません。しかし、まだ十分に検証されたといえる説ではありません。

20世紀以降の温暖化の8～9割は、やはりCO₂に起因する可能性が高く、残りの1～2割が太陽活動に起因する可能性がありますというのが、あまりゆるぎない結論とは言えないのですけれども、最後の話の結論です。

ということで、一応用意した話はこれでおしまいです。どうもありがとうございました。

司会：ありがとうございました。これで用意されている話が終わりのようですが、多分皆さんいろいろご質問があると思います。まずは、今日のお話について質問がある方、どうぞ活発な議論をお願いします。

会場：おもしろいお話、どうもありがとうございました。UVによってオゾンが増えて、それが温室効果ガスになるというストーリーなのですが、割と近世で、極地では逆に紫外線が強くなったらオゾンが減るということが起こっていると思うのですが、それは、この観測には影響が出てこない程度なのでしょうか。

多田先生：わたしもオゾンのことは余り詳しくは無いのですけれども、ひょっとして、オゾン濃度が低下すると、地表に到達する紫外線量が増えると言うお話ではないのでしょうか？いわゆるオゾンホールのお話です。これは、人為起源のフロンガスなどが原因です。

会場：どうもありがとうございました。

会場：今のご質問と関係するのですけれども、太陽活動が活発化することによって短波長の電波が非常に増えてくると。それに伴って地球の上層部、成層圏なののでしょうか、その加熱効果というのがものすごく大きいと思うのですが、その加熱されたのが地表に届くかどうか。その対流のメカニズムというのは分かっているのでしょうか。

多田先生：それは分かっています。分かっていますというか、分かりつつありますと言うのが正しいのでしょうか。さっきちょっとお話しした、ごく最近出た論文によると、太陽活動の影響が最初に大気の上層に出始め、それが徐々に下に伝わっていく様子がシミュレーションで再現できるようになってきたようです。特に、大気上層ではガスの濃度が薄いので、加熱もすごく簡単にできるのですね。だから、温度変化だけ見ると、とてつもなく大きく変わっているのです。ただ、濃度は非常に薄いので、質量としては圧倒的に多い対流圏に、どういうふうにそんな薄いものの変化が伝わるかということは分からなかったのですけれども、風を介してだんだん下に伝わって、最終的には地表にまで到達する様子が復元できたという話です。

会場：先ほどのお話ですと、太陽の活動によって地球の平均温度というよりもパターンの変化のほうが大事だというお話だったのですが、タイで集中豪雨が起ったりとか砂漠化が進むとか、地球の地域ごとに異常気象が起りつつあるのですが、その現象と太陽活動との相関的な研究というのはなされているのでしょうか。

多田先生：個別の気象現象についてはまだはなされていないと思いますが、先ほどの図でもお見せしましたように、例えば北極振動のパターンと豪雪の関係があることが統計的にも示されています。この図はマンガですけれども、北極振動が弱まったときには、どういうところに非常に冷たい寒気が出てきて雪を降らせやすいかということは分かっている。それから、先ほどご説明したように、この北極振動と太陽活動かどうも関係しているらしいことも分かってきた。ただ、重要なのは1対1対応ではないのですよね。北極振動というのは全部太陽活動だけで動いているわけではなくて、固有に動いているのだけれども、それに太陽活動の影響がたまたま加わると非常に大きな変化になる、そういう性質のものだと思います。

会場：太陽活動が活発になる時期は11年周期だと

いうふうに伺っていますが、マウンダー極小期の前に12.5あるいは13年周期というのが来て、その後にマウンダー極小期が来たというふうに聞いたことがあるのですが、今の時点で今年が12.5と。この次の周期がもし13年というふうに延びましたら、その後は寒い時期が来るのでしょうか。寒いというか、パターンですけれども、大体70年とかの寒い時期が来るのでしょうか。

多田先生：よくご存じで。一つは、マウンダー極小期の直前というか、極小期の間も周期が長いのですよね。極小期は太陽黒点がないので、そういう意味では数えられないのですけれども、先ほどお話ししたベリリウム10とか炭素14を使って周期を調べる研究がもうなされており、12年前後の長い周期になっていることが分かっています。

それに関して、今、もう一つの重要なご指摘がありました。これは太陽の観測のほうでは結構大きな話題になっています。、どういふ話かという、今、太陽活動のサイクルの23が終わって24に入っているのですけれども、23の周期が非常に長かったのです。アメリカの大気宇宙局などの予想がことごとく外れて、毎月修正を繰り返したので、みんながあきれたという話です。これは太陽黒点数と明るさの関係を示した図ですけれども、図に示されるように、黒点極小期の太陽の明るさが通常の極小期よりも下がっている、明らかに暗くなっているのです。けれども、明るさ現象は想定範囲内です。マウンダー極小期のレベルまではまだ行っていませんが。次の図は太陽の黒点周期の長さとか太陽活動の関係を示した図ですが、黒点周期が長い時期というのは太陽活動が弱まった時期とがよく合っています。図に示される期間にはマウンダー極小期が入っていないのですが、この範囲では12年が最長です。一方、過去5つのサイクルの周期は10.5、11.5、10、10.5ときて12.5年に延びているわけです。だから、そういう意味では、これからマウンダー極小期になるのではないかという話は、あながちうそとは言えません。

これは、また過去400年間の黒点数変動の図ですが、約90年周期の繰り返しを見ると、我々が生

まれるちょっと前ぐらいから始まった約90年のサイクルの長さが、既に100年を超えており、そろそろ終わってもいい。そういう意味では、少なくとも、いわゆる80年周期の極小期に来たと言えそうです。マウンダー極小期になると、さらにそのもう一つ上の周期に当たるので、これが来たかどうかというのはちょっとまだ分かりません。多分、ダルトンとか、1900年ミニマムのレベルのものが来る可能性がありますね。そうすると結構影響が出てくるかもしれません。

実は、総放射量変動だけだったら大したことはないのですが、今、すごく大きな話題になっていることがあります。それは何かというと、先ほど太陽の活動に伴って太陽のスペクトルが変わるというお話をしましたよね。紫外領域とか赤外領域での変動のほうで可視領域より大きいという話もしましたが、その程度が通常の11年周期よりもはるかに大きいと報告されているのです。今、それが本当かどうかを検証しています。要するに、スペクトルを取れる衛星が打ち上がったばかりなので、その衛星が正しいデータを出しているのか、それとも測定機器の問題なのかという事をまだ議論しています。もし、それが正しいとすると変動は結構大きい。この図はそれを正しいとしてやったシミュレーションの結果なのですが、そうすると見事にAOのパターンが出てきて、太陽活動だけで北極振動が説明できてしまうというのです。

マウンダー極小期でも平均気温としてはただか0.3~0.4℃の低下なのです。だから、そういう意味では地球全体の平均気温にはそんなに影響はないと思うのですが、パターンの変化という意味ではかなり大きな変化が生まれてもおかしくないのです。そうした太陽活動極小期がこれから10年、20年は続くと思われるのですが、それが終わる前に太陽活動の気候への影響予測ができるのかどうか、今後競争になってくるのではないかと思います。

会場：ここ何年かの中で、2009年を挟んででしたでしょうか、全く黒点がなかった2年間があったということでしたけれども、これまでの太陽黒点

の活動の知られている時代で、そういう黒点のなかった時期というのはあったのでしょうか。

多田先生：それは結構あると思います。2年連続というのがどのぐらい珍しいか。珍しいことは間違いないのですが、本当に前例がないかどうかというのは、ちょっとわたしは分かりません。しかし、1年ぐらゐなかった時期が、マウンダー極小期以外にもあったらしいという事は、総黒点数の記録でもある程度見えます。

会場：ラニーニャ現象の話で2点ほど質問があるのですが、大変勉強不足で申しわけないのですが、まず、少し前にラニーニャ現象があったという話がちらっと出ていたのですが、それについて、まず太陽の活動とは何かしら関係とか相関とかはあったのですか？

多田先生：ラニーニャというのは数年おきに起こっていますよね。では、それが太陽活動と相関するかというと、ほとんどないと思います。一方で、太陽活動の最大時と最小時の差をとると、ラニーニャ的なパターンが出てくるのは間違いありません。面白いのは、温暖によっても、どっちかというラニーニャ的なパターンが出てくるのです。だから、いわゆるエルニーニョ、ラニーニャという現象とダイレクトに関係しているかどうかというのはわかりません。わたしが話したのは、あくまでパターンが似ていると言う事です。実はパターンとしてはエルニーニョやラニーニャと良く似ているけれど、継続時間がずっと長い現象が、地質学的過去に繰り返したと言う事が、段々解って来ました。これはスーパーENSOという名前ですが、その形成メカニズムはENSOとは多分違っています。このスーパーENSOが太陽活動と関係している可能性はあります。

そういう意味で、我々が気象で言っているようなエルニーニョ、ラニーニャが、ダイレクトに太陽活動とリンクしているかということ、それは多分違うと思います。

会場：ありがとうございます。その話に大分関係するのですが、2点目が、ちょうどあのビヤークネスフィードバックのところで、結局は、ちょっとしたきっかけでラニーニャ的パターンが出る、そのお話ですが、やっぱりそれもまだ関連とかはちゃんとデータとしては出ていないということでしょうか。

多田先生：そうですね、観測データの解析をすると、時系列でラニーニャ的なパターンが出たり出なかったりというデータは見出せません。それを太陽活動を気候モデルに入力して出せるかということ、それはまだ出せていないと思います。ただ、太陽活動を強めた状態でラニーニャ的なパターンを生み出すことができるかということ、それはモデルの中では生み出すことができます。だから、物理メカニズムとしてはそういうものが存在するというの言っているけれどそれがエルニーニョ、ラニーニャを引き起こすすべてかということ、それは違うということです。

会場：マウンダー極小期と小氷期についてなのですが、すけれども、地域によって大小はあると思うのですが、すけれども、日本での古文書ですとかそういった記録で、例えば太陽の活動がちょっとおかしいとか、ものすごくふぶいた年が続いたとか、そういった記録というのは残っているのでしょうか。

多田先生：残っているはずですよ。それから、古気候記録としても解析がされています。マウンダー極小期ではないのですが、太陽活動とモンスーンの間にはかなりいい相関が生まれることがあって、例えば関西地域の雨量と太陽活動が関係しているようです。因果関係は、完全には分かっていないけれども相関は出ている、そういう研究は結構あります。文章では中国の古文書やなんかを掘り起こして、小氷期のときに中国がどうだったかというような研究もなされています。最初にご紹介したエディさんというのは、そういう記録を丹念に集めてマウンダー極小期と小氷期が関係するのではないかという説を最初に言い出した人なの

です。だから、太陽活動と気候変動との関係の話は、むしろ古文書記録の解析から始まっています。

会場：太陽の黒点が多くなったり少なくなったりするというのは、何か太陽がほかの惑星からの影響とか、そういうを受けているからなのでしょうか。

多田先生：それは完全にわたしの専門を超えているので、正しい回答ができるかどうかわかりません。ただ、太陽活動がどの様にして起こっているかという事は、まだ完全に分かっていないと、わたしは太陽物理学者の知人から聞きました。基本的には太陽の表面付近での対流に関するのですが、太陽磁場の強さの変化とも関係しているという話です。それ以上のことは、わたし自身が、話は聞いたけど理解し切れていないので、やめておきます。

以上