

電離圏・熱圏大気擾乱の低緯度伝搬

ー 数値シミュレーションによる予測と検証 ー

[講演: 藤原 均 (東北大学 大学院理学研究科)]



電気通信大学 細川 敬祐

1 はじめに

磁気嵐やサブストームの爆発相において、極域電離圏・熱圏に流入するエネルギーが急激に増大したとき、それに伴って生じる擾乱はどのようにして中・低緯度まで伝わるのか？ また、それらの擾乱は、中・低緯度の電離圏・熱圏大気にどのような影響を与えるのか？ 70年代半ばから行われ始め、現在も進展を続ける数値シミュレーションによる研究は、その予測と検証に大きな役割を果たすことが期待される。伝搬性大気擾乱 (Traveling Atmospheric Disturbance: TAD) や大規模伝搬性電離圏擾乱 (Large Scale Traveling Disturbance: LS-TID) と呼ばれる熱圏・電離圏擾乱に関して、その励起プロセスや中・低緯度への伝搬過程、グローバルに起こる電離圏嵐との関連性について、これまでの数値シミュレーション研究の進展を年代順に追いかけて紹介してゆき、最後に未解明問題の整理を行う。

2 TAD と LS-TID

磁気嵐やサブストームの期間、極域への急激なエネルギー流入の増大により中性大気加熱が起こったとき、それに伴う変動がどのようにして中・

低緯度まで伝わるかを概念的に示したものを図1に示す [Prölss, 1993]。磁気嵐やサブストームに伴う極域へのエネルギー流入の増大が起こると、ジュール加熱によって大気の鉛直構造が変わり、中性大気の組成 (O/N_2 比) が変化した領域が現れる (composition disturbance zone)。図では、この擾乱が1-3時間後には、昼側・夜側の双方において中・低緯度まで伝搬している様子が示されている。図中では、Storm Surge という表現が使われているが、この低緯度へ伝搬する擾乱構造こそ、我々が Large-Scale Traveling Atmospheric Disturbance (LS-TAD) もしくは Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbance (LS-TID) と呼んでいる現象に対応するものと考えられる。磁気嵐の開始から十分に時間が経過すると、擾乱大気を中・低緯度へ輸送する Surge 的な構造 (LS-TAD/LS-TID) は見えなくなり、地球の自転や子午面循環によって、大気擾乱が広範囲に、特に経度方向に輸送される効果が卓越してくる。これらの過程は、Prölss [1995] や Prölss [2003] において詳細に解説されている。

TIDs に関しては、大気重力波が電離大気変動を引き起こした結果であることが Hines によって明らかにされた [Hines, 1960]。それ以降、70年代に入ってから、大気重力波の線形理論を発展させることで、重力波の各種モードの分析やその励起特性などが詳細に調べられるようになった。

平成 18 年度 MTI 研究会 サイエンスセッション

© Mesosphere Thermosphere Ionosphere (MTI)
Research Group, Japan

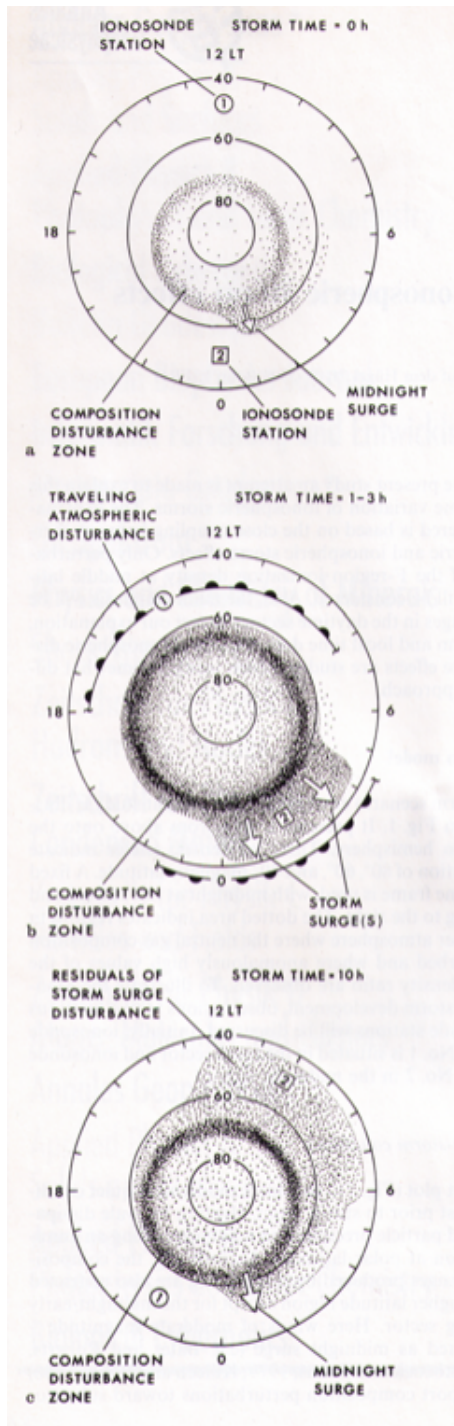


図 1: 磁気嵐中の極域へのエネルギー流入増大によって大気加熱が起こったとき、それに伴う変動がどのようにして中・低緯度まで伝わるかを概念的に示した図 [Prölss, 1993].

1970 年代になると、Richmond らのグループが世界に先駆けて、2 次元の数値シミュレーションによる熱圏での大気重力波の励起・伝搬過程に関する研究を開始した。励起源としてジュール加熱やローレンツ力を考え、LS-TAD/LS-TID の極域での励起とその中・低緯度への伝搬過程が示された [Richmond and Matsushita, 1975]. この Richmond らのグループによる 2 次元シミュレーションに感化される形で、University College London (UCL) において Fuller-Rowell (現在 SWPC/NOAA) らの手によって世界初の (3 次元) 熱圏 GCM (General Circulation Model) が誕生することとなった [Fuller-Rowell and Rees, 1980].

TAD はその素性が波動なのか何なのかはさておいて、中性大気の伝搬性擾乱の総称として用いられる用語である (TAD という呼称はおそらく Prölss の 1993 年の論文において初めて用いられた). 大規模伝搬性電離圏擾乱 (LS-TID) は LS-TAD と電離大気との相互作用によって起こるため、LS-TID と LS-TAD は同様のものと見なされることが多い (ここでも以降は同義のものとする). TAD の中・低緯度への伝搬が、中緯度電離圏に与える影響を模式的にあらわしたものを図 2 に示す [Prölss, 1993].

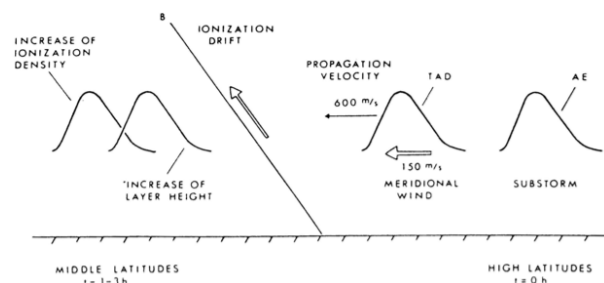


図 2: TAD の中・低緯度への伝搬が、中緯度電離圏に与える影響を模式的に示した図 [Prölss, 1993].

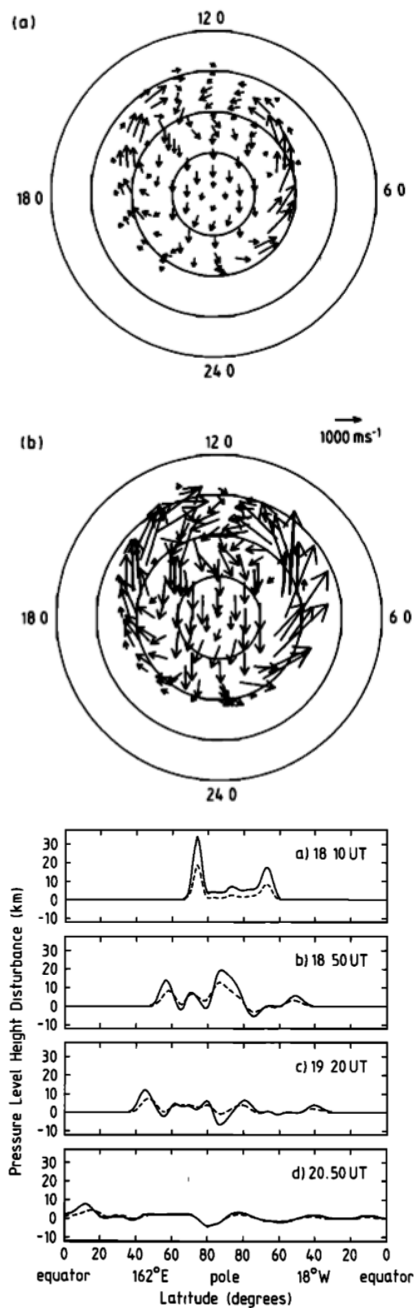


図 3: (上) 静穏時と (中央) 擾乱時の中性風の空間分布. (下) 東経 162 度と西経 18 度を通る子午面において, 等圧面高度にみられる変動の緯度分布を示したもの. 中央が極で, 両端が赤道. 時間を追うごとに擾乱が低緯度や高緯度 (極冠域) へ伝搬する様子が見て取れる [Millward et al., 1993].

ここでは, サブストームによって極域に印加されたエネルギーが 150 m/s 程度の振幅の赤道向きの風 (meridional wind) を作り出し, その擾乱が 600 m/s 程度の速度で中・低緯度へ伝搬している状況を考えている. 赤道向きの風を含む擾乱が中緯度へ到達すると, 中緯度の磁力線が傾いていることにより, 磁力線に沿ってプラズマを鉛直上向きに押し上げる. これが電離圏高度の上昇を引き起こすことになる. 高高度では N_2 や O_2 が少ないために, 上昇したプラズマ (イオン) の再結合率/消滅率が減少し電子密度の増大を引き起こす. また, 両極から TAD が赤道方向に伝搬し, その擾乱が低緯度域に到達した場合, 赤道向きの風の収束による断熱圧縮加熱が起こり大気膨張によって熱圏大気の密度が上昇することも知られている [Prölss and Ocko, 2000].

3 初期の 3 次元シミュレーション

80 年代に入ると 3 次元熱圏 GCM による数値シミュレーションが開始され, 80 年代後半には電離圏との結合モデルが登場するに至った. これ以降, 欧米のグループによってモデルの拡張が進められ, 熱圏・電離圏 GCM は超高層大気研究, とりわけ TID/TAD 研究において極めて強力な研究ツールとなった. Millward et al. [1993] による LS-TID/TAD の計算結果を図 3 に示す. 図の上段, 及び中央には, 静穏時と擾乱時の中性風分布がそれぞれ示されている. 下段には, 東経 162 度と西経 18 度を通る子午面における, 擾乱 (等圧面高度の変化) の緯度分布が示されている. 中央が極, 両端が赤道となっている. 時間を追うごとに, 等圧面高度にみられる擾乱が低緯度や高緯度 (極冠域) へ伝搬する様子を見て取ることができる.

90 年代にシミュレーションが発展していくなか, 電離圏嵐の観測的特徴を説明するための計算機シミュレーションも行われるようになった. Fuller-Rowell et al. [1996] は, 夏半球の中緯度で負相嵐が起こりやすく, 冬に正相嵐が起こりやすいというイオノゾンドの観測結果の説明を試みた. 極

域から中低緯度へ伝搬する擾乱 (LS-TID/TAD, Storm Surge) 自体に夏冬の違いは少ないものの、夏半球から冬半球へと向かう季節による背景風の違いが存在する。この背景風によって (N_2 や O_2 が豊富に含まれる) 中性大気組成の変動領域 (composition bulge) が夏半球の極域から中低緯度へと輸送されやすくなる。このように電離圏嵐にともなう中性大気組成変動が異なることが夏冬の負相・正相の違いを生み出していると結論づけられた。

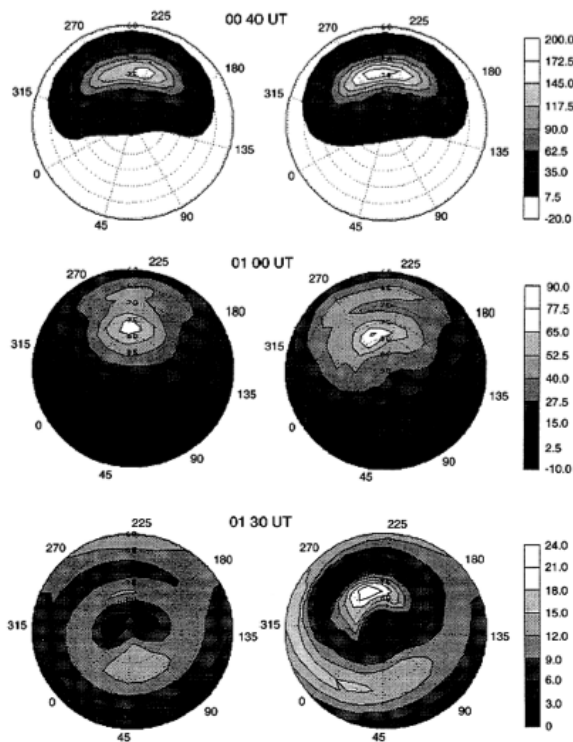


図 4: 左は粒子加熱のみ、右は粒子加熱とジュール加熱の双方を考慮した場合の中性温度にみられる擾乱の時間発展 [Namgaladze et al., 1996].

3次元シミュレーションの発展によって、LS-TID/TADの励起過程も詳細に再現することができるようになってきた。図4にカスプにおける粒子降下に伴う擾乱の励起と、低緯度への伝搬過程を計算した例 [Namgaladze et al., 1996] を示す。

左は粒子加熱のみ、右は粒子加熱とジュール加熱の双方を考慮した場合の中性温度にみられる擾乱の時間発展を表している。双方とも入力となる加熱過程には、時間・空間変動が考慮されている。どちらの場合も、TAD的な擾乱が励起され、低緯度方向へ伝搬する様子が再現されている。この計算結果は、ジュール加熱なしで、粒子加熱だけでも大規模な擾乱を作りうることを示唆しているという点において興味深い。カスプにおいて特徴的な低エネルギー粒子の降り込みによって、熱圏上部が暖められるだけでも、低緯度まで伝搬する全球的な擾乱が生まれる可能性が示されている。

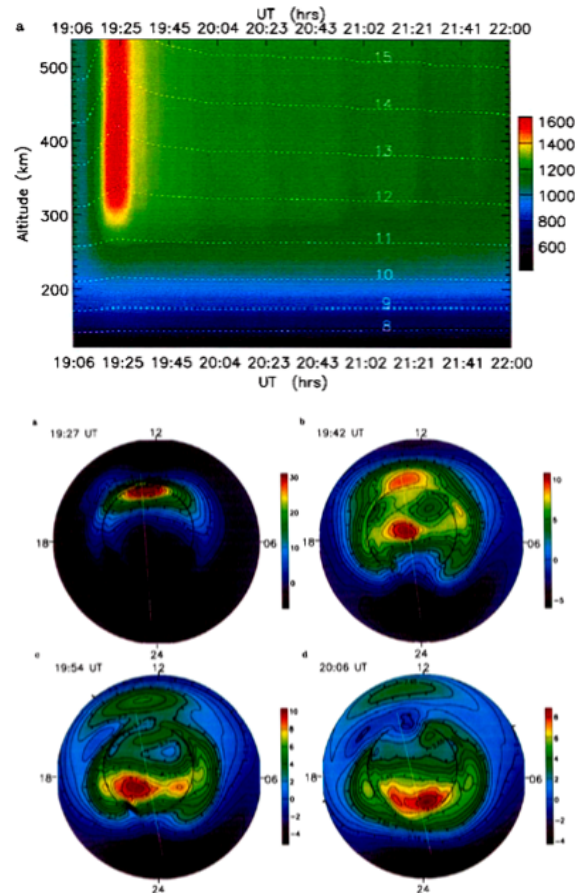


図 5: (上) 北緯 70 度、西経 100 度での中性大気温度高度分布の時間変化, (下) 中性温度に見られる擾乱の空間分布 [Idenden, 1998].

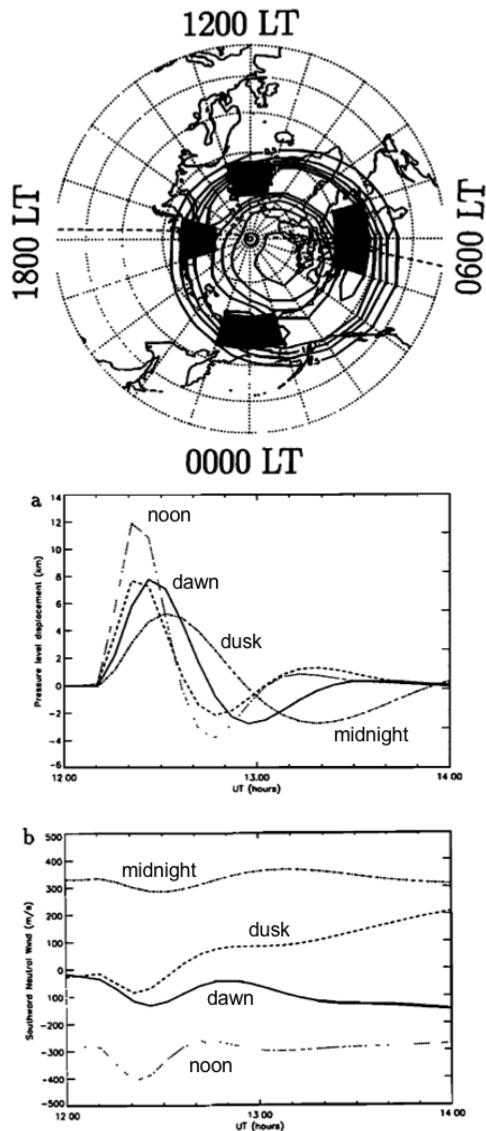


図 6: (上) エネルギー流入 (電場) 増大領域の空間分布, (中央) 各ローカルタイムにおいて, エネルギー流入増大領域から極方向に 890km 離れた場所における等圧面高度の変動, (下) 各ローカルタイムにおける南北風の変動 (北向きが正) [Balthazoer and Moffett, 1999].

オーロラオーバルの拡大の際に励起される TAD のシミュレーション結果を図 5 に示す [Idenden, 1998]. 上段には, 北緯 70 度, 西経 100 度での中

性大気温度高度分布の時間変化を示す. 下段にはオーロラオーバルの赤道方向への拡大・エネルギー入力変化に伴う中性大気温度の上昇領域の変化が示されている. この変動に伴って, 低緯度・高緯度方向へ伝搬する TAD 的擾乱が励起される様子が示されている. また, 同時にポーラーパッチと思われる高電子密度領域が生成され, 極冠域 (極方向) へと移動している.

電離圏嵐が起こったときに, ローカルタイムによって擾乱の伝搬形態に違いが見られる. これは, 背景中性風の向きがローカルタイムによって異なることに起因する. 図 6 にこの効果について調べたシミュレーション結果を示す [Balthazoer and Moffett, 1999]. この計算では, 図 6 上段のように, 真昼・夕方・真夜中・朝方の 4 つのローカルタイムにそれぞれエネルギー流入 (電場) の増大領域を設定している. 図 6 中央は, エネルギー流入の増大領域から極方向 (この計算では, 極方向に伝搬する TAD を考えている) に 890 km 離れた場所における等圧面高度の変動を時系列で示したものである. 同様に, 図 6 下段にはそのときの南北風 (meridional wind) の時間変化を示している (北向きが正). TAD の伝搬方向と背景風の場合 (この場合昼側において), 擾乱が早いタイミングで, かつ大きな振幅で観測されることがわかる.

4 観測との整合性

シミュレーションの発展に伴って, 計算結果と観測との比較が試みられるようになった. 図 7 に, 1997 年 1 月 10 日の磁気嵐中の電離圏擾乱を TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model) シミュレーションによって再現した例を示す [Lu et al., 2001]. AMIE (Assimilative Mapping of Ionosphere Electrodynamics) というデータインバージョン手法によって求められた極域における粒子降り込みと電場の空間分布を入力として TIEGCM シミュレーションを実行している.

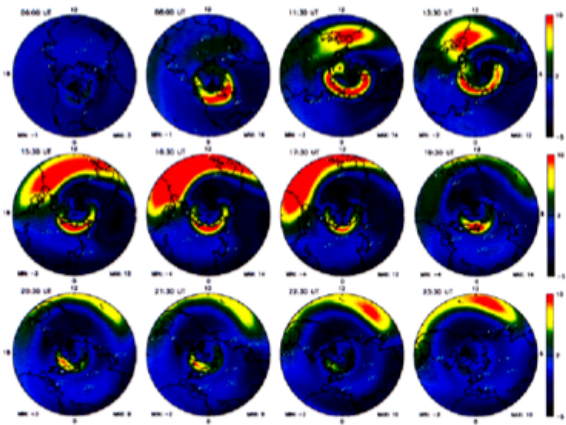


図 7: 1997 年 1 月 10 日の磁気嵐について, AMIE の結果を入力とする TIEGCM シミュレーションによって得られた TEC のグローバルな分布 [Lu et al., 2001].

図 7 には, 計算から得られた電離圏全電子数 (Total Electron Content: TEC) のグローバルな分布を示している. この計算結果から, 電離圏正相嵐と負相嵐が異なるローカルタイムにおいて同時に起こっていることが分かる. また, 極域において粒子降下が増大し, その擾乱が TID によって中・低緯度へ伝搬することにより電離圏正相嵐が起こる. 一方, 負相嵐は, 極域における中性大気組成の変化 (O/N_2 比の減少) が中・低緯度に伝わることによって引き起こされていることが示されている.

電離圏嵐 (特に負相嵐) の発生を考えると, 熱圏の中性大気組成に関する情報は必要不可欠である. したがって, シミュレーションから導出される中性大気組成と観測結果との整合性の評価は極めて重要な問題である. 例えば, Prölss et al. [1998] は, O/N_2 の変動量を TIGCM と CTIM というふたつの GCM を用いたシミュレーションによって再現し, 実際に DE-2 が観測した O/N_2 の変動量との比較を行っている. その結果, シミュレーションによる磁気嵐前後の O/N_2 の緯度分布は, 定性的には観測結果を良く再現しているが, 中低

緯度では定量的には観測結果と一致しないことが明らかになっており, この種の比較研究の難しさを示している.

5 最近の熱圏 GCM シミュレーション

図 8, 9 に Lin et al. [2005] によって行われたシミュレーション結果を示す. この研究では, Sheffield 大学が開発したプラズマ圏・電離圏モデル (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model: SUPIM) や ROCSAT-1 衛星の実観測データと, TIEGCM シミュレーションを組み合わせて, 磁気嵐中に赤道異常付近の電子密度構造がどのように変化するかを考察している.

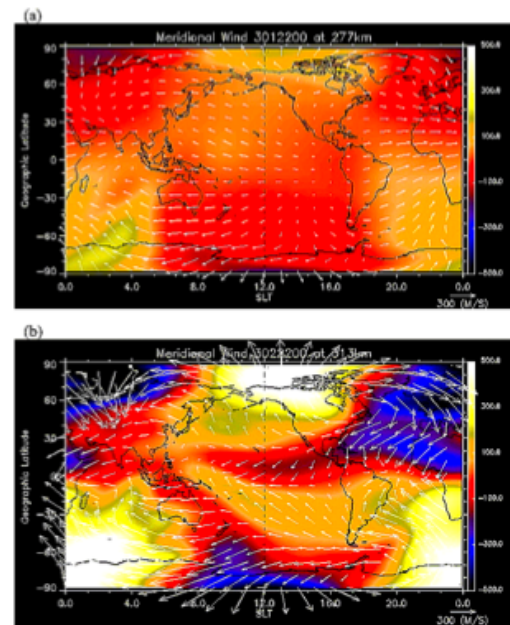


図 8: 静穏時 (上) と擾乱時 (下) の熱圏中性風の南北成分 [Lin et al., 2005].

図 8 には, TIEGCM で計算された高度約 300 km の等圧面上での地磁気静穏時 (上段) と擾乱時 (下段) の熱圏中性風 (ベクトル) とその南北成分

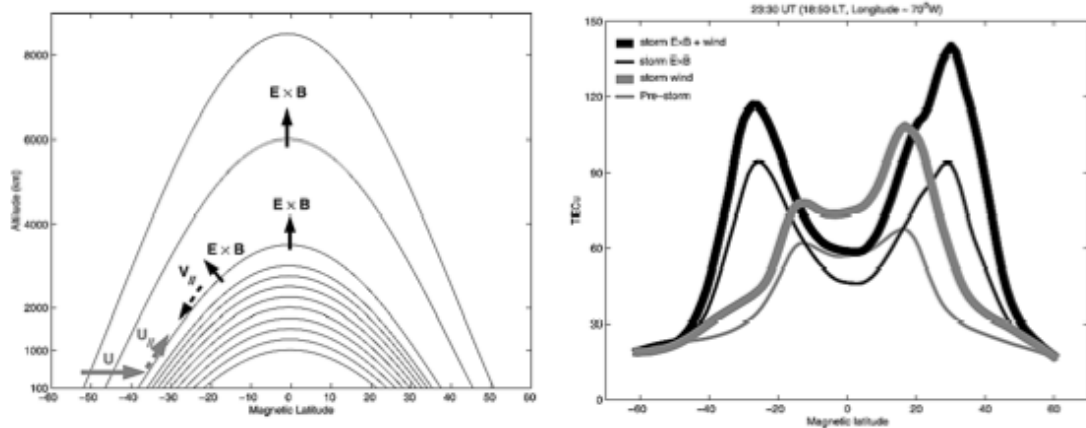


図 9: (左) 磁気嵐中に赤道域に進入した東向き電場による $E \times B$ ドリフトと、磁気嵐にともなって増大した赤道向きの中性風がイオンをドラッグする効果が、赤道異常付近の電子密度構造にどのように寄与するかを模式的に示した図、(右) 電場の効果と中性風の効果によって赤道異常近辺の電子密度空間構造がどのように変化するかを計算した結果 [Lin et al., 2005].

(カラーコンター：北向き正)を示している。横軸は地方時、縦軸は地理緯度である。擾乱時には全球的に風が強まり、経度（地方時）方向に広がった大規模な変動が低緯度へ押し寄せていることが見て取れる。図 9 は赤道電離圏での様々な物理プロセスの概念図と、SUPIM によって計算された 2330 UT (1850 LT) における TEC の緯度分布を示す。左図は、磁気嵐中に赤道域に進入した東向き電場による $E \times B$ ドリフトと、磁気嵐にともなって増大した赤道向きの中性風がイオンをドラッグする効果が、赤道異常付近の電子密度構造の変化にどのように寄与するかを模式的に示している。右図は、電場の効果 ($E \times B$: 黒い細線) のみ、風の効果 (灰色の太線) のみ、双方の効果 (黒い太線) を入れたときに、灰色の細線で示される磁気嵐前の TEC 緯度分布がどのように変化するかを調べた計算結果である。磁気嵐時に、赤道異常帯がより高緯度まで広がり、かつその密度が大きくなっていることが見て取れる。

図 10 に、Fujiwara and Miyoshi [2006] による熱圏 GCM シミュレーションの結果を示す。この計算では、極域電場の増大によって（ジュール加熱の増大に伴う急激な気圧傾度によって）TAD を励

起している。加熱直後に（図 10a）、極域において中性大気温度と赤道方向の中性風が増大し、TAD として擾乱が低緯度方向へ伝搬している。その 3 時間後（図 10b）には、この擾乱は赤道域へと到達していることが見て取れる。このような空間スケールの大きな擾乱の他にも、様々な細かい擾乱が極域での加熱に伴って生成されていることが分かる。

6 まとめ

GCM シミュレーションにより熱圏・電離圏擾乱のグローバルな描像が明確に示されるようになりつつある。とくに、LS-TID/TAD と呼ばれる大規模な伝搬性擾乱に関しては、その励起から、伝搬過程、電離圏嵐との関連性等が再現されている。最近では、これらの大規模な構造に加えて、局所的な擾乱の励起、伝搬も確かめられるようになってきた。グローバルな構造と局所的な構造の成り立ちや関係について、今後、さらに理解を深める必要がある。

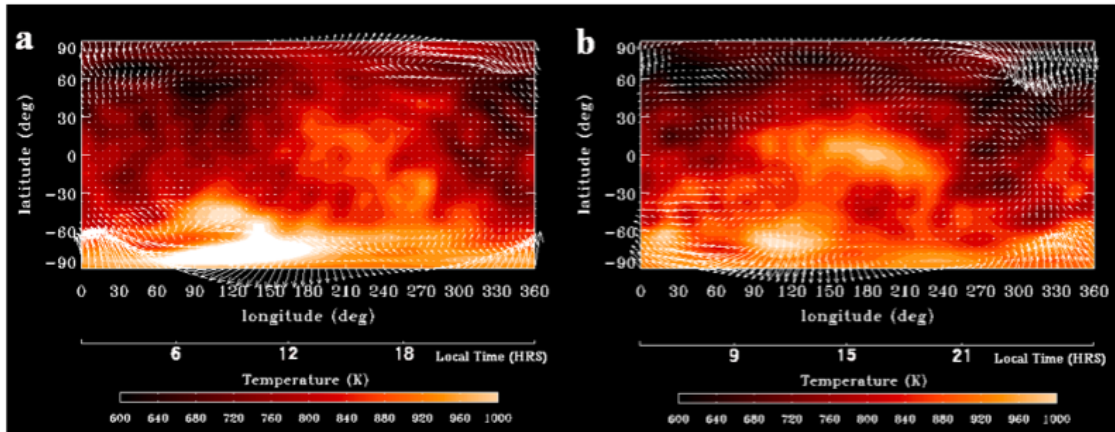


図 10: 極域電場の増大によって励起された TAD (中性大気温度と中性風変動) のグローバル伝搬の GCM シミュレーション. (a) 加熱を与えた直後, (b) 3 時間後の分布 [Fujiwara and Miyoshi, 2006].

7 何がまだ理解されていないのか？

- 熱圏・電離圏擾乱の規模 (例えば, TID/TAD の空間スケール) と励起源 (ソース) の関係は？さらに, 励起源の鉛直構造に関して詳細は明らかになっていない.
- LS-, MS-TADs/TIDs は, どのようなときに (太陽活動, 季節, 磁気嵐の主相・回復相, 昼夜, ...) どのような規模のものが励起され何処まで伝搬するのか？極域のエネルギー入力の規模・特性によって, どのような擾乱が励起されるのかを特定できるようにならない.
- TAD のエネルギーは最終的に, どこにどのくらい散逸するのか？中・低緯度へ輸送されたエネルギーがどこでどのような過程を経て, どれだけ散逸されるのかを定量的に明らかにしなければならない. 熱圏でのエネルギー輸送という観点から, TAD の担う役割を理解する必要がある.

参考文献

- Balthazor, R. L., and R. J. Moffett, Morphology of the large-scale traveling atmospheric disturbances in the polar thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **104**, 15–24, 1999.
- Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, Characteristics of the large-scale traveling atmospheric disturbances during geomagnetically quiet and disturbed periods simulated by a whole atmosphere general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL027103, 2006.
- Fuller-Rowell, T.J., and D. Rees, A three-dimensional time-dependent global model of the thermosphere, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2545–2567, 1980.
- Fuller-Rowell, T. J., M. V. Codrescu, H. Rishbeth, R. J. Moffett, S. Quegan, On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **101**, doi:10.1029/95JA01614, 1996.
- Hines, C. O., Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, **38**, 1441–1481, 1960.
- Idenden, D. W., The Thermospheric Effects of a Rapid Polar Cap Expansion, *Ann. Geophys.*, **16**, 1380–1391, 1998.

- Lin, C. H., A. D. Richmond, R. A. Heelis, G. J. Bailey, G. Lu, J. Y. Liu, H. C. Yeh, and S.-Y. Su, Study of the low- and mid-latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 superstorm: Relative importance of the neutral wind and the electric field, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2005JA011304, 2005.
- Lu, G., A. D. Richmond, R. G. Roble, and B. A. Emery, Coexistence of ionospheric positive and negative storm phases under northern winter conditions: A case study, *J. Geophys. Res.*, **106**, 24,493–24,504, 2001.
- Millward, G. H., R. J. Moffett, S. Quegan, and T. J. Fuller-Rowell, Effects of an atmospheric gravity wave on the mid-latitude ionospheric F layer, *J. Geophys. Res.*, **98**, 19,173–19,179, 1993.
- Namgaladze, A. A., A. N. Namgaladze and M. A. Volkov, Numerical modelling of the thermospheric and ionospheric effects of magnetospheric processes in the cusp region, , *Ann. Geophys.* **14**, 1343–1355, 1996.
- Prölss, G.W., On explaining the local time variation of ionospheric storm effects, *Ann. Geophys.*, **11**, 1–9, 1993.
- Prölss, G. W., Ionospheric F-region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. II, edited by H. Volland, pp. 195–248, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1995.
- Prölss, G.W., S. Werner, M.V. Codrescu, T.J. Fuller-Rowell, A.G. Burns, and T.L. Killeen, The thermospheric-ionospheric storm of December 8, 1982: Model predictions and observations, *Adv. Space Res.*, **22**, 123–128, 1998.
- Prölss, G.W., and M. Ocko, Propagation of upper atmospheric storm effects towards lower latitudes, *Adv. Space Res.*, **26**, 131–135, 2000.
- Prölss, G. W., *Physics of the Earth 's Environment: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- Richmond, A. D., and S. Matsushita, Thermospheric response to a magnetic substorm, *J. Geophys. Res.*, **80**, 2839–2850, 1975.