

## 2-2-5 磁気圏モデルの数値予報への応用に向けて — AE 指数による検証 —

### 2-2-5 Application of the Magnetospheric Model for Numerical Forecast — Validation Using the AE Index —

北村健太郎 島津浩哲 藤田 茂 亘 慎一 國武 学  
品川裕之 田中高史

KITAMURA Kentarou, SHIMAZU Hironori, FUJITA Shigeru, WATARI Shinichi,  
KUNITAKE Manabu, SHINAGAWA Hiroyuki, and TANAKA Takashi

#### 要旨

高緯度の地磁気変動から算出される AE (Auroral Electrojet) 指数はオーロラ活動を示す指数であり、サブストームを始めとする磁気圏中の電磁じょう乱の目安として広く利用されている。リアルタイム磁気流体力学 (MHD) シミュレーションによって AE 指数の再現を試みた結果について報告する。シミュレーションの上流側の境界条件は ACE によって観測された太陽風データをリアルタイムで利用しているため、シミュレーションの結果は 1 時間後の AE 指数の変化を予測するものとなっている。247 日分のシミュレーションの結果について観測から求めた AE 指数との比較解析を行ったところ、全体の 64 % は相互相関係数が 0.5 を越えており AE 指数の予報可能性を十分に示す結果となった。本稿では、さらに観測によって得られた AE 指数とシミュレーションによって得られた AE 指数との比較評価を行い、太陽風-磁気圏結合に関する考察を行う。

Real-time magnetohydrodynamic (MHD) simulation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere (S-M-I) coupling system was used to calculate auroral electrojet (AE) indices. We compared the simulated AE indices for 247 days with the AE indices deduced from the magnetic variations at up to 12 stations located around the auroral latitude. The results show that the simulated AE reproduces the observed AE indices well. Of the 247 days, 64% had cross-correlation coefficients of more than 0.5. The result of the analysis indicates that the prediction of the AE index could be one of the most realistic contests in the space weather forecast. In this paper, the implication of the solarwind-magnetosphere coupling which is deduced from the comparison analysis between the onserved and simulated AE indices is also discussed.

#### 【キーワード】

リアルタイム MHD シミュレーション, AE 指数, サブストーム  
Real-time MHD simulation, AE index, Substorm

## 1 はじめに

宇宙天気予報を行うために多くの宇宙環境情報が利用されているが、中でも地上での地磁気観測データを元に算出される AE (Auroral Electrojet) 指数は、極域におけるオーロラの活動度を示す指標として広く利用されている。オーロラ活動は、

太陽風じょう乱に伴う磁気圏中でのサブストームなどによって急激な増光を伴うことが知られている。その際、磁気圏-電離圏間での三次元電流系の形成に伴い、極域電離層では急激で強いジェット電流が流れる。電離層でのジェット電流は、地上における地磁気の変化を引き起こし、AE 指数へ反映される。すなわち、AE 指数とは太陽地球

系物理学においては、太陽風-磁気圏-電離圏結合の帰結として多様な情報を含んでおり、宇宙環境を俯瞰するために非常に有用な指数である。

情報通信研究機構(NICT)では、スーパーコンピュータ(SX-8)を用いた磁気流体力学(MHD)シミュレーションによって太陽風-磁気圏-電離圏のプラズマ変動、磁場変動をリアルタイムで計算している。本シミュレーションでは上流側の境界条件として、ACEで観測された太陽風磁場、太陽風プラズマのリアルタイム情報を使用している。ACEは地球から太陽方向に約220 Re(Re:地球半径)上流のL1点で太陽風のモニタリングを行っており<sup>[1]</sup>、その観測データはNICTの10mアンテナでリアルタイム受信している。ACEから地球までの太陽風伝播時間は、おおむね1時間程度あるため、本シミュレーションにおける磁気圏変動の様子は、1時間後の磁気圏じょう乱を予測するものとして宇宙天気予報に利用が可能である。

## 2 AE指数

AE指数は、オーロラ帯で経度方向におおむね均等に分布した12観測点で観測された地磁気データを元に作成される<sup>[2][3]</sup>。現在は、これらの観測やデータ転送は、NICT、京都大学、ロシア極地研究所、ロシア科学アカデミー、アラスカ大学、ジョンスホプキンス大学が参画する

RapidMagプロジェクトを基軸とした国際的協力関係に基づいて運用されている<sup>[4]</sup>。表1にAE指数を算出するために利用される地磁気観測所のリストを示す。観測所は磁気緯度60度から70度にかけて分布しており、その磁場変動にはオーロラジェット電流の効果が大きく寄与する。

AE指数の算出方法は、これらの観測点で得られた地磁気変化のうち、南北成分(H)を用いる。図1は、2005年11月8日の各観測点のH成分をベースライン補正した後に重ね書きした図である。このときは、7観測点のデータが利用可能であった。重ね書きしたプロットのうち、最大の包絡線を赤で示しており、最小の包絡線を青で示している。オーロラ帯における地磁気H成分の変動においては、電離層上の東西方向のジェット電流の寄与が最も大きい。すなわち、東向きのジェット電流はH成分の正(北向)の変動を引き

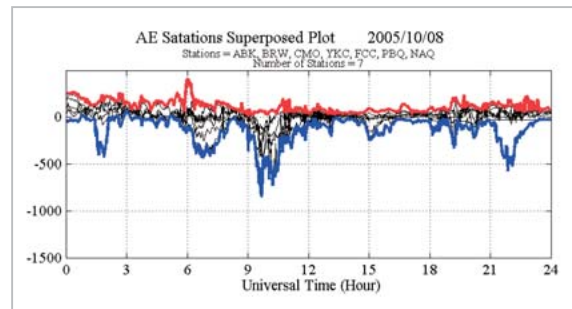


図1 2005年10月8日のAE観測点での重ね合わせプロット(地磁気H成分)

表1 AE指数に用いられる観測点のリスト(京都大学世界地磁気資料解析センターHPより参照)

Observatory	Station Code	Geographic Coord.		Geomagnetic Coord.	
		Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)	Long.(°E)
Abisko	ABK	68.36	18.82	66.04	115.08
Dixon Island	DIK	73.55	80.57	63.02	161.57
Cape Chelyuskin	CCS	77.72	104.28	66.26	176.46
Tixie Bay	TIK	71.58	129.00	60.44	191.41
Cape Wellen	CWE	66.17	190.17	61.79	237.10
Barrow	BRW	71.30	203.25	68.54	241.15
College	CMO	64.87	212.17	64.63	256.52
Yellowknife	YKC	62.40	245.60	69.00	292.80
Fort Churchill	FCC	58.80	265.90	68.70	322.77
Poste-de-la-Baleine	PBQ	55.27	282.22	66.58	347.36
Narsarsuaq (Narssarsuaq)	NAQ	61.20	314.16	71.21	36.79
Leirvogur	LRV	64.18	338.30	70.22	71.04

起こし、西向きのジェット電流は負(南向)の磁場変動を引き起こす。したがって図1においては、赤のプロットが東向きのジェット電流の指標となり AU 指数と呼ばれる。また青のプロットは西向き電流の指標となり AL 指数と呼ばれる。

図1で 0540 UT 頃より赤の AU 指数が増大しており、その後 0620 UT より青の AL 指数が急激に減じている。AU 指数が増大している期間は東向きの電離層電流が卓越しており、磁気圏ではサブストームの成長相によって磁気圏対流が増大していることを示している。その後、サブストーム爆発相の開始に伴って、西向きのジェット電流が急激に減じている。このように、AU 指数と AL 指数は経度方向における東向き及び西向きのジェット電流の最大値を表している。さらに、AU 指数、AL 指数より、AE 指数及び AO 指数を以下のように算出する [2][3]。

$$AE = AU - AL$$

$$AO = (AU + AL)/2$$

このように算出された、AE 指数は、オーロラの発達に伴う電離層のジェット電流の変動を強く反映する。図1においては、0620 UT の後に、0900 UT 及び 2100 UT にもサブストームに伴うオーロラジェット電流の発達が読み取れる。オーロラ活動に伴うジェット電流の変動は、太陽風-磁気圏-電離層の結合過程を経た帰結として出力されるものであり、各結合における物理過程を反映していると考えられる。

### 3 リアルタイムシミュレーション

過去の研究においても MHD シミュレーションはサブストームを初めとした磁気圏じょう乱をよく再現していることが知られている [5]-[12]。NICT では、ACE から受信した太陽風データを上流側の境界条件として、Tanaka [13]-[15] によって開発された磁気圏 MHD シミュレーションをリアルタイムで運用している。シミュレーションコードは、磁気圏と電離層といった異なる空間スケールのカップリングを効率よく解くために、非構造格子のグリッドシステムを用いた有限体積 TVD (Total variation-diminishing) 法が用いられている。シミュレーションの内側境界は 3 Re の距離とし、そ

こでの電場ポテンシャルを双極子磁場に沿って電離層に投影する。電離層に侵入した電場ポテンシャルに対して、電離層中のオームの法則より、ベダーセン電流とホール電流を計算する。このときの 3 次元電流系は以下のように計算される。

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \Phi_I = G_m (\text{rot} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_b) = J_{\parallel}$$

$$\sigma = \sigma_{EUV} + k_1 \sigma_{Diff}(P, \rho) + k_2 \sigma_J(J_{\parallel})$$

$$\Phi_m = \Phi_I - k_3 f_1(J_{\parallel}) J_{\parallel}$$

ここで、 $\sigma$  は電離層での電気伝導度テンソル、 $\Phi_I$  は電離層での電場ポテンシャル、 $\Phi_m$  は 3 Re での磁気圏のポテンシャル、 $\mathbf{B}_1$  は磁場の変動成分、 $\mathbf{n}_b$  は外向きの単位ベクトル、 $J_{\parallel}$  は磁力線に平行な電流成分(沿磁力線電流)をそれぞれ表している。また  $G_m$  は 3 Re から 1 Re までマッピングする際の幾何要素である。電離層に投影された電場ポテンシャルから電離層電流を求めることが出来るが、その際の電気伝導度はモデルより与えるのではなく、MHD シミュレーション中で動的に計算される。 $\sigma_{EUV}$ 、 $\sigma_{Diff}$ 、 $\sigma_J$  はそれぞれ、太陽紫外線による電気伝導度、拡散オーロラの振込み粒子による電気伝導度、沿磁力線電流の振込み電子による電気伝導度を表す。 $\sigma_{Diff}$  は太陽風動圧 ( $P$ ) と太陽風密度 ( $\rho$ ) の関数として定義され、 $f_1$  は沿磁力線電流の向きを決める係数である。 $k_1$  から  $k_3$  はスケーリング係数である。電気伝導度 ( $\eta$ ) は次のように定義される。

$$\eta = k_4 f_2(x) |J|^2 / |B|^2$$

ここで、 $f_2$  は時間に独立な関数であり地球に近い領域 ( $x > -20$  Re) から単調増加し、地球から離れた領域 ( $x > -60$  Re) で飽和する。また、 $k_4$  はスケーリングのための定数である。

図2はリアルタイムシミュレーションによって、惑星間空間衝撃波が磁気圏に衝突した後の時刻(右下図参照)における磁気圏および極域電離層の様子を再現している。右上図は子午面上でのプラズマ圧の分布を示している。衝撃波の衝突によって、磁気圏前面のシース領域における圧力上昇と尾部におけるプラズマシートの薄層化およびプラズモイドの放出が再現されている。また、左下図は北極から見た電離層上での電場ポテンシャル(コンタープロット)及び電気伝導度(カラー

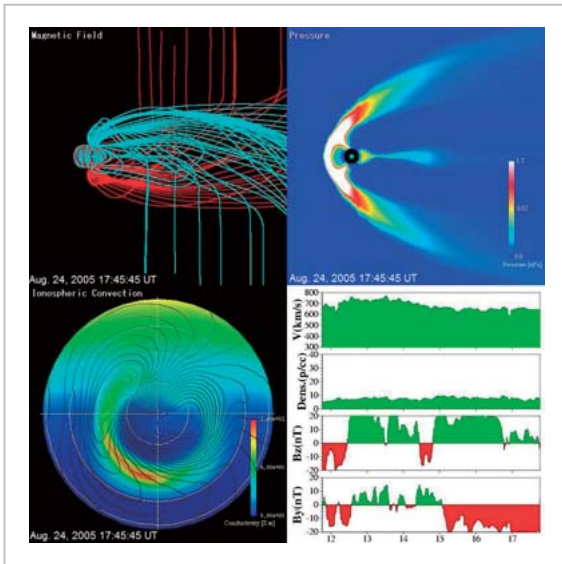


図2 MHD シミュレーションの例

(左上：磁力線分布、右上：圧力分布、左下：極冠息電気伝導度分布及び電場ポテンシャル、右下：入力太陽風パラメーター)

マップ)を示しており、衝撃波衝突直後に夜半前の領域においてオーロラ粒子の振込みによる電気伝導度の増大と、朝-夕方向の電場の発達がよく再現されていることが分かる。

## 4 シミュレーションと観測による AE 指数の比較

### 4.1 シミュレーション AE の算出方法による違い

シミュレーションによって得られた電離層電流系より、地上における地磁気変動は単純にビオサバルの法則より求めることが出来る。前述のように、AE 指数はオーロラ帯に位置する最大 12 観測点での地磁気変動より算出するが、観測点の緯度は最大で約 11 度のばらつきがある。そこで、本研究では、シミュレーションによる AE 指数の算出をする際に (1) 本来の観測点の位置に最も近い格子点での地磁気変動から算出した AE 指数 (以下  $AE_{12}$  と表記) (2) 緯度 60 度から 70 度の間のすべての格子点における磁場変動から算出した AE 指数 (以下  $AE_{all}$  と表記) の 2 通りの算出法を試みた (AL、AU、AO についても同様に表記)。

図 3(a) は 2006 年 7 月 28 日における、AE、AU、AL、AO の各指数を示している。それぞれ

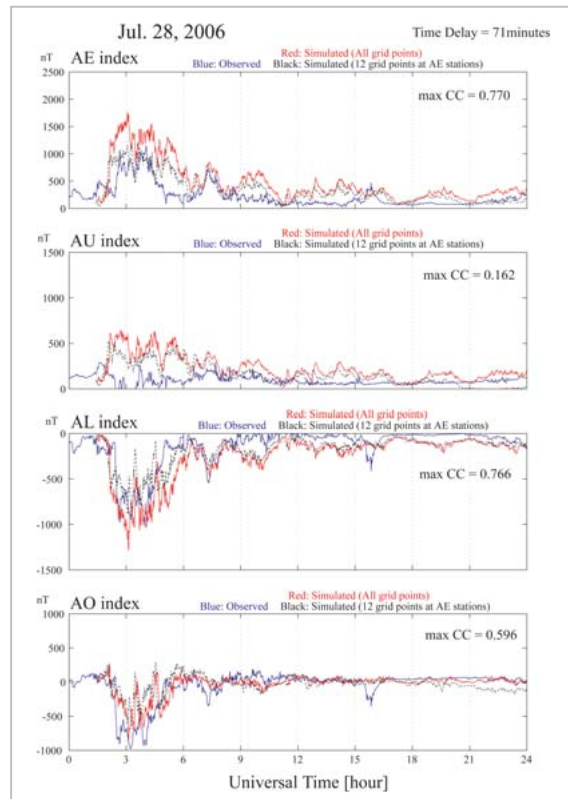


図3a 観測による指数とシミュレーションによる指数の比較 (2006 年 7 月 28 日の例)

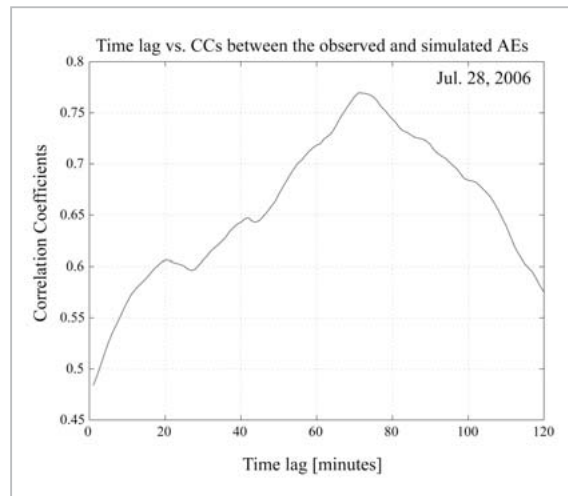


図3b 観測-シミュレーション間での時間差と相互相関係数の関係

の指数に対して、観測から求めた指数 (青線)、 $AE_{12}$  (黒線)、 $AE_{all}$  (赤線) を重ねて表示している。観測による AE 指数は、World Data Center(WDC) for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>) より提供された Quick-Look (QL) AE 指数を利用した。QL データ

は準リアルタイムで速やかにデータを提供することを目的に公開されており、細かなエラーの修正等を行われていない。そのため、本来は解析等に用いるには不向きなデータである。しかし本研究では、このようなリアルタイムデータを用いた宇宙天気予報への適用の妥当性等を評価するために、ACE データや AE 指数データは、ともにリアルタイムデータや QL データを利用している。

図 3(a) では 2 UT から 6 UT にかけてサブストームの発生に伴って各指数が大きく増大している。AE 指数においては、全体的にシミュレーションの AE 指数と観測の AE 指数との間にはよい一致が見られたが、大きさに関しては  $AE_{all}$  が  $AE_{12}$  に対して大きく算出される傾向が見られた。これは 12 観測点のうち 2 観測点は磁気度 70 度以上に位置するためであると考えられる。特に、高緯度の夕方側の観測点は AU 指数により寄与すると考えられている [16]。しかしながら、 $AE_{all}$  と  $AE_{12}$  の差異は、観測から求めた AE 指数との差に比べると十分に小さいため、以後  $AE_{all}$  をシミュレーションによって求めた AE 指数として取り扱う。

#### 4.2 シミュレーションによる AE 指数の再現性

図 3(a) の例について、シミュレーションより求めた AE 指数の再現性を検証する。観測の AE 指数では、0200 UT から 0500 UT にかけて、最大振幅約 1000 nT を超える明白なオーロラの活動が認められる。一方シミュレーションの AE 指数は同時間帯に同じような活動度が見られるが、その振幅は約 1700 nT を越えており、かつ、観測では見られないようなピーク間振幅が約 700 nT に達する変動が同時間帯に重畳している。しかし、0600 UT から 0800 UT にかけてのオーロラ活動に関しては、観測とシミュレーションの AE 指数は非常によく一致している。

AU、AL、AO 指数のそれぞれについて、観測とシミュレーションの指数の相互相関係数を計算した結果が図中に示されている。AL 指数と AO 指数はそれぞれ、0.766 及び 0.596 と高い相関を示しているのに対して、AU 指数では 0.162 とほぼ無相関の結果となった。このことは、AU 指数のプロットにおいて観測(青)とシミュレーション(赤、黒)の変動が 0200 UT-0500 UT 間において

大きく異なっていることから明らかである。じょう乱時において、シミュレーションの AU 指数は観測の AU 指数の値を大きく上回っている。この差は最大で 500 nT にも達する。

この結果は本研究で用いたグローバル MHD シミュレーションが、AL 指数に寄与する西向きオーロラジェット電流をよく再現するものの、AU 指数に寄与する東向きのジェット電流はサブストームなどのじょう乱時において実際よりも大きく見積ってしまうことを示唆している。ここでは典型的なサブストームイベントの一例を示して紹介したが、同様の傾向は他の多くのイベントにおいても見られた。この原因については、統計的な結果に基づいて後述する。

#### 4.3 観測とシミュレーションによる指数間の時間差

図 3(b) は図 3(a) における観測とシミュレーションの AE 指数に対して相互相関係数を計算した結果を示している。横軸は時間差を示し、相互相関係数は時間差に対して二次関数に準じた変化を示している。相互相関係数の最大値(maxCC)は時間差が 71 分のときに 0.77 を示した。この時間差は、太陽風速度が約 330 km/s の ACE から地球までの伝播時間に相当している。

ここで、観測とシミュレーションによる AE 指数間の時間差は、シミュレーションによって求めた AE 指数の評価に関して重要な要素となる。先述したように、時間差の原因は主に ACE からの太陽風伝播速度のみであるため、太陽風速度が増大すれば時間差は減少するはずである。図 4 は時間差と太陽風速度との関係を示したプロットである。横軸は時間差であり縦軸は  $1/V$  である ( $V$  は太陽風速度)。図中には maxCC が 0.4 以上のイベントのみをプロットしている。プロットは大きく散らばっているものの、時間差が大きくなるにしたがって、 $1/V$  が大きくなっていく様子が見られる。このプロットにおける二者の相互相関係数は 0.53 であった。散布しているプロットに対して一次の回帰分析を行った結果、 $y = 1.26 \times 10^{-5}x + 1.40 \times 10^{-3}$  ( $x$ : 時間差,  $y$ :  $1/V$ ) を得た。この結果より、時間差は主に太陽風速度の依存性を示していることが伺えるものの、 $1.40 \times 10^{-3}$  という  $y$ -切片の大きさは時間差が太陽風速度以外の要因

によってもコントロールされている可能性を示唆している。

図4における破線はACEの位置を地球から太陽方向へ220 Reとした場合に予想される  $1/V$  の時間差に対する関係を示している。これより、ほとんどのイベントにおいて実際の時間差は予測された時間差よりも長いことが分かる。このことか

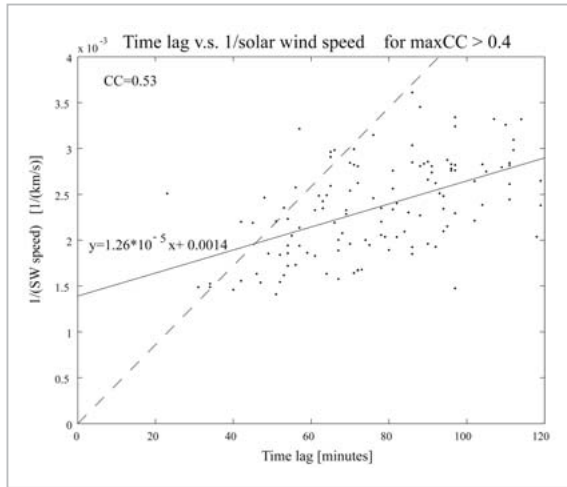


図4 観測—シミュレーション間での時間差と太陽風速度の関係(最大相互相関係数(maxCC)が4以上のイベント)

らも、観測とシミュレーションによるAE指数の時間差は、太陽風の伝播時間のみによって決まるのではないことが分かる。磁気圏の太陽風の変化の応答に関する時定数が、予測値からのずれに大きく寄与していることが示唆される。また、別の可能性として、太陽風の構造がACEから磁気圏へ伝播する間に変化している効果も複合していると考えられる[17]–[20]。

#### 4.4 相互相関係数の分布

図5は2005年8月から2006年9月にかけて太陽風の欠測や計算機の停止などの期間を除いた247日における、AE、AL、AU、AO指数のmaxCCの頻度分布を表している。AE指数のmaxCCは主に、0.4から0.8の間に分布しており、全体の64%となる158日において0.5以上を示した。この結果からも、シミュレーションによるAE指数は実際のオーロラ活動の状態をよく再現しており、1時間後の予報に利用可能であると考えられる。図5(b)–(d)にはそれぞれAU、AL、AO指数のmaxCCの頻度分布が示してある。AL指数の分布はAE指数と同様の傾向を示してお

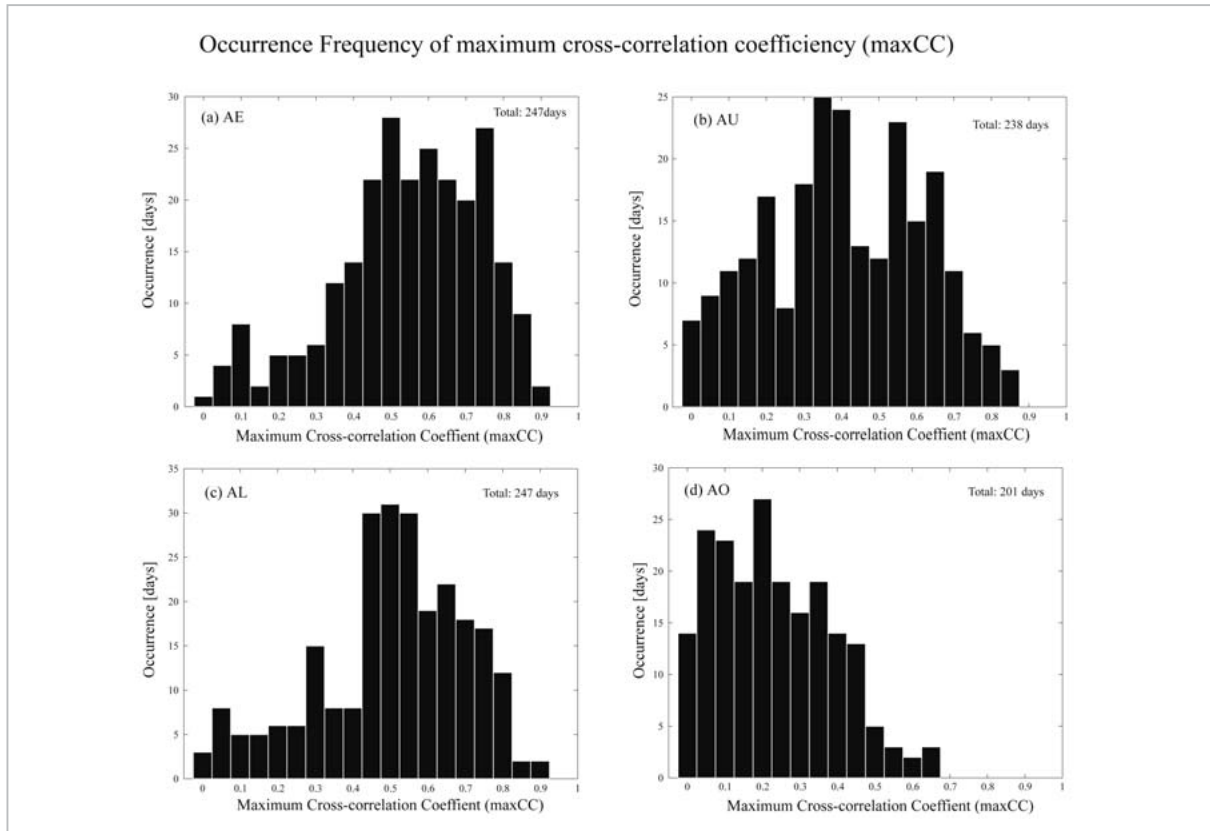


図5 各指数におけるmaxCCの頻度分布

り、約 54 % が 0.5 以上を占めている。一方、AU 指数と AO 指数に関してはそれぞれが異なる頻度分布を示した。AU 指数に関しては 0.4 をピークに幅の広い分布をしている。また、AO 指数に関しては、0.2 をピークに 96 % が 0.5 を下回り、非常に再現性の悪いことが明らかになった。

AL 指数と AU 指数の違いは、電離層電流の再現性の違いにあると考えられる。AL 指数における高い maxCC より、本シミュレーションはサブストームによる突発的な西向きのジェット電流はよく再現できていることが分かる。一方、東向き電流はサブストームの爆発相において、西向き電流と異なり狭い範囲に集中しては流れないとされている [21][22]。また、サブストーム中の極域における電場ポテンシャルは夕方側のセルの方が小さく、AU 指数は極冠の電場ポテンシャルの関数となることが知られている [23]。これらのことから、本シミュレーションでは広い範囲に分布している弱い東向きジェット電流が正確に再現されていないと考えられる。これらの理由に関して、本シミュレーションのモデルに組み込まれていない磁気圏-電離圏結合に関して、今後注意深く考察する必要がある。

#### 4.5 じょう乱時におけるシミュレーション AE 指数の評価

AE 指数の予報という観点から考えた場合、シミュレーション AE 指数の再現性に関しては静穏時よりもむしろ AE 指数が大きな変化を示すじょう乱時における再現性の評価に気を配るべきである。そこで、観測から求めた AE 指数 (1 分サンプリング) に対する標準偏差を求め maxCC との比較を行った。図 6 は横軸に観測 AE 指数の標準偏差、縦軸に maxCC の値をとっている。プロットは広く散布しており、明確な線形関係は認められない。しかし分布の状態は標準偏差が 100 nT を境に異なる傾向を示している。AE じょう乱時として標準偏差 100 nT 以上の領域に注目すると、120 日のうち 74 % は maxCC が 0.5 以上であった。一方で静穏時にあたる標準偏差 100 nT 以下の領域では、0.5 以上の maxCC を示すのは全体の 36 % に過ぎなかった。すなわち、シミュレーション AE 指数は静穏時よりも変動の激しいじょう乱時の方がより高い再現性を示している。

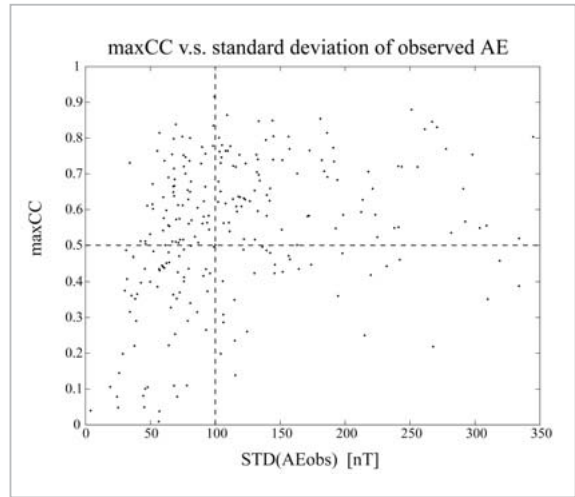


図6 観測による AE 指数の標準偏差と maxCC の関係

シミュレーションのタイムステップは通常 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件によって決まるがそれは通常 1 秒以下である。本シミュレーションでは、シミュレーション AE 指数として 1 分サンプリングのデータを生成したが、シミュレーションに短周期の変動が発生している可能性がある。Tanaka [24] は、MHD シミュレーションによって、サブストームの発達相から爆発相までの観測的な特徴をうまく再現したが、これらのシミュレーションは磁気圏対流を十分に発達させる理想的な太陽風条件の下で行われた。本 MHD シミュレーションでは、リアルタイムに衛星で観測された太陽風データを用いて行うため、静穏時における太陽風の微小な摂動成分がシミュレーション内に大きく反映されていると考えられる。

### 5 シミュレーション AE 指数から考察される太陽風-磁気圏結合系

AE 指数はオーロラの活動度の指標として広く利用されており、特にサブストームの判別やその特徴を認識するために多く活用されている。サブストームは、太陽風-磁気圏結合系の代表的な現象の一つであり、AE 指数の変動が上流に当たる太陽風のパラメーター (磁場、速度、圧力等) に高い依存性を示すことは良く知られている。しかしサブストーム発生時におけるエネルギー蓄積・開放過程に関しては、未だ多くの未解決問題が存在している [24] - [30]。

これまでに、太陽風のじょう乱に対する AE 指数の変動に関しては多くの比較研究がなされてきている(例: [31][32][16])。これらの研究が示すことは、太陽風-磁気圏の結合系は基本的に非線形の結合系であり、サブストームにおけるエネルギーの蓄積・解放過程は、AE 指数の変化に包括されているということである。

本稿で示した、シミュレーションによる AE 指数と観測による AE 指数との顕著な違いは、AE 指数じょう乱時においてシミュレーションの指数には大振幅の短周期変動が多く重畳していることと、小規模な短周期変動やサブストーム的な変化が静穏時においてもシミュレーションの AE 指数に現れることであった。実際の太陽風の変動には様々な時定数の変化が含まれているが、リアルタイムの太陽風データを入力とする本シミュレーションではすべての微小変動に対する磁気圏の応答まで計算されている。Uritsky<sup>[33]</sup>は、3.5 時間以内の太陽風変動は基本的に AE 指数の強度変化の時定数とは無関係であると指摘している。本シミュレーションにおける観測 AE 指数との不一致は、このような実際の磁気圏の応答とは異なっている。すなわち、実際の太陽風-磁気圏結合系では、本シミュレーションには含まれていないような、太陽風の短周期微小変動に対して磁気圏応答

の際にエネルギー流入を緩衝ないし整流する過程が含まれていることを示唆している。

## 6 むすび

本 MHD シミュレーションから導出される AE 指数は、観測の AE 指数と比較的よい一致が見られ、特に磁気圏じょう乱時において高い相関性を示した。この結果は、MHD シミュレーションを基にした AE 指数の予報が十分に可能であることを証明している。しかし、今後より精度の高い現実に近い予報を行うために、粒子効果の導入や、計算のタイムステップよりも短時間の爆発的・突発的現象などを、どの様にシミュレーション内に取り込んで行くかを検討する必要がある。

## 謝辞

本稿執筆にあたって、京都大学地磁気世界資料解析センターのデータベースより AE 指数データを利用させていただいた。太陽風データは National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) の Space Environment Center (SEC) より提供頂いた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1 Zwickl, R. D., K. A. Doggett, S. Sahm, W. P. Barrett, R. N. Grubb, T. R. Detman, V. J. Raben, C. W. Smith, P. Riley, R. E. Gold, R. A. Mewaldt, and T. Maruyama, "The NOAA Real-Time Solar-Wind (RTSW) system using ACE data", *Space Sci. Rev.*, 86, 633-648, 1998.
- 2 Davis, T. N., and M. Sugiura, "Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations", *J. Geophys. Res.*, 71, 785, 1966.
- 3 Kamei, T., M. Sugiura, and T. Araki, "Auroral electrojet (AE) indices for January-June 1978", Data book No. 3, World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, Japan, 1981
- 4 Takahashi K., C. Meng, T. Kamei, T. Kikuchi, and M. Kunitake, "Near-Real-Time Auroral Electrojet Index: An International Collaboration Makes Rapid Delivery of Auroral Electrojet Index", *Space Weather*, 2, S11003, doi:10.1029/2004SW000116, 2004.
- 5 Walker, R. J., T. Ogino, J. Raeder, and M. Ashour-Abdalla, "A global magnetohydrodynamic simulation of the magnetosphere when the interplanetary magnetic field is southward: The onset of magnetotail reconnection", *J. Geophys. Res.*, 98, 17235, 1993.
- 6 Fedder, J. A. and J. G. Lyon, "The Earth's magnetosphere is 165 RE long: Self-consistent currents, convection, magnetospheric structure, and processes for northward interplanetary magnetic field", *J. Geophys. Res.*, 100, 3623, 1995.



- 7 Raeder, J., R., J. Walker, "M. Ashour-Abdalla, The structure of the distant geomagnetic tail during long periods of northward IMF", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 349-352, 1995.
- 8 Spicer, D. S., S. T. Zalesak, and R. Lohner, S. Curtis, "Simulation of the magnetosphere with a new three dimensional MHD code and adaptive mesh refinement: Preliminary results", *Adv. Space Res.*, 18, 253, 1996.
- 9 Elsen, R. K., and R. M. Winglee, "The average shape of the Magnetopause: A comparison of three-dimensional global MHD and empirical models", *J. Geophys. Res.*, 102, 4799-4820, 1997.
- 10 Janhunen, P., H. and E. J. Koskinen, "The closure of Region-1 field-aligned current in MHD simulation", *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1419-1422, 1997.
- 11 White, W. W., G. L. Siscoe, G. M. Erickson, Z. Kaymaz, N. C. Maynard, K. D. Siebert, B. U. O. Sonnerup, and D. R. Weimer, "The magnetospheric sash and the cross-tail S", *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1605, 1998.
- 12 Song P., D. L. De Zeeuw, T. I. Gombosi, C. P. T. Groth, and K. G. Powell, "Numerical study of solar wind-magnetosphere interaction for northward interplanetary magnetic field", *J. Geophys. Res.*, 104, 28361, 1999.
- 13 Tanaka, T., "Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields", *J. Comput. Phys.*, 111, 381-389, 1994.
- 14 Tanaka T., "Generation mechanisms for magnetosphere-ionosphere current systems deduced from a three-dimensional MHD simulation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling processes", *J. Geophys. Res.*, 100, 12057, 1995
- 15 Tanaka T., "Interplanetary magnetic field  $B_y$  and auroral conductance effects on high-latitude ionospheric convection patterns", *J. Geophys. Res.*, 106, 24505, 2001
- 16 Allen, J. H., and H. W. Kroehl, Spatial and temporal distributions of magnetic effects of auroral electrojets as derived from *AE* indices", *J. Geophys. Res.*, 80, 3667-3677, 1975.
- 17 Paularena K. I., G. N. Zastenker, A. J. Lazarus, and P. A. Dalin, "Solar wind plasma correlations between IMP 8, INTERBALL-1 and WIND", *J. Geophys. Res.*, 103, 14601, 1998
- 18 Richardson J. D., F. D. Dashevskiy, and K. I. Paularena, "Solar wind plasma correlations between L1 and Earth", *J. Geophys. Res.*, 103, 14619, 1998
- 19 Eastwood J. P., A. Balogh, and M. W. Dunlop, "Cluster observations of the heliospheric current sheet and an associated magnetic flux rope and comparisons with ACE", *J. Geophys. Res.*, 107, 1365, doi: 10.1029/2001JA009158, 2002
- 20 Lepping R. P., C. - C. Wu, and K. McClernan, "Two-dimensional curvature of large angle interplanetary MHD discontinuity surfaces: IMP-8 and WIND observations", *J. Geophys. Res.*, 108, 1279, doi: 10.1029/2002JA009640, 2003
- 21 Kamide Y., A. D. Richmond, B. A. Emery, C. F. Hutchins, B. - H. Ahn, O. de la Beaujardiere, J. C. Foster, R. A. Heelis, H. W. Kroehl, F. J. Rich, and J. A. Slavin, "Ground-based studies of ionospheric convection associated with substorm expansion", *J. Geophys. Res.*, 99, 19451, 1994.
- 22 Kamide Y., W. Sun, and S. - I. Akasofu, "The average ionospheric electrodynamics for the different substorm phases", *J. Geophys. Res.*, 101, 99, 1996.
- 23 Weimer D. R., "Substorm influence on the ionospheric electric potentials and currents", *J. Geophys. Res.*, 104, 185, 1999.

- 24 Tanaka T., "The state transition model of the substorm onset", *J. Geophys. Res.*, 105, 21081, 2000.
- 25 Baker, D. N., A. J. Klimas, D. Vassiliadis, T. I. Pulkkinen, and R. L. McPherron, "Reexamination of driven and unloading aspects of magnetospheric substorms", *J. Geophys. Res.*, 102, 7169, 1997.
- 26 Shi Y., E. Zesta, L. R. Lyons, K. Yumoto, and K. Kitamura, "Statistical study of effect of solar wind dynamic pressure enhancements on dawn-to-dusk ring current asymmetry", *J. Geophys. Res.*, 111, A10216, doi: 10.1029/2005JA011532, 2006.
- 27 Kitamura, K., H. Kawano, S. Ohtani, A. Yoshikawa, and K. Yumoto, "Local-time Distribution of Low and Middle Latitude Ground Magnetic Disturbances at Sawtooth Injections of April 18-19, 2002", *J. Geophys. Res.*, 110, A07208, doi: 10.1029/2004JA010734, 2005.
- 28 Kitamura, K., H. Kawano, S. Ohtani, A. Yoshikawa, K. Yumoto, and the Circum-pacific Magnetometer Network Group, "Quasi-periodic substorms during recovery phase of magnetic storm for space weather study", *Proceedings of the International Symposium on Information Science and Electrical Engineering 2003*, 354-357, Nov. 13-14, 2003.
- 29 Lyons L. R., G. T. Blanchard, J. C. Samson, R. P. Lepping, T. Yamamoto, and T. Moretto, "Coordinated observations demonstrating external substorm triggering", *J. Geophys. Res.*, 102, 27039, 1997.
- 30 Lyons L. R., D. - Y. Lee, C. - P. Wang, and S. B. Mende, "Global auroral responses to abrupt solar wind changes: Dynamic pressure, substorm, and null events", *J. Geophys. Res.*, 110, A08208, doi:10.1029/2005JA011089, 2005.
- 31 Bargatze, L. F., D. N. Baker, R. L. McPherron, and E. W. Hones, "Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity", *J. Geophys. Res.*, 90, 6387, 1985.
- 32 Klimas, A. J., D. Vassiliadis, D. N. Baker, and D. A. Roberts, "The organized nonlinear dynamics of the magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 101, 13089-13113, 1996.
- 33 Uritsky, V. M., A. J. Klimas, and D. Vassiliadis, "Comparative study of dynamical critical scaling in the auroral electrojet index versus solar wind fluctuations", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3809-3812, 2001.



北村 健太郎

徳山工業高等専門学校機械電気工学科  
助教 博士(理学)  
太陽地球系物理学、宇宙天気



島津 浩哲

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ主任研究員 博士(理学)  
宇宙空間物理学



藤田 茂

気象大学校准教授 理学博士  
磁気圏電離圏系物理学



萱 慎一

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ研究マネージャー 博士(理学)  
太陽地球系物理学、宇宙天気



國武 学

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ主任研究員  
磁気圏物理学、超高層物理学



品川 裕之

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ主任研究員 Ph. D.  
電離圏物理学



田中 高史

九州大学大学院理学研究院教授  
理学博士  
複合系磁気圏物理学

太陽宇宙環境の計測・予測に関する研究開発／宇宙環境(ジオスペース環境)の監視と予測／磁気圏モデルの数値予報への応用に向けてー A E 指数による検証ー