

太陽活動と気候変動*

廣岡俊彦**

1. はじめに

太陽の活動度には色々な周期の変動成分がある。古くから観測されている太陽黒点数は太陽活動度の指標となることが知られているが、これには有名な約11年周期の変動や、22年周期、80年周期、さらにはもっと長い変動周期が存在する。

それに対して、気候に見られる長期変動を、これら太陽活動周期と関連づける調査研究も、かなり以前から行なわれてきた。しかし、大勢の研究者達の努力にもかかわらず、なかなかはっきりとした関係は見いだせなかった。例えば気温変化の中に11年周期の変動を求めようとする努力についても、ある期間に11年周期のきれいな変動が見えても、別の期間になるとそれが全く見えなくなってしまうことがあったり、変動が見えたと思ってよくよく調べてみれば、実は測定機器の変更により作られた偽の変動が、たまたま11年周期変動を示していたということもあった。また、黒点数の変動に伴い、実際にどれくらいの太陽エネルギー流束の変動があるのか知られていなかったのも事実であった。このような事情から、学会レベルでは、太陽活動周期と気候変動の関係について否定的な空気が長らく支配的であった。

ところが近年、太陽活動変動と気候変動との関係が、新しい観点から議論され始めた。これは、近頃さかんな地球温暖化論議とも一部関連するものである。本小論では、近年行なわれているこれら新しい議論を紹介しよう。なお、太陽活動の変動そのものやその指標については、藤田氏の気象談話室解説(1994)をあわせて

て参照されたい。

2. 印象派以前の絵画に見えること

1988年に、米国の気象学会は、それまでの気候・応用気象関係のジャーナル (Journal of Climate and Applied Meteorology) から気候関係のジャーナルを独立させた (Journal of Climate)。その第1号の記念すべき巻頭言に次のようなことが書かれている。

世界中の美術館で出会う絵画を調べてみると、16、17世紀の芸術家達は、それから2世紀後の彼らの後継者達とは異なった世界を感じたり見たりしていたのだ、ということがわかる。17世紀のオランダの大画家である Jan van Goyen の作品に見られるように、たくさんの絵画は、空じゅうを覆う厚く波打った雲で暗く陰鬱である。そして、池に張った氷の上でスケートをしている赤い頬の子供達が、灰色の空とは好対照に置かれていることが多い。その時代は暗く寒くじめじめしていて、ヨーロッパは小氷期だったのである。続く2世紀の間に、たくさんの芸術家達は、絵画の上に異なった雰囲気を反映させた。キャンバスからは、明るい空と軽やかな感じがあふれ出した。暗い空はずっと明るくなり、雲は一層透明になった。16、17世紀の気候は穏和な気候に取って代わられ、今日では、小氷期のイメージは、過去の画家達のキャンバスにしか見られないのである。(A. D. Hecht による巻頭言からの抄訳)

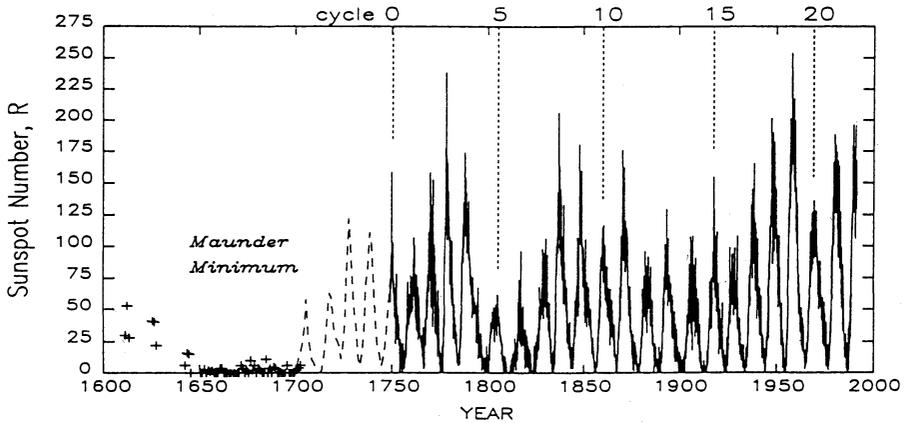
16、17世紀、特に17世紀後半のヨーロッパが寒く厳しい時代であったことは、木々の年輪や氷河のサンプルからも科学的に実証されており、また、その時代に打ち続いた飢饉やペストの大流行も、当時のこのような気候と関連があったと考えられている。

一方、太陽黒点数の記録は、有名な17世紀初めのガリレオの観測以来残されている(第1図)。17世紀の記

* Possible relationship between solar activity and climate change.

** Toshihiko Hirooka, 九州大学理学部地球惑星科学教室.

© 1994 日本気象学会



第1図 1610年以降の太陽黒点数の経年変動(Lean, 1991, Rev. Geophys., 29, 505-535). 1610年~1750年は年平均, それ以降は月平均を示している. 図中の実線, 破線や+はデータ出典の違いを表わす. 詳しくは原著論文を参照されたい.

録は断片的であるが, 17世紀後半から18世紀初頭にかけては, ほとんど黒点が観測されなかった. 現在, この黒点の極めて少なかった時代を, 発見者の名から, マウンダー極小期と呼んでいる.

太陽黒点が多い時は太陽活動が活発な時に対応する. 1970年代末以来, 衛星観測により, 太陽からのエネルギー流束の正確な値が得られるようになり, 最近の11年周期変動に伴う太陽エネルギー総量の変動幅は0.1%程度であることがわかった. これをシュテファン=ボルツマンの法則にあてはめて計算すると, 気温変動幅はわずか 0.1°C にも満たないものとなる. しかし, マウンダー極小期のように何十年も黒点が見えない時には, 最近の変動の下限をはるかに下回るエネルギーしか来ていなかった可能性がある. このことを確かめる術はもちろんないが, マウンダー極小期と小氷期出現が偶然の一致なのかどうか興味深いことではある.

3. ラビツケとヴァン・ルーンの研究

ここで話の中心を中層大気に移そう. 中層気とは, 成層圏から下部熱圏にわたる高度約10~110 kmの領域を言うが, ここは, 対流圏のように陸海面との相互作用や雲や降水などの水文過程の直接の影響を受けないため, 色々な現象が端的に現われ, その機構も比較的簡単な理論で説明可能なことが多い. 従って, もし太陽活動の影響が(もしあるとするならば)見えやすいのは, 中層気ではないかという予想がつく.

ドイツの気象学者ラビツケ女史(K. Labitzke*)

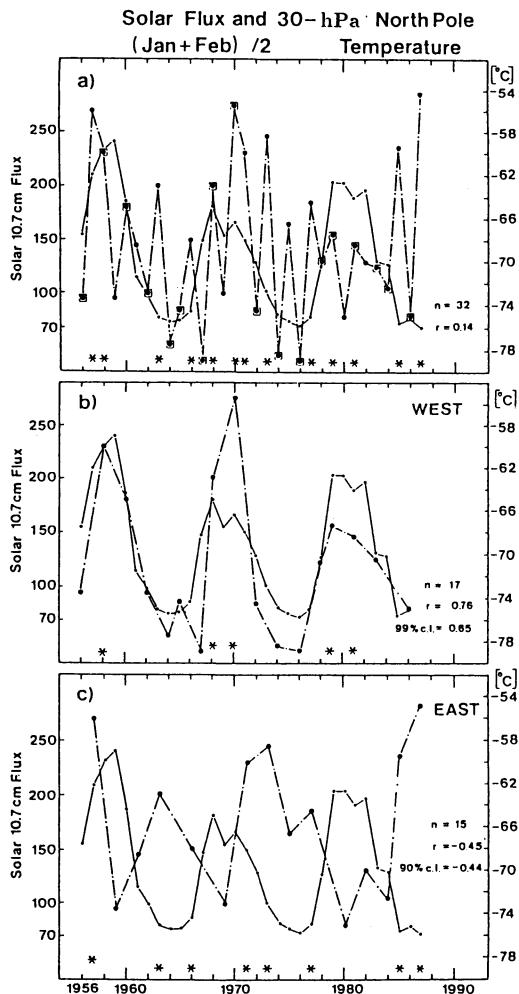
は, 以前より, 一般にベルリン天気図と呼ばれている成層圏天気図に基づき, 冬季の北半球高緯度成層圏に特有な突然昇温現象と, 赤道域中部成層圏の準2年周期振動との関係を調べていた.

突然昇温現象とは, 文字どおり, 冬季高緯度成層圏の気温が数日で 50°C 以上も昇温し, 同時に, 冬季成層圏を支配する西風極夜ジェットが崩壊する現象である. これは, 対流圏の大規模山岳などにより励起された停滞性プラネタリー波(地表面に対して停滞する性質を持った地球規模の波動)が冬季の主風である西風中を上方かつ水平方向に伝播し, 波束がうまく高緯度の極夜ジェットに集中した場合に起こるもので, 平均的には2年に一度程度の割合で起こっている.

一方, 準2年周期振動とは, 赤道域中部成層圏(高度約18~32 km)の東西風が, 26~28か月周期(即ち準2年周期)で交代している現象で, 英語(Quasi-Biennial Oscillation)の頭文字からQBOと略称される.

このように起こる領域が全く異なる突然昇温とQBOであるが, 両者に関係が無いわけではない. 停滞性プラネタリー波は西風中しか伝播しないので, QBOが西風か東風かということは, 側面境界条件としてプラネタリー波の伝播方向に影響を与え, その結果突然昇温の起こり方に影響を与える可能性がある. そのような観点から, 彼女は, QBOが西風と東風の時に分けて突然昇温の起こり方を調べ, 東風位相の時は突然昇

*ラビツケ女史の人となりについては, 「天気」1988年12月号「素顔」の欄に廣田氏による紹介がある.



第2図 (a)各年の1月と2月について平均した、10.7 cm の波長帯の太陽長波放射量 (実線, 単位は $10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) の年々変化と、同じ2か月について平均した北極点における 30 hPa での気温 (一点鎖線, 単位は $^{\circ}\text{C}$) の年々変化。気温変化の方の□は、QBO が 50 hPa 面付近で西風の年を表わす。また底部に描いている*は突然昇温の起こった年を表わす。図中に統計年数と両者の相関係数も記している。(b)太陽の長波放射量はaと同じだが、気温の方は QBO が西風の時のみを描いている。その他はaと同じで、相関係数の下に99%の有意水準も示している。(c)bと同様。但し、気温については QBO が東風の時のみを描いている。相関係数の90%有意水準も示している (Labitzke and van Loon, 1988, J. Atmos. Terr. Phys., 50, 197-206)。

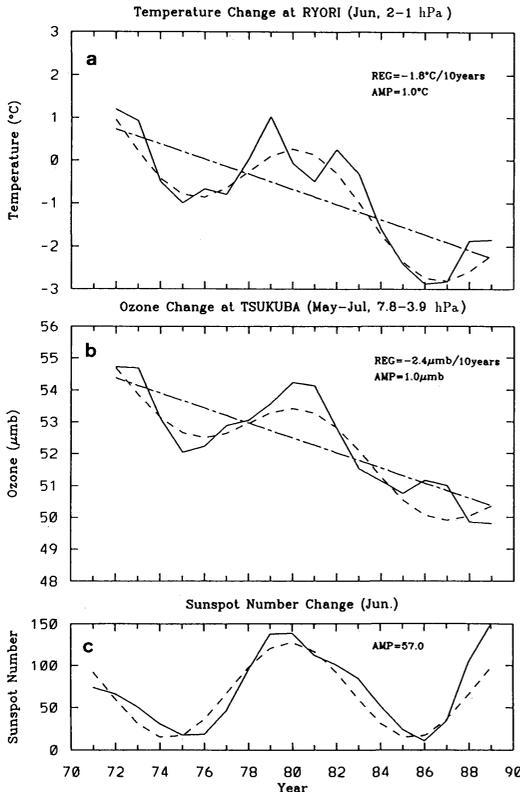
温が起りやすいが、西風位相の時は、太陽黒点数が極大の頃を除いて突然昇温が起り難いという結果を得た。ここで、太陽黒点数というパラメータがいきなり登場するのは唐突な気がするが、これこそ彼女が解析の専門家として長年培ってきた“勘”の結果なのであろう。

このことは、数年後、米国の気象学者ヴァン・ルーン (H. van Loon) との共同研究によって、より明瞭に示された。第2図がそれである。図は3段に分かれている。上段は、30 hPa 面における北極点の1月と2月の平均気温と、波長 10.7 cm の太陽放射の1月と2月の平均量の年々変動を描いたものである。この波長 10.7 cm の太陽放射は、黒点数と同じく、太陽活動度を表わすパラメータとしてよく用いられるものである。両者の間にはほとんど相関が見られない。ところが中段と下段は違う。中段は、気温について QBO 西風位相時のみを抽出したもので、気温と太陽活動度にはきれいな正の相関が見られる。また、下段は同じく東風位相時のみのものを抽出したもので、両者には逆相関が見られる。

この平均気温の変化は、突然昇温の生起と密接に関係している。各段の図の最下部に*印で示しているのは、突然昇温が起こった年である。そして突然昇温の起こった年が高温となっている*²。従って、QBO 西風位相時は、太陽活動が極大の時突然昇温が起りやすく、東風位相時は、太陽活動が極大の時には突然昇温が起りにくいということになる。彼女達は、この図に見える相関に関して統計学的な吟味を行ない、これらの相関が十分有意なものであることを示した。

この論文に見える太陽活動度との関係は十分明白なものに思われる。しかし、この関係がどうして起こるのかといった発現機構を示すまで至っていなかったこともあり、周囲からの反響は、統計期間が短すぎる、統計学的な吟味の仕方がまだ不十分だ、といった批判的な意見が多かった。とはいえ、それまで否定的先入観を持って見られがちであった太陽活動と気候との関係に、ラビツケ女史といういわば業界の大物が示した結果は、十分衝撃的であったといえる。

*²突然昇温時に昇温となるのは成層圏高緯度域のみで、成層圏低緯度や中間圏高緯度では逆に降温する。従って、これらの領域では、第2図に見える相関とは逆になる。なお、突然昇温の機構については、小倉義光著「一般気象学」(東京大学出版会)などを参照されたい。



第3図 (a)三陸の綾里における気象ロケット観測による、2~1 hPa 面間(高度約 45 km)・6 月平均気温の経年変化(°C). (b)つくば(館野)における反転観測による、7.8~3.9 hPa 面間(高度約 37 km)・5~7 月平均オゾン分圧の経年変化(μmb). (c)6 月平均の太陽黒点数の経年変化. データには 1-2-1 の移動平均を施し(実線), トレンド(一点鎖線)と 11 年周期の正弦波のフィッティング(破線)とともに描いている. 図中の REG は 10 年当りのトレンド, AMP は正弦波の振幅をそれぞれ表わす(廣岡と菅野, 1992, 1992 年日本気象学会秋季大会).

4. 中層大気での気温変動

前節の関係は冬季に関するものであるが, 冬季はプラネタリー波や QBO が絡んでくるため, 状況が複雑である. それでは, 夏季に関してはどうなのであろうか. 一般に夏季の中層大気では, 東風が主風となり停滞性プラネタリー波が対流圏から伝播して来ることができないため, 太陽エネルギーの入射と大気からの放射が局所的にほぼ釣り合っているという, 放射平衡に近い状態で気温が決まる. 特に上部成層圏域では, 太陽紫外線によるオゾンの光化学反応により気温が支配

されている.

第3図は, 筆者らによる, 日本上空のオゾン変動と気温変動の調査結果を示したものである. 上段は, 三陸の綾里における気象ロケット観測による, 2~1 hPa 面間(高度約 45 km)・6 月平均気温の経年変化, 中段は, つくば(館野)における反転観測による, 7.8~3.9 hPa 面間(高度約 37 km)・5~7 月平均オゾン分圧の経年変化を, それぞれ示している. どちらも, 減少トレンド*3の上に約 11 年周期の変動が乗っているように見受けられる. 極大と極小の差は気温が 2 K, オゾンが 2 μmb (変動率で約 4%), 極大は太陽活動の極大と一致している. この変動は日本上空のみで見られる特殊なものではなく, 世界各地の気温やオゾン・データを用いた解析でもほぼ同様の結果が得られている.

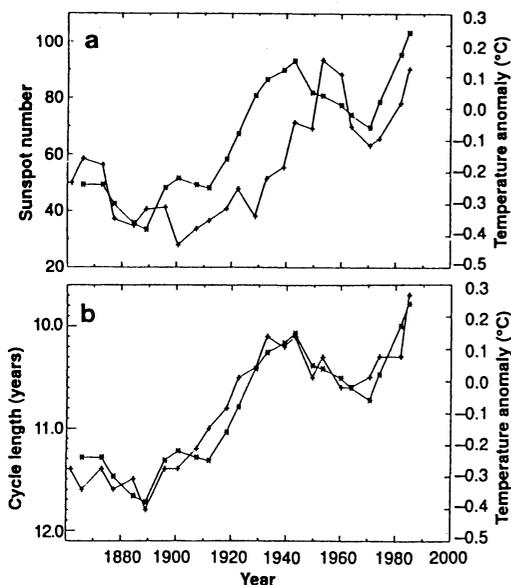
最近の研究によると, 波長 200 nm 付近の紫外線域では, 11 年周期の変動率は約 8% に及ぶことが知られており, そのような紫外線変化を光化学モデルに与えた計算によると, オゾンの変動は 4 hPa 付近が変化率最大で約 4%, そこでの気温変動は約 2 K 程度になるといふ. これらの結果は観測と一致しており, 確かに太陽活動 11 年周期変動の影響があるといつてよいだろう.

以上は夏季の結果だが, その他の季節でも, 太陽の当たらない極夜域を除き, 基本的には夏季と同程度の 11 年周期変動に伴うオゾンや気温の変動が存在するはずである. 前節の“ラビツケ振動”について, この気温変動に伴う風場の変動がプラネタリー波の伝播特性を微妙に変化させ, その結果振動が引き起こされたのだという可能性が, 気象研究所の小寺氏らによって調べられている. しかし, この程度の気温変動で, ラビツケ振動のような大きな変動が本当に説明できるかどうか, 結論はついていない.

5. 対流圏での気候変動

それでは, 対流圏の気候は太陽活動の影響を受けているのだろうか. 上述のラビツケとヴァン・ルーンの一連の研究では, 対流圏の気温についても調べている. 夏季の, 500 hPa 面以上の, しかも特定の地域においてのみ, QBO の位相とは関係なく 11 年周期変動が現われるようである. しかし, 地表面付近では, 11 年周期

*3 成層圏オゾンの減少はフロンを始めとするハロゲン化炭素類の増加が, また気温低下は温室効果気体の増加や成層圏オゾンの減少が, それぞれ原因と考えられる. 温室効果気体の増加が成層圏で気温低下をもたらすことについて馴染みの無い読者は, 「科学」1989 年 9 月号の松野氏による解説などを参照のこと.



第4図 (a)北半球平均気温の1861年～1989年平均からの偏差の変動(*)と11年移動平均をした太陽黒点数の変動(+). 気温の偏差については11年太陽黒点周期の極値間(極大同士または極小同士の間)の平均を取っている。(b)同じく気温の変動(*)と太陽黒点周期の長さ(極値間の間隔, +)の変動(Friis-Christensen and Lassen, 1991, Science, 254, 698-700).

の変動はほとんど見られないとのことである。

地表面付近の気温については、11年周期よりもっと長い変動周期についてよく調べられている。例えば、第1図の黒点数に対して、11年以上の移動平均を施せば、11年より長い周期の黒点の長期変動が得られるが、それと地表気温の長期変動を並べて描くと、両者の変動はかなり似たものとなる(第4a図)。

さらに、太陽活動周期を細かく見ると、長期的に見た活動が活発な時には周期は10年程度とやや短く、逆に不活発な時には12年程度にやや長くなるという具合に、周期自体が80～90年のスケールで変動していることが知られている。これを発見者の名前を取ってグライスベルク・サイクルというが、この周期を気温変動と並べて描くことにより、黒点変動以上の、驚く程よい一致が見られることが最近指摘された(第4b図)。

これらの結果を見ると、最近の温暖化は、温室効果気体の増加の結果というより、太陽活動に起因するのではないかと結論づけたい。また、前述の印象派以前の画家の絵とマウンダー極小期との関係も考え

合わせると、太陽活動と気候の関係は、もはや疑う余地が無いと思われる向きも多いであろう。事実、米国などの研究者には、同様の論拠から、温室効果気体放出抑制議論に強硬に反対している人もいる*4。しかし、このような長い周期の太陽活動の変動に伴い実際にどれだけのエネルギー流束の変動が起こっているのかは不明であり、両者の関連を理論的に説明することはできていないのが現状である。

6. おわりに

以上述べてきたように、太陽活動と気候変動の関連を理論的に説明することは、現段階では一部を除きほとんど成功していない。しかし、一般人やマスコミの間には第3図や第4図のような関係を見せられると、ただちに両者の関連を信じてしまう傾向が強い。しかし、例えばQBOの周期のように、その周期を持つ外的強制力が存在せずとも、地球大気の内的性質の結果としてたまたま作られる変動周期が存在することも事実である。従って、太陽活動の変動傾向との一致は、必ずしも外的な太陽活動の強制によってそれが引き起こされていることを意味しない。経済の分野にあるジューラー・サイクルと呼ばれる約11年周期の変動や、女性のスカート丈の変化もほぼこの周期で変動している、などといった例を出すまでもなく、この種の問題には常に統計的“偶然の一致”という危険性がつきまとう。

我々がこの問題を真に理解することができるのは、両者の因果関係を明確に示し得た時だけである。そのためには、太陽エネルギー流束の長期的変動量を正確に知る必要がある。ここでは触れなかったが、19世紀半ばより蓄積されている、ある種の地磁気変動の指標を使って、間接的に太陽エネルギー流束の変動量を推定しようという試みも一部なされている。しかし、正確な太陽エネルギー流束変動量を直接得るためには、あと100年以上の観測データの蓄積が必要である。そして、遅くともその頃には、太陽活動と気候変動の関係にも最終的な決着がついていることであろう。

*4 例えば、1989年に出たマーシャル研究所のマーシャル・レポートがある。このレポートについては、「科学」1990年3月号の“科学の目”に朝倉氏による解説がある。