Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. **10**, 1–10 (2000)

松尾神社　和銅の松』の年輪解析と太陽活動

時政典孝[1]、久保田諄[2]

1 ）兵庫県立西はりま天文台
2 ）大阪経済大学

The Dendrochronological Analysis of Tree Ring of "Wadou-matsu" Pine at the Matsuo Shrine and the Solar Activity

Noritaka Tokimasa[1], Jun Kubota[2]

1) Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan
2) Osaka University of Economics, Osaka, Japan

E-mail: tokimasa@nhao.go.jp

(Received 2000 December 21)

概要

京都府亀岡市の松尾神社にあった和銅の松 (1670–1970) の年輪幅の経年変化には 30、40 年と 60 年の周期性があることがスペクトル解析から判明した。この年輪幅と南極における氷床のアイスコアで測定されたδ ^{18} O 指数の変化が相似であることは、樹木の成長率が気候によって支配されることを示している。また、黒点数と年輪幅の変化の相関が著しいことは、気候が太陽活動の変化に影響を受けていることを示唆する。

Abstract

Spectral analysis of tree ring series(300 year data) of "Wado–matsu" pine shows the periodicities of 30, 40 and 60 years in its growth. Similarity of the temporal distribution of tree ring width to that of the δ ^{18} O index measured from the ice core at the site of the southern pole indicates that the growth rate of the tree is predominantly due to the climate change. Excellent correlation between the 22 year moving averaged curve of sunspot number and that of tree ring width also provides an evidence that the climate may be influenced by the solar activity.

Key words: Tree Ring, Solar Activity

1. 序論

樹木が成長する速さは気候の変化に大きく影響される。適当に雨も降る温暖な気候では樹木の成長も盛んであるが、反対に、寒冷で降水量も少ない場合には成長の速さは低下するであろう。気温と降水量ばかりではなく、毎日の日射量も成長を左右する因子であろう。

日本のように春夏秋冬の四季の移り変わりがはっきりしている地域では、樹木に年輪が毎年一つづつ表皮の下に作られる。樹木の成長に適した気候の年は幅の広い年輪が作られるであろうが、そうでない年の年輪は狭くなることが予想される。それ故、樹木の幹を直角に切った断面に見られる過去から現在までの年輪の幅の年毎の変化は気候の移り変わりを表していると考えられる。そして、もし太陽の活動が地球の気候に影響を及ぼしているならば、逆に年輪幅の年毎の変化から過去の太陽の活動を推定できるであろう。

この様な予想のもとに、樹木の年輪幅の時系列から過去の気候の変化、ひいては太陽活動の変化を読み取ろうとしたのは Douglass(1928) が最初であった。アリゾナ、カリフォルニアやバルチック海沿岸から数多くのサンプルを集めて調べ、AD1650 年から 1720 年までの期間を除いて、AD1400 年から現代までの年輪の幅に太陽の活動サイクルの影響と思われる変化 (周期 11.3 年) が存在すると述べている。Douglass による結果は多くの人々の注目するところとなり、中でも Huntington(1922) は年輪の幅に太陽の 11 年周期の活動の影響が存在するいう説の熱心な提唱者となり、過去 2000 年にも遡る樹木の年輪を探し求めて測定し、11 年周期のサイクルが見られると力説している。

このような 11 年サイクル説に初めて反論を唱えたのは Harris(1926) であり、太陽の黒点数の変化と年輪幅の相関はあっても極めて弱いと述べている。また、Mitchell はアメリカ西部の樹木の年輪の幅に 22 年周期のサイクルが見られると述べているが、れは太陽活動よりもカリフォルニアの旱魃の周期にその原因があるとしている。Douglass 自身による研究でも、しばしば 11 年周期の太陽サイクルと同じシグナルが消えて、他のサイクルが優勢になることがあると指摘している。

LaMarch と Fritts(1972) は五種類の異なった統計方法を使って、樹木年輪の幅の時系列に隠れているサイクルを見つけようと試みたが、黒点活動の変化と年輪幅の変化の間にはっきりした相関を見つけることはできなかった。また、Currie(1991) は最大エントロピー法を使って北アメリカの樹木の年輪幅の時系列を解析し、10.5 年の周期をもつサイクルが非常に弱いと述べている。今日では太陽活動と同じ周期の 10.5 年サイクルが年輪幅の中にもあることはあるが、非常に弱くて、しかも、時と場所によって、現れたり現れなかったり、場合によっては他のサイクルの変化が現れることを多くの人々が指摘している。つまり、11 年周期は存在しても、年輪幅の時系列の始めから終わりまで一貫して存在するのではなく、現れても数サイクルだけで消えてしまったり、また現れたりするので、統計的な方法でサイクルの存在を明らかにするのは困難である。

この論文では、京都府亀岡市旭町の松尾神社の御旅所にかって巨大な黒松があって、この松が枯死したとき、伐採されたこの木の根元部分の断面に見られた年輪を故竹岡林氏が現場で測定されたデータを再解析する。このデータに現れる太陽活動の周期 (11 年) 以外の変動が年輪幅に見られることに注目した。

2. 和銅の松

亀岡市旭町の山の中に松尾神社と呼ばれる古社がある。かってこの神社の御旅所に「和銅の松」と呼ばれる黒松があった (図 1)。これは丹波地方最大の松で、その姿の堂々として立派なことは付近に住む氏子の人々の大きな誇りであった。この松は「南桑田郡誌」にも旭村史跡名勝地として次のように紹介されている。

> 「和銅の松、松尾神社を離るること約二丁の西部に老松二株合して一株のごとく見え、回り二丈余、高さ二十間ありて枝四方に繁茂す。和銅年間より生い立ちしと伝うるを以て和銅の松と言う」

この松の葉が茶褐色に変わり始めたのは昭和 44 年で、翌 45 年 (1970 年) には枯死してしまった。原因は松喰い虫の害である。枯死した後、直ちに伐採して取り除かれ、幹の中ほどを直角に輪切りにした三枚の板が記念として保存され、その一つは松尾神社の拝殿に置かれている (図 2)。

年輪の幅を測定して、その木の成長の歴史を調べるには、御神木あるいは墓地の松のように、過去に枝打ちなどの手入れが行われていないものが最適である。深い山の奥などの自然に生えている木は勿論そのよ

Fig. 1. The "Wado–matsu" pine before its death.

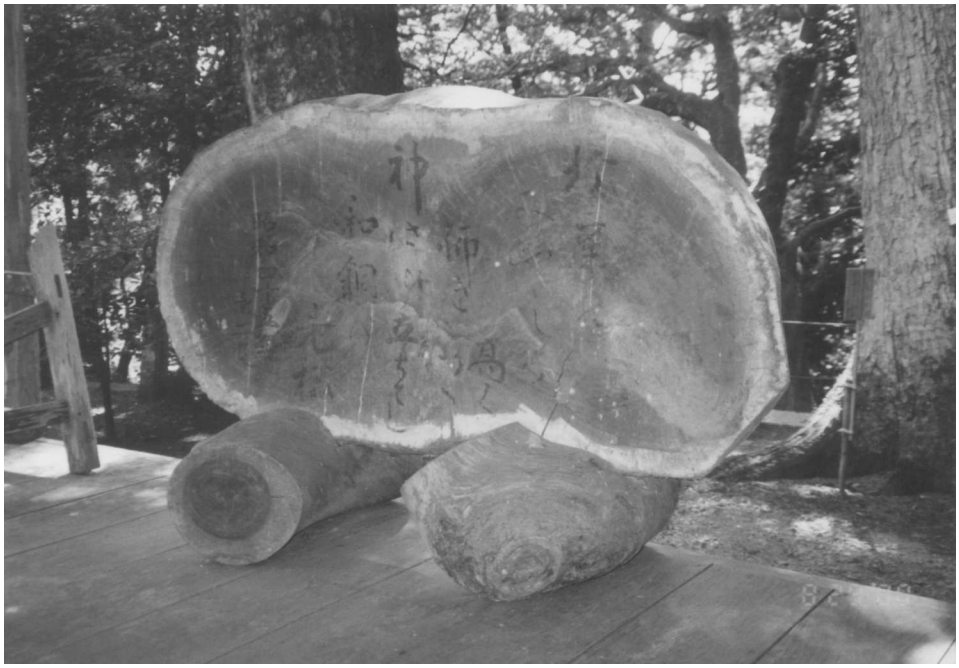

Fig. 2. The section plate preserved at the Matsuo shrine.

うな人手が加えられていないものが多いが、一方、その木の成長の過程で隣接して立っている他の木の影になる期間があると成長が阻害されるので、自然にある木がすべて測定に良い条件にあるとは言えない。その点、和銅の松のように広い水田の中に孤立して立っている（少なくとも江戸時代は）木の成長は気温、降水量や日射量などの気候要素の経年変化に正直に影響を受けるであろうから、最も適当なサンプルと言えるであろう。宮司の川勝　覺氏によれば、この松は始めから御神木として大切に育てられたわけではなく、昔のある時に通りかかった占い師がこの木に害を与えるとたたりがあると言ったことから、人々がいっさい手を入れなくなったとのことである。これは年輪研究にとってまことに幸いなことであった。

故　竹岡　林氏は根元に近い幹の直角の断面で年輪幅を測定した。年輪の中心から異なる四つの方向に沿って、一つ一つの年輪の幅を 0.1mm のスケールが附いたルーペを使って読み取った。竹岡氏によれば、この松が成長を停止したのは昭和 44 年 (1969 年) である。測定は表皮の下の幹の最外側の年輪から中心に向かって 301 番目の年輪まで行われた。これから見ると、この松は少なくとも寛文 10 年 (1670 年) より以前からここに存在していたことになる。しかし、これは江戸時代の初期であり、和銅年間からここにあったというのは伝説であろう。

竹岡氏は四つの方向で測定された年輪幅の時系列を各年毎に平均した。そして、1670 年から 1970 年までの平均幅の時系列を棒グラフ列として著書「丹波路」（学生社刊）の中で公表している。残念ながらこの本は京都府北部の丹波地方を紹介する本なので、樹木の専門家の注意を引かずに忘れられていた。この棒グラフ列から読み取った年輪幅のグラフを図 1 に示す。細線がそれで、太い線は 5 年移動平均したものであり、縦軸は任意スケール、横軸は 1670 年からの年輪の番号である。

樹木の若い時はその成長速度も速いので、年輪幅も大きいが、年月の経過とともにその幅も減ることが知られている。この松が生きた江戸時代の初期から明治までの期間は世界的な寒冷な時期で小氷期と呼ばれている。この松の成長も決して順調ではなかったと思われるが、それでも図 1 に年輪幅が年とともに指数関数的に減少する傾向が認められる。

3.　周期的な変化

図 3 に示した年輪幅の時系列を PDM 法により周期解析を行なった。図 4 は周期（横軸）に対して PDM パワー（縦軸）を描いた曲線を示す。30, 40 および 60 年の周期の存在が見えるが、太陽黒点活動サイクルに対応した周期は見あたらない。また、他の樹木の年輪にもしばしば検出される 22 年周期の変化もここでは顕著ではない（Kerr 2000,Murphy et al. 1994, 久保田、時政 1996）。

30, 40 および 60 年の周期に対応する気候的な変化は何であろうか。この PDM 法では、例えば 30 年隔てて二回の増加や減少があっても周期的なパワーとして検出される。さらにこれが三回もあれば大きいパワーの増加となる。次の章でも取り上げるように、1780 年、1807 年、1835 および 1895 年の幅の大きい減少は PDM パワーに現れた周期を充分に作り出す変化である。11 年の太陽活動サイクルではなく、もっと長い周期の変化がこの木の成長に大きく影響したことを示唆している。

4.　長い周期の変化と気温

図 3 に示した和銅の松の年輪幅の経年変化から、樹木は若い時ほど成長の度合が大きく、年とともに指数関数的に年輪幅が狭くなっていることが分かった。この様な年輪のパターンは勿論、樹木の種類によって著しく違っている。いろいろな樹木の年輪幅の経年変化を比較したり、木の成長過程における環境の変化の影響を調べるためには、図 3 の様な年輪曲線を標準化しなければならない。この標準化については、先ず、成長過程における外部からの変化の影響が殆ど入らない場合のその樹木固有の成長曲線とも言うべき年輪のパターンの傾

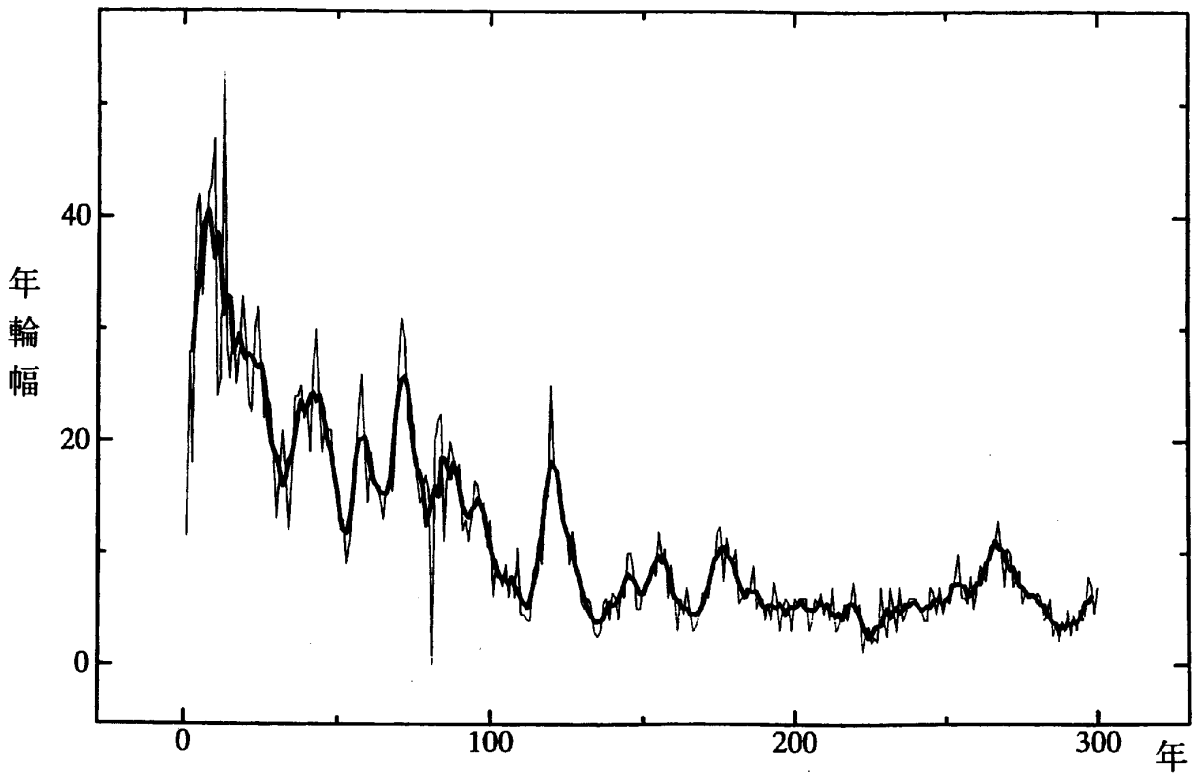

Fig. 3. The time change of tree ring width (the ordinate in arbitrary scale). The abscissa gives the number of tree ring from the origin of measurement(year). Faint curve shows original value, and solid one, 5 year moving averaged curve.

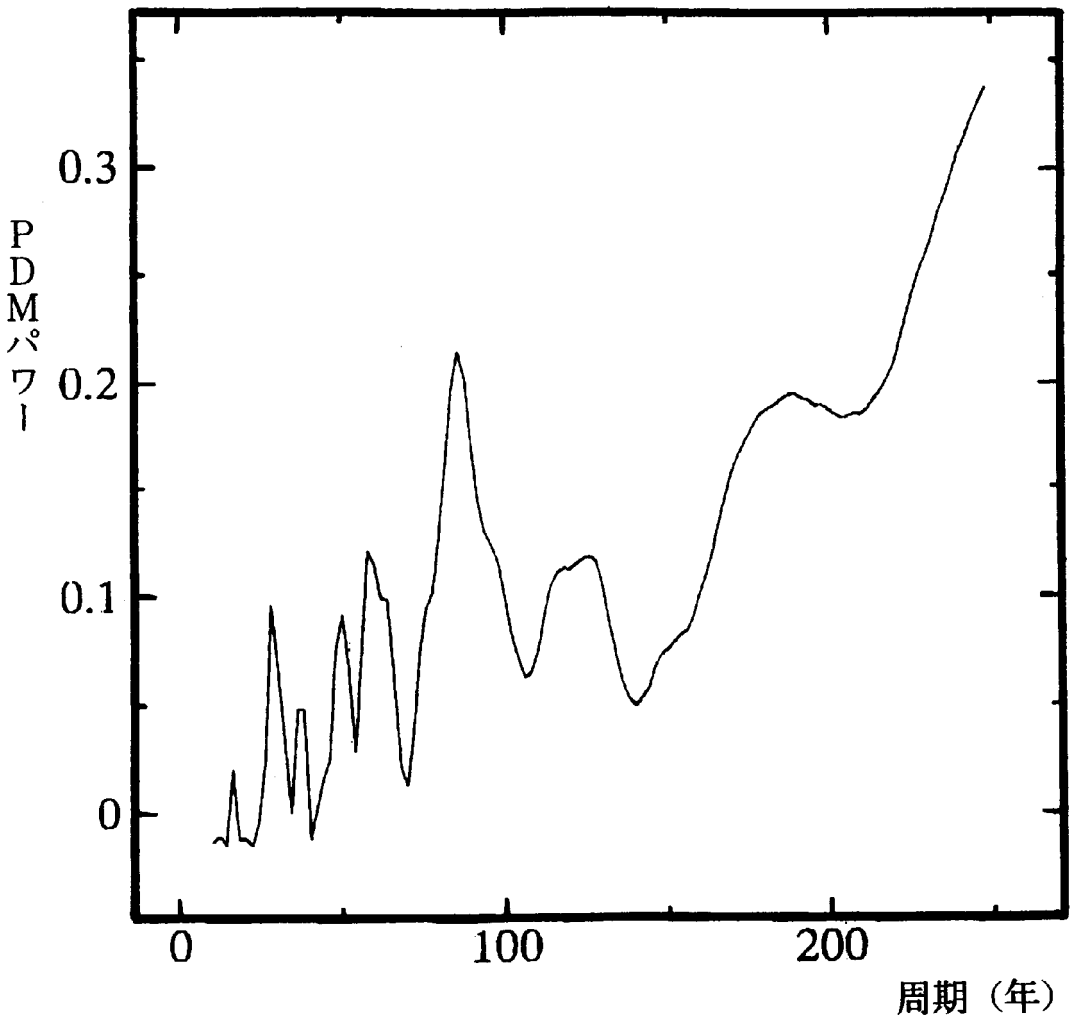

Fig. 4. The PDM power of the time series of tree ring width (5 year moving averaged). Abscissa gives the period(in year).

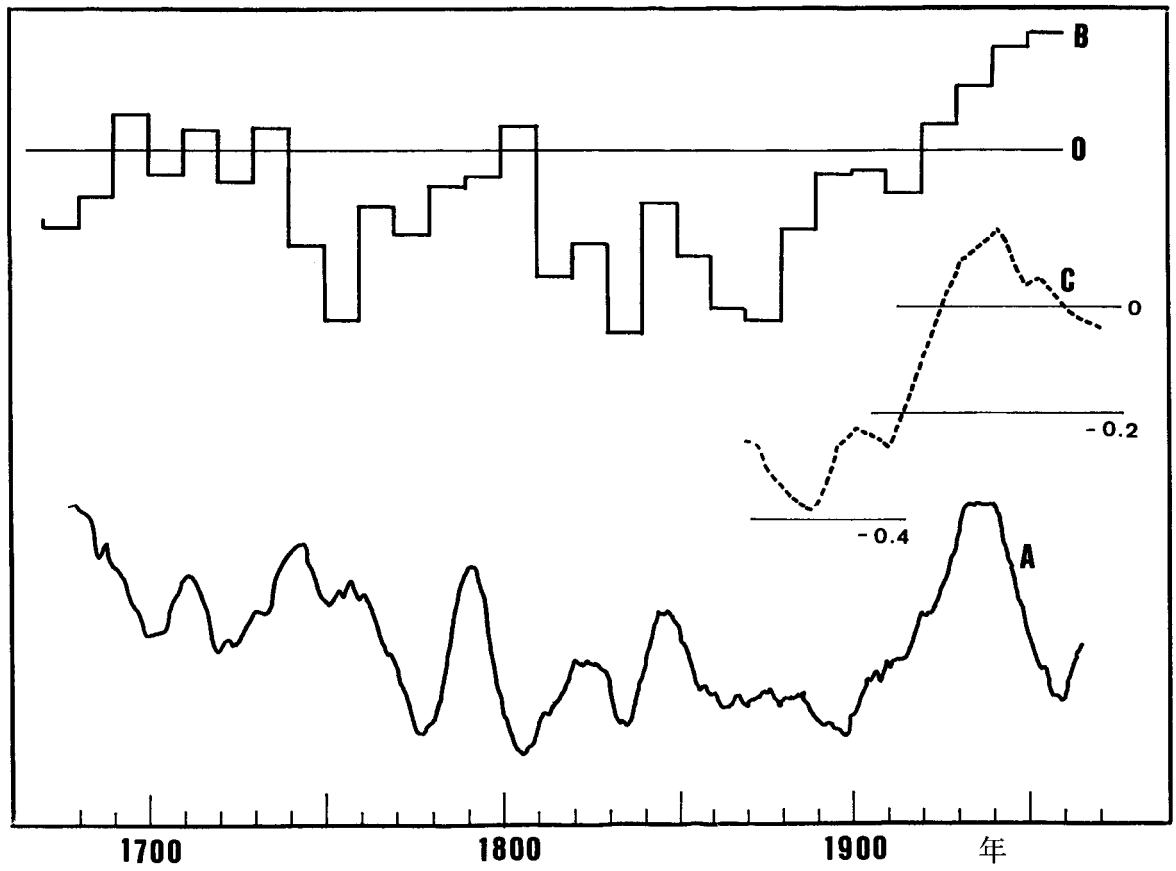

Fig. 5. The 11 year moving averaged tree ring width(curve A), the δ^{18}O index in the ice core at the site of the southern pole(curve B), and the sea surface mean temperature in the northern hemisphere(curve C), plotted against the time(year). The horizontal line in curve B gives the mean for past 9000 years.

向曲線を決める。そして、それぞれの年輪幅をその傾向曲線で割った値が標準化した時系列である。

この和銅の松が成長した AD1700 年頃から現代までの期間は、後述のように世界的な寒冷化とそれに続く 1900 年以降の急激な温暖化の時代であって、樹木の成長、特にその年輪幅には著しい影響があったものと考えられる。従って、図 3 に示した曲線の時系列から最小自乗法によってパターンの傾向曲線を作るのは無意味であると思われる。それ故、比較的温暖で木の生育が順調であったと思われる 1700, 1800 年頃および 1940 年頃の年輪幅を基準 $(=1)$ として、傾向曲線を $A\exp(-\alpha t)+B$の形に決めた。A, Bおよびαは係数、t は年単位の時間である。図 5 の曲線 A は年輪幅の時系列に 11 年移動平均を行い、傾向曲線で割って基準化したものである。この基準化した年輪曲線を気温の変化と比較する。

近代的な気象観測は 19 世紀の中頃から始まったので、われわれが入手可能な気温の信頼できるデータは僅々150 年間程度であり、和銅の松の生存期間に較べてあまりにも短い。従って、この年輪幅と比較すべき遠い過去の気温は、他のいろいろな資料や文献から推定したものと、気温変化に敏感な酸素同位元素の存在比のデータから推算されたものに頼らざるを得ない。

前島郁雄と田上善夫 (1983) は残されている弘前藩庁の毎日の天候記録を使って、1661 年から 1867 年ま

での気候変動を調べている。彼らの結果によると、

1610–1650 年　非常に寒冷
1650–1690 年　温暖
1690–1720 年　非常に寒冷
1720–1740 年　寒冷
1740–1780 年　温暖
1780–1820 年　寒冷
1820–1850 年　非常に寒冷
1850–1880 年　寒冷

と判定されている。このように和銅の松が主として成長した江戸時代は比較的短い期間内に、温暖、寒冷そして非常に寒冷と次々に移り変わった極めて気候の不安定な期間であったと推定される。

このような、どちらかと言えば寒冷化が優勢で、短い期間内に移り変わった気候は単に日本という地域だけではなく、地球的規模の気象メカニズムの中で作り出された現象である。これは最近公表された日本の南極観測隊による「ふじドーム」(標高 3810m) における深さ 2500m に達するボーリングで採取されたアイスコアの中の酸素 18 と酸素 16 の同位体の存在比の経年変化から明かである (藤井 1998)。

一般に重い酸素 18(^{18}O) を含む水は天然水や海水の中に約 0.2 その割合は蒸発や凝縮など水の状態の変化するときに変わる。海から蒸発するとき、^{18}O を含む水の方が^{16}O を含む水よりも蒸発しにくい。また、水蒸気の中で^{18}O を含む水は^{16}O を含む水よりも凝結して雪になり易い。寒い時には、蒸発した海から離れるほど^{18}O を含む雪は早く落ちてしまうので、内陸部では^{16}O を含む雪がより多く降り積もることになる。従って、古い過去からの雪が降り積もってできた氷床のボーリングで採取されたアイスコアには、気温の経年変化に応じて年代的な酸素の同位体の比が記録されていることになる。酸素同位体の比 ^{18}O /^{16}O の海水における値からの偏差δ^{18}O は気温の関数であることが分かっているので、いろいろな深さにおけるアイスコアの氷のδ^{18}O の値からそれぞれの年の気温を推定することができる。

この様にして求められた過去 35 万年間の気温変動のうちの 1670 年から 1960 年までの部分を図 5 の折れ線 B に示している。これは 10 年毎の平均値の変化として表されている。横線は過去 9000 年間の平均値であり、それより上は温暖、下は寒冷とされる。この折れ線 B を前島、田上両氏の推定結果と比較すると、極めて良く一致していることが分かり、この推定した期間は世界的な寒冷化の時期であったと言える。

さらに、酸素同位体の比の変化を 1880 年–1970 年の期間の北半球のグローバルな地平面気温の変化 (図 5 の C 曲線) と比較する。これは近代的な気象観測が世界的に始まった 1860 年以降の最も信用できる気温のデータであり、Hanssen and Lebedef(1987) や Jones et al.(1986) がアメリカ大気海洋局 (NOAA) やイギリス気象庁の刊行物の中のデータをもとにまとめたものである。両方の曲線は非常に良く似通っており、酸素同位体の存在比が気温の変化を忠実に反映していることを示している。

図 5 の曲線 A で表した和銅の松の年輪曲線と気温の変化 (折れ線 B) を比較しよう。曲線 A は図 1 に示したデータを 11 年移動平均した値を標準化しているので、この曲線に見られる大きい変化はすべて 11 年以上の期間をもつ幅の減少である。年輪の幅の曲線が著しい極小を示した時期は、1700, 1720, 1778, 1805, 1834, 1898 および 1960 年を中心とする短い期間である。そして、この曲線で特に注目される年輪幅の減小は 1778–1840 年の期間である。

これらの幅の減小期間は前島、田上両氏が指摘した過去の寒冷化あるいは極めて寒冷の時期と一致している。また、ドームふじの氷床コアの酸素同位体の比から求めた世界的な気温の変化とも良く一致しており、この「和銅の松」が気候の変化に忠実に影響されながら成長したことを示唆している。即ち、木の年輪幅を決める主な因子は気温であろう。

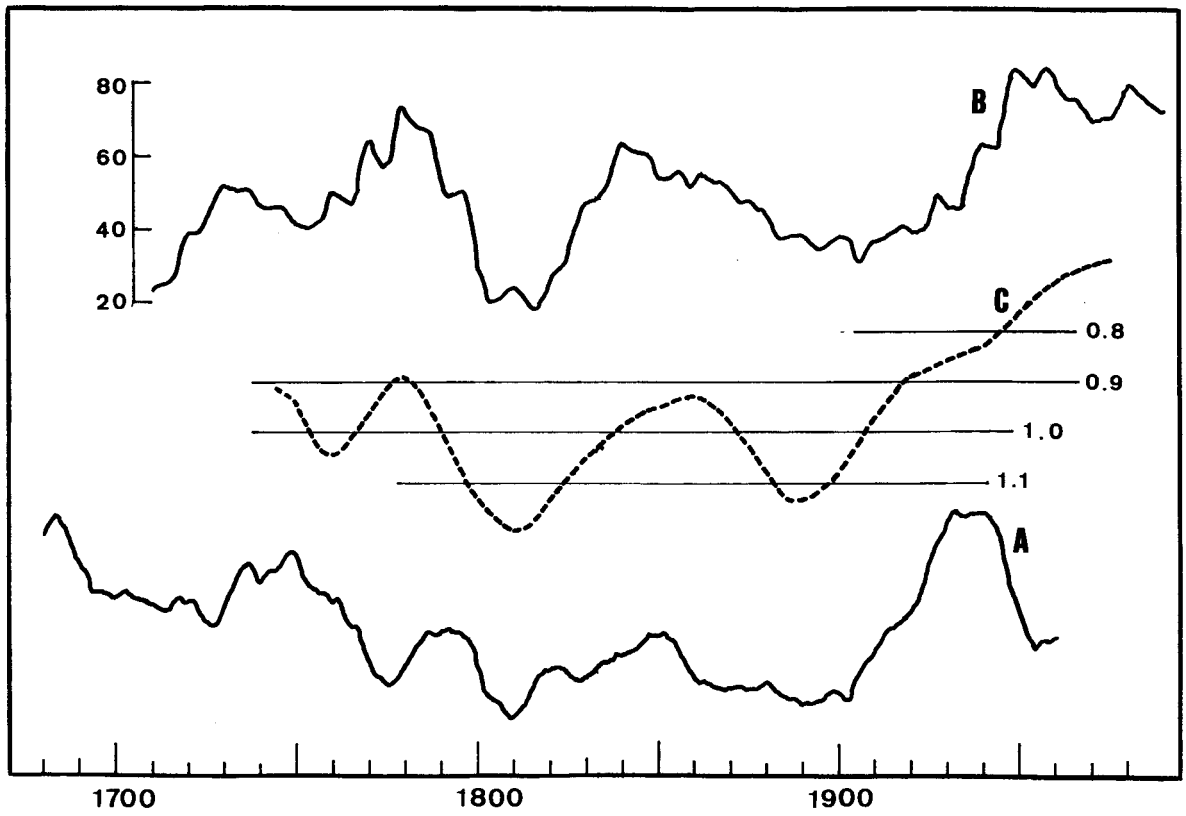

Fig. 6. The time change of tree ring width(curve A, 22 year moving averaged), the sunspot number(curve B, 22 year moving averaged), and the density of radio isotope ^{10} Be(curve C, multiply 10000/gram).

5. 長い周期の変動と太陽の黒点活動

最後に、年輪幅による松の成長率の経年変化を太陽黒点活動と比較する。

図 3 に示された年輪幅の経年変化の曲線を 22 年移動平均を行ったのが図 6 の曲線 A である。幅が 22 年以下の小さい変動は消えて、1775 年、1810 年、1890 年を中心とした年輪幅の減少と 1900 年から 1945 年までの急激な増加、および 1960 年頃の減少が特徴的である。

次に、同じ期間の年平均黒点相対数の時系列にも 22 年移動平均を行って、図 6 の曲線 B に示す。1810 年と 1900 年を中心とした黒点相対数の下降、1900 年から 1950 年までの急激な上昇が明かである。

図 6 の曲線 C はグリーンランドの氷床で掘削されたアイスコアの中で測定されたベリリウム 10(^{10} Be) の存在濃度の経年変化である。^{10} Be (半減期 150 万年) は銀河宇宙線が地球高層大気に貫入する際に、窒素や酸素原子と衝突して作られる宇宙線起源の放射性同位元素である。太陽面に黒点が数多く現れると、黒点が持つ磁場は遠く惑星間空間まで太陽風によって運び出され、地球はその磁場に頻繁に包まれることになる。ところが、黒点の磁場に包まれると外部から地球の高層大気に侵入する銀河宇宙線の数は減ることになり、宇宙線によって作られる^{10} Be の数は減少する。反対に、黒点が少いと、銀河宇宙線はすみやかに地球高層大気の中に貫入し、^{10} Be が数多く作られるであろう。即ち、アイスコアの中に蓄積されている過去の^{10} Be の濃度変化は太陽面の黒点の数によって制御された結果と考えられる。^{10} Be 濃度の経年変化 (曲線 C) は曲線 B

と較べて変化は逆相関であり、^{10} Be 濃度が黒点数によって制御されていることは確かである。

曲線 A と B および C を比較すると、年輪幅の著しい減少は 1810 年と 1890 年を中心とした期間で、黒点数の減少および^{10} Be 濃度の増大と一致している。また、1900 年以降の曲線 A と B の増加と曲線 C の減少が一致している。この点から見ると、黒点数と年輪幅は良い相関があるように思えるが、1775 年の年輪幅の減少は黒点数の増大や^{10} Be 濃度の減少と時期的に一致している。図 5 の曲線 A や B から見ると、年輪幅の減少と気温の低下が時期的に一致しているので、この場合、黒点数の増加と気温の低下が同時に起こったことになり、この点については今後の検討が必要であろう。

6. 考察と結論

図 4 に示した「和銅の松」の年輪幅の経年変化の PDM パワーは、この松の成長に 30 年、40 年および 60 年の周期が存在することを表している。これらは 11 年を周期とする太陽黒点活動とどのような関係にあるのか良く分からないが、図 5 および図 6 の曲線 A の変化から見て、11 年よりももっと長い周期が黒点活動にあって気温の変化に影響を与えているのかも知れない。

図 5 の曲線 A と B の比較から、この木の成長に最も大きい影響を与える気候的な要素は気温であることが示唆される。また、図 6 の曲線 A と B の比較から、1650 年から 1970 年の期間のうち、1780 年頃を除いて、年輪幅と黒点相対数（あるいは^{10} Be 濃度）も良い相関を示すことが分かる。

相関が逆になっている期間については、黒点相対数や^{10} Be 濃度のデータの検討が必要であろう。1780 年頃は相対数が高いにも拘らず天明大飢饉が起こる寒冷化があったことは、黒点に代表される太陽活動以外に気温を低下させる原因があったのかも知れない。例えば、浅間山の噴火による空気中のエアロゾルの増加が長い期間にわたって地上に到着する太陽の光の流入を減少させたことも一つの原因と考えられる。

《参考文献》

Currie, R.G., 1991, Annales de Geophysicae 9, 565-570.

Douglass, A.E., 1928, Publication 289, Carnegie Institution of Washington D.C. Vol.2,125

藤井理行 1998, 三洋化成ニュース　第 388-397 号

Hanssen, J. and S. Lebedef, 1987, J. Geophys. Res. 92, 13345.

Harris, J.A., 1926, Monthly Weather Review 54, 13-14

Huntington, E. and S.S. Visher 1922, Climate Changes, Yale Univ. Press, New Heaven.

Jones, P.D., S.C.B. Raper, R.S. Bradley, H.F. Diaz, P.M. Kelly and T.M. Wigley 1986, J. Clim. Appl. Meteorel. 25,161.

Kerr, R.A. 2000, Science 288, 1984-1986.

久保田　諄、時政典孝 1996, 経大論集　47 巻 1 号　17.

LaMarche, V., and H.C. Fritts 1972, Tree Ring Bulletin 32, 19-33.

前島郁雄、田上善夫, 1983, 気象研究ノート, 147, 81-89.

Murphy, J.O., H. Sampson, T.T. Veblen, and R. Villalba 1994, Proc. Austral. Astron. Soc. 11, 157.

竹岡　林 1976, 丹波路（学生社）p.61.