

一日黒点の周期性

久保田 諄
鈴木 美好

要旨

太陽面に現れる短寿命の微小な黒点（一日黒点）の数の全体の黒点数に対する割合を求め、その経年変化を調べた。この変化には黒点の11年周期の影響は消え、約80年の周期が認められて、グライスベルグ周期（約80年）と一致する。このグライスベルグ・サイクルの極小において微小黒点の発生する割合が増加することが明らかになった。太陽面上の黒点の動きから求めた太陽の自転速度は緯度が高くなるに従って遅くなる差動自転であるが、この差動自転の緯度勾配も約80年の周期で変化するので、微小黒点の発生割合の変化と太陽の自転周期の変化との関係を調べた。

キーワード：太陽黒点，差動自転，Gleissberg 周期

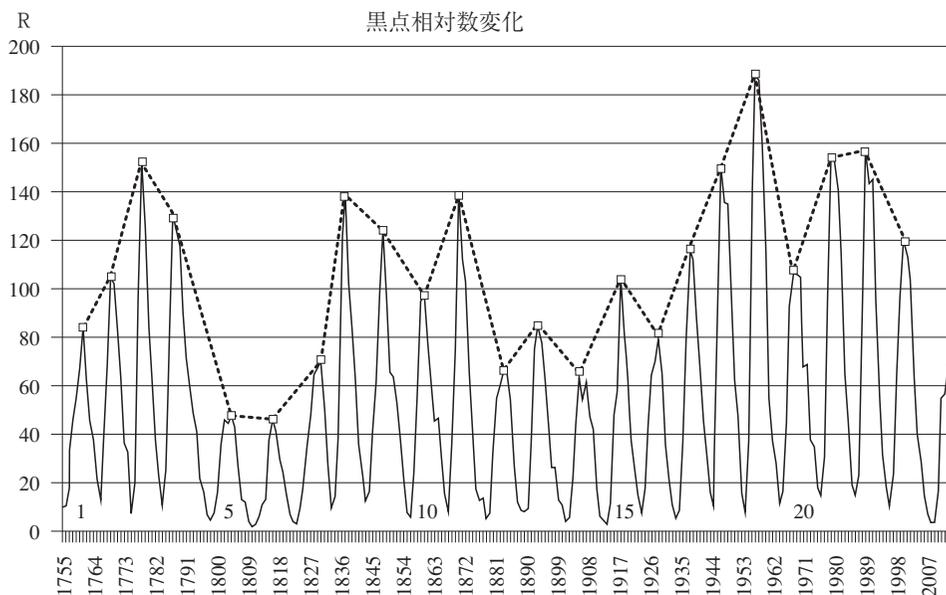
I 序 論

太陽表面に現れる黒点の数は平均11年の周期で増減を繰り返すことはよく知られている。毎日の太陽面に見られる黒点の数を表わす指標として、現在一般的に使われているのはチューリッヒ黒点相対数 R （あるいはウオルフ相対数）である。これはチューリッヒの天文学者ウオルフ（Wolf）が1864年に、その日その日の太陽面に見える黒点の数を数えて、全部の黒点の総面積の大きさを表す指標値として考案し、世界の観測者に提唱した数値である。以来、連綿として観測が引き継がれ、現在に至るまで、世界各地の観測所の共同事業として、毎日の黒点相対数の記録が続けられている。自然科学の分野で最も長い観測記録として、特に環境変化の研究にとっても基本的なデータとして広く活用されている。

この黒点相対数の経年記録（図1）を見ると、黒点数の増加と減少の繰り返しが顕著である。極小から極大を経て、次の極小までの期間を活動サイクルと呼び、その時間的長さをサイクルの長さと呼んでいる。1762年に R が極大であったサイクルの番号を1とし、現在（2015年）はサイクル24の極大期である。これらのサイクルの長さは短い場合は7、8年、長い場合は12.4年とさまざまであるが、その平均が約11年であることから、黒点活動の11年サイクルと名付けられている。

それぞれのサイクルの極大値だけを点線で結ぶと（図1）、サイクルの極大値（振幅）だけの経年変化が明らかである。この変化はサイクルの約7倍あるいは8倍の長い周期を示し、発見者の名をとって、グライスベルグ（Gleissberg）サイクルと呼ばれている。この周期的な変化は11年サイクルに重なりあって、唸りのように黒点活動の変化に現れてい

図1；太陽黒点相対数Rの経年変化（1755～2009年）と
グライスベルグ・サイクル（点線）



る。

これらの11年および80年の周期をもつ黒点活動の経年変化は大きい黒点も小さい黒点も観測されたすべての黒点を数えて決定されたが、ここで微小な黒点、特に一日だけしか観測されなかった短寿命の黒点（一日黒点）だけにデータを限定して、その経年変化を調べたのはリングネス（Ringnes 1981）である。それぞれの観測日で、黒点の総数に対する一日黒点の数の比を求め、その経年変化を調べたところ、11年サイクルの変化は消えて、1920年代に極大をもつ奇妙な変化が現れた。彼が調べたデータは1885-1976年の範囲であり、その後の変化についてはまだ明らかにされていないので、鈴木が1970年以来観測を続けてきた太陽黒点のデータを使って、一日黒点の出現頻度の現在に至るまでの経年変化を調べる。

II 一日黒点とは

一日黒点（one-day spot）は次のように定義されている（Ringnes 1955）。観測は決められた時刻ではないが、一日に一回行われた場合、ある日の前日には全く太陽面に見当たらず、その日だけ太陽面に見えて、その翌日にはもはや観測されない、短い寿命の黒点を一日黒点と呼ぶ。それはある大きい黒点群の最後の生き残りの一つでもなく、また、最初に一つの小さい黒点が現れて、それが次第に成長してゆくものでもない。あくまで単独の小さくて短寿命の黒点であって、その日一日あるいは観測の時だけ見えていた黒点である。太陽自体が自転しているので、東西の縁近くに見えていた小さい黒点も一日黒点の中を含めない。したがって、太陽中央子午線から経度が 65° 以上隔たっているものは除外する。

太陽の自転のため、前の日に太陽面の反対側にあった黒点が、その日に東の縁に現れてくるかも知れないし、反対に西の縁近くに現れた黒点が次の日に太陽面の反対側に行って存続するかも知れないからである。また、縁の近くにある黒点の暗部の部分が太陽面から窪んで見える現象 ウイルソン (Wilson) 効果によって黒点自体が検出しにくくなるからである。また、観測した日の前日、あるいはその翌日も欠測があった場合も一日黒点に含めるとすれば、一日黒点の寿命は72時間以内と云える。

Ⅲ 黒点の面積のデータ

太陽面に現れる黒点は微小なものから肉眼で見えるほどの巨大なものまで、さまざまなサイズを持っている。一般に太陽面で黒点やファキュラ (白斑, faculae) などの占める面積を表す単位として、太陽半球面の百万分の一の面積 (mvh) が使われている。この 1mvh の面積は太陽面上で $3.044 \times 10^6 \text{ km}^2$ であり、この面積をもつ円形の黒点を考えると、その直径は $1.969 \times 10^3 \text{ km}$ (地球から太陽面上でそれを見た角度 2.81 秒角)、または、日面経度であらわすと赤道上で 0.16° である。この単位を使って表した黒点の総面積は 1mvh から 2000mvh まで様々である。

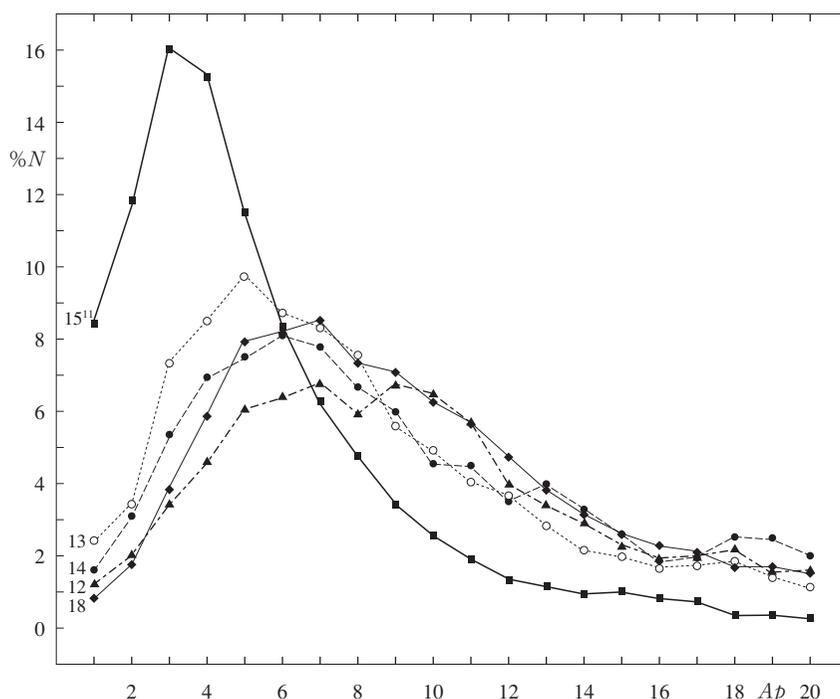
グリニッチ (Greenwich) 天文台では1876年以来、世界各地に分散して設けた太陽黒点観測専用の屈折望遠鏡を使って、1976年までの毎日、太陽面の写真を撮影した。そして、殆ど欠測の日のないこれらの太陽面写真を使って、毎日のある時刻における黒点あるいは黒点群の太陽面上の位置 (日面緯度と日面経度)、黒点の総面積および暗部面積を測定し、結果をグリニッチ日面写真結果 (Greenwich Photoheliographic Results: GPR) として出版している。これは1976年より以前の太陽黒点の記録として最も重要で価値の高いものであり、すべての黒点および宇宙環境の研究にとって基本的なデータとなっている。この記録を使うと、容易に毎日の一日黒点の数と面積を知ることができるので、多くの人々がすべてこのデータを使って研究を進めている。(Nicholson 1933, Jensen, Nordo and Ringnes 1955, Tandberg-Hanssen 1955, Edwards 1957, Ringnes 1961, Antalova 1971, Ringnes 1981, 1984, Antalova 1991, Hatherway 2013, Bludova, Obridko and Badelyan 2014)

リングネス (Ringnes 1955, 1961) はこの GPR データを使って、太陽黒点活動サイクル 12-20 (1879-1976年) の期間における、サイクル毎の一日黒点の数と全黒点数の比 (パーセンテージ) および一日黒点の平均面積 (半暗部面積) を求めている。彼は一日黒点を単独黒点、双極型黒点 (二つの暗部をもつ) および多重黒点 (二つ以上の暗部をもつ) に分け、それぞれのグループの黒点全体に対する数の比と平均黒点 (半暗部) 面積 (A_p) を求めた。単独、双極型および多重黒点の数の比は、全部のサイクルで平均して、それぞれ 59.6%, 26.4%, および 14.1% であり、一日黒点の 6 割は単独黒点が占めていることがわかる。また、それぞれの平均面積 A_p は 6.4, 14.0 および 19.0 mvh である。つまり、一日黒点の面積 (半暗部面積) は 20 mvh 以下であるが、その代表的なものは単独黒点で、その平均面積 (半暗部面積) は 6.4 mvh である。

黒点は発生から消滅までの間、さまざまにその形とサイズを変える。その形を表わすた

めにワルドマイヤー (Waldmeier) により黒点のチューリッヒ分類が始められ、一般的に使われている。この一日黒点をチューリッヒ分類によって表わすと、A (単独黒点, 半暗部なし), B (双極型, 半暗部なし) C (双極黒点群, 主な暗部一つに半暗部), および J (単独黒点 半暗部あり) などに分類されるが, 1938~1976年の期間に観測された3221個の一日黒点のうち91.8%はA型であり, B, C型はそれぞれ7.8%および0.3%であった。J型はさらに少なく, 0.03%に過ぎない (Ringnes 1984)。つまり, 一日黒点のほとんどは半暗部を持たない微小黒点である。

図2 ; 黒点活動サイクル (12~18) における, いろいろな面積 Ap をもつ一日黒点の数 N の分布 (%) (Ringnes (1961) による)

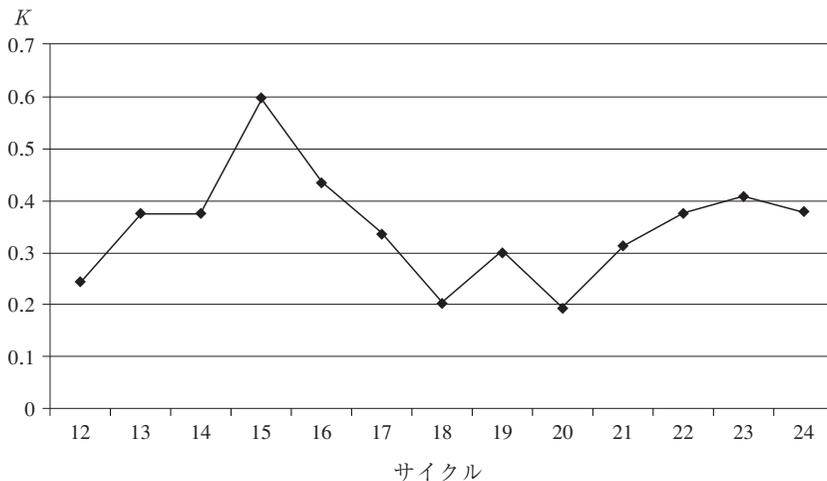


また, それぞれの黒点活動サイクルにおいて, 記録されたすべての黒点の総数に対して, いろいろな面積 Ap を持つ黒点の頻度分布 (図2 Ringnes 1961) を見ると, 面積の小さい黒点ほど頻度は大きく (特に $Ap \leq 10$ msvh において), 極大は 5-6 msvh である。もちろん, これより小さい面積の黒点はより数多く存在すると考えられるが, 寿命が短いのとサイズが小さいために, 日々の観測で十分に検出記録されないであろう。このような極めて微小な黒点の数の補正は不可能である。したがって, 一日黒点として GPR に記録された黒点の数は正確に一日以下の寿命を持つ黒点の総数を表わしているのではなく, その指標値を与えると考えられる。つまり, ここで観測された一日黒点の数が多き日 (年) は微小黒点の出現頻度が高い日 (年) である。

IV 一日黒点の数の永年変化

二日あるいはそれ以上の寿命をもつ黒点に対して、一日黒点はどれくらいの割合で現れるのであろうか。その割合の経年変化を調べる。リングネス (Ringnes 1961) は活動サイクル12から20まで、GPR のデータを使って、各サイクル毎に現れた一日黒点の総数を求め、全黒点数に対する発生割合 K を調べている。図3はリングネスによる K のサイクル毎の変化を示す。

図3；太陽黒点サイクル（11年周期）内の、全黒点数にたいする一日黒点数の割合 K のサイクルの進行にともなう変化（横軸はサイクル番号）



一方、鈴木美好は1970年以降、観測可能な日には白色光による太陽面の写真を撮影するほか、日々の太陽面のスケッチを行なった。彼はこれらの資料をもとに、観測された黒点が現れた日付および消滅した日付を表す黒点消長表を毎月作成している。この表を使うと、欠測の日を除いて、毎月の一日黒点の数、さらに一年間および一サイクルの期間の一日黒点の数を容易に求めることができる。リングネス (1955) が行なったのと同じ基準で一日黒点を選び、サイクル20, 21, 22, 23, および24における K の値を求め、図3に連結し両方の変化を示す。この図から明らかなように、 K 値はサイクル15と23において極大を示す。特に、サイクル15の極大は著しく高い。

また、 K 値に約8サイクルの周期があることが分かる。リングネス (Ringnes 1961) はサイクル12から20までの期間のデータから約80年の周期をもつ K 値の変化を見つけているが、われわれの結果はそれを再確認するものである。さらに、これは黒点11年周期の各サイクルの極大値（振幅）を結んだ曲線から見出されたグライスベルグ (Gleissberg) サイクルの周期（約80年）と一致している。このサイクルは単に黒点数の時間的な変化であるが、図3の K 値の変化は、微小な黒点の割合がそれと逆相関で変化することを示す。すなわち、これは全黒点数の少ないサイクルほど微小黒点を含む割合が大きいことを意味

している。

V 考 察

図3におけるサイクル15の極大はサイクル23の極大にくらべて異常に高く、約1.5倍である。リングネス(1955)が行なった一日黒点の数の数え方とわれわれの方法には大きい違いはないと思われるが、サイクル23における K 値がそれほど高くないのは不思議な感じがする。しかし、ブルドヴァら(Bludova, Obridko and Badelyan 2014)が調べた、面積100 mvh以下の微小黒点の数の全黒点数に対する割合 K の経年変化を見ても、サイクル15の期間に極大を示しているのも、 K の絶対値はともかく、この期間に K が高まりを示したことは疑いないであろう。

イエンスン(Jensen, Nordo and Ringnes 1955)、およびタンドベルグ・ハンセン(Tandberg-Hanssen 1955)、イエンスン、リングネス(Jensen and Ringnes 1955)らは黒点の総面積(半暗部面積) A_p に対する暗部面積 A_u の比 $q(=A_u/A_p)$ に注目して、 q の年平均値の経年変化を調べた。1927-1976年の期間についてGPRのデータを使った結果では、 q の年平均値はサイクル15の期間に著しく増し、極大を示している。また、同じデータを使った、ブルドヴァら(Buldova et al. 2014)による q 値の統計的な解析でも、イエンスンらやタンドベルグ・ハンセンの先駆的な研究結果を再確認している。

一方で、黒点の q 値は総面積 A_p の小さい黒点では大きく、特に一日黒点では著しく大きい(Bludova, Obridko and Badelyan 2014)。従って、サイクル15の期間で平均の q 値が大きいことは、この期間に微小黒点の発生する割合が大きかったこと、平均の K 値が大きかったことを意味する。故に、サイクル15の期間に平均 q 値の増加は K 値の極大で説明できる。サイクル15と23における K 値の極大は約80年間の周期の存在を示し、グライスベルグ(Gleissberg)サイクルと一致している。グライスベルグ・サイクルの極小のあたりでは微小黒点(一日黒点)の発生する割合が増加することを示している。

鈴木(Suzuki 2012)は太陽面上の黒点の動きを観測した太陽自転角速度の測定で、自転角速度の緯度勾配がサイクルによって周期的に変化することを見つけた。一般に太陽の自転角速度は緯度 ϕ によって変わり、 $\omega(\phi)=A-B\sin^2\phi$ で近似的に表され、この係数 A を赤道自転速度、 B を緯度勾配と呼んでいる。一サイクル毎に平均された黒点の自転角速度から求めたこの係数 A と B のうち、 A はサイクルによってほとんど変化しないが、 B 値はサイクル21と22において極小となることが明らかになった。

さらに、プルッキネンら(Plukkinen and Tuomiminen 1998)は B 値がサイクル14においても極小を示すことを報告しているのも、これと鈴木(2012)の結果(サイクル22における極小)を結びつけると、太陽の自転周期の変化にもグライスベルグサイクルと同じ周期があることがわかる。

しかし、太陽の自転速度の緯度勾配が示すサイクル14-22の周期と一日黒点の発生数から得られる周期のサイクル15-23の間に1サイクルの偏差がある。サイクル20以降の q 値

の変化も含めた解析が必要である。

結論として

- (1) 太陽面上で微小黒点（一日黒点）が発生する割合（全黒点数に対する）はサイクル23で極大を示し，リングネス（1981）が示したサイクル15における極大と併せて考えると，微小黒点の数の変化に約80年の周期が認められる。
- (2) サイクル毎の微小黒点の発生する割合はグライスベルグ・サイクルと同期し，グライスベルグ・サイクルの極小のときに微小黒点の発生する割合が増加する。
- (3) 微小黒点の発生数の変化が示す周期と太陽自転速度の緯度勾配が示す周期には1サイクルの偏差が認められる。

参 考 文 献

- Antalova, A. (1971) "The ratio of penumbral and umbral area of sun-spots in the 11-years solar active cycle" *Bul. Astro. Inst. Csl.*, vol 22, No, 6, 352-370.
- Buldova, N. G., Oblidko, V. N. and Badalyan, O. G. (2014) "The relative umbral area in sunspot groups as an index of cyclic variation of solar activity" *Solar Phys.*, vol 289, 1013-1028.
- Edwards, A. W. F. (1957) "The proportion of umbra in large sunspots, 1878-1954" *Observatory*, vol 77, 69-70.
- Hathaway, D. H. (2013) "Curious history of sunspot penumbrae" *Solar Phys.* vol 286, 347-356.
- Jensen, E., Nordo, J., and Ringnes, T. S. (1955) "Variations in the structure of sunspots in relation to the sunspot cycle" *Astrophysica Norvegica* vol 5, No 6, 167-205.
- Nicholson, S. B. (1933) "The area of a sunspot and the intensity of its magnetic field" *Publ. Astro. Soc. Pacific*, vol 8, 51.
- Pulkkinen, P., and Tuominen, I. (1998) "Velocity structure from sunspot statistics in cycle 10 to 21 I. Rotational velocity" *Astron. Astrophys.* vol 332, 755-765.
- Ringnes, T. S. (1961) "Secular variations in short-lived sunspots" *Astrophysica Norvegica* vol 8, No. 2, 17-51.
- Ringnes, T. S. (1981) "The eighty year period in short-lived sunspots" *Pub. Inst. Theor. Astrophys. Oslo*, Rep. No. 52.
- Ringnes, T. S. (1984) "On the structure of small sunspots" *Publ. Inst. Theor. Astrophys. Oslo*. Rep. No 62.
- Suzuki, M. (1998) "The rotation of sunspots during activity cycle 22" *Solar Phys.* vol 178, 259-265.
- Suzuki, M. (2012) "The rotation of sunspots during activity cycle 23" *Solar Phys.* vol 278, 257-
- Suzuki, M. (2014) "On the long term modulation of solar differential rotation" *Solar Phys.* vol 289, 4021-4029.
- Tandberg-Hanssen, E. (1955) "A study of the penumbra-umbra ratio of sunspot pairs" *Astrophysica Norvegica*, vol 5, No.7.
- 鈴木美好, 久保田諄 (2011) "太陽活動サイクル23における太陽の自転速度", 『大阪経大論集』, 第62巻, 第2号, 105-115.