

データ同化に基づく放射線帯モデルパラメータの推定

外山晴途(1)、三好由純(1)、上野玄太(2)、越石英樹(3)、松本晴久(3)、塩川和夫(1)

- (1) 名古屋大学太陽地球環境研究所
- (2) 統計数理研究所
- (3) 宇宙航空研究開発機構研究開発本部

1. 序論

内部磁気圏には、放射線帯と呼ばれる高エネルギー粒子が地球磁場によって捕捉されている領域がある。放射線帯を形成する高エネルギー粒子は、そこを飛翔する実用衛星に重大な障害を与えることが知られており、衛星障害を未然に防ぐためには放射線帯粒子フラックス変動の正確な予測を行うことが、宇宙天気研究、宇宙天気予報の重要な課題となっている。

シミュレーションに用いられているパラメータを推定する手法の一つに、「データ同化」という方法がある。これは、ベイズ統計に基づいて観測や実験データを取り込み、モデルの結果を修正・改良する技法である。これにより、シミュレーションで用いられる各種パラメータ最適値を時々刻々と推定することが可能となる。

放射線帯電子フラックスの時間変化は、一般に以下の Fokker-Planck 方程式で記述される動径方向拡散を用いてモデル化されている。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + \text{Source} - \text{Loss} \quad (1)$$

ここで、 f は位相空間密度、 L は L 値、 t は時間、 D_{LL} は拡散係数である。放射線帯電子フラックスの時間変化は、電子の加速過程・輸送過程・消失過程のそれぞれのバランスによって作り出されている(Reeves et al. 2003)。

放射線帯電子の正確な予測を行うためには、この Fokker-Planck 方程式に含まれる各パラメータを信頼性の高いものにする必要があり、そのためにデータ同化が用いられてきた。これまでの放射線帯データ同化研究では、アンサンブルカルマンフィルタを用いて動径方向拡散以外の加速メカニズムである内部加速や消失過程の推定(Koller et al. 2007)や、拡張カルマンフィルタを用いた消失過程の推定(Kondrashov et al. 2007)が行われてきた。これらの研究では、動径方向拡散係数を、Brautigan and Albert(2000)が提案する Kp 指数に基づく経験的な値を用いている。

これに対して、本研究においては新たに開発した粒子フィルタに基づくデータ同化を行い(Miyoshi et al. 2006)、従来の研究では推定されてこなかった拡散係数の時間変化の推定を試みる。同時に消失項も推定し、動径方向拡散と消失過程のダイナミックな変化を推定する。

2. データ同化

本研究では、2002年につばさ衛星が計測した2つの異なるエネルギーにおける電子フラックスデータを用いることによって、Fokker-Plank方程式の拡散係数および、消失項の消失時定数を決めるホイッスラーモード波動強度の時間変化の推定を試みる。すなわち、モデルとして消失項を含んだ以下のFokker-Planck方程式を用いて、この式の中の拡散係数 D_{LL} と τ_w を推定する。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) - \frac{f}{\tau_w} \quad (2)$$

拡散係数 D_{LL} は、通常以下の式で表すことができる(Brautingam and Albert, 2000)。本研究では D_0 を推定する。

$$D_{LL} = D_0 L^{10} \quad (3)$$

また、 τ_w を含む項は、プラズマ圏におけるホイッスラーモードヒスによるピッチ角散乱により電子が大気へ降り込むことによる消失を表す消失項である (e.g., Lyons et al., 1972, Abel and Thorne, 1998, Albert, 1994)。ここで、 τ_w と電子の波動強度の間には以下のような関係がある(Lyons et al., 1972)。

$$\tau_w = B_{\text{wave}}^{-2} \tau_0(E) \quad (4)$$

(4)で、 $\tau_0(E)$ はホイッスラーモード波動と電子とのピッチ角散乱係数から与えられる量であり (Albert, 1994)、背景プラズマ密度や磁場強度によって変化する。本研究では、この τ_w に含まれる B_{wave} の推定を行う。

データ同化にあたっては、Miyoshi et al.(2006)によって開発された粒子フィルタにもとづくデータ同化のコードを使用し、粒子スモーカーによって平滑化分布を導出している。ここで、一般状態空間モデルとの対応を述べておく。一般状態空間モデルは以下のモデルで与えられる(例えば、樋口, 2011)。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) && \text{[システムモデル]} \\ \mathbf{y}_t &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) && \text{[観測モデル]} \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{x}_t は状態変数ベクトル、 \mathbf{v}_t はシステムノイズ、 \mathbf{y}_t は観測ベクトル、 \mathbf{w}_t は観測ノイズを表し、 \mathbf{f} は一期先の予測を計算する演算子 (今の場合、Fokker-Plank方程式)、 \mathbf{h} は状態変数ベクトルと観測ベクトルを変換する演算子である。本研究では、位相空間密度、拡散係数、波動強度を状態変数ベクトル \mathbf{x} に含まれる変数とし、また、つばさ衛星が観測した differential フラックスを観測ベクトル \mathbf{y} に含まれる変数としている。

3. 結果

3.1 400 keV 電子フラックス、800 keV 電子フラックスのデータを用いた同化計算

図1は、400 keV の電子について、Brautingam and Albert(2000)に基づく拡散係数および、 $B_{\text{wave}}=10$ pT を用いて計算した結果である。図1(a)は、シミュレーションで求められた differential flux、図1(b)は Kp 指数、図1(c)は Dst 指数となっている。

これに対して図2は、同じ400 keVの電子についてデータ同化結果を行った結果である。図2(a)は、データ同化によって計算された differential flux、図2(b)は、つばさ衛星の観測データ、図2(c),(d)が Kp 指数、Dst 指数となっている。

図1(a)で示した経験的なパラメータで計算した differential flux は、 $L<3$ の領域にフラックスが集積している様子がわかる。これは、図2(b)で示した観測のデータと比べると、時間変化の様子およびフラックスの量が大きく異なっていることが分かる。これに対して、データ同化によって計算された differential flux は (図2(a))、放射線帯の基本的な構造である外帯・スロット領域がよく再現されている。また、磁気嵐時にフラックスが一度減ってから増加する様子なども再現されている。

図3に、800 keV の電子フラックスについてデータ同化を行った結果を示す。400 keV の場合と同様に、磁気嵐時に外帯電子フラックスが1回減ってから増大する様相が再現されている。また、外帯でまずフラックスが増加し、その後スロット領域へとフラックスが拡散し、スロット領域のフラックスが増加していく様相も再現できている。一方、 $L=5\sim6$ 付近の値は、観測されたフラックスに対してデータ同化から再現されたフラックスは小さい値になっていることが分かった。

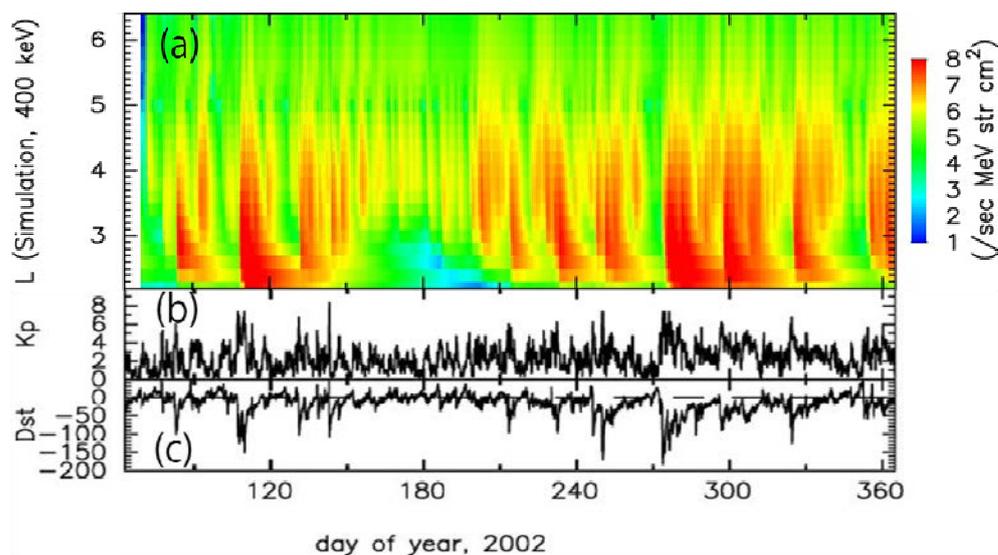


図1. 経験的なモデルによる計算結果。上から(a)400 keV 電子の differential flux の L-time ダイアグラム、(b)Kp 指数、(c)Dst 指数を表す。

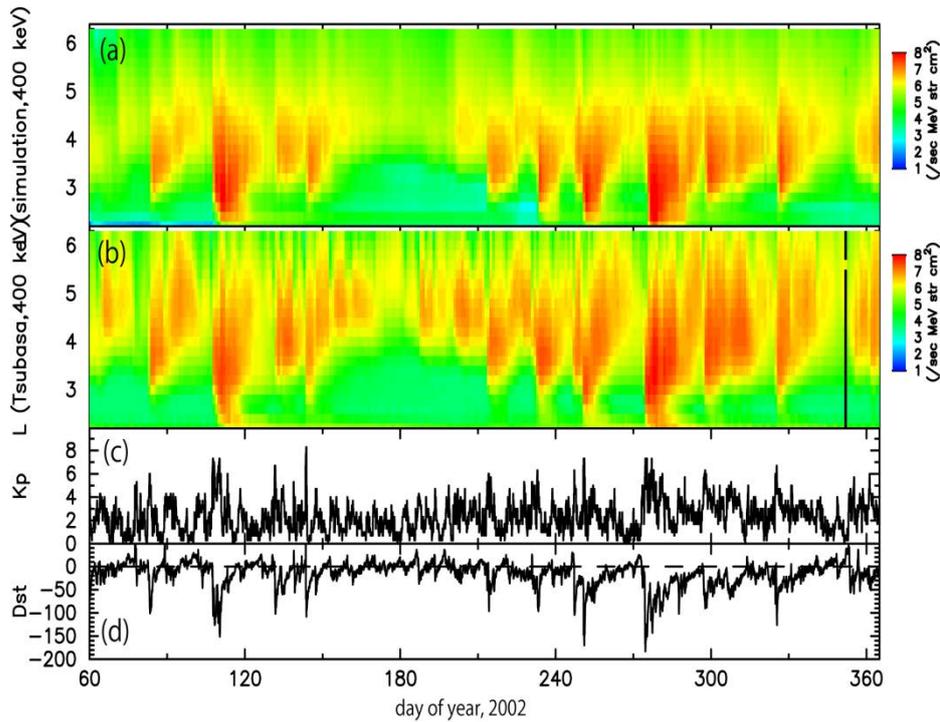


図 2. 電子 400 keV でのデータ同化結果。上から(a)400 keV 電子の differential flux のデータ同化結果、(b)400 keV 電子のつばさ衛星の differential flux 観測データ、(c)Kp 指数、(d)Dst 指数を表す。

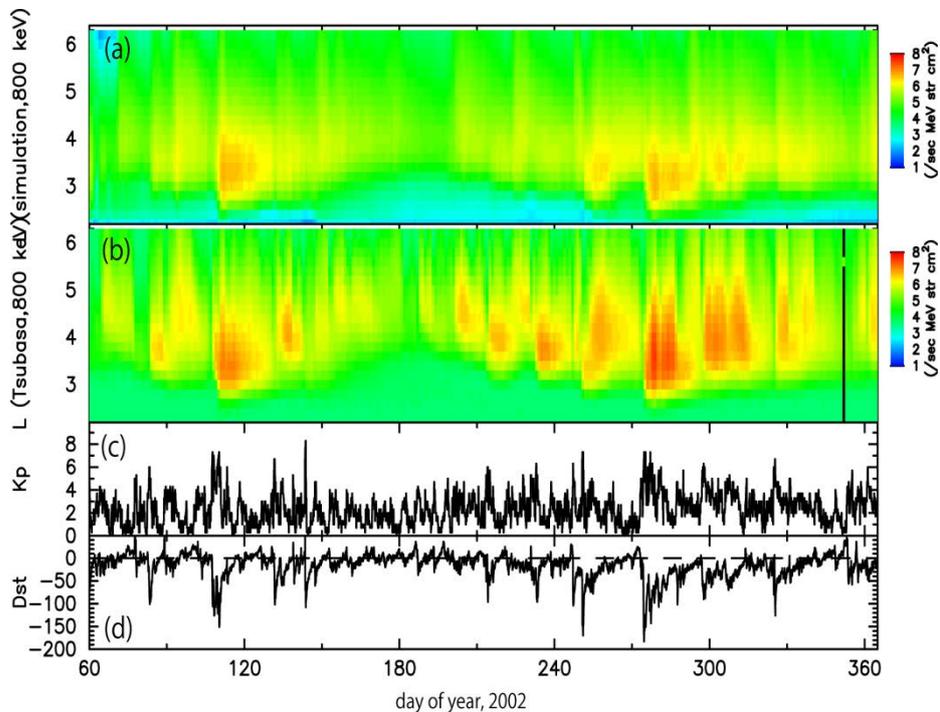


図 3. 電子 800 keV でのデータ同化結果。上から(a)800 keV 電子の differential flux のデータ同化結果、(b)800 keV 電子のつばさ衛星の differential flux 観測データ、(c)Kp 指数、(d)Dst 指数を表す。

3.2 推定されたパラメータの評価

次にデータ同化によって推定されたパラメータが、どのような依存性を持っているかを調べた。図 4(a)は、400 keV の電子フラックスデータのデータ同化計算結果から推定された拡散係数と、800 keV の電子フラックスデータのデータ同化計算から推定された拡散係数とを比較したものである。それぞれの点は、同じ日(DOY)についてそれぞれの推定値を表し、紫の直線は得られた分布を主成分分析によってフィッティングしたものである。800 keV のフラックスデータで推定された拡散係数の値は、400 keV のフラックスデータで推定されたものより大きく、拡散係数がエネルギーに依存していることが分かる。式(3)で示したように、現在シミュレーションで用いている拡散係数はエネルギーに依存していないことを前提としている。データ同化の結果から得られたエネルギーに依存した拡散係数は、(2)式で表現されていないエネルギーに依存した物理過程が放射線帯電子変動に寄与している可能性も示唆するものであり、興味深い。図 4(b)は、400 keV の電子フラックスデータのデータ同化計算から推定された波動強度および 800 keV の電子フラックスデータのデータ同化計算から推定された波動強度との対応を示したものである。両者の推定値は比較的一致しているが、推定された波動強度はおおよそ数 pT 付近に集中していることがわかる。これは、過去の衛星観測の研究結果からは、プラズマ圏ヒスの典型的な強度は数十 pT とされており(Meredith et al., 2004 など)、これに比べて低い値になっている。

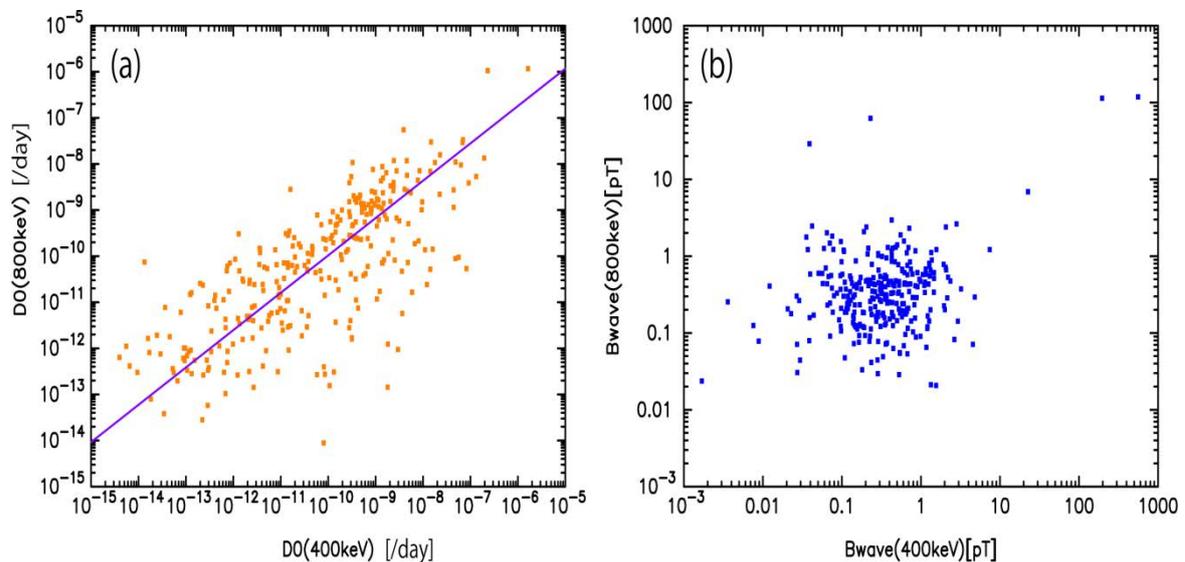


図 4. (a)データ同化によって推定された拡散係数 (左図)。横軸は 400 keV の電子フラックスデータのデータ同化から推定された拡散係数の値、縦軸は 800 keV の電子フラックスデータのデータ同化から推定された拡散係数の値を示す。紫の直線は、主成分分析によるフィッティングを表している。(b)データ同化によって推定された波動強度 (右図)。横軸は 400 keV の電子フラックスデータのデータ同化から推定された波動強度の値、縦軸は 800 keV の電子フラックスデータのデータ同化から推定された波動強度の値を示す。

3.3 400 keV 電子フラックスと 800 keV 電子フラックスのデータを同時に用いた同化計算

次に、2つのエネルギーの電子データを同時に観測ベクトルとしてデータ同化を行い（以後、統合計算と呼ぶ）、2つのエネルギーの電子フラックスの変化を同時によく再現しうる拡散係数、波動強度の推定を行った。

図 5 (a)は、この統合計算によって推定された 400 keV 電子フラックスである。図 5(b)の観測データと比較したところ、データ同化の結果から推定されたフラックスと観測データとの残差は、それぞれのエネルギーの電子フラックスを独立に用いてデータ同化を行ったときに比べて小さくなり、データ同化の結果を改善していることが分かった。しかし、 $L > 5$ の領域に注目した場合には、400 keV 電子フラックス、800 keV 電子フラックスをそれぞれ独立に用いたデータ同化計算と同様、統合計算においても観測結果との差が有意に大きく、うまく再現できていないことも明らかになった。

外帯の外側の領域でデータ同化によって推定されたフラックスが、観測に比べて常に低く推定されることは、(2)式に含まれていない物理過程の重要性を示唆するものと思われる。これまでの研究から、外帯に動径拡散以外にホイッスラーモードコーラスによる電子加速過程が存在していることが指摘されており [e.g., Miyoshi et al., 2003, 2007, Horne et al., 2005]、動径方向拡散以外の効果を評価することは重要である。

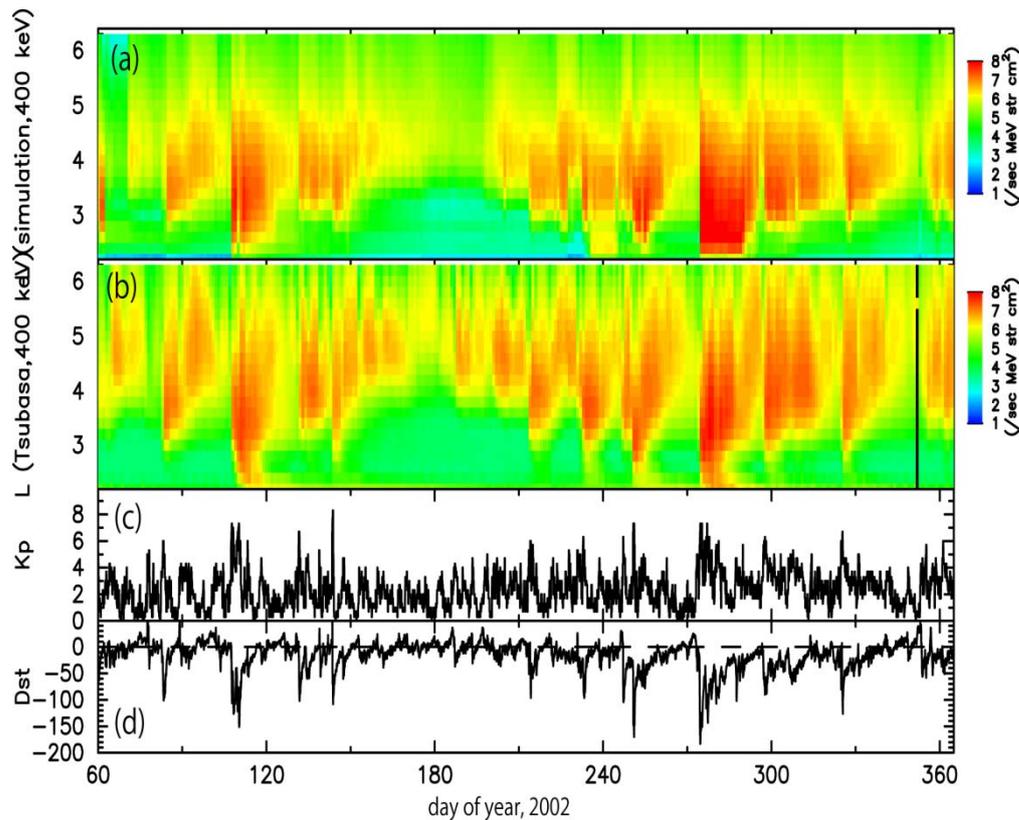


図5. 統合計算によって得られた400 keVでのデータ同化結果。上から(a)400 keV電子の differential flux のデータ同化結果(統合計算)、(b)400 keV電子のつばさ衛星の differential flux 観測データ、(c)Kp指数、(d)Dst指数を表す。

4. まとめ

本研究では、つばさ衛星が観測した400 keV電子、800 keV電子フラックスのデータを用いて、粒子フィルタによるデータ同化計算から、放射線帯の動径方向拡散モデルの拡散係数およびプラズマ波動強度の推定を行った。

データ同化を行った結果、磁気嵐時の外帯の消失とその後の増加、またスロット領域においてフラックスが増加する様子がよく再現された。一方、外帯外側の $L=5\sim 6$ においては、データ同化から推定される電子フラックスが、観測値に対して低い値になっていることが分かった。また、2つのエネルギーから独立に推定された拡散係数の値はよい相関をもつものの、その強度には800 keVで推定した値のほうが400 keVで推定した値より大きく、エネルギーによる依存性が見られた。また、推定された波動強度は数 pT程度であり、過去の衛星観測から知られている典型的なプラズマ圏ヒスの波動強度に比べて1桁程度低い値として推定された。

今後、現在のモデルに含まれていない内部加速項を組み込むモデル開発を行い、データ同化計算を試みることで、動径方向輸送、内部加速、消失項が、いつ、どの領域で、どのように変化しているかを推定し、放射線帯電子変化の物理を明らかにしていきたい。

<参考文献>

- Brautigam, D. H. and J. M. Albert, Radial diffusion analysis of outer radiation belt electrons during the October 9, 1990, magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **105**, A1, 291–309, 2000
- 樋口知之・上野玄太・中野慎也・中村和幸・吉田亮, データ同化入門, 朝倉書店, 2011
- Horne, R. B., R. M. Thorne, S. A. Glauert, J. M. Albert, N. P. Meredith, and R. R. Anderson (2005), Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves, *J. Geophys. Res.*, **110**, A03225, doi:10.1029/2004JA010811.
- Kondrashov, D., Y. Shprits, M. Ghil, and R. Thorne, A Kalman filter technique to estimate relativistic electron lifetimes in the outer radiation belt, *J. Geophys. Res.*, **112**, A10227, doi:10.1029/2007JA012583, 2007
- Koller, J., Y. Chen, G. D. Reeves, R. H. W. Friedel, T. E. Cayton, and J. A. Vrugt (2007), Identifying the radiation belt source region by data assimilation, *J. Geophys. Res.*, **112**, A06244, doi:10.1029/2006JA012196, 2007
- Lyons, L. R., and R. M. Thorne, Pitch-Angle Diffusion of Radiation Belt Electrons within the Plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, **77**, NO. 19, PP.3455-3474, doi:10.1029/JA077i019p03455, 1972
- Meredith N. P., R. B. Horne, R. M. Thorne D. Summers, R. R. Anderson, Substorm dependence of plasmaspheric hiss, *J. Geophys. Res.*, **109**, A06209, doi:10.1029/2004JA010387, 2004
- Miyoshi, Y., A. Morioka, H. Misawa, T. Obara, T. Nagai, and Y. Kasahara (2003), Rebuilding process of the outer radiation belt during the 3 November 1993 magnetic storm: NOAA and Exos-D observations, *J. Geophys. Res.*, **108**(A1), 1004, doi:10.1029/2001JA007542.
- Miyoshi, Y., G. Ueno, V. Jordanova, G. Reeves, and T. Goka (2006), Data assimilation of radiation belt electrons, *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Supp., Abstract SM53A-1444
- Miyoshi, Y., A. Morioka, R. Kataoka, Y. Kasahara, and T. Mukai (2007), Evolution of the outer radiation belt during the November 1993 storms driven by corotating interaction regions, *J. Geophys. Res.*, **112**, A05210, doi:10.1029/2006JA012148.