

磁気嵐急始部(SC)に伴う磁気圏内擾乱域の発生と伝播について

発表者：M2 新堀 淳樹 (電磁気)

1. 序論

1-1. SSC 及び SI の定義

SSC 及び SI は太陽表面のフレアなどの爆発現象による太陽風中の衝撃波や不連続面が地球磁気圏を急激に圧縮する現象であり、特に中低緯度地域において地磁気の水平南北成分 (H 成分) が 1-10 分以内の間で急に増加する現象として観測される。ここで、SSC は Storm Sudden Commencement の略称であり、この名の示すようにこの現象の後に磁気嵐を伴う。一方、SI は Sudden Impulse の略称であるが、この現象の後に磁気嵐を伴わない。これら SSC と SI を総称して単に SC (急始) という。

1-2. SC に伴う Pc1 脈動の励起と変調

Pc1 脈動に対する SC 効果を最初に見出したのは、Tepley and Wentworth (1962) である。その後、Heacock and Hessler (1965) や Kokubun and Oguchi (1968)、Hirasawa (1981) などによって詳しく調べられた。図 1 は昭和基地で観測された SC 効果の典型例であり、柿岡での地磁気 H 成分の記録とともに示してある。

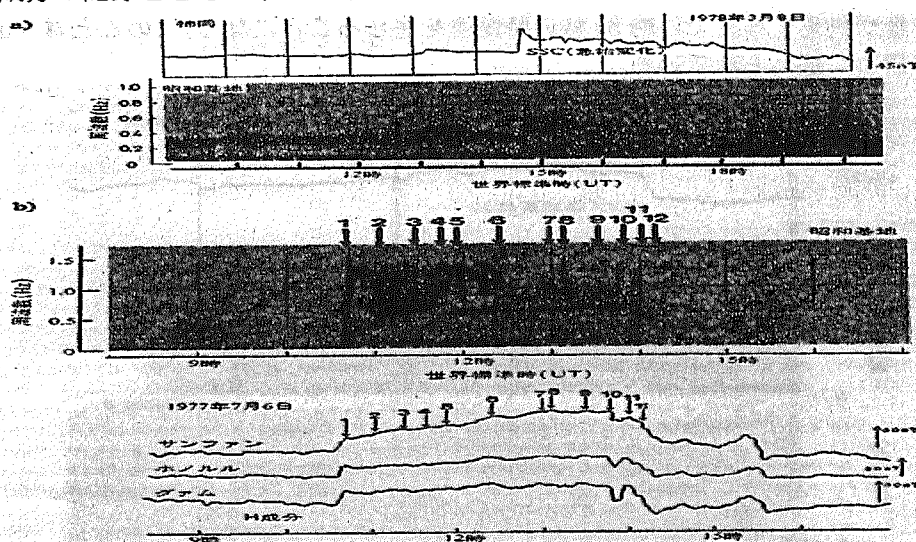


図 1. SC に伴う Pc1 脈動スペクトルの変化。a) 1978 年 3 月 8 日 14 時 39 分 UT に起こった SC に伴う Pc1 脈動の周波数変化。b) 1977 年 7 月 6 日 10 時 37 分 UT の SC に伴って発生した Pc1 脈動。図中の矢印は低緯度地域の地磁気変化から推定された磁気圏の圧縮と膨張の時刻と Pc1 脈動の強度変化の対応関係を示す (Hirasawa, 1981)。[南極の科学からの抜粋]

この例では、14 時 39 分 (UT) に起こった SC に伴いそれまで長時間続いていた Pc1 の中心周波数が 0.25Hz から 0.5Hz に急に上昇し、スペクトル強度も増大した。また、図 1b は SC に伴って新たに Pc1 が誘発したものである。Pc1 の周波数上昇と強度変調は、図の数字が示すように H 成分の微小変動に対応しており、数字の 6 の部分にそれが顕著に現れている。

ここで注目すべき点は、 $\Delta H < 0$ のときは Pc1 脈動がほとんど消えてしまうことである。これは、磁気圏が膨張し磁場強度が減ると SC 効果とは逆の現象になることを示している。また、SC 効果は磁気地方時 6 時ごろから 21 時ごろまでの昼間側で観測され、特に 12 時から 15 時に SC が起こる場合は、ほぼ 100% の確率で Pc1 の強度変調が観測されることを報告している。このような事実は、昼間側の磁気圏は常に Pc1 脈動が起こりやすい条件になっており、磁場変化に伴うプロトンのフラックスや速度分布の異方性の変化に応じて容易に Pc1 脈動が誘発されることを示している。

1-3. SC に伴うホイッスラー波の励起と変調

(i) 地上観測

ホイッスラー波 (VLF コーラス) に対する SC 効果を最初に見出したのは、Morozumi (1965) である。その後、Kokubun and Oguti (1968) によって詳しく調べられた。ホイッスラー波に対する SC 効果は、Pc1 脈動に対するものと同じで周波数の上昇と強度増加が SC に伴って起こる。図 2 は、昭和基地で観測された VLF エミッションに対する SC 効果の一例である。Pc1 脈動の場合と異なる重要な特性は VLF エミッションの強度増加が SC を示す磁場変動よりも 30 秒以上早く現れることである。この時間差は、圧縮性の電磁流体波によって変調を受けるホイッスラー波の発生源が外部磁気圏にあることを間接的に示す証拠として考えられる。つまり、昭和基地付近を通る磁力線に沿うアルフベン波の平均速度は、約 2000 (km/sec) でホイッスラー波の平均速度の 1/20-1/30 であるため、SC による VLF エミッションの発生が L=6-7 の磁気赤道面付近で起こると仮定すると、ホイッスラー波が地上に到達してからアルフベン波が到達するまでに約 30 秒の時間差を生じることになる。このことは、Gail [1990] によって詳しく述べられている。

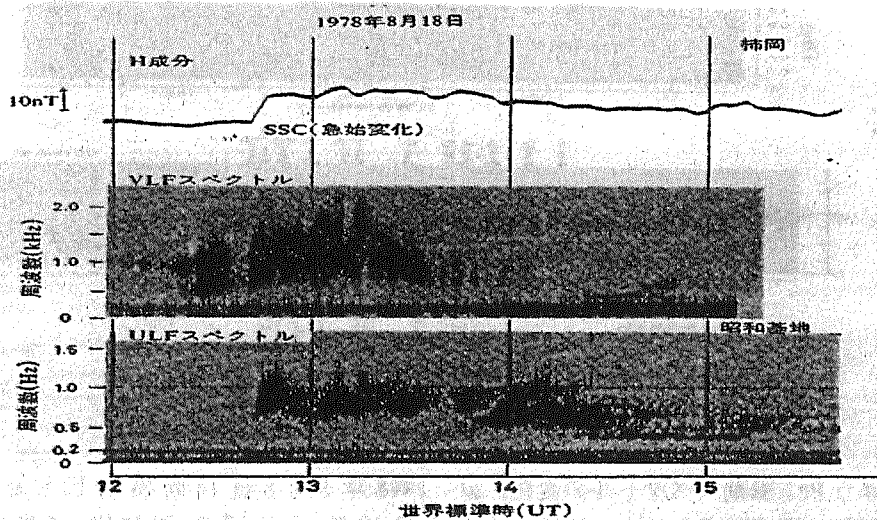


図 2. VLF エミッションと Pc1 脈動に対する SSC 効果の同時観測例。上段は栂岡の地磁気 H 成分変化を、中段と下段は昭和基地で観測された VLF エミッションと Pc1 脈動のスペクトルを表す。SC の発生時刻は 1978 年 8 月 18 日 12 時 42 分 UT である。[南極の科学からの抜粋]

(ii) 衛星観測

SC に伴うプラズマ波動励起にかかわる衛星観測の報告例は、少なくなるが、準極軌道衛

星 DE1 (Gail and Inan, 1990) や静止軌道衛星 GEOS2 (Kokubun 1983, Mullayarov and Yachamenev 1990)、赤道衛星 CRRES (Wilson et al. 2001) での報告がある。DE1 衛星における報告では、1982 年から 1984 年までの 14 例についてプラズマ波動の電界強度、周波数、発生場所などを検討し、ローカルタイムの依存性がないこと、そして、主として出現領域は L 値に対して 3 から 6 の限られた範囲で観測されることを示している。しかしながら、DE1 衛星の時間分解能が 32 秒であること、観測例が 14 例と数が少ないために SC に伴う内部磁気圏内における擾乱の伝播速度を求めるには至っていない。ここで、図 3 には DE1 衛星で観測された SC に伴うプラズマ波動の観測例が示されている。さらに、SC に伴い AKR も出現していると報告しているが実際のところよく分かっていない。

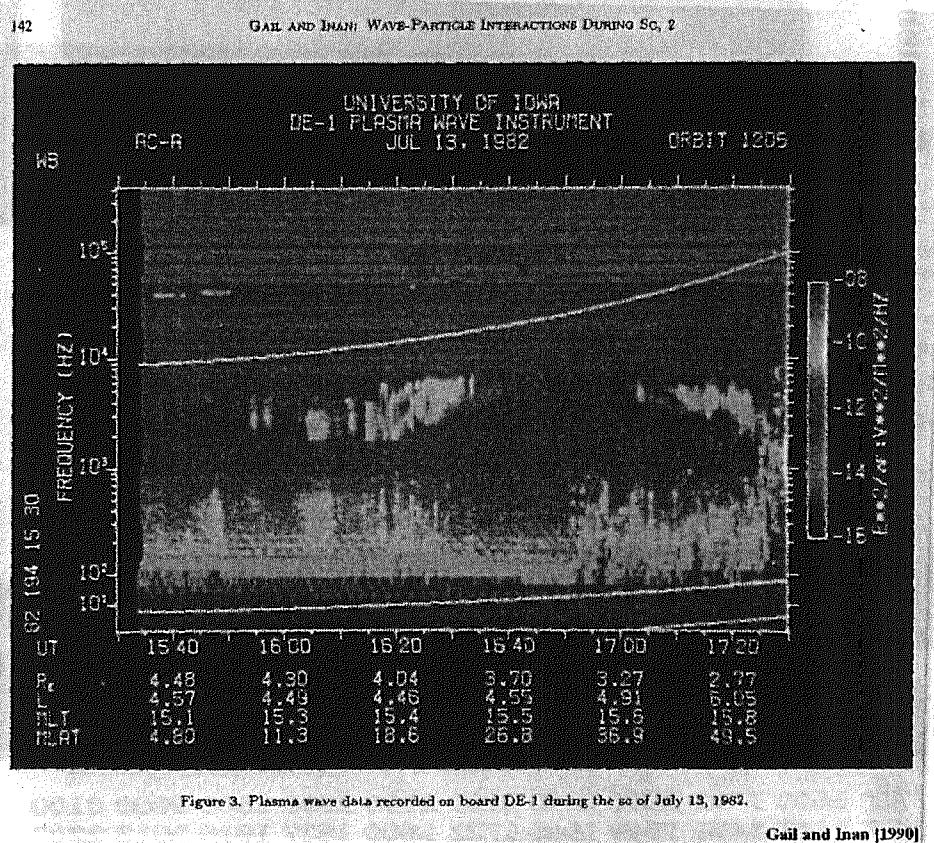
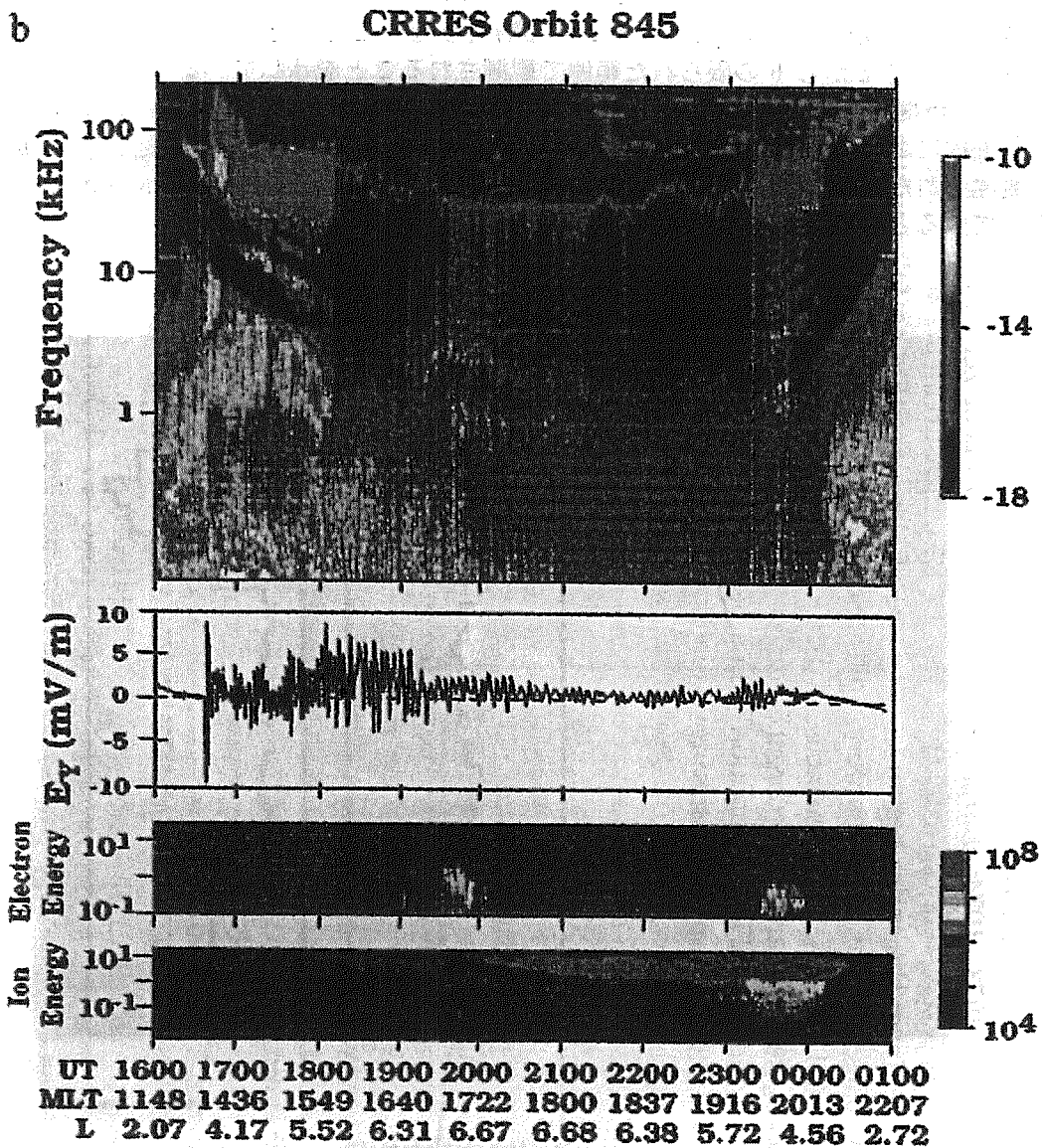


図 3. DE1 衛星観測による SC に伴うプラズマ波動励起。SC に伴い、電子サイクロトロン周波数以下の波動の強度が上昇している。

一方、GEOS2 における報告では、夜側の磁気圏内で SC に伴い、バースト状の波動が 1~3 分間観測されたことや粒子のピッチ角分布が変化したことを報告し、速進モードの磁気音波がこの波動や粒子のピッチ角変化を引き起こしたと結論づけているが、実際のところよく分かっていない。また、CRRES における報告でも SC に伴ってホイッスラー波や AKR が出現することを示している。この CRRES 衛星で観測された例を図 4 に示す。さらに、電場観測において約 15mV/m もの振幅を持つ変動が観測されている。



Wilson et al. [2001]

図4. CRRES 衛星観測による SC に伴うプラズマ波動励起。上段の図がプラズマ波動、中段の図が電場、そして、下段の図が粒子データを表している。

1-4. 本研究の目的

SC に伴う ULF 帯、VLF 帯プラズマ波動の励起と変調に対する過去の研究は、ほとんどが極域の地上で観測可能なものや静止衛星軌道 (L=6.6) 付近の外部磁気圏における観測だけに限られていた。また、当時の観測の時間分解能、用意された観測項目、現象の発生頻度の問題により、磁気圏内の広範な領域にわたる SC に伴うエネルギー粒子の発生過程、プラズ

マ波動擾乱域の伝播経路などは明らかにされていない。

このような背景にあって本研究では、高時間分解能をもち、長期間継続的で広範な領域にわたって観測しているあけぼの (EXOS-D) 衛星観測データと柿岡の 1 秒値を比較することで、SC に伴う磁気圏内擾乱域の伝播経路を明確にすること、そして、磁気圏内の各領域で発生する波動のモードの決定、それに関わるエネルギー粒子との関係について究明することを目的としている。

2. 解析方法

2-1. 解析に用いているデータ

プラズマ波動観測データは、あけぼの衛星において PWS(20kHz-5.1MHz)、VLF(3.16Hz-17.8kHz)、そして ELF(0Hz-80Hz)が用いられ、Geotail 衛星においては PWI(5.62Hz-800kHz)が用いられる。また、粒子データは、あけぼの LEP(電子:10eV-12keV、イオン:12eV-16keV)が用いられる。一方、電場、磁場データは、それぞれあけぼの EFD、MGF が用いられる。これらのデータは、あけぼのサイエンスデータベース (SDB) データ (時間分解能:8 秒値)を参照している。また、プラズマ波動の励起時刻の読み取りには、PWS の 2 秒値を用いている。

一方、SC イベントを決めるにあたっては SYM-H データを用いており、SC の開始時刻を 1 秒の精度で決めるために柿岡の 1 秒値を用いている。

2-2. SC イベントの同定方法

SC のイベント数は、1989 年 3 月から 2001 年 11 月までの約 13 年間に於いて 930 例が見出された。SC は、1.1 で述べたように中・低緯度の全ての地磁気観測所において地磁気の水平成分の急な立ち上がりを示し、短時間(1 分から 10 分)で起こる現象である。このため、中・低緯度の磁場変動の平均値を示す 1 時間値の Dst データについては、立ち上がりの大きな SC を同定することが可能であるが、立ち上がりの小さな SC を同定するのは困難である。そこで、時間分解能が 1 分値である SYM[Iyemori and Rao, 1996]における H 成分を用い、そのデータについて 10 分間に 5(nT)以上の急な立ち上がりを示す事象に関して SC と同定した。図 5 には、SC と同定された 1990 年 3 月 30 日の 1 例についての SYM が示されている。

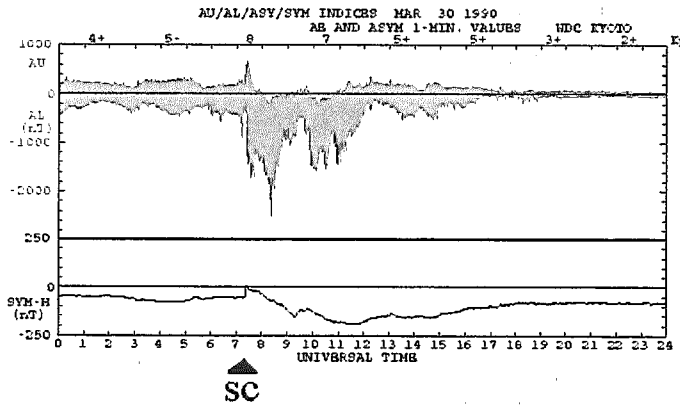


図5 1990年3月30日のSYM1分値のデータ。7時20分ごろにSCが発生しているのが明瞭に表れている。SCの発生とともにオーロラの活動が活発になっている。

SCの立ち上がり時間を精密に決定するために上記のように求められたSCの事象に対応する観測データに関しては、時間分解能が1秒値である柿岡地磁気観測所における磁場データを用いている。また、図6に示されているようにSCの立ち上がり部分を拡大し、磁場変化が急に変わるところをSCの開始時間を決定した。

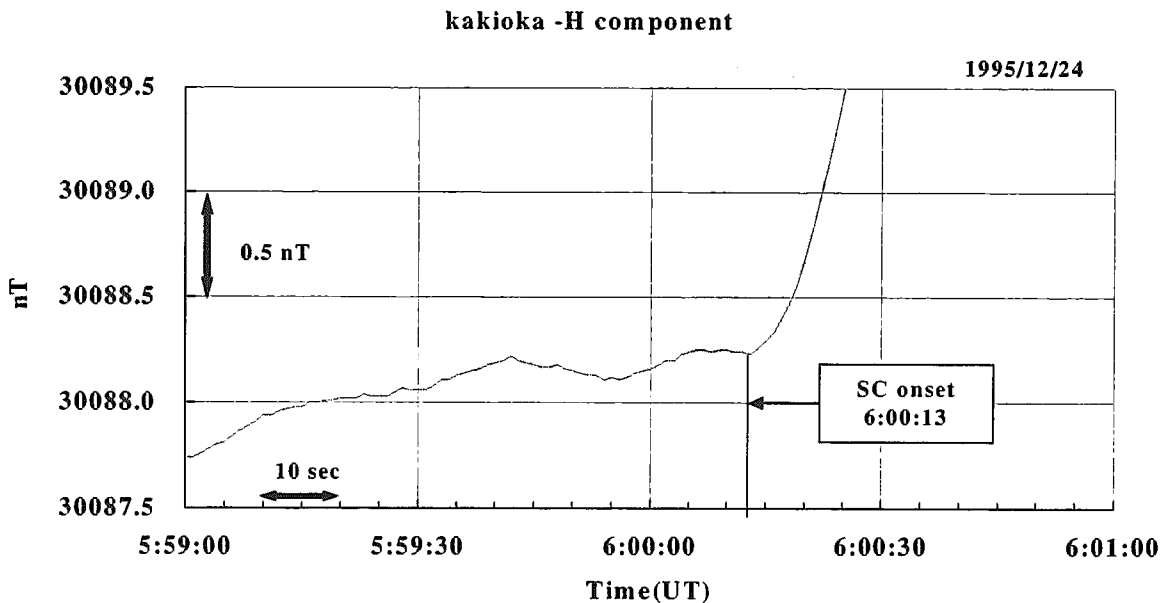


図6. SCの立ち上がり時刻の決定方法。
この場合、SCの開始時刻は06:00:13 (UT) となる。

2-3 同時観測

2.1で述べた方法によって求められたSCの事象を含むあけぼの衛星のプラズマ波動観測データについて257例が見出された。この257例についてあけぼの衛星における磁気緯度45度を境として分割した結果、高緯度(MLAT>45度)に属するものが158例、低緯度(MLAT<45度)に属するものが99例となった。この見出されたプラズマ波動観測データ全てにおいて図7、図8に示されるように柿岡でのSCの開始時間と非常によい対応をもってプラズマ波動の励起が認められた。一方、GEOTAIL衛星についても同様に4例が見出された。期間は、あけぼの衛星が1989年3月から2001年11月までの約13年間であり、GEOTAIL衛星が1992年10月から1999年12月までの約8年間である。

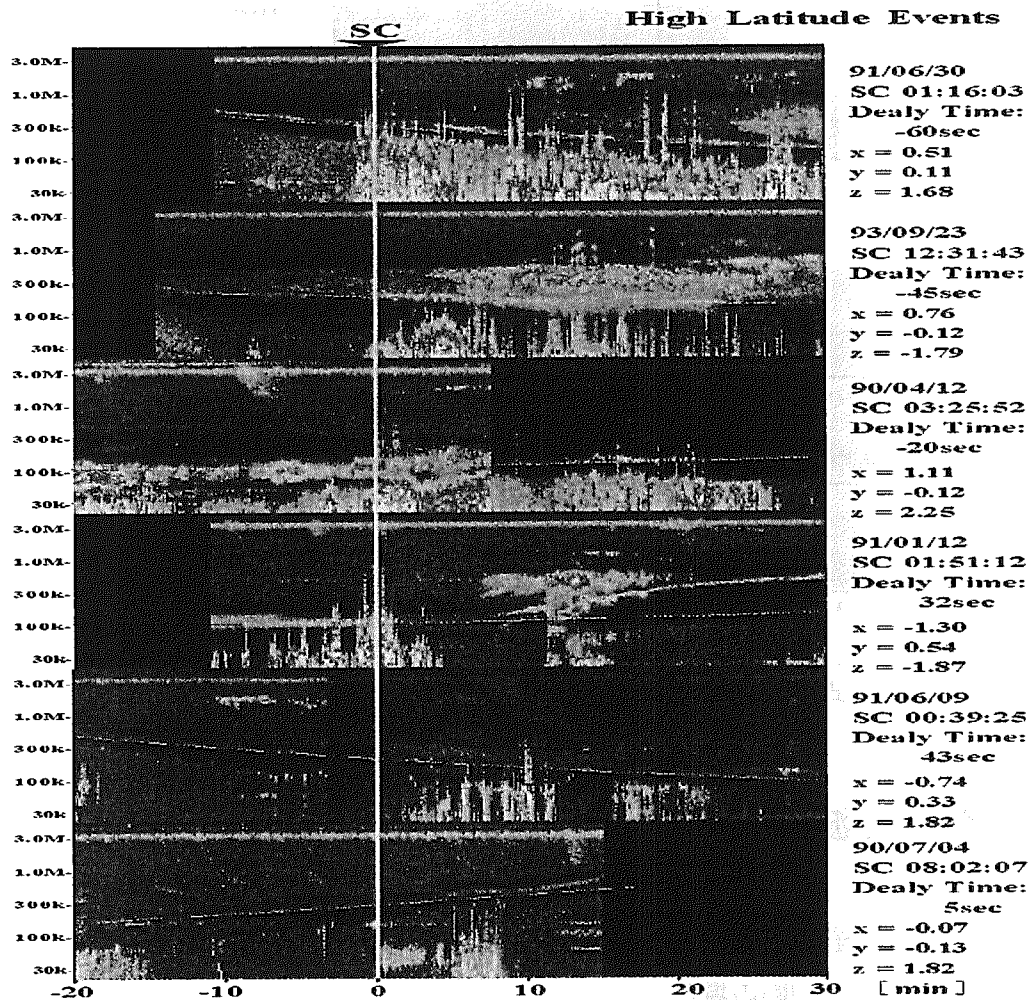


図7. 高緯度におけるあけぼのPWS波動観測データ。
横軸は時間で柿岡でのSCの開始時刻を0としている。また、図の右側にはSCの日付時刻、SCの開始時刻とプラズマ波動の励起時刻との時間差、並びにそのときのあけぼの衛星の位置が示されている。

Low Latitude Events

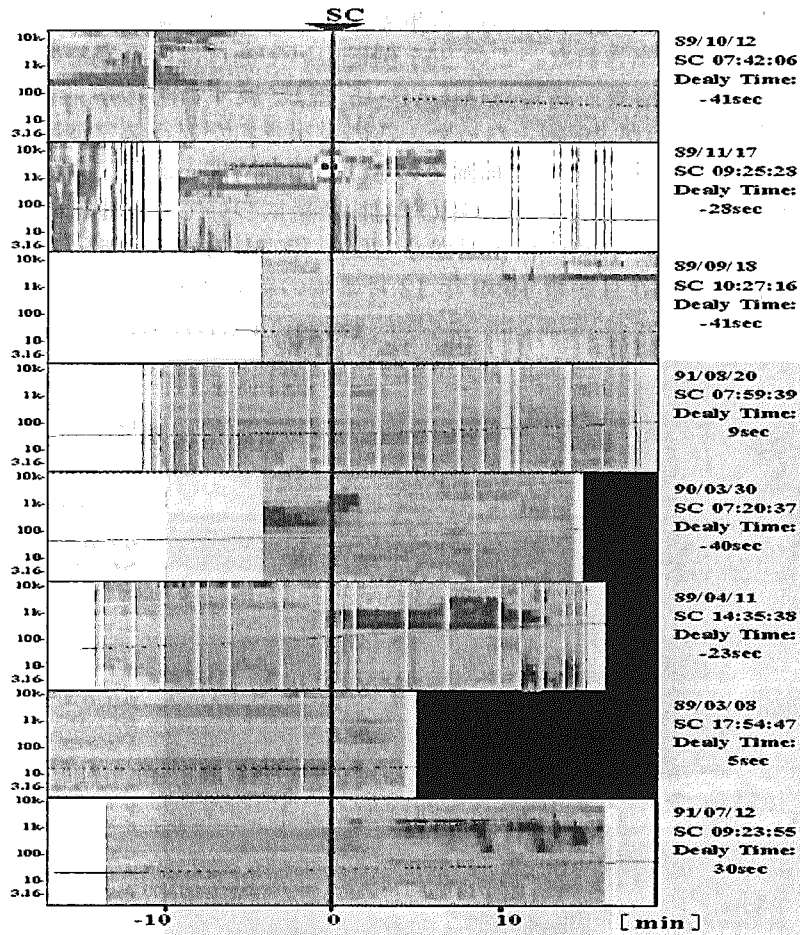


図 8. 高緯度におけるあけぼの VLF 波動観測データ。
図の形式は図 7 と同じ。

3. データ例と波動の特徴

3-1. あけぼの衛星での観測

3-1-1. 高緯度(MLAT>45 度)の場合

図 9 に示される 1990 年 4 月 12 日の例では、あけぼの衛星は、昼間側のカスプクレフト領域付近に位置していた。この場合、SC の立ち上がりに同期したプラズマ波動は、1Hz から 90kHz にまでわたる広帯域バーストが出現している。SC の立ち上がりよりも約 20 秒先行して LHR 周波数上方から電子のサイクロトロン周波数下方にかけて出現しているプラズマ波動は、電界成分の方が強い静電的なホイッスラー波と考えられる静電的プラズマ波動が出現している。また、プロトンのサイクロトロン周波数上方から LHR 周波数下方にかけて出現しているプラズマ波動は、イオン音波、あるいは静電的イオンサイクロトロン高調波の可能性が考えられるが、SC に対応して磁界成分も伴っていることから電磁波モードのホイッスラー波及びイオンサイクロトロン波が混在して発生している。さらに、プロトン

のサイクロトロン周波数下方には、ELF 帯スペクトルからわかるように電界、磁界ともに広帯域(0Hz から 80Hz)にわたるイオンサイクロトロン波が発生している。この波動の特徴は、電界成分よりも磁界成分の方が強いということであり、酸素のサイクロトロン周波数付近でそれが最も現れている。一方、5Hz 以下にも磁界成分の強い Pc1 帯の電磁流体波も発生している。一方、PWS データにおいて SC よりも遅れて周波数 1.3MHz 付近に狭帯域の地球ヘクトメートル電波[e. g., Oya et al. 1985]も出現している。

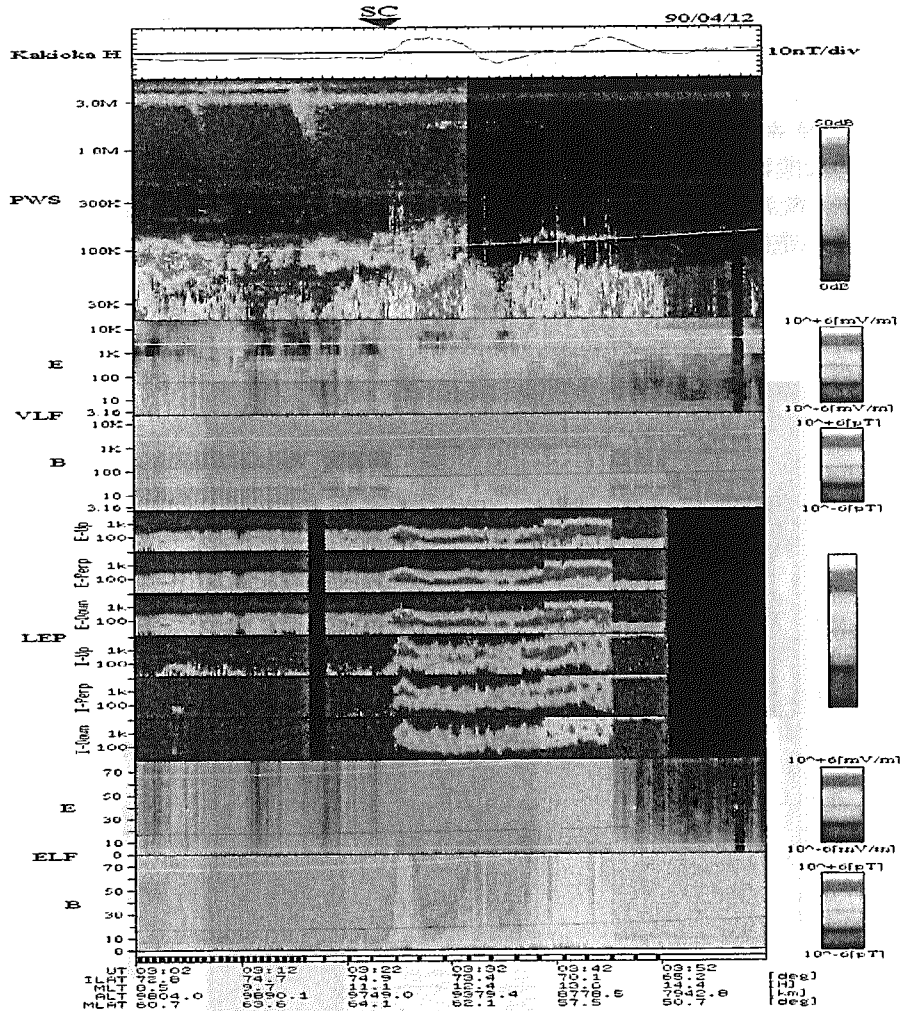


図9 1990年4月12日の例。

これらのプラズマ波動の励起に関わって LEP 粒子データからは、SC の立ち上がりと同様に磁力線平行方向、垂直方向の電子、イオンのフラックスの増大が認められ、それらのエネルギーは、それぞれ平均して 500eV、1keV であり、最大で電子が 800 eV、イオンが 10keV にまで増大している。特に電子、イオンのスペクトル強度からともに磁力線垂直方向に加熱されており、大きな温度異方性が生じていることが示されている。さらに、イオンの磁力線平行方向のフラックスからは、地球へ向かう方向(down)成分よりも地球から宇宙空間へ逃げる方向(up)成分のスペクトルが強いことを示している。これは、通常のカスプクレフト領域で観測される粒子データとは大きく異なっている。

3-1-2. 低緯度 (MLAT>45 度) の場合

図 10 に示される 1990 年 3 月 30 日の例では、あけぼの衛星は、磁気赤道付近に位置し

ていた。この場合、SC の立ち上がりに同期したプラズマ波動は、40 秒先行して約 3kHz から 5 kHz 付近の LHR 周波数の下方、またはその付近でスペクトルの強度増大がまず認められ、直後に LHR 周波数よりも上方へ上昇するのが認められた。これに対応するプラズマ波動は、PWS の周波数領域において約 30kHz 付近にまで至っている。

さて、この領域で出現しているプラズマ波動としては、スペクトルから電界、磁界成分ともに上記で述べた現象が認められるので、この周波数帯で出現しているのは、電磁波モードのホイッスラー波であると考えられる。また、ELF の周波数領域においてヘリウムのサイクロトロン周波数の約 1.5 倍の周波数付近に SC の立ち上がりに対応して電界成分の強い静電的なヘリウムのイオンサイクロトロン波と考えられる静電的プラズマ波動が出現している。さらに、酸素のサイクロトロン周波数付近にも SC の立ち上がりに対応して電界成分の強い静電的な酸素のイオンサイクロトロン波と考えられる静電的プラズマ波動も出現している。一方、酸素のサイクロトロン周波数下方、約 5Hz 以下にも SC の立ち上がりに対応して Pc1 帯の電磁流体波の出現が認められる。

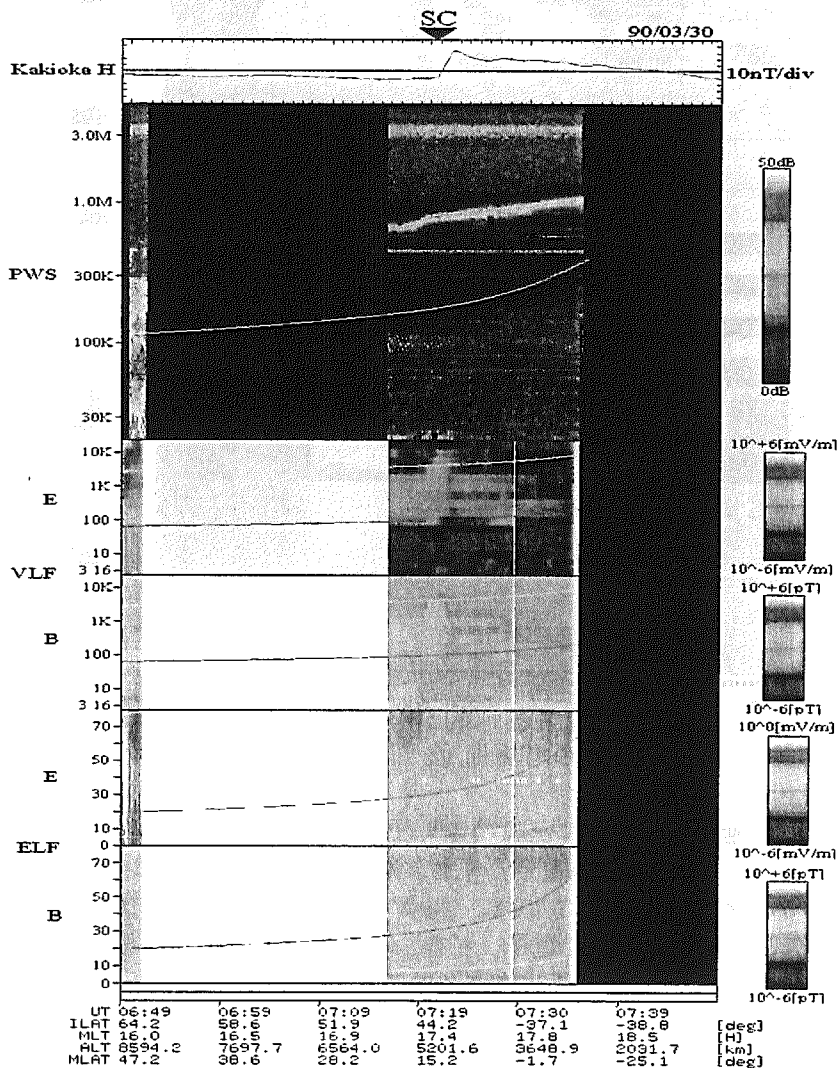


図 10 1990 年 3 月 30 日の例。

3-2. GEOTAIL 衛星の場合

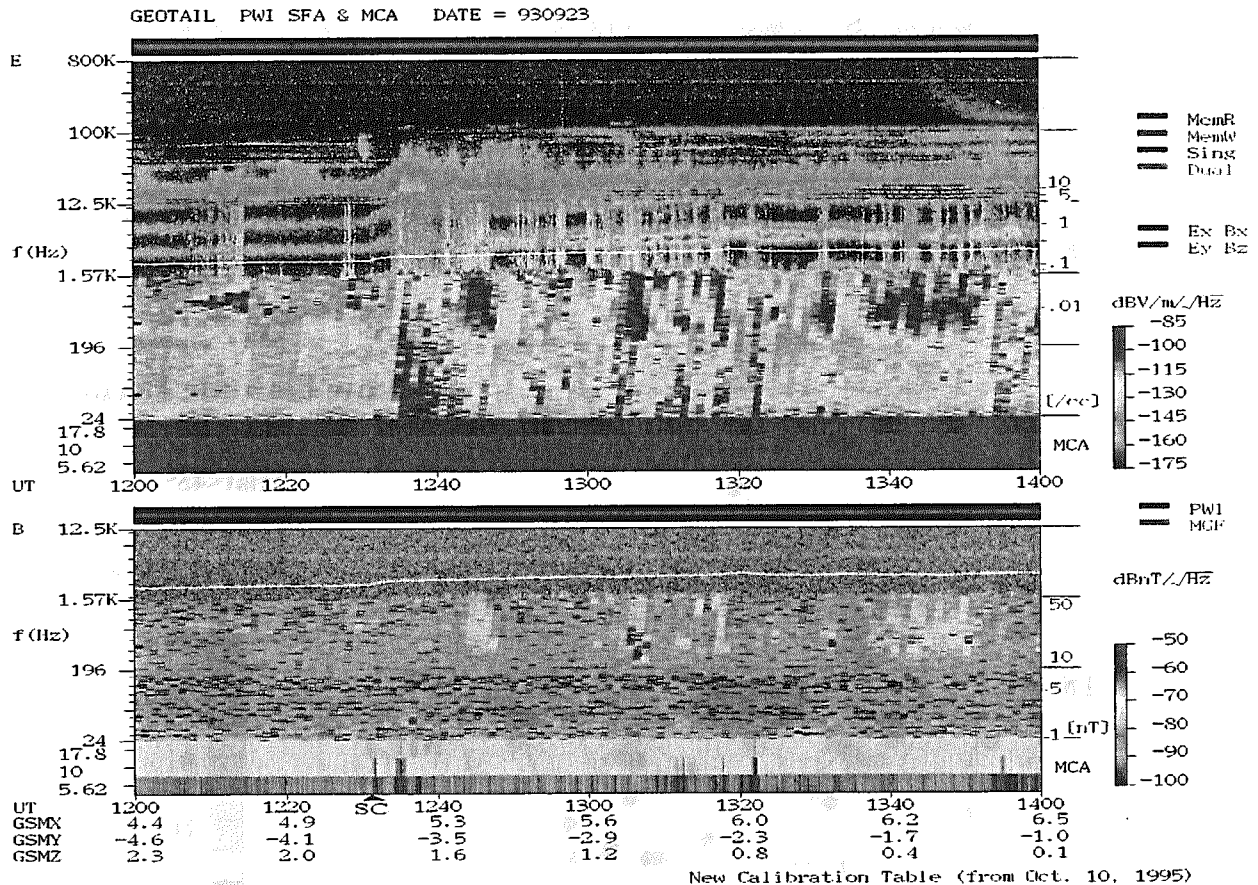


図 11. 1993 年 9 月 23 日の例。

図 11 に示される 1993 年 9 月 23 日の例では、SC の立ち上がり同期したプラズマ波動は、約 40 秒先行して電子のサイクロトロン周波数下方において特に電界成分について周波数の上昇が認められ、低周波領域の磁界成分にも 5.62Hz から 24Hz にかけて出現している。その後、2 分から 3 分遅れて電界成分の方に 24Hz から 2kHz 付近にかけて広帯域にわたる静電的プラズマ波動が出現している。

さて、この領域で出現しているプラズマ波動は、SC の立ち上がりに対応して電子のサイクロトロン周波数下方には電界、磁界成分の両方に認められる電磁波モードのホイッスラー波が出現し、その後、電界成分にしか認められない静電的なホイッスラー波が出現している。また、低周波、つまり 5.62Hz から 24Hz にかけて磁界成分に出現しているプラズマ波動は、イオンサイクロトロン波や Pc1 帯の電磁流体波であると考えられる。一方、静電的なホイッスラー波の出現に対応して電子のサイクロトロン周波数上方の約 30kHz 付近の UHR 波動の強度が増大し、それと同時に電子のサイクロトロンレゾナンス f_{Qn} が出現している。また、SC の到来以前から出現している静電的電子サイクロトロン高調波の強度も増大しており、電磁波モードのホイッスラー波が発生しつづけている。

4 遅延時間の解析

4-1. 低緯度(MLAT<45度)での解析

解析に用いた仮定は、SCで励起されるVLF帯のホイッスラー波の発生領域が磁気赤道付近にあり、そこからあけぼの衛星の位置まで磁力線に沿って伝搬してくるというものである。図12にVLF波動を観測したあけぼのが位置したL値と磁気地方時に分けたプロットを示す。この図が示している遅延時間の分布は、昼間側のプラズマ圏内において地球方向(L値の小さい方向)に行くにつれて遅くなる傾向を示し、夜側に行くにしたがって遅くなるという分布を示している。このことは、SCに伴う擾乱域がプラズマ圏内を昼間側から夜側へ伝播していくことを示している。

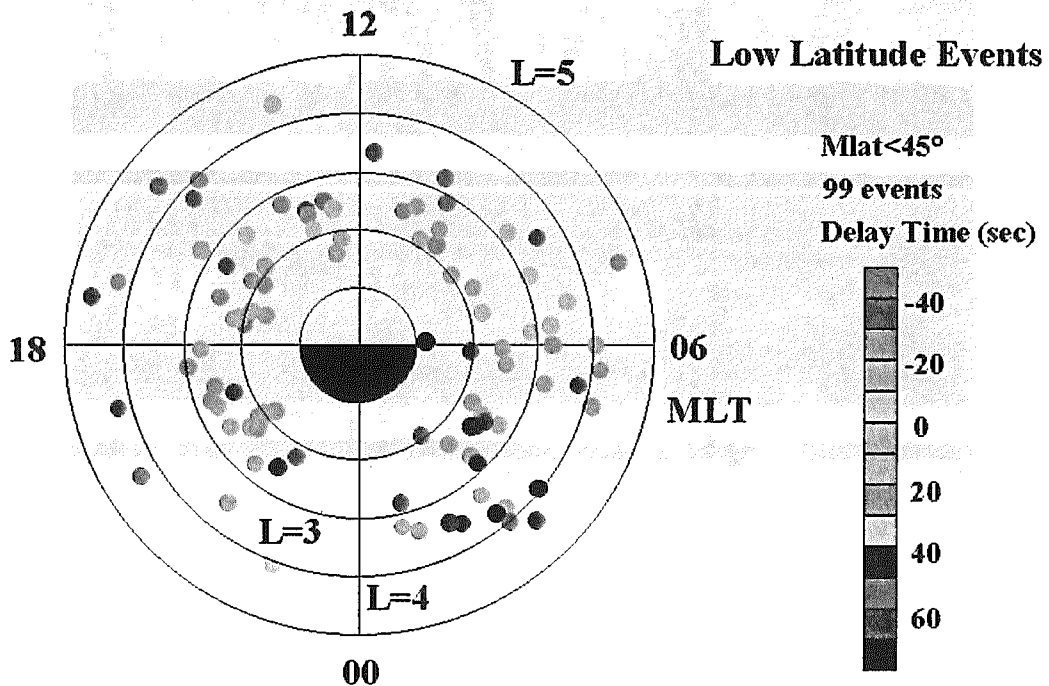


図12 低緯度イベントの解析結果_1

また、その伝搬速度を求めるにあたって横軸に遅延時間を縦軸に $L \cos \phi$ をとってプロットしたのが図13である。図13での遅延時間の分布は、回帰直線に対する相関係数の大きさが $R=0.703$ と1に近い値をとっており、この直線からの分散が小さいことを示している。この事実は、擾乱域が赤道面を伝播するという仮定が正しいことを示している。また、この直線の傾きから推定される伝播速度は、約 $341.7(\text{km/sec})$ と求められ、この速度を持って擾乱域が赤道面を昼間側から夜側へ向かって進む様相が示されている。このことから、あけぼの衛星がプラズマ圏内に位置しているときに観測されるLHR周波数付近における電磁波モードのプラズマ波動の発生源は、赤道域に存在するものと考えられる。

なお、この解析では、SCの立ち上がりの時間から1分以上離れているものやプラズマ波動の出現時間の読み取りが困難であったものについて不明瞭(unclear)、そうでないものについては明瞭(clear)と分類している。

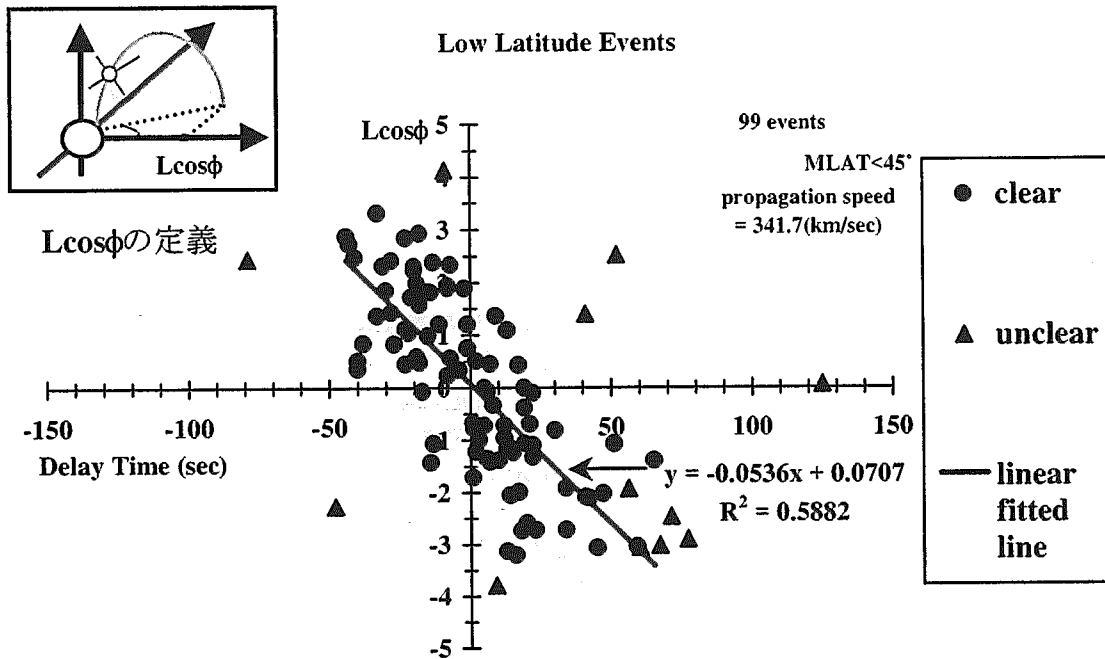


図 13 低緯度イベント解析結果_2

4. 2. 高緯度(MLAT>45度)での解析

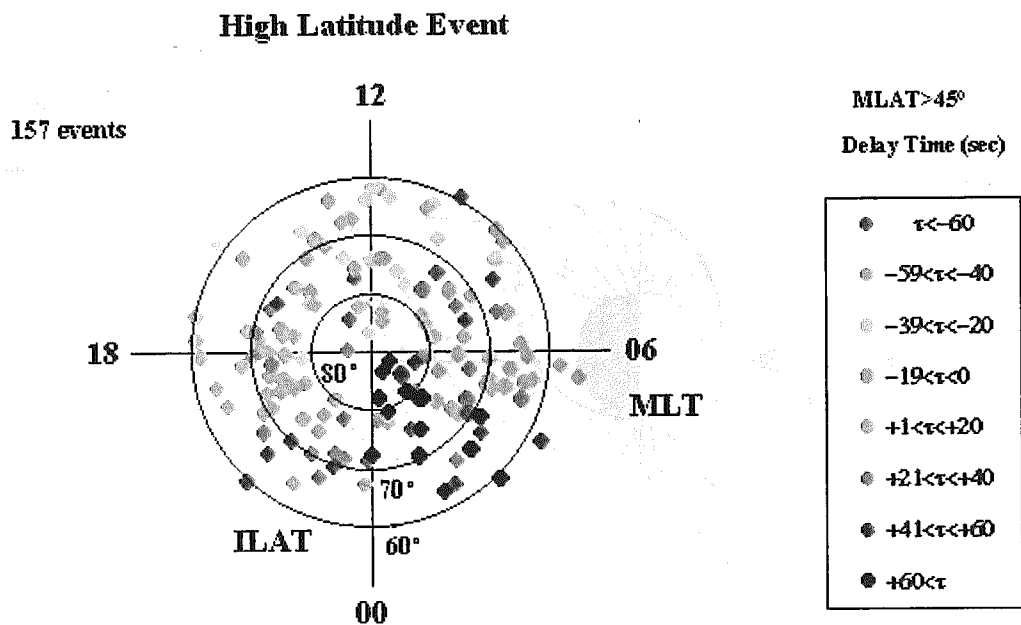


図 14 高緯度イベント解析結果

高緯度観測の例について図 14 では極域座標系に従って表示している。あけぼの衛星における不変磁気緯度と磁気地方時に対して地上に SC が到来した時刻よりも先行しているものが、赤、緑であり、遅れているものが、青、紫としてプロットした。その結果、最も先行して現れる事象が集中している不変磁気緯度が 70°-80° 付近で磁気地方時が 10 時から 14 時の領

域に最も先行して現れる事象が集中している。このことから、高緯度での伝播経路は低緯度のものとは異なり、カスプ域付近から極域を広がりながら夜側へ伝播していくものと考えられる。また、この伝播速度を推定するために4-1で行った同様の解析から擾乱域の伝播速度は、約 67.6 (km/sec)であった。

5.まとめ

本研究では、まずプラズマ圏、内部磁気圏、及び極域電離圏内において SC に伴い、極めて良い対応を持って ULF 帯、VLF 帯プラズマ波動が励起されていることを示した。この事実は、これまで地上観測ならび静止衛星軌道 (L=6.6) 付近に限られた事例しか報告がなかったが、SC による VLF 強度変調について磁気圏、プラズマ圏、極域電離圏の極めて広範な領域において敏感にプラズマ波動が発生することを示すものとなった。中、低緯度プラズマ圏では、長距離伝播可能な電磁波モードのホイッスラー波と LHR 波動が励起されていた。また、ヘリウムと酸素のサイクロトロン波の明確な励起が見うけられた。一方、極域電離圏、およびその上部では、広帯域に及ぶ静電的なホイッスラー波や電磁的なヘリウムと酸素のサイクロトロン波が励起された。

以上のように、観測領域に対応して様々なプラズマ波動現象が引き起こされている。また、粒子計測が可能な領域、つまり、極域電離圏、およびその上部では SC に伴い、電子、イオンのフラックスの増大が引き起こされている。したがって、SC に伴う磁気圧縮の効果により、粒子を加速、加熱され、それに伴ってプラズマ波動が励起されるという事実が判明した。

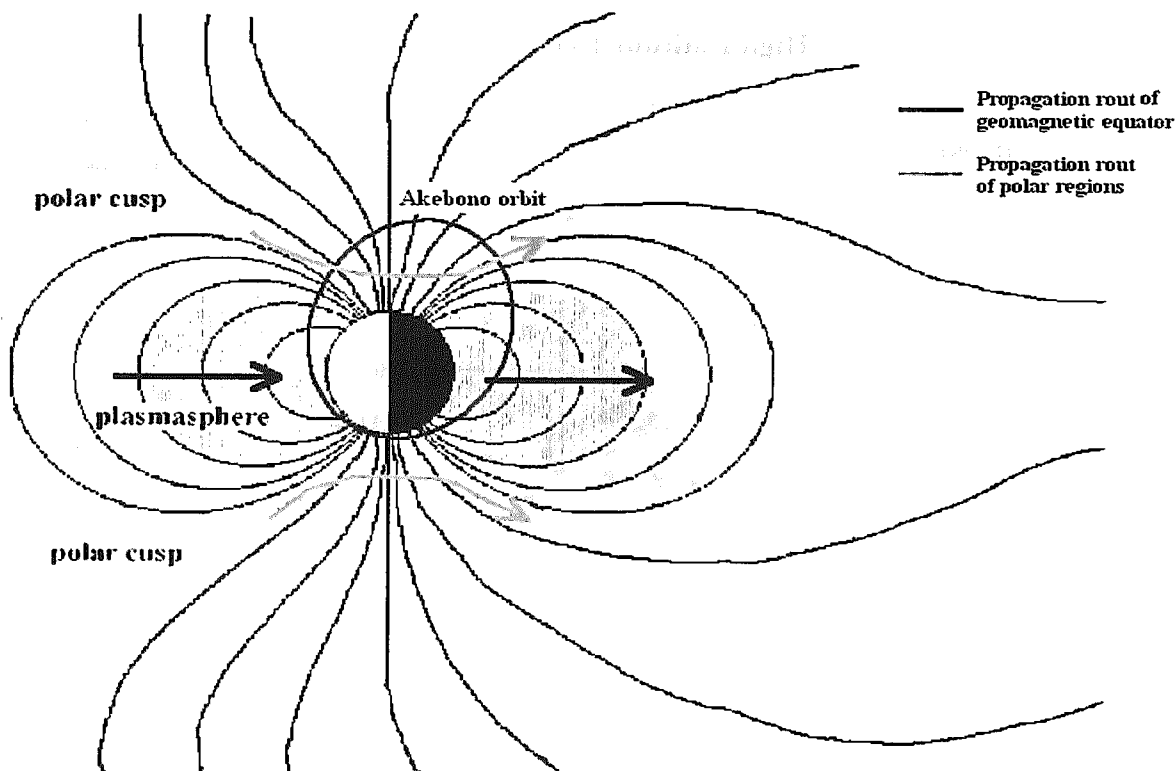


図 15 推定される SC に伴う擾乱域の伝搬経路

SC に伴う磁気圏内擾乱域の経路については図 15 に示されるように二つ存在することが示

され、それは、約 340 (km/sec) の速度を持って赤道域付近を昼間側から夜側へ伝播する経路とカस्प域付近から擾乱域が開始し、昼間側の極域を広がりながら夜側へ伝播する経路に分かれることが明らかになった。

[参考文献]

- Gail, W. B., U. S. Inan, R. A. Helliwell, D. L. Carpenter, S. Krishnaswamy, T. J. Rosenberg, and L. J. Lanzerotti, Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements 1. Ground based observations, *J. Geophys. Res.*, **95**, 119-137, 1990(a).
- Gail, W. B., and U.S. Inan, Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements 2. spacecraft observations., *J. Geophys. Res.*, **95**, 139-147, 1990(b).
- Hayashi, K., S. Kokubun, and T. Oguti, Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation, *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **22**, 149-160, 1968.
- Harris, K. K., G. W. Sharp, and C. R. Chappell, Observations of the plasmopause from OGO 5, *J. Geophys. Res.*, **75**, 219-224, 1970
- Hirasawa, T., Effects of magnetospheric compression and expansion on spectral structure of ULF emission, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue Jpn.*, **18**, 127-151, 1981.
- Horwitz, J. L., R. H. Comfort, P. G. Richards, M. O. Chandler, C. R. Chappell, P. Anderson, W. B. Hanson, and L. H. Brace, Plasmasphere-ionosphere coupling 2. Ion composition measurements at plasmaspheric and ionospheric altitudes and comparison with modeling results., *J. Geophys. Res.*, **95**, 7949-7959, 1990.
- Iyemori, T., and D. R. K. Rao, Decay of the Dust field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation, *Ann. Geophys.*, **14**, 608-618, 1996.
- Kimura, I., K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri, and K. Hayashi, VLF observations by the Akebono (EXOS-D) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 459-478, 1990.
- Kokubun, S., and T. Oguti, Hydromagnetic emission associated with storm sudden commencements, *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **22**, 45-59, 1968.
- Kokubun, S., Characteristics of storm sudden commencement at geostationary orbit, *J. Geophys. Res.*, **88**, 10025-10033, 1983.
- Morozumi, H. M., Enhancement of VLF chorus and ULF at the time of SC, *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **19**, 371-374, 1965.

Mukai, T., N. Kaya, E. Sagawa, M. Hirahara, W. Miyake, T. Obara, H. Miyaoka, S. Machida, H. Yamagishi, M. Ejiri, H. Matsumoto, and T. Itoh, Low energy charged particle observations in the “auroral” magnetosphere: first results from the Akebono (EXOS-D) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 479-496, 1990.

Mullayarov, V. A., and I. V. Yachmenev, Features of the appearance of SC in VLF radiation, *Geomag. and Aeronomy.*, **30**, 271-273, 1990.

Oya, H., A. Morioka, and T. Obara, Leaked AKR and terrestrial hectometric radiations discovered by the plasma wave and planetary plasma sounder experiments on board the Ohzora (EXOS-C) satellite-instrumentation and observation results of plasma wave phenomena, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 237-262, 1985.

Oya, H., A. Morioka, K. Kobayashi, M. Iizima, T. Ono, H. Miyaoka, T. Okada, and T. Obara, Plasma wave observation and sounder experiments (PWS) using the Akebono (EXOS-D) satellite – instrumentation and initial results including discovery of the high altitude equatorial plasma turbulence, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 411-422, 1990.

Tepley, L. R., and R. C. Wentworth, Hydromagnetic emissions, X-ray bursts, and electron bunches, 1, Experimental results, *J. Geophys. Res.*, **67**, 3317-3333, 1962.

南極の科学「オーロラと超高層大気」