

太陽長期変動研究の観点から見た
アフリカ・ビクトリア湖水面位とナイル川水位変動の
歴史的記録の考察

Water Level Time Variations of the Lake Victoria and the River Nile
In the Framework of the Long-term Solar Magnetic and Irradiance Changes

吉村宏和
元東京大学大学院理学系研究科

要旨

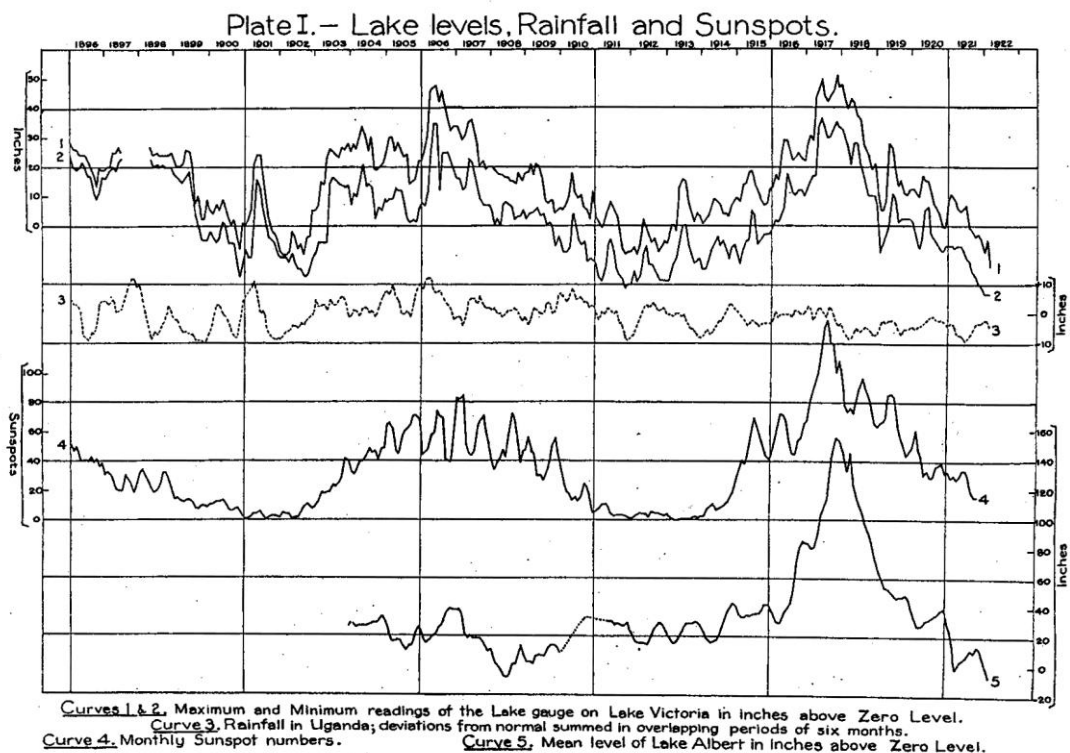
1923 年に C. E. P. Brooks の歴史的論文が発表されて以来、アフリカ・ビクトリア湖水面位の変動と太陽黒点活動の周期変動との問題は、太陽—地球気候関係の存在に懐疑的な人たちにも、存在があると想定して実証しようとする人たちにも、典型的な太陽—地球気候関係の問題の例として君臨し続けてきている。1992 年から宇宙空間からの衛星による湖水面の変化のデータが継続的に得られるようになると、1896 年から 1923 年までの非常に良い太陽黒点数と湖水面位の変動の間の正の相関が崩れて、むしろ逆相関になっていると言う 1923 年後の主張が、再度崩れていることが明確になってきた。すなわち太陽黒点数と湖水面位の変動の正の相関は 1968 年-2011 年の 4 太陽周期には戻っている。ここでは太陽黒点数と湖水面位の変動の間の正の相関が明確でない時期は太陽 55 周年大周期の第 V 大周期である太陽周期 16 から太陽周期 20 にかけていることを発見したことを報告する。また正の相関が明確な時期である太陽 55 周年大周期の第 IV 大周期と第 VI 大周期には太陽内部の太陽黒点磁気周期をつくりだす太陽周期磁気ダイナモパルスと太陽輻射変動をもたらす太陽周期熱パルスの 2 種類のパルスの位相関係が類似していて、第 V 大周期の 2 種類のパルスの位相関係と異なることを論ずる。さらにビクトリア湖を一つの源流とするナイル川の水位の長期データの中に太陽の長期変動と類似する周期が存在することの意味を考察する。

Abstract

Ever since Brooks published his monumental paper in 1923 on the extraordinarily clear positive correlation between time profiles of the sunspot number and of the water levels of the Lake Victoria, a source of the River Nile, the positive correlation has been a subject of fundamental importance for the science of the Sun-Climate connection. Once thought to be false or coincidental after 1923, when the correlation became unclear or even negative, the clear positive correlation reappeared after about 1968. We point out here that the time interval of the unclear positive correlation corresponds to the 55-year grand cycle V from solar cycle 16 to 20.

1. なぜ、今、 アフリカ・ビクトリア湖とナイル川の水位なのか

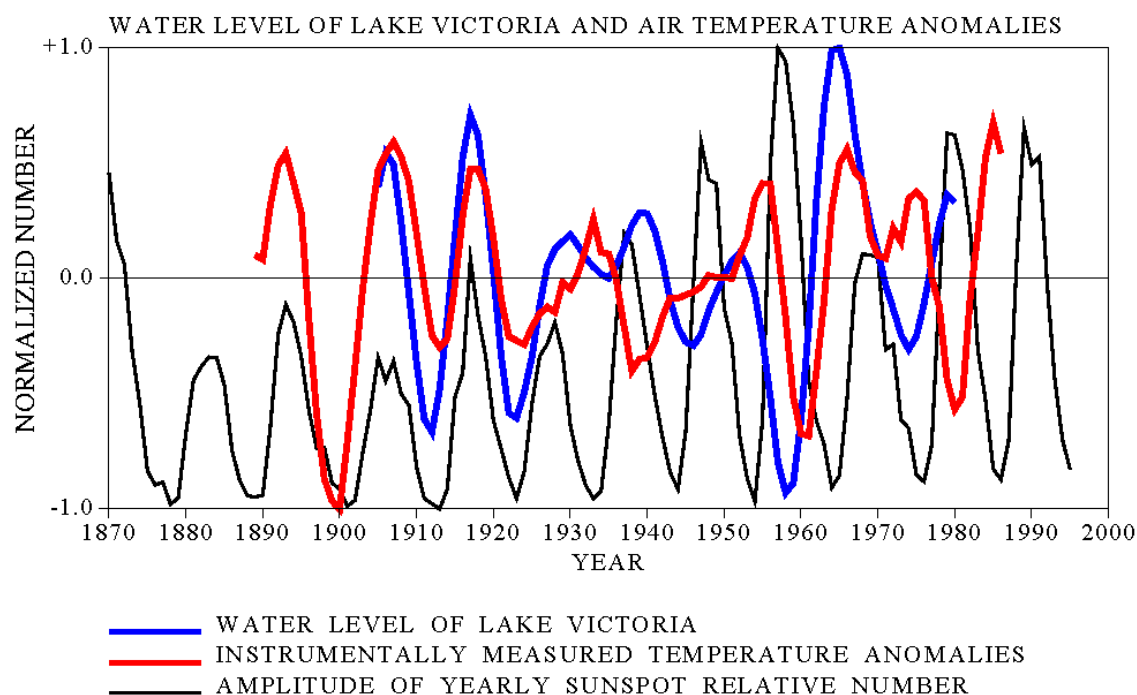
ビクトリア湖水位の変動のデータは大英帝国のアフリカ植民地政策が推し進められていた 19 世紀に湖の方々に杭を打ち水位測定することによって得られ始めた。ウガンダ鉄道をビクトリア湖周辺に敷設する際に必要な情報としての重要性もあった。またナイル川の源流の一つとしての重要性もあった。水位のデータを整約するなかで太陽の黒点数という思いもかけない現象と明確な正の相関があることが Brooks (1923) により発見され公表された。



第 1 図 ビクトリア湖の水位の最大値と最小値（曲線 1&2）、ウガンダの降雨量（曲線 3）、黒点相対数（曲線 4）、アルバート湖の平均水位（曲線 5）の時間変化。Brooks, C. E. P. (Charles Ernest Pelham Brooks) “Variations in the levels of the central African lakes Victoria and Albert”, Geophysical Memoirs, London 2, 20, 337-344, 1923 から。

第 1 図で上の 2 つの曲線はビクトリア湖の水位の最高値と最低値を表わしている。3 番目の曲線はウガンダの降雨量であり、4 番目の曲線が太陽黒点数の増減を表している。5 番目の曲線はビクトリア湖につながるアルバート湖の水位の変化を表わしている。ビクトリア湖とアルバート湖の水位とも太陽黒点 11 年周期の 2 周期にわたって太陽黒点周期曲線と同じような時間変化曲線を示している。この稿では 2 つの曲線の正の相関を Brooks 相関と呼ぶ。

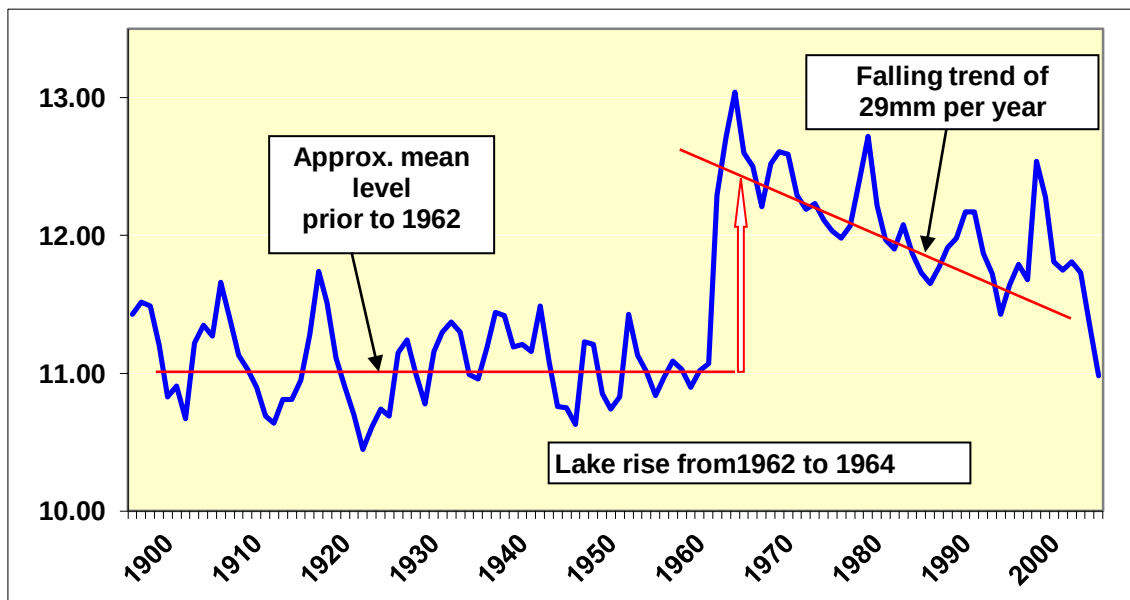
Brooks 相関が公表された 1923 年の後、ビクトリア湖の水位は期待されたように太陽黒点 11 年周期曲線と同じようには変化はしなかった。そのため Brooks 相関の正の相関は見かけだけの偶然のものであり、むしろ逆相関を示しているとされていた。このため、ビクトリア湖の水位の変化と太陽黒点数の Brooks 相関は、2 つの物理現象を相関曲線だけで論ずることの危険性の代表例とされた。しかし、その後の研究により Brooks 相関が再び帰って来ていることを明らかになっている。



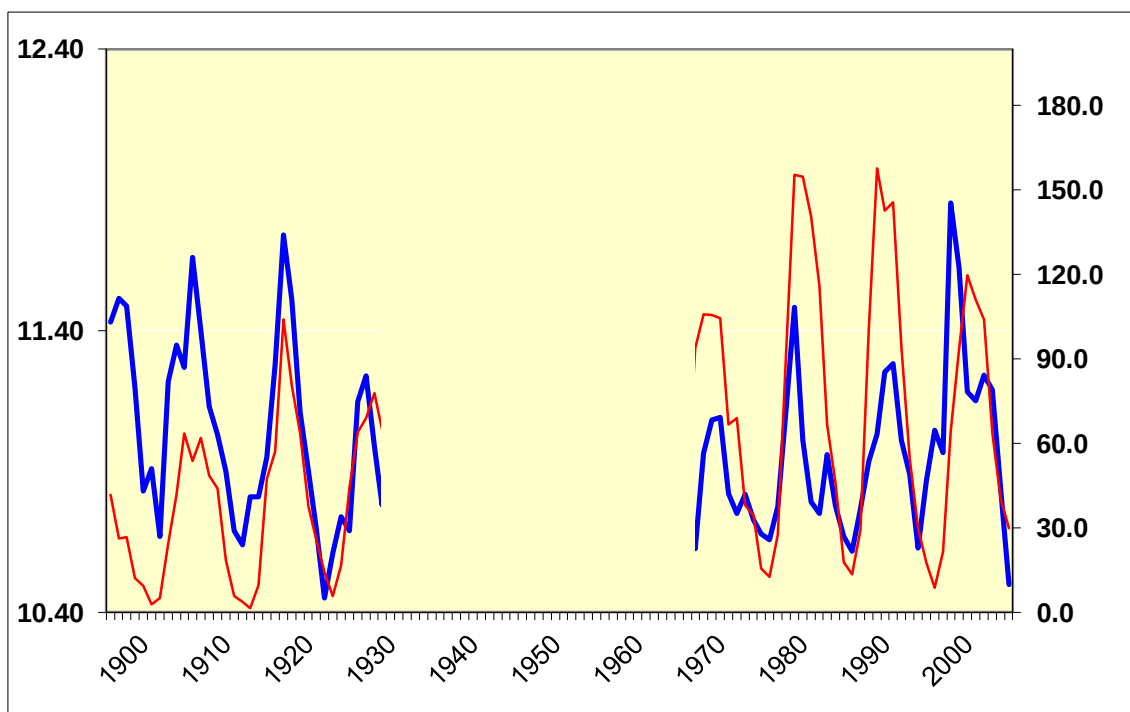
第 2 図 ビクトリア湖の水位（青色曲線）、黒点相対数（黒色曲線）、全球気温偏差（赤色曲線）の時間変化。Yoshimura, Hirokazu “Decadal Components of the Solar Total Irradiance and Terrestrial Climatic Variations as Seen in the Land Air Temperature Anomaly and Lake Victoria Water Level Changes”, Proceedings of the Japan Academy, Series B, Vol. 73 No. 7 pp.120-125, 1997 の原画。© H. Yoshimura

第2図に1896年から1989年までのビクトリア湖の水位のデータを使ってビクトリア湖の水位、黒点相対数、全球気温偏差の時間変化を比較した図を示す。太陽周期14(1902年2月-1913年8月) から太陽周期15(1913年8月-1923年8月)にかけてBrooksの相関は明確である。太陽周期16(1923年8月-1933年9月) から太陽周期20(1964年10月-1976年6月)にかけて時間変化の曲線を平滑化すると、太陽周期16にもBrooks相関が見られ、太陽周期20には戻っている。太陽周期20には全球気温偏差も同様な変化をしている。太陽周期21(1976年6月-1986年9月)にはBrooksの相関はあるものの水位と全球気温偏差の時間変化は逆になっている。

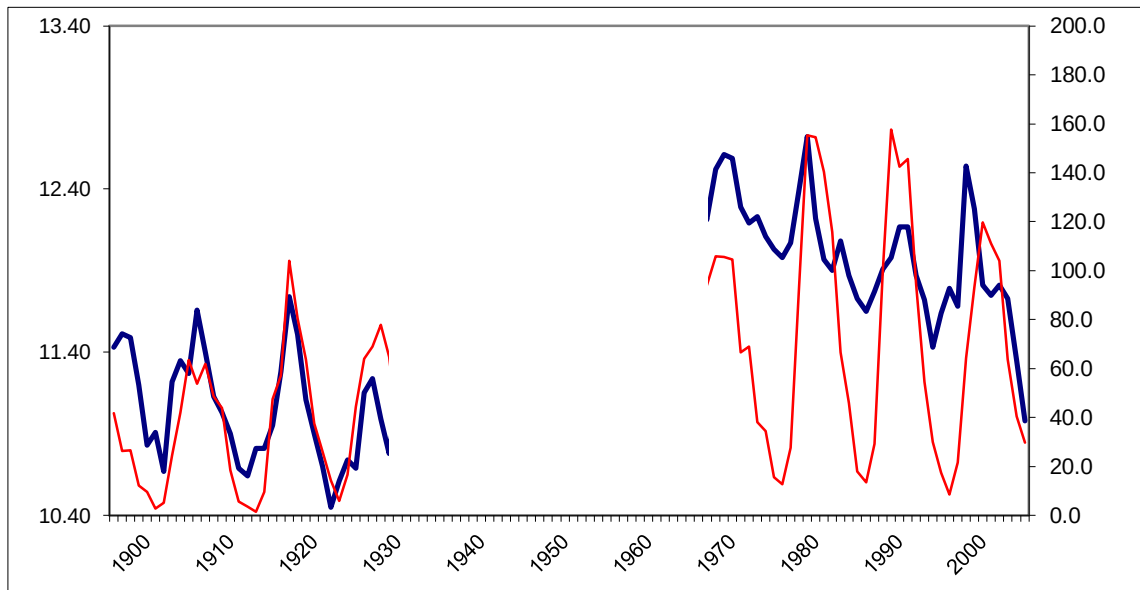
1990年代初からダム建設のためにビクトリア湖の水位を調査していた P. J. Mason は Brooks相関が1968年頃から回帰していることに気づき1993年に発表している。第3図、第4図、第5図にMasonの図を示す。Mason は全球気温偏差の時間変化を考慮に入れてはいない。



第3図 ビクトリア湖の水位の年変化（青色曲線）と水位の長期変動傾向（赤色直線）。1960年代に水位が大きく上昇、その後、長期にわたって減少している。© P. J. Mason 許可済



第4図 ビクトリア湖の水位（青色曲線）、黒点相対数（赤色曲線）の時間変化。水位は1960年代からの長期変動を差し引いている。© P. J. Mason 許可済



第5図 ビクトリア湖の水位（青色曲線）、黒点相対数（赤色曲線）の時間変化。
1960年代からの水位の長期変動を差し引かないもの。© P. J. Mason 許可済

第3図、第4図、第5図とも Mason, P. J. “Lake Victoria: a predictably fluctuating resource”, Hydropower & Dams Issue Three, 2006 に発表されたものをもとにしている。

これらの図で示されたビクトリア湖の水位の変遷の特徴は太陽周期 14、15 まで明らかな Brooks 相関が太陽周期 16 から消えかかり、太陽周期 20 から戻る兆候を見せ、太陽周期 21 から太陽周期 23 までには戻っていることである。現在、太陽周期 24 が始まっているが、同じ傾向を見せている。また、第3図で明らかなことは、1960年代にビクトリア湖の水位が大きく上昇し、その後、長期にわたって減少していることである。これは中央アフリカならびに東アフリカー帯に共通した現象である。Mason は 1960年代のビクトリア湖の水位の上昇と、その後の長期にわたる減少を差し引いて、第4図を示している。第5図は差し引かないと Brooks 相関が見えにくいことを示している。第4図は、1923年後の Brooks 相関は逆であり偶然の産物であると結論づける方が時期尚早であったことを示している。

ここに至って Brooks 相関は太陽-地球気候関係の研究にとり重要な現象かどうかを再度検証する必要が高まっている。すなわち Brooks 相関は太陽変動と地球気候の変動の実際の相関を示すのか、あるいは偶然の産物であるかを再び考えなおさなければならないと考えられる。また太陽周期 16 から太陽周期 20 までの間隙は何を意味するのか考えなければならない。ビクトリア湖はナイル川の源泉の一つでもあり、ビクトリア湖の水位とナイル川の水位の変動が地球の気候の変動と太陽の変動の関連を示すものであるならば、湖水位と河川水位の変動と太陽の変動との関連の解明は人類の歴史を解明することと深い関係がある。

2. アフリカ・ビクトリア湖の特殊性



第 6 図 ビクトリア湖のアフリカにおける位置。赤道直下にあり、大地溝帯にあってナイル川の源流の一つである。 第 7 図のアフリカ大陸の河川の分布も表している。

© P. J. Mason 許可済

第 6 図に示すようにビクトリア湖は世界的に見ても、あるいはアフリカ大陸の中で見ても特殊な湖である。赤道直下にありナイル川の一つの水源となっている。人類発祥の地の地でもあり、アフリカ中央部の多くの国の淡水を供給する湖でもある。砂漠と熱帯密林の境界にあり、大地溝帯、グレート・リフト・バレーの中央にあるため、周囲を山脈に囲まれた盆地となっている。この盆地は広い地域の雨量を蓄積するためビクトリア湖の水位は自然が提供する平均化機構を反映していると考えられる。この水位の変動は、世界の砂漠化と関連している可能性、地球長期温暖化と関連している可能性、太陽長期変動と関連している可能性を秘めている。周囲には地球温暖化の象徴にもなったキリマンジャロ山の氷帽が東にあり、西には西リフトバレー、ルウェンゾリ山地のアレキサンドラ峯とマルガリータ峯からなるスタンレー山がある。アフリカ第 1 位の高峰キリマンジャロ山、第 2 位の高峰ケニア山、第 3 位の高峰スタンレー山に囲まれていることになる。

3. アフリカ・ビクトリア湖の人為的要素の導入

ビクトリア湖の水の出口は北のジンジャ (Jinja - Uganda) の一カ所にある。1954 年まではここに自然が創った堰がありリポン滝 (Ripon Falls) を創っていた。ビクトリア湖の水位がこの堰より低いときは、水はナイル川に流れださなかった。ところが 1954 年から稼働したオーウェンス滝ダム (Owens Falls Dam) がリポン滝 (Ripon Falls) を取り除いてつくられ、ナルバーレ水力発電所 (Nalubaale Power Station) がつくられるようになると、ビクトリア湖の水位は、この人工物によって自然を研究する上で正確な指標となり得ないと考えられた時期もあった。しかし、1954 年稼働のオーウェンス滝ダムのナルバーレ水力発電所の場合、流して良い水量はエジプト政府とウガンダを代表する英国政府の間の協定により、ビクトリア湖の水位によって決まる関係式に基づいて決められていたので、自然のビクトリア湖の水位の変動には影響しないとされた。第 3 図に示された 1960 年台の大降雨による水位の大きな変化は第 2 の水力発電所の建設を推進することになり、オーウェンス滝ダムの他にダムが建設され、新しい水力発電所がつけられた。第 3 図―第 5 図を描いた P. J. Mason は 1990 年台はじめから、この新しい水力発電所のためにビクトリア湖の水位を調査していた。2000 年から試験稼働し 2003 年に正式な式典があつて稼働しているキイラ水力発電所 (Kiira Power Station) はエジプト政府とウガンダ政府に間の協定を守っていないとされる。ビクトリア湖の水位計 (ゲージ) による測定データも一般公開されなくなった。

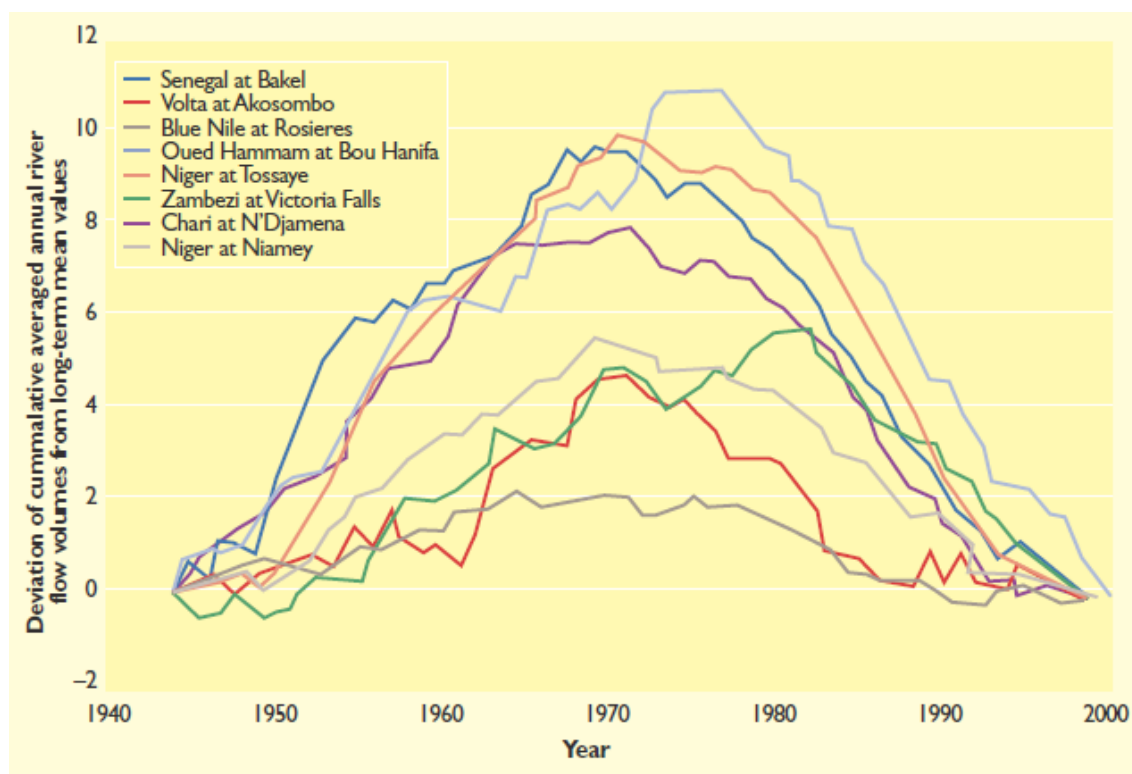
4. アフリカ・ビクトリア湖の宇宙からの計測

しかしながらアフリカ・ビクトリア湖だけではなく世界の淡水資源の確保と食料の確保と言う面からも世界のすべての淡水面および海水面のデータは重要で、1992 年から複数の小型観測衛星によって宇宙から計測され一般公開されている。トペックス/ポセイドン (TOPEX/POSEIDON)、ジェイソン 1 (Jason-1)、ジェイソン 2 (Jason-2/OSTM) などが知られている。ビクトリア湖の水位計による測定データと宇宙からの計測データの比較を通して宇宙からの計測データの較正もされ、正確なビクトリア湖の水位の観測は続いている。

5. アフリカ・ビクトリア湖の水位は何で決まるか

ビクトリア湖の水位はどのような仕組みで決まるかという問題は自然科学と工学の問題としてだけではなくアフリカの広大な地域の食料および産業ならびに疫病の発生に深く関係しているために多くの研究者によって調べられている。現在はビクトリア湖に集める河川からの水量と降雨量と湖水面からの蒸発のバランスで水位は決定すると見られている。ダムと水力発電所の影響よりもビクトリア湖に流れ入る水と蒸発量を考慮に入れて太陽変動とビクトリア湖の水位変動との関連の有無を考える必要があることになる。

6. アフリカの降雨量と河川の水量

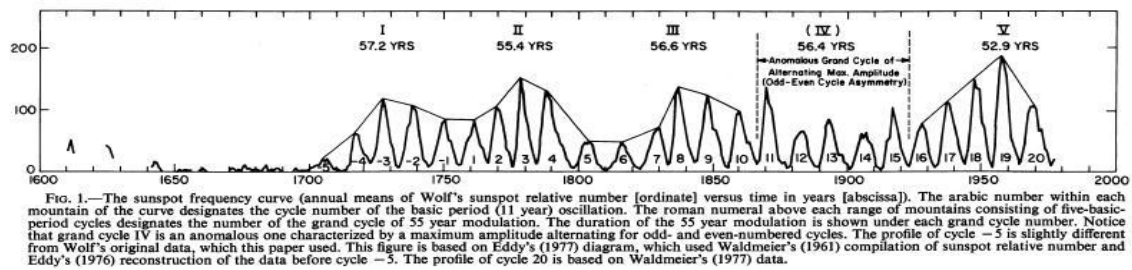


第7図 アフリカの河川の水量の長期変動。© P. J. Mason 許可済

第7図にアフリカ大陸の各地の河川の流量の変化を示す。P. J. Mason “Climate variability in civil infrastructure planning” Proceedings of ICE, Civil Engineering 163, May 2010, pp. 74-80 による。この図はFrossard, E., Garros-Berthet, H., and Le Clerc, S. “Evolution des régimes hydrologiques avec le climat: incidences sur les aménagements hydrauliques” in Proceedings of the 22nd International Congress on Large Dams, 18-23 June 2006, Barcelona, Spain, International Commission on Large Dams, Paris, France, pp. 521-542 の第5図をもとにしている。この図に描かれている河川は第6図にあるようにアフリカ大陸全域を網羅している。セネガル川、ボルタ川、青ナイル川、ウエ・ハマン川、ザンベジ川、チャリ川、ニジェール川などである。これらの川の流量をそれぞれの川の流量の1945年から2000年までの平均流量を1とした数の対数で表現している。この図で表現されたアフリカ大陸の流量はアフリカ全域にわたって降水量が55年の間に増減していることを明確に示している。湖と違って川の水量の変化は蒸発量と降雨量との差よりも降雨量の変化そのものを表していると考えられる。問題はビクトリア湖の水位という10年規模の変動が50年規模の変動に重なっていることである。また、それが何を意味しているかである。

7. 太陽長期変動との関連

第 8 図と第 9 図に非線形ダイナモ理論によって発見した解析法による太陽黒点相対数の時間変化をどのように見るかと言う問題の結果を示す。黒点相対数そのものにはなんらの変更も加えていない。線形解析と違って黒点相対数の変化を太陽周期の磁場振動とみなし、その非線形振動の局所振幅とも言うべき各周期の極大期の黒点相対数と周期の長さを図にして周期の分類をしたのが第 9 図である。振幅が上昇する時に周期は短くなり振幅が下降するときに周期は長くなることを示している。



第 8 図 太陽黒点数の推移。横軸は西暦年。縦軸はウォルフ黒点相対数 (国際黒点相対数)。
Yoshimura, Hirokazu “The Solar-Cycle Period-Amplitude Relation as Evidence of Hysteresis of the Solar-Cycle Nonlinear Magnetic Oscillation and the Long-Term (55-Year) Cyclic Modulation”, Astrophysical Journal Vol. 227, pp. 1047-1058, 1979 より。© H. Yoshimura

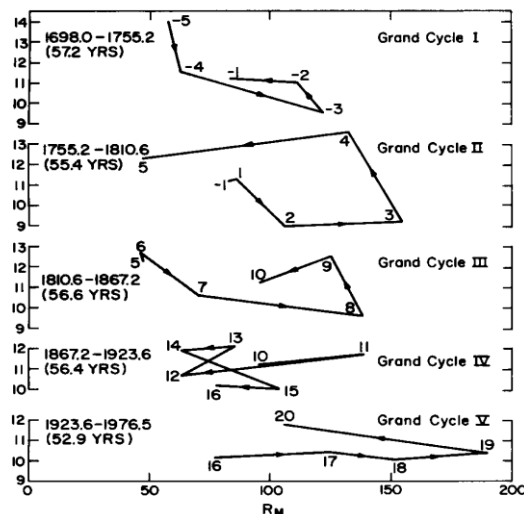


FIG. 4.—Similar to Fig. 3 but each loop of grand cycle is separated out from others. Abscissa is R_M and ordinate is period in years. Grand cycle IV should be regarded as anomalous.

第 9 図 太陽周期の振幅 (極大黒点数) と周期の長さの関係。Yoshimura, Hirokazu “The Solar-Cycle Period-Amplitude Relation as Evidence of Hysteresis of the Solar-Cycle Nonlinear Magnetic Oscillation and the Long-Term (55-Year) Cyclic Modulation” Astrophysical Journal Vol. 227, pp. 1047-1058, 1979 より。

© H. Yoshimura

このようにして太陽周期の 11 年周期は 5 周期を単位として変動していることを発見した。それによって太陽周期を第 I 大周期(太陽周期-5 から太陽周期-1 まで)、第 II 大周期(太陽周期 1 から太陽周期 5 まで)、第 III 大周期(太陽周期 6 から太陽周期 10 まで)、第 IV 大周期(太陽周期 11 から太陽周期 15 まで)、第 V 大周期(太陽周期 16 から太陽周期 20 まで)に分類した。これを図示したのが第 8 図である。現在の太陽周期 24 は第 VI 大周期の 4 番目にあたる。第 IV 大周期(太陽周期 11 から太陽周期 15 まで)は他の大周期とちがって太陽周期ごとに振幅(極大黒点数)が大小を交互に繰り返していることを特徴としている。第 VI 大周期(太陽周期 21 から太陽周期 25 まで)は第 IV 大周期と似た様相を示している。

この周期の非線形振動の局所振幅とも言うべき極大黒点数が大小を繰り返す現象は当時の太陽周期の非線形ダイナモモデルでは再現が困難で非線形性の一つのあらわれであろうと考えていた。また非線形ダイナモモデルには組み込まれていないメカニズムで起きている可能性もあった。

第 1 図から第 5 図に示した Brooks 相関の現象は、この非線形ダイナモモデルの謎のメカニズムはどのようなものであるかについて解決策を見出す鍵を与えていると思われる。すなわち、その鍵は第 IV 大周期と第 VI 大周期の中間の第 V 大周期に Brooks 相関が明瞭に見られないという事実にあると思われる。

太陽周期 16(1923 年 8 月-1933 年 9 月) から太陽周期 20(1964 年 10 月-1976 年 6 月)にかけて時間変化の曲線を平滑化すると太陽周期 16 にも Brooks 相関が見られ太陽周期 20 には戻っていることが見られる。これは太陽周期の磁場が第 IV 大周期から遷移期間を経て第 V 大周期に移行する、また第 V 大周期から遷移期間を経て第 VI 大周期に移行する、この遷移期間が太陽周期 16 であり太陽周期 20 である、と考えるのである。従って第 IV 大周期の太陽地球気候関係で Brooks 相関とそれと同様な現象は第 VI 大周期に継続される、と考えるので第 VI 大周期の太陽周期 25 並びにその次の第 VII 大周期の初めの太陽周期 26 にも良い相関はあるだろうと言う予測ができる。そのメカニズムが解明されるか否かを問わず、ビクトリア湖の水位は黒点太陽周期にともなって変動すると予測されるのである。

この様な予測が正しければ太陽地球気候関係の科学上の考察としてだけでなくビクトリア湖の水位の増減が意味する淡水資源の確保あるいは電力資源の確保あるいは水位の低下がもらすと思われる疫病の事前の備えと対策に役に立つことを意味している。

しかしながら、この稿では、このような社会に及ぼす影響の議論ではなく、Brooks 相関は太陽の理解にとって何を意味するかを考察することを主な目的としている。そのためには、これまでに展開された太陽周期の非線形ダイナモ・モデルを理解しなければならない。

8. 太陽周期の非線形ダイナモ・モデルの妥当性の観測的証拠

非線形ダイナモ・モデルの説明の前にモデルの妥当性を示す観測的事実を示す。この事実は同時に第7図に示したアフリカの降雨量と河川の水量の時間変動と Brooks 相関の時間変動が別のメカニズムで太陽と関連していることを示唆する観測結果となっている。

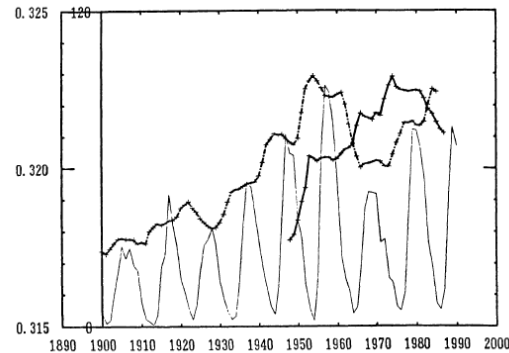


Fig. 2. The time variation of the angular momentum layer density at the surface, M/C , denoted by a solid line as in Figure 1(c) and the 11-year running average of the yearly mean of the sunspot relative number, R . The first ordinate is for M/C and the second is for R_{11} . The ordinate of the thin line for the yearly mean of the sunspot relative number is not shown in this diagram but is the same as in Figures 1(a), 1(b), and 1(c) and is from 0 to 250 in linear scale.

第10図 太陽周期の振幅と太陽微分回転の角運動量指標の変動の関係。Yoshimura, Hirokazu and Kambry, Maspul Aini “The Secular Modulations of Solar Rotation from 1943 to 1992 and its Time-Delayed Correlation with the 55-Year Grand Cycle of the 11-Year Solar Cycle”, Solar Physics, Vol. 148, pp. 11-26, 1993 より。

© H. Yoshimura and M. A. Kambry

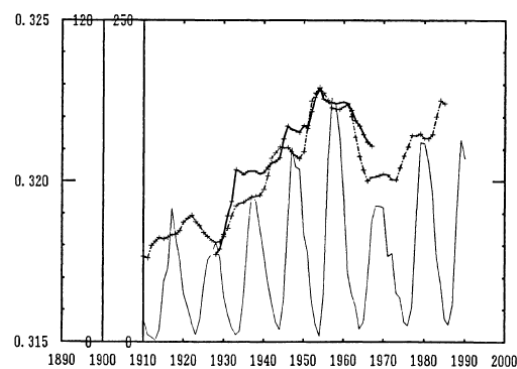


Fig. 4b. The time profiles of the angular momentum layer density, M/C , and the 11-year running mean, R_{11} , of the yearly mean of the sunspot relative number, R , similar to Figure 4(a) but with a delay time of 20 years, which shows visually better correspondence between the time profiles of M and R_{11} than in Figure 4(a).

第11図 第10図の角運動量指標の変動の曲線を20年過去に移動したもの。

© H. Yoshimura and M. A. Kambry

第 10 図は太陽周期の振幅と太陽微分回転の角運動量指標の変動の関係を示した図であるが、この場合の角運動量指標とは太陽の微分回転を決定するための運動の指標とした黒点群あるいは黒点の磁力線の源の層の角運動量を太陽の全球面にわたって積分したものである。従ってこの角運動量指標が増加するということは、もっと深いところから角運動量が運ばれてくることを意味している。逆に減少することはこの層から角運動量が運ばれていくことを意味している。さらに、この角運動量指標が変化するということは何らかの力が微分回転の流体運動に働いていることを意味している。また、第 10 図と第 11 図は、この角運動量指標の変化が太陽 11 年周期の磁場の変化と 20 年の遅れ時間を持って変化していることを示している。ダイナモの非線形モデルではこれは磁場のローレンツ力によって太陽内部の角運動量が動径方向すなわち深さ方向に輸送されていることを意味している。第 10 図、第 11 図はこの証拠となる。第 10 図、第 11 図ともに、11 年を単位として黒点相対数の移動平均を取り、あるいは 11 年の間の黒点群の位置の変化によって微分回転を決定している。

この稿で第 10 図と第 11 図を示す目的は、第 7 図で示したアフリカの河川の水量の長期変動の極大値が 1970 年頃にあり、太陽黒点 11 年周期の 55 年長期変動の極大値が 1950 年から 1960 年にかけてあるという関係だけからはアフリカの河川の水量の長期変動と太陽の関係はないと言う結論を導くことは短絡的であり、必ずしもそのような結論にはならないことを示すことである。太陽微分回転の角運動量指標の時間変化と同様に 20 年遅れでアフリカの河川の水量の長期変動をもたらすものが太陽にあるとすれば、それは太陽—地球気候の関連を示す有力な証拠となる。太陽にあるアフリカの河川の水量の長期変動をもたらすものの候補としては太陽の光度あるいは太陽輻射総量の変動がある。その 50 年以上の均一な性質の直接の観測結果はまだないが、そのようなデータを観測して蓄積することは、これからの太陽物理学あるいは天文学あるいは太陽—地球気候関係学の重要な課題である。

さらに太陽微分回転の角運動量長期の変化をみるために、すでに発表された論文にあったグリニッジ天文台の黒点群の位置データを解析して微分回転を決定した結果を使い角運動量の変化を見た。論文は「Balthasar H., Vázquez M., Wöhl H. “Differential Rotation of Sunspot Groups in the Period from 1874 through 1976 and Changes of the Rotation Velocity within the Solar Cycle”, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 155, pp. 87-98, 1986」である。Balthasar たちは太陽微分回転は長期変動はしないという主張を結論としていたが、太陽微分回転の角運動量指標の変動という新しく導入した概念を使うと、Balthasar たちの主張とは逆に明確な長期変動が見られた。第 12 図、第 13 図にその結果を示す。第 12 図は、角運動量指標と黒点相対数を 11 年で 2 回、移動平均したものである。第 13 図はさらにそれを 20 年、30 年、40 年、50 年で移動平均したものと、角運動量指標を 50 年移動平均したものを示している。移動平均の期間が長くなるにつれて、55 年周期は平滑化され消えていき、その 2 倍の 110 年周期が現れてくる。

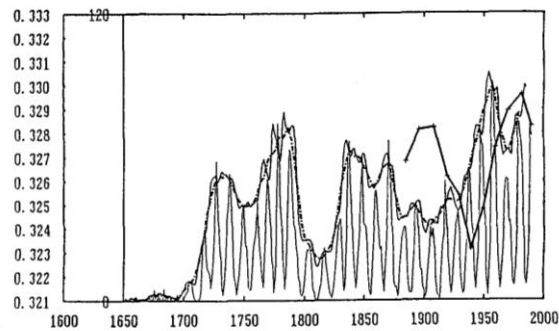


Fig. 3. Time series of the angular momentum surface layer density M/C denoted by the thick solid line, the single 11-year running mean of the yearly mean of the sunspot relative number denoted by the thin solid line, the double 11-year running mean denoted by the thick dotted line, and the yearly mean denoted by the thin solid line. The format of the diagram is the same as in Fig. 1.

第 12 図 太陽周期の振幅と太陽微分回転の角運動量指標の変動の関係。 Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Coupling between the 110-Year Periodic Modulations of Solar Differential Rotation and Solar Cycle” in “The Cosmic Dynamo”, Proc. IAU Symp. Vol. 157, ed. F. Krause, K.-H. Rädler, G. Rüdiger pp. 63-69, 1993 より。© H. Yoshimura

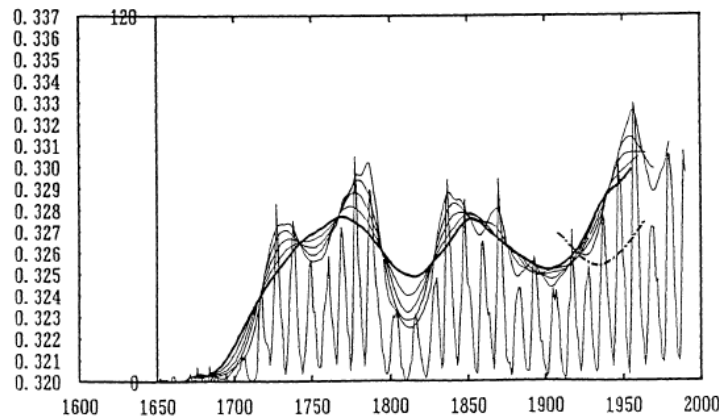


Fig. 4. Time series of 20, 30, 40, and 50 year running means of the double 11-year running mean of the yearly mean of the sunspot relative number. The yearly mean and 20, 30, and 40 year running means are denoted by thin solid lines. The 50 year running mean is denoted by the thick solid line. The 50 year running mean of M/C shown in Fig. 3 is denoted by the thick dotted line.

第 13 図 太陽周期の振幅と太陽微分回転の角運動量指標の変動の関係。 Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Coupling between the 110-Year Periodic Modulations of Solar Differential Rotation and Solar Cycle” in “The Cosmic Dynamo”, Proc. IAU Symp. Vol. 157, ed. F. Krause, K.-H. Rädler, G. Rüdiger pp. 63-69, 1993 より。© H. Yoshimura

角運動量指標では微分回転の変化はわかりにくい場合を考慮して、第 14 図に太陽微分回転の赤道加速の時間変動を示す。横軸は太陽周期番号であり時間を表す。縦軸は赤道加速の割合で、0.2 は 20 パーセントだけ赤道が極より角速度が速いことを意味する。この図でわかるように、太陽の微分回転は 100 年規模で大きく変化していて、最近の 100 年間でも 15 パーセントから 25 パーセントまで変わっている。第 12 図、第 13 図と比較すると、もっと長い間には微分回転も大きく変化しうることが推察できる。

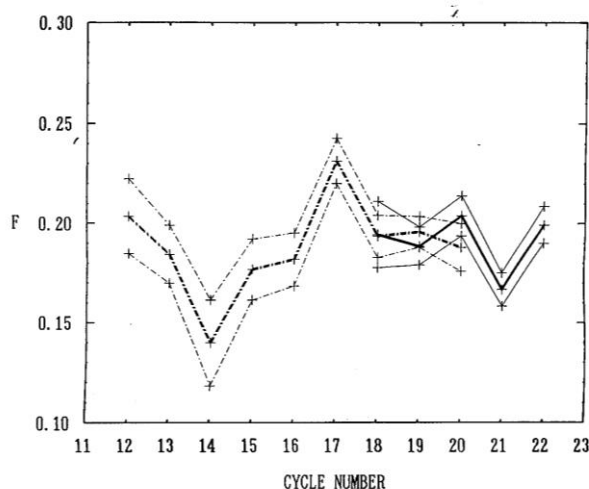


Fig. 3: Time sequence of the degree of the equatorial acceleration or the flatness of the latitudinal dependence profile F . The thick lines denote the values calculated from the A and B values determined by the least square fitting method. The thin lines show the values calculated from the A and B values with standard deviations. The abscissa is solar cycle number. The ordinate is F , which shows that the average degree of the equatorial acceleration is about 20 percent. The F values undergo a modulation which is similar to that of M in Fig. 1 and in Fig. 5 in antiphase with the modulation of M reaching a minimum at cycle 14, a maximum at cycle 17 and a minimum at cycle 21. Notice also that the F values of the Greenwich and the Mitaka data agree well at cycle 18.

第 14 図 太陽微分回転の赤道加速の時間変動。横軸は太陽周期番号。Yoshimura, Hirokazu and Kambry, Maspul Aini “The 100 -Year Periodic Modulation of Solar Rotation”, Astron. Nachr., Vol. 314, pp. 9-19, 1993 より。© H. Yoshimura and Maspul Aini Kambry

これらの数々の証拠は太陽内部で磁場によるローレンツ力が働いていて、内部の流体運動を変化させていることを示している。さらに流体運動を変化させることができるなら熱を運ぶ対流運動を変化させて太陽内部の熱構造を変化させうることを示している。この過程を太陽ダイナモ理論に組み込んだのが太陽非線形ダイナモ理論である。その中で重要な要素は、力を及ぼすのには時間がかからなくてもその結果としての流体運動の変化と熱構造の変化には時間がかかるという概念である。非線形ダイナモ理論での遅れ時間の概念の導入によって様々な解の多様性が生まれ、その遅れ時間は数々の観測事実によって実証されつつある。

9. 太陽周期の非線形ダイナモモデル

1978 年から 1980 年にかけて発表した太陽周期の非線形ダイナモ・モデルは、太陽の磁場を創る太陽対流層の内部の微分回転とグローバル対流が創った磁場のローレンツ力によって変化を受け、その変化には時間がかかるというものである。そのかかる時間を遅れ時間と呼び、その長さを調整しながら非線形ダイナモ方程式を数値積分すると、長さをパラメータとして解の傾向がわかる。その結果、遅れ時間が 20 年、200 年、1000 年という 3 つのパラメータとして表現できるならば観測された太陽磁場の長期変動あるいは宇宙線で地球大気中に創られた同位体元素である樹木のなかの炭素の同位体 ^{14}C とグリーンランドと南極大陸の氷の中のベリリウムの同位体 ^{10}Be の量から推定された過去の長期の太陽磁場活動の時間変動が再現でき、さらに 17 世紀のマウンダー極小期なども再現できることがわかった。

遅れ時間が無いとすると非線形ダイナモ方程式は解が同じ周期解を永久に繰り返すというリミット・サイクルと呼ばれる解になることもわかって、観測あるいは測定された太陽磁場活動の長期変動は再現するには、どうしても遅れ時間を必要としていることがわかった。

しかしながら遅れ時間がないとしても、創られた磁場のローレンツ力はグローバル対流に力を及ぼし、対流は熱を運ぶから太陽表面から放出される輻射は変動せざるを得ないという結果もあった。太陽対流層は熱溜めとして機能し、一時的に熱を溜め、あとで放出するというメカニズムである。この帰結は、奇しくも、1978 年から系統的に宇宙から観測された太陽観測衛星ソーラー・マキシマム・ミッションと気象衛星ニンパス 7 号によって確定的に実証され、それ以降も様々な宇宙探査機により Total Solar Irradiance (TSI) あるいは Solar Total Irradiance (STI) と呼ばれる太陽の輻射総量の観測は継続されている。

非線形ダイナモ理論の遅れ時間は、ダイナモ自身が創った磁場の反作用による微分回転の変化として現れるか、グローバル対流の変化として現れ、その結果としての輻射の変化に現れるかを特定することはできないという数学的構造を持っていた。そこで、両者の変化を観測的に実証するものがあるかということが要求されていた。あるいはすべての可能なメカニズムを入れた非線形方程式を数値的に解くかの二つの方法によって両者に対する磁場の反作用の効果を見る方法もあった。すべての可能なメカニズムを入れた非線形モデルを創ることはメカニズムがどのようなものかが分かって初めて出来ることである。観測的にも理論的にも非線形性を実証する現象を求め、第 IV 大周期(太陽周期 11 から太陽周期 15 まで)の太陽周期ごとに振幅(極大黒点数)が大小を交互に繰り返している謎のメカニズムを探している過程で太陽周期の非線形ダイナモ・モデルの妥当性を示すいくつかの観測事実が浮かび上がって来た。先に述べた太陽微分回転の太陽 11 年周期磁場に遅れ時間をともなった変動もその一つである。

以下に太陽非線形ダイナモ・モデルのいくつかの結果を示す。

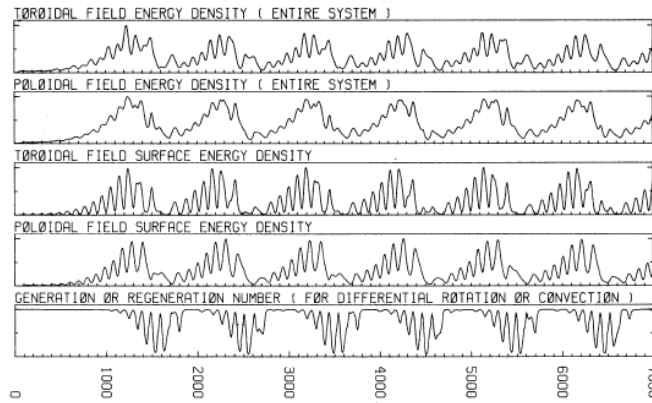


FIG. 1.—The evolution of the energy indices of the nonlinear magnetic oscillation with a second-period modulation which results from the delayed nonlinear reaction process. The basic period of the oscillation corresponds to 22 years of the solar cycle, and the second period corresponds to its 80 year modulation. The integration time span is approximately 670 years. The meanings of the energy indices described at the head of the curves are explained in Yoshimura (1978a). Each peak has its own spatial structure corresponding to the 11 year solar cycle (Fig. 4). The values of the nonlinear parameters are: $a_N = 0.001$, $N_f = 5$, and $t_d = 0.03$. Notice the possibility of double peaks during one (11 year) cycle around step 6300.

第 15 図 太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の例。11 年の基本周期に長期の変調が見える。横軸は時間積分のステップ数。Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Astrophysical Dynamos : Multiple-Period Dynamo Wave Oscillations and Long-Term Modulations of the 22-Year Solar Cycle”, *Astrophys. J.*, Vol. 226, pp. 706-719, 1978 より。© H. Yoshimura

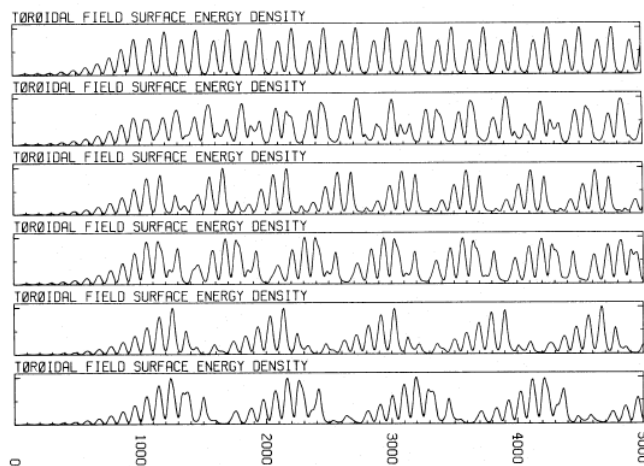


FIG. 2.—Six cases of the nonlinear magnetic oscillation with various values of the delay time parameter t_d , showing the dependence of the length of the second-period modulation on t_d . From top to bottom, $t_d = 0.005$ (5 year), 0.01 (10 year), 0.015 (15 year), 0.02 (20 year), 0.025 (25 year), and 0.03 (30 year). The larger the value of t_d , the longer the period of the modulation. The values of N_f are, from top to bottom, $N_f = 15, 8.25, 8, 7, 6$, and 5 . These are chosen since the effects of N_f become strong as t_d increases. Other parameters are the same as in Fig. 1.

第 16 図 太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の長期の変調に周期が遅れ時間が長くなると長くなることを示す図。Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Astrophysical Dynamos : Multiple-Period Dynamo Wave Oscillations and Long-Term Modulations of the 22-Year Solar Cycle”, *Astrophys. J.*, Vol. 226, pp. 706-719, 1978 より。© H. Yoshimura

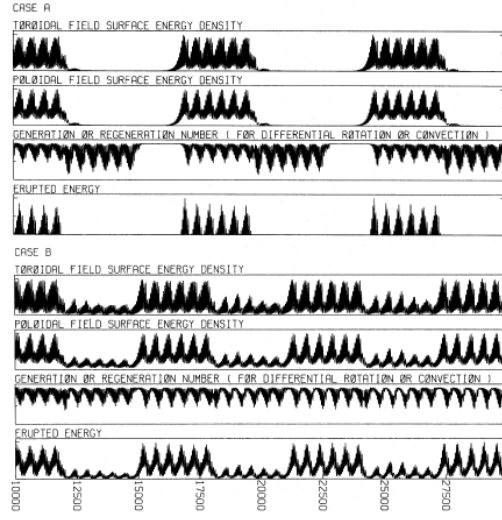


FIG. 9.—Examples of the magnetic oscillation with multiple (three) periods when two delay-time parameters represent the feedback process. A spike in the diagrams corresponds to an 11 year cycle, a mountain to an 80 year modulation, and a range of mountains to a higher-order (1000 year) modulation. Notice in case A that there are extended eras of a total absence of surface activity. The duration of a nonactive era, however, is comparable to that of an active era in the two delay-time parameter case. The values of parameters are: $a_{d1} = 0.2$, $a_{d2} = 0.1$, $N_1 = 5$, $N_2 = 5$, $t_{d1} = 3000$ steps, $t_{d2} = 150$ steps, and $\Delta t = 0.0002$. Other parameters are the same as in Fig. 8. A larger value of t_{d1} can make the period of the higher-order modulation longer. Case B is similar to case A, but with $a_{d1} = 0.1$, $B_{int} = 0.3$, and $E_s = 0.0001$. Three kinds of oscillation are visible even in a great-grand-minimum of a higher-order modulation. The rugged appearance of the curves is due to the coarse resolution of the graphic display. Internally, the evolutionary curves are more smooth.

第 17 図 2 種類の遅れ時間を考慮に入れた太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の例。2 つの高低の変調が見える。Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Astrophysical Dynamos : Multiple-Period Dynamo Wave Oscillations and Long-Term Modulations of the 22-Year Solar Cycle”, Astrophys. J., Vol. 226, pp. 706-719, 1978 より。© H. Yoshimura

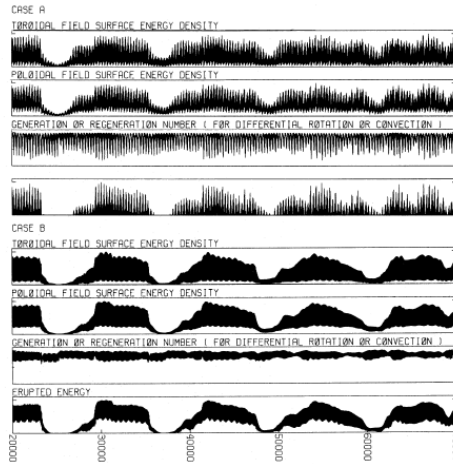


FIG. 10.—Multiple-period magnetic oscillations when three delay-time parameters represent the feedback process. These are examples of numerical simulations of the actually observed long-term modulations of the solar cycle. In order to describe the phenomenon that the nonactive phase is shorter than the active phase and an especially anomalous era like the 17th century (Maunder minimum), we need at least three delay-time parameters corresponding to three channels in the time-delayed feedback process. The three delay-time parameters are: $t_{d1} = 6000$ steps (1200 years), $t_{d2} = 2000$ steps (400 years), and $t_{d3} = 100$ steps (20 years). For case A, $a_{d1} = 0.22$, $a_{d2} = 0.1$, $a_{d3} = 0.1$, $N_1 = 6.0$, $N_2 = 4.1$, $N_3 = 8.5$, $B_{int} = 1.0$, and $E_s = 0.0001$. For case B, $a_{d1} = 0.1$, $a_{d2} = 0.05$, $a_{d3} = 0.1$, $N_1 = 5.0$, $N_2 = 4.0$, $N_3 = 5$, $B_{int} = 0.3$, and $E_s = 0.0001$. Integration was done over 13,440 years (70,000 steps) and the time span displayed in the diagram is 9600 years (50,000 steps). Case A is a typical example of the cases in which the first (55 year) and third (2300 year) kinds of modulations dominate the oscillation. Each spike consists of approximately five basic-period (11 year) cycles. Indicators of the surface energy densities in the upper two diagrams are calculated at one level below the surface. Internal fields are thus shown to be in an oscillating state even in such an era without sunspots. Case B is a typical example of the cases in which the second (1000 year) and the third (2300 year) kinds of modulations dominate the oscillations beside the basic-period (11 year) cycle.

第 18 図 3 種類の遅れ時間を考慮に入れた太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の例。解はカオス的になる。Yoshimura, Hirokazu “Nonlinear Astrophysical Dynamos : Multiple-Period Dynamo Wave Oscillations and Long-Term Modulations of the 22-Year Solar Cycle”, Astrophys. J., Vol. 226, pp. 706-719, 1978 より。© H. Yoshimura

第 15 図と第 16 図は一つの遅れ時間を考えダイナモ・モデルに導入すると、基本振動の 11 年周期に乗って第一の変調が現れ、その変調の周期の長さは遅れ時間が長いほど長いという結果が得られたことを示している。実際の太陽ではどのようなになっているかを見る必要性から、再度、太陽周期を表す黒点相対数の時間変化の振幅と周期を同時に見なおしたところ、太陽は第 8 図、第 9 図のような 55 年周期になっていて、それまで太陽周期の振幅だけのフーリエ解析から 80 年周期などの長周期があると主張されてきたことが表層的なものであり見かけだけのものであることがわかった。現在でも同じような解析は行われていて、関連する文献の判断を複雑にしている。第 15 図と第 16 図の解は、太陽表面近くの磁場は観測されるような蝶形図となり、内部では観測されていない内部の太陽磁場構造をも示している。第 17 図と第 18 図も同様である。第 17 図は二つの遅れ時間をダイナモモデルに導入した太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の例で、現れる変調は二つのまだ規則性のある周期性を残した解である。興味深い事実は二つの高低の長期変動に乗って基本周期の第一の変調が現れ、二つの高低の長期変動は第二の変調になっていることである。第 18 図は三つの遅れ時間をダイナモ・モデルに導入した太陽非線形ダイナモ・モデルの数値解の例であり、解は周期性を保ちつつカオス的になることを示している。17 世紀のマウンダー極小期に対応する時期も再現できる。

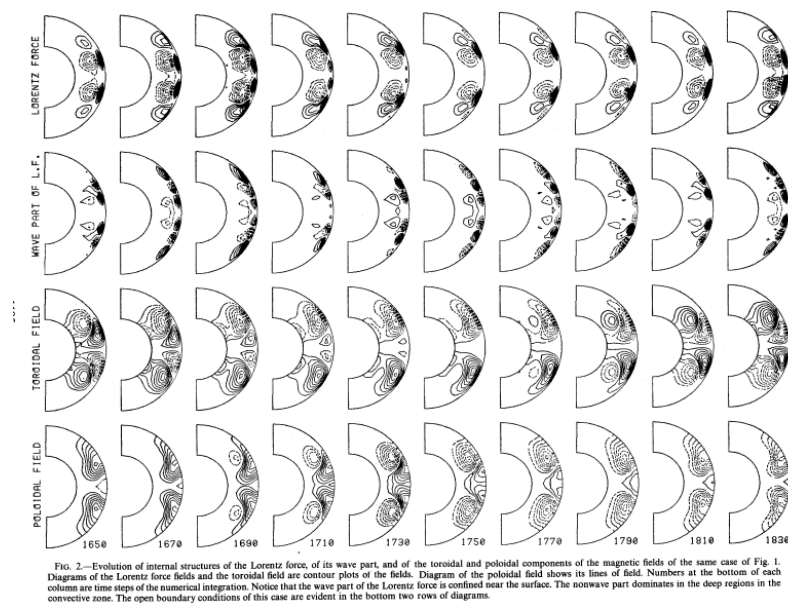


FIG. 2.—Evolution of internal structures of the Lorentz force, of its wave part, and of the toroidal and poloidal components of the magnetic fields of the same case of Fig. 1. Diagrams of the Lorentz force fields and the toroidal field are contour plots of the fields. Diagram of the poloidal field shows its lines of field. Numbers at the bottom of each column are time steps of the numerical integration. Notice that the wave part of the Lorentz force is confined near the surface. The nonwave part dominates in the deep regions in the convective zone. The open boundary conditions of this case are evident in the bottom two rows of diagram.

第 19 図 ダイナモ・モデルによる太陽内部の磁場の構造とその磁場によって発生するローレンツ力の構造。ダイナモ波は表面にむかって伝搬。深い内部ではローレンツ力は磁場の波動性によらない。Yoshimura, Hirokazu “Solar Cycle Lorentz Force Waves and the Torsional Oscillations of the Sun ”, *Astrophys. J.*, Vol. 247, pp. 1102-1112, 1981 より。© H. Yoshimura

第 19 図はダイナモ・モデルによる太陽内部の磁場によるローレンツ力の構造を示している。磁場のダイナモ波は表面にむかって伝搬している。ローレンツ力は磁場の極性によらず、その大きさもダイナモ波の振幅が一定の非線形ダイナモ・モデルでリミット・サイクルとなる場合、深い内部では一定となる。深い内部ではローレンツ力は波動とならない。ローレンツ力の波動性はダイナモ波が表面の境界層で波形が崩れたときに現れる。

この事実は、1980 年に発表された Howard と LaBonte の太陽の微分回転のねじれ振動が太陽周期の磁場のローレンツ力によるもので、ねじれ振動は太陽の比較的浅い部分の現象であるという議論に使われた。Howard と LaBonte の論文は「Howard, Robert, LaBonte, Barry J. “The Sun is Observed to Be a Torsional Oscillator with a Period of 11 Years ” , Astrophys. J., Part 2 - Letters to the Editor, Vol. 239, pp. L33-L36, 」に発表されている。

ねじれ振動自体は太陽の磁場の分布の時間変化から予想していたが、ねじれ振動は、私が Mt. Wilson 天文台の速度場のデータを解析し始めた 1974 年から、新たに導入した手法で太陽の速度場の長期変動を調べるプログラムの成果の一つである。

また、この成果とローレンツ力によって微分回転が長期変動することは第 19 図のようなローレンツ力の構造が磁場の波動性によらず太陽周期の振幅で変化しているべきであるということから予想されていて、第 10 図から第 14 図までに示した微分回転の長期変化の発見は必然的なものであった、

非線形ダイナモ・モデルで示された三種類の遅れ時間は、20 年、200 年、1000 年と予想していたが、20 年については第 10 図から第 14 図までに示した微分回転の長期変化に対応するものと考えていた。

しかし、第 1 図から第 7 図に示したアフリカ・ビクトリア湖とアフリカ全大陸の河川の水位と水量の変化は、新たに 20 年の遅れ時間が太陽内部の磁場と輻射輸送のメカニズムについても関連していることを示唆しているように思えるようになった。すなわち、第 1 図から第 6 図に示した太陽周期 14 から 15 にかけた Brooks 相関の出現と太陽周期 16 から 20 にかけた消滅さらに太陽周期 21 からの回帰は太陽周期 16 から 20 の 55 年第 V 大周期が、第 IV 大周期とも現在の第 VI 大周期とも違って、太陽内部の磁場と熱輸送の関連が第 V 大周期と第 IV、VI 大周期では異なっていることを示しているように思えるようになった。さらに第 7 図に示したアフリカ全大陸の河川の水位と水量の変化は Brooks 相関とは異なった経路で太陽と地球気候は結びついていると思えるようになった。このようなことと第 V 大周期で Brooks 相関が消滅したように見えることが関連している可能性もある。

10. 再びアフリカの降雨量と河川の水量とビクトリア湖水位

本稿は、アフリカ・ビクトリア湖の湖水面の水位と太陽黒点数の相関という、一見すると関連がないように見える現象の記述から始めた。また、この稿は太陽物理学あるいは地球気候学の考え方に慣れていない方々のために現象を紹介するように依頼されたことがきっかけとなっている。そのため引用文献の記述も通常の形式をとっていない。本稿の論題は地球気候学でも太陽物理学でもまだ確定的な合意がなされていない分野であり現象である。アフリカの湖水あるいは河川のデータも研究者によってというより、むしろ淡水を利用する技術者によって計測され、ダムあるいは治水という実際の建設のための基礎データとして蓄積されデータの統一管理もできていない状況である。またアフリカ・ビクトリア湖と太陽の相関のみであれば物理的関係があったとしても局所的な出来事として重要視されないのかもしれない。さらに単なる相関だけで物理的関係があるかどうかを論じるのは危ういという見解もある。このようなことがあるにも関わらず、Brooks 相関は一度消えたと思われた時期もあるが、回帰して今なお継続しているという事実から目を離すわけにはいかない、という社会的事情がアフリカ・ビクトリア湖にはある。湖水面の変化は周囲の国々に広大な地域の食料および産業ならびに疫病の発生に深く関係していて大きな影響を与えるからである。このため、今後も湖水面の変化のデータは蓄積され、太陽地球気候関係学の重要なデータとして認識される可能性があることも否定できない。その間に太陽内部の磁場と熱の流れの研究をすすめる太陽表面磁場活動をもたらし太陽周期磁気ダイナモパルスと太陽輻射変動をもたらし太陽周期熱パルスの 2 種類のパルスの位相関係が、太陽周期によって同じかどうかを明確にする必要がある。

太陽内部の磁場が表面に出現する現象として 200 日周期磁気熱脈動もデータの中に発見している。磁場パルスの前に太陽は暗くなり、磁場パルスの後、明るくなる。次の論文に発表している。「Yoshimura, Hirokazu “The Time-Delayed Solar Cycle Luminosity Modulation by Sub-Surface Magnetic Flux Tubes” *Astron. Nachr.*, Vol. 315, pp. 189-203, 1994、Yoshimura, Hirokazu “Darkening of the Sun Prior to Surface Appearance of Sunspot Flux Tubes and Magneto-Thermal Pulsation of the Sun ” *Astron. Nachr.*, Vol. 315, pp. 371-390, 1994」。同様なことが、Brooks 相関に関する 11 年太陽周期規模の磁気パルスと熱パルス、あるいは、アフリカ大陸全土に共通する降雨量の変化ならびに河川の水量の変化の時間規模である 55 年太陽大周期に伴う磁気パルスと熱パルスの位相関係を明らかにする必要がある。ことに第 V 大周期と第 IV、VI 大周期の違いを明らかにすることは重要である。

さらにデータの発掘からも、歴史的データとして、ビクトリア湖を一つの源流とするナイル川の水位の変化の長期データはアフリカ大陸全土に共通する現象を含んでいると思われるので重要である。