

太陽黒点極少期における IMF セクター構造と地磁気活動度との関係

永井正男

概要

著者はさきに Explorer 35, 41, 43, 47 の惑星間空間磁場の資料を使い、1970~1972年の太陽黒点極大期附近におけるセクター構造と地磁気嵐および地磁気活動度との関連について調べた。

ここでは、Thule および Vostok の地上の資料を使い、1964~1967年および 1972 July~1975 June の太陽黒点上昇期および下降期における二つの極少期附近について調べた結果、次のことが判明した。

太陽黒点上昇期においては4セクターを示す。地磁気活動度は away セクターの方が toward セクターよりも大きい。またセクター境界の通過後第1日目が最も大きく、日数がたつに従って急速に減少する。このパターンは太陽黒点極大期附近のものとはほとんど同じである。

しかし太陽黒点下降期においては2セクターを示し、地磁気活動度は away よりも toward の方が大きくなる。またセクター境界の通過後3日目に活動度がピークを示し、割合高い活動度が数日持続する。とくにこの傾向は toward で顕著にあらわれ、太陽黒点上昇期とは明らかにパターンを異にしている。

1976年の極少期から新しいサイクルへの移行の段階では2セクターと4セクターの特徴が入り混ったパターンを示し、やや複雑である。

SSC とセクター境界との関係は、4セクターではセクター境界の第1日目で発生頻度が最も多く、2セクターでは2日目にピークを示している。

Sg とセクター境界との関係は、4セクターでは太陽黒点極大期・極少期の区別なく、セクター境界の通過前後 $-2 \sim +2$ 日で、ほぼ一定した割合幅広い極大をもった発生頻度を示す。これに反し、2セクターでは SSC と同様セクター境界の影響を明瞭にうけ、セクター境界の通過後2日目にピークを示す。

以上のように27日の回帰を示す磁気嵐は SSC, Sg とともにセクター境界付近で発生頻度が大きい。これはセクター境界と一緒に回転している Interplanetary Shocks および Magnetohydrodynamical Turbulence が存在することを暗示している。

§1. は し が き

地磁気嵐の発生源の一つとして、太陽面が静穏な時 M 領域なるものが Bartels (1934)¹⁾ によって提唱されて来た。

Hundhausen (1972)²⁾ は太陽磁場の構造とコロナの拡がりの速度との関係について、数人の研究者の論文を review し、閉じた磁力線上のコロナは低速度であり、高速度の太

陽風の流れは開いた磁場の構造に起因することを示した。

Gulbrandsen (1973)⁹⁾ は $\lambda 5303$ の強い放射が閉じた磁力線の構造と結びつき、高い密度のコロナ領域から発することをたしかめた。そして彼 (1975)⁴⁾ は、“M 領域が開いた磁場の中心部又は Coronal hole と同一であるだろう”ということを経験的に結論した。

Coronal hole はコロナの根元が低温で低密度の領域である。それはまた開いた磁場の形状に結びつけられる。従って閉じた磁場の構造を示した高密度の領域とは、全く正反対の特性をもっている。

W. M. Neupert (1974)⁵⁾ は地磁気活動度の明瞭な増大が (A_p がほとんど2倍に上昇する) 大きな Coronal hole の中央子午線通過の後2~3日でおこることを見出した。これは高速度の流れが地球に到着する時間である。また彼は屢々回帰して長く生きのびている大きな Coronal hole は27日の回帰を示す地磁気擾乱 (Bartels, 1934) すなわち “M-領域” に対して必要条件を満足するようにあらわれることを述べている。

Hirshberg と Colburn (1973)⁶⁾ は太陽風とセクター境界を横切る磁気圏との間の複雑な相互作用を議論した。そして彼等は地磁気活動度の増加は、速度の上昇によって生ずる増大したエネルギーの入力と、セクター境界の後の領域において見出される南むきの惑星間空間磁場に帰せられることを暗示した。

著者は” さきに 1970~1972年における惑星間空間磁場のセクター構造と地磁気活動との関係を調べた結果、セクター境界の通過後第1日目が最も大きく、日数がたつに従って急速に減少すること、また away セクターの方が toward セクターより活動度が大きいことを述べた。

ここでは特に、太陽黒点極少期における地磁気嵐および地磁気活動度とセクター構造との関連について述べ、さきに得られた結果と比較検討する。またこれらの結果と Coronal hole との関連について私見を述べる。

§2. 太陽黒点周期と SSC および Sg の発生頻度

第1図には太陽黒点周期 NO. 19, No. 20 における太陽黒点相対数 (破線)、SSC (実線) および Sg (鎖線) の年発生頻度が示されている。SSC は IAGA Bulletin にのっているものを採用し、Sg については柿岡における水平分力の Storm Range が 50 gammas 以上のものを採用している。SSC の発生頻度と太陽黒点相対数との間にはよい相関があり、1924~1976年の 5 Solar cycles における相関係数は 0.87 で、SSC の年発生回数を y とし、太陽黒点相対数を x とすると、回帰直線は $y=0.186x+4.0$ で表わされる。

しかしこれを詳細にみると、太陽黒点周期の極少期において、とくに1962~1965年では太陽黒点相対数の減少に比例して SSC の発生回数は減少していない。しかもこの期間は太陽フレアの回数が極端に少ない。従って SSC には太陽フレアにともなって発生するものと、極少期において太陽フレアとは全く無関係に発生する M-領域によるものとの二つに大別できる。

また Sg と太陽黒点相対数との関係は太陽黒点の下降期の間から極少期にかけて多く

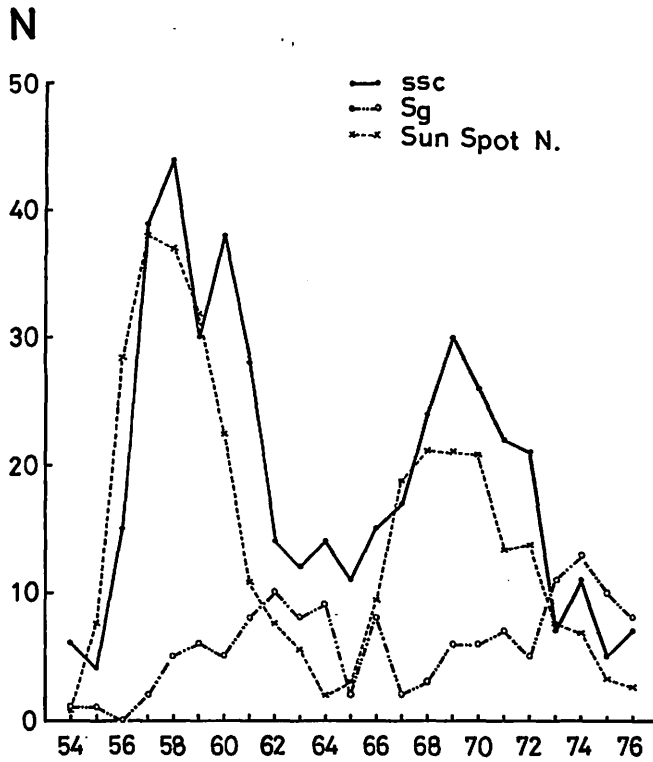


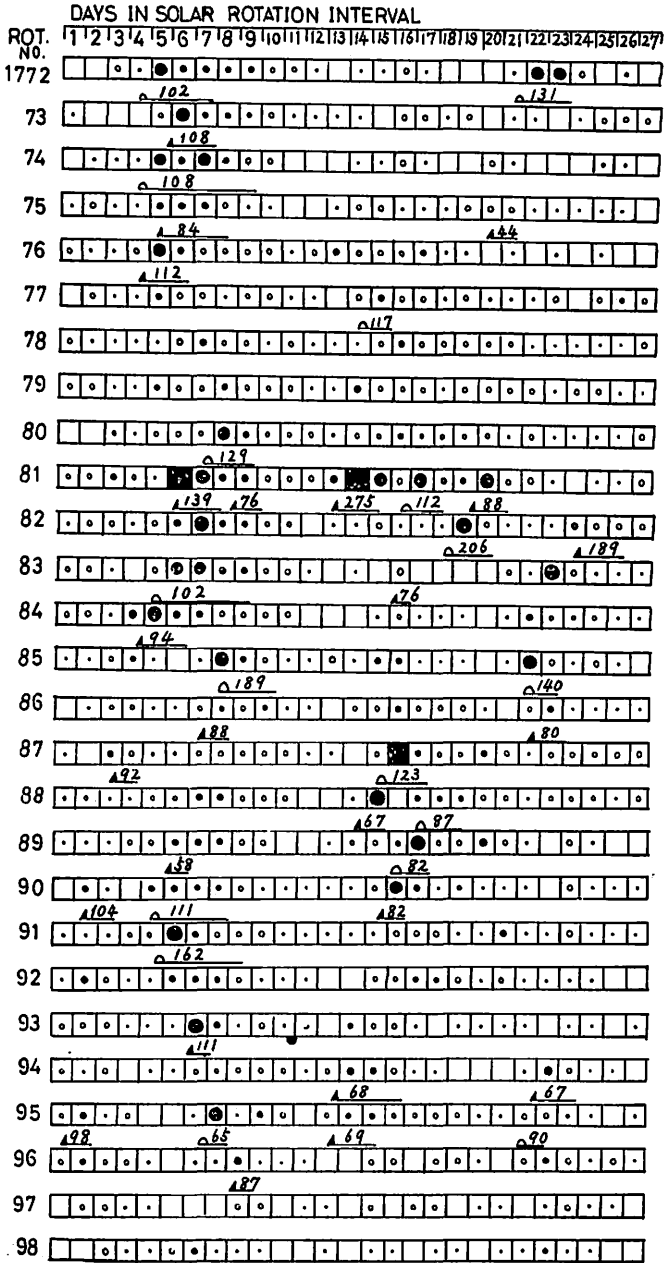
Fig. 1. Comparison of annual occurrence frequencies of geomagnetic storms and relative sunspot numbers for the period of 1954 to 1976.

発生しており、特に1962、1974年で極大を示している。そして Sg の発生回数の多い期間で27日の回帰性は明瞭にあらわれている。

§3. 太陽黒点極少期における SSC および Sg の 27 日回帰性

第2図～第3図には太陽黒点の上昇期と下降期における地磁気活動度を見るために1963～1964年 (solar rotation no. 1772～1798) および 1975～1976年 (solar rotation no. 1934～1961) の2つのグループにおける柿岡の Σk の大きさを6段階にわけ solar rotational intervals に従って図示した。また地磁気嵐の27日回帰性をみるために SSC (▲) と Sg (○) にわけて大きさと継続時間が下段に示されている。

これらを通観してわかることは、Sg だけでなく SSC も回帰していることである。既に述べたように太陽黒点極少期においては黒点数の減少する割合に比べ、SSC の数は減少していない。そしておそらくこれは M-領域に起源を求めなければならない種類のものであろう。



ΣK 0~6 7~13 14~20 21~27 28~33 34~

Fig. 2. Daily geomagnetic K-index diagram for 1963~1964 (solar rotation no. 1772~1798), a period of low solar activity arranged after solar rotational intervals.

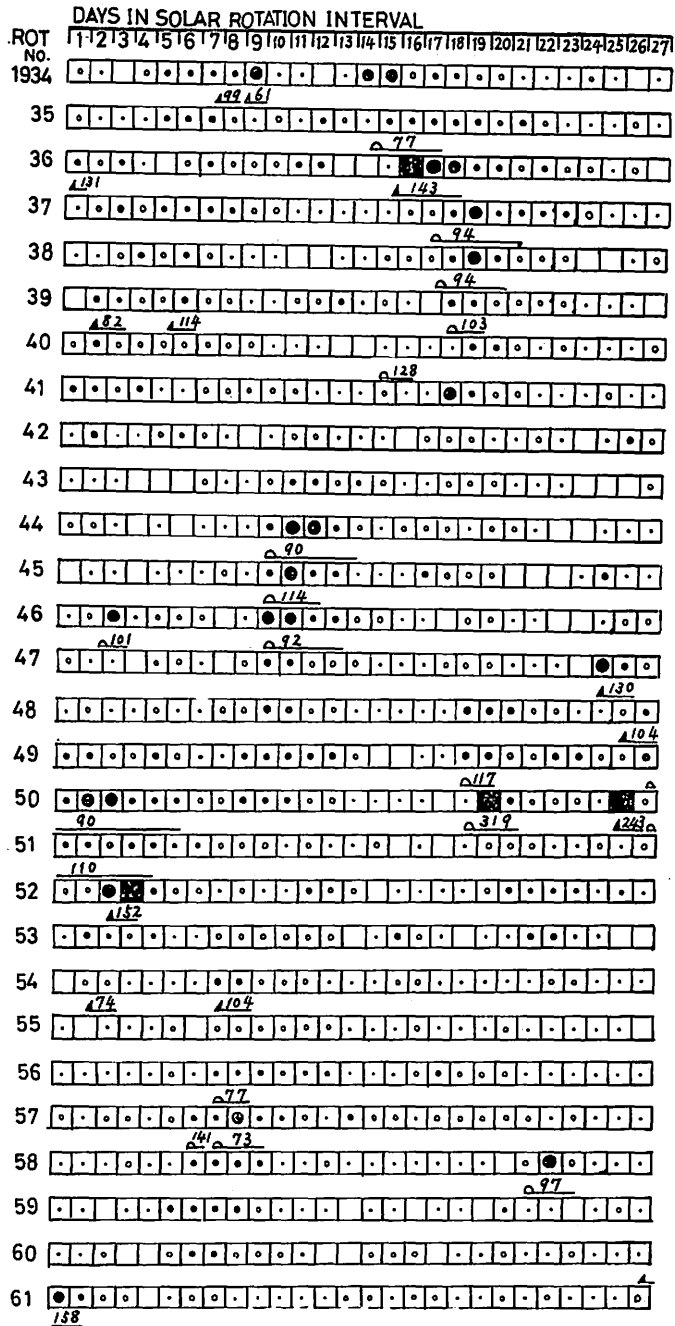


Fig. 3. Daily geomagnetic K-index diagram for 1975~1976 (solar rotation no. 1934~1961), a period of low solar activity arranged after solar rotational intervals.

また回帰嵐の大部分は 100 ガンマー程度の大きさであるが、1976年に見られるように太陽フレアが観測されていないにもかかわらず 243 ガンマーの SSC が観測されている。また Sg でも 319 ガンマーという大きな嵐が観測されている。これらはいずれも特別な例であるが、回帰嵐の全てが必ずしも 100 ガンマー程度の大きさのものばかりでないことを注意する必要がある。

Burton⁹⁾ 等は Explore 33, 35 の資料を使い、太陽風の速度 (V km/s)、密度 (n /cm³) および惑星間空間磁場の南北成分 (B_z gammas) から太陽風の dynamic Pressure $P = nV^2 \cdot 10^{-2}$ eV/cm³ および dawn-dusk electric field $E = VB_z \cdot 10^{-8}$ mV/m の 2 つの要素の時間的変動を求め、これに Ring current による decay rate を適合させて、地磁気嵐の D_{st} 変化を定量的に予測した。そして $D_{st} \leq 120$ ガンマーの嵐について、かなりよい近似を得ている。おそらくこの方法を回帰性嵐に適用すれば、地磁気嵐の形態も含めて、かなりの範囲の嵐が太陽風のパラメーターおよび惑星間空間磁場の変動と結びつけて定量的に論ずることが可能であろう。

しかしここではとくに惑星間空間磁場のセクター構造と地磁気活動度との関連について調べることにする。

§ 4. IMF のセクター構造と ΣK

第 4 図には 1964 および 1965 年における ΣK と IMF のセクター構造との関連を示してある。1964, 1965 年はいずれも 4 セクターを示しており、セクター境界の第 1 日或いは第 2 日目に ΣK の極大を示している。また 1965 年では各セクターの中間で地磁気活動度が小さくなっている。第 5 図には 1973, 1974 年における ΣK と IMF のセクター構造との関連を示してある。1973, 1974 年はいずれも 2 セクターの構造を示している。

1974 年は 2 セクターにおける一つの典型的なパターンを示している。すなわち away セクターではセクター境界の 2 日目に極大を示し、toward セクターでは 3 日目に極大を示して、高い活動度が数日持続するのが見られる。

一方 1973 年では away, toward とともにセクター境界の第 1 日目が大きく次第に活動度の減少が見られるが、セクターの中間付近で再び両セクターとも地磁気活動度の増大するのがみられる。すなわちセクター境界の第 1 日或いは第 2 日目で地磁気活動度が極大になるのが通常のパターンであることから考えると、むしろ 4 セクターのパターンに属する。そしてこれは 1972 年が 4 セクターであったことから考え、4 セクターから 2 セクターへの過渡的なパターンを示しているように思われる。

§ 5. セクター境界からの日数と ΣK

第 6 図にはセクター境界からの日数と ΣK の大きさの関係が示される。

左側は 4 セクターを示した 1964~1967 年のものでセクター境界の第 1 日目で最も大き

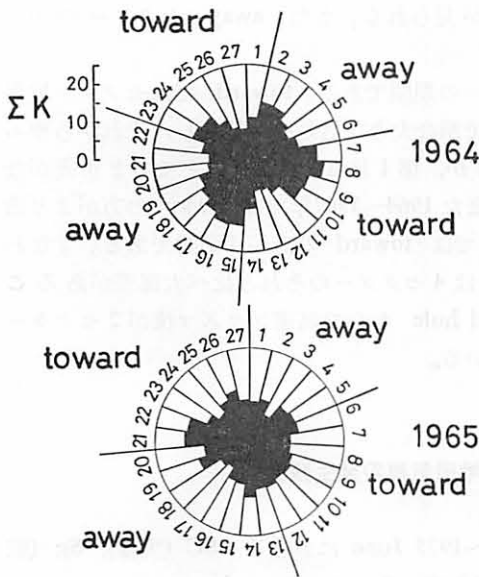


Fig. 4. Distribution of the daily sum of K -index at Kakioka for the interplanetary sector structure in the beginning of solar cycle 1964 and 1965.

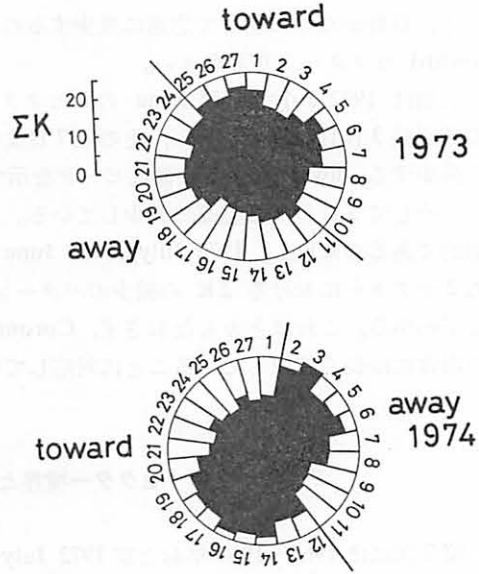


Fig. 5. Distribution of the daily sum of K -index at Kakioka for the interplanetary sector structure in the ending of solar cycle 1973 and 1974.

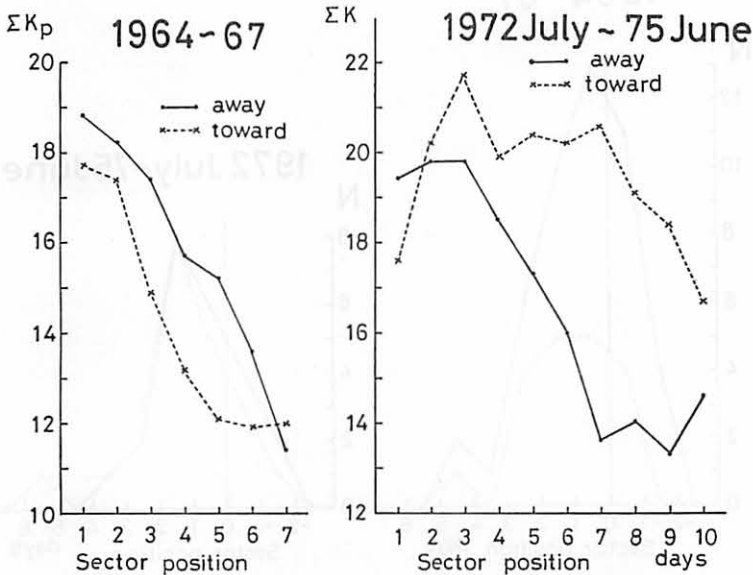


Fig. 6. Variation of ΣK at Kakioka after the passage of the sector boundary. The abscissa represents position within the sector measured in days, as the sector sweeps past the earth.
 left hand; 1964~1967
 right hand; 1972 July~1975 June

く、日数がたつに従って急速に減少するのが見られる。また away セクターの方が toward セクターよりも大きい。

右側は 1972 July~1975 June の 2 セクターの期間である。toward ではセクター境界の通過後 3 日目に極大を示し、その後 7 日まで割合大きな活動度が持続し、それからやっと減少する。away では 3 日後にピークを示すが、第 1 日目と第 2 日目とであまり差がない。そして 3 日目から急速に減少している。また 1964~1967 年では away の方がより活動的であるのに反し、1972 July~1975 June では toward の方が活動的である。すなわち 2 セクターにおける ΣK の減少のパターンは 4 セクターのそれと比べ大部差があることがわかる。これはとりもなおさず、Coronal hole からの高速プラズマ流が 2 セクターの場合には長く持続していることに対応している。

§ 6. セクター境界と地磁気嵐の発生頻度

第 7 図には 1964~1967 年および 1972 July~1975 June における SSC (実線), Sg (破線) の発生頻度とセクター境界との関係が示されている。

左側の 1964~1967 年ではセクター境界の第 1 日目で SSC の発生頻度はピークを示す。Sg ではセクター境界の通過前 1 日から通過後 3 日までほぼ同じ発生頻度を示している。

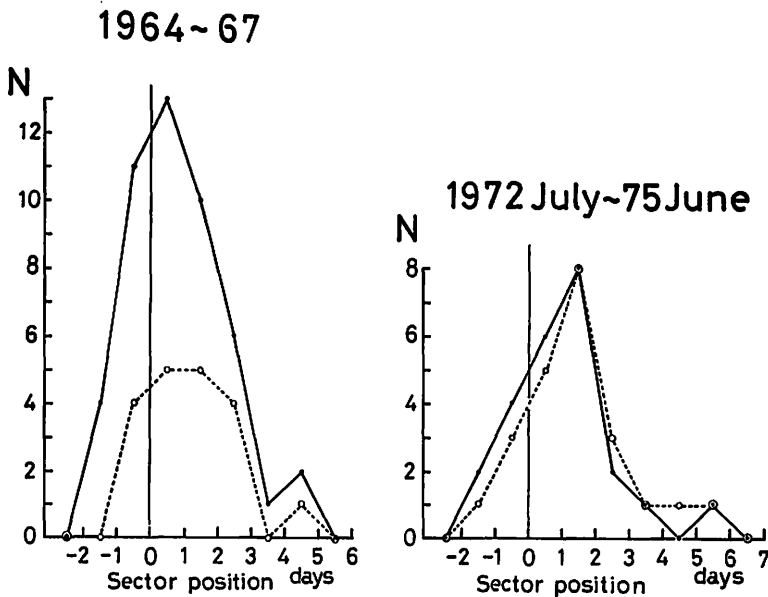


Fig. 7. Occurrence frequency of sudden commencement and gradually commencing storms within a sector. The abscissa is reckoned from the time of the crossing of a sector boundary.
 left hand; 1964~1967
 right hand; 1972 July~1975 June

これに反し、1972 July~1975 June では SSC, Sg ともセクター通過後2日目にピークを示し、差が見られない。すなわち2セクターを示す太陽黒点周期の下降期の中から極少にかけて、27日回帰性の明瞭な期間では、Sg の発生頻度が高く、セクター境界による影響が SSC とほとんど同じであることがわかる。これはまた SSC も Sg も27日の回帰を示す磁気嵐はいずれも M-領域或いは Coronal hole に発生源をもつことを意味しているように思われる。

§7. 太陽黒点極大期近くのパターンとの比較

第8図には1970~1972年における太陽黒点極大期近くの4セクターの期間における地磁気嵐とセクター境界との関係を示す。このパターンは1964~1967年と全く同じ傾向を示している。

また第9図には1970~1972年の ΣK とセクター境界との関係を示す。セクター境界から第1日目が最も大きく、日数がたつにつれて急速に減少している。また away の方が toward よりも活動的である。そしてこれらの傾向は全く1964~1967年と同じであり、4セクターにおける典型的なパターンであることが裏づけられた。

第10図には太陽黒点周期 No. 20 から No. 21 への過渡的状态である1976年におけるパターンが示される。セクター構造は2セクターであるが、 ΣK のパターンは必ずしも2

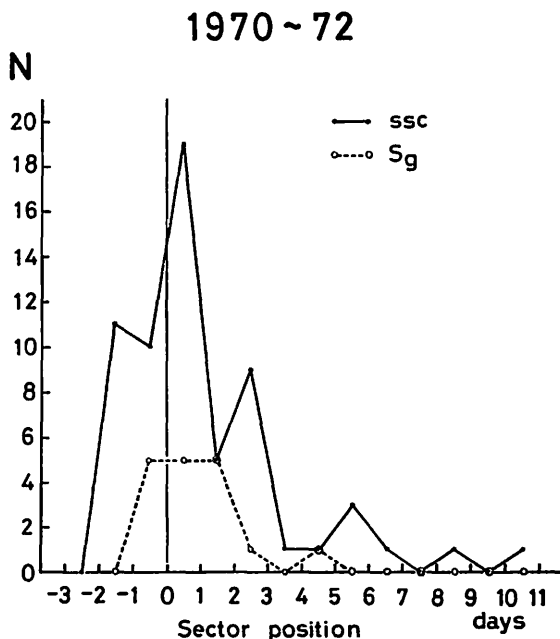


Fig. 8. Occurrence frequency of sudden commencement storms and gradually commencing storms within a sector for the period of 1970 to 1972.

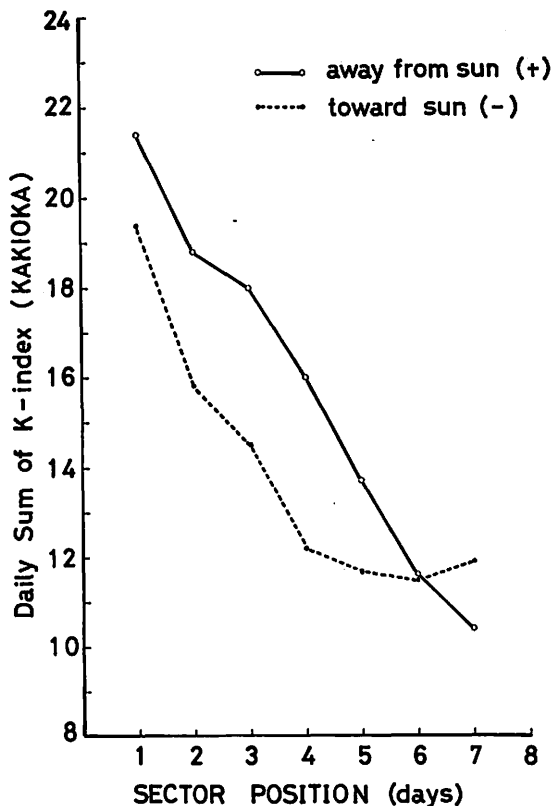


Fig. 9. Variation of ΣK at Kakioka after the passage of the sector boundary for the period of 1970 to 1972.

セクターのパターンを示していない。例えばこの期間では away の方が toward よりも活動度が大きい。しかも away セクターではセクター境界の第2日目までピークを示し、日数がたつに従って急速に減少する。これら2つの傾向はむしろ4セクターに近い。一方 toward ではセクター境界の第3日目までピークを示し、ややおくれる。これは2セクターの傾向を維持しているように思われる。またセクター構造の中間で ΣK が小さくなっているのが特徴的である。

§8. Coronal hole とセクター構造に関する二、三の問題点

最近コロナの中に周囲より冷たい領域が存在し、これが数回転持続することがわかった。この領域は太陽大気的基本的構造の一つとみなされ、Coronal hole と呼ばれているが、一般に細長い長靴のような形状を示して極から赤道にむかってのびており、その温度は周囲より数十万度低い。前にものべたように Coronal hole からは高速の太陽風が吹き出している。これは Coronal hole が中央子午線を通過して2~3日後に地磁気活動度の大き

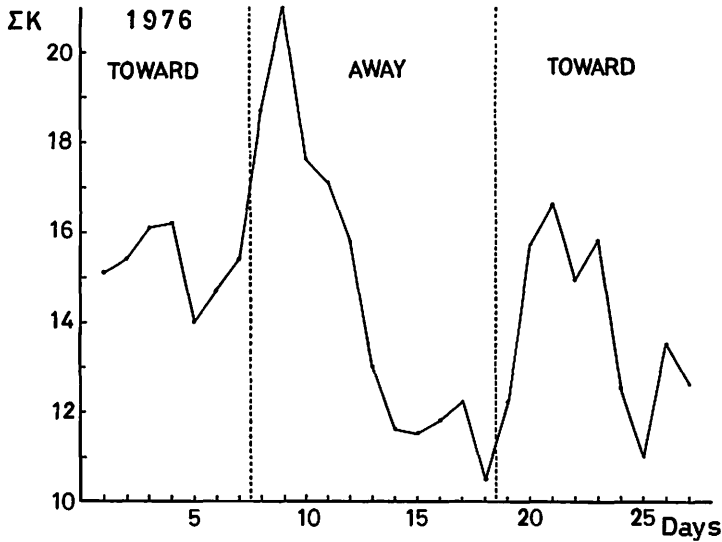


Fig. 10. The average variation of ΣK at Kakioka with respect to IMF sector boundaries. The abscissa represents the solar rotational intervals measured in days and the dashed vertical line shows the sector boundary.

きなピークを作り出していることによって証明される。

Heath (1975) 等¹⁰⁾によると、セクター構造と Coronal hole とは関係があり、セクター境界の位置を規準にとって経度方向にコロナの EUV Emission の強度分布をプロットすると、太陽風の transit time を考慮し、1セクターの平均的長さを 13.5 日とすると、Coronal hole はほぼセクターの中央にあり、逆にセクター境界付近は Emission の強い領域にあたるのがわかった。さらにセクター構造と地球付近で観測される高速度太陽風の出現頻度を同様にプロットすると、やはり高速度太陽風は統計的にセクターの中央に存在することがわかった。

しかしこの結果は著者の解析結果とは必ずしも一致しておらず、特に 4セクターの場合のセクター境界の第 1 日目に地磁気活動度が最大であることの説明が困難である。

著者は Vela 3 (1965 July~1967 Nov.), Explorer 33 (1966 July~1967 Aug.) の Solar wind velocity の資料を使い、セクター構造との関連を調べてみたが、(詳しい結果は技術報告に発表予定)、いずれも 4セクターを示しセクター境界の第 1 日~第 2 日で高速度があらわれており、 ΣK とセクター構造との関連とはほぼ一致していることがわかった。

また Patterson (1973)¹¹⁾によれば、人工衛星の資料を使ってセクター構造を決定した場合は away と toward で地磁気活動度の差はほとんどないが、Thule 或いは Vostok の地磁気日変化から決定した場合は、toward に比べ away で著しく大きいことを結論している。

しかし既に述べて来たように、著者の解析によれば人工衛星による場合も Polar cap における地磁気日変化から決定した場合も同様の結果を示し、明らかに 4セクターの期間に

おいては away の方が toward より大きな地磁気活動度を示している。

§9. むすび

以上太陽黒点周期の No. 20 における始めと終りの二つの極少期と極大期とを比較してセクター構造と地磁気嵐および ΣK との関係を調べた結果、次のことがわかった。

- ① 太陽黒点の上昇期および極大期の4セクターの期間に見られるように、away の方が toward より活動度が大きく、セクター境界の通過後第1日目が最も大きく、日数がたつにつれて急速に減少する典型的なパターンが見られる。
- ② 太陽黒点周期の終りに近い極少期では2セクターを示す。この期間は4セクターのパターンと異なり、セクター境界の通過後3日目に活動度のピークを示す。また割合高い活動度が数日持続し、その後になってやっと減少する。この傾向はとくに toward で顕著である。また toward の方が away よりも活動度が大きいことが2セクターにおける一般的な特徴である。
- ③ 以上の典型的なパターンの他に過渡的な状態が存在する。4セクターから2セクターに移る時、或いは2セクターから4セクターに移る時に見られ、両者が混合されたパターンを示すが、特に1976年にみられるように新しい周期に移行する際のパターンはやや複雑である。
- ④ 2セクターの期間は S_g の発生頻度の多い期間と一致する。セクター境界の影響もシャープで、セクター境界の通過後第2日目にピークを示す。これに反し4セクターの期間では太陽黒点極大期・極少期の区別なく、セクター境界の通過前後の4日間に割合 broad な発生頻度を示す。
- ⑤ SSC とセクター境界との関係は、4セクターではセクター境界の第1日目で発生頻度が最も多く、2セクターでは2日目にピークを示している。
- ⑥ セクターの境界付近で SSC および S_g の発生頻度が大きいことは、セクター境界と一緒に回転している Interplanetary shocks および Magneto hydrodynamical turbulence が存在することを暗示している。

終りにこの研究に際し、機会を与えられ発表を許可された地磁気観測所長河村諱氏に厚く御礼申し上げます。また終始御指導をいただき、Solar wind velocity の資料を送付いただいた東京大学宇宙航空研究所西田篤弘博士ならびにこの研究に興味を示され、有意義なコメントをいただいた東北大学齊藤尚生博士、名古屋大学村山喬博士に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Bartels, J. (1934): Twenty-Seven day recurrences in terrestrial-magnetic and solar activity, 1923-1933, J. G. R. 39, 201.
- 2) Hundhausen, A. J. (1972): Coronal Expansion and Solar Wind, p. 162-168, Springer, New York.

- 3) Gulbrandsen, A. (1973): Relation between Coronal λ 5303 Intensity, Recurrent Geomagnetic Storms, and Solar Sector Structure, *J. G. R.* Vol. 78, No. 22, p. 4787-4791.
- 4) Gulbrandsen, A. (1975): The Solar M-region problem—an old problem now facing its solution? *Plant. Space Sci.* Vol. 23, p. 143-149.
- 5) Neupert, W. M. and V. Pizzo (1974): Solar Coronal Holes as Sources of Recurrent Geomagnetic Disturbances, *J. G. R.* Vol. 79, No. 25, p. 3701-3709.
- 6) Hirshberg, J. and D. S. Colburn (1973): Geomagnetic activity at sector boundaries, *J. G. R.* Vol. 78, 3952.
- 7) Nagai, M. (1977): Relationship between Interplanetary Sector Structure and Geomagnetic Storm, *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, Vol. 17, No. 1, p. 27-47.
- 8) Nagai, M. (1977): Geomagnetic disturbances related to the solar rotation cycles, *RISRJ* (in press).
- 9) Burton P. K., McPherron R. L. and C. T. Russell (1975): An empirical Relationship between Interplanetary Condition and Dst, *J. G. R.* Vol. 80, No. 31, p. 4204-4214.
- 10) Heath, D. F., J. M. Wilcox, L. Svalgaard and T. L. Duvall (1975): Relation of the observed far ultraviolet Solar irradiance to the solar magnetic sector Structure, *Solar physics*, 45, p. 79-82.
- 11) Patterson, V. (1973): Forty years of implied interplanetary magnetic field data related to the geomagnetic index Ap, *EOS Trans. AGU*, 54, 447.

Relation between Interplanetary Sector Structure and Geomagnetic Activity near the Minimum of Sunspot Cycle

Masao NAGAI

Abstract

Effects of interplanetary sector structure on geomagnetic storm have been investigated for the minimum of sunspot cycle.

The average structure of geomagnetic activity with respect to a sector boundary has been investigated by use of the superposed epoch technique.

In the present study, ΣK at Kakioka is increased significantly for a day after the Passage of the sector boundary and decreased very rapidly from the second day after reaching peak value for the period of 1964 to 1967. On the contrary, during the period of 1972 July to 1975 June, ΣK is increased for 3 days after the passage of the sector boundary and then decrease rapidly after reaching the maximum in away sector. On the other hand, in toward sector, activity of same degree continues until 7 days after the passage of a sector boundary. It is noticeable fact that there is a great difference between 4 and 2 sectors in the beginning and ending of solar cycle, respectively.

The 27-day recurrence of geomagnetic storm is clearly seen not only gradually commencing storm but also sudden commencement for the period of sunspot minimum.

Especially, sudden commencement has occurred near the sector boundary and it has been observed to reach a maximum occurrence frequency after the passage of a sector boundary. This suggests that the sector boundary is accompanied by corotating shocks and

magnetohydrodynamical turbulence. Therefore, a sudden commencement is not necessarily associated with a flare-induced shock wave, but may also be caused by a corotating sector boundary.

All these results lead to the conclusion that most of the geomagnetic disturbances can be explained by the interaction between corotating distortions in the solar wind connected with the sector structure and the magnetosphere.