

## グローバル MHD シミュレーションによる AE 指数予報の可能性

北村健太郎(1)、島津浩哲(2)、藤田茂(3)、亙慎一(2)、国武学(2)、田中高史(3)

(1): 徳山工業高等専門学校、(2): 情報通信研究機構、(3): 気象大学校、(4): 九州大学理学研究院

## 1. はじめに

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。本報では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。

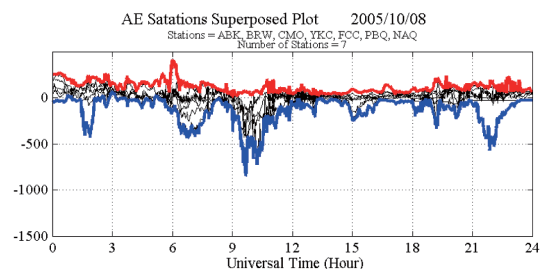
2. *AE* 指数とは

*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 [Davis and Sugiura, 1966; Kamei et al., 1981]。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 に示したように、最大 12 観測点での磁場変動プロットを重ね書きした後、上部の包絡線(赤)を *AU* 指数とし、下部の包絡線 (青) を *AL* 指数とする。*AL*, *AU* 指数より以下のように *AE* 指数及び *AO* 指数を求める。

$$AE = AU - AL$$

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

図 1. *AU*, *AL* 指数の算出方法

## 3. MHD シミュレーション

本シミュレーションでは上流の境界条件として、ACE で観測された太陽風データ (磁場、速度、密度、温度) を利用する [Tanaka, 1995, 2000, 2001]。

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。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、朝一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。ここで、求めた電場ポテンシャルと、電気伝導度より電離層中の電流密度を求め、AE 指数を算出する。

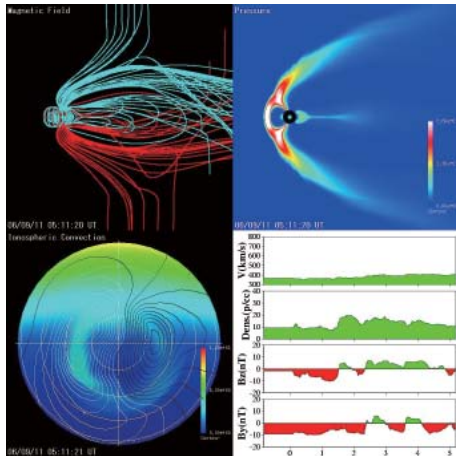


図 2. MHD シミュレーションの例

#### 4. シミュレーションと観測との比較

図 3 に観測で求まる指数とシミュレーションから算出した指数の比較プロットを示す。青線が観測から求まる実際の AE 指数である。赤線は、シミュレーションで計算した指数のうち、オーロラ帯の全格子点から算出した結果である。黒線は、実際の AE 観測点に最も近い 12 格子点から算出した結果を示している。

観測の AE 指数では、0200UT から 0500UT にかけて、最大振幅約 1000nT 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 1700nT 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 700nT に達する変動が同時間帯に重畳している。しかし、0600UT から 0800UT 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。

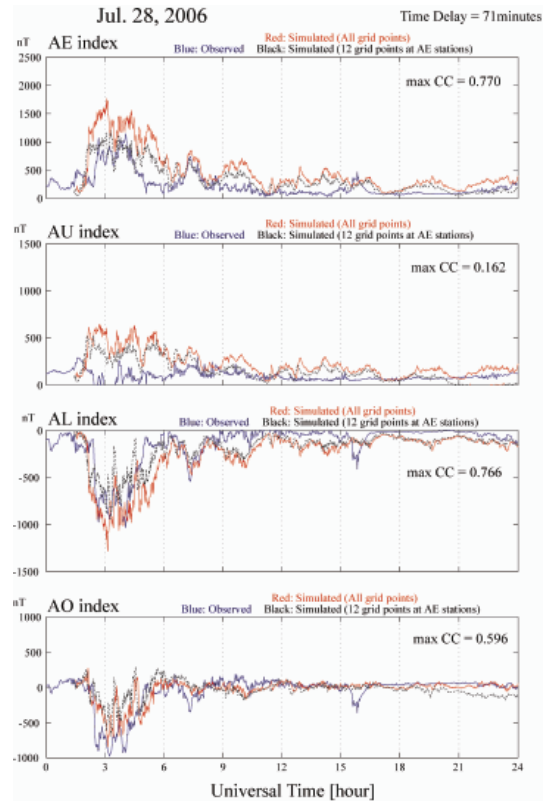


図 3. シミュレーション指数と観測の指数との比較

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 指数は 0.162 と非常に相関が悪い結果となった。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 0200UT—0500UT 間において大きく異なっていることから明らかである。シミュレーションの AU 指数は、じょう乱時において、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 500nT にも達する。

この結果は本研究で用いたグローバル MHD シミュレーションにおいて、AL 指数に

寄与する西向きオーロラジェット電流はよく再現されているものの、 $AU$  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は実際よりも大きく再現されている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。

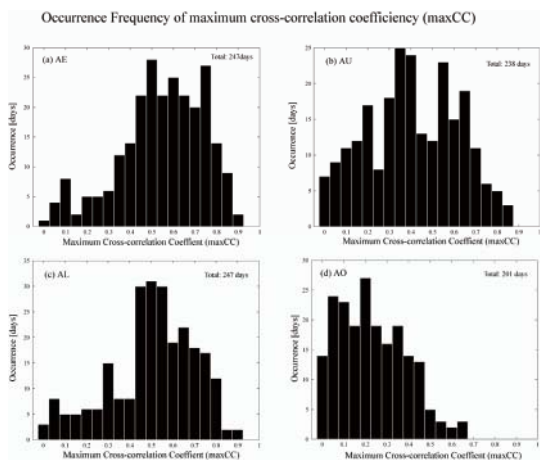


図 4. 相互相関係数の統計結果

本研究では、オーロラ帯の全格子点から求めた指数をシミュレーションから算出した指数と定義し、観測から求まる指数との相互相関係数を計算した。それぞれの時間を1分ずつずらしながら、相互相関係数を計算し、その値の最大値を  $\text{maxCC}$  と定義し、そのときの時間差も求めた。これらの値は図3にも記載されているが、274日分のデータにおける統計結果を図4に示す。 $AE$  指数の  $\text{maxCC}$  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。このことより、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4(b)-(d)にはそれ

ぞれ  $AU$ 、 $AL$ 、 $AO$  指数の  $\text{maxCC}$  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り、約54%が0.5以上を占めている。しかしながら、 $AU$  指数と  $AO$  指数に関してはそれぞれ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。

$AE$  指数の  $\text{maxCC}$  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。このことより、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4(b)-(d)にはそれぞれ  $AU$ 、 $AL$ 、 $AO$  指数の  $\text{maxCC}$  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り、約54%が0.5以上を占めている。しかしながら、 $AU$  指数と  $AO$  指数に関してはそれぞれ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統計的にも明らかになった。

## 5. $AU$ 指数の問題点

シミュレーションと観測の指数の比較において、 $AU$  指数における相互相関係数の悪さは、観測点の分布に起因すると考えられる。過去の研究より、東向きの電流はサブストームの爆発相には、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 (*Kamide et al., 1994, 1996*)。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 (Weimer, 1999)。

図5は  $AU$  指数を決定する包絡線において、どの磁気緯度に位置する観測点のデータが採用されたかを示す分布図である。これによると、 $AU$  指数に寄与するのは、概ね磁気緯度が69度付近の観測点であることが分かる。

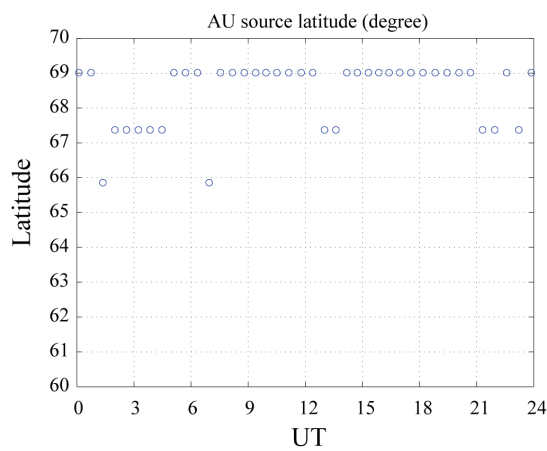


図5.  $AU$  指数算出時の緯度分布

これに対して、図6は同様に、 $AU$  指数に寄与する観測点の地方時分布を求めた結果である。これより、 $AU$  指数に寄与するのは、主に15-18時の地方時に位置する(夕方側)観測点であることが分かる。

ここで、 $AE$  指数算出のための12観測点の位置を精査すると、TIK,CWEに関しては、磁気緯度がそれぞれ、60.44度、61.79度とたの観測点に対して、低緯度側に位置していることが分かる。

すなわちこれらの観測点は、実際には  $AU$  指数算出時にあまり寄与していない可能性が示唆される。それぞれの観測点の磁気経度は、191.41度及び237.1度であり、これらの観測点が夕方側に位置するのは、世界時間で

概ね4時から10時に相当する。そのため、この時間帯に関しては、観測の  $AU$  指数が正確に算出されていない可能性が示唆される。

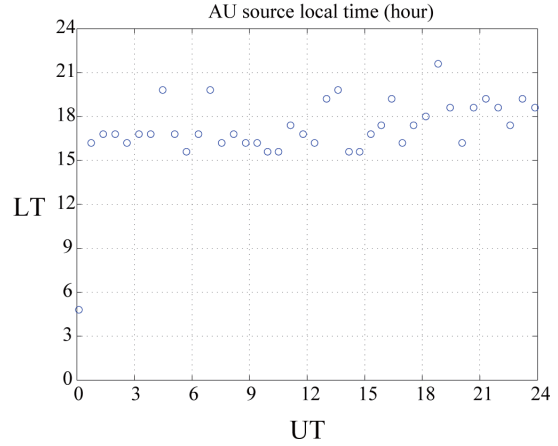


図6.  $AU$  指数算出時の地方時分

### 6. まとめ

$ACE$  で観測されたリアルタイムの太陽風データを用いた、グローバルMHDシミュレーションによって、地上での  $AE$  指数を再現した。 $AE$  指数に関しては、全体の64%が相互相関係数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を得た。一方で、現在の  $AE$  指数導出のための観測点の配置には、特に  $AU$  指数に関して正確な値を算出できていない可能性が示唆された。今後、注意深い検証が必要である。

### (参考文献)

Davis, T. N., and M. Sugiura, Auroral electrojet activity index  $AE$  and its universal time variations, *J. Geophys. Res.*, 71, 785, 1966. 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. 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. 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. Tanaka T., The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res.*, 105, 21081, 2000.

- Tanaka T., Interplanetary magnetic field  $B_y$  and auroral conductance effects on high-latitude ionospheric convection patterns, *J. Geophys. Res.*, 106, 24505, 2001
- 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.
- Kamide Y., W. Sun, and S. -I. Akasofu, The average ionospheric electrodynamic for the different substorm phases, *J. Geophys. Res.*, 101, 99, 1996.
- Weimer D. R., Substorm influence on the ionospheric electric potentials and currents, *J. Geophys. Res.*, 104, 185, 1999.