

マルチ GNSS によるスポラディック E 層の観測
その生成から消散まで

02172010 藤本達也

2021 年 1 月 28 日

目次

1	はじめに	2
1.1	Sporadic E 層とは	2
1.2	Sporadic E 層の成因	3
1.3	Sporadic E 層の特徴	4
1.4	微細構造について	5
1.5	Sporadic E 層の観測	6
1.6	GPS-TEC 法による E_s 層の観測	8
2	観測・解析手法	11
2.1	GNSS	11
2.2	GEONET	13
2.3	GNSS-TEC 法	15
2.4	GPS 単独とマルチ GNSS の比較	18
3	観測結果	19
3.1	観測イベントについて	19
3.2	2018 年 8 月 1 日の E_s 層	19
3.3	2019 年 6 月 7 日の E_s 層	24
3.4	2019 年 7 月 4 日の E_s 層	28
4	考察	33
4.1	E_s 層の移動について	33
4.2	形状と TEC 強度の変化	35
4.3	QP TEC とパッチについて	35
5	まとめ	36
6	謝辞	37

1 はじめに

ここでは観測対象である Sporadic E 層 (E_s 層) について解説する.

1.1 Sporadic E 層とは

地球の大気上部では太陽の紫外線により大気分子, 原子が部分的に電離されプラズマ状態になった電離圏が存在する. 図 1 は地球大気の電子密度の高度変化を示したものである. 電子密度は高度方向に相対的に高い電子密度を持つ電離層があり, 下部から D, E, F 層と呼ばれている. またこれらの電離層が生じる高度をそれぞれ D, E, F 領域と呼ぶ. 高度 60-90 km の D 領域に生じる D 層は再結合速度の速い分子イオンが中心のため, 太陽紫外線が消える夜間にはほぼ消滅する. 高度 90-150 km の E 領域に生じる E 層は, N_2 や O_2 分子が紫外線により電離され, NO^+ や O_2^+ を主成分として生成される. 夜間は電子密度が 1/100 程度まで減少する. 高度 150-500 km の F 領域の成分は, 高度 300 km までは O^+ イオンが中心だが, 高度と共に He^+ イオン, H^+ イオン等の軽元素イオンが中心となる. F 領域の電離層は 2 つ発生し, 高度 150-200 km に F_1 層, 高度 200 km 以上に F_2 層が発生する. F_1 層は太陽放射による光化学過程が支配的なため, 昼間と夜間では密度が大きく異なる. 一方, F_2 層の高度では中性大気の密度が低く, 太陽放射によるプラズマの生成, 消失が減少するため, 昼夜による変化は生じていない.

Sporadic E 層 (E_s 層) とは, その名の通り E 領域で散発的には発生する電離層のことである. E_s 層が発達すると通常は突き抜けるはずの VHF 帯の電波を反射するようになる. 以前はテレビ放送 (地上アナログ放送) が VHF 帯を使用していたため, 電波障害を引き起こす現象として知られていた. 現在のテレビ放送 (地上デジタル放送) は UHF 帯を使用しているため, 影響は生じなくなっている. しかし, 現在でも VHF 帯を使用する

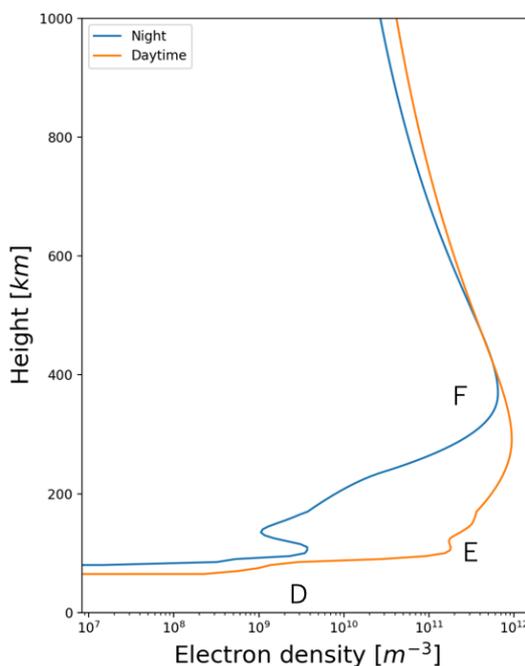


図 1 電子密度の鉛直構造 (IRI, 2016)

FM 放送などは影響を受けることになる。例えば、日本では通常受信することのできない中国や韓国の FM 放送が受信されるといったことが生じる。

1.2 Sporadic E 層の成因

E_s 層の発生には Wind-shear 理論と E 領域の金属イオンの存在が大きく関わっていると考えられている (Whitehead. 1989)。

1.2.1 Wind-shear 理論

E_s が発生するメカニズムは、Wind-shear 理論で多くの場合説明できる。この理論は中性大気の水平運動に鉛直方向の傾度 (shear) が存在すると、イオンが地球磁場の影響を受け収束し E_s 層が形成されるというものである。図 2 はそのメカニズムを模式的に現した図である。風があるとイオンも中性大気分子と衝突し、風と同じ方向に移動する。しかし、地球磁場の水平成分が存在するため、ドリフト運動をすることになる。その結果、イオンは西向きの風に対しては斜め下向き、東向きの風に対しては斜め上向きに移動し、その中間に集積する。電子の場合は、中性大気との衝突周波数がジャイロ周波数よりもずっと低いためその運動は磁力線に束縛されている。しかし、濃集したイオンに電子はひきつけられ、磁力線にそって電子が鉛直方向に移動するため E_s 層が形成される。

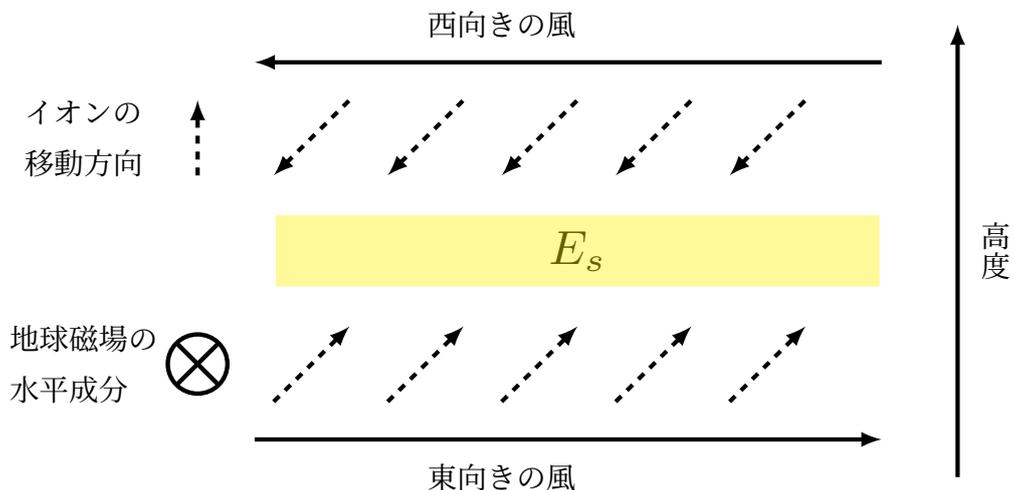


図 2 Wind-shear 理論の模式図

1.2.2 金属原子イオンについて

E_s 層の発生条件には前節で述べた Wind-shear 理論以外にも金属原子イオンの存在があげられる。 E_s 層のようにプラズマの密度が高くなると、イオンと電子の再結合が進む。そのため E 領域を主に構成するイオンである NO^+ や O_2^+ のような分子イオンでは、再結合速度が速いため高い密度を維持することができない。そのため、再結合速度の遅い金属原子イオンが必要となる。観測データでも E 領域において、 Mg^+ や Fe^+ などの金属原子イオンが観測されている。この高度の金属原子イオンは流星により供給されている。流星物質が大気圏に突入することにより、プラズマ化し金属イオンが発生する。

1.3 Sporadic E 層の特徴

Sporadic E 層の発生を正確に予測することは困難である。しかし、その発生は季節的、地理的な統計的特徴がみられる (Chu *et al.* 2014)。図 3 は GPS-RO 法で観測された E_s 層の発生率を示したものである。この図から地理的特徴、季節的特徴がわかる。 E_s 層の発生頻度の地理的特徴としては中緯度で高く、極域や赤道地域（地磁気赤道）では低くなっている。この原因は極域では地球磁場成分の水平成分が弱いため、イオンが鉛直方向に移動しないためである。一方赤道域では磁力線が水平に近く、磁力線に束縛された電子が鉛直方向に移動できないからである。

E_s 層の発生頻度の季節的特徴は北半球、南半球ともに夏季にピークを持つということである。この原因としては高度 100 km で卓越している潮汐風の強さが冬季に比べて夏季に強くなるからと考えられている。

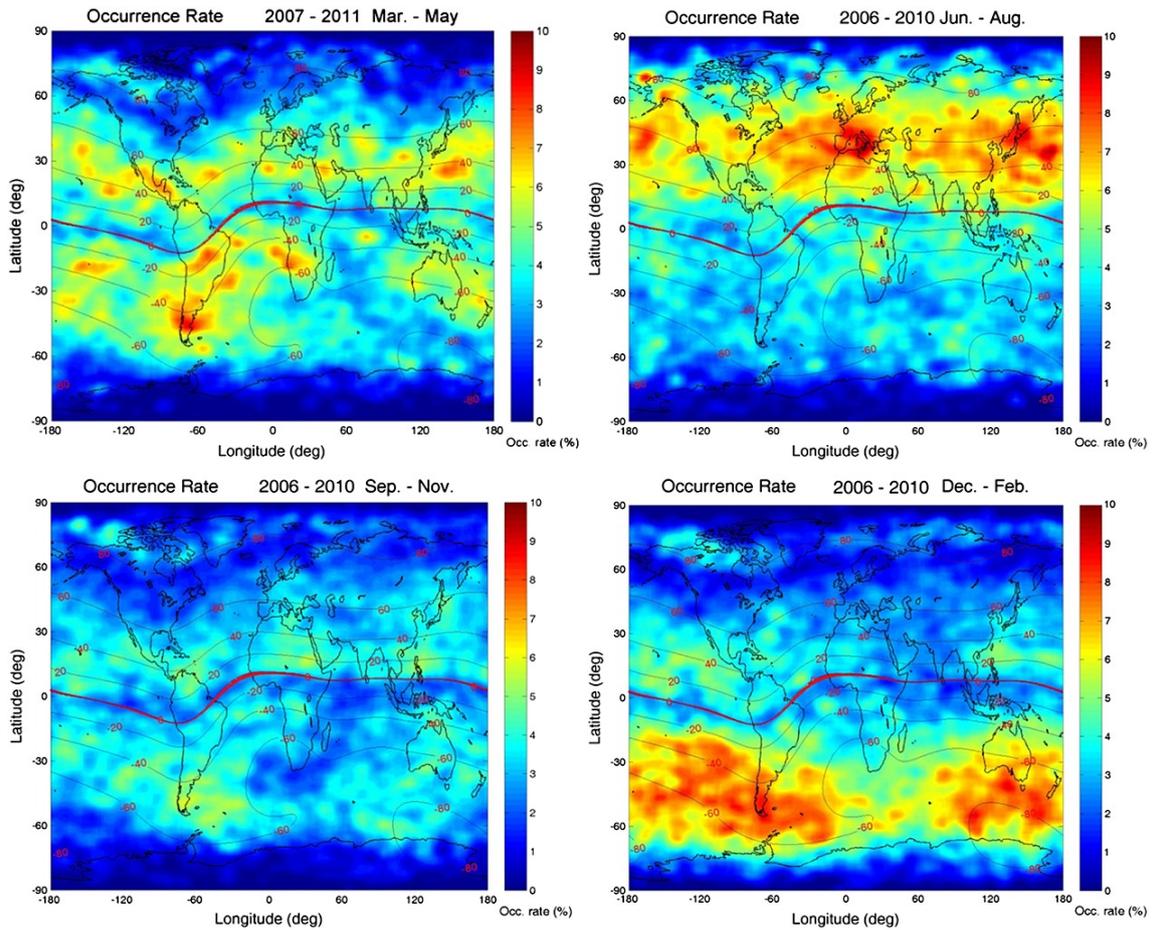


図3 季節ごとの E_s 層の発生率 [Chu *et al.*, 2014]. E_s 層は夏半球に多く発生している。また、一年を通して、磁気赤道と極域では E_s 層の発生は非常に少ない。

1.4 微細構造について

E_s 層のレーダを用いた観測により、準周期的 (Quasi-periodic: QP) なエコーが観測されている (Maruyama, 1995)。これは E_s 層の不均一な小規模な構造により QP エコーが発生していると考えられている。この構造が生じる原因としては大きく3つの説が提唱されている。一つ目は、大気重力波により生じるという説である (R. F. Woodman *et al.*, 1991)。大気重力波とは、重力による復元力で規定される中規模の大気波動のことである。この波により本来均一で水平な E_s 層が歪められるとされる。二つ目は、中性風シアーによる Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定により、小規模構造が形成するという説である (Bernhardt, 2002)。KH 不安定とは密度・速度の異なる流体の境界面に発生する流体力

学的な不安定のことである。 E_s 層が形成される場合は鉛直シアが存在するので発生しやすい条件が揃っているといえる。 KH 不安定により発生した billow とよばれる境界面に周期的に発生する渦により E_s 層が変形されるといった説である。 三つ目は E_s 層不安定性である (Cosgrove and Tsunoda, 2002)。 北西 - 南東方向に伸びた不均一構造ができ、 南西方向に移動するといった特徴がある。

1.5 Sporadic E 層の観測

ここでは代表的な E_s の観測手法について簡単に紹介する。

1.5.1 イオノゾンデによる観測

電離圏は古くからイオノゾンデ (電離圏垂直観測) を用いて観測が行われてきた。 電離圏は電子密度に応じた周波数の電波を反射するという性質を持つ。 そのため、地上から周波数を変化させながら電波を放射し、反射し帰ってきた電波 (エコー) を観測することで電子密度の鉛直構造を知ることができる。 この反射エコーの観測結果を縦軸に見掛けの高度、横軸に周波数を取り、信号強度をコンターで表す図をイオノグラムという。 E_s 層の観測には f_oE_s と呼ばれる指標が用いられる。 これはイオノグラム上の E 領域でほとんど連続した E_s トレースの正常波成分の最も高い周波数と定義され、 E_s 層で反射される最も高い周波数 (臨界周波数) である。 情報通信研究機構 (National Institute of Information and Communications Technology: NICT) では $f_oE_s \geq 4.5\text{MHz}$ の場合、 E_s 層が発生しているとしている。

図 4 は国分寺局にて 2018 年 6 月 4 日 14:00(JST) に観測されたイオノグラムである。 高度 100 km 付近に発生した E_s 層によるエコーが 20 MHz 付近まで見られる。 また、高度 200 km 付近に見られるエコーは E_s 層で反射した電波が地表で反射され再び観測されたものである。

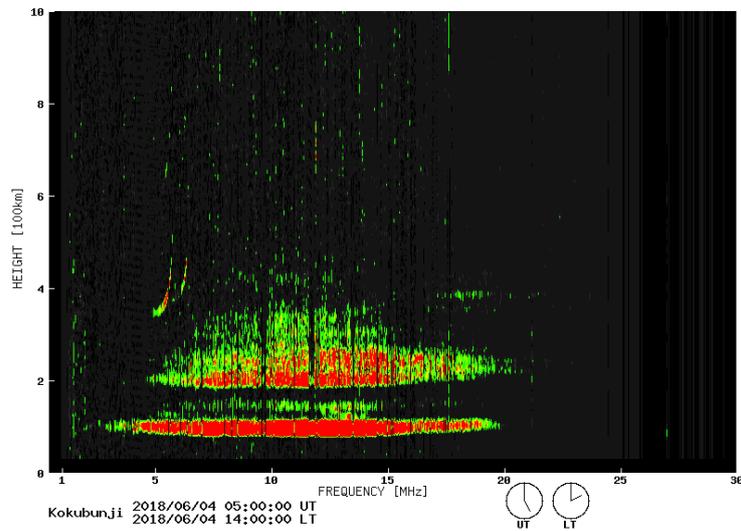


図4 2018年6月4日の国分寺局でのイオノグラム (NICT ホームページより).
 f_oE_s は 20 MHz ほどと読み取れる.

1.5.2 GNSS 掩蔽法による観測

GNSS 掩蔽法 (Global Navigation Satellite System Radio Occultation: GNSS-RO) とは, GNSS 衛星が送信した電波が地球大気を貫いて到達することを利用して電離圏や大気の鉛直構造を解析する手法である (図5). COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) では地球低軌道 (low Earth orbit: LEO) に GNSS からの電波を受信する衛星を配置し, 全球を観測可能としている. GNSS-RO 法を用いた観測では鉛直分解能は良いが, 水平分解能は悪いという特徴がある. また, 観測点は多数とることができるが, 特定の場所のある時刻のデータを取得することが難しい.

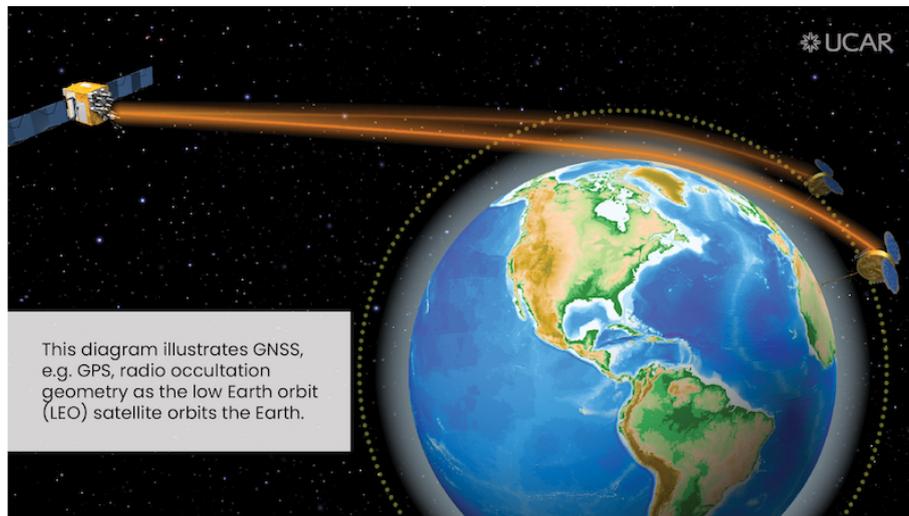


図5 GNSS-RO法のイメージ

(URL:<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/gnss-radio-occultation/>)

1.5.3 SAR衛星を用いた観測

E_s 層はSAR (Synthetic Aperture Radar) 衛星を用いても観測されている。Furuya *et al.* (2017) ではだいち/だいち2号 (Advanced Land Observation Satellite: ALOS/ALOS2) のデータから、日本上空の E_s 層を観測した。SAR衛星は一つの周波数を用いて観測をおこなっているため、後述するGNSS-TEC法のように2つの周波数を用いて電子数を推定することができない。しかし、SSM (Split-Spectrum Method) を用いると、実際に2つの周波数で観測したような画像を得ることができる。この手法を用いることで E_s 層の観測に成功している。SARによる観測では、非常に解像度が高く観測できる。しかし、衛星は地球を周回しており、 E_s 層を観測できるタイミングは限定的である。

1.6 GPS-TEC法による E_s 層の観測

GPS-TEC法とは詳しくは次節で解説するが、測位衛星の電波を用いて衛星と受信局の全電子数 (Total Electron Content: TEC) を観測する手法である。日本では緻密なGNSS観測網により衛星からの電波が常時取得されているため、電離圏の観測に有用である。Maeda and Heki (2014, 2015) ではGPS-TEC法を用いて E_s 層の水平構造とその動態を明らかにした。図6はGPS-TEC法で得られた E_s 層である。また、TECの時系列変化からQPエコーのような準周期的な変化 (QP TEC) も観測されている (図7)。この他にもGPS-TEC法を用いて日本上空の E_s 層の3Dトモグラフィーもおこなわれて

いる (Muafiry *et al.*, 2018) .

本研究では、GPS だけでなく、マルチ GNSS (GPS, GLONASS, QZSS) を用いることで、より詳細な E_s 層の生成から消失までの研究を行った。

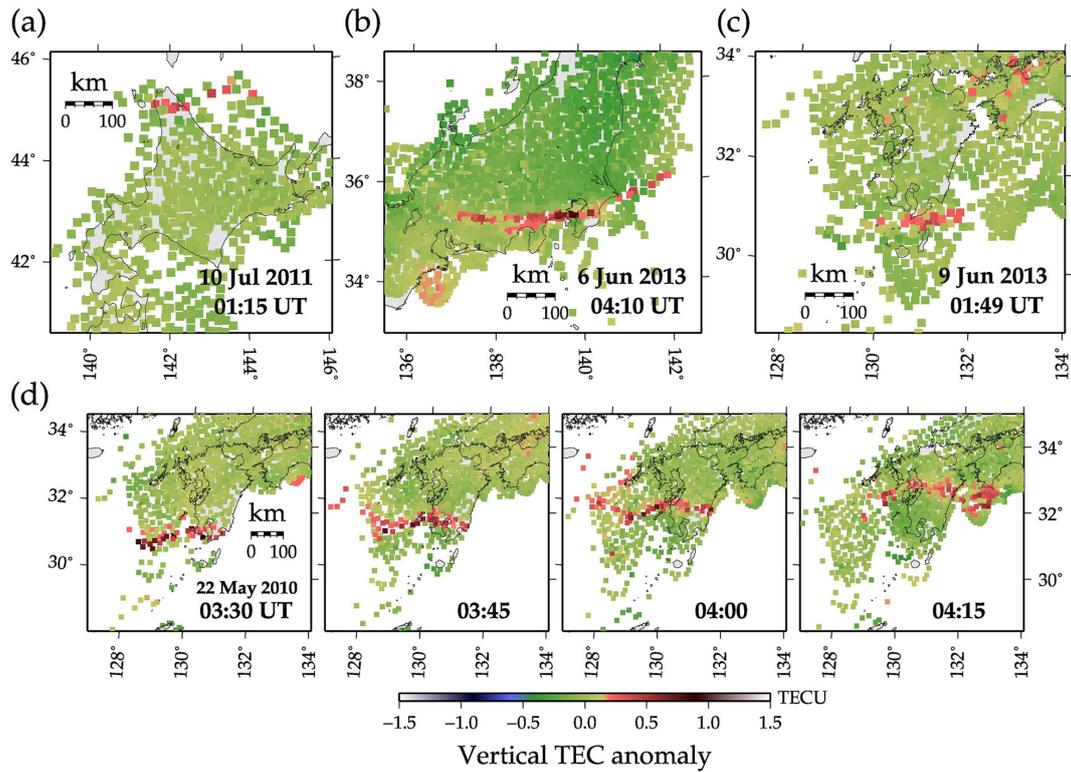


図6 GPS-TEC法で得られた E_s 層 : a:稚内, b:国分寺, c:山川, d:北-北東方向へ移動する E_s 層 [Maeda and Heki, 2015]

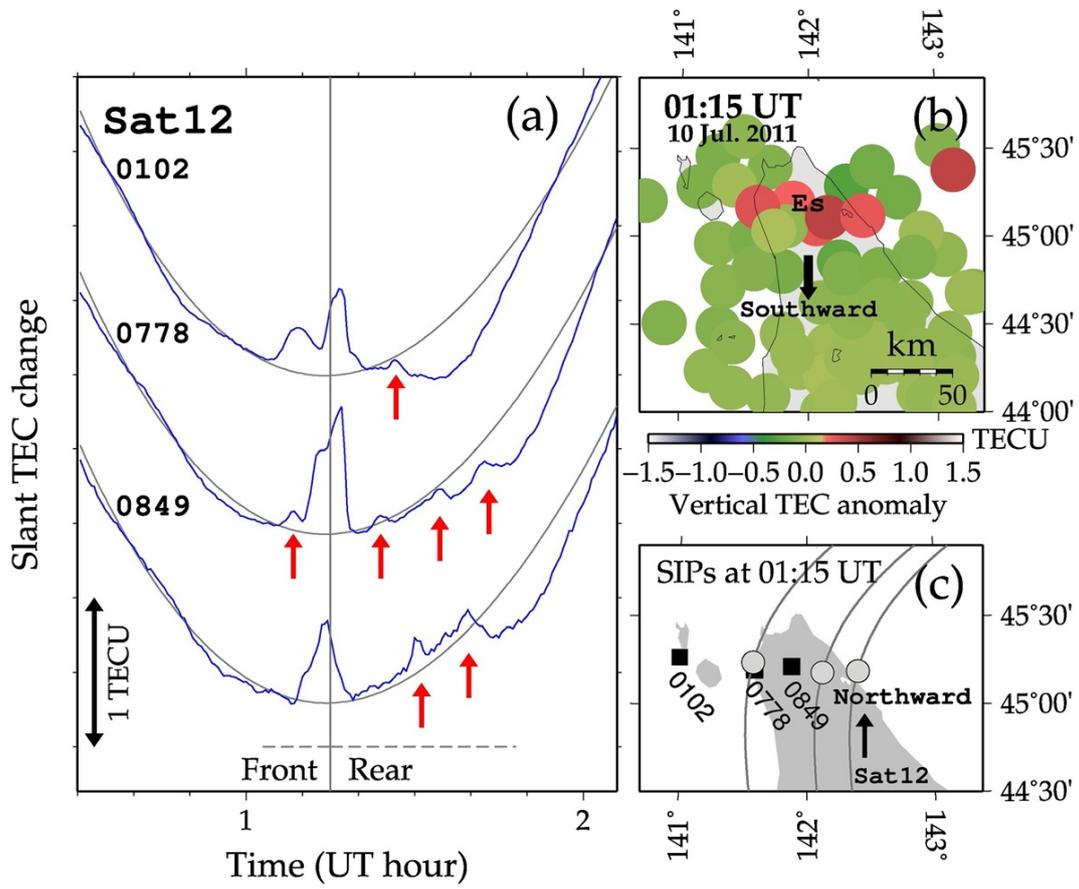


図7 TEC 時系列変化で得られた QP TEC [Maeda and Heki, 2015]

2 観測・解析手法

ここでは、解析に用いた GNSS と GEONET、電離圏を観測する手法である GNSS-TEC 法についての解説をする。

2.1 GNSS

2.1.1 GNSS とは

全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) とは地球を周回する複数の測位衛星から発信された電波を地上局で受信し、その搬送位相の変化から測位を行うシステムの総称である。代表的なシステムとしては、米国の全球測位システム (Global Positioning System: GPS)、ロシアの GLONASS、欧州連合 (EU) の Galileo、中国の北斗 (BeiDou) があげられる。また、これらのシステムを補完する目的に地域を限定した測位システムも存在し、日本の準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System: QZSS) やインドの NAVIC (NAVigation Indian Constellation) がある。

2.1.2 GPS

GPS(Global Positioning System) とはアメリカが開発・運用している GNSS である。1993 年から運用されている。

2020 年 11 月現在では軌道上に 32 機 (運用中 31 機) の衛星が配置されている。GPS は軌道高度 22000 km、軌道傾斜角 55° 、周期 12 時間の軌道を用いている。それぞれ傾きの異なる 6 つの軌道面に 4 機ずつ衛星が配置されている (図 8)。

衛星から送信される電波の周波数は、L1 (1575 MHz)、L2 (1227 MHz)、L5 (1176 MHz) が利用されている。本研究で用いたのは L1、L2 である。衛星からの通信には符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) という方式が採用されている。この方式は同一周波数帯で複数の通信を行う技術である。GPS の場合には搬送波を擬似ランダムノイズ (Pseudo Random Noise: PRN) により変調している。PRN は各衛星により決まっているので、受信機は各衛星を識別できる。

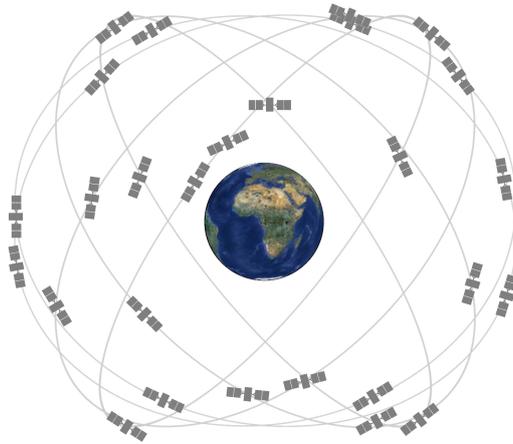


図8 GPS衛星の軌道イメージ
(URL:<https://www.gps.gov/systems/gps/>)

2.1.3 GLONASS

GLONASSとはロシアが開発・運用しているGNSSである。1982年に最初の衛星が打ち上げられ、1995年に一度完成した。しかし、1990年代後半になるとソ連崩壊の影響もあり、急速に衛星の数を減らした。しばらくの間進展がなかったが、2002年にロシア連邦政府により新しいプロジェクトが始まり衛星が打ち上げ始められ、再び24機体制で運用されている。(2020年12月合計30機、運用中23機)

GLONASSが使用している軌道は軌道高度19100km、軌道傾斜角64.8°、周期11時間15分44秒である。それぞれ傾きの向きが異なる3つの軌道に、1軌道あたり8機の衛星が配置され、合計24個の衛星によりシステムが構成されている(図9)。

衛星から送信される電波の周波数帯はL1、L2及びL3(1202MHz)を用いている。本研究で用いたのはGPS同様、L1とL2である。GLONASSとGPSの大きな違いはそれぞれ個々の衛星の識別方法である。GPSでは前項で述べたように各衛星から通信にはCDMAを使用し、衛星ごとの符号で受信機が衛星を識別している。一方、GLONASSでは周波数多重分割多元接続(Frequency Division Multiple Access: FDMA)という方式を採用している。(L3はCDMAを採用)これは衛星ごとに送信する電波の周波数を少しずつ変えることでデータを送信しており、これにより衛星を識別できる。GLONASSの送信する周波数(L1,L2)はチャンネル番号kを用いると以下のように算出できる。(k = -7...+12)

$$L1 : 1602 \text{ MHz} + k * 9/16 \text{ MHz}$$

$$L2 : 1246 \text{ MHz} + k * 7/16 \text{ MHz}$$

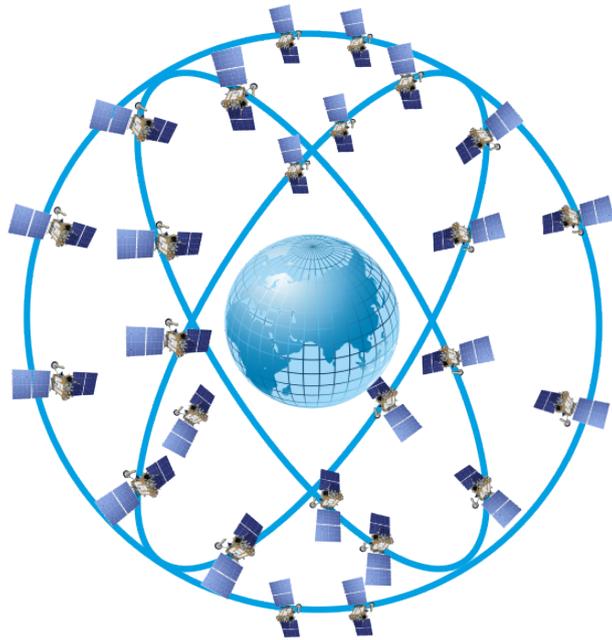


図9 GLONASS 衛星の軌道イメージ
(URL:<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>)

2.1.4 QZSS

準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System: QZSS) は日本が開発・運用している GNSS である。GPS 及び GLONASS は全地球衛星系 (Global Constellation) と呼ばれ利用可能範囲が全球であるが、QZSS は地域衛星系 (Regional Constellation) と呼ばれ利用可能範囲が限定的なもの (日本及びアジア太平洋地域向け) になっている。2010 年 9 月にみちびき 1 号機が打ち上げられ、2018 年 11 月から 4 機体制で運用が開始されている。また、宇宙基本計画では 2023 年から 7 機体制で運用が開始される予定である。

QZSS は 3 機の準天頂軌道衛星と 1 機の静止軌道衛星の合計 4 機の衛星から構成されている。衛星から送信される電波の周波数帯は L1, L2, L5, L6 (1279 MHz) を用いている。本研究では L1, L2 を用いた。衛星の通信方式は GPS と同様の CDMA を用いている。

2.2 GEONET

GNSS 連続観測システム (GNSS Earth Observation Network System: GEONET) とは、全国約 1,300 ヶ所に設置された電子基準点と GEONET 中央局 (茨城県つくば市) からなる観測システムである。20~25km 程度の間隔の三角網を目安に基準点が設置されて

おり、GNSS を用いた観測システムでは非常に緻密な観測網となっている。本研究では国土地理院で公開されているデータを用いた。

2.2.1 RINEX データについて

国土地理院で公開されている GNSS の観測データは RINEX ((Receiver Independent Exchange Format) が用いられている。このデータ形式は異なる機材で取得された GPS の観測データを円滑に処理するために開発された共通フォーマットである。RINEX v.2 では GPS, GLONASS のみ正式対応だったが、RINEX v.3 からはマルチ GNSS に対応した。(v.3.00 では Galileo のみ, v.3.02 から QZSS 等に対応) RINEX データファイルは主に 3 つのファイルから成り立っている。観測データファイル (Observation Data File), 航法データファイル (Navigation Message File), 気象データファイル (Meteorological Data File) である。RINEX データファイルの命名規則は次のようになっている。

ファイル名形式 : ssssdddf.yyt

ssss : 受信局番号
ddd : 年初からの通算日 (1-)
f : 観測番号 (24 時間分は 0)
t : ファイルタイプ
O : 観測データ
N : 航法データ
M : 気象データ

また、国土地理院で公開されている RINEX v.3.02 ファイルでは航法データのファイルタイプは GNSS ごとに異なる。

g : GLONASS
l : Galileo
n : GPS
q : QZSS

本研究では観測データファイル、航法データファイルを用いた。

2.3 GNSS-TEC 法

本節では前節で説明した GNSS を用いて TEC を算出する手法について述べる。

まず, GNSS-TEC 法で用いられる用語について説明する. TEC (Total Electron Content: 電離圏全電子数) とは衛星と受信機の視線方向に沿って存在する電子数を積分した値のことである. 単位は TEC Unit ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrons/m}^2$) で表現される. 本研究では特に衛星視線方向の TEC を STEC (Slant TEC), 鉛直方向に換算した TEC を VTEC (Vertical TEC) と表記する (図 10). また, E_s 層は上下に幅を持っているが, 便宜的に最も電子密度の高い高度に薄い層 (本研究では 100 km) を仮定し, 衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルがその層と交わる点を IPP (Ionospheric Penetration Point), その地表への投影点を SIP (Sub-ionospheric Point) という.

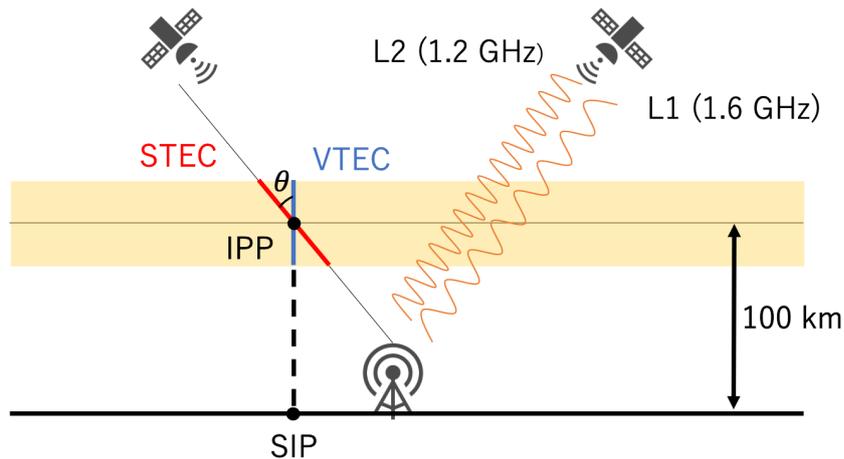


図 10 GNSS-TEC 法の模式図

GNSS 衛星から送信された電波は, 対流圏や電離圏で遅延が生じる. 電離圏遅延の場合, 遅延は搬送波の振動数の逆 2 乗に比例するという分散性を持つので経路中の電子数を推定することができる.

STEC は受信機から衛星への視線方向に沿って電子数密度 N_e を積分したものである. 経路 s を用いると

$$STEC = \int N_e ds \quad (2.1)$$

となる. STEC を導出するために電離圏の屈折率について考える. 電離圏の屈折率 n は次

のように示される.

$$n = 1 + \frac{N_e q_e^2}{2\varepsilon_0 m_e (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.2)$$

ε_0 :誘電率

m_e :電子質量

q_e :電子の電荷

ω_0 :媒質中で束縛される電子の共鳴角振動数

ω :外から媒質中に入る電磁波の角振動数

電離圏では電子は自由電子として存在するので $\omega_0 = 0$ である. 屈折率 n_p は

$$n_p = 1 - \frac{N_e q_e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2} \quad (2.3)$$

と表せる. ここで $\omega = 2\pi f$ を代入すると

$$n_p = 1 - \frac{a}{f^2} \left(a = \frac{N_e q_e^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e} \right) \quad (2.4)$$

となる. a は正の量であり, 屈折率は1より小さくなるので, 群速度は光速より遅くなる
ことがわかる. ここでマイクロ波が電離圏の影響を受けることによる遅延について考える.
衛星から受信局までの距離は電離圏遅延の影響を受け, 真空中を伝搬する場合に比べて
見かけの距離の差 ΔS が生じる. ΔS を n_p を使って表すと次のようになる.

$$\Delta S = \int (n_p - 1) ds \quad (2.5)$$

上記の式へ (2.1),(2.4) を代入すると次のようになる.

$$\Delta S = - \int \frac{a}{f^2} ds \quad (2.6)$$

$$= - \frac{b}{f^2} \int N_e ds \quad (2.7)$$

$$= - \frac{b}{f^2} \text{STEC} \quad (2.8)$$

ここで2種類の周波数で観測した場合を考える. 2つの周波数をそれぞれ f_1, f_2 とおくと
それぞれの ΔS は次のようになる.

$$\Delta S_1 = - \frac{b}{f_1^2} \text{STEC} \quad (2.9)$$

$$\Delta S_2 = - \frac{b}{f_2^2} \text{STEC} \quad (2.10)$$

上記の2つの式の差をとって、変形すると

$$\text{STEC} = \frac{\Delta S_1 - \Delta S_2}{b} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.11)$$

となる。

本研究で用いた GNSS の観測生データ (RINEX データ) から TEC がどのように取り出されるか説明する。RINEX データには2種類の周波数 L1, L2 の位相データが含まれる。位相にそれぞれの波長をかけて単位をラジアンから長さに変換したものを L_1, L_2 とする。この差をとったものと L_4 とする。

$$L_4 = L_2 - L_1 \quad (2.12)$$

また、 L_4 は $\Delta S_1, \Delta S_2$ を使うと、

$$L_4 = \Delta S_2 - \Delta S_1 \quad (2.13)$$

となる。これを用いると (2.11) より b へ適切な値を代入すると STEC は次のように表現できる。

$$\Delta \text{STEC} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L_4 \quad (2.14)$$

位相データには、整数値の不確実性があるため、絶対値に意味はなく、時間変化のみに意味がある。RINEX ファイルに二周波のコード情報が含まれている場合は、それらの差に L_4 を合わせることによって整数値不確実性を除去することができる。さらにそこから、受信機の周波数間バイアスと衛星の周波数間バイアスを除去すれば正しい STEC が得られる。

STEC は仰角の変化により見かけの変化を伴う。VTEC の変化は、実際の電子数の増減を示すため、本研究では VTEC を用いて議論を行った。STEC に視線の電離圏の入射角をかけることで VTEC に換算できる。入射角 θ を使うと VTEC は次のように表せる。

$$\text{VTEC}(t) = [\text{STEC}(t, \theta) - \textit{bias}] \cos \theta \quad (2.15)$$

\textit{bias} は受信機と衛星の周波数間バイアスである。本研究では QZSS の場合は入射角 30° 以内、GPS, GLONASS の場合は入射角 60° 以内の場合は、GIM(全球電離圏図) の値から周波数間バイアスを推定した。その他の場合は VTEC の多項式近似の際に同時に推定した。

本研究では VTEC を用いて電離圏の異常をプロットするために、VTEC の時間変化にモデル曲線をフィッティングし、残差をプロットした。VTEC の多項式近似は次数 k を用

いて次のような式である.

$$\text{VTEC}(t) = \sum_{n=0}^k a_n t^n \quad (2.16)$$

このモデル曲線からの残差 (異常) を対応する SIP ヘプロットした.

2.4 GPS 単独とマルチ GNSS の比較

本節では従来用いられてきた GPS 単独での観測とマルチ GNSS を用いた観測の比較を行う. 前節で述べた GEONET では GPS の他に QZSS, GLONASS, Galileo を観測している. 本研究では GPS, QZSS, GLONASS を用いて解析を行った. 図 11,12 は GPS 単独での観測点とマルチ GNSS での観測点の数の比較である. この図から GPS 単独の場合に比べて, マルチ GNSS を使用した場合は観測点が 2 倍以上になっていることがわかる.

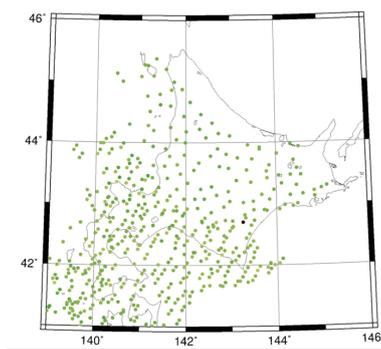


図 11 単独 GPS の SIP

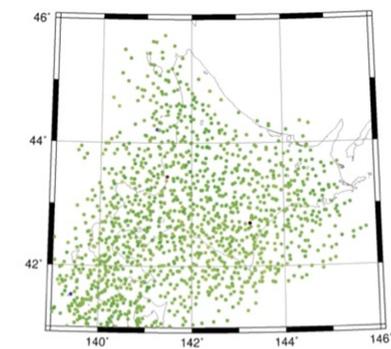


図 12 マルチ GNSS の SIP

3 観測結果

3.1 観測イベントについて

本研究で取り上げる E_s 層は下記の 3 つのイベントである.

- 2018 年 8 月 1 日 1:50-2:50 (UT) 東北
- 2019 年 6 月 7 日 2:30-4:00(UT) 西日本
- 2019 年 7 月 4 日 1:00-3:00(UT) 西日本

各イベントに対して、空間構造の時間変化、緯度方向のみの平滑化、TEC の時系列変化についてプロットした.

3.2 2018 年 8 月 1 日の E_s 層

2018 年 8 月 1 日の 1:50-2:50 (UT) の E_s 層についての観測結果は以下のようになった.

3.2.1 空間構造の時間変化

2018 年 8 月 1 日 1:50-2:50 (UT) の VTEC 異常の空間構造の変化は図 13 のようになった. ノイズの影響を抑えるために平滑フィルタをかけている. VTEC の多項式近似では次数 7 を用いた. 北緯 41 度付近に発生した東西に伸びる異常領域が、南方向へ移動していることがわかる. また、南に移動するにしたがって異常領域が南北方向にも幅を持つようになり、2:35 頃に最大になっている. その後は南に移動しながら、徐々に南北方向の幅は狭くなり消失していくように見える.

3.2.2 緯度方向のみの平滑化

次に、 E_s 層の特徴が認識しやすいように VTEC の空間構造の変化を経度ごとに区切り、緯度方向のみ平滑化した. 図 14 を見ると初期段階では鋭いピークを東西方向に不規則に持つことが特徴として見られる. 時間が経過すると、ピークが滑らかになっていることが伺える. 移動速度は南方向におおよそ 50 m/s である.

3.2.3 TEC 時系列変化

図 15 のように南北に観測局を指定し、TEC の時系列変化をプロットしたのが図 16 である. TEC 異常のピークは最大で 0.5 TECU ほどであり、徐々に北へ移動していること

がわかる。また、異常は複数のピークを持っていることがわかる。

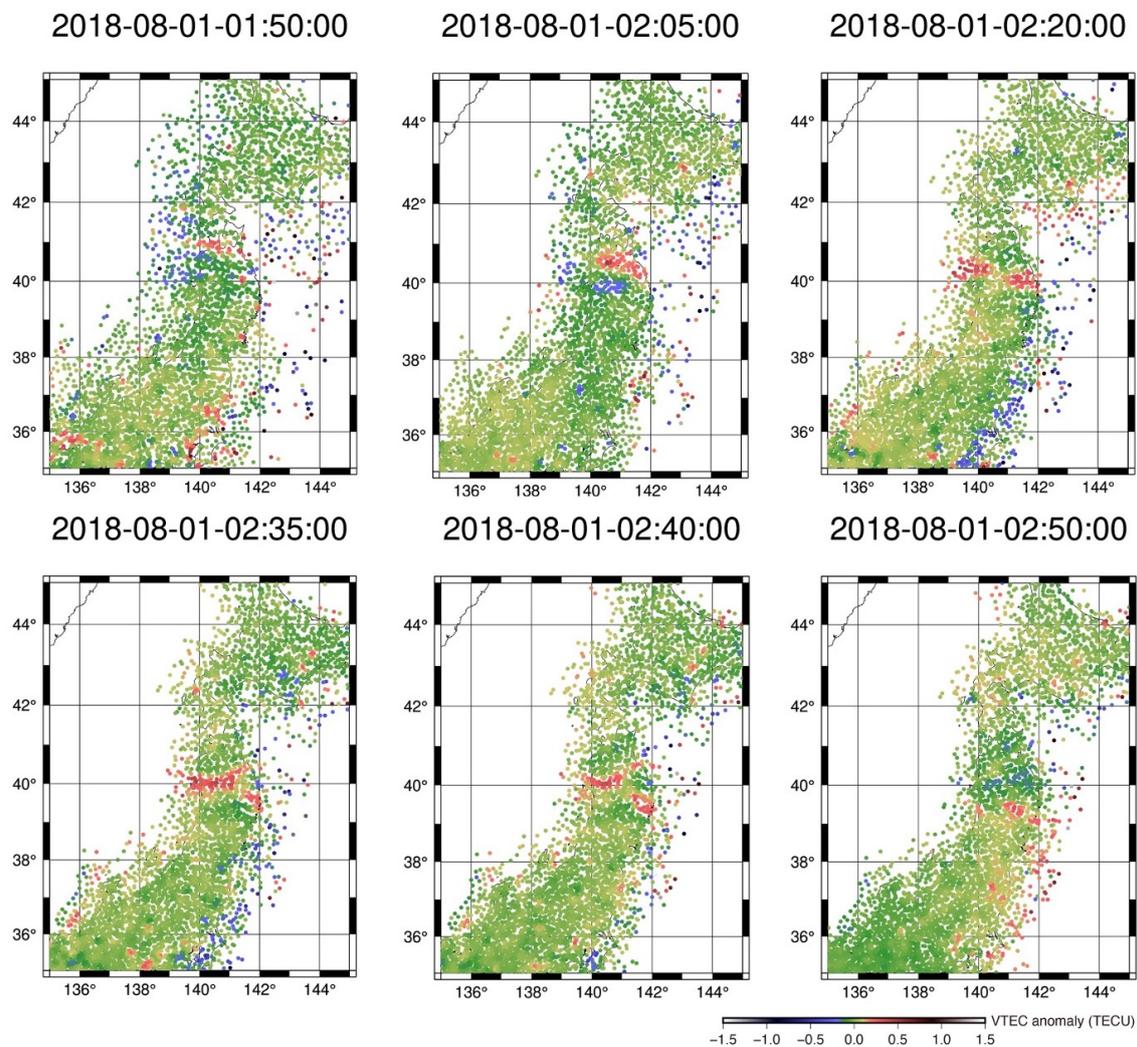


図 13 20180801 E_s 層の空間構造. 使用した衛星番号 (G01, G08, G11, G18, G22, G28, R05, R11, R21, J03)

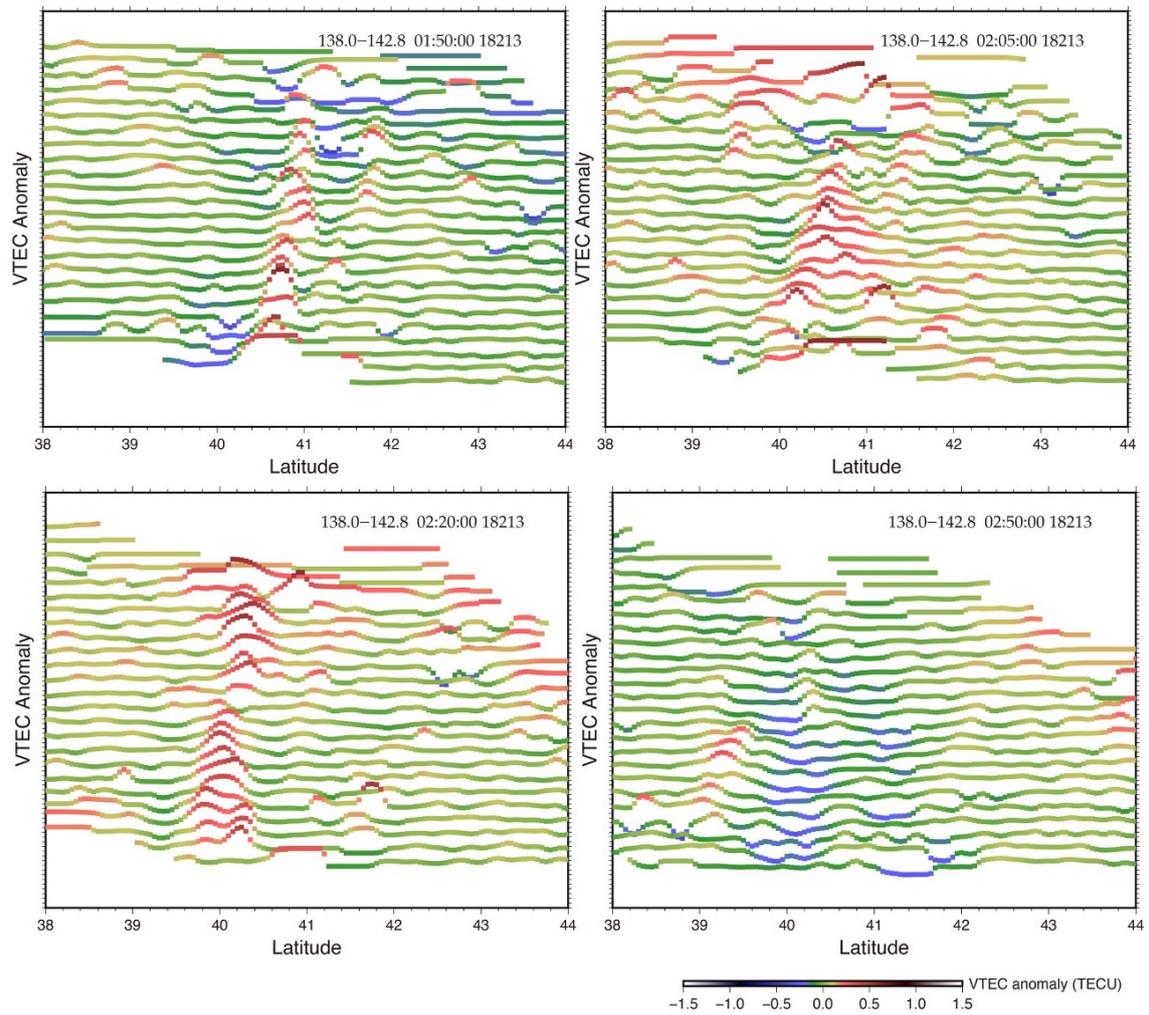


図 14 20180801 E_s 層の経度方向の平滑化. 東経 $138^\circ - 142.8^\circ$ の範囲で 0.2 度ごとに幅 0.2 度で、南北にのみ平滑化した.

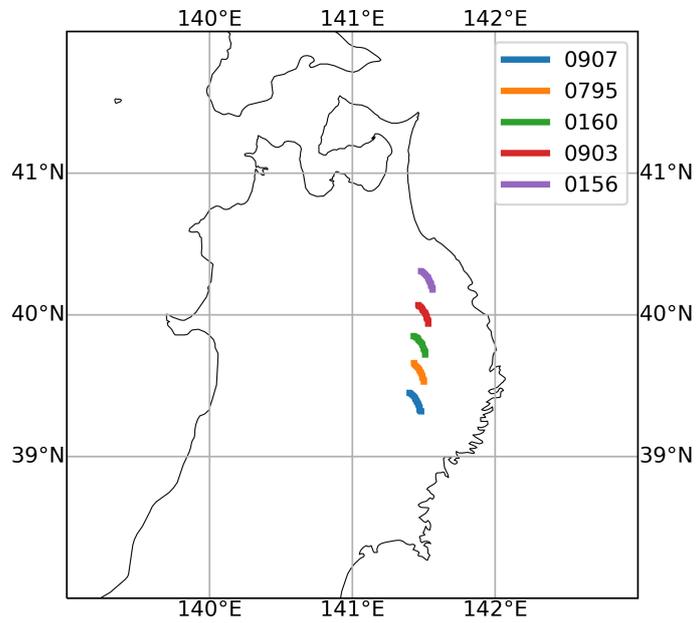


図 15 TEC 時系列変化のプロットに用いたデータの SIP の変化 (1:30-4:00). GEONET において RINEX 名称 0156, 0903, 0160, 0795, 0907 での QZSS 03 番衛星のデータを用いた.

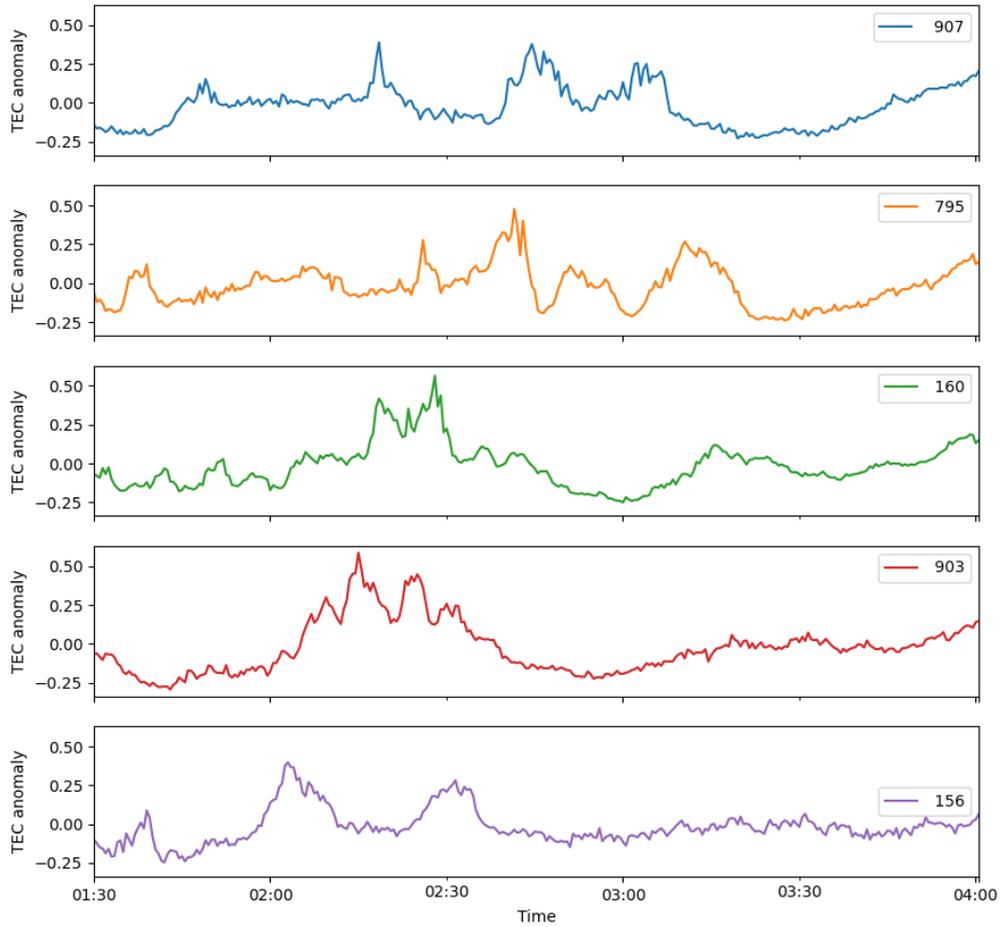


図 16 20180801 E_s 層の TEC 時系列変化. 受信局には GEONET での RINEX 名称 0156, 0903, 0160, 0795, 0907 を選び, QZSS 03 番衛星の TEC の時系列変化をプロットした. 南北に並んだ受信局をプロットし, 北から 0156, 0903, 0160, 0795, 0907 の順である.

3.3 2019年6月7日の E_s 層

2019年6月7日の1:50-2:50 (UT) の E_s 層についての観測結果は以下のようになった。

3.3.1 空間構造の時間変化

2019年6月7日2:40-3:55 (UTC) の VTEC 異常の空間構造の変化は図17のようになった。2:40の図を見ると北緯32°付近に正の異常のパッチが東西方向に並んで出現していることがわかる。このパッチが時間経過とともに徐々に成長し、東西方向に伸びた異常領域を形成している。また、このパッチの成長段階では南西-北東方向に伸長した形になっている。東西方向の伸びは3:20 UT 付近で最大になり550 km ほどである。

3.3.2 緯度方向のみの平滑化

次に、 E_s 層の特徴が認識しやすいように VTEC の空間構造の変化を経度ごとに区切り、緯度方向のみ平滑化したのが、図18である。初期段階では、北緯33度付近に東西にまばらに異常が存在するが、時間経過とともに北へ移動し、東西に伸びた異常となっていることがわかる。移動速度は1:50-2:20にかけては北方向へ約58 m/s、2:20-2:50では同じく北方向へ約44 m/s である。

3.3.3 TEC 時系列変化

図19に示した受信局のデータを使用し、TECの時系列変化をプロットしたのが、図20である。TEC異常のピークは最大で0.7TECUほどであり、この異常が北方向へ移動していることがわかる。また、異常の大きさは時間経過とともに小さくなっている。

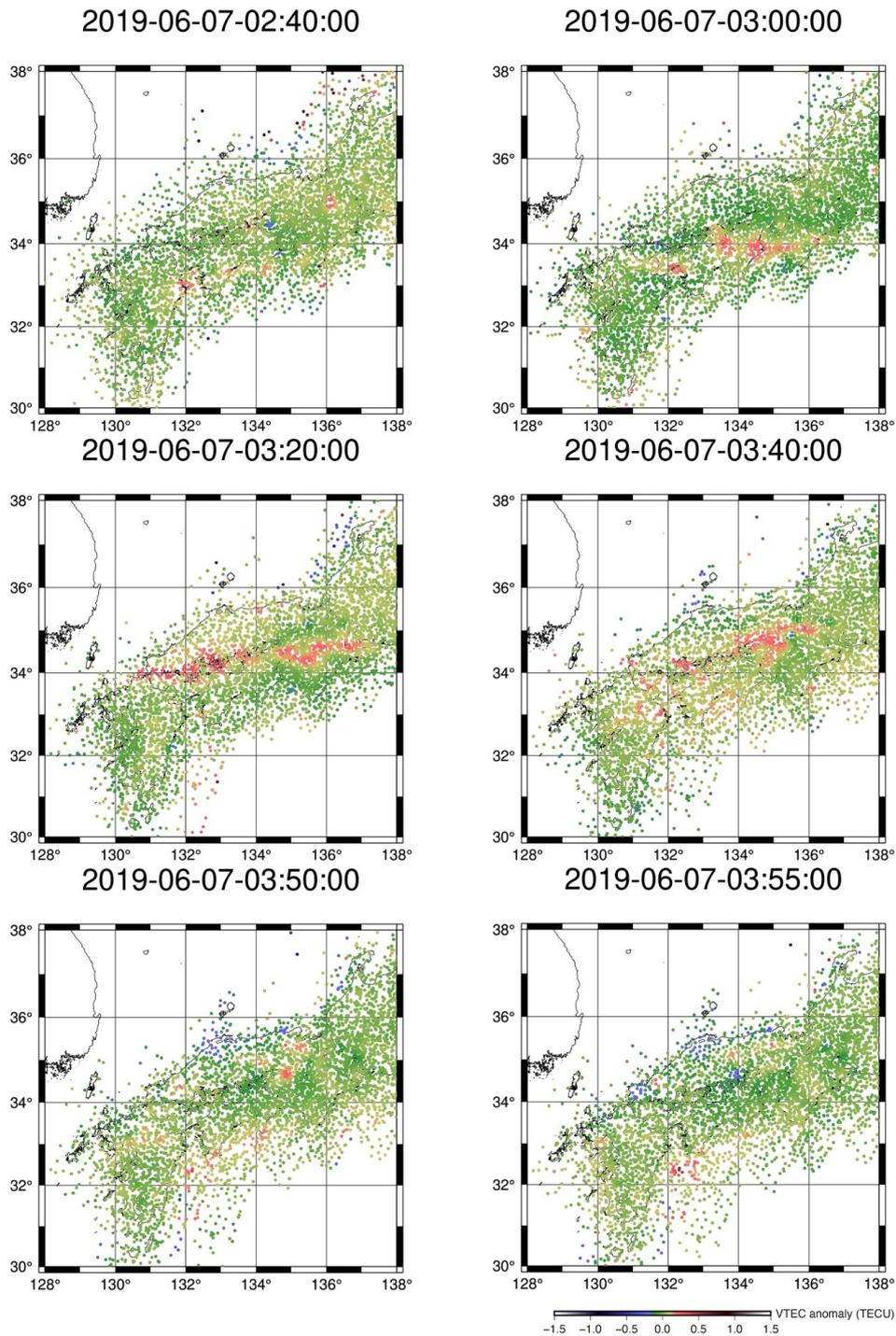


図 17 20190607E_s 層の空間構造の時間変化
 使用した衛星 (G07,G08,G11,G16,G18,G27,R09,R16,R18,R19,J02,J03,J07)

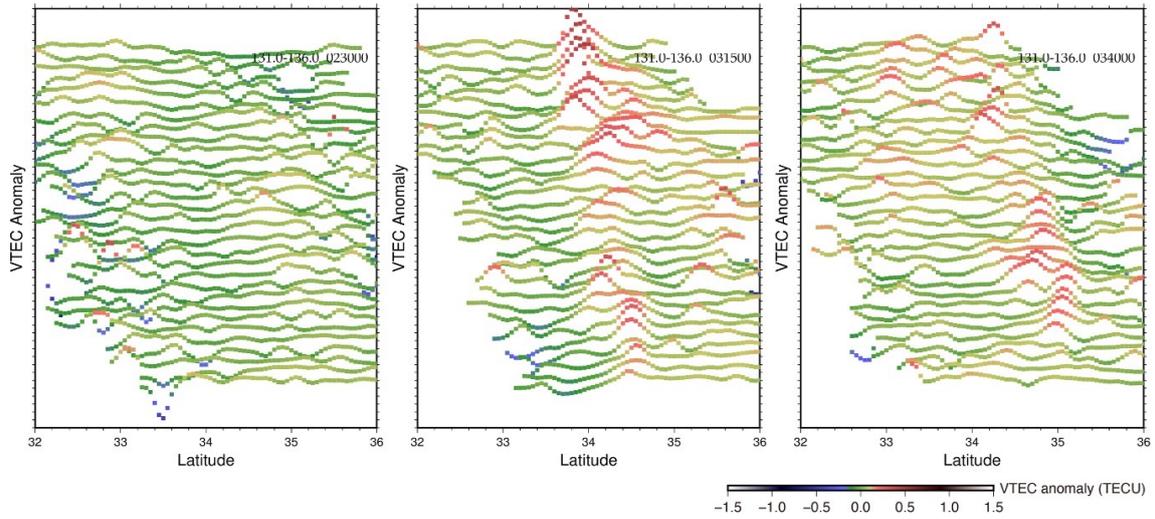


図 18 20190607 E_s 層の経度方向の平滑化. 東経 131°-136° の範囲で 0.2 度ごとに幅 0.2 度で、南北にのみ平滑化した.

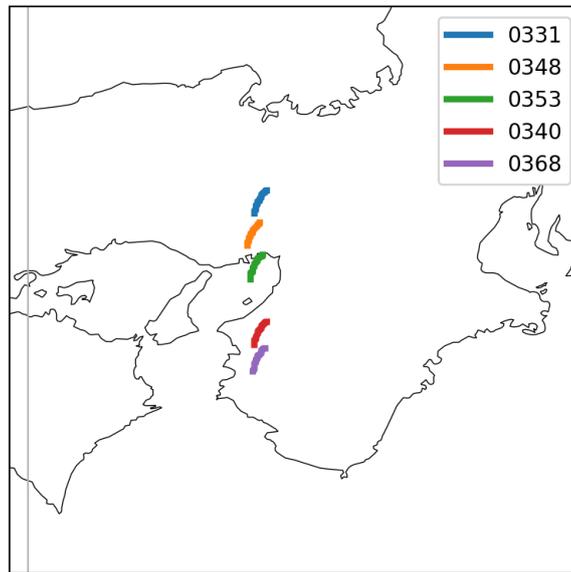


図 19 TEC 時系列変化のプロットに用いたデータの SIP の変化 (1:00-3:00) . GEONET での RINEX 名称 0331, 348, 0353, 0340, 0368 での QZSS 03 番衛星の SIP をプロットした.

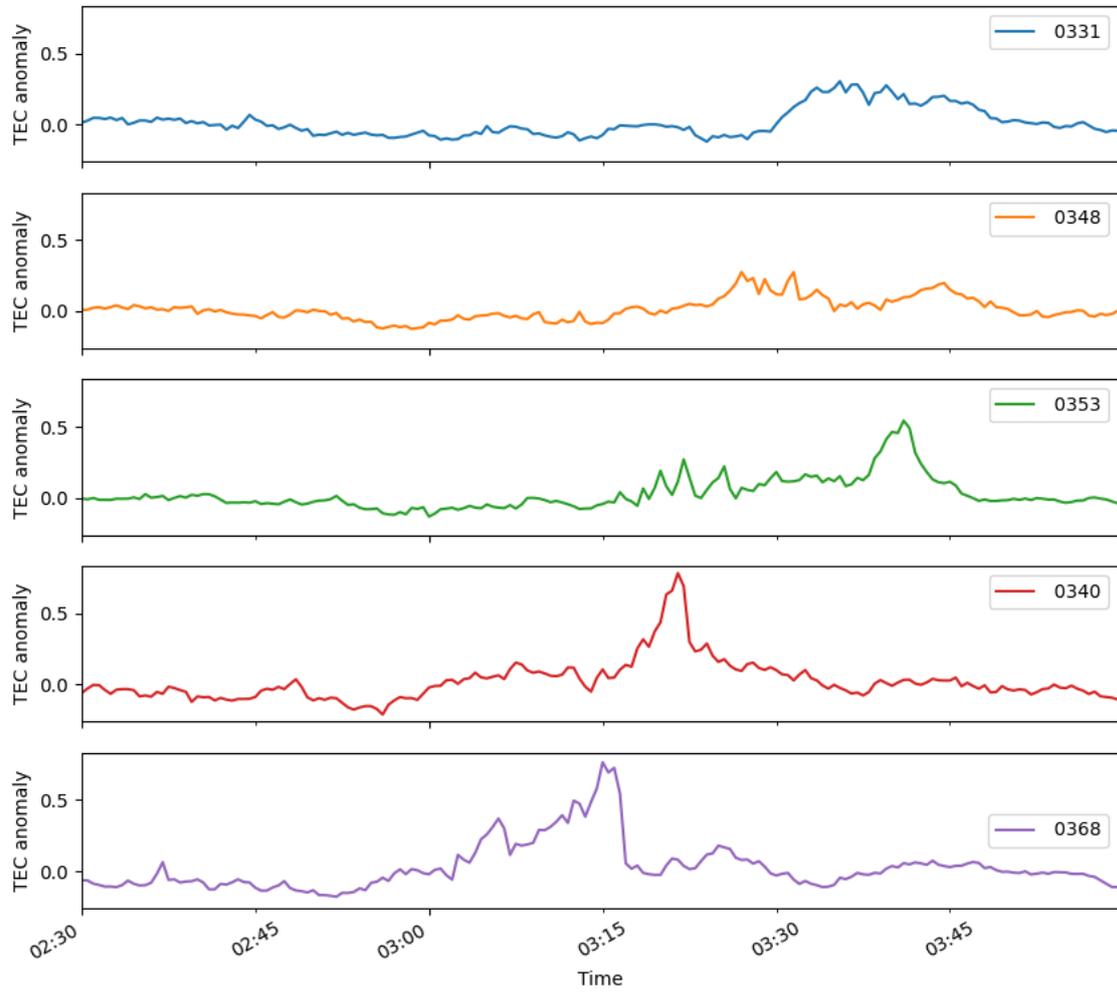


図 20 20190607 E_s 層の TEC 時系列変化. GEONET での RINEX 名称 0331, 348, 0353, 0340, 0368 での QZSS 03 番衛星の VTEC の時系列変化をプロットした. 南北に並んだ受信局をプロットし, 北から 0331, 348, 0353, 0340, 0368 の順である.

3.4 2019年7月4日の E_s 層

3.4.1 空間構造の時間変化

2019年7月4日の1:25-2:55 (UT) の VTEC 異常の空間構造の変化は図 21 のようになった。1:25-1:50 の図では東西方向にパッチが整列していることがみてとれる。このパッチが時間経過とともに南へ移動しながら成長し、線状の異常領域になっているように見える。この線状の異常は 2:25 ごろを境に徐々に消えていった。東西方向の伸びは 2:25 UT 付近で最大になり 400 km ほどである。

3.4.2 経度方向の空間平滑化

次に、空間構造の時間変化がわかりやすいように空間平滑化をしたのが図 22 である。初期段階では、異常は鋭いピークを持つことがわかる。時間経過とともに異常が北方向へ移動していることがわかる。異常のピークは移動とともに滑らかになり、消失していることがわかる。移動速度は北方向に 1:25-1:55 では約 53 m/s, 1:55-2:25 では約 68 m/s, 2:25-2:55 では約 37 m/s である。

3.4.3 TEC 時系列変化

図 23 のように南北に受信局を選択し、VTEC の時系列変化をプロットしたのが図 24 である。VTEC 残差のピークは最大で 0.4TECU ほどであり、異常が北方向へ伝搬していることがこの図からもわかる。また、この事例では顕著であるが TEC の残差が最大になる点の前後を比較すると、前部では TEC 変化の凹凸が顕著であるが、後部では比較的滑らかになっている。

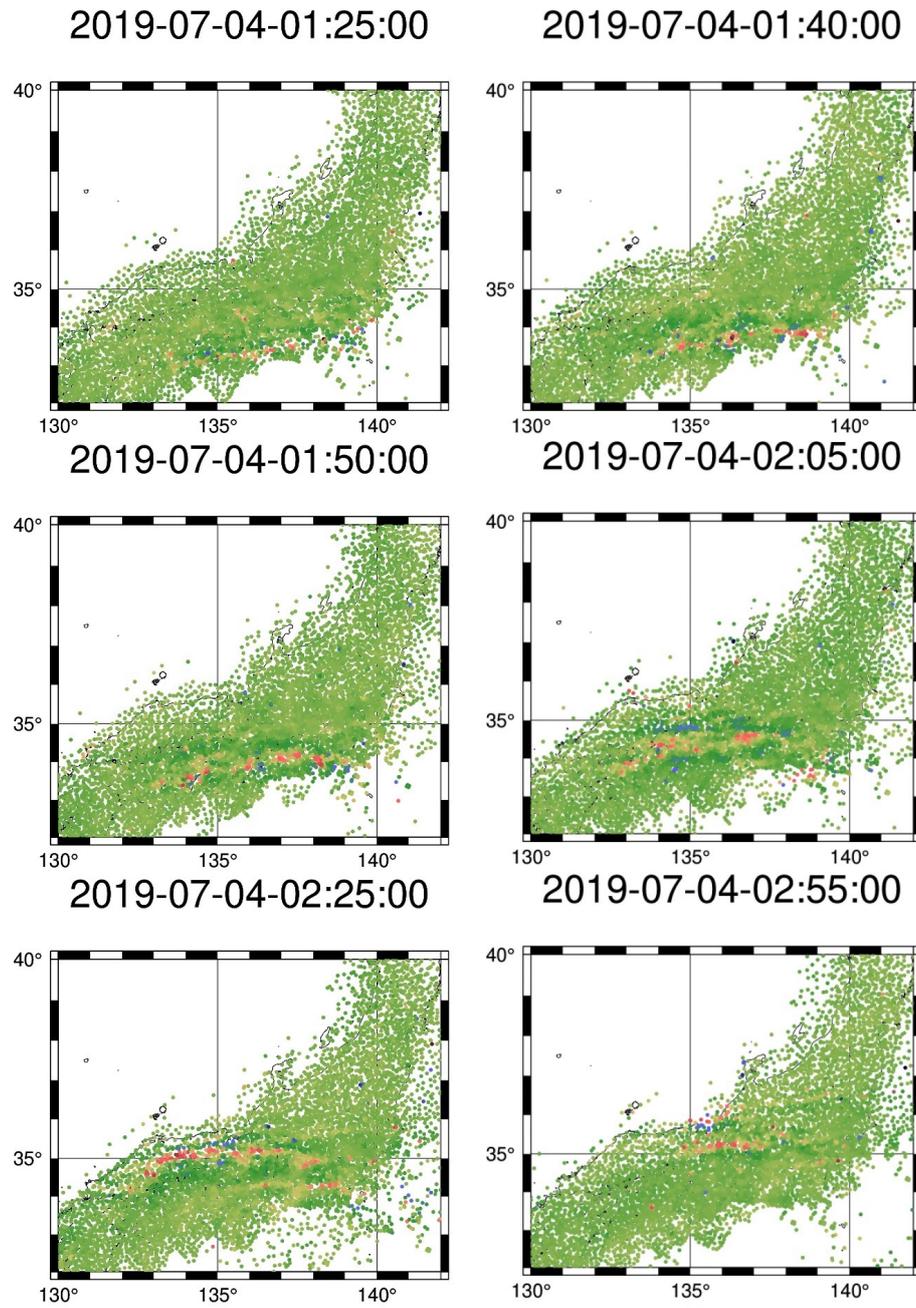


図 21 20190704E_s 層の空間構造の時間変化
 使用した衛星番号 (G01, G07, G08, G11, G16, G18, G21, G24, G27, J02, J07)

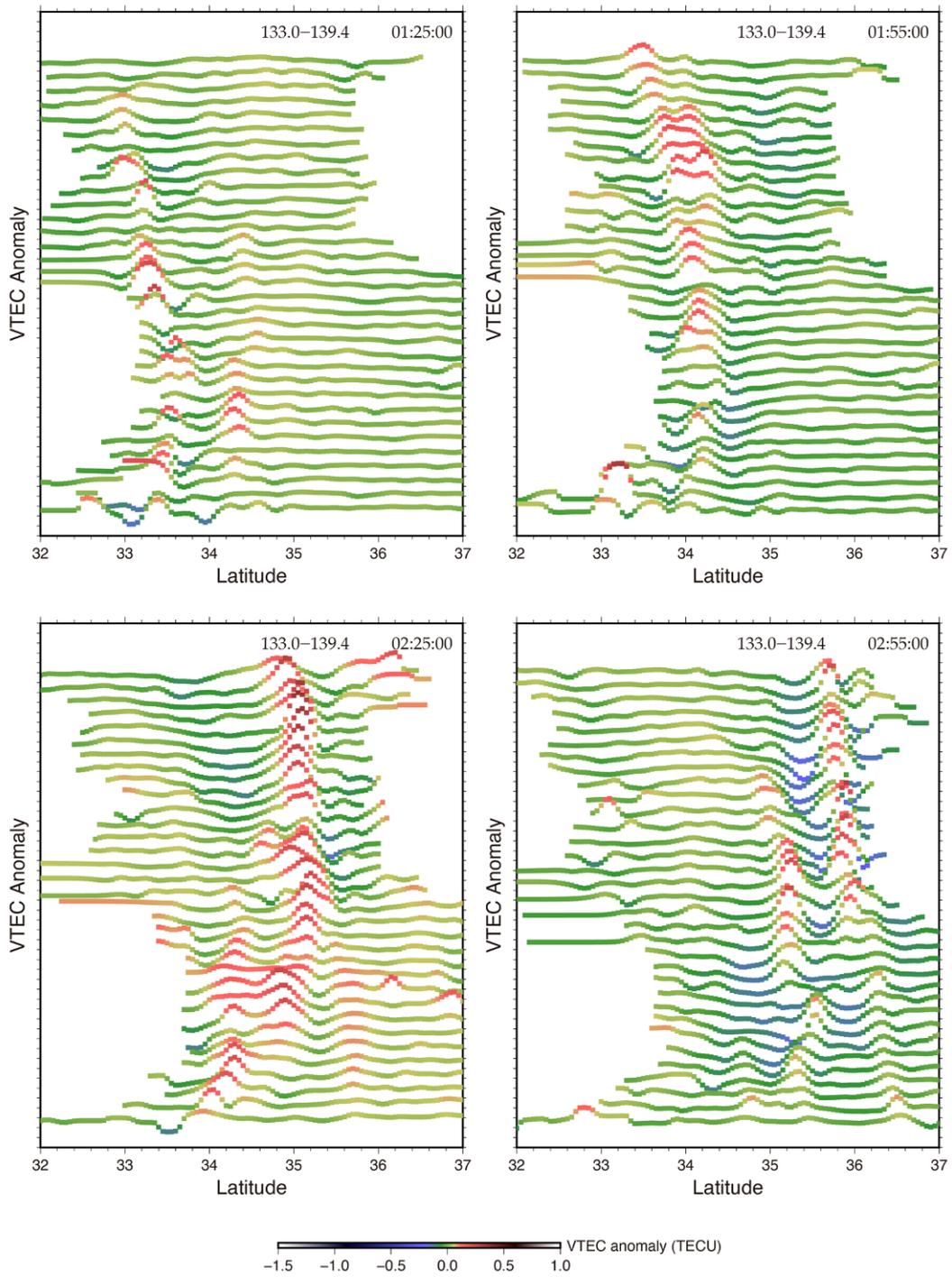


図 22 20190704 E_s 層の経度方向の平滑化. 東経 133°-139.4° の範囲で 0.2 度ごとに幅 0.2 度で、南北にのみ平滑化した.

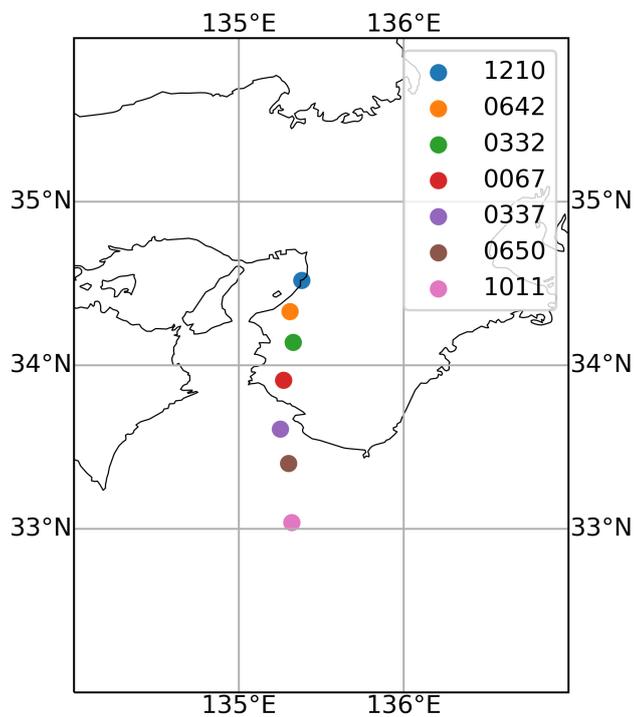


図 23 TEC 時系列変化のプロットに用いた受信局の SIP (1:00-3:00). 受信局は GEONET での RINEX 名称 1011, 650, 337, 67, 332, 642, 1210 を用いて, QZSS 7 番衛星のデータをプロットした. QZSS 7 番衛星は静止衛星のため, SIP は時間変化しない.

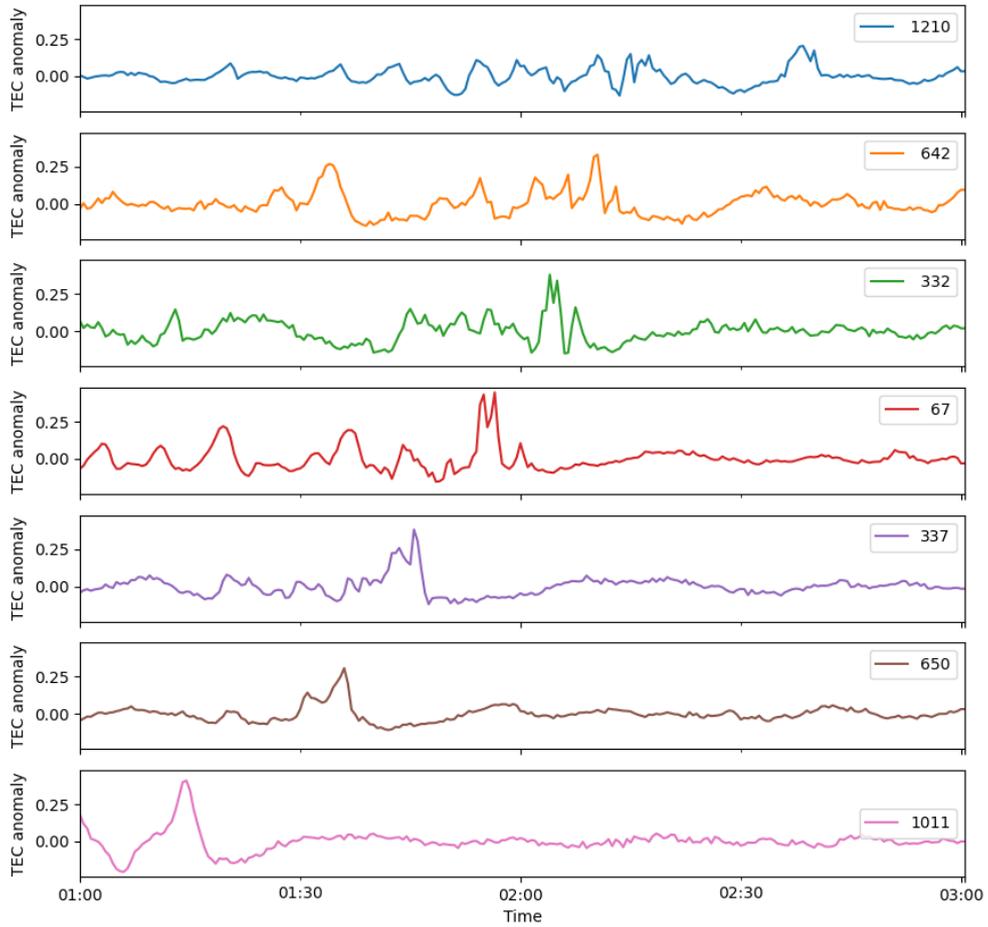


図 24 20190607 E_s 層の TEC 時系列変化. GEONET での RINEX 名称 1011, 650, 337, 67, 332, 642, 1210 での QZSS 07 番衛星の VTEC の時系列変化をプロットした. 南北に並んだ受信局をプロットし, 北から 1011, 650, 337, 67, 332, 642, 1210 の順である.

4 考察

4.1 E_s 層の移動について

Maeda *et al* (2015) では 2010 年に発生した 71 個の E_s 層の伸長方向, 速度, 長さ (図 25) をまとめている. そして GEONET の観測局が密な場所に関しては, 発生時間とその移動方向について (図 26) もまとめられている. 今回の結果と比較すると, 本研究の 3 つの E_s 層は東西方向に伸びた形状をしており, 伸長方向については典型的な E_s 層である. また, 移動速度についてもほとんど平均的な速度である. 2019 年 6 月と 2019 年 7 月の E_s 層はそれぞれ東西の幅が約 550 km と約 400 km であるのでかなり東西方向に発達した E_s 層であるといえる. また, この 2 つの E_s 層に関しては, 午前中に発生した E_s 層で北方向へ移動しているため, この時間帯では典型的な動きであるといえる.

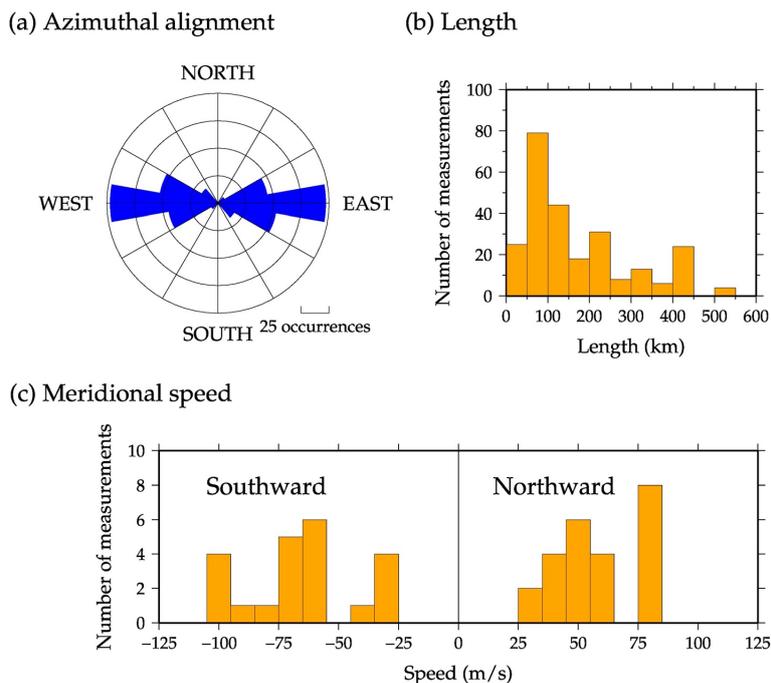


図 25 (a) E_s 層の伸長方向, (b) 長さ, (c) 速度 [Maeda and Heki, 2015]

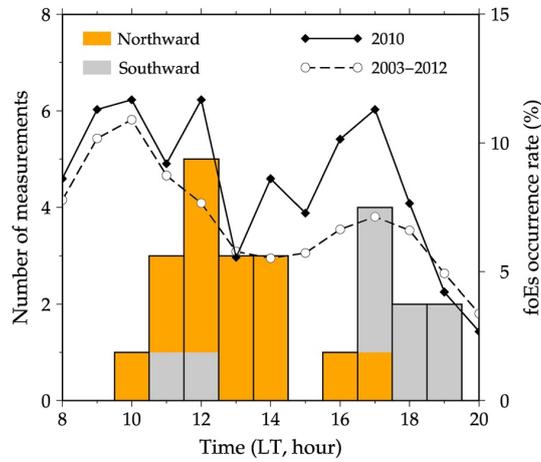


図 26 E_s 層の時間ごとの発生数と移動方向 [Maeda and Heki, 2015]

E_s 層が発生する高度 100 km 付近では、大気潮汐が卓越しており、 E_s 層の発生のみならず、その後の移動にも影響を及ぼしていると考えるのが自然である。この大気潮汐が E_s 層の移動に与える影響について考える。Andoh *et al* (2020) では、大気潮汐の影響を考慮した E_s 層のシミュレーションを行っている。この研究では、中性大気の大挙動の入力に GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) という熱圏大気モデルを用いている。このモデルから得られた 2015 年 6 月の立川上空の平均的な日周及び半日周の大気潮汐は、帯状風が図 27、子午線風が図 28 となっている。図 28 から午前中は南風が支配的であり、反対に午後には北風が支配的であることがわかる。これは、今回西日本で午前中に観測した 2 つの E_s 層が北へ移動していること及び、Maeda and Heki (2015) の E_s 層の時間帯ごとの移動方向が午前中は北方向であることと反対である。この理由としては、大気潮汐が地理的、季節的变化をし、 E_s 層が発生した地点と 2015 年 6 月の立川上空が大きく異なることが考えられる。

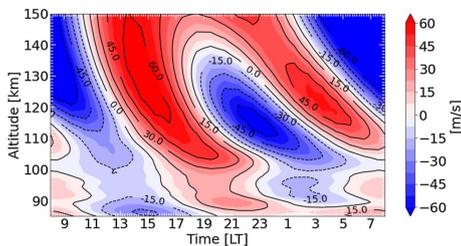


図 27 2015 年 6 月の日周及び半日周の大気潮汐の平均帯状風 [Andoh *et al*, 2020]. 東向きが正

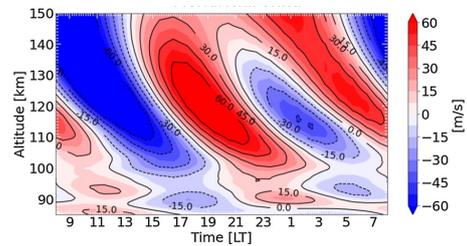


図 28 2015 年 6 月の日周及び半日周の大気潮汐の平均子午線風 [Andoh *et al*, 2020]. 南向きが正

4.2 形状と TEC 強度の変化

3つのイベントの空間構造の形状の時間変化は東西に伸びた点線上の形状から、それが繋がり線状へ、そして南北方向へ広がった後、徐々に細くなり消失している。また、TECの時系列データでは時間経過とともにピークの強度が低下している。これは、初期段階で Wind-shear により陽イオンが濃集し、そこに電子が引き付けられることで E_s 層が形成される。その後、Wind-shear が弱まることにより陽イオンと共に電子が拡散し、 E_s 層が消失しているものとする。また、2019年6月7日の E_s 層の 3:00 (図 17) では北西-南東方向に伸長したパッチが見られる。この北西-南西方向に伸長した構造は E_s 層不安定の特徴とよく一致している。

4.3 QP TEC とパッチについて

経度方向のみに平滑化した図を見ると、3つのイベント全てで初期状態では、東西に断続的に正の異常が発生していることがわかる。これは空間構造の図でも見られ、特に2019年7月の E_s 層では東西に並んだパッチが顕著である。これらのパッチは 10-40km ほどの間隔で並んでいる。この東西にパッチに並ぶ特徴は KH 不安定による微細構造形成の説とよく一致しており、KH 不安定によって発生する billow によるパッチ (図 29) であると考えられる。ここで KH 不安定によるパッチの間隔について詳しく考察する。KH 不安定で発生する billow の間隔は shear の厚さに依存していると考えられている (Bernhardt, 2002)。中性風の shear の厚さ D を用いると、billow は波数が $0.45/D$ になる空間波長の時、最も大きく成長することがわかっている。ここで E_s 層の厚さについて考える。電子数密度 N_e を用いると E_s 層の臨界周波数 f_0 は下記のように示される。

$$f_0 \approx 8.98\sqrt{N_e} \quad (4.17)$$

また、VTEC は E_s 層の厚さを d とすると次のように表せる。

$$\text{VTEC} = d \times N_e \quad (4.18)$$

よって、観測された臨界周波数と VTEC の残差を用いることで E_s 層の厚さを推定することができる。2019年7月の E_s 層の厚さを考える。臨界周波数を 20 MHz と仮定すると、TEC 残差の最大値は 0.5 TECU ほどであるので E_s の厚さは 1 km ほどとなる。 E_s 層発生時、 E_s 層の厚さに比べて shear の厚さは大きいものと考えられる。仮に E_s 層の厚さと shear の厚さが等しいとして計算すると、billow の間隔は約 10 km になる。

shear の厚さは E_s 層の厚さよりも厚いと考えられるため、パッチの間隔が 10-40 km であることは KH 不安定で説明できると考える。

TEC の時系列変化の図を見ると複数のピーク (QP TEC) が見られる。この原因は、 E_s 層の微細構造を反映し、生じていると考える。

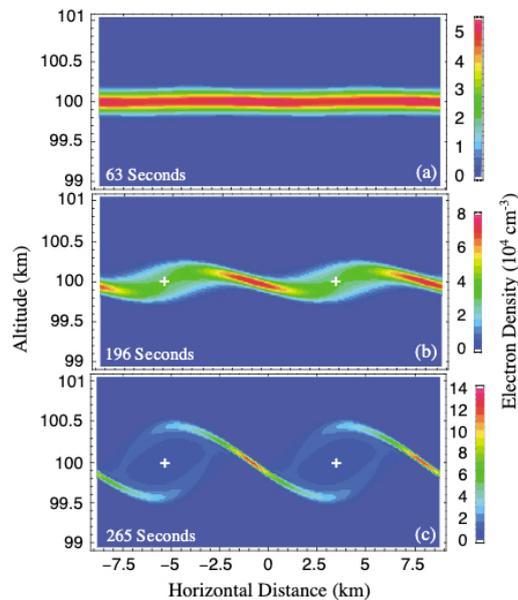


図 29 KH 不安定の billow により変形された E_s 層 [Bernhardt, 2002]. 水平に広がる E_s 層 (a) が billow により変形されている (b). (c) は非定常な状態。

5 まとめ

マルチ GNSS を用いることで 2018 年 8 月 1 日, 2019 年 6 月 7 日, 2019 年 7 月 4 日の 3 つの事例の E_s 層の空間構造及び時間発展を可視化することができた。2019 年 6 月の事例では、 E_s 層の成長段階で北西-南東方向に伸長した構造が観測でき、 E_s 層不安定性の影響が示唆された。また、2019 年 7 月の事例では、 E_s 層発生段階で正の異常が東西に並んだ構造が観測でき、KH 不安定の影響が示唆された。今後の研究としては、TEC 時系列の特徴の詳細な解析、より多くの事例を観測することや解析方法を発展させることに定性的な E_s 層の成長から消散までの過程を研究したいと思う。

6 謝辞

本研究で使用した RINEX データは国土地理院から、GIM ファイルはベルン大学から提供していただきました。本研究を行うにあたり、宇宙測地学研究室及び固体ゼミの皆様には大変お世話になりました。指導教官の日置幸介教授には研究の進め方から発表資料や論文作成に至るまで、研究に関するあらゆることについてご指導いただきました。固体ゼミでは、発表資料及び発表に関するアドバイスや内容の指摘等、本当に多くのことを学ぶことができました。皆様、誠にありがとうございました。

参考文献

- [1] S. Andoh, A. Saito, H. Shinagawa, and M. K. Ejiri. First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures. *Earth, Planets and Space*, Vol. 72, No. 1, p. 165, 2020.
- [2] P. A. Bernhardt. The modulation of sporadic-E layers by Kelvin – Helmholtz billows in the neutral atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, No. 12, pp. 1487 – 1504, 2002.
- [3] Y. H. Chu, C. Y. Wang, K. H. Wu, K. T. Chen, K. J. Tzeng, C. L. Su, W. Feng, and J. M. C. Plane. Morphology of sporadic E layer retrieved from COSMIC GPS radio occultation measurements: Wind shear theory examination. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 119, No. 3, pp. 2117–2136, 2014.
- [4] R. B. Cosgrove and R. T. Tsunoda. A direction-dependent instability of sporadic-E layers in the nighttime midlatitude ionosphere. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 18, pp. 11–1–11–4, 2002.
- [5] M. Furuya, T. Suzuki, J. Maeda, and K. Heki. Midlatitude sporadic-E episodes viewed by L-band split-spectrum InSAR. *Earth, Planets and Space*, Vol. 69, No. 1, 2017.
- [6] IGS. IGS-Formats-IGS, 2020. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201096516-IGS-Formats>.
- [7] J. Kurihara, N. Iwagami, T. Takahashi, K. Ishisaka, A. Kumamoto, T. Abe, A. Matsuoka, and M. Ishii. Sounding Rocket Observations of Spatial Structure of Sporadic E Layers in the Ionosphere. *J. Plasma Fusion Res*, Vol. 92, No. 4, pp. 251–258, 2016.
- [8] J. Maeda and K. Heki. Two-dimensional observations of midlatitude sporadic e irregularities with a dense GPS array in Japan. *Radio Science*, Vol. 49, No. 1, pp. 28–35, 2014.
- [9] J. Maeda and K. Heki. Morphology and dynamics of daytime mid-latitude sporadic-E patches revealed by GPS total electron content observations in Japan Aeronomy. *Earth, Planets and Space*, Vol. 67, No. 1, 2015.
- [10] I. N. Muafiry, K. Heki, and J. Maeda. 3D tomography of midlatitude sporadic-E in Japan from GNSS-TEC data. *Earth, Planets and Space*, Vol. 70, No. 1, p. 45,

2018.

- [11] T. Maruyama. Shapes of irregularities in the sporadic E layer producing quasi-periodic scintillations. *Radio Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 581–590, 1995.
- [12] J. D. Whitehead. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 51, No. 5, pp. 401–424, 1989.
- [13] R. F. Woodman, M. Yamamoto, and S. Fukao. Gravity wave modulation of gradient drift instabilities in mid-latitude sporadic e irregularities. *Geophysical Research Letters*, Vol. 18, No. 7, pp. 1197–1200, 1991.