

2009年7月22日の日食イベント：国内 イオノゾンデ・GPS全電子数観測結果

情報通信研究機構

津川 卓也, 加藤 久雄, 久保田 実, 品川 裕之, 長妻 努, 村田 健史

京都大学 理学研究科 地球物理学教室

齊藤 昭則, 五井 紫

概要

- 情報通信研究機構(NICT) では、2009年7月22日に日本で観測された日食イベントに合わせ、国内イオノゾンデ（稚内、国分寺、山川、沖縄）の電離圏特別観測と、国土地理院のGPS受信機網（GEONET）の準リアルタイムデータを利用した全電子数（TEC）観測を行った。
- **イオノゾンデ特別観測**
 - 全観測点で1分間隔の観測。
 - F2領域臨界周波数（foF2）、スプラディックE層臨界周波数（foEs）の準リアルタイム自動読み取り。
- **全電子数観測**
 - 準リアルタイム観測（3–6時間遅れ）
 - 日本上空におけるTEC絶対値、60・30・15分以下のTEC変動成分、電子密度擾乱指数（ROTI）、GPS信号ロック損失率あ。
- 上記の電離圏観測データを、日食イベント速報として、準リアルタイムでウェブで公開。

電離圏観測のターゲット

- 日食領域の太陽放射（EUV等）の減少による、電離圏電子密度の減少。
→ foF2、foE、全電子数の観測
- 日食領域の移動（ $\sim 2,000\text{km/h} = 556\text{ m/s}$ ）に伴い励起された波動現象。
→ foF2、全電子数変動の観測
- 日食領域の低電子密度領域と周辺の高密度領域の境界等での電離圏イレギュラリティの発生。
→ 電離圏イレギュラリティ指数（ROTI）、GPSロック損失

どの現象も、2次元的に観測された例はない。

NICT 皆既日食イベントサイト

NICT

電磁波計測研究センター 宇宙観測計測グループ
 電磁波計測研究センター 宇宙観測計測グループ
 電磁波計測研究センター 宇宙観測計測グループ

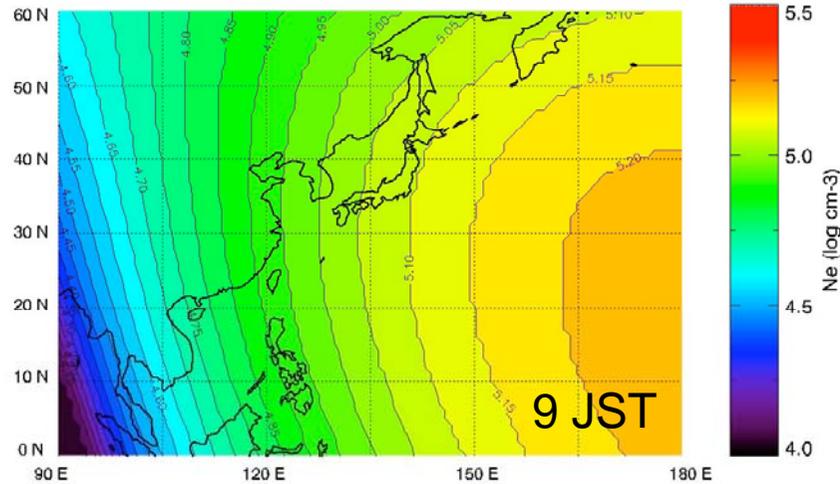
準リアルタイムGPS全電子数マップ (最新6時間、10分間隔)

全電子数(TEC)マップに使用されているTECデータは、NICTで算出・提供されています。TEC変動成分、電離圏電子密度擾乱指数(ROTI)マップに使用されているTECデータは、京都大学で算出・提供されています。これらすべてのTECデータは、国土地理院のGPS受信機網(GEONET)データを利用しています。TEC、TEC変動成分、ROTIマップは速報値であり、正確な値でない可能性があることにご注意ください。このページに対するご質問・ご意見等は、iono@ml.nict.go.jp にメールをお願いいたします。

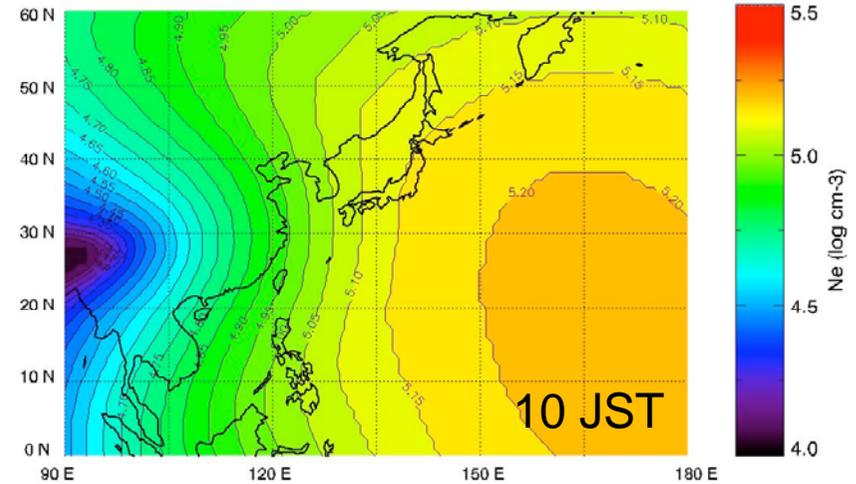
過去 60日分	全電子数(TEC)	TEC変動成分 (60分以下)	TEC変動成分 (30分以下)	TEC変動成分 (15分以下)	電子密度擾乱指数 (ROTI)	GPS信号 ロック損失率
最新 6時間	11:30:00(UT) 08/17 2009 	11:20:00(UT) 08/17 2009 	12:40:00(UT) 08/17 2009 	12:40:00(UT) 08/17 2009 	11:20:00(UT) 08/17 2009 	12:40:00(UT) 08/17 2009
日時・時刻	全電子数(TEC)	TEC変動成分 (60分以下)	TEC変動成分 (30分以下)	TEC変動成分 (15分以下)	電子密度擾乱指数 (ROTI)	GPS信号 ロック損失率
2009/08/17 14:20 UT	14:20:00(UT) 08/17 2009 					
2009/08/17 23:20 JST	14:20:00(UT) 08/17 2009 					
2009/08/17 14:10 UT	14:10:00(UT) 08/17 2009 					

シミュレーション：電離圏E領域の変動予測

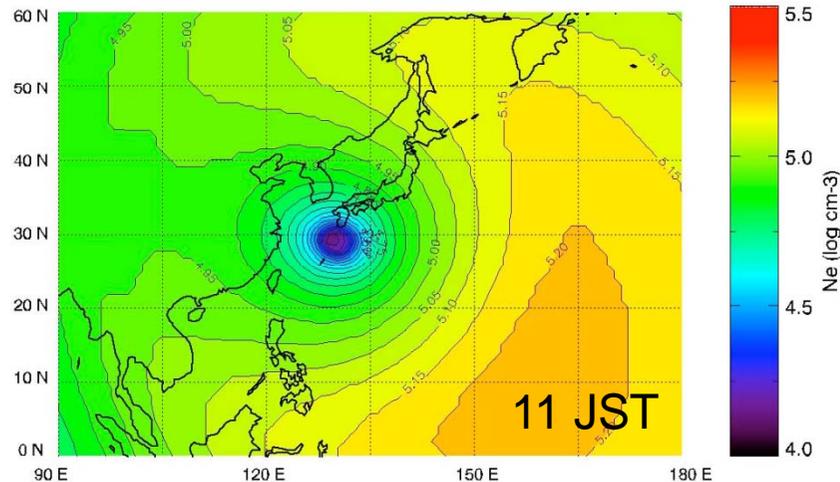
ELECTRON DENSITY [z=120 km] 2009/07/22 00h 00m UT



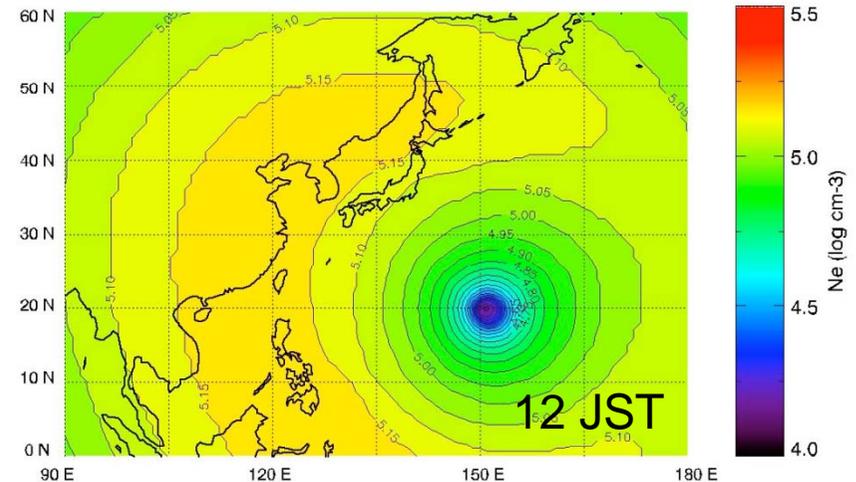
ELECTRON DENSITY [z=120 km] 2009/07/22 01h 00m UT



ELECTRON DENSITY [z=120 km] 2009/07/22 02h 00m UT

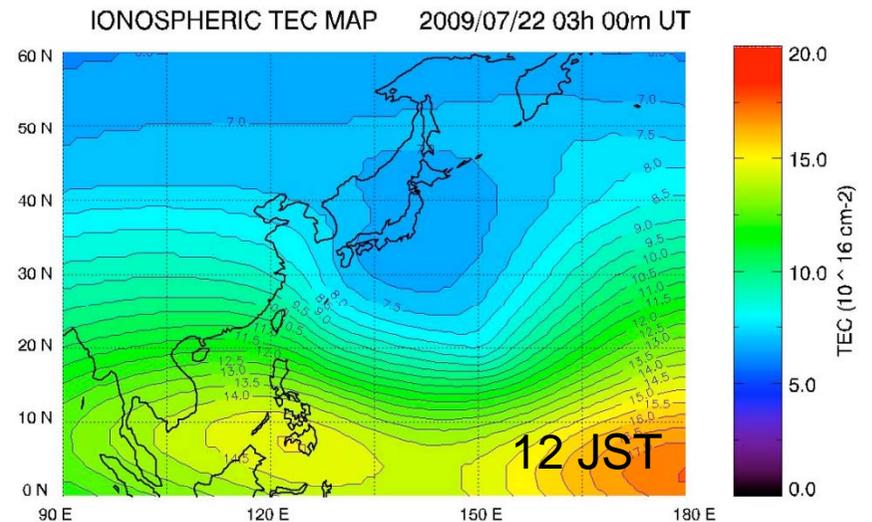
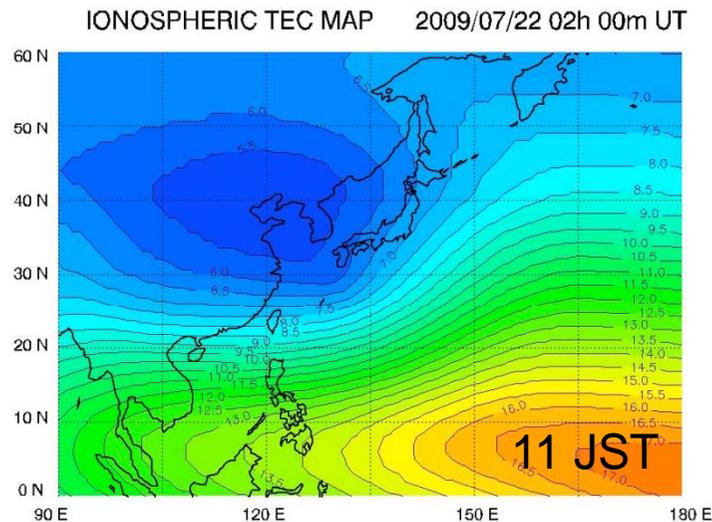
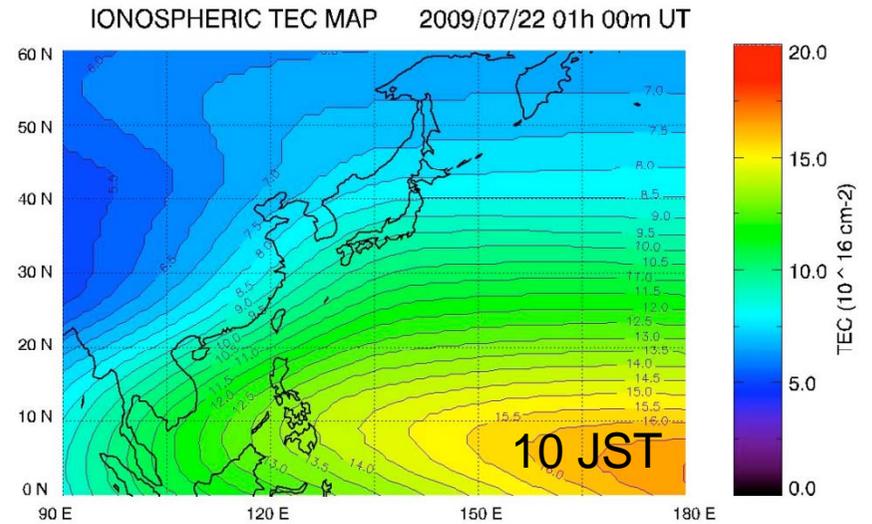
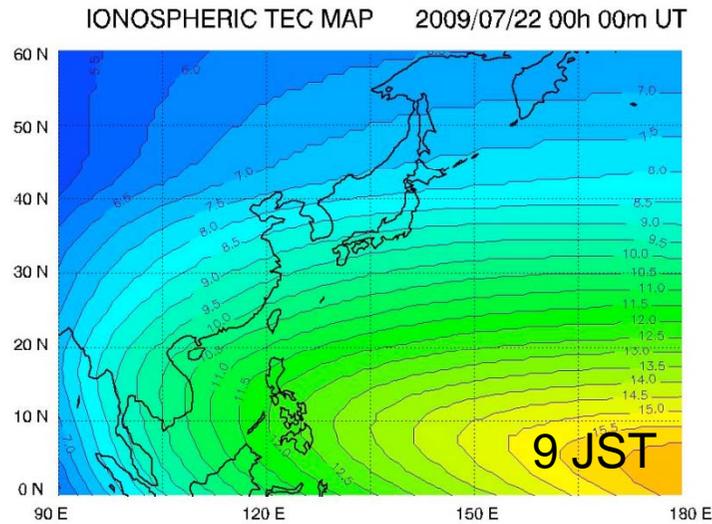


ELECTRON DENSITY [z=120 km] 2009/07/22 03h 00m UT



シミュレーションで計算された日本時間9時から12時までの電離圏E層の電子密度。カラーコンターの値は単位立方センチ当たりの粒子数の対数で表示されている。

シミュレーション：電離圏全電子数の変動予測

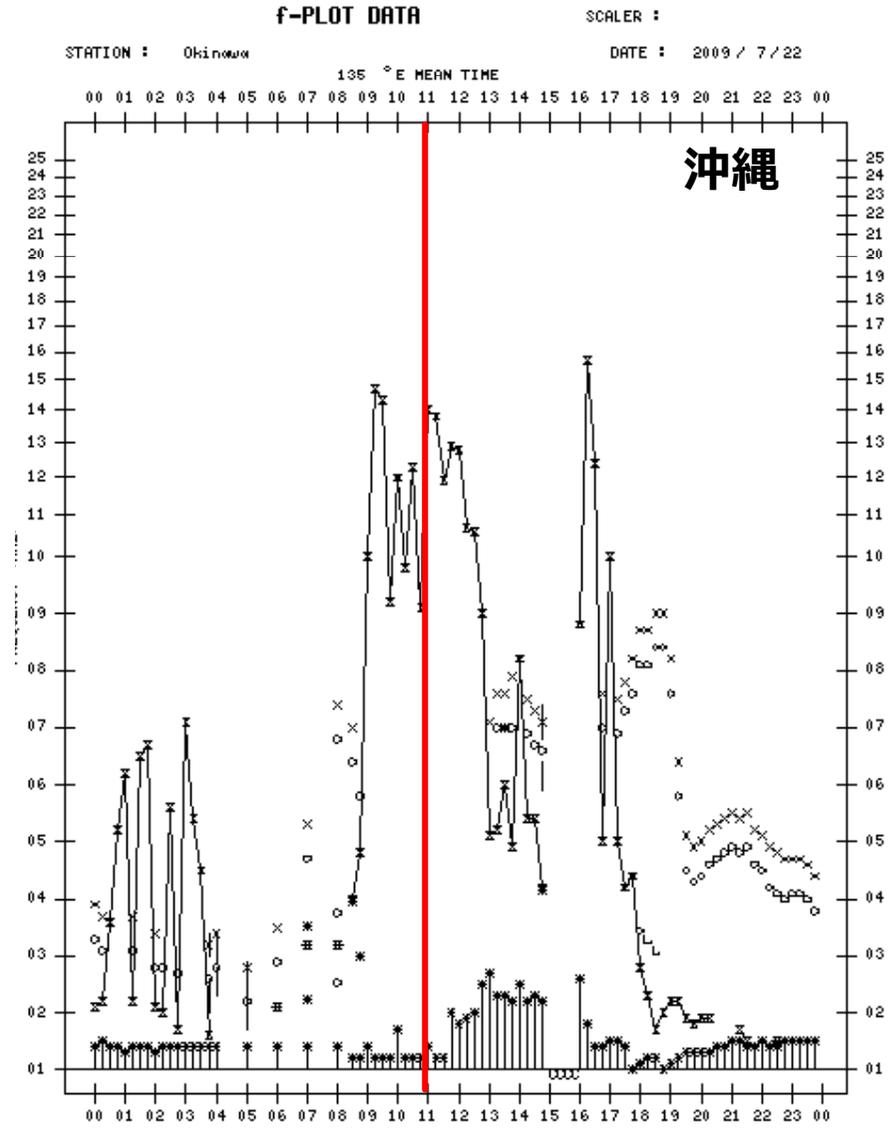
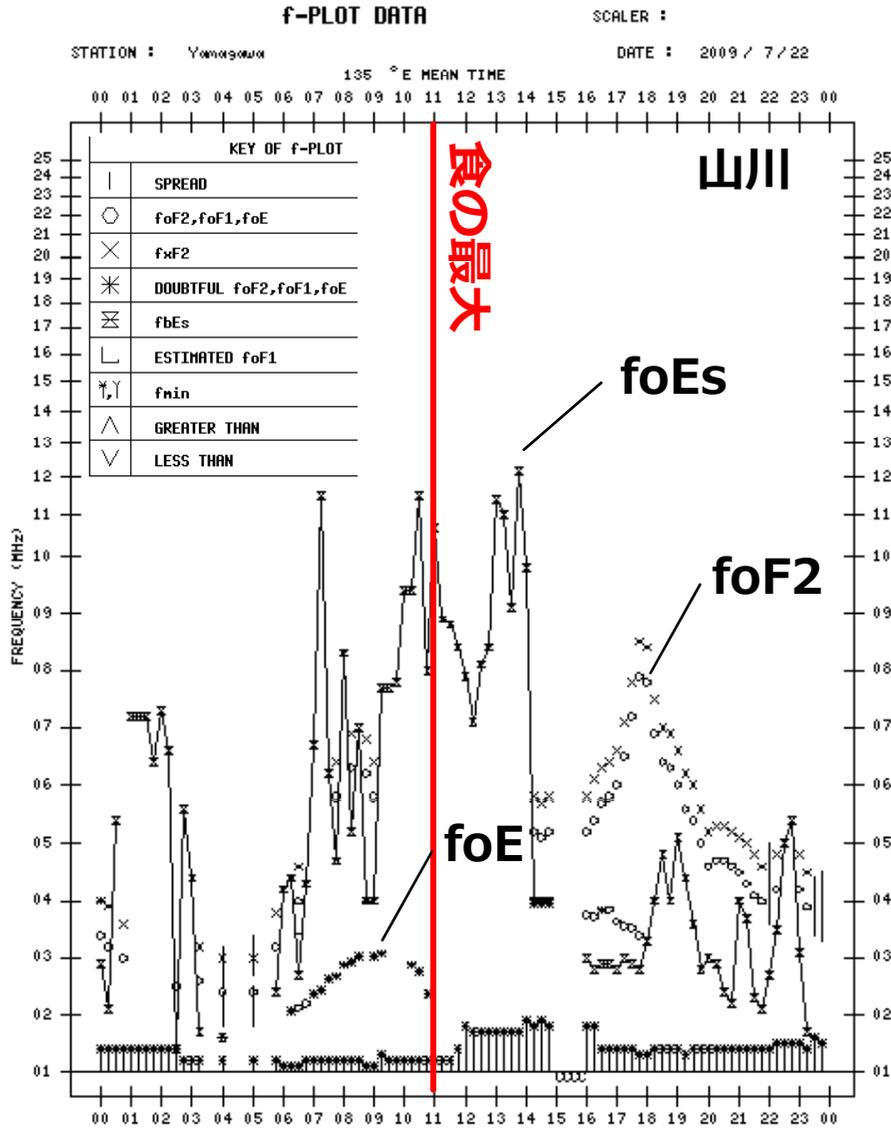


日本時間9時の電離圏全電子数 (TEC)。カラーコンターの値はTECの単位 (10の16乗単位平方メートル) で表示されている。

観測結果：国内イオノゾンデ

- 国内の4観測点（稚内、国分寺、山川、沖縄）とも、スプラディックEs層が断続的に強く、F領域臨界周波数（foF2）は観測できなかった。
- fminと、山川でかろうじて読み取れたfoEに日食効果が見られた。

観測結果：国内イオノゾンデ



観測結果：GPS全電子数

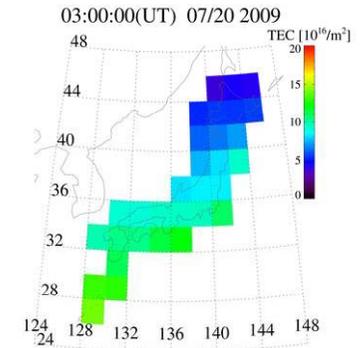
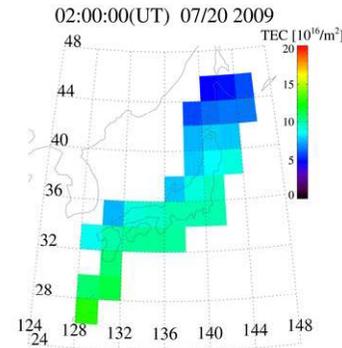
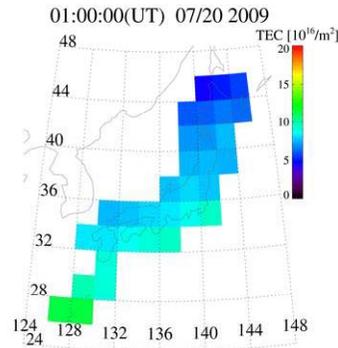
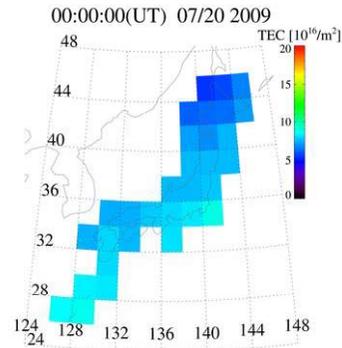
9 JST (0 UT)

10 JST (1 UT)

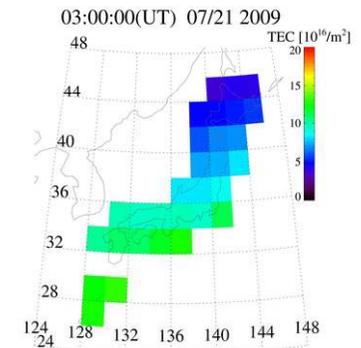
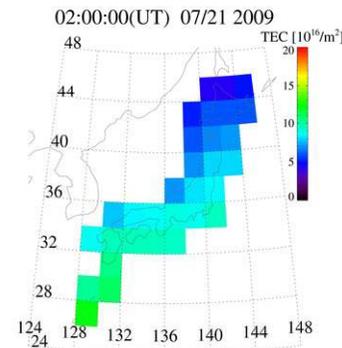
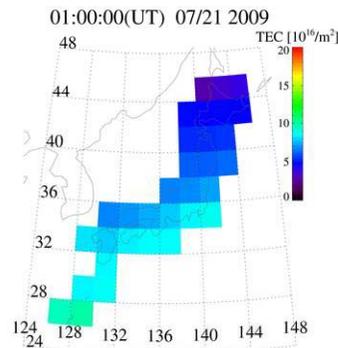
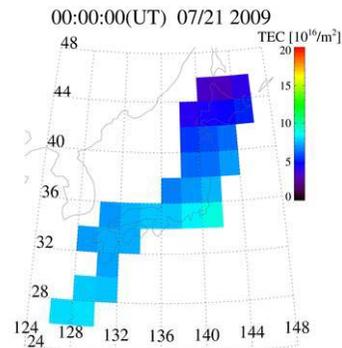
11 JST (2 UT)

12 JST (3 UT)

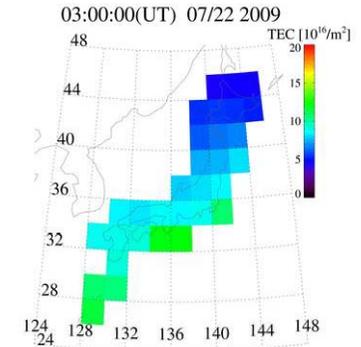
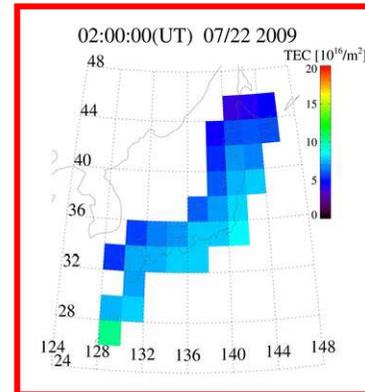
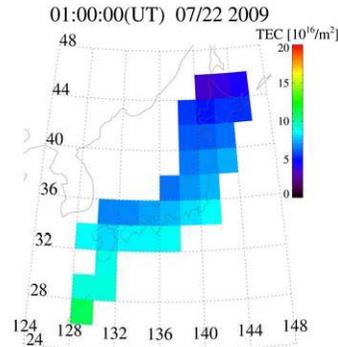
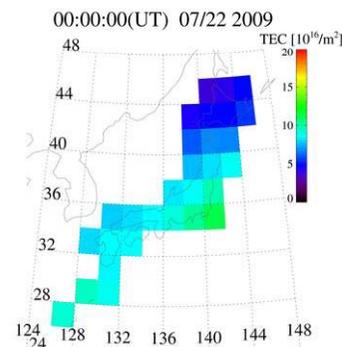
2009
Jul 20



Jul 21



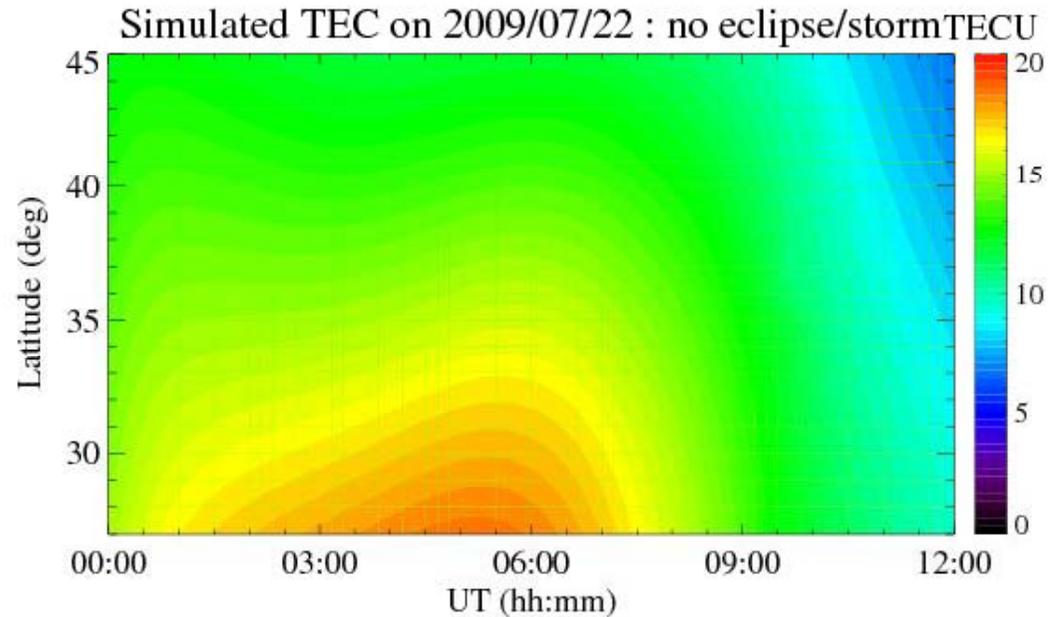
Jul 22
(日食)



モデルと観測結果：電離圏電離圏全電子数の変動

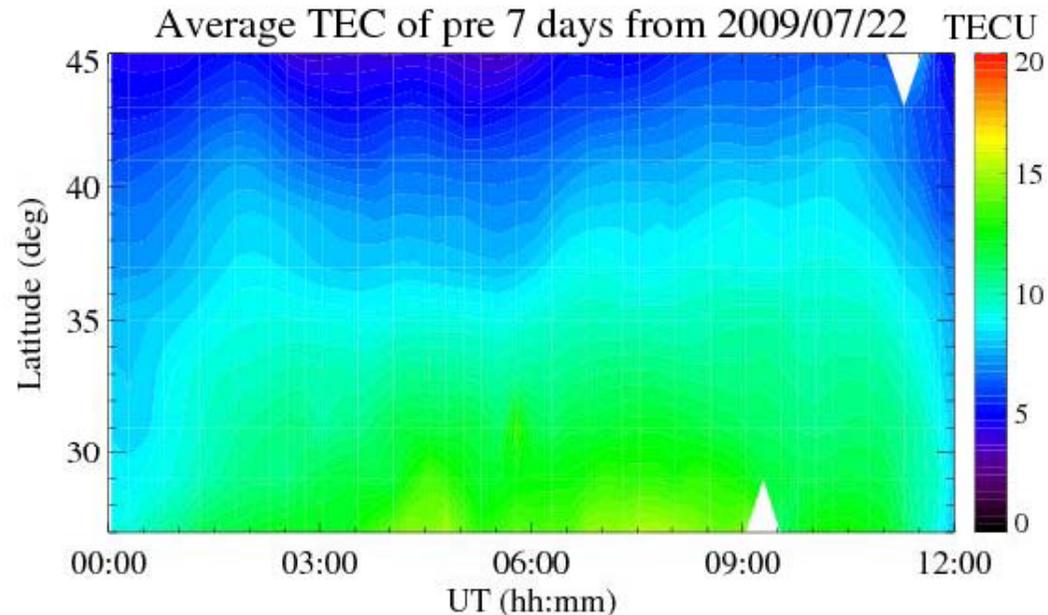
モデル

- 2009年7月22日で日食・磁気嵐無しの場合
- 日本近傍のTECを経度方向に平均



観測

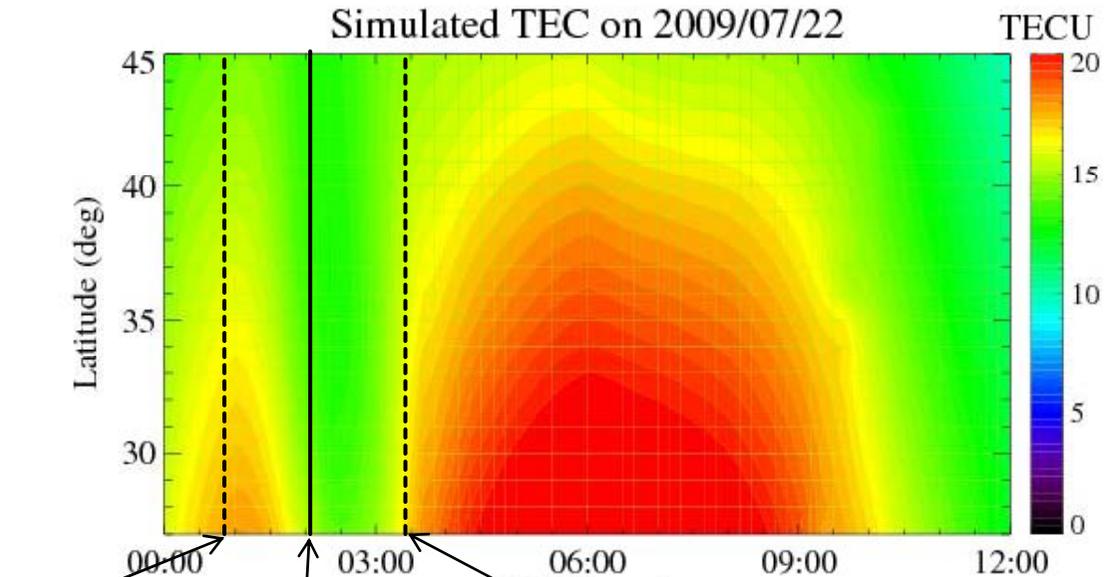
- 2009年7月22日から前7日間の平均
- 全観測データを経度方向に平均



モデルと観測結果：電離圏電離圏全電子数の変動

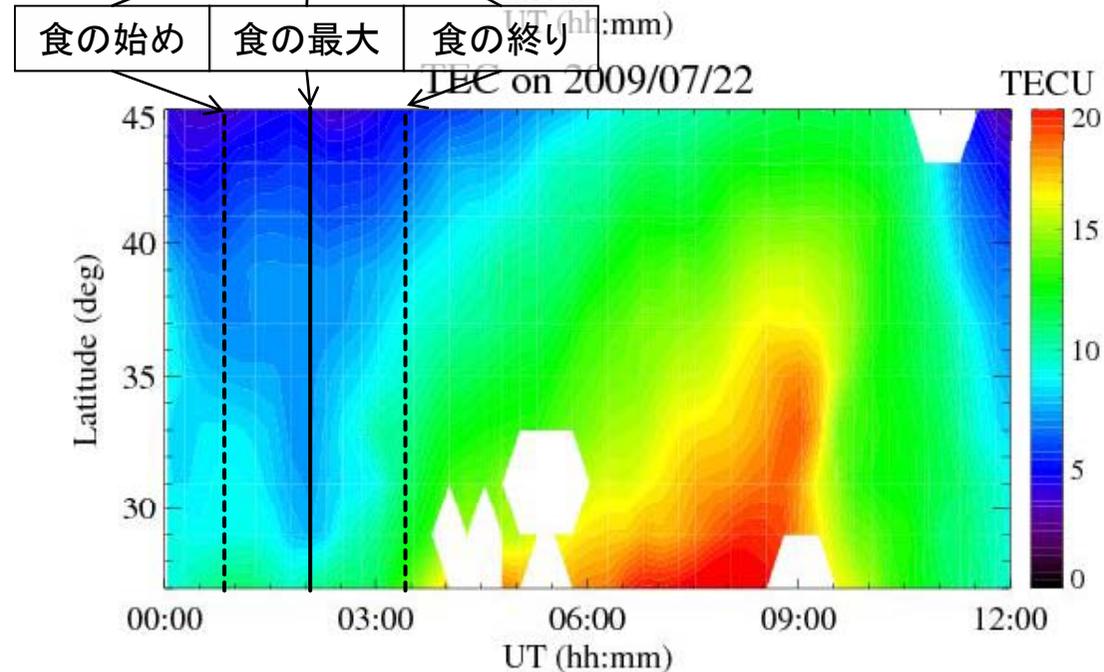
モデル

- 2009年7月22日で日食・磁気嵐効果ありの場合
- 日本近傍のTECを経度方向に平均



観測

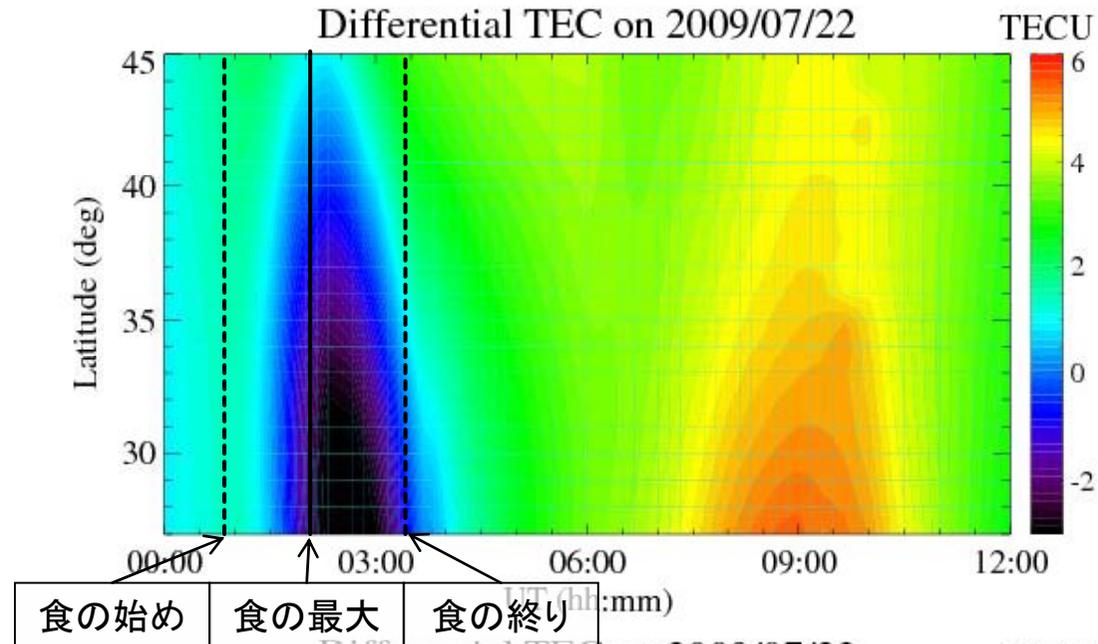
- 2009年7月22日
- 全観測データを経度方向に平均



モデルと観測結果：電離圏電離圏全電子数の変動

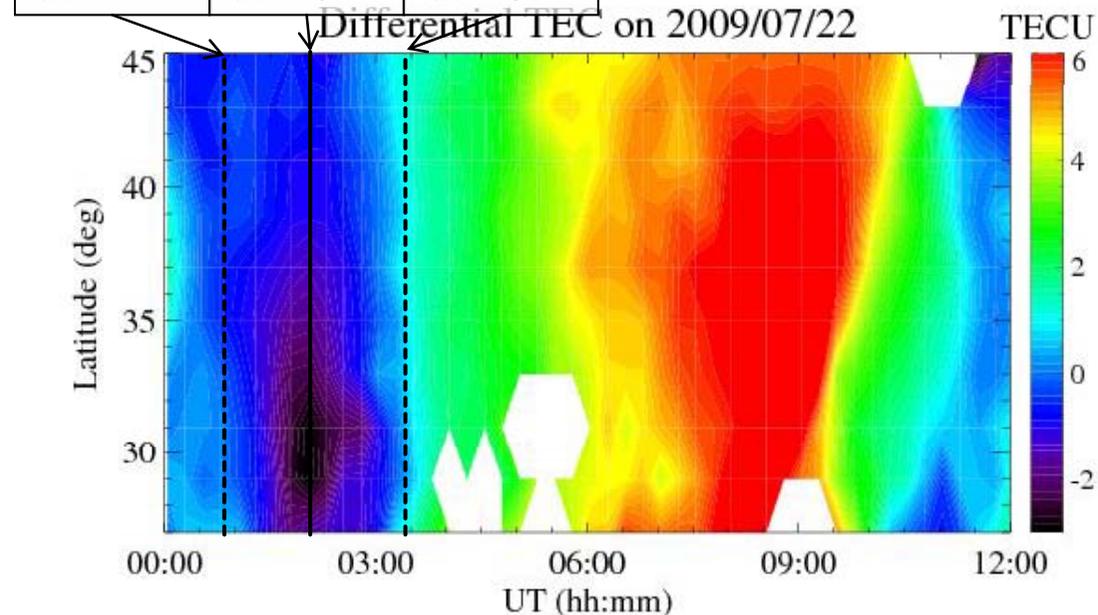
モデル

- 2009年7月22日
日食・磁気嵐効果あり
となしの差
- 日本近傍のTECを経度
方向に平均



観測

- 2009年7月22日と前7
日平均との差
- 全観測データを経度方
向に平均



シミュレーション・観測結果まとめ：全電子数

- モデル・観測とも、日食に対応して全電子数が減少し、その後地磁気擾乱の影響と思われる全電子数増大が見られる。
- 日本全域で全電子数が低下すること、低緯度ほど全電子数の低下が大きいことなど、定性的にはモデル計算の全電子数は観測結果を再現していると考えられる。
- モデル計算と観測結果の相違点
 - **全電子数の極小の時刻と緯度**

観測では、全電子数の極小は、食の最大の時刻・場所とほぼ一致。モデルでは観測値よりも低緯度側、遅め（～30分後）に極小となっている。

→ 日食に伴う全電子数の減少は、E～F領域下部の電子密度減少が効いている。

→ モデルの時間遅れは、プラズマ圏や反対半球からのプラズマ供給を考慮していないためか？
 - **モデルの方が絶対値が大きい**

背景電離圏を作るモデル（中性大気、太陽放射）が実際とは異なるため。これを観測と合わせても、日食に伴う全電子数変動量には効くが、極小値の時刻や場所は変わらない。

観測結果：GPS全電子数変動（60分ハイパス）

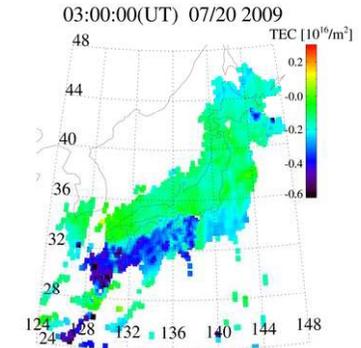
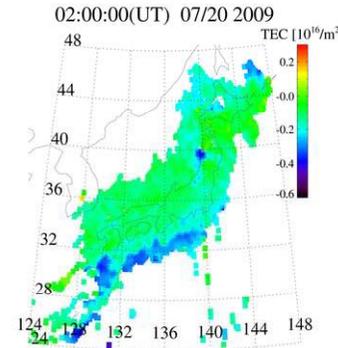
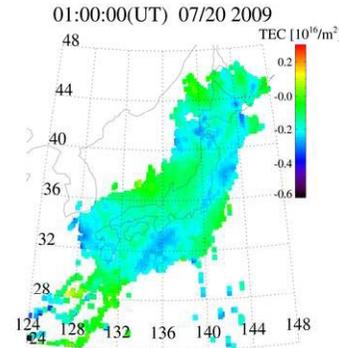
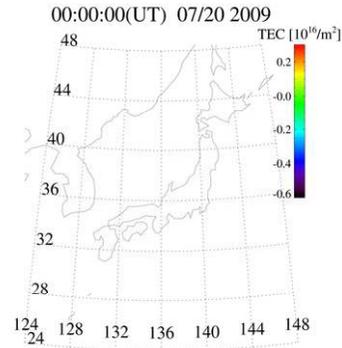
9 JST (0 UT)

10 JST (1 UT)

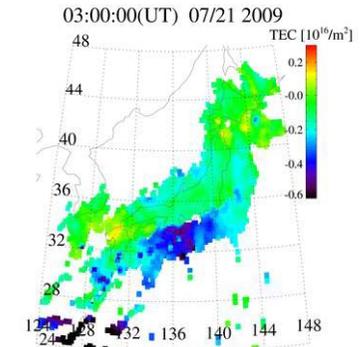
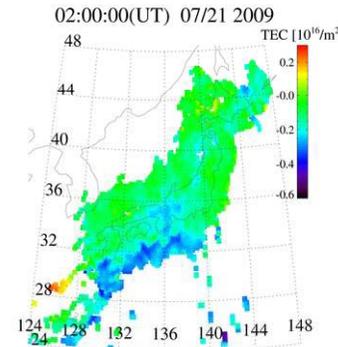
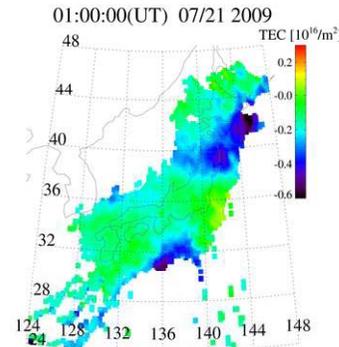
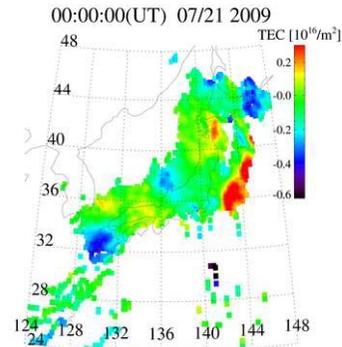
11 JST (2 UT)

12 JST (3 UT)

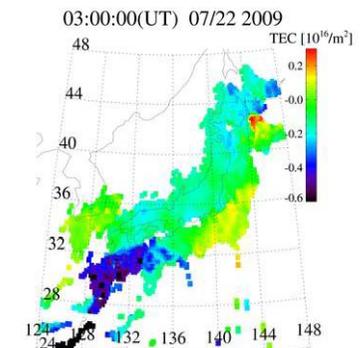
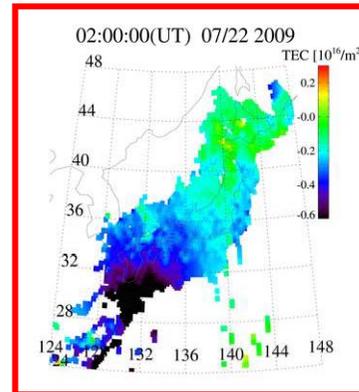
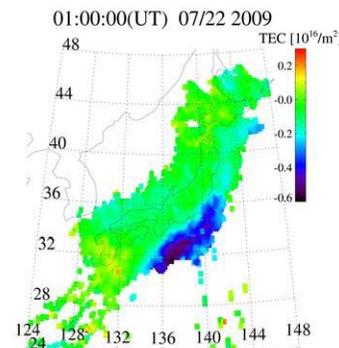
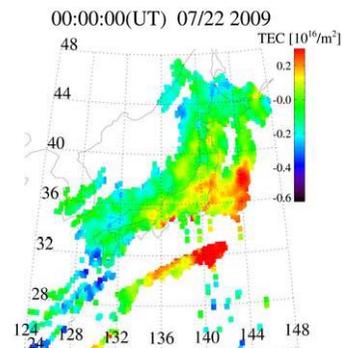
2009
Jul 20



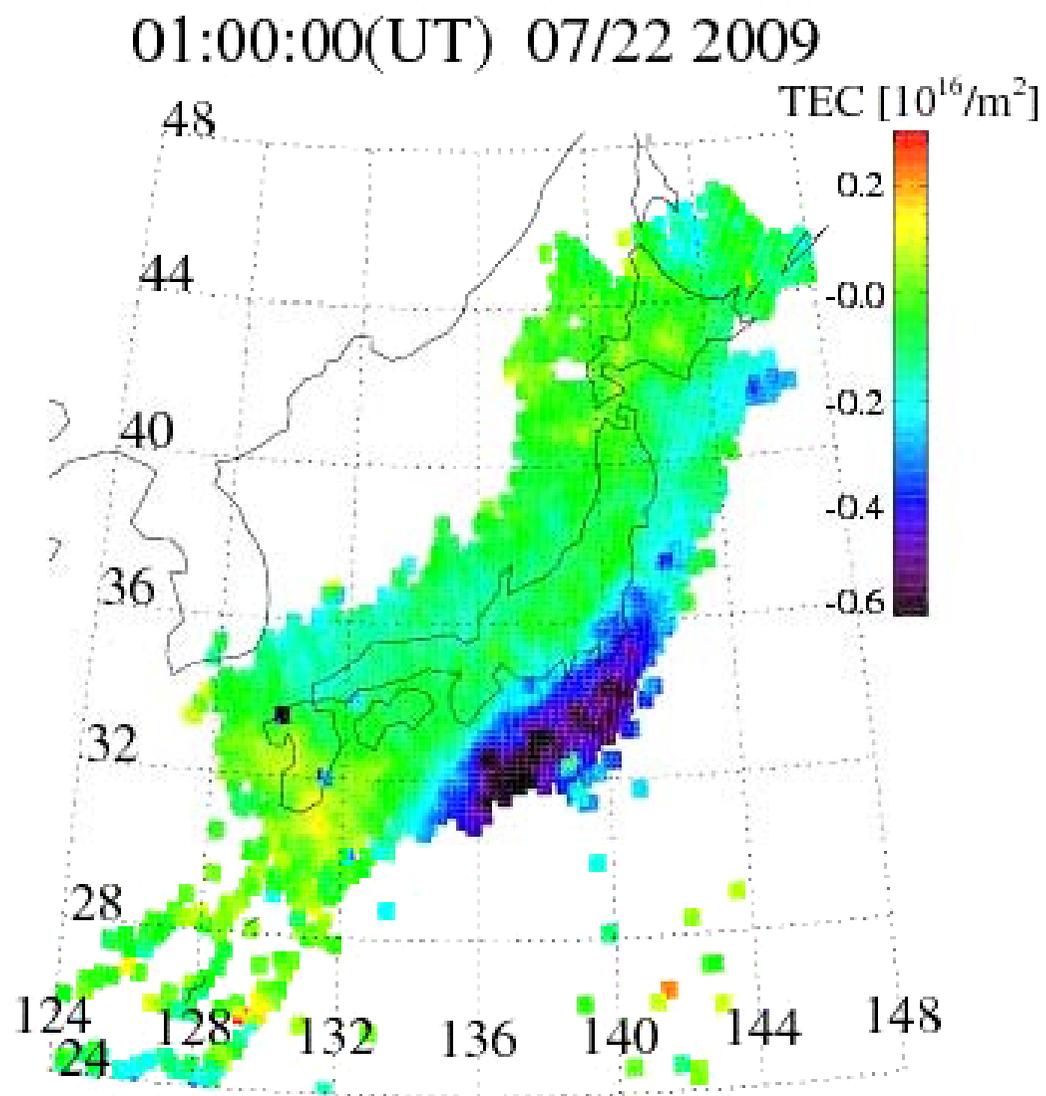
Jul 21



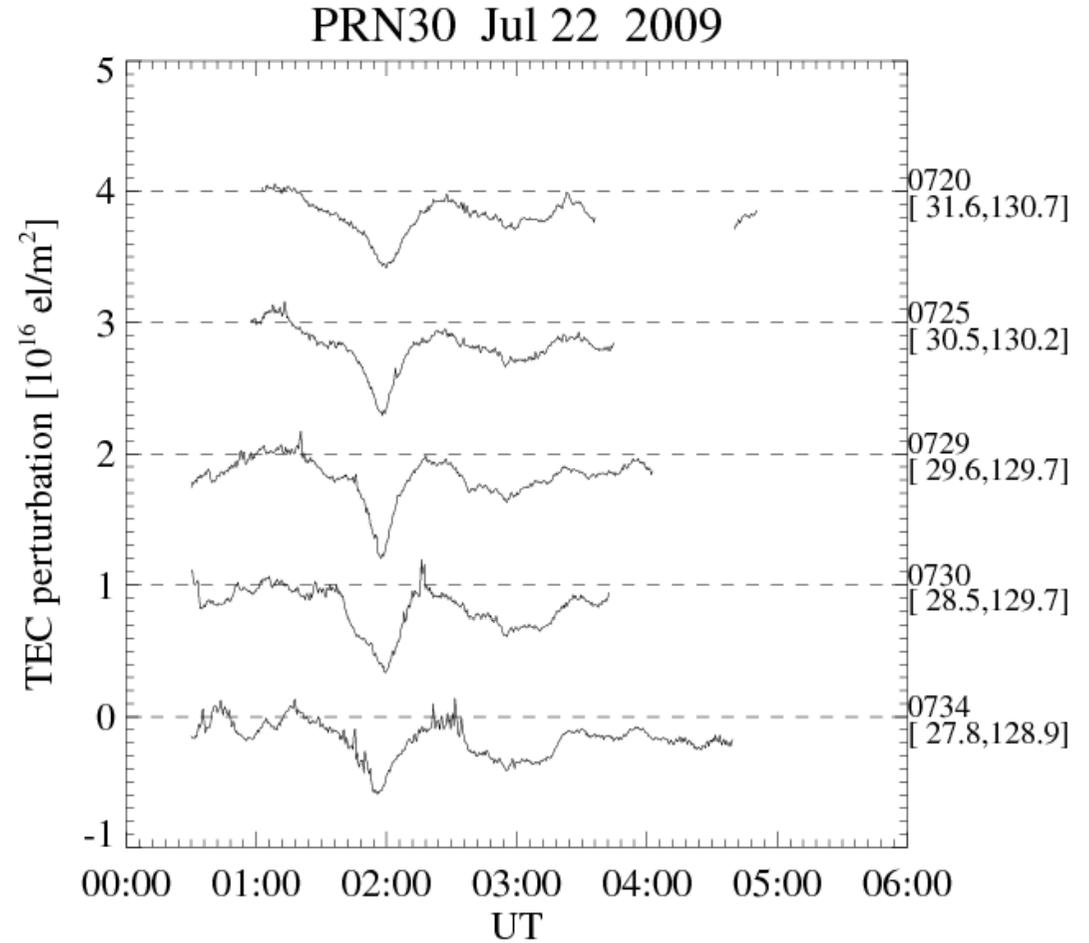
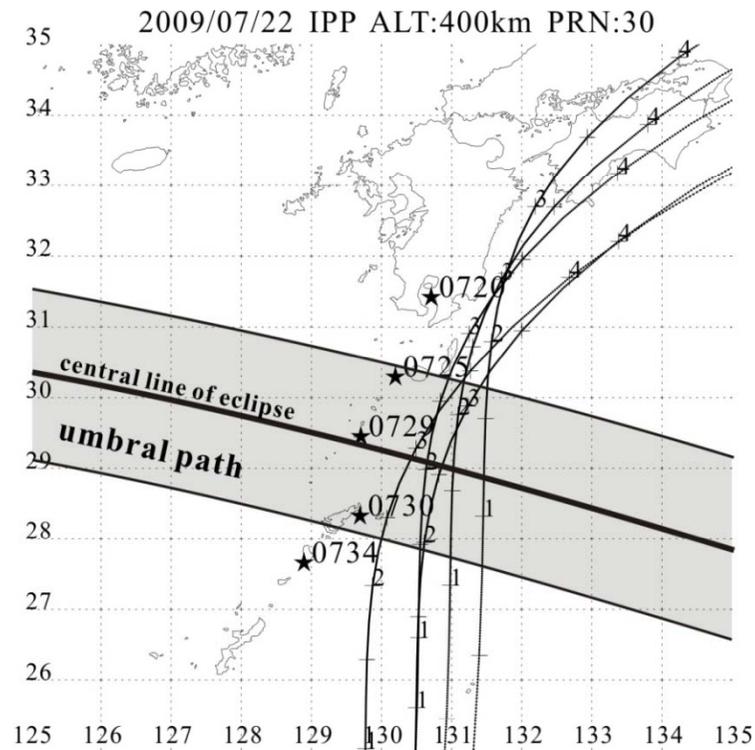
Jul 22
(日食)



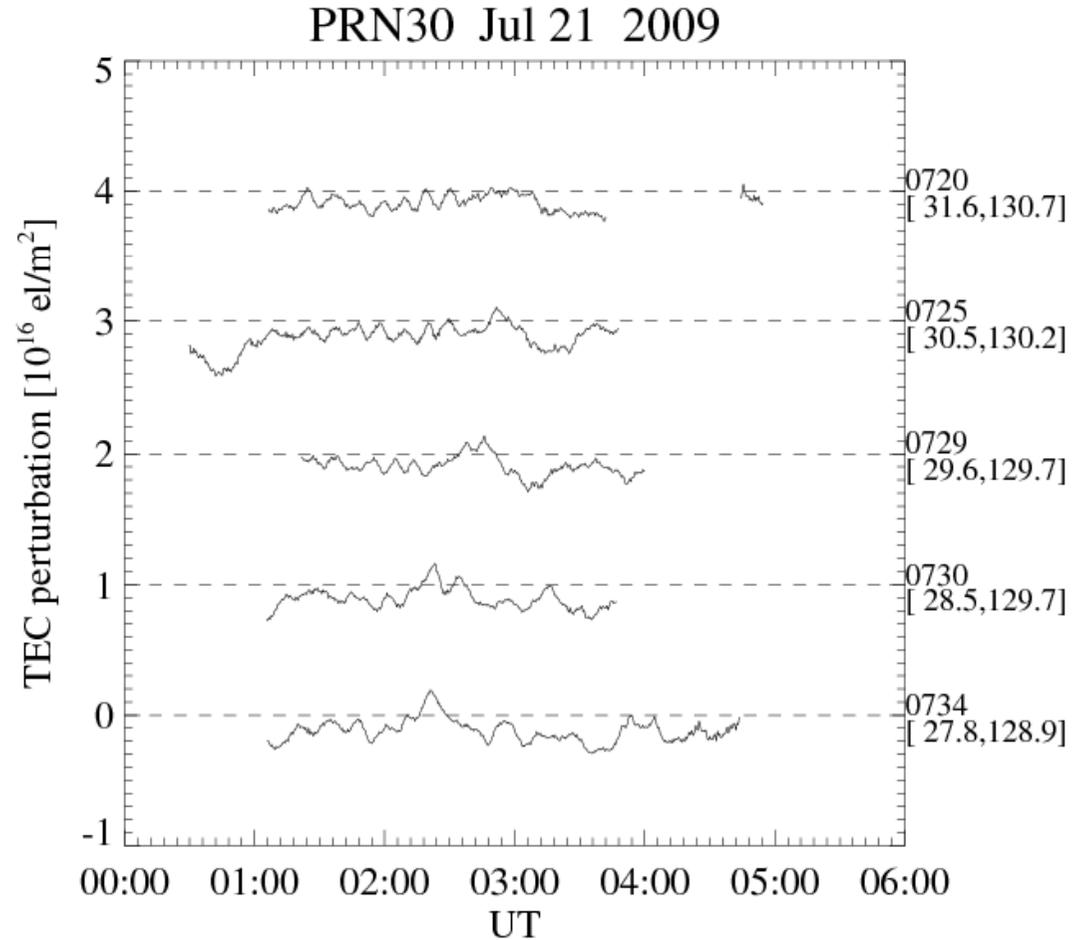
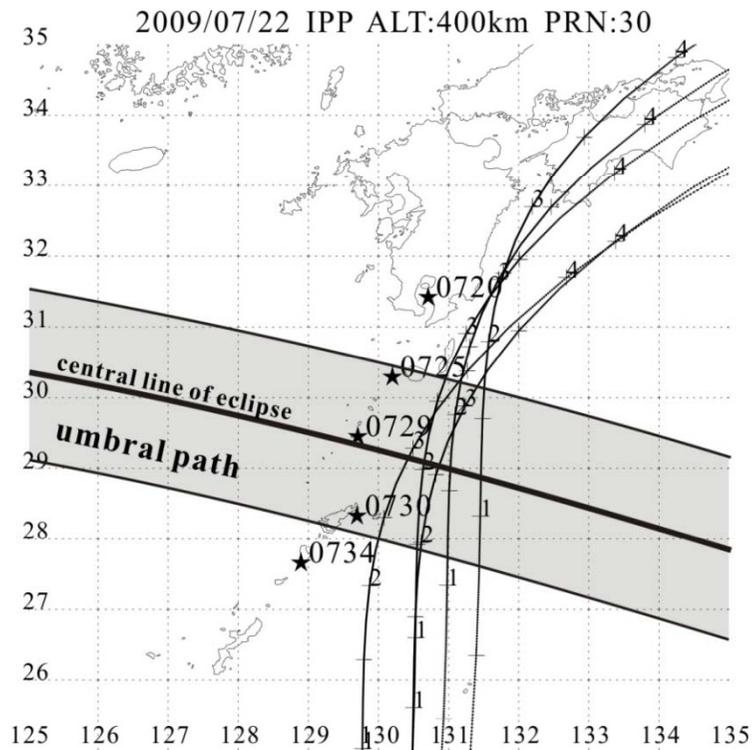
観測結果：GPS全電子数変動（60分ハイパス）



観測結果：GPS全電子数変動（60分ハイパス）



観測結果：GPS全電子数変動（60分ハイパス）



観測結果：電離圏イレギュラリティ指数 (ROTI)

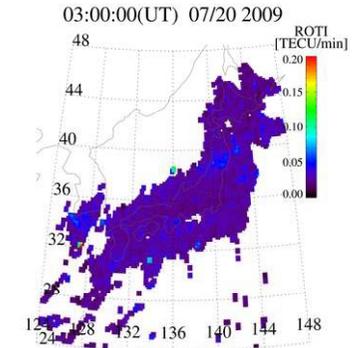
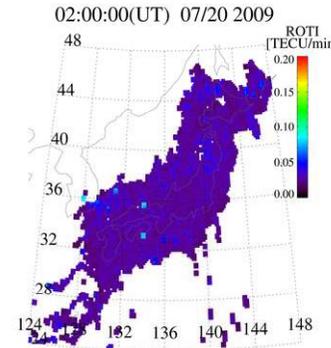
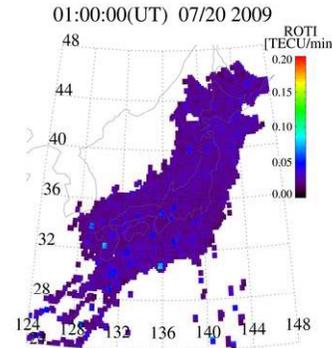
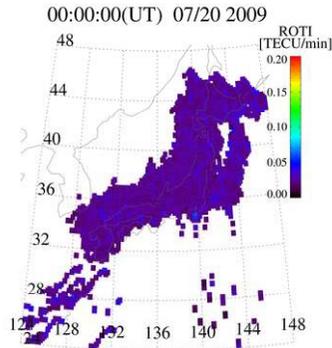
9 JST (0 UT)

10 JST (1 UT)

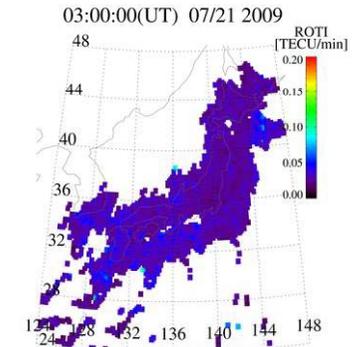
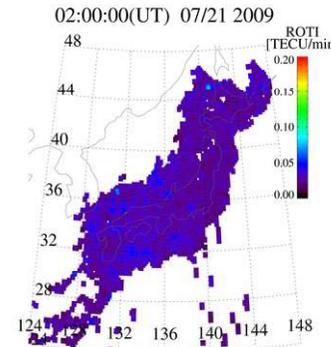
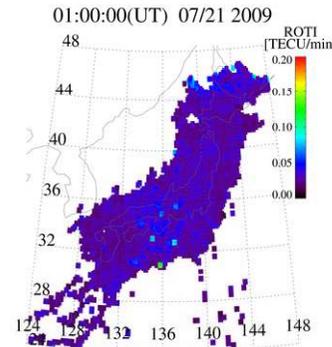
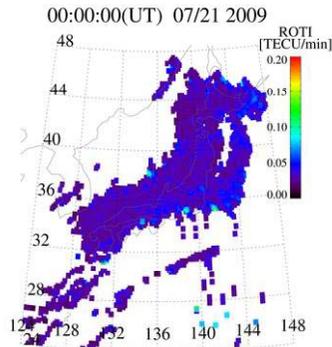
11 JST (2 UT)

12 JST (3 UT)

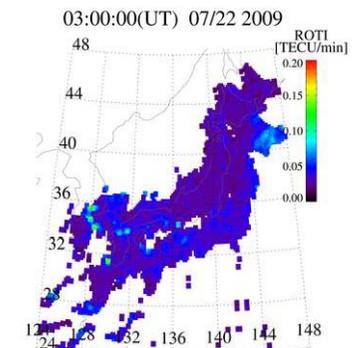
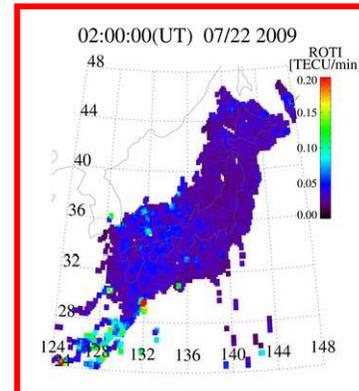
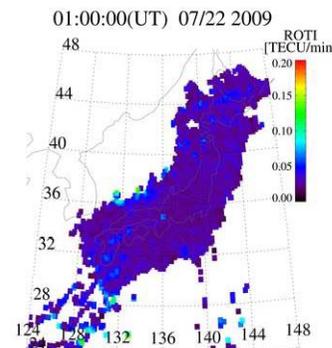
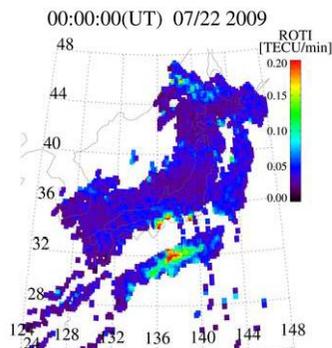
2009
Jul 20



Jul 21



Jul 22
(日食)



観測結果：GPS信号ロック損失率（L1、5分間）

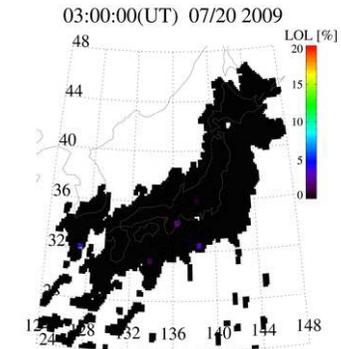
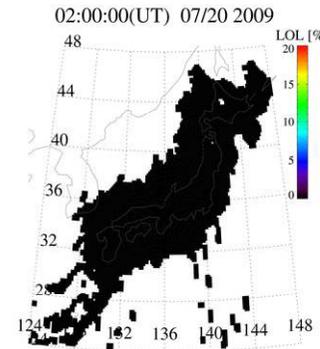
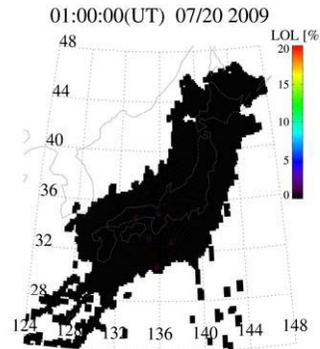
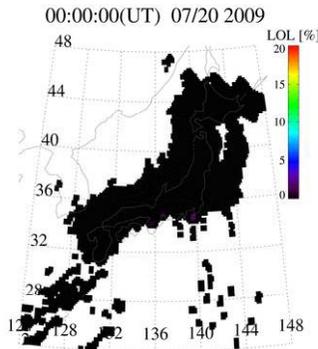
9 JST (0 UT)

10 JST (1 UT)

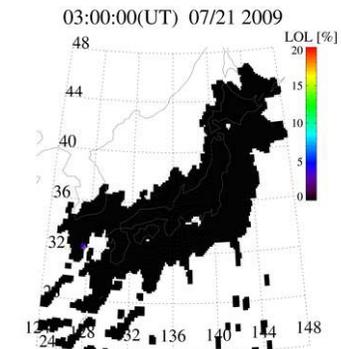
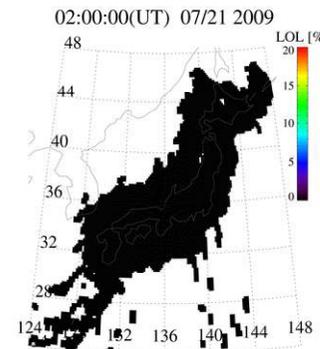
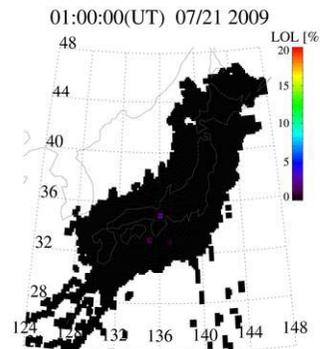
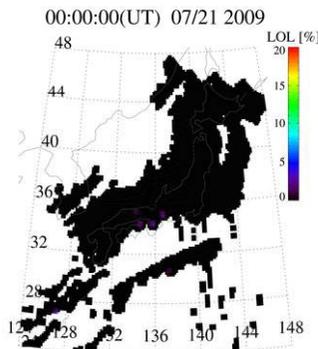
11 JST (2 UT)

12 JST (3 UT)

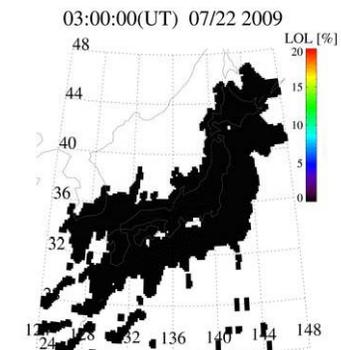
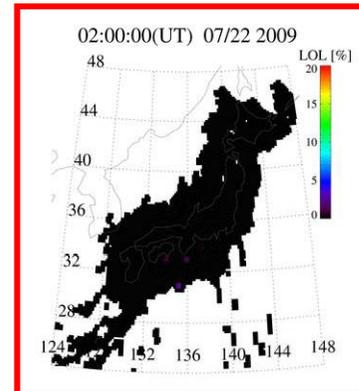
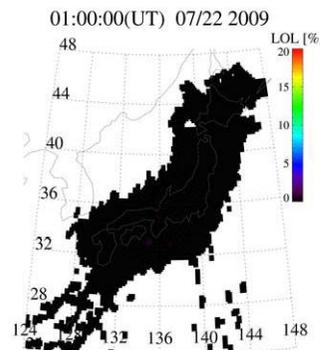
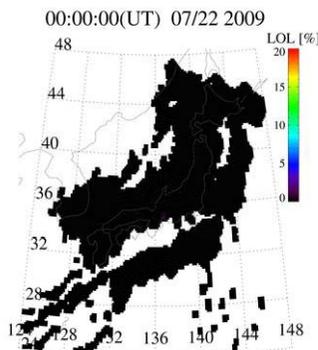
2009
Jul 20



Jul 21



Jul 22
(日食)



観測結果のまとめ：全電子数変動・イレギュラリティ

- **GPS全電子数変動成分**：60分、30分、15分以下の全電子数変動マップでは、皆既日食帯に近い日本南西部において、日食に対応した全電子数の低下はみられるが、日食に対応する特徴的な波動現象は観測されなかった。
- **電離圏イレギュラリティ**：皆既日食帯に近い日本南西部において、日食時にROTI増大（数10kmスケールの電離圏擾乱に対応）が見られるが、日食前にも見られるため、対応関係は不明。
- **GPS信号ロック損失**：日食前後でロック損失率に変化は見られない。（数100mスケールの電離圏イレギュラリティによる）強いシンチレーションはほとんどなかったと考えられる。

ディスカッション：日食に伴う波動現象の有無

過去に報告された日食に伴う波動現象

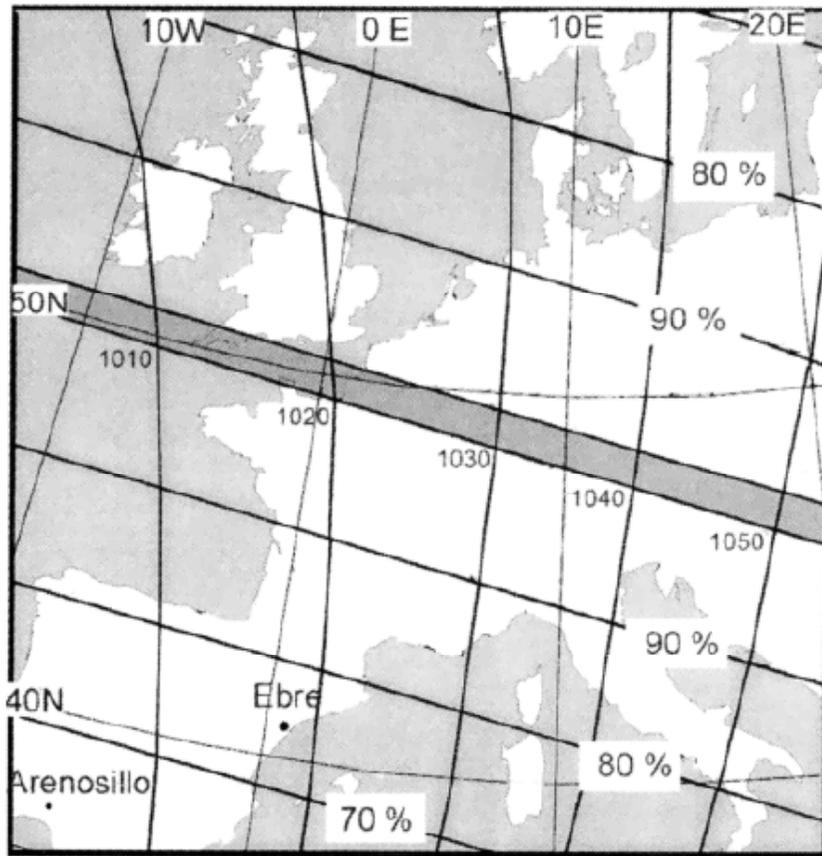


Figure 2. Path of the solar eclipse of August 11, 1999, at ground.
[Altadill et al., JGR, 2001]

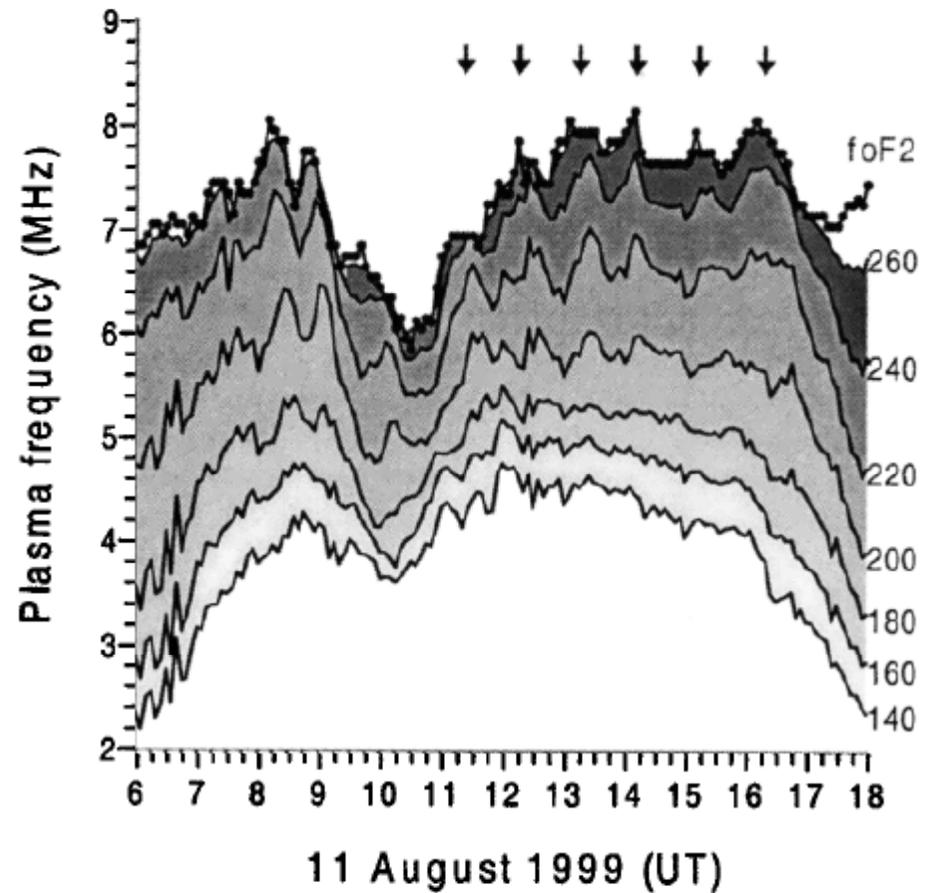
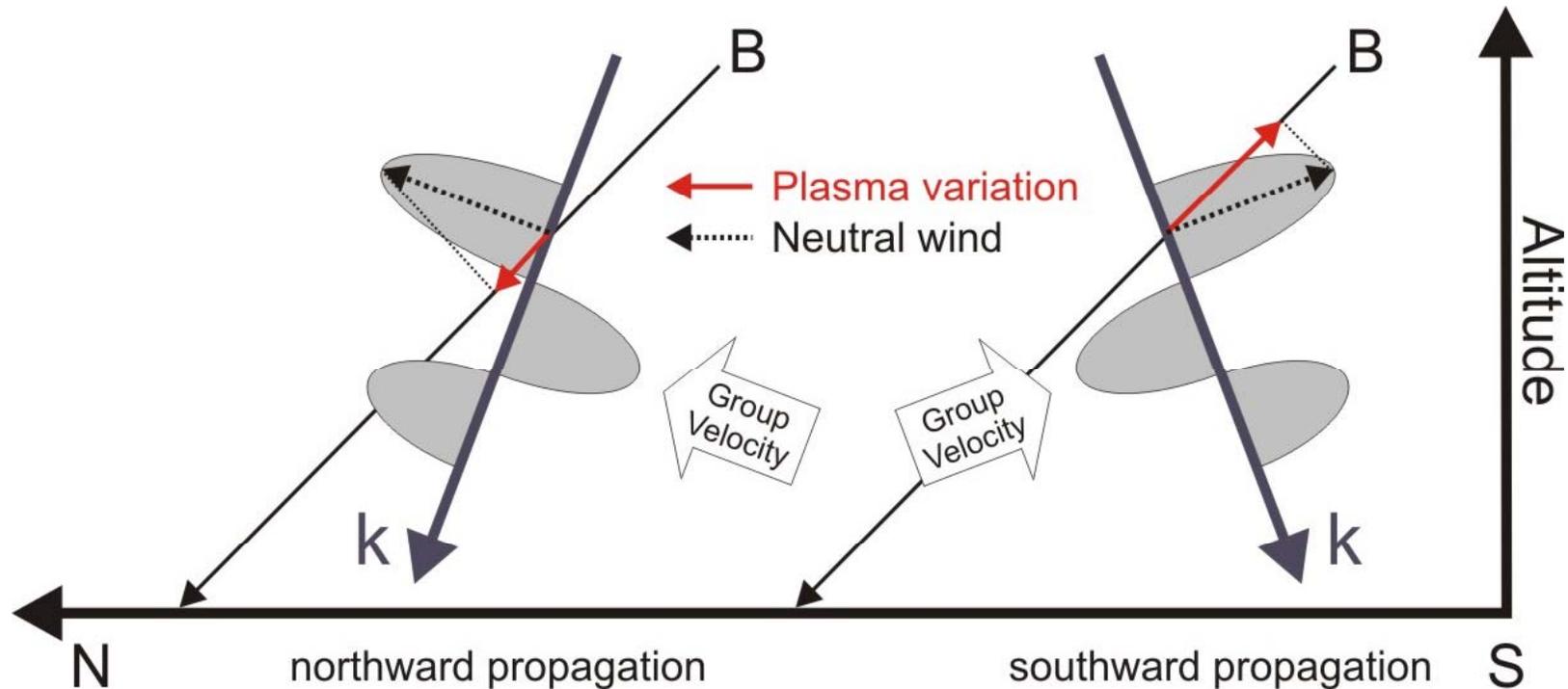


Figure 3. (top) Plasma frequency at indicated true altitude and f_oF_2

- 日食に伴って励起されたと考えられている波動現象は、日食前にも観測されている。

ディスカッション：日食に伴う波動現象の有無

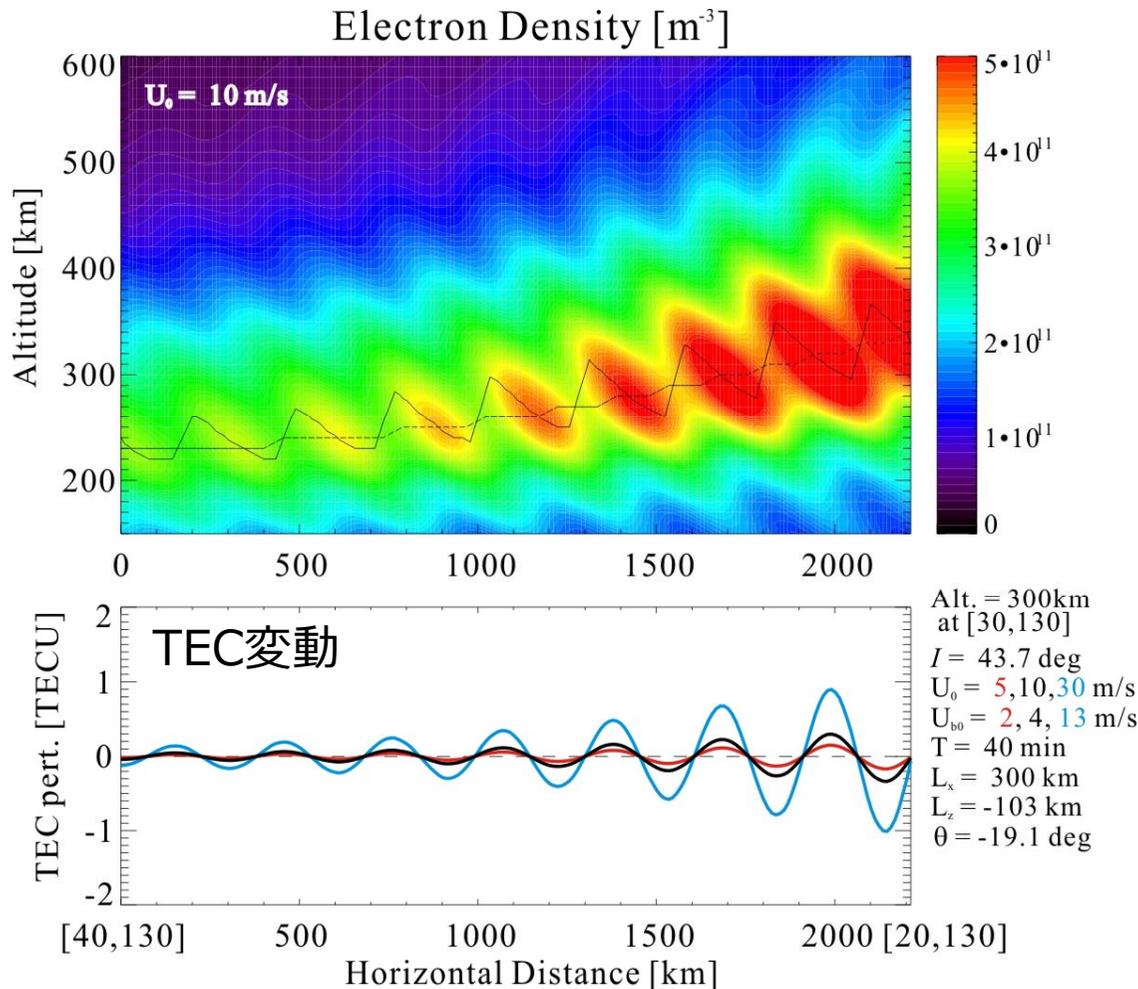
北向き・南向き伝搬する大気重力波による電離圏プラズマの変動



- 南向き伝搬の大気重力波に比べ、北向き伝搬の大気重力波は、磁力線に沿う電離圏プラズマの変動が小さい。
→ 北向き伝搬する大気重力波は励起されたとしても、電離圏変動として観測されていない？

ディスカッション：日食に伴う波動現象の有無

北向き伝搬の大気重力波に電離圏電子密度・全電子数変動のモデル計算



- Hooke [1968]モデルを利用した、北向き伝搬する大気重力波による電離圏電子密度、及び全電子数変動。
- インプットした重力波：
水平波長 = 300km
周期 = 40分
中性風振幅 = 5, 10, 30 m/s
※波長・周期は、夏の日出後に日本で見られるDusk MSTIDの統計値 [Kotake, 2007]
- 北向き伝搬する大気重力波の中性風振幅が5-10 m/s程度でも、全電子数変動として観測可能。
→ 日食起源の波動はあったとしても非常に弱いか、F2領域までは伝搬していない。

まとめ

- 情報通信研究機構(NICT)では、2009年7月22日に日本で観測された日食イベントに合わせ、国内イオノゾンデ（稚内、国分寺、山川、沖縄）の電離圏特別観測と、国土地理院のGPS受信機網（GEONET）の準リアルタイムデータを利用した全電子数（TEC）観測を行った。
- 日食に対応して、日本全域で全電子数が低下していることが観測され、シミュレーションによる予測とも定性的には一致している。一方、日食起源と考えられる特徴的な波動現象や電離圏不規則構造は観測されなかった。
- 今回のイベントに際して行ったリアルタイムTEC変動、ROTI、GPSロック損失の観測は、現在行われているNICTのリアルタイムTEC観測と合わせて今後も続けていく。また、過去のデータについても解析を進め、プラズマバブルやSED等の強い電離圏擾乱現象のGPS測位への影響を調べて行く予定である。