

宇宙環境変動予測の必要性和

地磁気指数予測方法に関するISO標準について

家森 俊彦*1・能勢 正仁*1・五家 建夫*2・北澤 幸人*3

1. はじめに

人工衛星が飛翔する地球周辺の宇宙空間（超高層）にも希薄ではあるが大気が存在し、その密度は太陽光の放射強度だけではなく、地磁気活動度にも依存する。人工衛星、特に低高度衛星は超高層大気から抵抗力を受け、減速されてやがては大気圏に落下する。また、宇宙空間には様々なエネルギーの電磁波と粒子（電子およびイオン、原子）が飛び交い、人工衛星が故障する原因の一つとされている。太陽表面での大規模な爆発現象である太陽フレアや地球の磁場が大きく変動する磁気嵐に関連して、多量の高エネルギー荷電粒子が生成され、人工衛星を帯電させたり、電子部品に直接損傷を与えたりして、故障を引き起こす。また、宇宙飛行士だけではなく、旅客機の乗員の被爆も無視できない。磁気嵐などで宇宙空間に流れる数百万アンペア以上の巨大な電流は、人工衛星だけではなく、地上の送電システムやパイプラインなどにもしばしば重大な損傷を与える。

大気密度の変動から衛星の高度変化を予測すること、太陽活動の変動から衛星の寿命を予測すること、あるいは、地磁気擾乱を事前に予測し、人工衛星や地上システムの故障を未然に防ぐことや最小限にとどめることなどが、宇宙環境予測の目的である。そのためには、ま

ず宇宙環境の諸量、例えば放射線帯粒子の分布や地磁気を表現するモデルが必要となる。その次のステップとして、宇宙環境の変動を予測するモデルが必要となる。ここで紹介させていただく地磁気指数予測のためのISO標準は、このような宇宙環境予測の一端を担う。

2. 地磁気擾乱と衛星の故障

地球は巨大な磁石にたとえられる磁場（地磁気）を有する惑星の一つで、地磁気は、大気と共に、銀河系や太陽など宇宙空間から飛来する宇宙線（高エネルギー荷電粒子）が地表に到達するのを防ぐ働きをしている。しかしその一方では、太陽から数百km/secの超高速で常時吹き出している希薄なプラズマの流れ（太陽風）が地球の磁場にぶつかり、その運動エネルギーを電磁気的エネルギーに変換（すなわち発電）し、磁場のエネルギー（電流）として地球の周辺空間に蓄える働きをする。一旦電磁場の形に姿を変えた太陽風の運動エネルギーは、磁力線再結合というプロセスを介して、再び磁気圏プラズマの運動エネルギーや熱エネルギーに姿を変える。この一連の過程で、地上では磁気嵐やオーロラサブストーム^(注1)とよばれる現象が観測され、宇宙空間では磁気嵐の原因となる数百万アンペアの強い電流が流れると共に、磁気圏サブストームと呼ばれる多彩な現象が生起する。このような現象が人工衛星の帯電・故障を引き起こしており、それを未然に防ぐ必要が、宇宙環境（予測）研究の動機の一つとなっている。

*1京都大学大学院 理学研究科

*2東京都市大学、茨城大学

*3株式会社IHI 宇宙開発事業推進部

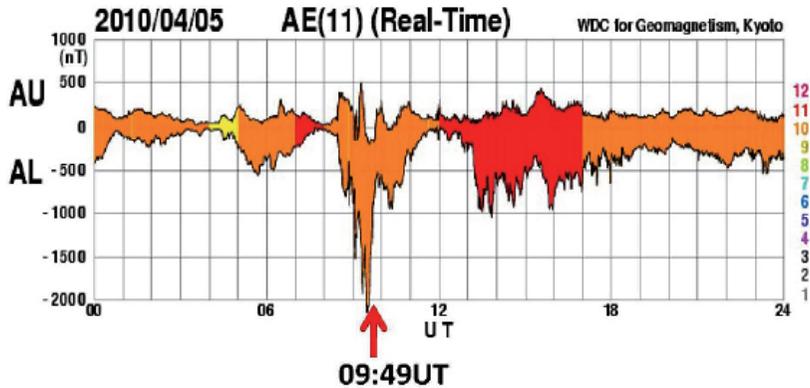


図1 GALAXY-15が故障した4月5日のAE（オーロラジェット電流）指数。故障した9時49分の直前に、AE（AL）指数で-2000nTにおよぶ強い磁場変動を発生させた西向き電流が、オーロラ帯を流れたことがわかる。このときに、おそらく大量の高エネルギー荷電粒子が人工衛星の周辺に流入したと推測される。

図1は、2010年4月5日以降、約半年間使用不能となった静止通信衛星Galaxy-15が制御不能となった日の地磁気AE（Auroral Electrojet）指数^(注2)を示す。この指数は、磁気緯度でおおよそ60度から75度のオーロラ帯と呼ばれる領域の電離層を東西方向に流れる電流の強さを示す。磁気圏サブストームが発生すると、オーロラ帯の電離層に強い電流が流れ、その下では地磁気が大きく乱れる。その強さをモニターする指数がAE指数で、京都大学理学研究科附属地磁気世界資料解析センターから準リアルタイムで算出・公開している。Galaxy-15が制御不能に陥ったのは4月5日の09:49UT（世界時）であったが、その直前に非常に大きなサブストームが発生していたことがわかる。おそらく、このサブストームに伴う荷電粒子が衛星の周辺に押し寄せ、衛星を帯電させたことが制御不能に陥った原因である可能性が高い。

人工衛星が故障する原因はいろいろありうるが、このように強いサブストームが原因になったと考えられるケースはこれまでにもしばしば発生している。この他、磁気嵐に伴う

放射線帯粒子の増加と衛星故障の関連もよく知られている。

このように、地磁気擾乱の程度を表現する地磁気指数と衛星故障の因果関係は明らかと考えられるため、地磁気擾乱の予測が必要になる。

3. 地磁気擾乱と超高層大気

上記AE指数でモニターされる極域の電離層電流は、ジュール熱により超高層大気を加熱する。その結果大気は膨張し、人工衛星の飛翔する高度でも大気密度が増加する。一方、太陽放射も変動しており、超高層大気の温度も太陽活動度により変化し、それ故、密度も変化する。超高層大気密度の変動予測は人工衛星の軌道を設計・維持する上で重要な要素となる。超高層大気のモデルには、太陽活動度と共に、地磁気活動度もパラメータとして組み込まれているため、軌道変化の予測にはそれらパラメータの数年以上先までの予測が必要となる。図2に、宇宙環境を予測し宇宙利用を推進するために研究・開発をされている様々なモデルと予測方法および、その基礎

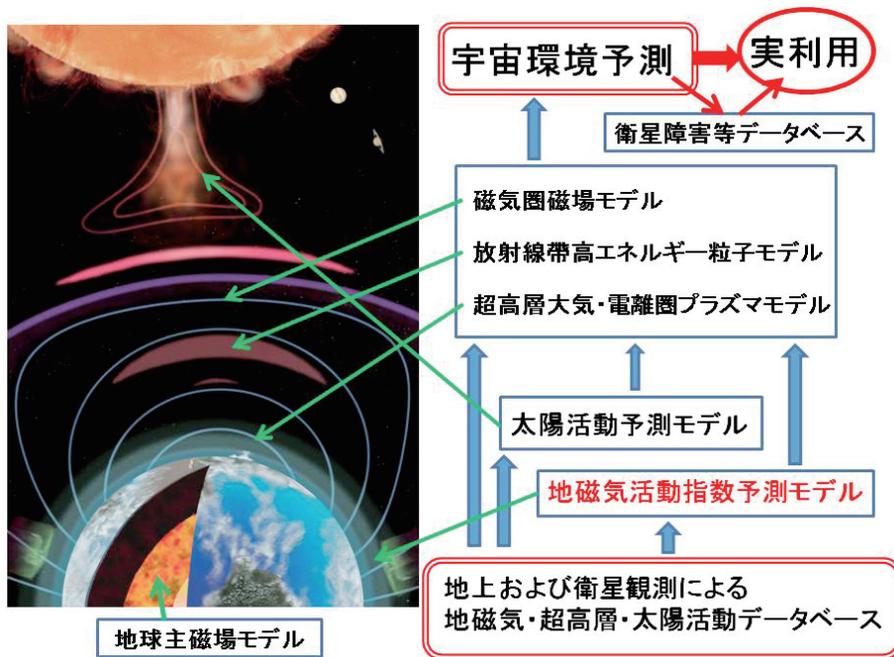


図2 様々な宇宙環境モデルの関連

となる観測データベースの関係を模式的に示す。

ここで紹介させていただくISO標準は、様々なタイムスケールで地磁気指数を予測するための手法とその結果の評価方法について記述したものである。

4. 地磁気指数変動予測のためのISO標準

現時点では地磁気変動のメカニズムは十分定量的に解明されたとは言えないし、そのエネルギー源である太陽活動の変動も物理学の基本原則から定量的に予測するという段階には至っていない。しかし、長期に亘る太陽および地磁気変動の観測データからは、一定の経験的あるいは統計的知識が得られており、それをを用いた予測方法が数多く提案されている。しかし、太陽活動や地磁気変動研究の専門家以外には(あるいは専門家であっても)それらから適切な予測方法を選び出し、利用することは容易ではない。このような状況に対

処するために検討され、今回策定されたISO標準が、ここで紹介する『ISO 16698 Space environment (natural and artificial) -- Methods for estimation of future geomagnetic activity』で、今年5月1日に制定・発行された日本提案のISO標準である。この標準は、通常のISO標準とは毛色が多少異なり、ある特定の方法を標準とするのではなく、利用者が、提案されている多くの予測方法とその適用範囲を理解し、適切な方法を選択・使用できるようにするために標準とすべき知識とプロセスを提供している。すなわち、各種地磁気指数の定義と既存の予測方法の分類および参照文献、予測方法を評価・公表するプロセスから構成される。

ここではその詳細については述べないが、一例として、太陽風の観測データを入力として、磁気嵐の指数である地磁気Dst指数^(注3)を予測する方法を紹介する。

図3は、情報通信研究機構(NICT)の宇宙

天気情報センターが提供している約1時間後のDst指数のリアルタイム予測図で、方法としては、ニューラルネットワークを用いている(文献1)。

<http://www2.nict.go.jp/aeri/swe/swx/ace/nnw/>

今回策定されたISO標準では同一の指数に対しても様々な方法を紹介している。図4は、米国コロラド大学で開発された、物理的考察も取り入れた半経験式に基づくDst指数のリアルタイム予測である(文献2)。

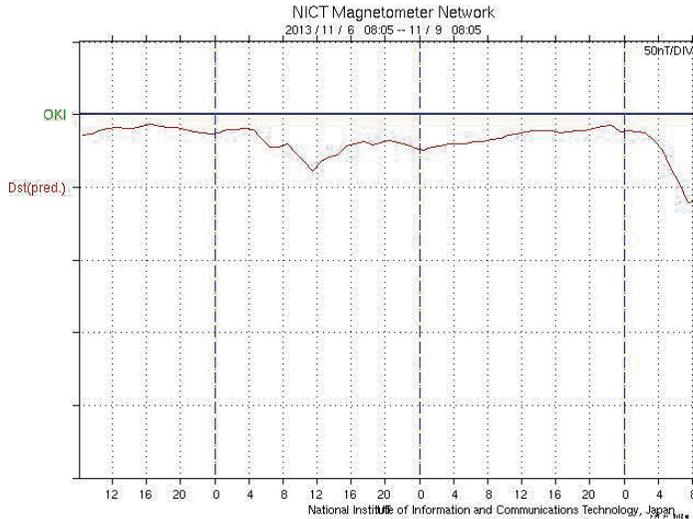


図3 情報通信研究機構 (NICT) の宇宙天気情報センターが提供しているDst指数のリアルタイム予測図

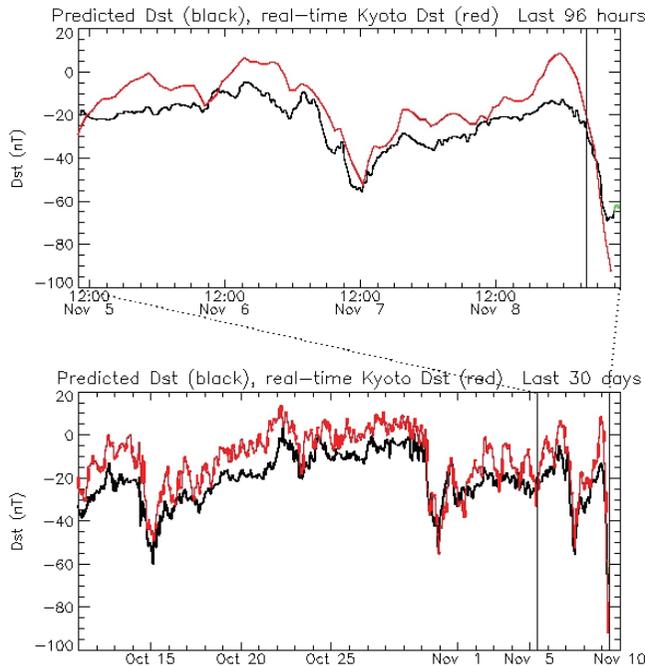


図4 別の方法によるDst指数のリアルタイム予測。赤線は実際のDst指数。

http://lasp.colorado.edu/space_weather/dsttemerin/dsttemerin.html

どちらの方法も太陽風のリアルタイム観測データを入力パラメータとして用いており、約1時間後のDst指数を両図に示す程度に、かなりよい精度で予測することができている。

しかし、より長時間先の変動を予測することは簡単ではない。それは太陽・太陽風の予測が必要となるため、上記方法で比較的よく予測できる理由の一つは、入力パラメータとして地球より上流側の太陽風観測データを地球周辺に到達する約1時間前に利用することができるためであり、太陽風データの利用ができない、より長期間先までの予測は、現時点では経験的あるいは統計的手法に頼らざるを得ない。

5. おわりに

現在の地磁気指数予測技術とその精度には明らかに限界があると同時に、開発・発展途上にある。しかし、宇宙開発の推進には、発展途上にあっても、利用可能な範囲で最良の手法が提供されるべきである。今回策定したISO規格の中で紹介された数々の手法が多くの利用者によって使われ、評価されることにより、例えば、5年後に予定されている改訂までに、方法の改良、あるいは、数値シミュレーションを含め、新しい手法の出現も期待される。また、衛星故障のデータベースを充実・公開し、それともリンクさせた予測手法が開発される必要がある。

(注1) 真夜中付近のオーロラ帯で急激にオーロラが明るくなり、爆発的に広がる現象を、オーロラサブストームとよぶ。この時、オーロラを光らせる高エネルギー電子（またはイオン）が大気を電離させ、電離層の電気伝導度が高くなるため、強い電流が流れる。磁気圏では同時に、磁力線再結合現象など様々なプラズマ現象が発生しているが、この一連の現象を磁気圏サブストームとよぶ。磁気嵐の期間には大きなサブストームが多数回発生するが、それ以外の通常の日でも一日平均数回発生している。

(注2) オーロラサブストーム時に極域に流れる電流強度をモニターするために、北半球のオーロラ帯に位置する11（または12）カ所の観測所で測定された地磁気擾乱水平（南北）成分を時間軸を揃えて重ね合わせ、その包絡線（エンベロープ）の下側の値をAL指数、上側をAU指数、それらの間の幅をAE指数と定義される。詳しくは、下記URL参照。

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/onAEindex.html>

(注3) 磁気嵐は、中低緯度で地磁気水平成分が数十nT以上、場合によっては数百nT以上大きく減少する場合を指す。この大きさの指標となるDst指数の算出には、中低緯度に分布し、経度方向にほぼ等間隔な4カ所の地磁気観測所の水平成分を用いる。各観測所データに対し、静かな日を基準とする変動分を求め、各時刻の値を4カ所で平均することにより算出される。詳しくは、下記URL参照。

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>

[参考文献]

- (1) Watanabe, S., E. Sagawa, K. Ohtaka, and H. Shimazu (2003), Operational models for forecasting Dst, *Space Weather* 2000, 31, 4, 829-834.
- (2) Temerin, M., and X. L. Li (2002), A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 107, A12.