

"地球温暖化"における太陽活動変動の寄与評価

伊藤 公紀 *

Estimating the Effect of Solar Activity Changes on the Global Warming

Kiminori ITOH *

Synopsis

A trial was made to estimate the effect of solar activity on the global warming by using temperature proxies (sea surface temperature, ^{18}O content in coral leaves, and freezing date for Lake Suwa) and solar activity indices (aa index and cosmogenic isotope ^{10}Be). By matching these data each other for the period from 1650 AD, it is concluded that the solar activity is the main factor in the increasing trend of the global temperature in this century. The Lake Suwa data showed an increase near 1500 AD, which was consistent with an increase in the solar activity found in the ^{10}Be data.

1. 序

化石燃料の燃焼による二酸化炭素の濃度上昇によって、地球の気温がどの程度上昇するかという問題は、エネルギー政策や環境政策に大きな影響を与える問題である。二酸化炭素濃度が産業革命以前の 280ppm から、現在の 360ppm に増加した (Fig. 1 参照) ことは、とりもなおさず、人為的活動が地球環境に大きな影響を与えていることを意味している。事実、二酸化炭素濃度の増加に同期して種々の汚染も進行している。二酸化炭素の濃度上昇の影響として最も多く取り沙汰されるのは、もちろん温室効果による温暖化の可能性であり、ここ数年観測された高い気温が、二酸化炭素増加のためであるという見方をされることも多い。しかし報道などで通常言われることとは異なって、今世紀に観測されている約 0.5°C の気温上昇が二酸化炭素の増加によるという確証は出ていない (Kerr, 1997)。

Fig. 1 に示したのは、しばしば引き合いに出される、二酸化炭素濃度変化と気温 (平均海面温度: SST) の関係である (データについては方法の

項を参照)。数年のスケールでは SST の変動が CO_2 の変動よりもずっと大きいのが、100 年のスケールになると両者の変動の傾向は大略一致しているようにも見える。しかし、最近のコンピューターシミュレーションの結果を見ると、そんなに単純な話ではない。例えば Hansen らの大循環モデルによるシミュレーションによれば、最近 20 年間における二酸化炭素などの温室効果ガスによる温暖化傾向は、火山からのエアロゾルやオゾン層の減少による冷却傾向と完全に相殺している (Hansen, 1997)。この結果を基にして、Hansen らは 1980 年からの気温上昇の原因について論じ、その直前までに海洋に蓄積した熱が放出されたのだとしている。すなわち Hansen らによれば、Fig. 1 から得られる素朴な印象は間違っていることになる。Hansen らは従来、一貫して CO_2 の温室効果による地球温暖化を強調してきたが、将来の予想はともかくとして、少なくとも最近の気温上昇については、 CO_2 増加だけで説明することかできないと結論されたのは印象的である。

*横浜国立大学環境科学研究センター環境計測工学研究室 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

Department of Environmental Physical Chemistry, Institute of Environmental Science and Technology, Yokohama National University, Yokohama 240, Japan.

(1999 年 11 月 1 日受領)

一方、1970年代のEddyの研究(例えばEddy, 1977)を端緒として、地球気温と太陽活動変動の相関を主張する研究も多い。最近デンマーク気象研究所のグループは、太陽黒点周期の変動が気温変化と良く相関することを見出し、太陽活動の変動、特に太陽磁気活動の変動が、数百年単位の時間における地球気温変化の主因子であると主張した(Lassen & Friis-Christensen, 1995; Svensmark & Friis-Christensen, 1997)。

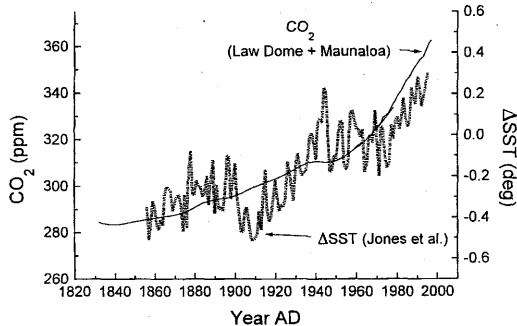


Fig. 1. A comparison between the sea surface temperature and the concentration of CO_2 . Data sources are as follows: for the CO_2 concentration, <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr20> (Law Dome data) and <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp001/maunaloa.co2> (Mauna Loa); for SST, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends> → temp → jonescru.

これに対して、DamonとPeristykhは、Svensmarkらの用いた過去の気温に対する評価が不正確であると、また黒点周期に対する詳しい検討を行って、今世紀の気温変化に対する太陽活動の寄与は25%程度とした(Damon & Peristykh, 1999)。残りは二酸化炭素の寄与だろうとしているが、上述のように、大循環モデルはこの結論を支持しない。

このように、地球気温の変化に対する、二酸化炭素濃度上昇の寄与と、太陽活動変動の寄与の見積もりについては、結論が出ていない。しかし、ここ数年、太陽の気候影響についての多くの傍証を基に、特に太陽の磁気活動が地球気候に影響するメカニズムが幾つか提案されており、このような評価を行うことは重要である(伊藤, 1999)。また、自然変動の一つとしての太陽変動の効果を見積もることは、より正確な気候モデルシミュレーションを行う上でも実質的な意味があると考えられる。本論文ではこの状況に鑑み、予備的な検討ではあるが、より適切な太陽活動指標と気温代替量の採用により、太陽の影響をできるだけ正確に評価することを試みた。

2. 方法: 各種代替量と解析方法

2.1. 解析方法

最終的な目標は、気温代表値であるSSTと、地球における太陽活動の影響の指標で、かつ機器測定による客観値が得られるaaインデックス(詳しくは後述)とを比較することに置いた。もちろん、適当にスケールリングを行えば、容易に、Fig. 1で見るとような形で両者を重ねることができ、

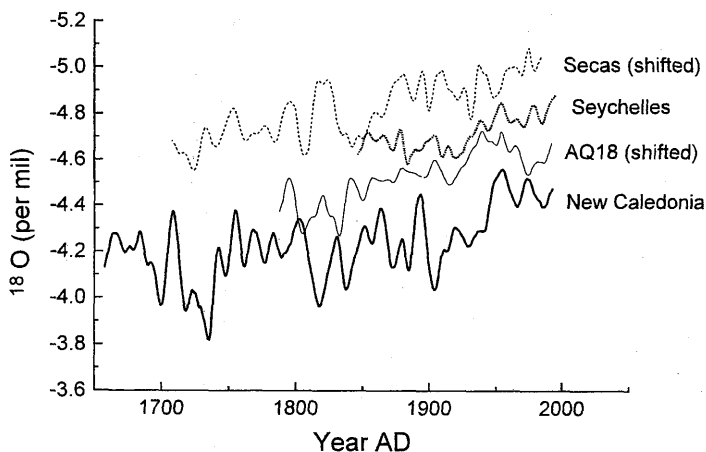


Fig. 2. Time courses of changes in the ^{18}O concentration in coral leaf samples from different points. Data were taken from <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/coral>, and were 5-year averaged (twice).

これが妥当な比較である保証はない。そこで、できるだけ長期間の気温代替量と太陽活動指標とを比較することにした。具体的には、人為的な二酸化炭素の放出が無視できる 1860 年までの期間において、気温代替量と太陽活動指標とが対応すると仮定して、適当にスケールを変えて重ね、その結果を基にして、今世紀における両者の変動を比較した。後述のように、使用した太陽活動指標 (^{10}Be データ) の開始が 1420 年、気温代替量 (New Caledonia 珊瑚礁の ^{18}O 分析値) の開始が 1650 年なので、1650 年から二酸化炭素の濃度増加が少なかった 1900 年頃までの期間を基準にした。

気温、太陽活動ともに、長期間をカバーする記録は数少ないので、幾つかの記録を繋いで全体が見渡せるようにするという方法を用いた。気温指標については、1860 年から現在までの SST 記録と良く合うものを選択して温度軸の校正を行い、更にこれと合うものを選んで期間を過去に延ばすと共に、温度軸の校正を行うという手順を採った。太陽指標については、機器測定記録である aa インデックスを基準とし、同様にしてできるだけ過去に期間を延ばした。気温代替量、太陽活動指標共に、適当に平均化 (主として、5 年あるいは 10 年移動平均を 2 回) して用いたが、重ねたりして比較する量同士は同じやり方で平均化した。

2.2. 気温代替量

良く知られているように、機器測定による気温の記録は 1860 年頃から始まり、それ以前の気温は気温代替量によらざるを得ない。長期間におけ

る気温代替量として最も良く用いられるのは、樹木の年輪記録である (例えば Briffa & Osborn, 1999)。しかし年輪巾は、樹木の年齢によって大きく変わるので校正が必要である。また、二酸化炭素の濃度が増加すると樹木の成長が盛んになるという効果も無視できない。事実、Jones らが示した約 1000 年に亘る、主として年輪記録による気温変化は、特に 1800 年代の値が機器測定記録よりもかなり低くなっている (Briffa & Osborn, 1999)。そのため、ここでは以下に示す他の代替量を用いることにした。

2.3. 氷床コアおよび珊瑚礁の ^{18}O 記録

気温代替量として次に良く用いられるのは、極地 (例えば Delmas, 1992) や山地 (Thompson et al., 1998) において採掘された氷床コア中の、 ^{18}O などの同位体である。同様な気温代替量として、珊瑚礁中の同位体がある。蒸発や生物への取り込みのような物理的および化学的過程において、同位体効果による分離が起こるために、これらの試料中の同位体量は気温に依存している。珊瑚礁では、Sr/Ca 比が最も良く海表面温度 SST を反映するとされるが、 ^{18}O 量も十分に SST に対応している (Evans et al., 1998)。これらのデータは、米国大気海洋局 NOAA や二酸化炭素情報センター CDIAC などにより、年々変化の記録がインターネットで公開されていて使い易い。ここでは、これらのデータを採用した (後述)。Fig. 2 に、世界各地の珊瑚礁から得られた ^{18}O 変動データを示す。

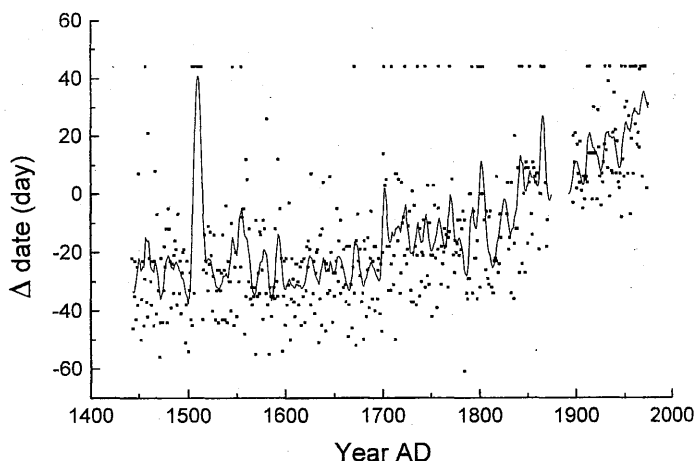


Fig. 3. Freezing date for Lake Suwa (Harada, 1977). The thin curve is a 5-year average (twice).

2.4. 諏訪湖の凍結記録

日本における気温代替量としてユニークなものに、諏訪湖の凍結記録がある (原田, 1977)。

Fig. 3 に示したように、1443 年から 1975 年まで、明治維新後の暫くの空白期間を除くと、ほぼ連続的に毎年、完全凍結の日付が記録されている。凍

結日が早いときは寒冷時期、遅いときは温暖時期である。Fig. 3 の date 値は、1 月 1 日を基準にして、凍結が何日早いかを負の整数で表し、遅い場合は正の整数で表したものである。また、未凍結の場合は、凍結の最も遅い日(2月13日→date=43)よりも十分に正の値(例えば 50)を割り当てた。Fig. 3 には、素データとともに、5 年平均の曲線も示してある。凍結日と気温の対応も試みたが、全期間に対する妥当な変換は困難であった。

2.5. 太陽活動指標

太陽活動の指標も種々提案されてきた。Reid (1987) によって導入された太陽黒点数や、前出の太陽黒点周期は太陽自身のパラメーターであるが、地球への太陽活動の影響を表す指標もある。代表的なものは、銀河宇宙線が大気成分と衝突することによって生じる ^{14}C (例えば Sonett, 1991)、 ^{10}Be (Beer et al., 1990)、 ^{36}Cl (Plummer et al., 1997) などの同位体である。宇宙線は太陽風により大気突入が妨げられるので、宇宙線強度は太陽の磁気活動と逆相関する。従って、これらの同位体量は、太陽磁気活動の指標である。樹木などに取り込まれた ^{14}C が太陽活動を記録していることは、Eddy (1977) により指摘された。彼は、およそ 1650 年から 1700 年まで続いた太陽活動の沈滞期に、その発見者である Maunder の名を冠してマウンダーミニマムと命名し、更に、この期間がヨーロッパにおける小氷期に対応していることを指摘した。しかし、 ^{14}C は大気中の滞留時間が長いので、年々変化は平滑化されてしまう。また、 ^{14}C 濃度の低い化石燃料の燃焼により大気中の ^{14}C が薄められたため、近年の ^{14}C 記録は太陽変化の指標として不適當である。 ^{10}Be の濃度は、降水量に

ほぼ反比例するので降水量指標としても使われるが、太陽の磁気活動の指標としても有用である。特に、大気中の滞留期間が 1 年程度であるために、 ^{14}C に比較するとずっと時間的な分解能が良いのが特徴である。ここでは、J. Beer 博士により提供された、グリーンランドの氷床コアの分析により得られた ^{10}Be データ(1420 年-1980 年)を用いた。Beer らは既に、 ^{10}Be 濃度変化が 18 世紀来の地球気温変化と良く対応していることを示している (Beer et al., 1994)。

aa インデックスは、地磁気の変化から測定される、太陽磁気活動の良い指標である (Gorney, 1990)。太陽の磁気活動が強くなると、地球に到達する太陽風の強度が増し、太陽風による地磁気の擾乱が大きくなる。その程度を nT (ナノテスラ) を単位として表したのが aa インデックスである。太陽磁気活動が大きいと aa インデックスは大きくなるので、上述の宇宙線由来同位元素の生成量とは逆相関の関係となる。aa インデックスの記録は 1868 年からしかないので、これより過去については ^{10}Be データに接続させることにした。

2.6. インターネットからのデータ取得

- 1) 二酸化炭素濃度は、<http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr20> (Law Dome 20 年平滑化 CO_2 データ) および <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp001/mauna-loa.co2> (マウナロア山の二酸化炭素データ) から取得した。
- 2) SST は、<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends-temp-jonescu> から取得した。
- 3) 珊瑚礁の ^{18}O データは、<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/coral> から取得した。

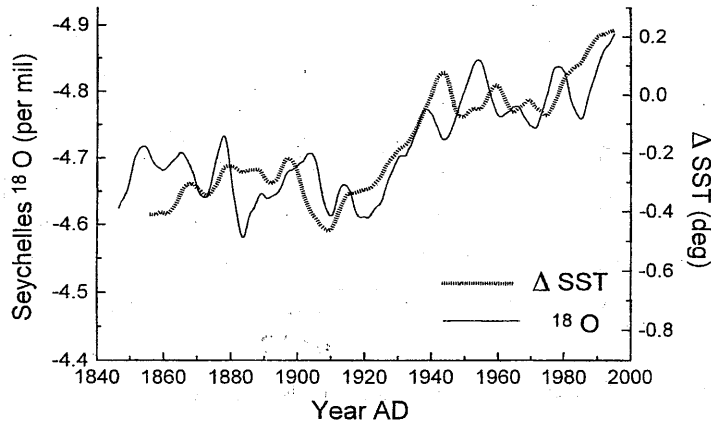


Fig. 4. A relation between ΔSST (5-year averaging, twice) and ^{18}O data from Seychelles islands (5-year averaging, twice). The superposition is arbitrarily carried out in such a manner that the two curves matches each other as far as possible.

3. 結果と考察

3.1. データの重ね合わせと接続

Fig. 2 に示した珊瑚礁データを見ると、全期間を通じての気温の上昇傾向と、特に今世紀における気温上昇がはっきり分かる。また、周期 10 年程度の周期を持つ振動が良く現れている。 ^{18}O の絶対値や振動の中が、地点によって異なるのは、各地点での海水温の値や変動幅が異なるためと思われる。Seychelles の ^{18}O データでは、最近の気温上昇が現れており、SST と比較するのに適当と思われた。また、New Caledonia の ^{18}O データは最も期間が長く、太陽活動と比較するのに適当と思われる。そこで、SST と Seychelles ^{18}O データを比較し、次に Seychelles ^{18}O データと New

Caledonia ^{18}O データを比較接続することにした。

Fig. 4 に、SST と Seychelles ^{18}O データを、全体ができるだけ合致するように重ねた結果を示す。珊瑚礁データは、かなり良く SST を反映しているはずであり、事実、Fig. 4 を見ると全体の傾向は合っている。しかしピークの位相は必ずしも合っていない。ピークの位相については、他の珊瑚礁のデータと SST の関係も同様であった。

Fig. 5 に、Seychelles ^{18}O データと New Caledonia ^{18}O データを重ねた結果を示す。ピークの位相は、かなり良く一致しており、また全体の傾向も一致していて、接続を適当に行うことができると判断した。

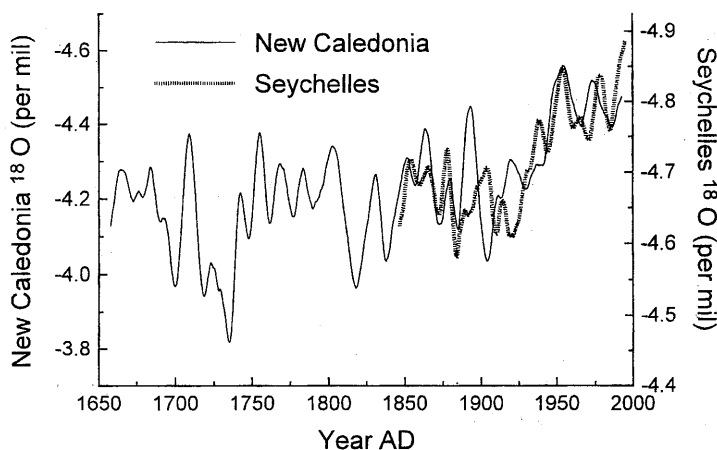


Fig. 5. Matching between two coral leaf ^{18}O data (5-year averaging, twice): samples for New Caledonia and Seychelles. The superposition is arbitrarily carried out in such a manner that the two curves matches each other as far as possible.

Fig. 6 に示したのは、aa インデックスと ^{10}Be データを適当に重ねた結果である。aa インデックスはここ 100 年で約 12 から約 26 に増加しており、これは太陽の磁気的活動が約 2 倍になったことを示す。これに対応して、 ^{10}Be 量は約 1.3 から約 0.6 と半分以下に減少しており、 ^{10}Be の生成機構を考えると妥当である。1700 年付近で ^{10}Be 量が多くなっているのは、マウンダーミニマムに良く対応している。Fig. 6 では、マウンダーミニマムが ^{10}Be = $1.6 \times 10^4/\text{g}$ 程度に対応し、aa インデックスの 0 が ^{10}Be = $1.8 \times 10^4/\text{g}$ に対応しているが、マウンダーミニマムの時期は太陽の活動が極めて減少したと考えられていることを考慮すると、この対応は妥当と思われる。ちなみに、1991 年に Beer らが示した対応関係では、マウンダーミニマムにおける aa インデックスが負になってしまうので、適当とは言えないだろう。

なお、aa インデックスと ^{10}Be 量の間には、かなりの位相のずれが見られ、15 年程度ずらすと一致が良くなる。 ^{10}Be の生成機構と、滞留期間が 1 年程度と比較的短いことを考えると、このずれは不思議である。 ^{10}Be データの年代決定の誤差ではないらしく、原因はまだ不明である。

3.2. 気温代替量と太陽活動指標の比較

Fig. 7 に、New Caledonia の ^{18}O データと ^{10}Be データとの対応を示す。New Caledonia データがカバーする 1650 年から 1890 年程度までの期間で、両者が良く対応するように重ねた。 ^{10}Be データにおいて、各世紀に見られる上向きの峰は、太陽活動で知られる 80 年周期の Gleisberg サイクルに対応している。各サイクルの終わりに対応して、1700 年付近、1800 年付近、1900 年付近には、深い窪みがある。New Caledonia の ^{18}O データにおい

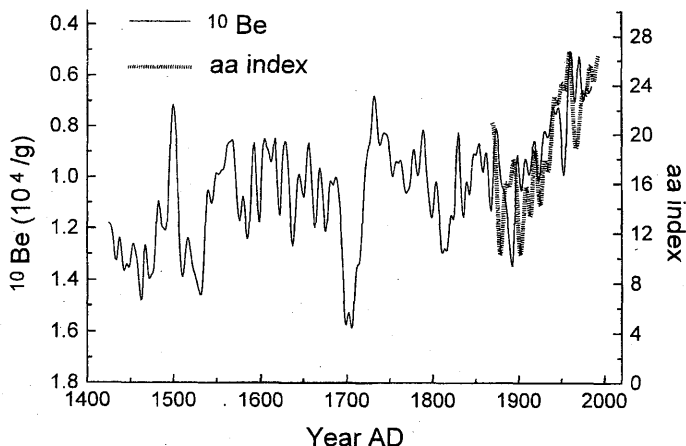


Fig. 6. Matching between two solar indices (5-year averaging, twice): aa index and ^{10}Be concentration in a Greenland ice core. The superposition is arbitrarily carried out in such a manner that the two curves matches each other as far as possible.

でも、このずれは明瞭である。 ^{10}Be データは、1720年頃にかかなり大きくなっていて、New Caledoniaの ^{18}O データと大きくずれているが、この点を除けば、両者の対応はかなり良い。もちろん、このような比較には任意性があるので、ある程度の中を持たせるべきであるが、ここでは予備的な検討として、17世紀での曲線が似ていること、18世紀と19世紀の Gleisberg サイクルの峰がかかなり

一致することに留意して、両曲線を重ねた。

Fig. 7において、ピークの位相は必ずしも良く対応していないが、全体の形はかなり良く一致しているようである。特に、今世紀の上昇傾向は一致し、その程度も良く似ている。ピーク位置のずれは、前述した ^{10}Be データと aa インデックスの位相のずれと関係があるかも知れない。

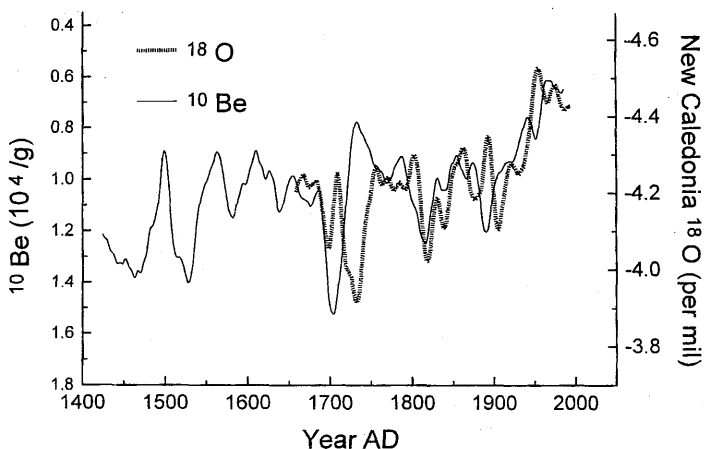


Fig. 7. Matching between ^{18}O data for New Caledonia and the concentration of ^{10}Be from Greenland (10-year averaging, twice, for both). The superposition is arbitrarily carried out in such a manner that the two curves matches each other during the period of 1650 AD - 1870 AD as far as possible.

3.3. SST と aa インデックスの対応

Fig. 7 の結果および、Fig. 4 - 6 の関係を用いて作った、SST と aa インデックスとの対応関係を Fig. 8 に示す。aa インデックスにおける幾つかのピーク(1870年、1910年、1920年、1950年、1960年)がかなり際立っていることなどを除けば、全体の傾向は一致し、またピークの位相もかなり良く一致している。そして、今世紀における上昇の程度、最近 20 年における上昇の程度はかなり一致している。

1870年付近での両者のずれが大きく見えるが、これはむしろ、この時期の SST が低めに出ていることが原因のようである。これは、Fig. 4 に示した SST と Seychelles の ^{18}O データの対応を見ると判る。この図における対応関係は、ピーク位相のずれを除けば、Fig. 8 の対応関係よりも一層はつきりしているようで、1870年付近でのずれが特に大きいわけではないことが判る。

Fig. 8 において、1950年から1960年にかけてのずれは、太陽活動に比較して気温が低かったということを示していると解釈することもできる。これを、最近の大循環モデルによるシミュレーション(Hansen, 1997)で採用される、人為的なエアロゾルの効果と見ることができるとも知れない。

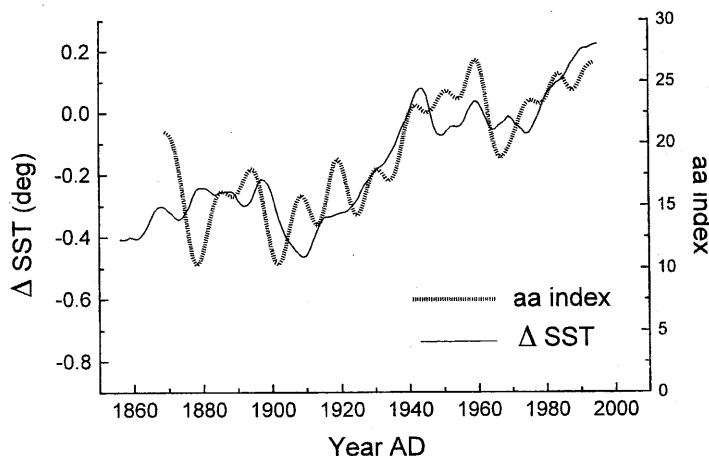


Fig. 8. A relation between aa index and SST (5-year averaging, twice). The matching was made from the results of Figs. 4-7, and hence, not arbitrary.

3.5. 諏訪湖データにおける太陽活動の影響の評価

諏訪湖の凍結記録は1443年に始まるので、 ^{10}Be 濃度データの初めから比較が可能である。Fig. 9 にその結果を示す。特徴として、1800年からの上昇傾向が一致しており、ピークの位置もかなり良く合っているように見える。1700年付近のマウン

3.4. 気温変化に対する太陽活動の寄与の評価

Fig. 8 の結果から、太陽活動の変動の影響が気温変化に占める割合を出すことができるはずである。今世紀初頭の下向きピークを基準とした変動の中を比較することにより、予備的な検討ではあるが、90%以上が太陽活動の影響と見ることができる。すなわち、二酸化炭素の影響はせいぜい10%であるということになる。結局、今世紀の気温上昇の主要原因は、太陽活動の変動であるというのが本考察の結論である。これは、太陽活動の寄与が25%程度とした Damon & Peristykh の見積もり(1999)と大きく異なる結果である。この原因は、彼らが Svensmark & Friis-Christensen (1997) に倣って、太陽活動指標として太陽黒点周期の変動を用いていることにある。太陽黒点周期が太陽活動の指標としてどの程度有効であるか(Baliunas & Soon, 1995)は別としても、黒点のような遠隔的な観測に基づく指標よりも、実際に太陽活動が地球上でどのように働いているかということについて、より直接的な情報を与える指標である aa インデックスや ^{10}Be 濃度のような指標の方が、地球気候に対する影響を評価するために適当であるとしても不思議はないと思われる。

ダーミニナムに対応した気温低下ははっきり見えないようであるが、17世紀の低温期と、18世紀に入ってから高温な時期は良く現れている。また、1500年付近に見られる高いピークが一致しているようである。これは、諏訪湖凍結データが1443年まで溯るために、初めて見ることが可能になったことである。

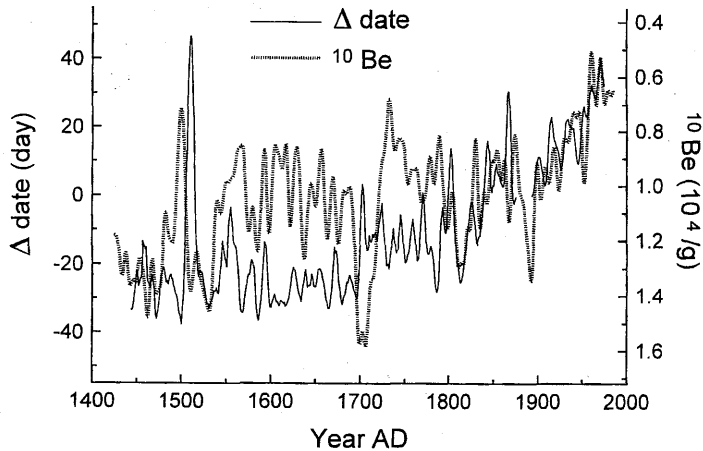


Fig. 9. A relation between freezing date of Lake Suwa and the ^{10}Be data (5-year averaging, twice, for both). The matching was arbitrarily performed.

1800年以前の比較的気温が低かった時期においては、凍結日曲線は低く、振幅も小さく見える。この原因の一つは、年内における気温の変動が正弦関数的であることによるものであることが明らかである。すなわち、気温が低かった時期には、凍結が11月から12月に起こり、この時期における気温の日毎の変化量は比較的大きい。これに対して、温暖な時期には凍結が1月から2月に起こるため、気温の日間変化の程度が少ない。これを考慮して正規化を図ると、1800年までの対応関係はかなり改善される。但し、1800年以降の温暖期については、この方法では補正が難しかった。

また、諏訪湖の凍結記録と、諏訪における気温記録(1945年からの最高気温、最低気温、平均気温)との対応はかなり良かったが、詳しく見ると必ずしも対応しておらず、凍結記録を気温に変換するためには、更に今後の検討が必要であるとされた。

4. 結論

本論文では、今世紀の気温変動に対する太陽活動変動の寄与を見積もるために、気温代替量と太陽活動指標を比較した。気温代替量としては、珊瑚礁の ^{18}O データが有効であった。特に、幾つかのデータ系列を用いて比較することにより、1650年まで遡ることができた。太陽活動の指標としては、黒点数のような定性的要素の大きい指標ではなく、太陽磁気活動の地球への影響を直接表す機器測定量であるaaインデックスと、氷床コア中に保存されている宇宙線由来の同位体 ^{10}Be が有効であった。1650年から1900年における、これらの代替量と指標を比較することにより、1900年からの気温上昇における太陽活動の寄与を見積も

ることができる。最終的に、SSTとaaインデックスを比較するスケールを得て、両者を比較し、太陽活動変動の影響が主要因であると結論した。また、1443年に始まる諏訪湖の凍結記録を気温代替量として用いて、 ^{10}Be データと比較した結果、1500年付近の太陽活動の増加に伴うと思われる温暖期が観測されるなど、かなり良い対応が見られた。凍結日と気温の対応関係がはっきりすれば、今世紀における気温上昇の要因についても検討できるデータになり得る。

このような経験的手法は、信憑性に欠けるとされることもあるが、本論文の結果を見ると、信頼性のあるデータ系列を多く用い、また参照とする期間を延ばすことによって、かなり正確な見積もりができると思われる。

太陽の磁気的活動が地球気候に影響する物理的機構がはっきりしないことから、大気海洋大循環モデルには、太陽の影響が十分には採り入れられていない(伊藤, 1999)。今後、太陽の寄与の見積もりがはっきりすれば、当然、大循環モデルの修正も必要にならざるを得ないだろう。

謝辞

氷床コア中の ^{10}Be データを提供戴きましたことを、スイス環境科学研究所のJuerg Beer博士に感謝致します。

参考文献

- Balliunas, S. and W. Soon, 1995. Are variations in the length of the activity cycle related to changes in brightness in solar-type stars? *Astrophys. J.*, 450: 896-901.

- Beer, J., et al, 1990. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity, *Nature*, 347: 164-166.
- Beer, J., F. Joos, Ch. Lukaszyk, W. Mende, J. Rodriguez, U. Siegenthaler and R. Stellmacher, ^{10}Be as an indicator of solar variability and climate, NATO ASI Series, Vol. I 25, The Solar Engine and Its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate, ed. E. Nesme-Ribes, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.221-233.
- Briffa, K. R. and T. Osborn, 1999. Seeing the wood from the trees, *Science*, 284: 926-927.
- Damon, P. E. & Peristykh, A. N. 1999, "Solar cycle length and 20th century northern hemisphere warming: revisited", *Geophys. Res. Lett.* 26: 2469
- Delmas, R. J., 1992. Environmental information from ice cores, *Rev. Geophys.*, 30: 1-21.
- Eddy, J. A., 1977. Climate and the changing sun, *Climatic Change*, 1: 173-190.
- * Evans, M., Fairbanks, R.G., and Rubenstone, J.L., 1998, Kiritimati Coral Isotope Data, IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 1998-035. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/)
- Gorney, D. J., Solar Cycle Effects on the Near-Earth Space Environment, *Rev. Geophys.*, 28 (1990) 315
- Hansen, J. et al., 1997. Forcings and chaos in interannual to decadal climate change, *J. Geophys. Res.*, 102: 25,679-25,720.
- Kerr, R., 1997. Greenhouse forecasting still cloudy, *Science*, 276: 1040-1042.
- Lassen, K., & E. Friis-Christensen, 1995. Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57: 835-845.)
- Plummer, M. A., F. M. Phillips, J. Fabryka-Martin, H. J. Turin, P. E. Wigand, and P. Sharma, 1997. Chlorine-36 in fossil rat urine: an archive of cosmogenic nuclide deposition during the past 40,000 years, *Science*, 277: 538-541.
- Reid, G. C., 1987. Influence of solar variability on global sea surface temperature, *Nature*, 329: 142-143.
- Sonett, C. P., 1991. Long period solar-terrestrial variability, *Rev. Geophys.*, Supplement: 909-914.
- Svensmark, H. & E. Friis-Christensen, 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - a missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59: 1225-1232.
- Thompson, L. G., M. E. Davis, E. Mosley-Thompson, T. A. Sowers, K. A. Henderson, V. S. Zagorodnov, P.-N. Lin, V. N. Mikhaleenko, R. K. Campen, J. F. Bolzan, J. Cole-Dai, and B. Francou, 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores, *Science*, 282: 1858-1864.
- 伊藤公紀、1999. 地球温暖化問題の新しい局面 - 太陽・気候相関のミッシングリンク、*科学*, 69: 665-669.
- 原田常治、1977. 「気温の周期と人間の歴史」 同 志社.