

データ同化を用いたオーロラ活動指数の推定

三好 由純¹・上野 玄太²・山本 凌大¹・町田 忍¹・
能勢 正仁¹・塩田 大幸³・中村 紗都子¹

(受付 2022 年 1 月 4 日；改訂 4 月 13 日；採択 4 月 18 日)

要 旨

オーロラは、宇宙空間からの荷電粒子が超高層大気と衝突して起こる発光現象であり、地球周辺の宇宙空間(ジオスペース)の電磁気的な活動を反映して、その動態を様々に変化させる。このオーロラ活動を指標化したものとして、オーロラに伴う電離圏の電流によって変化する地上磁場変化にもとづいたオーロラ活動指数(AU, AL, AE)が広く用いられている。このオーロラ活動指数は、オーロラ活動のみではなくジオスペース全体の電磁気的な変動を反映するものでもあるため、宇宙天気予報の観点から重要な課題である。本研究では、このオーロラ活動指数の高精度予測を目指して、粒子フィルターを用いたデータ同化によるオーロラ活動指数の推定方法を開発した。システムモデルには、先行研究で提案されたオーロラ活動指数の時間発展方程式を用い、AU 指数および同論文で提案されたカップリングパラメータを状態変数ベクトルとしている。また、観測ベクトルとして、オーロラ活動指数の一つである AU 指数を用いている。開発したコードを用いて、1998 年から 2015 年までの期間について、AU 指数のデータ同化計算を行った。データ同化にもとづいてカップリングパラメータを動的に推定することにより、先行研究に比べて AU 指数の再現能力が大きく向上した。また、データ同化によって推定されたカップリングパラメータの解析を行ったところ、カップリングパラメータは季節および年によって値が異なることが明らかとなり、電離圏の電気伝導度の変化の季節、年変化に対応したものである可能性が示唆された。

キーワード：データ同化、粒子フィルター、オーロラ活動予測、宇宙天気予報。

1. はじめに

ジオスペースと呼ばれる地球周辺の宇宙空間では、太陽からのプラズマ流である太陽風と惑星間空間磁場(IMF)が、地球の固有磁場と相互作用することによって、磁気圏と呼ばれる領域を形成している(小野・三好, 2012; Borovsky and Valdivia, 2018)。極域超高層に輝くオーロラは、この磁気圏に存在する電子が超高層大気へ降り込み、高度 100km 付近の大気と衝突することによって起こる発光現象である。特にオーロラが爆発的に輝くときには、高さ 100km 付近の電離圏領域にオーロラジェット電流と呼ばれる水平方向の電流が流れ、その結果、地上の磁場の南北成分も大きく変動する。そのため、極域で地上磁場を観測することによって、オーロラ

¹ 名古屋大学 宇宙地球環境研究所：〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町

² 統計数理研究所：〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3

³ 情報通信研究機構 電磁波研究所：〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

の活動度をモニタすることが可能となる。

また、IMFが南を向いた状態がしばらく続くと、磁気再結合を通して、磁気圏や電離圏の活動が活性化し、サブストームと呼ばれる大規模な電磁氣的擾乱現象が発生する。たとえば、サブストームのときには、夜側磁気圏から地球周辺に向かって、高温のプラズマの注入が起これ、その結果として人工衛星の帯電に伴う障害リスクが高まることが指摘されている。また、このサブストームのときには、オーロラが爆発的に輝くとともに、オーロラジェット電流が非常に強くなり、地上の送電線網に影響が及ぶこともある。このようにサブストームは、人類の社会基盤に様々な影響を及ぼす可能性がある。人間活動に密接に関連した宇宙環境の総称を宇宙天気と呼び、その環境変動の予測は宇宙天気予報と呼ばれるが、サブストームの予測、あるいはオーロラ活動度の予測は、このような宇宙天気予報の観点から重要な意義を持つものである。

オーロラの活動の度合いを表す指標として、オーロラジェット電流が起こす地上磁場の変動から算出する、次の3つの指数(AU, AL, AE)がよく使われる(Davis and Sugiura, 1966; WDC, 2005)。AU, AL 指数を表す変数 $AU(t)$, $AL(t)$ は、極域の12箇所の地上磁場観測点で得られた東向き最大のオーロラジェット電流 I_{EMax} , 西向き最大のオーロラジェット電流 I_{WMax} が引き起こす地磁気の時間変動に対応したものであり、磁束密度 nT を単位として持ち、以下のように表される。ここで、 μ_0 は真空の透磁率を表す。

$$AU(t) \propto \mu_0 I_{EMax}$$

$$AL(t) \propto \mu_0 I_{WMax}$$

$$AE(t) = AU(t) - AL(t)$$

このオーロラ活動指数の予測のために、これまで様々なモデルが提案されてきた。そのうち、Goertz et al. (1993)は太陽風とオーロラジェット電流をカップリングした非線形モデルを提案している。このモデルでは、AU 指数は、磁気圏の昼側で IMF と地球磁場との磁気再結合を反映した変数、一方、AL 指数を夜側の磁気圏における電場に対する変化として考えている。さらに、このモデルでは、磁気圏と電離圏の結合は、磁気圏の電場の変化によって起こる電磁流体波(Alfvén 波)によって生じるとしている。Goertz et al. (1993)では、1979年の特定の2日間において、後述の式(2.3)を含む方程式系に基づいた AE 指数の予測を行い、相関係数は約0.9と高精度の予測に成功した。しかし、この Goertz et al. (1993)では、式(2.3)を含む方程式系におけるパラメータを、この2日間に限って最適化しており、そのままでは他の期間にも適用することは難しいことが指摘されている(McPherron and Rostoker, 1993)。

また、AU 指数は driven 過程と呼ばれる太陽風電場によって直接駆動される磁気圏内の物理過程に関わる一方、AL 指数は driven 過程に加えて、磁気圏が太陽風から取り込んで尾部に蓄積し、それを短時間に解放する unloading 過程に関わっていることが知られている(たとえば、Li et al., 2007)。そのため、driven 過程のみを取り入れた Goertz et al. (1993)の研究においては、AL 指数に関する理論的な検討が不十分であることが指摘されている(Baker et al., 1997)。

そこで、本研究では Goertz et al. (1993)によって提案された AU 指数のみを取り上げ、その振る舞いを記述する時間発展方程式に対して、モデルにおけるパラメータをデータ同化によって動的に推定することで、長期間にわたって AU 指数を高精度で予測することを目的とする。さらに、データ同化によって推定されたパラメータの時間変化を分析し、パラメータの意味を議論する。

2. モデルとデータ

2.1 状態空間モデル

本研究においては、次のような非線形・非ガウスのシステムモデル、および非線形・ガウス

の観測モデルとなっている。

$$(2.1) \quad x_t = f_t(x_{t-1} + v_t)$$

$$(2.2) \quad y_t = h_t(x_t) + w_t$$

ここで、 x_t は時刻 t における状態変数ベクトル、 v_t は時刻 t におけるシステムノイズベクトル、 y_t は時刻 t における観測ベクトル、 w_t は時刻 t における観測ノイズベクトルを表す。式 (2.1) は時刻 t のシステムモデルを、また式 (2.2) は時刻 t の観測モデルを示す。これらの状態変数ベクトルおよび観測ベクトルについては後述する。

2.2 システムモデルと観測モデル

本研究では、システムモデルとして、Goertz et al. (1993) が提唱した太陽風の電場 E_y を入力とした AU 指数の変動を計算する微分方程式を用いた。

$$(2.3) \quad \tau_{AD} \frac{dAU_d(t)}{dt} + AU_d(t) = a_1 E_y(t)$$

ここで、 t は時間を表す。また、Goertz et al. (1993) では、direct driven による AU の変化を明示するために、その指数に対応する変数を AU_d としており、本研究もそれに倣った表記を行っている。

本モデルは、太陽風の電場 E_y を入力として、AU 指数の時間変化を出力するものであり、磁気再結合が起こることによって、太陽風の電場が電離圏の電場を発達させるということを、式 (2.3) によって表している。Goertz et al. (1993) によれば、この式において a_1 と τ_{AD} は以下のように与えられる。

$$(2.4) \quad a_1 = \mu_0 g_D \Sigma_{HD} \alpha_{MAX}$$

$$(2.5) \quad \tau_{AD} = T_A \frac{\Sigma_{PD}}{\Sigma_{AD}}$$

ここで、 Σ_{HD} 、 Σ_{PD} 、 Σ_{AD} は、それぞれ昼側のホール電気伝導度、ペダーセン電気伝導度、そして Alfvén 電気伝導度、 T_A は電離圏と磁気圏の間を Alfvén 波が伝搬する時間を示す。また、 α_{MAX} はリコネクション係数の最大値、また g_D は磁気圏境界面の電場が電離圏に投影されるときの比率を表す投影係数を表す。

式 (2.3) の τ_{AD} 、 a_1 はカップリングパラメータであり、それぞれオーロラジェット電流が太陽風電場に応答する時間、および太陽風電場が電離圏に伝搬する割合を表している。本モデルでは、後述するように入力となる E_y の値が負の場合、磁気再結合の効率が極端に低下するため、 E_y の値を強制的に 0 とする。そのため、出力される AU 指数は常に正となるが、実際に観測される AU 指数は極まれに負となる場合もある。そのことを含め、北向き IMF の状態では、本モデルは実際の変化を正しく表現することができない点に注意が必要である。

以上の仮定のもと、Goertz et al. (1993) では、 τ_{AD} 、 a_1 をそれぞれ 70 min、 10^{-13} s/m という値を持つ定数として、1979 年の特定の 2 日間の AU 指数を計算し、相関係数 0.88 と高い精度の推定に成功している。しかし、McPherron and Rostoker (1993) が指摘しているように、ほかの期間については、このパラメータでは常時高い精度が得られるわけではなく、パラメータ自身が時間変化している可能性が考えられる。

本研究では、AU 指数、またカップリングパラメータである a_1 、 τ_{AD} について、式 (2.1) における状態変数ベクトル x_t 、すなわち $x_t = (AU(t), a_1(t), \tau_{AD}(t))$ を考える。システムノイズに関して、 a_1 については 0 から 4.13×10^{-4} s/m、 τ_{AD} については 5 min から 135 min の範囲で設定し、各時刻 t 毎に独立の一様分布として与えている。また、観測された AU 指数を観測ベクトル

ル y_t として用い、観測ノイズの分散としては 100nT^2 を設定している。この AU 指数の時間分解能は 1 分である。

本研究では、式(2.1)、式(2.2)で与えられる状態空間モデルにもとづいて状態ベクトルの予測を行う。そのために、予測分布、フィルター分布、平滑化分布と呼ばれる確率密度分布をデータ同化によって導出する。ここでは、データ同化の計算において、逐次型データ同化の手法の一つである粒子フィルターを用いた(中村 他, 2005)。粒子フィルターは、状態の確率密度分布を多数の粒子でアンサンブル近似する手法であり、他の逐次型データ同化であるアンサンブルカルマンフィルター等とは異なり、非線形・非ガウスの問題にも適用することが可能である。この粒子フィルターを用いて、逐次的に各ステップにおける予測分布、フィルター分布を推定するとともに、粒子 smoother を用いて平滑化分布を導出している。ここでの平滑化区間は 20 分である。実際の計算では、Message Passing Interface (MPI) を用いた並列計算を行ってデータ同化を行い、10000 の粒子を用いて同化を行った。

3. データ同化による AU 指数の予測

本研究では、入力として用いる E_y として太陽風観測衛星である ACE の観測データを用いており、その時間分解能は 1 分である。また、NASA/OMNI-2 データベースを用いることにより、ACE の場所から磁気圏界面までの太陽風伝搬時間は補正されている。なお、Goertz et al. (1993) では、惑星間空間磁場が北向きのときには、磁気再結合の効率が極端に低下して、磁気圏への電場の侵入が起こらないと仮定しているため、本研究でも北向きのときには $E_y = 0$ としている。

本研究では、予測精度の指標として、Mean Absolute Percentage Error (MAPE) を用いた (Kim et al., 2012)。

$$(3.1) \quad MAPE[\%] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{AU_{obs,i} - AU_{pre,i}}{AU_{obs,i}} \right| \times 100$$

ここで、 i は各予測点、 N は予測点数、 $AU_{obs,i}$ は i 番目の AU 指数の観測値、 $AU_{pre,i}$ は、 i 番目の AU 指数の予測値を示す。式(3.1)に示されるように、MAPE の値が小さいほど予測の結果と観測値との差が小さくなり、推定精度が高いことを示している。

図 1 に、2002 年 1 月 14 日の場合について、Goertz et al. (1993) モデルにもとづいて、AU 指数の変動をデータ同化を行った場合、データ同化を行わずに Goertz et al. (1993) のパラメータで計算を行った場合についての結果を示す。図は上から、AU 指数、 a_1 、 τ_{AD} 、 E_y 、 N_{eff} 、MAPE である。まず、AU 指数と E_y を比較すると、太陽風電場が増加するのに伴って、AU 指数も大きくなっているのが分かる。なお、式(2.3)から分かるように、 $E_y < 0$ においては a_1 にはデータ同化の効果は表れていない。このため、図 1 において、 $E_y < 0$ の区間では、 a_1 の表示として事前分布である一様分布の上限と下限が表示されていることに注意されたい。

データ同化を行っていない場合には、観測された AU 指数の細かな変動を推定することはできず、また観測値を再現できていない期間が多い。MAPE による推定精度の評価でも、 $UT = 11 - 17$ で精度が大きく落ちているのが分かる。

一方、データ同化を用いた結果では、AU 指数の細かな変動を推定することができており、MAPE による精度評価においても精度が向上しているのが分かる。また、データ同化によって推定した a_1 、 τ_{AD} は時間とともに変化しており、一定でないことが分かる。Goertz et al. (1993) では、これらの a_1 、 τ_{AD} を一定値として計算を行っていたが、AU 指数の推定精度を高めるためには、 a_1 、 τ_{AD} を動的に変化させる必要があることが分かった。

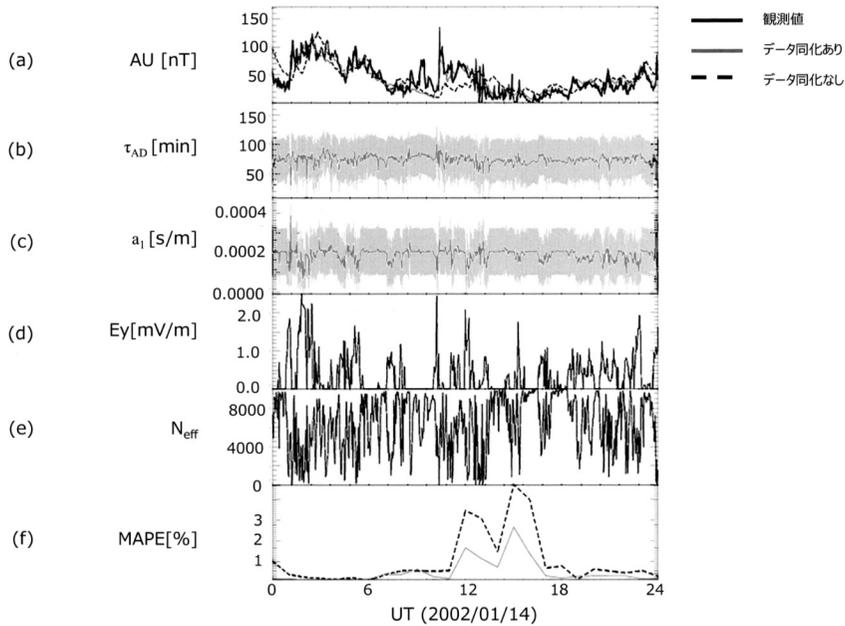


図 1. 2002 年 1 月 14 日の AU 指数についてのデータ同化の例. (a) AU 指数(観測: 黒, データ同化を行った場合: 灰色, データ同化を行わなかった場合: 破線), (b) τ_{AD} の変化. 灰色は平滑化分布の標準偏差を表す. (c) a_1 の変化. 灰色は平滑化分布の標準偏差を表す. (d) 太陽風電場 E_y , (e) Effective sampling size の時間変化, (f) MAPE の時間変化. データ同化を行った場合: 灰色, データ同化を行わなかった場合: 破線.

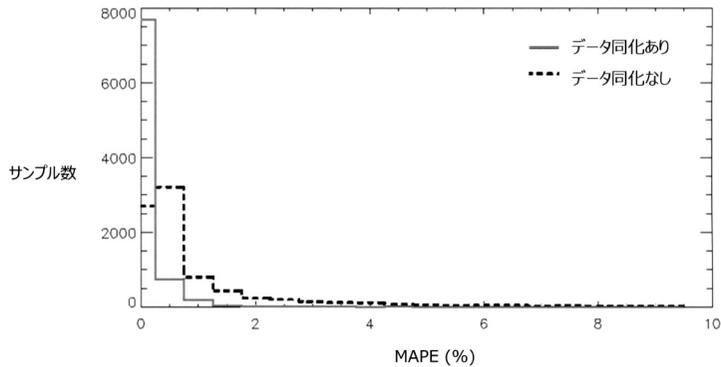


図 2. 2002 年の AU 指数について, データ同化を行った場合(灰色), 行わなかった場合(黒)の推定結果についての MAPE の頻度分布.

次に, 2002 年の 1 年間の AU 指数を推定した結果について, データ同化を行った場合と行わなかった場合についての MAPE の 1 時間平均の分布を, 図 2 として示す. 図 1 で示したのと同様に, 粒子フィルターを用いたことで MAPE が小さく, すなわち推定精度が向上していることが分かる.

また, 粒子フィルターを用いる前のオーロラ活動指数の推定値と観測値に対して, 1 日ごとの両者の相関係数のヒストグラムを図 3 に示す. MAPE 同様, 相関係数による比較でも, デー

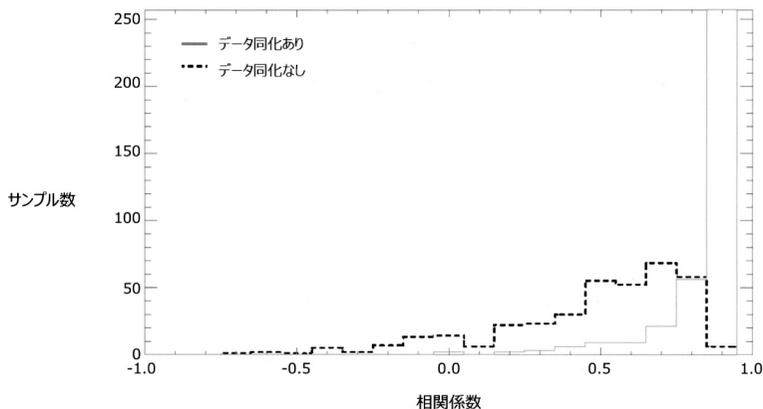


図 3. 2002 年の AU 指数について、データ同化を行った場合(灰色)、行わなかった場合(黒)の推定結果について、1 日の時間変化についての観測値との相関係数の分布。

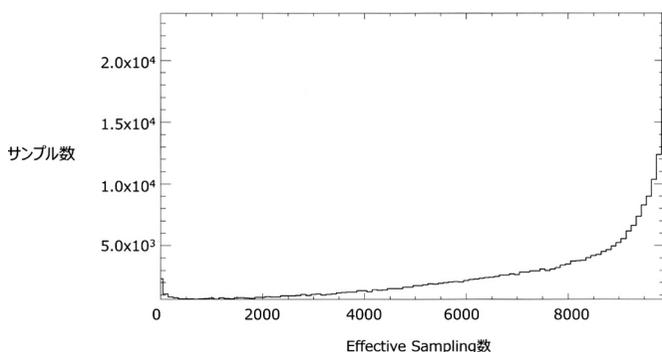


図 4. 2002 年の AU 指数についての Effective sampling size の分布。

タ同化を行ったことで推定精度が向上していることが分かる。このようにデータ同化を行ったことで、高精度の AU 指数変動の推定が可能となるとともに、図 1 に示すように Goertz et al. (1993) モデルに用いられているカップリングパラメータの時間変化の推定が可能となった。

なお、粒子フィルターにおいては、しばしば状態の縮退(退化)が問題となる(樋口 編著, 2009)。ここでは、退化が起きていないかを確認する手法として、Effective sampling size(実効粒子数)(Liu and Chen, 1995)を用いた。Effective sampling size(N_{eff})は、式(3.2)のように与えられる。

$$(3.2) \quad N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i^2}$$

ここで、 N は全粒子数、 w_t^i は時刻 t における i 番目の粒子の規格化尤度を表す。

N_{eff} が大きいほど、その時刻の粒子分布は広がりを持っていると考えることができ、推定したパラメータの信頼度は高いといえる。一般的に、 $N_{eff} \geq \frac{1}{3}N$ であれば、退化は起こっていないと考えられる(Liu and Chen, 1995)。推定したパラメータの信頼性を評価するために、図 4 に N_{eff} を示す。 N_{eff} の平均値は 7200 程度であり、全粒子数の $\frac{1}{3}$ 以上であるので、退化問題は起こっていないと考えられる。

4. データ同化による AU 指数の長期推定

次に、太陽風を観測している ACE 衛星のデータを利用できる 1998 年から 2015 年について、AU 指数の長期変化について、データ同化を行った結果を示す。

図 5 および図 6 は、それぞれデータ同化から推定された a_1, τ_{AD} の月平均値、およびその月平均値の時系列に対して、STL (Seasonal Decomposition of Time Series by Loess) を用いて、季節成分、長期成分および残差に分解した結果である。STL は、時系列データを季節成分、トレンド (長期) 成分、残差成分の和のモデルとして考えたときに、LOESS 平滑化 (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) と呼ばれるノンパラメトリック回帰モデルを用いて分解する手法である。

STL によって分解された季節成分を見ると、 a_1, τ_{AD} とも北半球の夏に高く、冬に低くなるという傾向があることが見出された。また、長期成分においては、 a_1 は 1998 年から 2005 年までは 2 年周期のような変動がみられ、2006 年-2011 年にかけては値が増大しているのが分かる。 τ_{AD} は 2001 年に極大期があり、2010 年に極小期、再び 2015 年に極大期があるのが分かる。

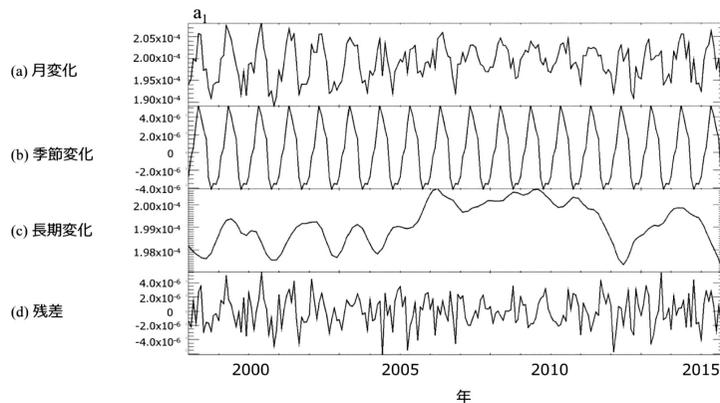


図 5. データ同化で推定した a_1 の 1998 年から 2015 年における長期変化。(a) 月平均、(b) 季節変化、(c) 長期変化、(d) 残差。

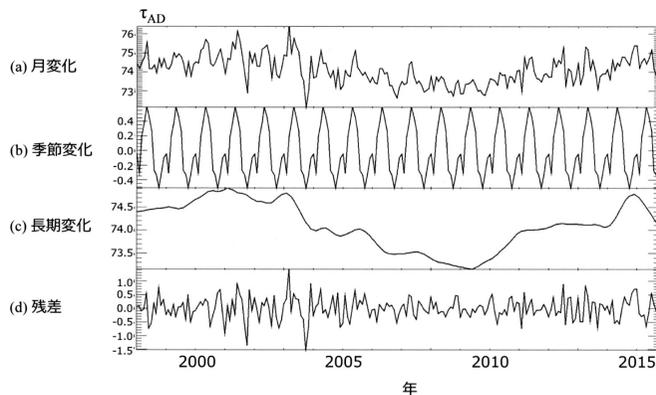


図 6. データ同化で推定した τ_{AD} の 1998 年から 2015 年における長期変化。(a) 月平均、(b) 季節変化、(c) 長期変化、(d) 残差。

a_1, τ_{AD} は、それぞれ式(2.4)、式(2.5)で表され、両パラメータとも電離圏の電気伝導度 (Σ_{HD}, Σ_{PD}) によって変動する。電離圏の電気伝導度は、電離圏の電子密度に依存し、その電子密度の量は太陽紫外線によって変化する。すなわち、式(2.4)、式(2.5)は、太陽紫外線量によって変化することが予想される。そこで、太陽からの紫外線量と相関があるとされる太陽電波 F10.7 指数(波長 10.7cm の太陽電波強度フラックス)と、 a_1, τ_{AD} のトレンドの比較を行ったところ、次節で詳述するように a_1 は F10.7 と逆相関があり、 τ_{AD} は相関があることが分かった。

5. 考察

本研究では、データ同化によって、Goertz et al. (1993)で提案されたモデルにもとづき、AU 指数および同モデルにおけるカップリングパラメータの長期推定を行った。推定されたカップリングパラメータ a_1, τ_{AD} は、ともに夏に高い値、冬に低い値を示す季節変動性があることが明らかになった。

a_1, τ_{AD} は、ともに電離圏電気伝導度に関するパラメータである。太陽紫外線によって電離圏の電子密度は変化するが、太陽天頂角の高い夏に電子密度が大きくなり、逆に太陽天頂角の低い冬に電子密度が低くなることが知られている。電離圏電気伝導度は、電離圏の電子密度に依存するため、電離圏電子密度と同様に電気伝導度も夏に大きく冬に小さくなる。式(2.4)および式(2.5)に示すように、 a_1, τ_{AD} は電離圏電気伝導度の関数であるため、推定された a_1, τ_{AD} の季節変動は、電離圏電子密度の季節変動を反映していると考えられる。

図7では、太陽からの紫外線量と相関があるといわれている F10.7 の長期変化と、 a_1, τ_{AD} それぞれの長期変化との比較を行っている。 a_1 と F10.7 は、逆相関 (-0.62) がみられ、 τ_{AD} と F10.7 は相関 (0.93) がみられる。 τ_{AD} と F10.7 に相関がみられるのは、前述の通り τ_{AD} が電離圏電気伝導度のパラメータであるためと考えられる。同じ電離圏電気伝導度に関するパラメータである a_1 が逆相関となる理由は定かではないが、 E_y が a_1 よりも支配的であるために a_1 の推定が適切に行われていない可能性がある。

今回用いた Goertz et al. (1993)で提案されているモデルは、太陽風の電場のみを入力として AU 指数の時間発展を予測する比較的簡易なモデルである。そのため、モデルの意味の物理的な理解も容易であるという特徴を持つ。一方、たとえば IMF が北向きの時には、磁気圏では

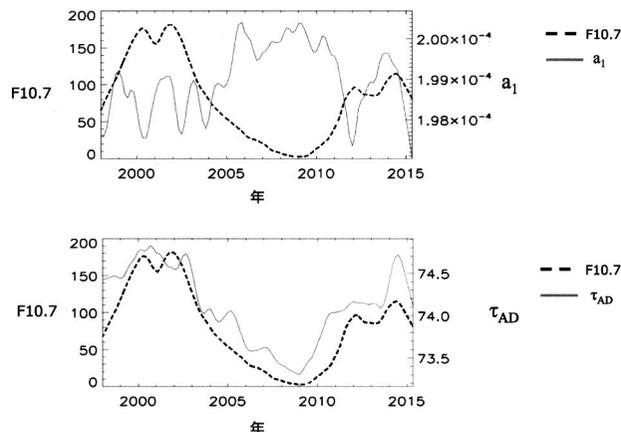


図7. (a)データ同化で推定した a_1 の1998年から2015年における長期変化(灰色)と F10.7 指数(破線)、(b)同 τ_{AD} .

磁気再結合が起きないと仮定しているために、入力となる太陽風電場を 0 とする。そのため、IMF が北向きの際には、入力が 0 になってしまうため推定が上手くいかない場合があり、実際、図 1 においても UT=08-10 においては推定がうまくいっていない。今後、入力パラメータの与え方を検討することによって、様々な IMF の状況に対しての予測が可能になると考えられる。

6. 結論

本研究では、Goertz et al. (1993) のモデルを用いて、オーロラ活動指数である AU 指数変動の高精度予測を行うために、粒子フィルターを用いたデータ同化を行った。本研究で得られた主要な結果は、以下のようである。

- (1) データ同化を用いることで AU 指数変動の推定精度の向上に成功するとともに、オーロラ活動指数予測モデルの太陽風カップリングパラメータ (a_1, τ_{AD}) の推定を行った。
- (2) 推定した太陽風カップリングパラメータに季節依存性を確認した。

本研究の結果から、Goertz et al. (1993) の AU 指数予測モデルにおいて、高精度な予測を行うためには、データ同化によってモデル中のカップリングパラメータを動的に変化させる必要のあることがわかった。また、そのパラメータの性質を推定値の長期変化から調べたところ、太陽紫外線量 (F10.7 指数) との対応 (相関, あるいは逆相関) があることが分かった。今後、Goertz et al. (1993) を用いてオーロラ活動指数の計算、特に観測データが存在しない未来についての予測を高精度で行うために、本研究で明らかになったパラメータの性質を適切に組み込んだモデルの構築が有効であることが示唆される。

参 考 文 献

- Baker, D. N., Klimas, A. J., Vassiliadis, D., Pulkkinen, T. I. and McPherron R. L. (1997). Reexamination of driven and unloading aspects of magnetospheric substorms, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 7169–7177, doi:10.1029/96JA02627.
- Borovsky, J. E. and Valdivia, J. A. (2018). The Earth's magnetosphere: A system science overview and assessment, *Surveys in Geophysics*, **39**, 817–859, doi:10.1007/s10712-018-9487-x.
- Davis, T. N. and Sugiura, M. (1966). Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *Journal of Geophysical Research*, **71**, 785–801, doi:10.1029/JZ071i003p00785.
- Goertz, C. K., Shan, L-H. and Smith, R. A. (1993). Prediction of geomagnetic activity, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 7673–7684, doi:10.1029/92JA01193.
- 樋口知之 編著 (2009). 『データ同化入門』, 朝倉書店, 東京.
- Kim, K.-C., Shprits, Y., Subbotin, D. and Ni, B. (2012). Relativistic radiation belt electron responses to GEM magnetic storms: Comparison of CRRES observations with 3-D VERB simulations, *Journal of Geophysical Research*, **117**, A08221, doi:10.1029/2011JA017460.
- Li, X., Oh, K. S. and Temerin, M. (2007). Prediction of the AL index using solar wind parameters, *Journal of Geophysical Research*, **112**, A06224, doi:10.1029/2006JA011918.
- Liu, J. S. and Chen, R. (1995). Blind deconvolution via sequential imputation, *Journal of the American Statistical Association*, **90**, 567–576.
- McPherron, R. L. and Rostoker, G. (1993). Comment on prediction of geomagnetic activity by C. K. Goertz, Lin-Hua Shan, and R. A. Smith, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 7685–7686, doi:10.1029/92JA01194.
- 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之 (2005). データ同化: その概念と計算アルゴリズム, *統計数理*, **53**, 211–229.
- 小野高幸, 三好由純 (2012). 『太陽地球圏』, 共立出版, 東京.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Nose, M., Iyemori, T., Sugiura, M. and Kamei, T. (2005). Geomagnetic AE index, doi:10.17593/15031-54800.

Forecasting Auroral Activity Using Data Assimilation

Yoshizumi Miyoshi¹, Genta Ueno², Ryota Yamamoto¹, Shinobu Machida¹,
 Masahito Nose¹, Daikou Shiota³ and Satoko Nakamura¹

¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

²The Institute of Statistical Mathematics

³Radio Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Auroral electrojet indices (AU, AL, AE) are a proxy of substorms and auroral activity. Forecasting these indices is crucial for space weather forecast. This study develops a data assimilation code to estimate the AU index based on the model proposed by Goertz et al. The state vector includes the AU index along with coupling parameters for solar-wind, magnetosphere, and ionosphere. The AU index provided from WDC-C2, Kyoto University is used as the observation vector. Using the data assimilation, the dynamical estimation of the coupling parameters is possible. This approach significantly improves the forecasting performance. The estimated coupling parameters have semi-annual and long-term modulations. According to a previous model, the coupling parameters are a function of the ionospheric conductance. It is expected that the estimated seasonal and yearly variations of the coupling parameters from data assimilation correspond to seasonal and yearly variations of the ionospheric conductance.