

科学技術政策研究所
調査研究資料
調査資料－9

太陽活動と地球温暖化

—地磁気活動を指標として—

平成3年3月

科学技術庁 科学技術政策研究所
第4調査研究グループ
客員研究官 柳原一夫

Solar Activity and Global Warming

— Deduced for Long-Range Variation of
Magnetic Indices —

March, 1991

Dr. Kazuo Yanagihara

Visiting Reseacher

4th Policy-Oriented Reseach Group

National Institute of Science and Technology

Policy (NISTEP)

Science and Technology Agency

太陽活動と地球温暖化

— 地磁気活動を指標として —

要旨

地球温暖化の要因として、CO₂の他に太陽活動の寄与を考える必要性が提言されている（Marshall研究所レポート）。しかし、地球気温上昇をもたらすであろうところの太陽放射エネルギーの増加については、その推測に合理的根拠がないという意見もあるようである。

このような背景を分析し、太陽活動の変化を地磁気活動度の解析から導き出すことを試みた。

その結果、太陽活動には、通常太陽黒点11年周期変化で表されるような変動とは別にその背景となっている長期変動のあることがわかった。

このような二通りの太陽活動がともに太陽放射エネルギーの増減に関わっているとすれば、太陽黒点11年周期1サイクルで観測された太陽放射の変化量0.1%から、過去100年間の変化量を推定することができる。

今世紀の太陽放射増加量を推定すると、0.1%の約2（=13/6.6）倍ということになった。太陽放射が変化したときの地球気温変化量を計算するモデルによれば、この太陽放射増加は地球気温に0.2-0.4°Cの上昇をもたらすことになる。もしこの通りとすれば、0.5-0.6°Cといわれている地球温暖化のかなりの部分を占めることになる。

また、17世紀後半の太陽黒点活動が殆ど休止したマウンダー極小期の気温を推定してみると、現在より0.6-1.2°C低温であった、と算定される。

地磁気活動から求められる太陽活動は太陽風の活動であるから、それが直ちに気温変化に結び付く太陽放射の変化を表すものとは必ずしもいえない。しかし、太陽活動は黒点数だけで表しうるものでないこと—とくに長期変動については—が示され、太陽放射の変化はいろいろな角

度から研究を進めるべきものであることを示唆している。この場合、地磁気活動は有力な手段と考えられる。

地球温暖化の機構を明かにするためには、地球システムに与えるエネルギーである太陽放射の変化の研究と、エネルギーの受け取り側である地球システムのモデル化の研究とを、ともにより強力に進めることが肝要であろう。

1. はじめに — 背景

地表の全球平均気温は前世紀の末期から現在までにおよそ0.5-0.6°C程上昇したといわれる。この地球温暖化は、人間活動によって人為的に放出されたCO₂の増加と同時に起こっているため、このままCO₂の増加が続くと地球の気温はますます上昇し将来の地球環境が大きく改変されるのではないかと懸念されている。

地球の熱的状态を大局的にみれば太陽放射のエネルギーを受け、一方地球放射によってエネルギーを放出し、そのバランスのもとに地球の気温がきまるものと考えられる。しかし大気・海洋ではさまざまなプロセスで放射の反射・吸収や熱の輸送が起こりその結果として気温の複雑な分布ができる。地球温暖化（地表の全球平均気温の上昇）を考えるためにはこのさまざまなプロセスを総合した地球システムを明かにしていかなければならない。

大気中のCO₂は地球放射を吸収するので、熱を外部に逃がさないで地表を暖める作用があり、温室効果気体あるいは温暖化ガスといわれる。フロンやメタンも温暖化ガスと考えられている。このような人工的物質以外でも水蒸気は地球放射を吸収する。水蒸気（水）はまた、雨—水流—蒸発—気流—凝結・雲—雨というように循環して、蒸発のとき奪った熱を凝結のとき放出し、蒸発と凝結の場所が違うので熱を輸送している。さらに、水蒸気（水）循環の過程にある雲は放射を反射・吸収するが、いろいろな雲についてその作用を明かにするのは容易でないと考えられる。地表面の状態も放射の反射・吸収に影響する。また大気・海洋の運動は熱を輸送する。海面で吸収された熱が海洋の運動によって水平・垂直に運ばれると、海洋の熱容量が大きいいため、熱がそこに蓄えられてあまり温度上昇をもたらさないことも考えられる。海洋の運動は地球温暖化を推論するために欠かせない重要な因子である。

この複雑な地球システムのモデル化の努力が続けられ多くの成果がえられるようになった。CO₂増加の効果についていえば、最近のモデルの

計算結果によれば、ほぼ現実の地球温暖化と同程度の気温上昇をもたらすといわれている。しかし、CO₂増加の時間的経過は温暖化の推移とかなり相違し（図1）、またモデルは地域的な違いを説明できていない¹⁾。

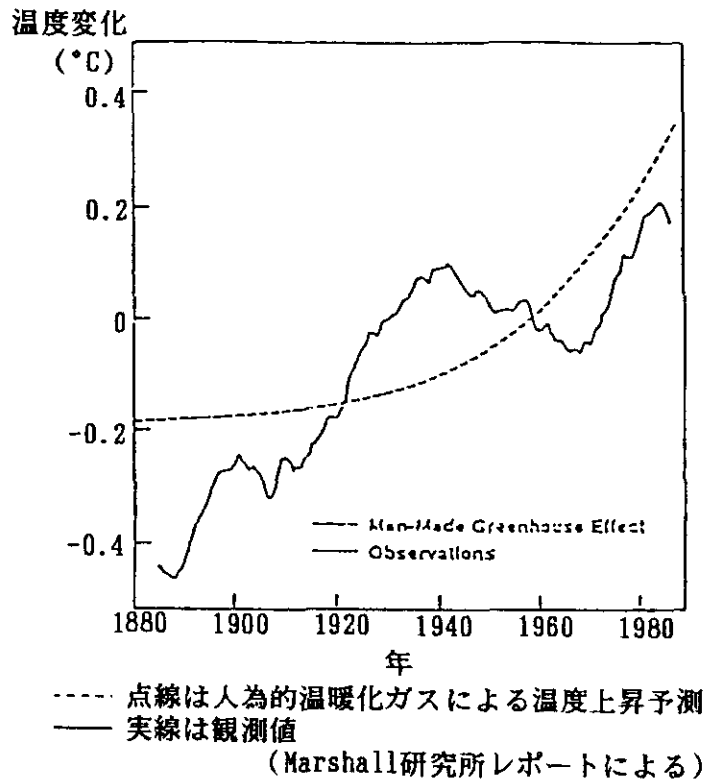


図1 人為的温暖化ガスによる温度上昇予測と
実測値比較

地球システムを構成するさまざまなプロセスには雲の作用や海洋の運動などのようにまだよく解っていないものも多く、モデルはこれらプロセスの解明とともに改良が続けられている状態である。このような状態において、モデルは観測事実による検証を経なければ確かな将来予測はできない。

モデル検証の材料とされる温暖化の観測事実について、問題はCO₂など温暖化ガス以外の自然的要因によるものが含まれていないかということである。気温の長期変動の要因としてしばしばあげられるものに—ミランコビッチ説のような超長期変動は別として—火山活動と太陽活動と

がある。

火山活動については、今世紀の温暖化進行の中途における一時的気温降下（あるいは気温上昇の停滞）が火山活動のため起こったという説もあったが大気中のエアロゾルや透明度の観測から否定されているようである。

太陽活動については、今世紀の地球温暖化は太陽活動の増大と平行しているという説²⁾もある。もし太陽活動の増大によって地球システムに入射する放射のエネルギーが増加すれば気温は上昇すると考えることもできる。果して太陽からのエネルギーは増大しているだろうか。

太陽からもらう単位時間当りのエネルギーは太陽定数³⁾とよばれる。太陽定数の測定は長年地上で行われてきたが、厚い大気層に邪魔されてそれが真の定数かあるいは変化があるものか確定できなかった。すなわち太陽からのエネルギーに変化のあるものか、ないものか、わからなかったわけである。

それが1970年代末期以降人工衛星によって精密な太陽定数の観測が可能となり、ほぼ太陽黒点一周期を経た現在、太陽定数には太陽活動に平行して0.1%程度の変化のあることが確認された。モデル計算によれば太陽定数0.1%の変化は地球気温に0.1-0.2°Cの変化をもたらすといわれる⁴⁾。

太陽定数の変化は確認されたが、その地球温暖化への寄与に関しては意見が二つに分かれた。その一つは、太陽定数に変化のあることが事実なら太陽は変光星であって長年の間には今観測された変化量以上の光度変化すなわち太陽定数変化があってもおかしくない、と考えるものである。Marshall研究所レポートはこの立場から提言を行っている。

それに対してもう一つは、仮に太陽活動による気温変化があったとしてもそれは小さい、太陽定数変化を太陽黒点数の変化に比例させて考えれば過去100年の太陽定数変化はいま観測された0.1%をそう大きく超えるものではない⁵⁾、というものである。

この意見の相違は太陽活動の考え方の相違に基づくものといえよう。

太陽活動というと通常太陽黒点数（正確に言えばWolf Number）であ

らわされ、11年周期の顕著な変化を示す。太陽面現象はもちろん地球環境もその幾つかはこの太陽黒点数と平行して変化する。例えば電離層の電子密度や磁気嵐⁶⁾の活動などがそれである（地球気温については第3節参照）。

磁気嵐など地磁気じょう乱と呼ばれる活動的変化は太陽風に原因を求められるが、磁気嵐のように間欠的に生起するものとは別に極光帯を中心にむしろ常時起きている活動的変化がある。激しいものはサブストーム⁷⁾とよばれる。このサブストーム系の活動は太陽黒点11年周期に沿って増減もするが、むしろ今世紀初頭以降増大を続け最近の太陽黒点極小年に於ける活動は今世紀はじめのサイクルにおける最大の活動よりも激しいものとなっている。すなわち太陽黒点数が年平均で零に近くなっても衰えない太陽活動のある証拠である。この地磁気活動度を太陽活動の指標として地球温暖化に関連する長期変動を考えてみよう。

2. 地磁気活動度の長期変動

地磁気じょう乱の主なものには磁気嵐とサブストームの二通りがある。いま長期変動を考えようというのであるから、それらの活動を過去に遡って長期間測らないとならない。幸いにしてu-measureとaa-indexという活動指標はかなり古い過去に遡って値が与えられている。

u-measure⁸⁾は、主として磁気嵐の活動を表す指標であって、古いほうは1835年まで値が与えられている。

aa-index⁹⁾は、主としてサブストーム系じょう乱の活動を表す指標であって、1868年以降の値が与えられている。

aa-indexとu-measureの年平均値を1868-1989年についてそれぞれ図2と図3に示した。いずれも長期変動（太い線で表される11年移動平均）は太陽黒点数のそれと平行しているように見える。

しかし、サブストーム系じょう乱の活動を表すaa-indexの変動をよくみると、ほぼ11年ごとに現れる極小値が平均の変動とともに増大していて太陽黒点数の変動と大きく異なっている。11年は太陽黒点の周期

であり、aa-indexの極小年は太陽黒点数の極小年と1年以内（月平均値で精密に比較すると0.0-0.9年）で一致し、aa-indexにも太陽黒点の11年周期変化と同様の変化もあることを示す。図4は、aa-indexの極小値を結ぶ線をベースラインとしてそれを超える部分を11年周期変化分と考え、1878-1965年の8サイクル分重ね合わせその上限、下限及び平均を示したものである。

一方、aa-indexの極小値が太陽黒点極小年（そのとき太陽黒点数は零に近い）にも零に近づかずむしろ平均とともに増大していることは、太陽黒点数11年周期変化の背景に別の太陽活動を考える必要のあることを示している。この背景変化は前述のaa-index極小値を結ぶベースラインで示される（図2の破線）。

黒点活動がほとんど休止しても（黒点数極小年がこれに当たる）aa-indexで表される地磁気じょう乱が活発にあることはこの別の太陽活動（背景変化）に基づく太陽風活動によるものと考えられる。

磁気嵐の活動を表すu-measureの方は、むしろ太陽黒点数とより密接に関係しているようである。1868年から1989年まで122年間の年平均値の相関係数は0.87である。磁気嵐の生起が黒点活動と関係していることの多いことを考えれば当然かもしれない。しかし、u-measureの極小値の推移をよくみるとaa-indexの極小値と同様に増大の傾向もみえる、がその量は小さい¹⁰⁾。

aa-indexがサブストーム系の常時存在する地磁気じょう乱の活動程度を表す指標であることを考えると、aa-indexの極小値の推移で表される太陽活動は11年周期変化の背景に常時（太陽黒点極小期にも）存在するものと考えられる。この背景変化は11年周期変化と無縁であるというわけではない。背景変化の増大とともに黒点1サイクルの平均の強さ（黒点数の11年平均）も増大している。背景変化が黒点各サイクルの強さを支配していると考えられるかもしれない。

太陽活動に基づく地球気温の変動を考えようとする場合もこの背景変化を考慮する必要があるだろう。今世紀の背景変化の推移は地球温暖化の傾向と似ている（図2）。温暖化の全てがこの背景変化で表される太陽

活動のためというわけではないが少なくともその寄与分を算定する必要があるだろう。

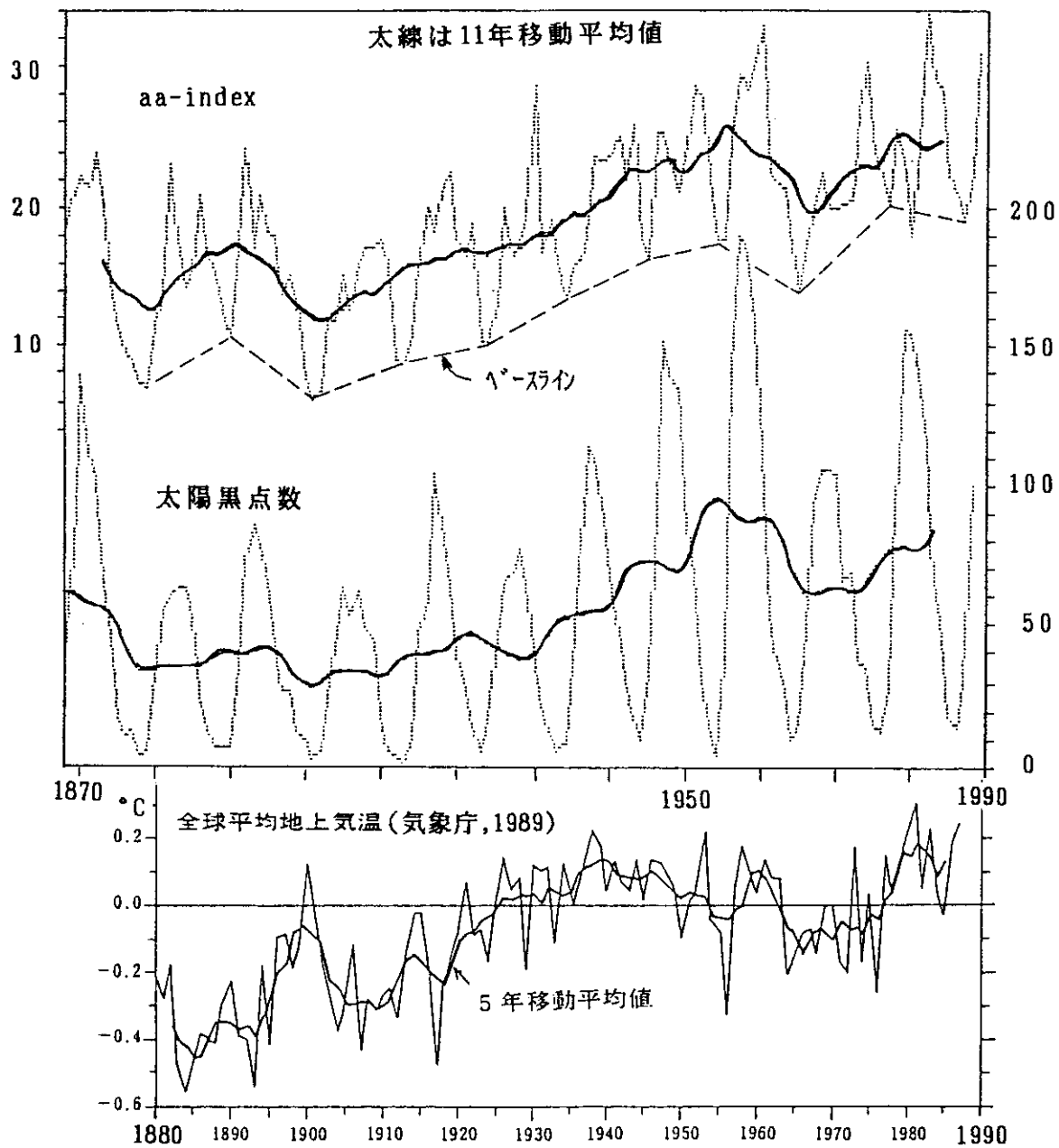


図2 aa-index

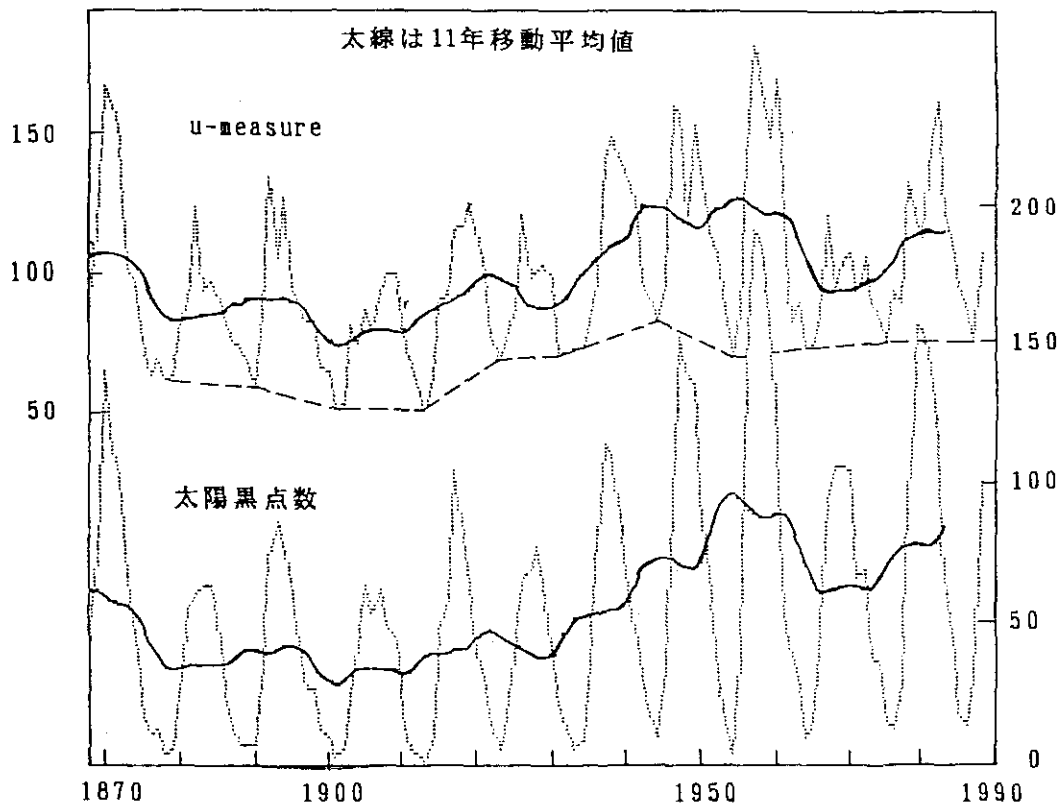


図 3 u - m e a s u r e

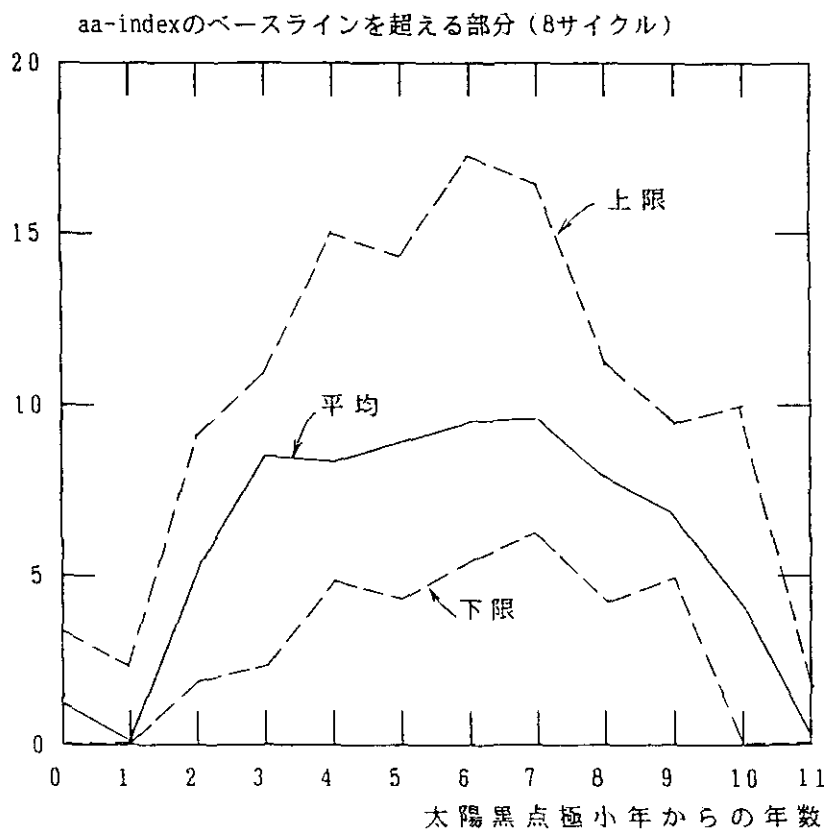


図 4 a a - i n d e x の ベースラインを超える部分 (8 サイクル)

3. 地磁気活動度aa-indexを太陽活動の指標とする地球気温変化の評価

太陽活動は黒点11年周期変化とそのベースになっていると考えられる長周期の背景変化とに分けて考える必要のあることがわかった。したがって太陽活動による地球温暖化の評価も単なる黒点数の比較から導くことは正しいとはいえない。aa-indexの解析からえられた11年周期変化と背景変化とを使って太陽活動による地球気温変化を評価してみよう。

aa-indexの不規則ランダムな変化分を除いて11年周期変化の振幅を求めてみると、1976-1986年のサイクルにおける較差はおよそ $6.6^{(1)}$ である。このサイクルは人工衛星によって太陽定数の変化0.1%を観測した期間にあたる。すなわちaa-indexの変化6.6に対して太陽定数0.1%の変化があったことになる。

一方、背景変化の変動量を求めるためにaa-indexの極小値をみると、過去100年の最小値は6.1(1901年)、最近の極小値は19.0(1987年)であってその差は12.9である。また気温変化には11年周期変化も背景変化もともに効くものとしてその和であるaa-indexそのものをとれば1900年頃の11年平均値は12、最近の11年平均値は25であってその差は13。何れにしても差は約13である。

太陽定数0.1%の増加はモデル計算によれば $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ の全球平均気温の上昇をもたらすといわれる。したがってaa-indexの変化6.6に対して地球気温は $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ の変化である。過去100年の長期変動ではaa-indexの上昇は13であるから、地球気温は $13/6.6$ を乗じて $0.2-0.4^{\circ}\text{C}$ 上昇したことになる。中間の値をとれば 0.3°C であってこれは地球温暖化 $0.5-0.6^{\circ}\text{C}$ に対して無視できない量である。このことは地球温暖化の原因として CO_2 など人為的なものの他に太陽活動のような自然原因も考慮する必要のあることを示唆している。

太陽定数変化に伴う地球気温の変化量はモデル計算によったが、モデルが事実によって検証されなければならないことは CO_2 増加による気温

上昇のモデルの場合と同様である。

太陽黒点11年周期変化にともなう気候変化については200年におよぶ長い探求の歴史があるが、厳しい批判をする人（例えばPittcock¹²⁾）によれば確たる証拠は何一つないということになる。気温についていえば、1810-1920年の長期間熱帯地方に黒点数と反平行の気温11年変化があるらしくみえていたが、1920年頃以降それも認められなくなった。

しかし、海上気温・海面水温や対流圏温度の解析が進むにつれて山元¹³⁾および山元ら¹⁴⁾は最近の数サイクルについて海上気温・海面水温の全球平均に0.1-0.2°C程度の対応するらしい変化のあることを報告している。

気象庁レポート¹⁵⁾に掲載された海面水温・地上気温・対流圏気温の図にも、少なくとも海面水温・対流圏気温については同様の変化が認められる（ただしレポートは黒点11年周期変化との関連には触れていない）。柳原¹⁶⁾もまた1946年以降について500mb高度偏差の北半球平均に0.15%程度の11年周期変化を認めている。

これらは黒点数と正の相関、つまり黒点の活発なとき温度も高いという関係であり数量的にもモデルと大体一致している。従来の陸地面だけによる全球平均気温と違って海面を考慮にいれることや高層の気温・高度を対象とすることは、それらの元データの精度はともかくとして、より合理的と考えられる。

4. マウンダー極小期の気温

17世紀後半は黒点活動が殆どみられなくマウンダー極小期とよばれ、地球気温も低かったといわれる。この頃のaa-indexはもちろんえられないが、黒点11年周期変化が殆ど零であることはわかっているので、黒点11年周期変化と背景変化の関係を使ってその頃の背景変化を推定し、それから当時の気温を推定することを試みよう。

黒点数のサイクル平均とaa-indexの極小値（背景変化の指標）の関係を図5に示した。図にみられる通りこの関係は2次式によって表される（赤池情報量基準の判定によれば直線より2次式の方がよい）。黒点数の

サイクル平均が零のところを外挿すればaa-index はマイナス14となる。

aa-indexがマイナスということはあるが、ここではaa-index はあくまで太陽活動の目安という意味で使っており、太陽活動の背景変化はかなり小さくなりうるということの意味するものであろう。aa-indexはその途中で零になり地磁気じょう乱活動は休止するが、aa-indexの原因となっている太陽活動はさらに小さくなりうるということである。

マウンダー極小期の黒点数のサイクル平均を零とすればaa-index (で表される太陽活動) は-14、最近の11年間のaa-index平均は25 (背景変化+11年周期変化)、その差は39である。前節と同様にして $39/6.6$ に $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ を掛ければ $0.6-1.2^{\circ}\text{C}$ がえられる。この値は、マウンダー極小期の気温が現在よりも 1°C 程度低かったといわれること、とよく合う結果である。

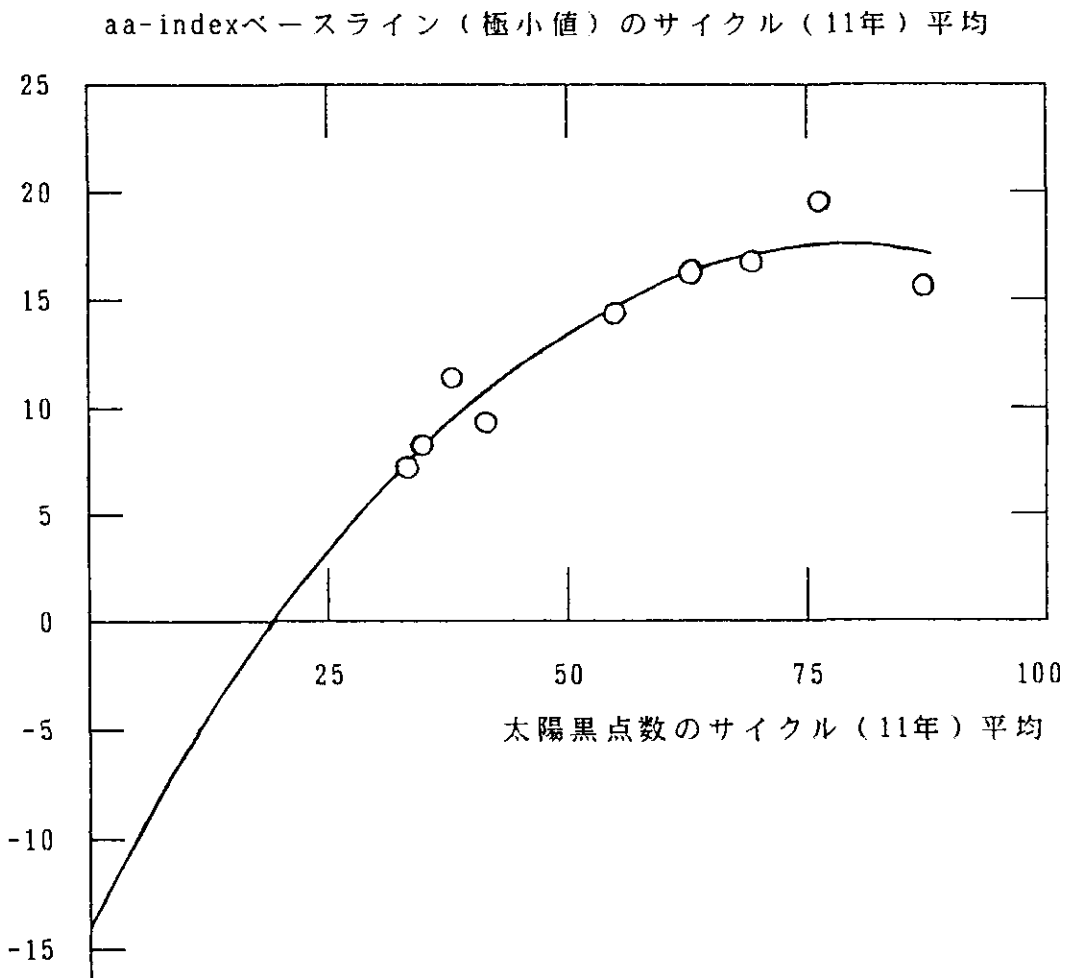


図5 黒点数のサイクル平均とaa-indexの極小値の関係

5. おわりに

地磁気活動度の aa-index を太陽活動の指標として考察すれば、太陽活動は黒点11年周期変化とその背景にある変化とに分けて考える必要のあることが示された。この立場で過去100年の地球温暖化に含まれる太陽活動依存分を評価すると0.2-0.4°Cということになる。またマウンダー極小期の気温は現在よりも0.6-1.2°C低いと計算される。

地磁気活動は太陽風に起因するものであるからそれが直ちに太陽定数変化に結びつくものとは必ずしもいえない。従って地磁気活動そのものが直接地球温暖化に関連するとは必ずしもいえない。しかし、地磁気活動度は地球温暖化に直接的に関わる太陽定数変化を推し量る指標として使用して有効であった。

また太陽活動を100年程度よりももっと過去に遡って推定する手段として使われる¹⁴Cの変化は太陽風のもたらす太陽磁場の変化に基づくものであり、その長期変動は地球気温の上昇下降とよく合うともいわれる。¹⁴Cとともによく用いられるオーロラは地磁気活動と一体のものでありサブストームそのものである。これらも合わせ考えると地磁気活動は地球気温変化に寄与する太陽活動の指標として有望な手段と思われる。

補遺

1) 温暖化の地域差

陸地面気温の長期変動の地域差は複雑であるがそれとは別に、最近海上気温の解析が進むにつれて北半球と南半球とでかなり著しい気温変化の相違のあることが報告されている。山元¹³⁾によれば、北半球では統計的に有意な温暖化は1930年以前にのみ認められるのに対して、南半球では1960年以降にのみ有意な温暖化がみられる、としている(図6)。このことは、CO₂の最近の急増が主として北半球の人間活動に基づくことに照らして問題であろう。

ただし山元は、「このことから、直ちに1960年以降の気温変動が二酸化炭素の増加によるものではないと結論するのは、早計である」、として、「1960年以降の気候変動は多重平衡解の中の1つの解から他の解への遷移の現れだ」、とする作業仮説を提案している。

2) Reid, G.C., 1987: Influence of solar variability on global sea surface temperature. *Nature*, 329, 142-143

3) 太陽定数

地球の大気圏外で太陽に正対する単位面積が単位時間に受ける太陽の放射総量であって、 1.37kWm^{-2} とされている。

4) Wetherald, R.T. and S. Manabe, 1975: The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model. *Journ. Atmos. Sci.*, 32, 2044-2059

5) 太陽定数0.1%の変化が観測された黒点サイクルの黒点数変化幅は(年平均値で)13-155である。これに対して、長期変動を11年平均のトレンドで測ると、過去100年の黒点数変化幅は30-95となって変動量は僅

かにすぎない。従って太陽定数が黒点数に比例して変化するものとするれば過去100年の太陽定数の長期変動トレンドは0.1%より小さいものとなるであろう。11年周期変化も加えて、過去100年の黒点数（年平均値）の最大変化幅でいえば1-190であるが、この場合でも0.1%をそう大きく超えるものではない。

6) 磁気嵐

地磁気じょう乱活動の中でもっとも激しいもの。太陽風が地球磁気圏を圧迫して磁場が増大する初相に始まり、ついで磁気圏内の磁気赤道面に西向きの環電流が形成され南向きの大きい磁場が発生する主相を経て、次第に回復に向かう終相となる。激しいじょう乱の期間は1-2日で終わる。初相が急激な磁場上昇で始まるものには太陽面爆発と関連づけられるものも多い。

7) サブストーム

極地方、とくに極光帯を中心に起こる激しい地磁気じょう乱。このときの地表のじょう乱磁場はそれと等価な上空の電流系で表すことができる（図7）。ただし、実際には電流が磁気圏から電離層へ磁力線沿いに流出入する立体的構造を考える必要がある。

サブストームは、太陽風からエネルギーを貰い、一旦磁気圏に蓄えられたものが電流や降下粒子となって電離層に伝えられたものと考えられている。降下粒子はオーロラを発生する。サブストームは磁気嵐のときに激しく活動するが、それ以外にも（少なくとも磁気嵐を象徴する主相が認められないようなときにも）しばしば活動する。

8) u-measure

地磁気水平分力の日平均値の前日のそれとの差の絶対値をもとにして、いくつかの低緯度観測所についてこの差絶対値に観測所の地磁気緯度のcosineを掛けたものを平均した値である。磁気嵐のとき形成される赤道環電流の強さを表すように工夫されたものである。しかし、時間分

解能が悪い（せいぜい月平均以上に意味がある）ので現在ではあまり使われなく、値も計算されていない。ここでは古い昔に遡る必要上この指標を使い、最近の値は筆者らが計算した。

9) aa-index

地磁気の一般的じょう乱の程度を過去長期間にわたり遡って測れる指標として工夫されたものがaa-indexである。北半球・南半球のそれぞれに1か所づつ地磁気緯度50°に近くかつ歴史の古い地磁気観測所を選び、そこに於ける地磁気3時間較差を地磁気緯度50°の値に引き直して平均したものをaa-indexとしている。選ばれた観測所はGreenwichとMelbourneであるが、現在それぞれHartland、Canberraに移転している。

サブストーム時の極光帯における地磁気じょう乱の程度を表す指標としては別のindexもあるが、過去に遡れる期間が限られ、またじょう乱が時間的にも局地的にも激しく変化しているので、長期にわたる活動度の変動をみるにはサブオーロラ帯の地磁気緯度50°における地磁気変化の指標であるaa-indexの方が都合がよい。

なおaa-indexの対象はサブストームに限られるわけではない。その対象を磁気嵐に対比して、本文ではサブストーム系じょう乱とよんでいる。ただし、磁気嵐のときもこのサブストームまたはサブストーム系じょう乱は活発に活動しaa-indexは増大する。

aa-indexの値は、古い方についてはIAGA(International Association of Geomagnetism and Aeronomy) Bulletin に、現在はのものはNOAA,USAの月刊Solar Geophysical Dataに掲載されている。

10) 磁気嵐のときにはサブストームあるいはサブストーム系じょう乱を含むので、u-measure算出の過程から考えてu-measureの中にaa-indexと同様の成分を含んでいる可能性がある。

サブストームは昼と夜とで不均衡があり、その中低緯度における現れである湾形変化は水平分力の増大する方が一方的に多いため、その活動の増減は日平均値の日間差に影響する。u-measureの変化には太陽黒点

数だけでなくaa-indexの変化も寄与している、と考えた方がよいことは赤池情報量基準の判定によって示される。

11) 1976-1986年におけるaa-indexの11年周期変化振幅の評価

aa-indexの不規則ランダムな部分を除くために二つの方法を用いている。一つは平均の11年周期変化(図4)に比例する部分を取り出す方法で、これによるとこのサイクルにおけるaa-indexの較差は6.5である。もう一つは客観的に平滑する方法で、客観ベイズ法(赤池弘次,1989:事前分布の選択とその応用,ベイズ統計学とその応用,鈴木雪夫・国友直人編,東京大学出版会,81-98)を用いると較差は6.7と計算される。平均して6.6である。

12) Pittock,A.B.,1978: A critical look at long-term Sun-weather relationships,Rev.Geoph.Space Phys.,16,400-420

13) 山本竜三郎,1990:地球温暖化の実態に関する研究の動向,天気,37,289-305

14) Yamamoto,R.,Y.Kakuno,1990: Observational studies of interdecadal and interannual climate change,Progress report of WCRP in JAPAN,Japanese WCRP Association,234-238

15) 気象庁,1990: 温室効果気体の増加に伴う気候変化(11)

16) 柳原一夫,1985: 太陽黒点サイクル周期帯における気温の変動およびそれに関連する500mb高度ならびに地磁気活動度の変動,東管技術ニュース,東京管区气象台,79,2-19

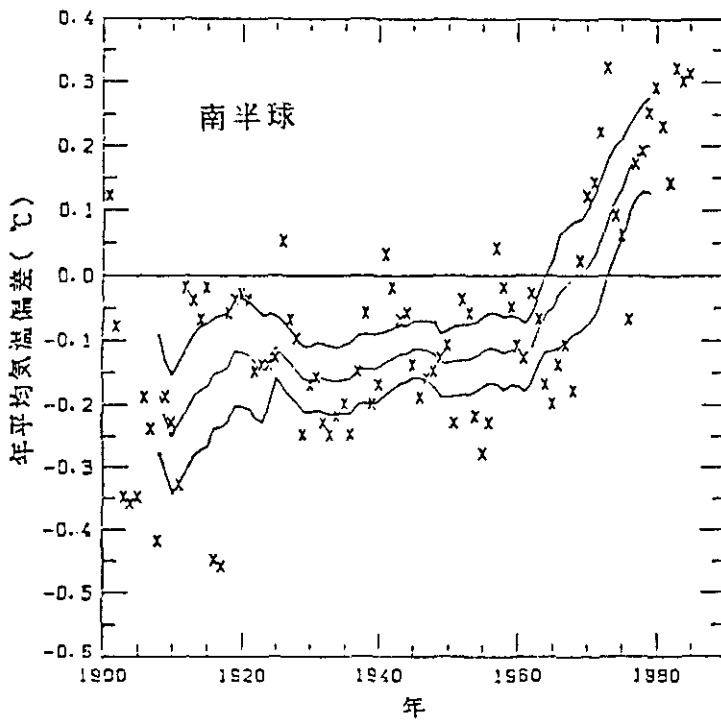
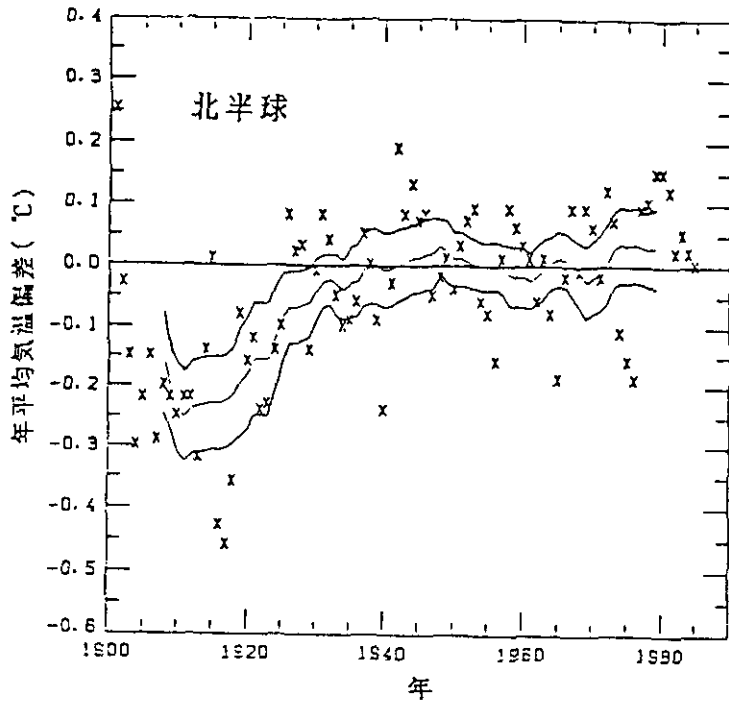
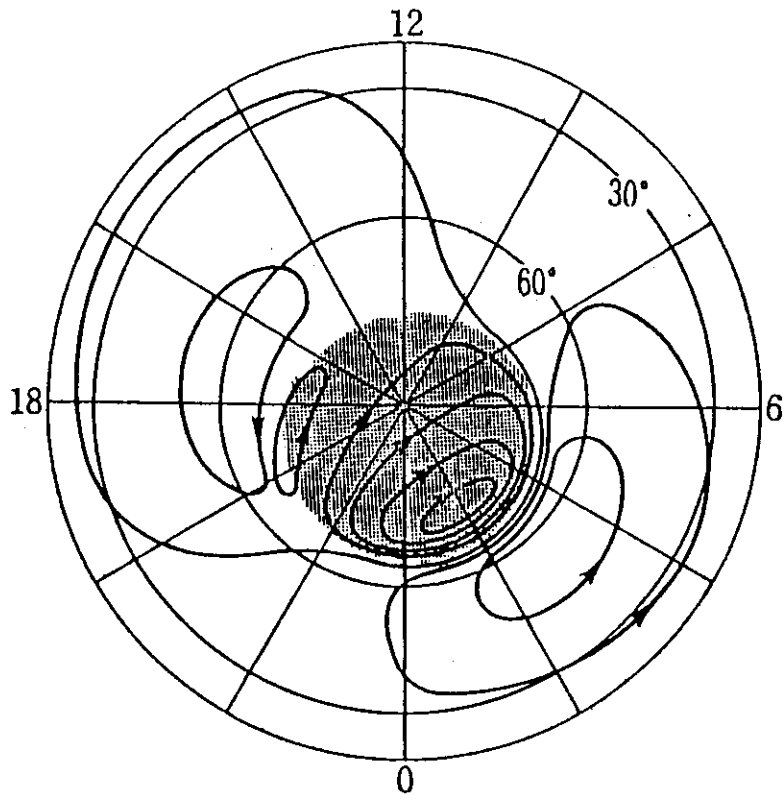


図6 北半球(北緯70度~赤道)および南半球(赤道~南緯50度)平均の年平均気温の推移(山元,1990による) ×印は年々の値で,実線は15年移動平均とその95%の信頼限界.



☒ 7