

急始型地磁気嵐の自動検出システムについて

Automatic Realtime Detection of Sudden Commencement of Geomagnetic Storms

篠原 学 菊池 崇 野崎憲朗

SHINOHARA Manabu, KIKUCHI Takashi, and NOZAKI Kenro

要旨

リアルタイム磁力計データを用いて、急始型磁気嵐の開始を示す SC の自動検出システムを構築した。急始型磁気嵐は、衛星運用や通信に大きな影響を与えるために、宇宙天気の中では重要な現象の一つである。SC 型磁場変化の特徴を数値化し、観測データから検出を行う。検出された場合は、自動的に電子メールなどで通知を行う。システムは 2003 年 6 月から運用を行っている。

By using realtime magnetometer data, we developed an automatic realtime detection system of sudden commencements (SC) of the geomagnetic storms. The geomagnetic storm is a major disturbance that often cause troubles on the operational satellites and telecommunications. The SC is a good indicator of onset of the geomagnetic storm. Therefore, it is important to automatically detect the SC and to inform space weather forecasters of the onset time and its magnitude. We have been operating this automatic detection system since June 2003.

[キーワード]

SC, 磁気嵐, 自動検出システム, 宇宙天気

Sudden commencement, Geomagnetic storm, Automatic detection system, Space weather

1 まえがき

磁気嵐は宇宙天気の重要な擾乱現象の一つである。太陽で CME (コロナガス大規模噴出現象) が発生し、高速の太陽風が地球方向に向かって放出されると、太陽風の擾乱は 1、2 日ほどかけて地球に到達する。衝撃波が地球に達すると磁気圏を圧縮するため、地上全域で磁場の急な増加が観測される。衝撃波に続いて太陽風の磁場が大きな南向きを持つなどすると磁気嵐が発生する。この時の最初の磁場変化を、sudden commencement(SC) と呼ぶ。また、SC に続いて発生した磁気嵐は、急始型磁気嵐とも呼ばれる。衝撃波の通過後、太陽風の磁場が北向きで推移するなどして、磁気嵐の発生に至らない場合もある。その時の最初の磁場変化は sudden impulse (SI) と呼ばれる。

急始型磁気嵐に対して、緩始型磁気嵐と呼ばれるものもある。これはコロナホールによる高速太陽風が原因となって発生する磁気嵐など、SC を

伴わないで発生した磁気嵐に対して使われる。コロナホールによる高速風の場合は、太陽風の変化が緩やかに進むため、磁気嵐も緩やかに発達する傾向があるからである。

CME による太陽風の乱れは、非常に激しくなる場合がある。そのため、これに続いて発生する急始型磁気嵐も非常に激しく発達する場合がある。したがって、人工衛星や短波通信など宇宙天気に敏感な機器に障害を発生させる可能性も高くなる。このため、急始型磁気嵐の発生をいち早く検知し、通知するシステムが必要である。この作業を人が行おうとすると、24 時間連続的に誰かがデータを見続けなければならないという、大変非効率な状況が発生する。検出そのものは PC を用いて自動化を行い、検出されたイベントに対して、人が規模を評価し、その後の対処を検討するシステムを整える方がより効率的である。しかも、現時点では夜間の現象発生に対しては翌朝まで対応は行われておらず、宇宙天気情報のユーザーに対

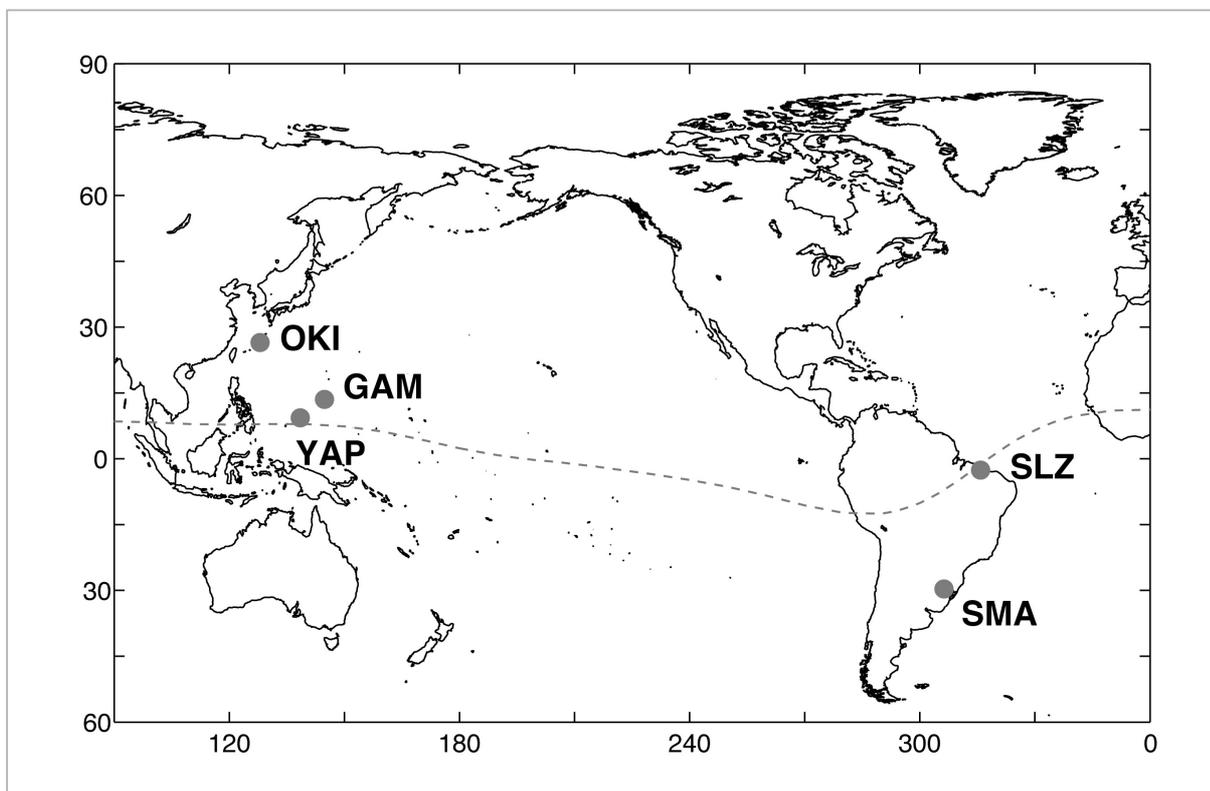


図1 SC/SIの自動検出に用いた、NICTの磁力計観測点

日本付近のOKI、GAM、YAPと、ほぼ反対半球に位置するブラジルのSLZ、SMAの5点を使用している。
破線は地磁気における赤道を示している。

する情報提供の一つとして、自動通報システムを構築することは価値があると考えている。

情報通信研究機構(NICT)の宇宙天気システムグループでは、世界的に広く分布した磁力計観測ネットワークを構築し、準リアルタイム(12分間隔)でデータを収集している。ここで収集されたデータを利用して、プログラムによってSC/SIの発生を自動検出するシステムを構築した。SC/SIが検出されると、直ちに電子メールで通報が行われ、ウェブ上に最新データを示すページが自動的に作成される。この情報はインターネットによってどこからでも閲覧することが可能である。

システムは2003年6月に運用を開始した。検出方法の詳細、検出状況などについて報告する。

2 SCの検出基準

図1は、NICTの準リアルタイム地磁気観測網のうち、SC/SIの自動検出に使用している低緯度の5観測点を示している[1]。日本側の沖縄(OKI)、

グアム島(GAM)、ヤップ島(YAP)の3か所と、日本とはほぼ反対半球にある、ブラジルのサンルイス(SLZ)、サンタマリア(SMA)の2か所を使用している。後に述べるが、昼側半球と夜側半球のように、広い範囲に観測点が分布していること、それぞれの半球で観測に障害が発生した場合のバックアップとして最低2点ずつあることが、検出に使用する観測網として重要である。この自動検出では、低緯度SC/SIの磁場変化がよく現れるH成分(南北成分)をデータとして使用している。

図2は、2001年1月31日8時UTに発生したSCの例である。OKI、GAMは夕側、SMAは朝側に位置していたが、両半球で類似した変化が観測されている。縦の破線で示した時刻から急に磁場の増加が起こっている。OKIのデータの上がりきった場所に三角形(▼)を記しているが、磁場の増加は5分程度でピークに達し、以後はゆっくりと下がっている。この最初の磁場の急増をSC、もしくはSIと呼ぶのである。このイベントは、この後に小規模だが磁気嵐の発達が見られたの

で、SC に分類される。磁気嵐の発生を伴わなかった場合は SI に分類される。

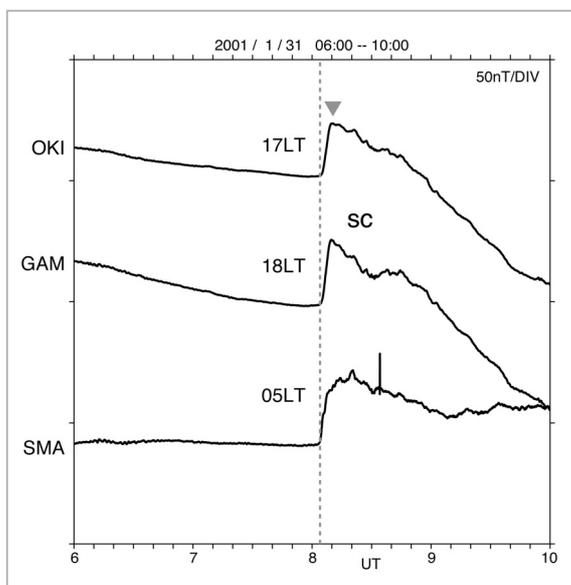


図2 2001年1月31日に観測されたSC

縦軸は、OKI、GAM、SMAの磁場H(北向き)成分。1目盛り50nT。
横軸は世界時(UT)。
夕側の観測点(OKI、GAM)と朝側の観測点(SMA)の両半球で、変化が同時に観測されている。

この特徴的な変化の中から幾つかの数値を定め、その条件に合致するイベントを検出することで、SC/SIの自動検出を実現することにした。SC/SIの磁場変化の中で最も大きな特徴は、短時間に急激に磁場強度が増加するという点にある。このことに着目し、SCの開始点(破線)と頂点(▼)との間の変化から次の三つの値を求めた。

- 振幅
- 立ち上がり要した時間
- 時間変化の最大値

2000年1月から2003年10月の間のSCを、米国海洋大気庁(NOAA)国立地球物理学データセンター(NGDC)のSolar-Geophysical Data^[2]のデータを元に89イベントリストアップした。そして、NICTの地磁気観測点の一つである沖縄のデータを用いて、各イベントについて上記の三つの値を求めた。それぞれの数値を統計的に解析して、

下限値、あるいは上限値を設定した。

自然現象には、極端に数値が低かったり高かったりするイベントが存在する。ここで、すべてのSCが検出に含まれるように限界の数値を設定すると、SCに類似したその他の現象も検出されやすくなってしまう。そもそもSCは、短時間に大きな磁場強度の増加を起こすという点に特徴がある。しかし、この極端さが弱まれば、その他の現象でも同じ程度の変化を作ることが可能になってしまうのである。その結果、誤った検出が増加することになる。

本研究の自動検出は、宇宙天気監視に向けたシステムの開発であり、宇宙天気に重要となる、ある程度規模の大きな擾乱を確実にとらえ、ユーザーに自動通知するシステムを作ることが目的である。したがって、すべてのSCを完全に検出することを優先して、誤検出が増えてしまうのでは実用性に欠けてしまう。小規模なSCをある程度取りこぼすことになっても、誤検出の頻度がある程度抑さえた設定を選ぶべきである。以降の議論で定める下限値、上限値などの設定値は、最終的にはSC/SIの検出率と誤検出の発生頻度とを勘案しつつ設定したものである。

2.1 SCの振幅

図3は、OKIで観測されたSCの振幅分布である。横軸はSCの発生日、縦軸は振幅を対数で表示している。図の下の方(振幅が小さい)には丸印が分布しなくなることから、SCと認識されるためには、振幅に下限値があると読み取れる。図の中で*印で表示しているのは、SC発生後の磁気嵐中のDstが-100nTよりも下がった(磁気嵐が大規模になった)イベントである。磁気嵐の規模は、SC発生後(衝撃波通過後)の太陽風の状態(速度や磁場強度、特に磁場の南向き成分)に影響を受ける。そのため、初動であるSCの振幅と、その後の乱れで決まる磁気嵐の規模との間には直接の関連はない。しかしながら、大規模な磁気嵐を起こすためにはある程度激しい太陽風の変化が必要であり、結果として、SCの規模もある程度大きなものになると考えられる。図2でも、散らばりは大きいですが、*印は比較的振幅の大きい側に偏って分布している。したがって、*印のSCはすべて含んでいるが、極端に小さい振幅のSCの

グループは多少検出漏れしても良いと考え、振幅の下限値を 7.5nT に設定した。

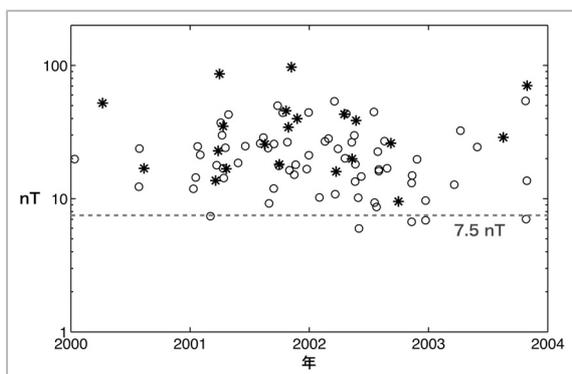


図3 OKIで観測されたSCの振幅分布

縦軸はSCの振幅(nT)。横軸はSCが発生した日付。
 *はSC以降にDst(磁気嵐)が-100nT以下に発達したイベントを、
 ○はSC以降のDstが-100nTに達しなかったイベントを示している。
 7.5nTをSC振幅の検出の下限とした。

2.2 SCの立ち上がり時間

図4は、SCの立ち上がりに要した時間(分)である。SCは太陽風の衝撃波が地球の磁気圏を圧縮して作るものであるので、通常ある程度の時間内で立ち上がりが終わる。*の印を見ると、大きな磁気嵐を伴ったイベントの方がより短時間に立ち上がる傾向が見られる。この図より、SCの立ち上がり時間については、10分以内という上限値を設けることにした。

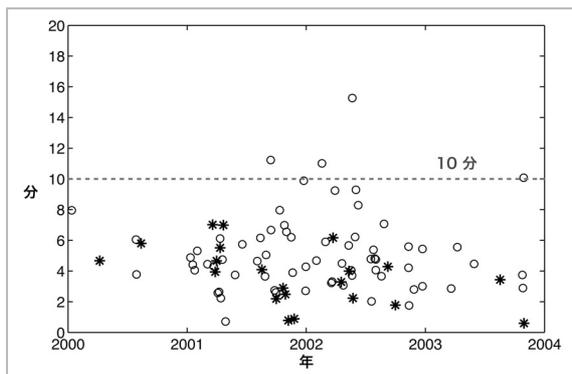


図4 OKIで観測されたSCの立ち上がり時間

縦軸はSCの立ち上がり時間(分)。横軸はSCが発生した日付。
 *はSC以降にDst(磁気嵐)が-100nT以下に発達したイベントを、
 ○はSC以降のDstが-100nTに達しなかったイベントを示している。
 10分をSC立ち上がり時間の検出の上限とした。

2.3 SCの時間変化の最大値

図5は、SCの立ち上がり時間内に観測された、1分当たりの磁場変化(nT/分)の最大値を示している。縦軸は対数で表示している。SCの立ち上がり方にはかなり幅があるようで、1nT/分と緩やかに増加するイベントから、激しい場合は40nT/分に達するイベントまでである。この図より、極端に緩やかなグループは外し、SCの最大時間変化が2.5nT/分以上あるイベントのみ検出することにした。

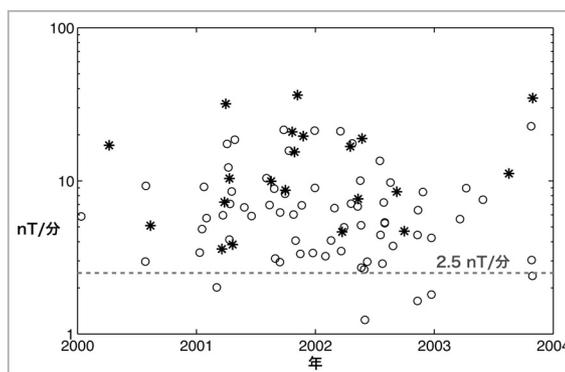


図5 OKIで観測されたSCの時間変化の最大値

縦軸は磁場H成分の1分間の変化(nT/分)。横軸はSCが発生した日付。
 *はSC以降にDst(磁気嵐)が-100nT以下に発達したイベントを、
 ○はSC以降のDstが-100nTに達しなかったイベントを示している。
 2.5nT/分をSC時間変化の検出の下限とした。

3 SC/SIの検出・通報

以上の統計解析より、SC/SIの判定基準を次のように設定した。

- 振幅 $\geq 7.5\text{nT}$
- 立ち上がり時間 $\leq 10\text{分}$
- 時間変化最大値 $\geq 2.5\text{nT/分}$

具体的には、リアルタイムで収集されたデータに対してこの基準を満たす変化を探すことになる。処理の手順としては、

- (1) 時間変化の最大値の条件を満たす現象の検出
- (2) 開始点、終了点の決定
- (3) 振幅、立ち上がり時間の判定

の順で行う。現象の開始点、終了点は、磁場の時間変化より、磁場強度が増加を始めた時刻と、

増加が終わった時刻をとっている。

SC/SI が検出された場合、登録されたユーザーへ SC/SI 発生電子メールを送信し、太陽風や磁場データなど、詳細を伝えるウェブページを自動的に作成・公開する。さらに、研究室では警報音が PC から鳴らされる仕組みになっている。初めに述べたように、自動検出の意義は人間がモニターを常時監視する必要性を取り除くことにある。現象を検出した場合、人に知らせるには音声を使うのが簡単で、比較的確実な方法であろう。

SC/SI が検出された時の、通報メールの一例を図 6 に示す。

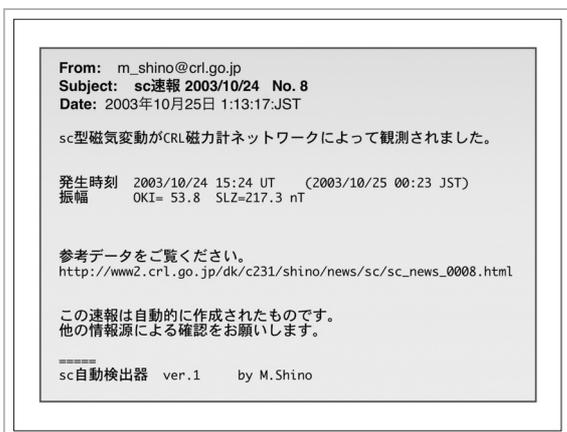


図6 SC 自動検出電子メールの例

観測された SC/SI の発生時刻、検出した観測点と SC/SI の振幅などが記されている。自動検出システムによって検出と同時に作成され、自動的に登録ユーザーへ送信される。

これは、みどり II (ADEOS-II) の事故が発生する直前の(事故のきっかけとなった)SC/SI を、検出システムが自動的に検出し、送信したメールである。観測時刻、各観測点で検出された SC/SI の振幅、データを掲載したウェブページのリンクが記されている。

SC/SI の振幅情報を見ることで、このメールから衝撃波の規模を大まかに推定することができる。図 3 と比較すると、OKI の振幅 53.8nT というのはかなり規模の大きな SC/SI だったことが分かる。また、参考データのウェブページを参照することで、メールを受け取った人は速やかに実際のデータから SC/SI の発生を確認することができる。

4 自動検出の稼働状況

この自動検出システムは 2003 年 6 月に運用を開始した。1 年経過した 2004 年 5 月の段階で、71 件の SC/SI の検出が行われた。この中で、55 件の検出報告が 2003 年 10 月から 11 月にかけて集中している。それはこの 2 か月間、太陽のフレア活動が非常に激しくなり、太陽風が非常に激しく乱れたためである。そもそも、この検出件数の集中は異常であり、宇宙天気が通常の状態ではなかったことを示している。この期間の検出結果については 4.2 で考察する。ここでは、残りの(通常の期間の)16 件について、検出結果の妥当性を評価する。

16 件の検出結果を分析すると、

SC	4 件
SI	8 件
磁気嵐中の乱れ	3 件
誤検出	1 件

となった。

SC にあたるイベントは 4 件、SI は 8 件検出された。SC のうちの 1 件は、運用初期に発生したシステムの問題のためにリアルタイムの検出はできなかったが、やや遅れて再処理を行い、イベントの検出が行われたものである。SC と SI の区別は、衝撃波の到来以降に磁気嵐が発生するかしないかで決まる。このため、初めの磁場増加だけ検出しているこのシステムでは、両者を区別する仕組みは含まれていない。また、磁気嵐中の乱れも、詳細は以下で述べるが、現在のシステムでは SC と区別できない。したがって、この 15 件はいずれもシステムとしては正常に動作したと言える。

同じ期間の Solar-Geophysical Data^[2] の SC リストと比較すると、リストに掲載されていた 10 件のうち 7 件の検出に成功していた。検出漏れとなった 3 件はいずれも振幅の小さい SI で、Solar-Geophysical Data^[2] の中でも検出レベルの低いイベントとなっている。振幅の小ささなどから、ある程度の検出漏れは仕方ないと考えた範囲のイベントだった。

4.1 誤検出の例

1 例だけあった誤検出というのは、サブストームの発生に伴うポジティブベイの変化を検出した

ものである。誤検出となったイベントそのものではないが、よく似た例として図7に2001年1月31日16時UTに観測された磁場変化を示す。OKI、GAMの二つの観測点で、SCと良く似た(図2参照)磁場の急な強まりが観測されている。これがポジティブベイである。磁気圏尾部で発生するサブストームによって作られた磁場変化である。磁気圏尾部と夜側の地球を結ぶ大規模な電流系が短時間で形成されるため、立ち上がりの早い変化が作られる。

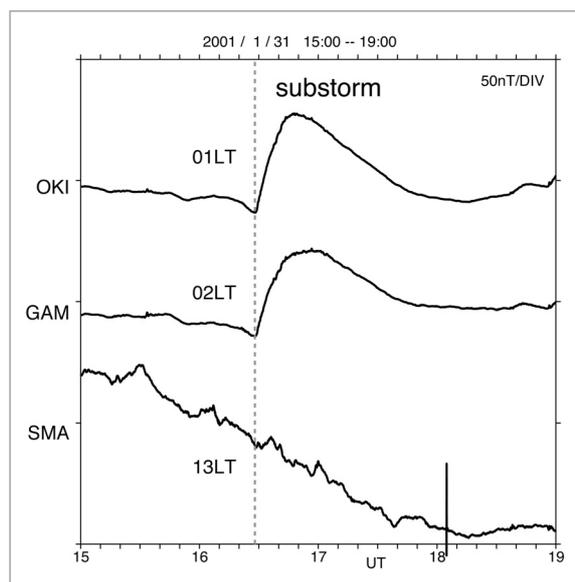


図7 2001年1月31日に観測されたサブストーム

縦軸は、OKI、GAM、SMAの磁場H(北向き)成分。1目盛り50nT。
横軸は世界時(UT)。
夜側の観測点(OKI、GAM)では変化が観測されているが、
昼側の観測点(SMA)では観測されていない。

サブストームは、SC/SIと比較すると、条件を整えば1日に何度も発生する非常に頻度の高い現象である。このサブストームを区別できなければ、自動検出は誤検出を多発することになる。両者の大きな違いとして、SC/SIは磁気圏全体の圧縮現象であるため、その変化は昼夜を問わずすべての地方時で観測されるのに対して、サブストームは夜側の現象であるため、ポジティブベイは夜側の比較的限られた時間帯でのみ観測されるということがある。図6の例では、ほぼ真夜中のOKIとGAMではポジティブベイが観測されたのに対し、昼側にあったSMAではこれに対応する磁場変化

は観測されていない。このように、磁場変化の空間的な広がり調べること、SC/SIとポジティブベイは区別できるのである。

図1に示したように、自動検出に使用している観測点は、日本付近とブラジルと大きく離れて分布している。したがって、通常はこの空間的な広がりによってポジティブベイの誤検出を防ぐことができる。上記の誤検出を行った例は、リアルタイムのデータ収集において欠測が生じて、夜側のデータしか集まらなかったために発生したのである。そのため、発生した磁場変化が広域で発生した現象なのか、夜側のみで発生した現象なのかを区別できなかったのである。SCの自動検出を正確に行うためには、広範囲の同時観測データを安定的に得ることが重要なのである。

4.2 磁気嵐中の乱れ

「磁気嵐中の乱れ」とは、磁気嵐が発生している最中にSC/SIと同様の磁場変化が観測されたイベントを示している。2003年10月から11月にかけて、太陽で非常に激しいフレアが発生し、北海道で低緯度オーロラが現れるような大規模な磁気嵐が発生した。この期間中、自動検出は55件ものSC/SI型の磁場変化を検出した。この検出のほとんども、「磁気嵐中の乱れ」と同じ状況にある。

期間は異なるが、太陽風が大きく乱れ、多数のSC/SI型変化を検出した2001年10月21日の例を用いて詳細を示す。

図8は、2001年10月21日15時UTから22日01時UTまでの、太陽風動圧(P)、OKIの磁場データ、Dst指数を示している。太陽風のデータは、地上のSCの開始時刻に合わせて、時間をずらしてプロットしている。また、Dst指数は、OKIの磁場データに重ねてプロットしている。

次に、この期間のデータから自動検出によって検出されたSC/SI型の磁場変化の発生時刻の一覧を示す。図7の中で、検出された時刻を6本の縦の破線で示している。

2001/10/21 16:47 <-- SC
2001/10/21 18:30
2001/10/21 20:29
2001/10/21 21:48
2001/10/21 22:34

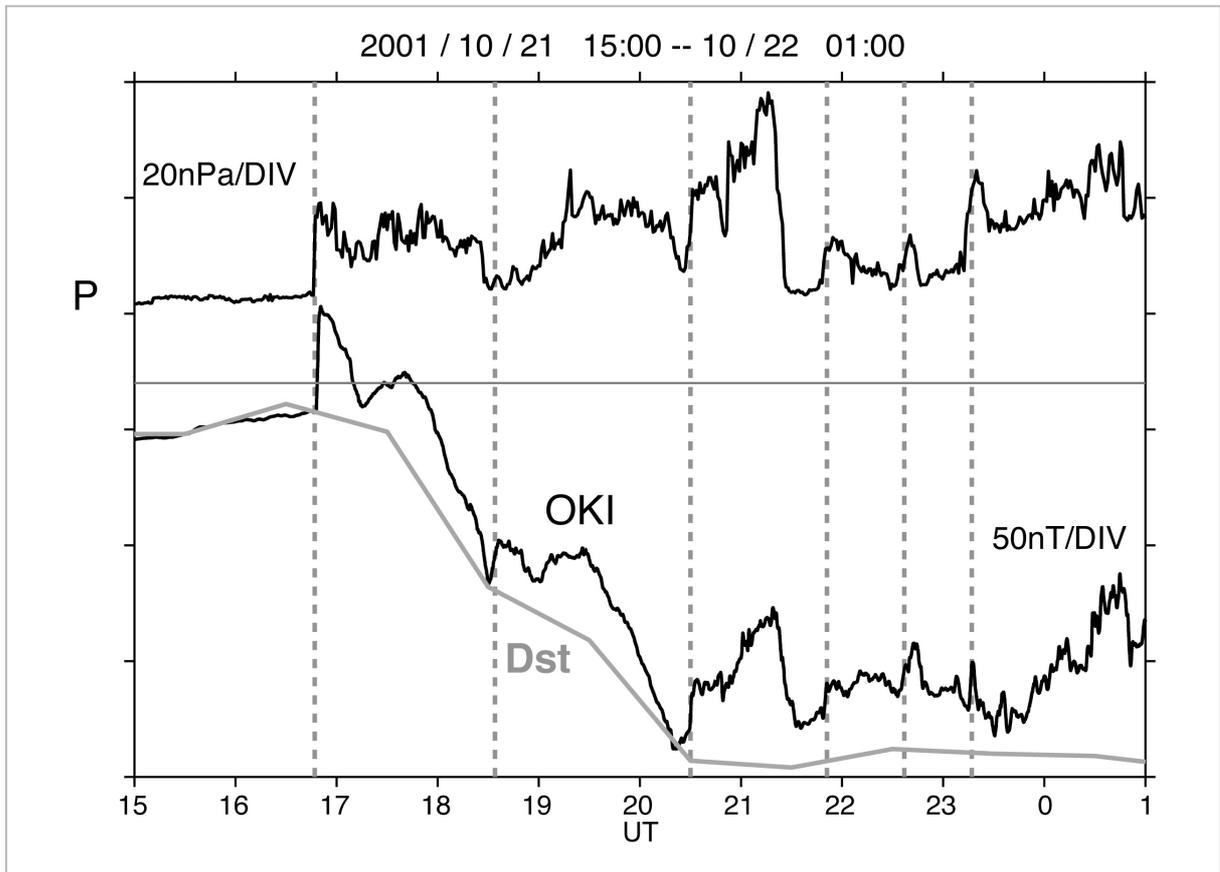


図8 2001年10月21日の、太陽風動圧(P)、OKIのH成分、Dst指数

横軸は世界時(UT)。
 太陽風動圧の縦軸は、1目盛り20nPa。
 太陽風のデータはACEによる。地上のSCの開始時刻に合わせて時間をずらしている。
 OKIのH成分とDstの縦軸は、1目盛り50nT。
 Dstは図中の横線を基準線(0nT)として、下へ下がるほど磁気嵐が発達していることを示している。
 SC/SIの自動検出で検出された箇所を縦の破線で示している。
 ACEデータ提供、the ACE SWEPAM instrument team and the ACE Science Center

2001/10/21 23:15

このうち、実際にSCと呼ぶべき変化は最初の16:47UTの一つだけである。図の最初の破線(左端の破線)がこれにあたり、太陽風動圧がここで一気に増加しているのが分かる。

重ねて表示しているDst指数は、SCの発生後急激に低下しており、SC以降に磁気嵐が発達したことを示している。SCに続いて五つの磁場変化が検出されているが、3番目から6番目については、OKIの磁場増加に合わせて太陽風動圧も急激に増加していることが分かる。つまり、太陽風の動圧変化としては、最初のSCも、3番目から6番目の変化も同じものなのである。このため、地上では同様のSC/SI型磁場変化が観測されてしまうのである。ただ、Dstで示したように、2番目

以降では既に磁気嵐が発達しているため、これらはSCとは呼ばれない。

したがって、SCを正しく識別するためには、現在が磁気嵐状態かどうかを判断する能力がシステムが持つ必要がある。磁場の急峻な立ち上がりをとらえるだけの現在の検出アルゴリズムでは、状況を区別できないのである。

5 むすび

NICTの準リアルタイム磁場データから、急始型磁気嵐の開始を検知するために、SC/SI型磁場変化を自動検出するシステムを構築した。SC/SIの検出は、幾つかの条件を満たす磁場の急な増加を検知することで行っている。検出が行われた場合は、登録ユーザーに電子メールを送信し、デー

タを示すウェブページを自動で作成する。検出システムは2003年6月より運用を始め、現在に至っている。

実際の運用の中では、ポジティブバイなどの類似した現象による誤検出も発生している。これに対しては、SC/SIがグローバルに観測される現象であることを利用して、昼側と夜側のように広く分布した観測点のデータを用いることで、局地的に発生する現象を区別することができるように考えている。したがって、誤検出を減らすためには、離れた地域に観測点をそれぞれ2か所以上設置するなどして、安定的に広域データを得られるようにすることが重要である。

また、SC/SI発生後に磁気嵐が発達したかどうかを認識するシステムを今後構築するべきであ

る。それによって、SCとSIを区別したり、磁気嵐発生中に検出報告を出さないようにすることなどができる。また、発生中の磁気嵐の規模や危険性など、より詳しい擾乱情報を通知することが可能になり、より有用な検出システムに発展できるだろう。

宇宙天気では、いつ擾乱が発生するか分からないため、連続的にデータの監視を行うことが必要である。しかし、人が24時間連続して監視を続ける体制は、構築したとしても非効率である。現象の検出そのものはPCによって自動化し、検出された事態に対して人が対処を行うというシステムこそ長期的には構築されるべきだと考える。このSC/SIの自動検出はほんの一部とはいえ、そのような構想をもって作成したシステムである。

参考文献

- 1 Nozaki K., Utada H., and Yumoto K., "Geomagnetically Induced Voltage Observation System of the Transpc-2 Cable", Proc. Intl. Workshop on Scientific Use of Submarine Cables, pp.49-51, 1997.
- 2 Solar-Geophysical Data, <http://sgd.ngdc.noaa.gov/>, National Geophysical Data Center (NGDC), NOAA.



篠原 学

元電磁波計測部門宇宙天気システムグループ専攻研究員(現九州大学助手) 博士(理学)
太陽地球系物理学



菊池 崇

元電磁波計測部門研究主管(宇宙天気担当)(現名古屋大学太陽地球環境研究所教授) 理学博士
太陽地球系物理学



野崎憲朗

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ主任研究員
電離層観測