

2019 年度 修士論文

オーロラサブストームと日本で観測される  
LSTID：マルチ GNSS による TEC 観測

Aurora Substorms and LSTID Observed in Japan:  
TEC Observation by Multi-GNSS

北海道大学大学院 理学院 自然史科学専攻  
地球惑星ダイナミクス講座  
宇宙測地学研究室

20183105

橋本 繭未

指導教官 日置 幸介 教授

## 要旨

太陽活動により、時々オーロラ帯の電離圏中にはオーロラジェット電流と呼ばれる強い電流が流れる。この電流によってオーロラサブストームと呼ばれる地磁気擾乱がオーロラ帯で発生する。同時にジュール加熱により周辺の大気が暖められて大気重力波が生じる。この大気重力波によって高緯度であるオーロラ帯で生じた電離圏擾乱が日本のような中低緯度地域まで伝播する。この現象を大規模伝播性電離圏擾乱(Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, LSTID)という。LSTID の観測や研究は古くから行われており、その大まかな発生メカニズムや特徴は知られている。日本においても稠密 GNSS 網を利用した電離圏全電子数 (TEC) 観測による LSTID の観測とその統計的な研究が行われている (Tsugawa et al., 2004) が、欧米で行われている LSTID の発生から伝播までの一連の様子を連続的に捉えた研究 (Zakharenkova et al., 2016) は行われていない。日本列島とオーロラ帯の間の地域 (東部シベリア) の観測網が疎であるため同様の研究は困難であるが、本研究ではオーロラサブストームと日本で観測される LSTID との関係性を現状の観測インフラで可能な手法を用いて探る。

本研究ではまず 2011 年から 2017 年の間にオーロラサブストームの活動を表す AE 指数が 2000 nT を超える 22 例において、つくばの GNSS 観測点で 5 例の LSTID を確認した。全ての観測例について AE 指数のピークから 1、2 時間後に LSTID の発生を確認した。また、観測した 2011 年 9 月 26 日の LSTID について伝播速度を計測した結果、AE 指数のピークの時間帯とオーロラ帯で LSTID の励起が予想される時間帯が一致した。

次に 2017 年に打ち上げられた QZSS 静止衛星を用いて、従来の GNSS では成し得なかった連続 TEC データを作成した。この連続 TEC データより 2018 年 10 月から同年 12 月までの期間で 3 局の観測点のデータの相互相関を取ることによって、LSTID と思われる TEC 変動を 14 例同定した。さらに観測した LSTID について南向きの伝播速度を計算し、オーロラ帯で LSTID が発生したと思われる時間を推定した。そして日本の北のオーロラ帯に位置するロシアの地磁気観測点 TIK 局の地磁気南北成分と比較した。その結果、14 例中 4 例については対応関係がみられた。その他の 10 例については、6 例については周辺時間帯に地磁気変動が見られ関係性が確認することができたが、4 例についてはオーロラ帯の地磁気変動との対応は確認できなかった。

本研究によって、確かに現在知られている LSTID の発生メカニズムにあうオーロラサブストーム活動と日本における LSTID を関係づけることに成功した。しかし、日本の北のオーロラ帯におけるサブストームの活動に関係していないと思われる LSTID も複数観測された。したがってオーロラ帯におけるサブストームの活動からある程度は日本に伝播してくる LSTID の発生を予測することはできるが、それだけでは予測できない LSTID が発生する可能性があることもわかった。

# 目次

## 要旨

1	はじめに	1
1.1	オーロラサブストームと LSTID	2
1.1.1	磁気圏	2
1.1.2	LSTID	3
1.2	日本における LSTID の研究	4
2	観測方法	7
2.1	GNSS	7
2.1.1	GNSS とは	7
2.1.2	GPS	8
2.1.3	QZSS	9
2.2	GNSS-TEC 観測	10
2.3	GPS と QZSS による TEC 観測の違い	13
3	GPS-TEC 観測による LSTID と AE 指数の比較	18
3.1	AE 指数	18
3.2	観測された 5 例の LSTID	19
3.3	2011 年 9 月 26 日の LSTID	23
4	QZSS-TEC 観測とオーロラ帯の地磁気変動	26
4.1	使用した地磁気データ	26
4.2	LSTID 同定方法	27
4.3	観測した LSTID	28
4.4	TIK 局の地磁気南北成分との比較	30
4.5	他の地磁気観測点との比較	32
5	考察	35
6	まとめ	39
7	謝辞	42
8	引用	43

# 1 はじめに

地球大気上層にあり、太陽からの紫外線等により窒素や酸素の原子や分子がイオン化し電子密度が高くなっている領域（高度 60~500 km）のことを電離圏（電離層）という（図 1.1）。電離圏の電子数密度は太陽活動に大きく依存し変動している。そのため定常的な変化としては日変化や季節変化があり、それに加えて太陽フレアやさまざまな伝播性電離圏擾乱、また火山の噴火や地震前後、ロケットやミサイルによる打ち上げに伴う突発的な電離圏擾乱が発生している。

本研究では GNSS を用いて TEC（Total electron content：全電子数）を観測することによって電離圏擾乱の一つである大規模伝搬性電離圏擾乱(Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, LSTID)を研究する。LSTID は 1960 年頃からこれまで多くの観測報告、理論研究がなされてきた。そのため、LSTID の大まかな発生メカニズムや原因、そして現象の特徴等は判明している。しかし、日本での LSTID の研究の数は少なく、また伝播の様子等は捉えているものの、その発生源を特定しているわけではないので予測等もできない。本研究では GNSS-TEC 観測を用いて LSTID を観測し、発生減となる高緯度地域での地磁気変動と比較し、その関連性を調べることを目的とする。

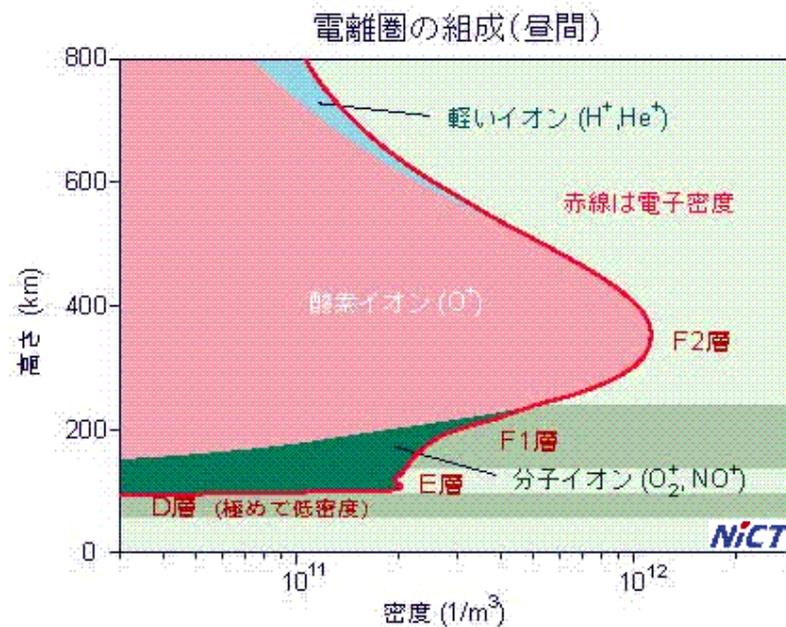


図 1.1 電離圏の電子数密度の高度プロファイルと、様々な層の高度と正イオンの代表的な種類（情報通信研究機構 NiCT のページより）

## 1.1 オーロラサブストームと LSTID

本節では研究対象である LSTID とその発生原因であるオーロラサブストームについて説明する。

### 1.1.1 磁気圏

地球は流体核におけるダイナモ作用の作り出す電流により固有磁場を持っている。その地球磁場は宇宙に広がっており、太陽から放出された高エネルギーのプラズマ粒子の流れ（太陽風）の影響を受け、太陽と逆側に吹き流されたような形をしている（図 1.2）。この地球磁場が支配する領域を磁気圏といい、地球は磁気圏をもつことで太陽からの高エネルギー粒子に直接さらされずに守られている。

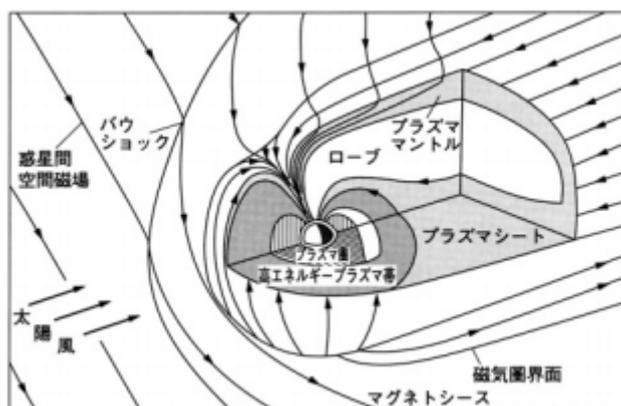


図 1.2 地球磁気圏の構造図（小原、2006）

この太陽風と地球磁気圏の状態が変化することで、地球上で地磁気変動が生じる。地磁気変動はオーロラサブストームと磁気嵐に分けて考えられる。オーロラサブストームは極域において30分から2時間程度の時間スケールで観測される数百から千数百 nT レンジの地磁気水平成分の変動である。光学的にいうと真夜中付近でオーロラが爆発的に光り始めて、それが次第に経度方向緯度方向に拡大していく現象である。サブストームに伴う地磁気変動は局所的で磁気地方時や磁気緯度によって大きく異なる。磁気嵐(Geomagnetic storm)は、中低緯度の地磁気の水平成分が数十から数百 nT の範囲で半日から数日にわたって全地球的に減少した状態が継続する変動である。磁気嵐の継続期間内に多くのサブストームが発生する。

### 1.1.2 LSTID

本研究では主にサブストームに伴うオーロラ帯（磁気緯度 60-70 度）で発生する地磁気変動が原因で発生する LSTID の研究を行った。はじめにサブストームが発生する原理を簡単に説明する。地球磁気圏の尾部では基本的にプラズマシートを朝側から夕方側に向かって尾部電流が流れており、磁気圏が静穏な時はプラズマシートを水平に流れている。しかし、太陽風の速度や惑星空間磁場の南向き成分が大きくなると、磁気圏に流入するエネルギー量が増大し、尾部電流の電流量が増える。プラズマシートはその性質（無衝突プラズマ）により、一定量以上の電流が流れると、抵抗が増大し尾部電流が遮断される。行き場を失った電流が磁力線に沿ってオーロラ帯の電離層に流れ込む（沿磁力線電流 field-aligned current）。真夜中過ぎの領域に流れこんだ電流は電離圏中を流れ、真夜中前の領域から磁気圏に流れ出す（図 1.3）。このときに極域の電離圏中を流れる電流をオーロラジェット電流という。このオーロラジェット電流により電離圏で大きな磁場変動が発生する。これがオーロラサブストームといわれる一連の現象である。

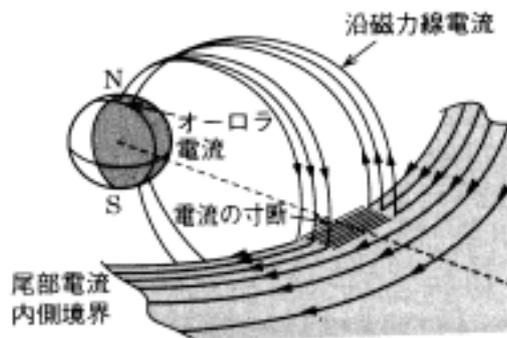


図 1.3 サブストーム中における磁気圏尾部の電流構造（小原、2006）

このサブストーム発生時に電流がオーロラ帯に流れ込むときに、ジュール加熱により周辺の中性大気が熱せられ、大気重力波が生じる。この大気重力波によって、高緯度に位置するオーロラ帯の電離圏擾乱を中低緯度地域まで伝搬する[Hines, 1960]。この現象が LSTID である。

LSTID の観測や理論研究は 1960 年頃から多くされており、先述のような古くから LSTID の発生メカニズムや LSTID の特徴として水平伝播速度が数百から 1000m/s、周期 30 分から 2 時間であること等が知られている[Hunsucker, 1982]。詳しい発生メカニズムについてはいまだに議論の余地がある。

## 1.2 日本における LSTID の研究

日本においても過去に LSTID の観測がなされてきた。本研究でも用いた GNSS-TEC 観測や大気光カメラ、イオノゾンデ等を用いて、LSTID の特徴や伝播の様子が研究されてきた [Tsugawa et al., 2003; Shiokawa et al., 2002]。Tsugawa et al. [2004] では日本における LSTID の統計解析が行われている。この論文では、1999 年 4 月から 2002 年 12 月の間で TEC の 2 次元マップから目視で 54 例の LSTID を同定し、統計的に解析が行われている。この研究において、指摘される LSTID の特徴をいくつか紹介する。

Kp 指数は全世界的な地磁気擾乱度合いを示す指標であり、図 1.4(a)はその Kp 指数が高い 4 以上のときと LSTID の発生数を月ごとに示す。ここから Kp 指数と LSTID の発生には相関があり、春と秋に LSTID が多く発生していることがわかる。次に図 1.4(b)は、図 1.4(a)と同様に Kp 指数と LSTID の発生数を 1 日の時間帯ごとに示す。この図から LSTID は昼よりも夜側で多く発生している。図 1.4(c)は観測された LSTID の伝播速度と周期を示している。伝播速度と周期は逆相関の関係性にあり、伝播速度はおおよそ 200 から 800 m/s、周期は 40 分から 2 時間くらいの範囲で観測されている。さらに図 1.4(d)は LSTID の伝播方向を示しており、LSTID の伝播方向は高緯度から低緯度から伝播するので基本的に南向きではあるが、数十度の範囲でその伝播方向は東西に広く分布している。

以上のように日本ではこのように稠密な GNSS 観測網である GEONET を使って、LSTID の観測が行われており、その伝播の特徴などはわかっている。しかし、近年南北アメリカやヨーロッパではその広範囲に設置された GNSS 観測点(図 1.5)用いて、LSTID の観測だけではなく、LSTID の発生から伝播するまでの様子が捉えられている [Cherniak and Zakharenkova, 2016; Zakharenkova et al. 2018]。これらの研究では LSTID 発生域から赤道域に渡る LSTID の伝播の様子を観測し、その発生起源であるオーロラサブストームや大気重力波と合わせて LSTID による TEC 変動と比較することによって LSTID の詳細な発生メカニズムや伝播が研究されている。しかし、図 1.5 で示されるように、日本には GNSS 観測点はあるが、日本北上のシベリア付近には十分な GNSS 観測点が配置されておらず、日本付近の経度帯ではオーロラ帯で発生するオーロラサブストームと日本で観測される LSTID の関係性については研究されていない。

したがって、本研究では LSTID の自動検出や発生源であるオーロラサブストームの活動から日本での LSTID 発生の予測などを目標に、GNSS-TEC 観測により日本に伝播された LSTID を観測し、発生源である高緯度地域で発生するオーロラサブストームとの関係性について研究を行った。

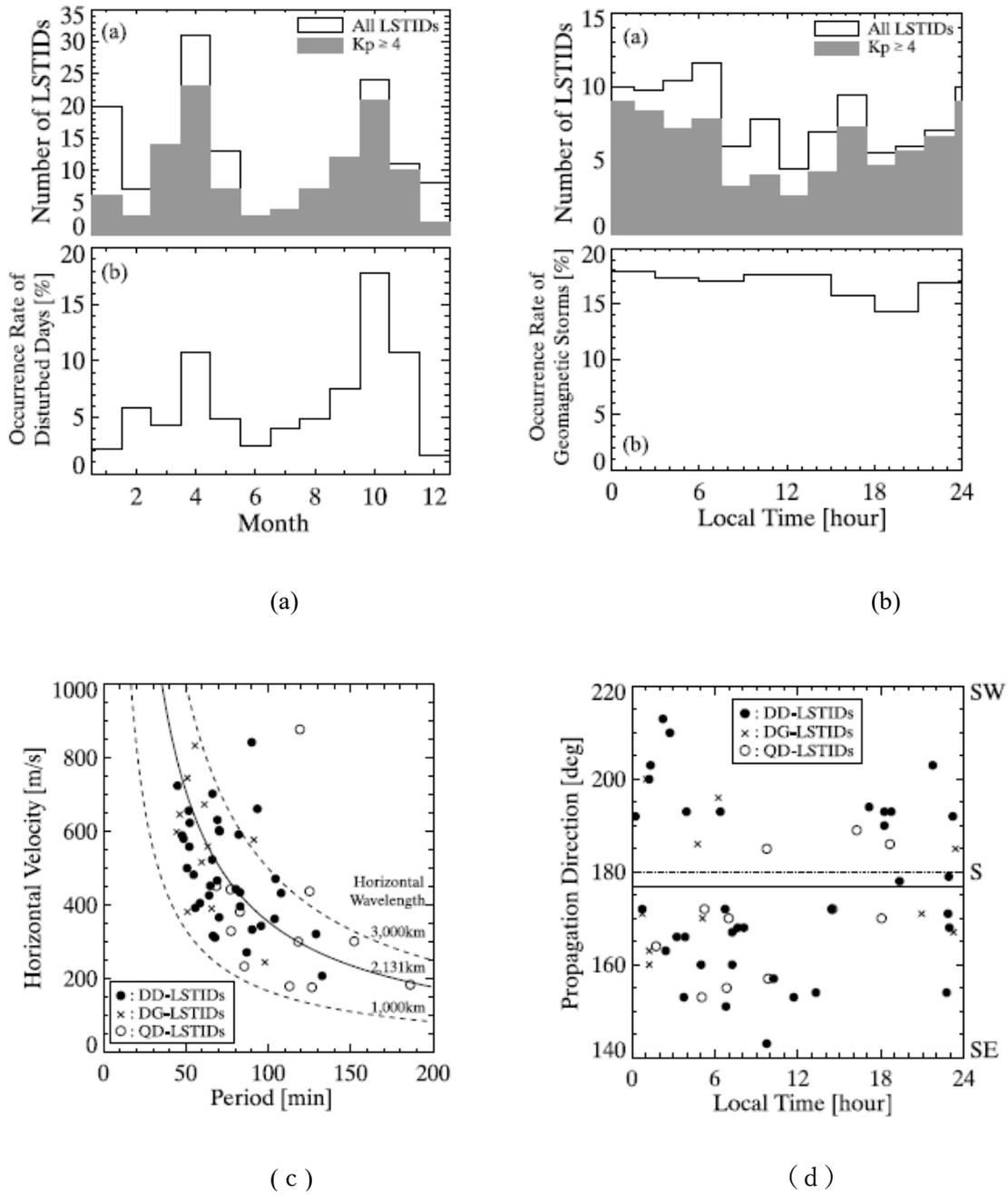


図 1.4 日本列島を通過する LSTID の特徴を GNSS 観測から求めたもの [Tsunami et al., 2004]

- (a)  $K_p$  指数( $>4$ )と LSTID の発生関係性
- (b) LSTID の発生時間帯
- (c) LSTID の水平伝播速度と周期の関係性
- (d) LSTID の伝播方向

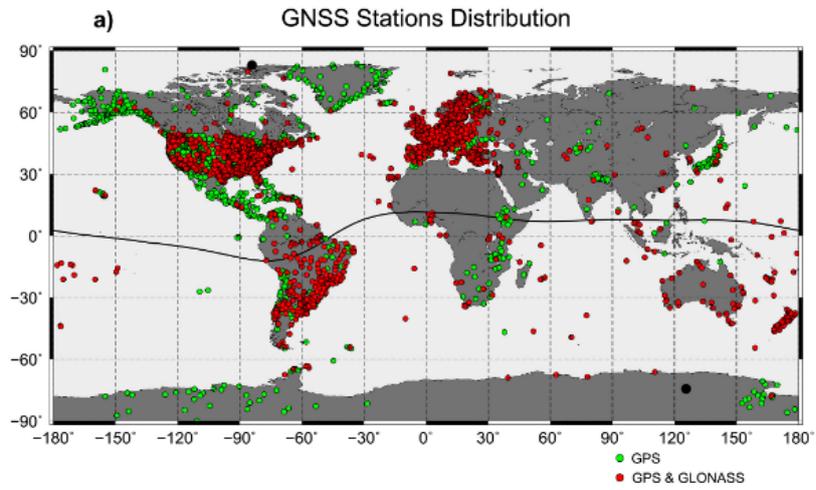


図 1.5 世界の GNSS 観測点 [Cherniak and Zakharenkova, 2016]

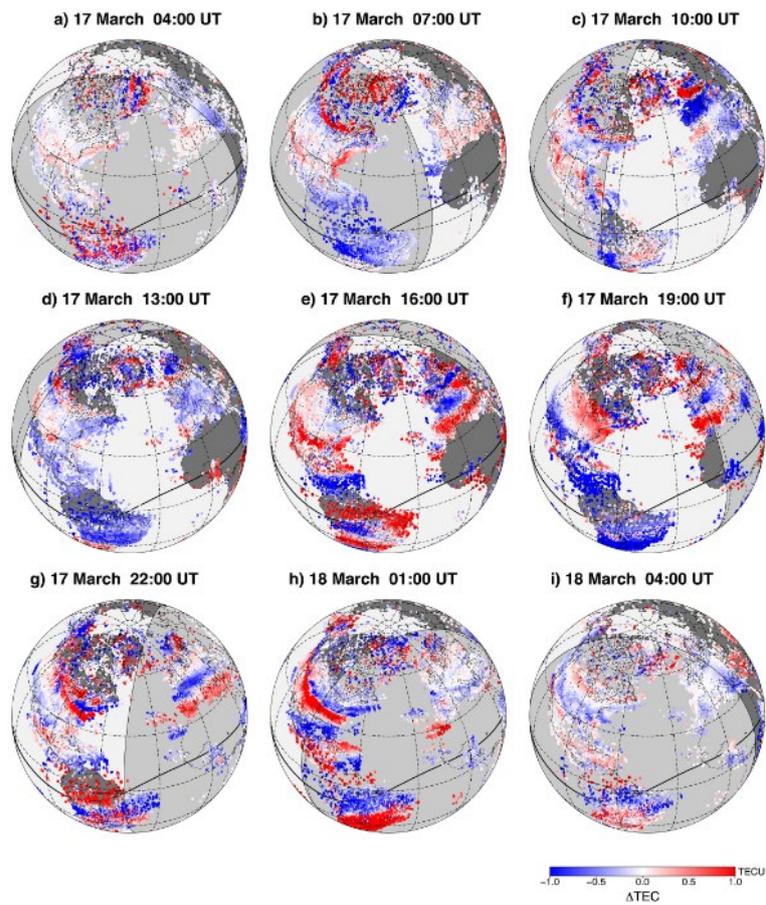


図 1.6 2015年3月17日から18日のLSTID発生時における南北アメリカとヨーロッパのTEC2次元マップ [Cherniak and Zakharenkova, 2016]

## 2 観測方法

本章では LSTID による電離圏擾乱を研究するため用いた GNSS 及び GNSS-TEC 観測について説明する。

### 2.1 GNSS

#### 2.1.1 GNSS とは

全球衛星測位システム (Global Navigation Satellite System、GNSS) とは、地球を周回する複数の人工衛星が送信される電磁波を地上局で受信し、その搬送波の位相変化等を観測・分析することによって高精度の測位を行うシステムである。GNSS は基本的に GNSS 衛星と呼ばれる人工衛星とその GNSS 衛星の追跡と管制を行う管制局、測位を行うための受信機により構成される。アメリカが運営する GPS (Global Positioning System 全球測位システム) は GNSS の一つであり、主に用いられてきた。現在、GNSS は GPS のほかにもロシアの GLONASS、中国の北斗 (BeiDou)、欧州連合の Galileo、インドの NAVIC (NAVigation Indian Constellation)、日本の準天頂衛星システム (QZSS) といったものがあり、世界中で高精度な測位システムが開発されつつある。

GNSS は複数の GNSS 衛星が発する電波を受信し、受信点の 3 次元位置を決定する。衛星から発信される電波に衛星の軌道情報や原子時計の正確な時間情報などの情報をのせ、衛星ごとに固有のコードで変調して送っている。その情報によってそれぞれの GNSS 衛星からの受信機までの距離や伝搬に要した時間を求め、位置を決定する。

また、GNSS による測位には受信点の絶対位置を単独で決定する単独測位とすでに位置が求められている基準点に対するもう一方の点の相対位置を決定する相対測位 (干渉測位) の二つがある。一般に単独測位は地球に対し、静止または運動している物体している物体の概略位置を求めるのに使われ、カーナビなどがその代表例である。相対測位は静止点の精密位置を決定するのに用いられ、地殻変動の計測などに用いられる。

GNSS は通常可視衛星 (受信点を観測可能な GNSS 衛星) が 4 機以上あれば受信点の測位は可能であるが、単独測位等では大きな測位誤差が生じてしまうことが多々ある。このような誤差が生じる要因は、衛星の時計誤差や軌道情報の誤差、電離圏遅延や大気遅延、建物や山の反射 (マルチパス)、ノイズ、GNSS 衛星の配置などが挙げられる。この中で測位誤差が大きくなる要因の一つは受信局上空の GNSS 衛星の配置だ。GNSS 衛星の配置状況は、DOP (Dilution of Precision : 精度低下率) という数値で表される。衛星受信数が少なく、かつそれぞれの GNSS 衛星の位置が離れていないと測位誤差は大きくなる。

## 2.1.2 GPS

本節では、本研究で用いた GNSS の中で最も代表的である GPS について説明する。GPS はアメリカによって航空機・船舶等の航法支援用として開発されたシステムである。1978 年に初めて GPS 衛星が打ち上げられて以降、人工衛星の寿命や技術の進歩に伴い、衛星の打ち上げを繰り返し、現在は計 30 個の GPS 衛星が配置されている。すべての GPS 衛星はいわゆる準同期軌道で、高度 20,200 km で軌道傾斜角 55 度、周期約 12 時間で地球上をそれぞれ周回しており、各衛星は昇交点 60 度おきに配置されている(図 2.1)。

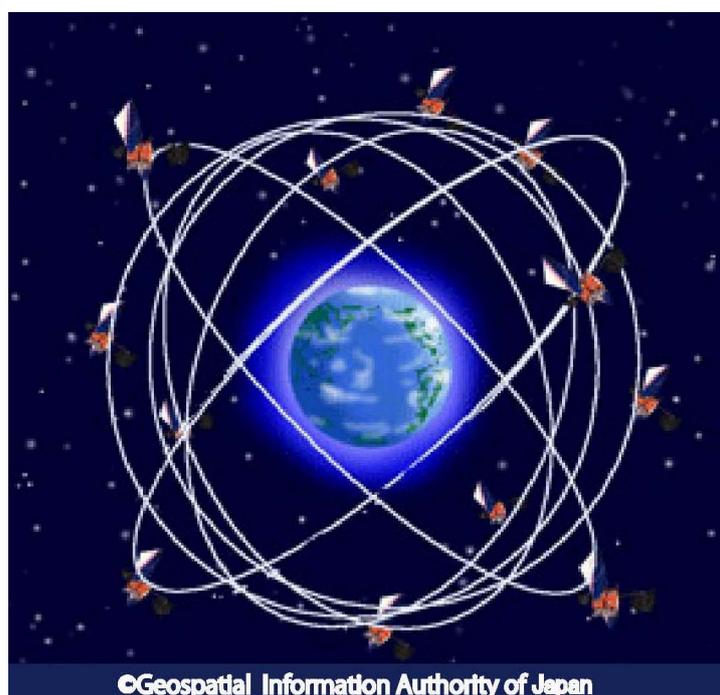


図 2.1 GPS 衛星のイメージ (国土地理院のページより)

次に GPS 衛星の電波について説明する。現在、GPS 衛星は L1 (1575.42 MHz)、L2 (1227.60 MHz)、L5 (1176.45 MHz) の最大 3 つの周波数帯で搬送波を送信している。GPS 衛星は、衛星の近代化に伴ってブロック名がついており、現在運用されている GPS 衛星はブロック II R とブロック II RM、ブロック II F タイプのものである。ブロック II R は L1、ブロック II RM は L1 と L2、ブロック II F は L1 と L2 と L5 の周波数で搬送波を発している。ブロックの分類は、ブロック I は 1978 年から 1985 年に打ち上げられたプロトタイプ、ブロック II は 1989 年から 1990 年、ブロック II A は 1990 年から 1997 年、ブロック II R は 1997 年から 2004 年、ブロック II RM は 2005 年から 2009 年、ブロック II F は 2010 年から 2016 年、ブロック III は 2019 年から打ち上げられた GPS 衛星と分類できる。

### 2.1.3 QZSS

本節では本研究で用いた日本の衛星測位システムであるみちびき、準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) について説明する。QZSS は4機のGNSS衛星で構成され、日本を含むアジア・オセアニア地域をカバーするGNSSの一つである。QZSSのGNSS衛星は3機の準天頂軌道衛星と1機の静止軌道衛星によって構成されている (図 2.2)。静止軌道とは対地同期軌道 (公転周期が地球の自転周期と等しい) の内の一つであり、軌道傾斜角と離心率を0とし、地表から常に見えるようにするため、経度を固定したまま赤道上空に静止させたものである。これを南北方向に振動させたもの、言い換えれば軌道傾斜角が0ではないものを傾斜静止軌道という。この傾斜静止軌道衛星のうち、離心率を変え、北半球では地球から遠ざけることで速度を遅くし、南半球では地球に近づくことで速度を速くしたものが準天頂軌道と呼ばれる。したがって、QZSSの準天頂軌道衛星は日本上空近くに長時間滞在することになり、日本付近から仰角20度以上に約16時間留まる。QZSSの準天頂衛星は、それぞれ8時間ほど日本から見て高仰角を保つことによって、3機の衛星で24時間安定して日本付近を観測できるように設計されている。

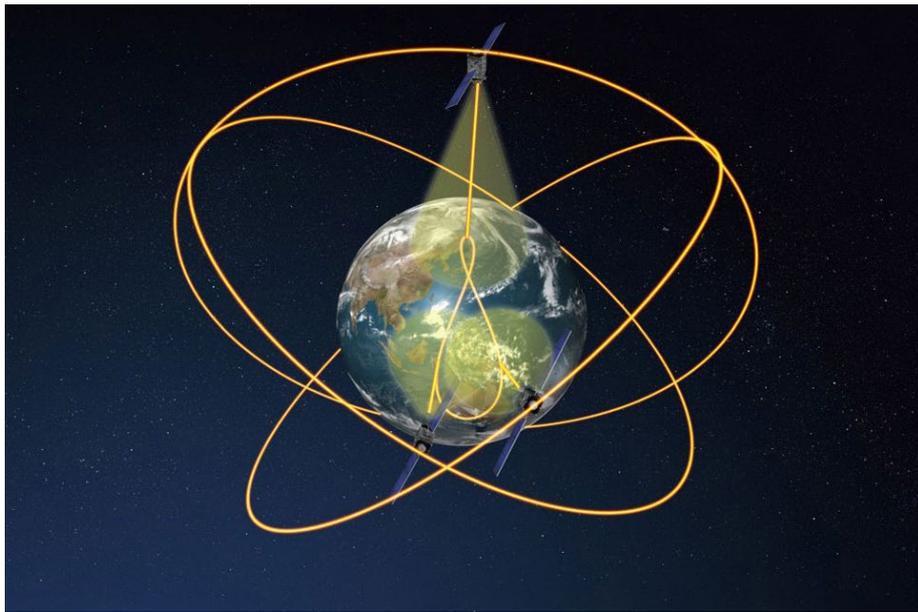


図 2.2 QZSS 衛星のイメージ図 (JAXA HP)

QZSS の衛星は2010年に初号機が打ち上げられ、2017年に2号機、3号機、4号機が打ち上げられた。3号機が静止軌道衛星であり、それ以外の3機が準天頂軌道衛星である。このQZSSは日本のより高精度で安定した衛星測位サービスを実現するために開発された。2023年度までには7機体制になることが予定されている。

どうしてQZSSが日本の測位システムをより高精度で安定したものとするかは、2.1.1節

で述べた GNSS 測位誤差に起因する。QZSS は先述の通り 24 時間高仰角で観測することができる。高仰角に位置する GNSS 衛星の電波の送受信は、建物や樹木による電波の妨害を受けにくく安定して行うことができる。したがって、QZSS 衛星で観測できる範囲は安定して可視衛星を増やすことができ、測位誤差が小さくなる。

また、QZSS はその衛星自体は少ないが、既存の GNSS、GPS と互換性を高めるために、GPS 衛星同様に L1、L2、L5 の 3 つの周波数の搬送波に軌道や時間などの情報をのせ、衛星ごとの固有のコードで変調して送っている。L6 (1278.75Hz) 信号という GPS 衛星にはなく、QZSS 独自の周波数帯のものもある。より高精度な測位情報を送信するもので、専用の受信機が必要である。具体的には、電子基準点の情報を用いて補正情報を計算し、現在位置を正確に求めるための情報を QZSS から送信する。

## 2.2 GNSS-TEC 観測

本節では前節で説明した GNSS を用いてどのようにして TEC を算出するか述べる。

TEC (Total Electron Content : 電離圏全電子数) とは衛星と受信機の視線方向、LOS (line-of-sight) 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 TECU ( $=10^{16}\text{el}/\text{m}^2$ ) で表される。本研究では特に衛星視線方向 (LOS) の TEC を斜め TEC (Slant TEC, STEC)、鉛直方向に積分した TEC を鉛直 TEC (Vertical TEC, VTEC) と表記する (図 2.3)。また、電離圏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 300 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。

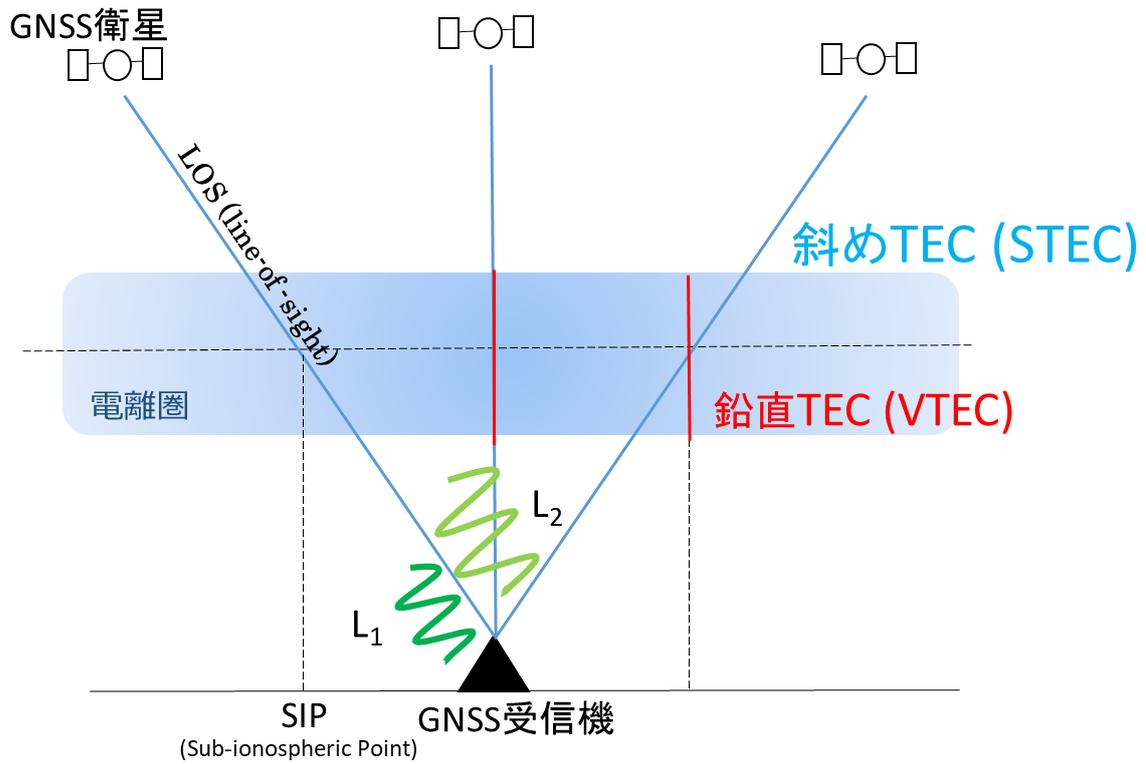


図 2.3 GPS 衛星と受信機、および IPP, SIP の模式図。STEC に視線の電離圏への入射角の余弦をかけることによって VTEC (図中の赤い線) に換算できる。

ここからは GNSS の生データからどのようにして STEC が算出されるのかを記述する。STEC は LOS に沿って電子数密度  $N_e$  を積分したものである。LOS を積分の経路  $s$  で表すと、

$$\text{STEC} = \int N_e ds \quad (2.1)$$

TEC を導出するために電離圏の屈折率について考える。ファイマン物理学 2 巻 6 章より、屈折率  $n$  は

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

$n$  : 屈折率

$N_e$  : 単位体積あたりの電子数

$q_e$  : 電子の電荷

$\varepsilon_0$  : 真空中の誘電率

$m_e$  : 電子の質量

$\omega_0$  : 媒質中で束縛される電子の共鳴角振動数

$\omega$  : 外から媒質に入る電磁波の角振動数

と表せる。電離圏の中で電子は自由電子として存在しているので、 $\omega_0 = 0$ と考えることができる。したがって、(2.2)式より電離圏の屈折率 $n_p$ は

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

$$n_p = 1 - \frac{a}{f^2} \quad \left( a = \frac{N_e q_e^2}{8\pi^2 q_0 m_e} \right) \quad (2.4)$$

(2.4)式から、屈折率の1からの差( $n_p-1$ )が、周波数の二乗に反比例することがわかる。ここで電離圏によって起こされるマイクロ波の遅延について考える。電離圏により衛星から受信機までマイクロ波が伝播する距離は、電離圏遅延により、真空中を伝播した場合に比べ、見かけ上の距離の差 $\Delta S$ が生まれる。これが電離圏遅延を長さの単位で表したものに相当する。 $\Delta S$ は屈折率 $n$ によってあらわすと、

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

となる。(2.5)式に(2.4)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta S &= - \int \frac{a}{f^2} ds \\ &= - \frac{b}{f^2} \int N_e ds \\ &= - \frac{b}{f^2} TEC \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、周波数 $f_1$ 、 $f_2$ で同時に観測していた場合、それぞれ $\Delta S_1$ 、 $\Delta S_2$ は(2.6)式より、

$$\Delta S_1 = - \frac{b}{f_1^2} STEC \quad (2.7)$$

$$\Delta S_2 = - \frac{b}{f_2^2} STEC \quad (2.8)$$

すなわち、電離圏遅延は周波数の二乗に反比例する。二つの式の差をとって変形すると

$$\text{STEC} = \frac{\Delta S_1 - \Delta S_2}{b} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.9)$$

となる。 $b$  は定数であり、 $\Delta S_1 - \Delta S_2$  は、距離で表した電離圏遅延の周波数による差である。GNSS は基本的にここで述べている電離圏遅延による測位誤差を除去するため複数の周波数で搬送波を送受信している。GPS や QZSS を例にとると、L1 と L2 の異なる周波数の搬送波が衛星から受信機へ送られている。L1、L2 の周波数をそれぞれ  $f_1$ 、 $f_2$  とする。L1 と L2 の位相に波長をかけて距離に変換し、この L1 と L2 の単純な距離の差を  $L4$  とする。 $b$  に適当な値を代入すると (2.9) 式は、

$$\text{STEC} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L4 \quad (L4 = L1 - L2) \quad (2.10)$$

となる。(2.10)式より、GNSS 衛星から発せられる 2 つの周波数の搬送波の位相差を単純な距離の差として表した値から STEC が求まることが分かる。

## 2.3 GPS と QZSS による TEC 観測の違い

本節では GNSS-TEC 観測における特徴及び前節で紹介した GPS と QZSS による TEC 観測の違いについて述べる。QZSS は日本の測位の高精度化のために開発されたが、GNSS-TEC 観測にも大いに有用である。この理由について説明する。GPS と QZSS の大きな違いはその衛星の軌道である。特に GNSS-TEC 観測において静止衛星の存在が重要である。図 2.4 は QZSS の静止衛星と GPS 衛星による GNSS-TEC 観測の違いをわかりやすくまとめたものである。

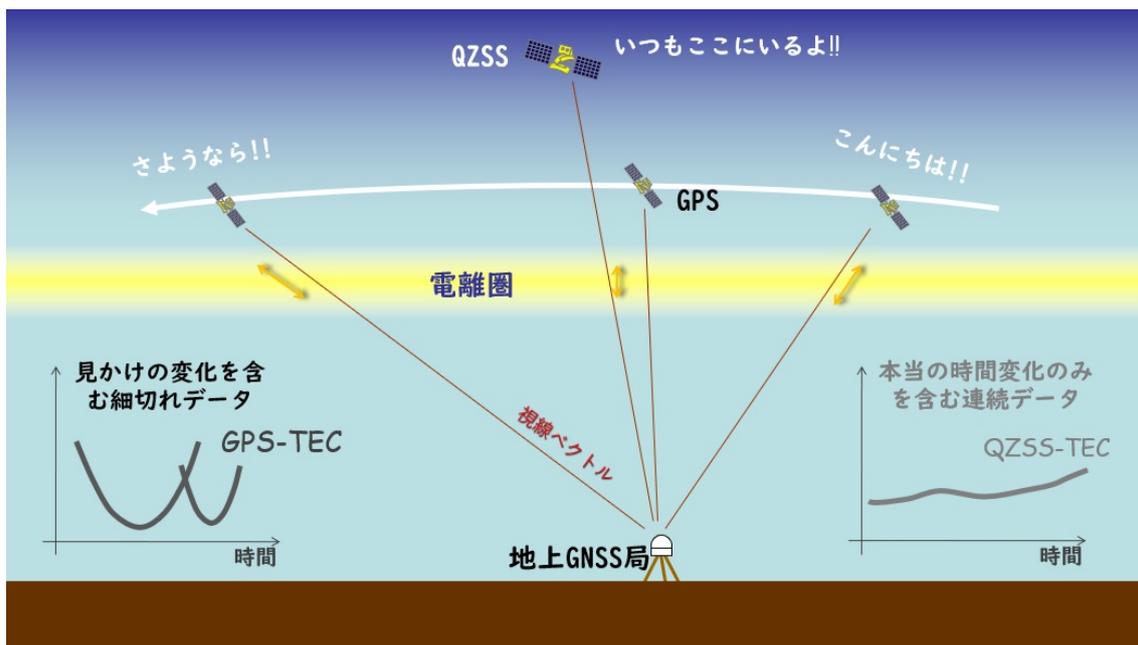


図 2.4 GPS 衛星と QZSS 静止衛星による TEC 観測の概略図

従来の GPS 衛星等の GNSS 観測点から移動して見える GNSS の生データから算出される TEC 変動には、3つの要因がある。電離圏の時間的な変化、空間的变化、衛星仰角の変化に伴う搬送波が電離圏を通過する距離の変化の3つである。電離圏擾乱を観測する場合に必要な情報は電離圏の時間的な変化だけであるが、GNSS 衛星と観測点の成す視線ベクトルが常に変化しているので、それに伴う見かけの変化を含んでしまっている。衛星仰角に伴う変化については STEC から VTEC に変換することで除去することができる。STEC と VTEC の関係は以下ようになる。

$$\text{STEC}(t, \zeta) = \frac{\text{VTEC}(t)}{\cos \zeta} + d \quad (2.11)$$

$t$ : 時間

$\zeta$ : LOS と観測局がなす角度

$d$ : 周波数間バイアス

この周波数間バイアス(Inter-frequency bias, IFB)とはアンテナや受信機のハードウェアの設計によって生じる2つの周波数の信号間の経路長の差によって生じる時間差である。この IFB は衛星と地上局に固有なものであり、衛星の IFB や一部の地上局の IFB は公開されているが GEONET 局のバイアスは一般に公開されていない。その場合は様々な手法を用いてバイアスをあらかじめ求めたり、(2.11)式を用いて最小二乗法によって推定したりする必要

がある。このバイアスや衛星や観測局の位置情報等あれば、STEC から VTEC に変化することができるが、そうした場合でも視線が電離圏を貫く点は空間中を移動してしまうため、電離圏の空間的な変化を取り除くことはできない。

一般的に、1 機の GPS 衛星を連続して観測できる時間はせいぜい数時間である。例として図 2.5 に 2019 年 1 月 1 日におけるつくばの観測局の 1 日の STEC 変動と VTEC 変動を示した。1 本の線が各 GPS 衛星のデータを示しており、横の数字は GPS 衛星の衛星番号である。1 機の GPS 衛星による TEC データが長くても 10 時間以内ということがわかる。本研究で扱うような LSTID のような電離圏擾乱が数時間続くものを観測する場合、GPS1 機から得られる TEC データだけでは限界がある。

一方、視線ベクトルの変化がない静止衛星を用いて TEC 観測をした場合、STEC のデータは電離圏の時間変化成分だけを示す。また、1 つの衛星から連続した TEC データが得られるようになる。図 2.6 は図 2.5 と同様に QZSS を用いて 1 日の STEC 変動をプロットしたものである。静止衛星によって連続した TEC データが得られることがわかる。また、準天頂軌道衛星も GPS の準同期軌道衛星よりも 1 つの衛星で長時間観測していることもわかる。

QZSS 静止衛星は 2017 年に打ちあがったが、GEONET では 2019 年 9 月 11 日以降安定して QZSS4 機のデータが公開されている。図 2.7 は実際の 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日の稚内 (940001 局) の連続 TEC データを示す。これまでも GIM 等でモデルを使って計算された連続した TEC データ等は作成されていたが、静止衛星を使うことで初めて生のデータとして連続 TEC データを取得できるようになった。モデルによって決まった TEC 変動は細かな電離圏擾乱による影響は省かれてしまっており、小さな電離圏擾乱を観測することは難しかった。この QZSS の静止衛星から得られた連続 TEC データは従来の GPS-TEC よりより電離圏の様子を研究することに役立つだろう。

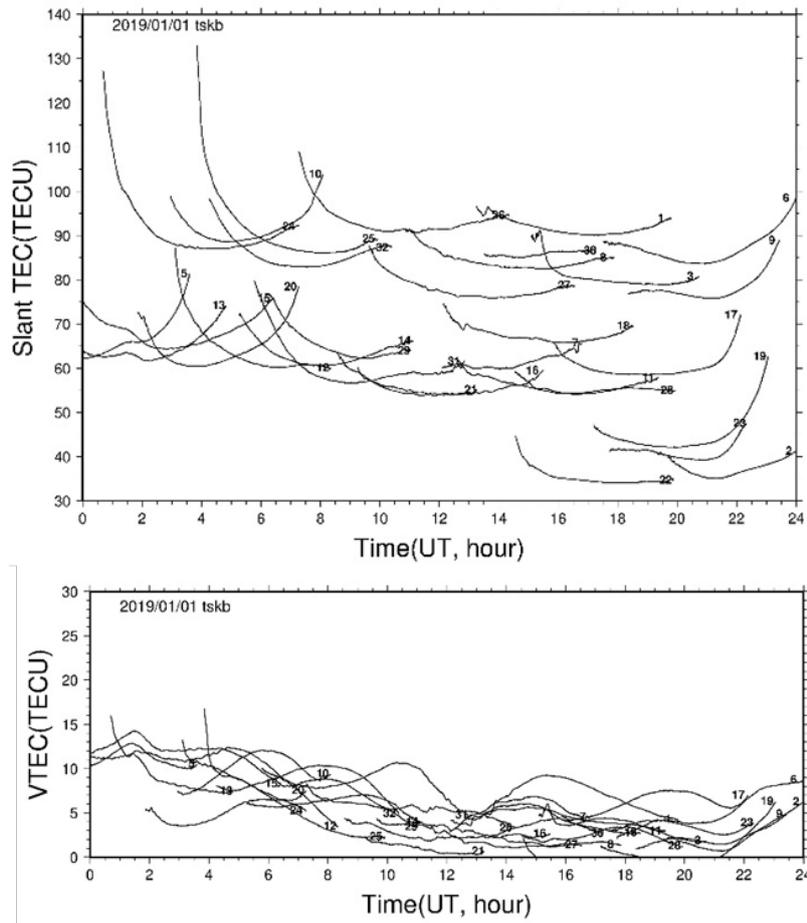


図 2.5 2019/1/1 の tskb 局において、GPS 衛星を用いて得られた STEC の変動（上図）と VTEC の変動（下図）。

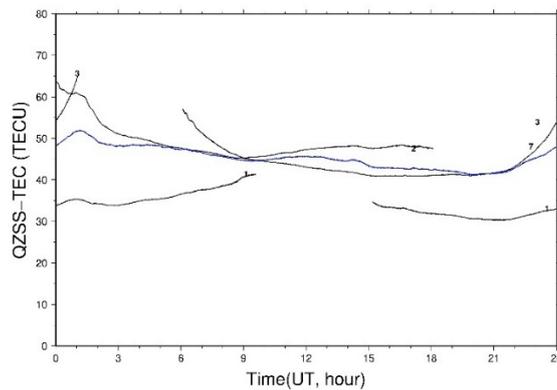


図 2.6 2019/1/1 の 940001 局（稚内）における QZSS の静止衛星(PRN7)および準天頂軌道衛星(PRN1,2,3)による STEC 変動。青線は静止衛星のデータを示す。

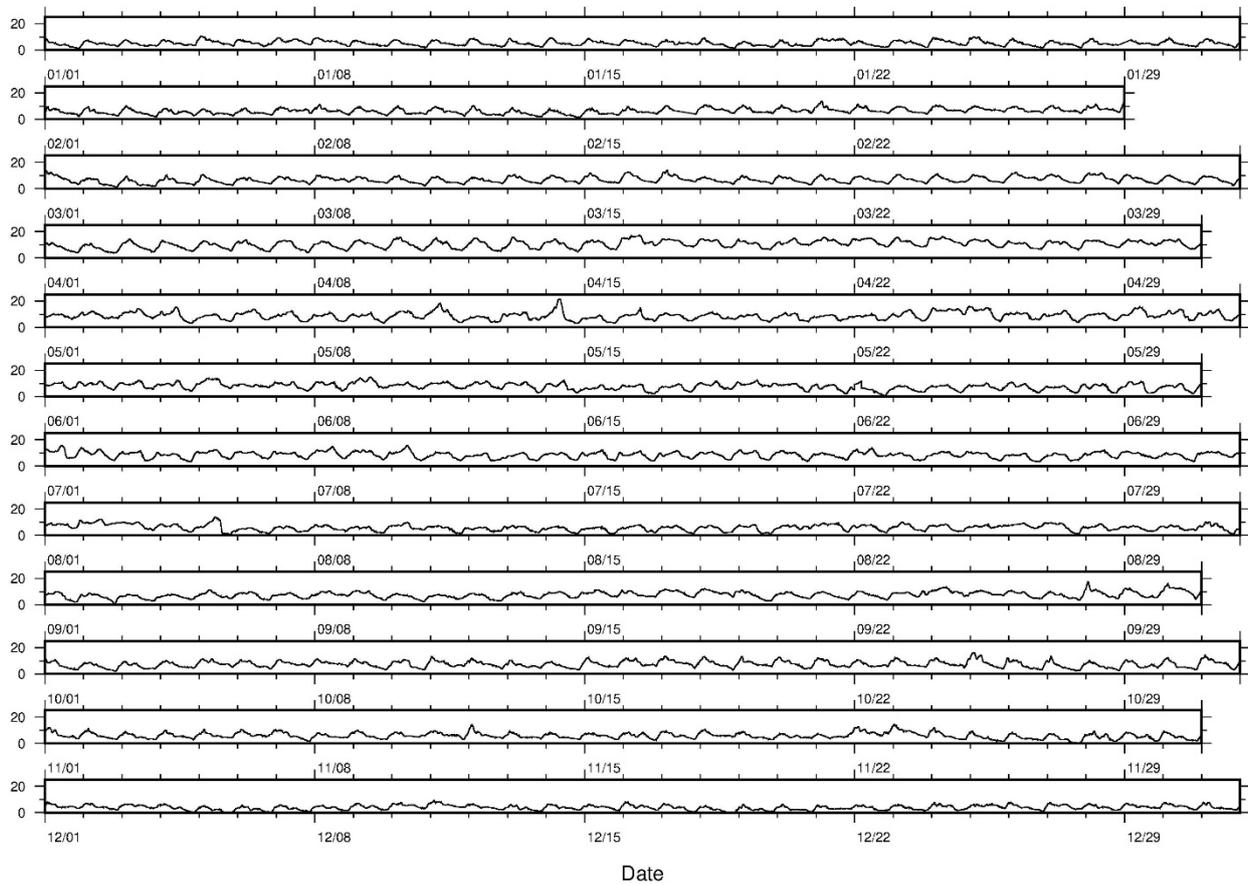


図 2.7 QZSS 静止衛星を用いて 940001 局で得られた連続 TEC データ (2019 年 1 月 1 日から 12 月 31 日)

### 3 GPS-TEC 観測による LSTID と AE 指数の比較

GNSS-TEC 観測で LSTID を観測した場合、TEC の日変化に加えて波のような擾乱がみえる。また、LSTID は北から南向きに伝播するので、複数の観測点や衛星の TEC 変動の時間差から LSTID が発生しているかわかる。しかし、先述の通り衛星の視線ベクトルが常に変化する GPS-TEC 変動から LSTID を同定するのは難しい。そこで本節では LSTID の発生源であるオーロラサブストームの強さを示す AE 指数を用いて LSTID の発生を予測し、GPS-TEC 変動と比較した。

#### 3.1 AE 指数

AE (Auroral Electrojet) 指数はオーロラ帯に位置する地磁気観測点のデータを用いてオーロラジェット電流の強さを示したものだ。オーロラ帯に位置する 12 点の経度方向におおよそ等間隔に配置された地磁気観測点 (図 3.1) の地磁気変動の南北成分(H)を用いて算出される。地磁気変動の南北成分は電離層中の東西方向の電流に大きく寄与する。東向きのジェット電流は地磁気の南北成分を正、つまり北向きに変動させ、西向きのジェット電流は南北成分を負、つまり南向きに変動させる。東向きのジェット電流の指標となるものを AU 指数、西向きのジェット電流の指標となるものを AL 指数と呼ぶ。2 つの指標は東西方向それぞれのジェット電流の最大値を示しており、この AU 指数と AL 指数の差をとったものを AE 指数という。このように算出された AE 指数はオーロラサブストームに伴うオーロラジェット電流の変動を示す。オーロラサブストームが活発に発生しているほどオーロラジェット電流はよく流れるので AE 指数はオーロラサブストームの活動度を表す指標になる。

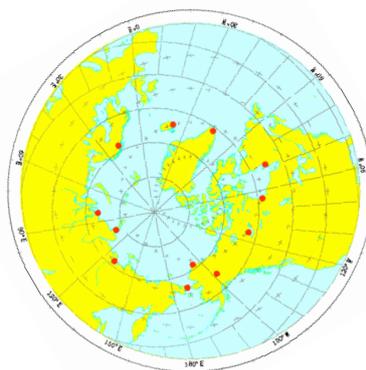


図 3.1 赤い丸が AE 指数を算出される際に使用される地磁気観測点を示す (京都大学世界地磁気資料センター HP より)。

本研究では AE 指数のデータは京都大学の世界地磁気資料センターで公開されている AE 指数の 1 分値のデータを用いた。本研究では AE 指数の値が大きくオーロラサブストームの活動が活発であるとき、日本に LSTID が伝播する可能性が高いと仮定して考えた。図 3.2 は 2011 年から 2017 年の AE 指数を示したものである。このように AE 指数は年間、日によって変動量が大きく違うことがわかる。今回はオーロラサブストームが活発であるという指標として AE 指数の閾値として 2000 nT を設定し、図 3.2 では 2000 nT を超えるような時間の箇所に赤い点をプロットしている。

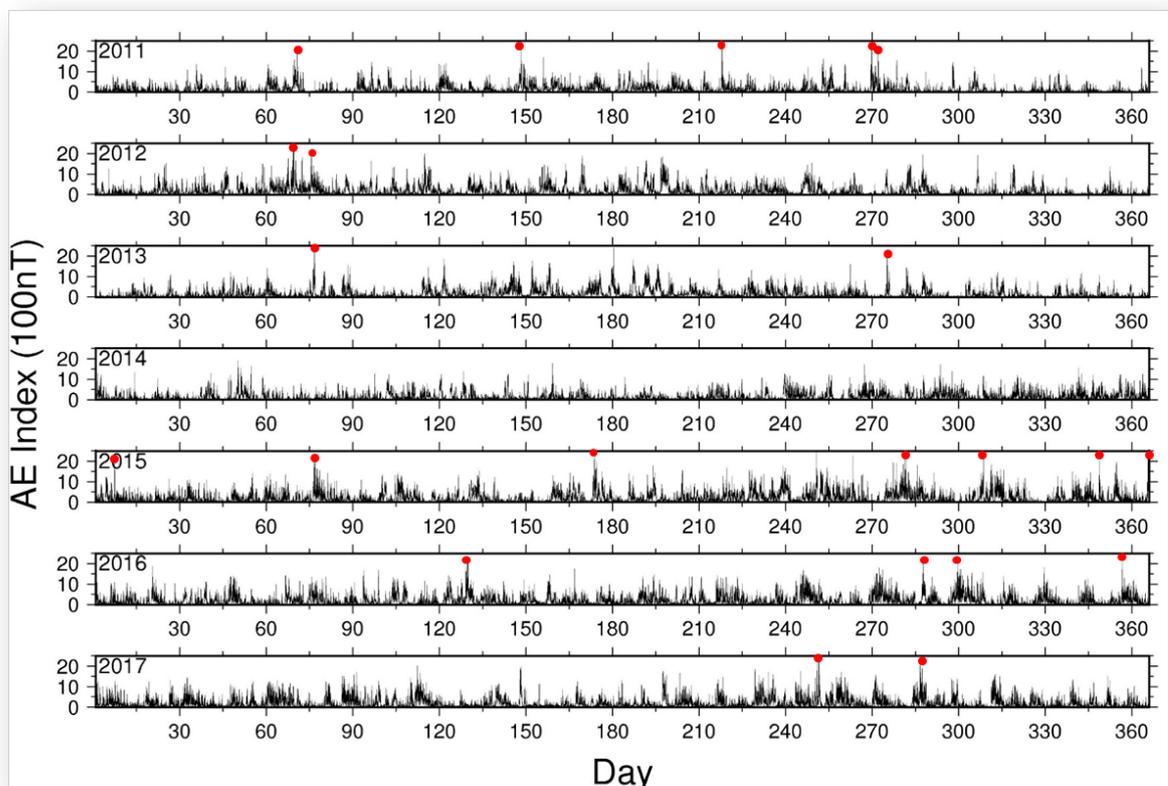


図 3.2 2011 年から 2017 年の AE 指数を示した図。赤丸は AE 指数が 2000 nT を超えた点を示す。

### 3.2 観測した 5 例の LSTID

始めに本研究で使用した GPS-TEC データについて説明する。先述の通り GPS の生データから得られるのは STEC データであり、衛星の仰角の変化の成分等を含む。LSTID による TEC

変動を観測するには衛星仰角による変化を除いたVTECデータにするのが望ましい。しかし、STEC から VTEC データに変換するには衛星の仰角だけでなく、周波数間バイアスのデータを除去する必要がある。GEONET の観測点では基本的に公開されていない。そのため、本研究ではバイアスが公開されている IGS (International GNSS Service、国際 GNSS 事業) 点であるつくばの観測点の GNSS データを用いて TEC 変動を観測した。

2011 年から 2017 年の間で AE 指数が 2000 nT を超えるようなときは 23 例あった。LSTID の伝播速度が大体数百 m/s から 1000 m/s と知られており、日本北方のオーロラ帯は日本からおおよそ 3000 km の距離があることを踏まえると、オーロラ帯で LSTID が発生してから日本に到達するためにかかる時間は 1-2 時間と推測される。今回は AE 指数のピークとなる時間にオーロラサブストームが活発になり LSTID が発生すると考え、AE 指数がピークのときから数時間後までのつくばの観測点での VTEC 変動を比較した。その結果 23 例中 5 例の場合、AE 指数のピーク後 1,2 時間後に観測点で LSTID が発生していることを観測した。図 3.3 から図 3.7 に観測した 5 例について AE 指数と tskb 局の VTEC を示す。VTEC 変動については 1 本の線が各 GPS 衛星による TEC 変動を示し、横の数字は衛星番号を示す。また、赤く囲んだ範囲で LSTID と思われる TEC 変動が見られる。

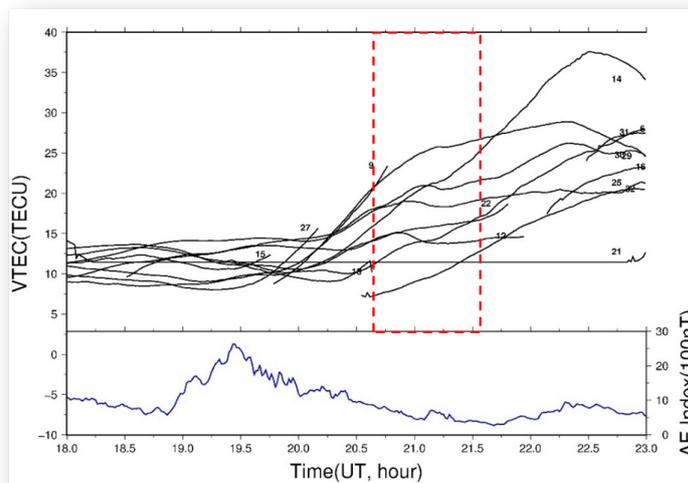


図 3.3 2011/9/26 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動

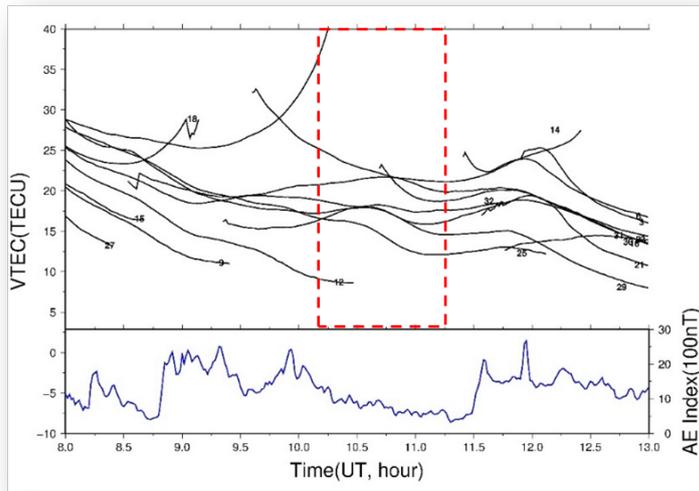


図 3.4 2012/3/9 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動。

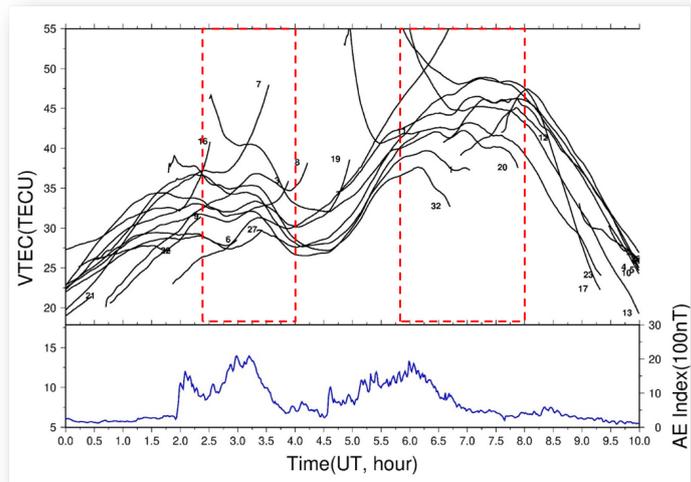


図 3.5 2013/10/2 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動。

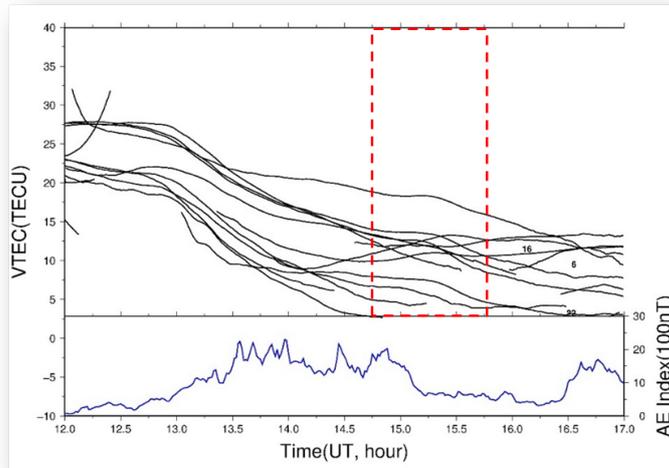


図 3.6 2013/3/17 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動。

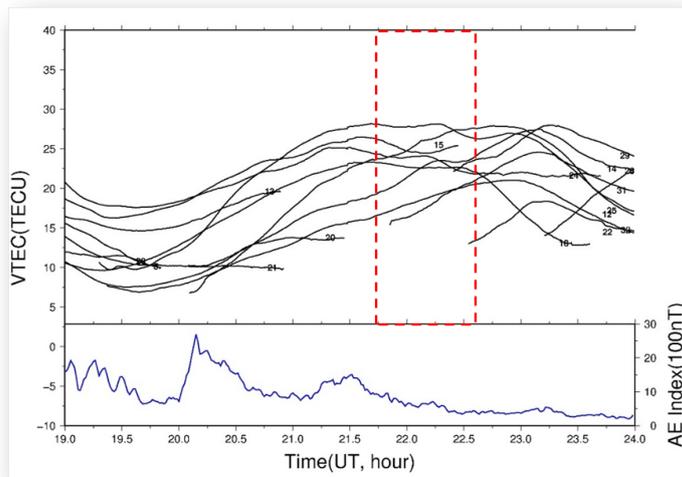


図 3.7 2013/6/22 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動。

GPS-TEC の LSTID による変動はわかりづらいので、比較として LSTID が発生していない場合についても図 3.8 に示す。図 3.3 と比較してみると、どちらも 20、21UT あたりから日変化として全ての衛星で一様に TEC 量が増加している。図 3.8 で示す例では直線的に増加しているが、図 3.3 で示す例では 21UT 付近で明らかに急激に増加し、それに続いて少し減少しており、LSTID による TEC 変動が発生していることがわかる。

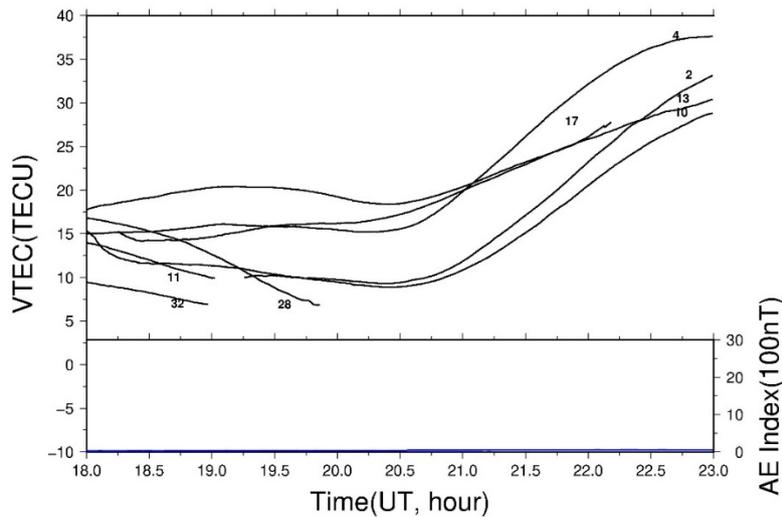


図 3.8 LSTID が発生していない 2014/3/16 における AE 指数と tskb 局の VTEC 変動。図 3.3 で見られた LSTID 特有の VTEC の増減が見られない。

### 3.3 2011 年 9 月 26 日の LSTID

本節では 2011 年 9 月 26 日に観測した LSTID についてその伝播の様子や伝播速度等を詳しく解析した。

まず GEONET 観測点全点を用いて、LSTID がどのように伝播にしている様子を捉えた。この解析方法は Ozeki & Heki (2010) の第 3 章を参考に行った。TEC は基本的に日変化するので時間の関数と考えることができる。ここで  $VTEC(t)$  が (3.1) 式のように時間の二次方程式に従って変化すると仮定する。

$$VTEC(t) = at^2 + bt + c \quad (3.1)$$

ここで、STEC と VTEC の関係式である (2.1) 式から (3.1) 式の  $a$ 、 $b$ 、 $c$  とバイアスである  $d$  を STEC データから推定することができる。これより推定できる (2.1) 式の STEC のモデルと観測されたデータの差を電離圏電子数の異常と考え、その値の大きさを観測局ごとに色を与え、SIP の場所に示す。これにより、GEONET の観測局で TEC 異常が起きているところが面的に把握できる。この方法を使って LSTID の伝播の様子を図 3.9 に示す。20 UT から負の TEC 異常が北から南西向きに伝播しており、その後正の TEC 異常が同じように伝播している LSTID の特徴的な伝播の様子がわかる。

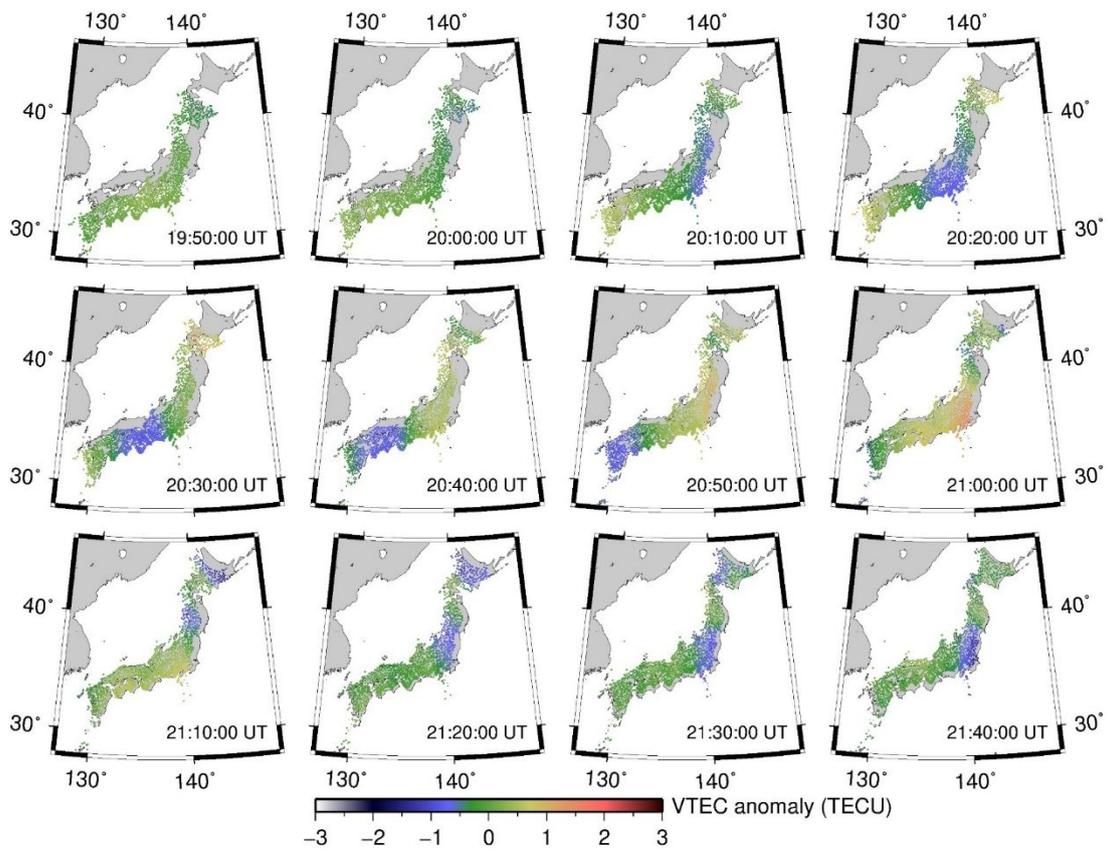


図 3.9 2011/9/26 に発生した LSTID の伝播の様子。GPS 衛星 30 番を用いた。

次に簡単な方法で LSTID の南向きの伝播速度も計測した。伝播速度を求めるためにつくばの観測点と同様に IGS 点でバイアスが公開されている水沢の観測点のデータを用いた。Tskb 局と mizu 局の位置を図 3.10 に示す。二つの観測点の直線距離は約 330 km で、南北方向に 300 km である。2011/9/26 の LSTID は複数の衛星で観測されているが、ここでは一番 TEC 変動の波が見える GPS30 番衛星によるデータを使用した。図 3.11 に二つの観測点の GPS30 番衛星による TEC 変動を示す。この波のピークの最大値の時刻の差は 0.15 時間であった。つまり水沢の観測点からつくばの観測点まで LSTID が到達する時間が 0.15 時間で、二つの観測点の位置からこの LSTID の速度は 610 m/s と計算できる。波の形から周期がおおよそ 30 から 40 分と判断できるので、Tsgawa et al. (2004) に指摘される伝播速度と周期の関係性にも当てはまる。また、AE 指数のピークからこの LSTID がつくばの観測点で観測されるのは 1.5 時間後である。先ほど求めた南向きの伝播速度とあわせて考えれば、1.5 時間前は、この LSTID の電離圏擾乱はつくばの観測点から北に 3300 km 程度離れたところで発生していたと考えられる。つくばの観測点から北に 3300 km 離れた場所は同経度で緯度 66 度あたりのオーロラ帯にあたる。したがって、この AE 指数が高いときにオーロラサブスームが活発になり、日本に LSTID が伝播してきていたことがわかった。

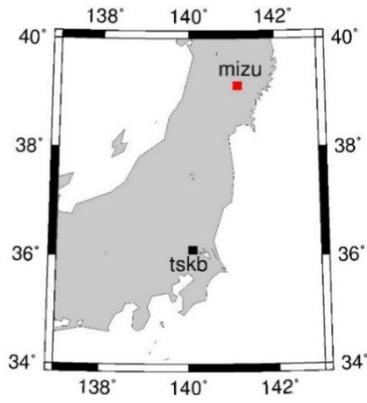


図 3.10 つくばと水沢の観測点の位置

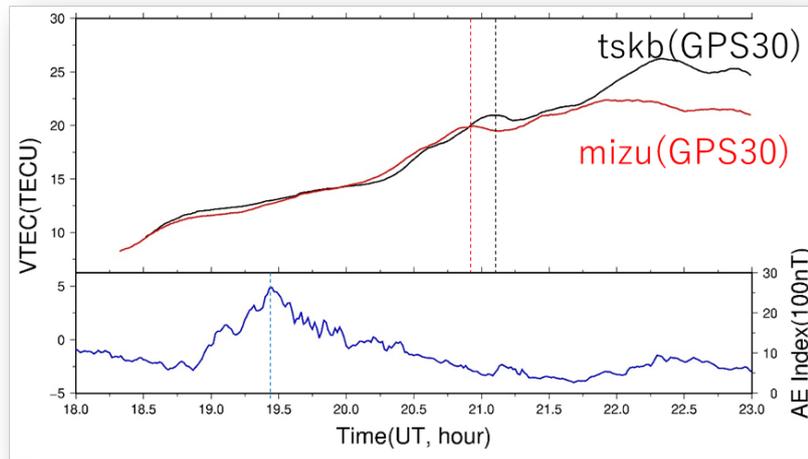


図 3.11 2011/9/26 に発生した LSTID によるつくば(黒線)と水沢(赤線)の観測点における GPS30 番衛星による VTEC 変動。それぞれの破線は波の正のピークの時刻を示す。

## 4 QZSS-TEC 観測とオーロラ帯の地磁気変動

前章の GPS-TEC 観測では LSTID の同定が難しく、変動がわかりづらかった。そこで、本章ではまず QZSS の静止衛星から得られた連続 TEC データから LSTID を同定し、その南向きの伝播速度を求めた。そして、そこから予想されるオーロラ帯で LSTID が発生している時間帯を予測し、実際のオーロラ帯の地磁気の南北成分と比較した。

### 4.1 使用した地磁気データ

前章では AE 指数を用いて、LSTID の発生源であるオーロラサブストームを考え、TEC 変動と比較した。だが、AE 指数は 2018 年 2 月以降のデータがいまだに公開されていない。そこで本章では、オーロラ帯に位置する地磁気観測点の地磁気の南北成分のデータを用いた。本研究で使用した地磁気データはすべて、SuperMAG(<http://supermag.jhuapl.edu/>)で公開されている地磁気観測点のデータである。特に使用した地磁気観測点の位置を図 4.1 に示す。

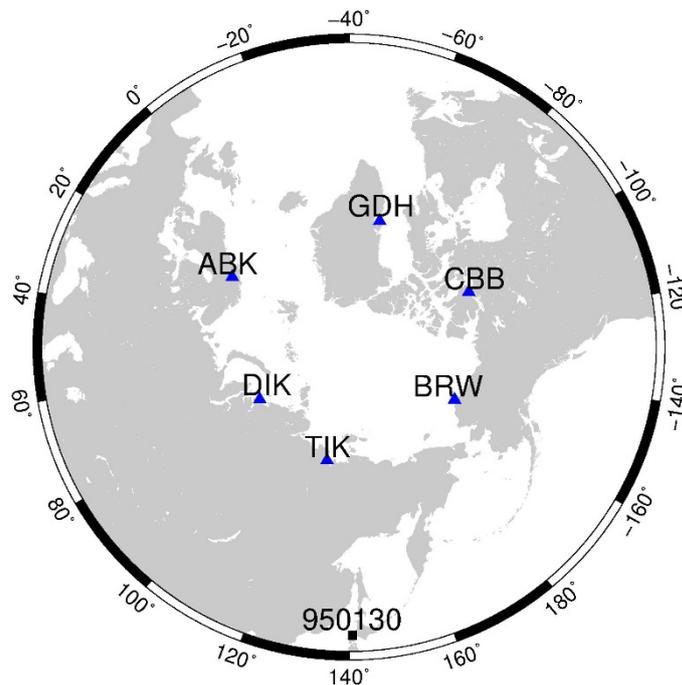


図 4.1 使用した地磁気観測点 (▲) と GNSS 点 (■)。

## 4.2.LSTID 同定方法

LSTID が伝播してくると TEC には山と谷が生じるが、それらが生じる時刻は伝播方向の先にある局ほど遅れる。図 4.2 はほぼ同経度の GEONET 観測点の QZSS 静止衛星による STEC 変動を北から南へプロットしたものである。波の到着が南の局ほど遅延している様子がわかる。

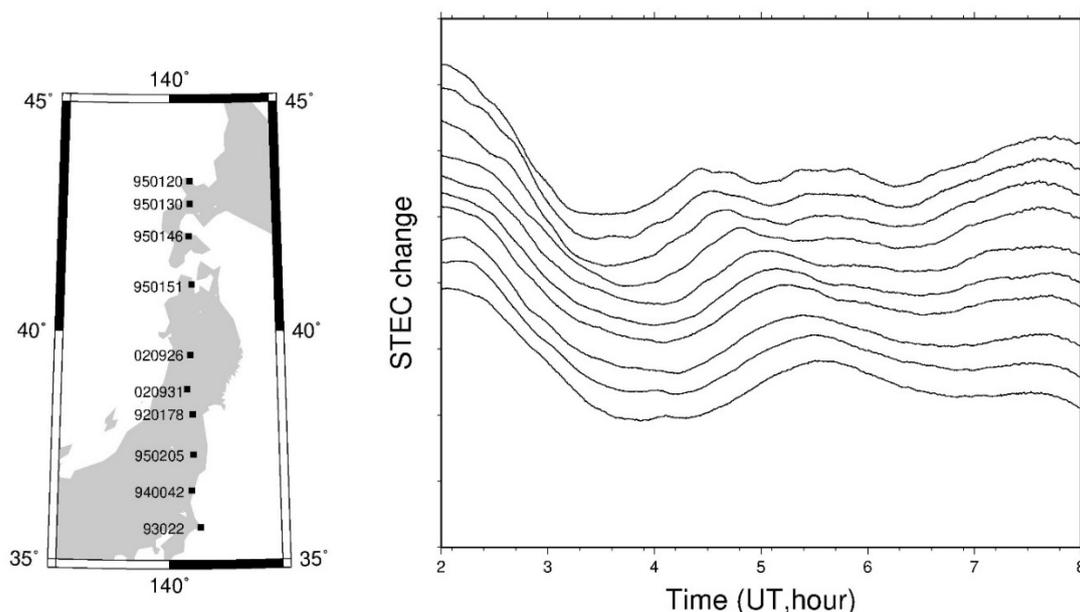


図 4.2 観測に使用した 10 の GEONET 観測点（左図）と QZSS 静止衛星による STEC 変動（右図）。右図は北にある観測点から順に上からプロットしている。

ここで、LSTID を同定するために同経度で異なる緯度の 3 局の GEONET 観測点の連続 TEC データを使用した。QZSS 静止衛星のデータは 2018 年 10 月から 12 月の 3 ヶ月間を使用した。2.2 節で述べたように QZSS の静止衛星を使用する場合、STEC でも LSTID による TEC 変動が十分に捉えることができる。しかし他の観測局のデータと比較する場合、観測点ごとに静止衛星の仰角は異なり TEC 量が増減するため、VTEC に変換する必要がある。前述の通り、GEONET の観測点では IFB が公開されないため GIM を用いてバイアスを推定した。観測点ごとにこのバイアスは異なるので、月初めの日の STEC 変動を VTEC 変動に変換し、GIM による観測点付近の TEC 変動と比較し、できるだけ GIM のデータと一致するようにバイアスを推定した。そして、それを月全体のデータに補正をかけ、月ごとに VTEC 変動に変換した。

求められた3局のVTEC変動のデータをOUTからそれぞれ4時間と6時間ごとに区切り、それぞれの相互相関係数 $C_{xy}$ を(4.1)式を用いて計算した。相互相関係数が最大になる時間を $\tau$  (時間ラグ) をTEC変動の観測局同士の遅延時間と考えると、相互相関係数が高く遅延時間がLSTIDの特徴と一致するとき、LSTIDが発生していると考えられる。相互相関係数はそれぞれ950130局と020926局、020926局と940042局、950130局と940042局で計算した。

$$C_{xy}(\tau) = \sum_{t=1}^T x(t)y(t+\tau) \quad (4.1)$$

計算した結果、その三つの遅延時間がLSTIDの特徴と一致するものをLSTIDとして同定した。

### 4.3 観測したLSTID

相互相関を計算した結果、LSTIDと思われるTEC変動の事例を2018年10月から12月の間で14例を観測した。実際にLSTIDを観測した事例の相互相関係数を計算した結果を図4.3に示す。そして、観測した14例のLSTIDの時間帯と相関係数から推定される伝播速度と950130局の位置からオーロラ帯でLSTIDが発生していたと思われる時間を表3.1に示す。伝播速度については計算した3つの遅延時間から算出される伝播速度の最大値と最小値をとって、その伝播速度とした。

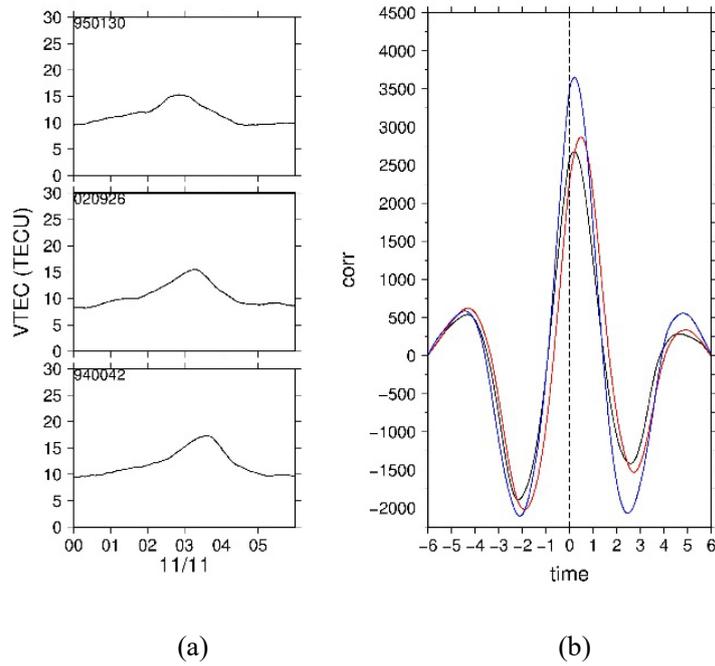


図 4.3 (a)比較した 3 局の VTEC 変動を示した図。(b)相互相関の値と時間を示した図。それぞれ黒線が 950130 局と 020926 局、青線が 020926 局と 940042 局、赤線が 950130 局と 940042 局の相互相関係数を示す。

表 4.1 観測した LSTID の推定される伝播速度とオーロラ帯で LSTID が発生していたと思われる時間

観測日時	伝播速度(m/s)	推定時間(h)	観測日時	伝播速度(m/s)	推定時間(h)
10/14(0-4UT)	230 - 650	1.4 - 3.9	11/11(0-6UT)	370 - 450	2.0 - 2.4
10/15(0-4UT)	370 - 580	1.5 - 2.4	11/18(0-4UT)	290 - 580	1.5 - 3.1
10/16(0-6UT)	640 - 910	1.0 - 1.4	11/20(0-4UT)	370 - 490	1.8 - 2.4
10/27(0-4UT)	220 - 290	3.1 - 4.0	11/22(0-4UT)	230 - 290	3.1 - 3.9
10/29(0-6UT)	420 - 690	1.3 - 2.1	12/4(0-6UT)	530 - 700	1.3 - 1.7
11/5(0-6UT)	610 - 1230	0.7 - 1.5	12/5(0-6UT)	280 - 390	2.3 - 3.2
11/6(0-4UT)	260 - 350	2.5 - 3.4	12/8(16-20UT)	550 - 680	1.3 - 1.6

Tsugawa et al. (2004)で指摘されている LSTID の水平伝播速度はおおよそ 200 m/s から 800 m/s である。表 4.1 から本研究で観測された LSTID の南向きの伝播速度は  $480 \pm 225 \text{ m/s}$  であ

るのでおおよそ一致する。

#### 4.4 TIK 局の地磁気南北成分との比較

前節で推定されたオーロラ帯で LSTID が発生したと思われる時間帯の地磁気データと比較した。まず日本の北で一番近いオーロラ帯に位置する地磁気観測点 TIK（ロシア）の地磁気データと比較した。ここで、LSTID が観測開始の時刻は最初に観測できる LSTID の TEC 変動の波のピークに当たる時間を基準として、その基準から前 1 時間の時間帯を GNSS 観測局での LSTID の観測開始時間と考えた。その観測開始時間から推定した伝播にかかった時間を差し引いて、LSTID がオーロラ帯で発生したと思われる時間帯を推定した。図は上が TIK 局の地磁気南北成分、下は 950130 局の VTEC 変動をプロットしている。黒い破線に囲まれた時間帯は LSTID を観測開始した時間帯を示し、赤い破線に囲まれた時間帯は推定されるオーロラ帯で LSTID がしたと思われる時間帯を示す。

地磁気との比較の結果、観測した 14 例のうち TIK 局で実際に地磁気南北成分の擾乱が確認されるものは 4 例であった。観測した 4 例を図 4.4 に示す。

次に LSTID がオーロラ帯で地磁気擾乱が発生していたと予想される時間帯に TIK 局で地磁気南北成分に変動がなかった 14 例中 10 例についても代表して図 4.5 に 4 例ほど結果を示す。

すべての場合において、推定される時間帯に地磁気変動は発生していない。しかし、図で示した 4 例中 3 例は推定される時間帯より 2 から 4 時間ほど前に地磁気変動が発生している。また、10 月 29 日に日本で観測した LSTID の例については、その前後で TIK での地磁気はまったく変動していない。

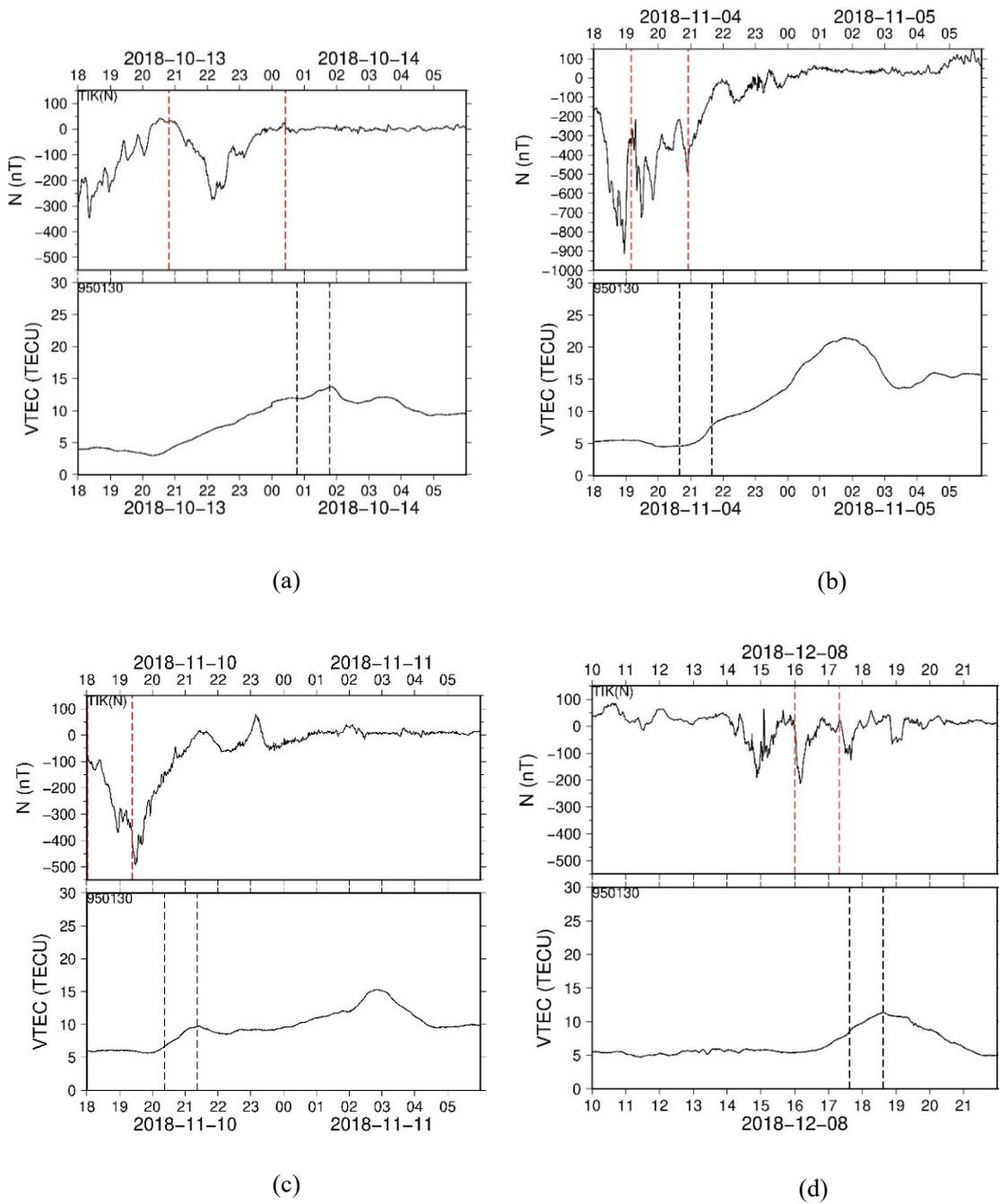


図4.4 TIK局の地磁気南北成分(上図)と950130局のVTEC変動(下図)。赤い破線で囲まれた時間帯はLSTIDを励起したオーロラが発生したと推定される時間帯を示す。黒い破線で囲まれた時間帯は950130局でLSTIDを観測開始した時間帯を示す。(a)2018/10/14、(b)11/5、(c)11/11、(d)12/8に観測したLSTIDの前後の磁場(TIK)とTEC(950130)の変動を示す。

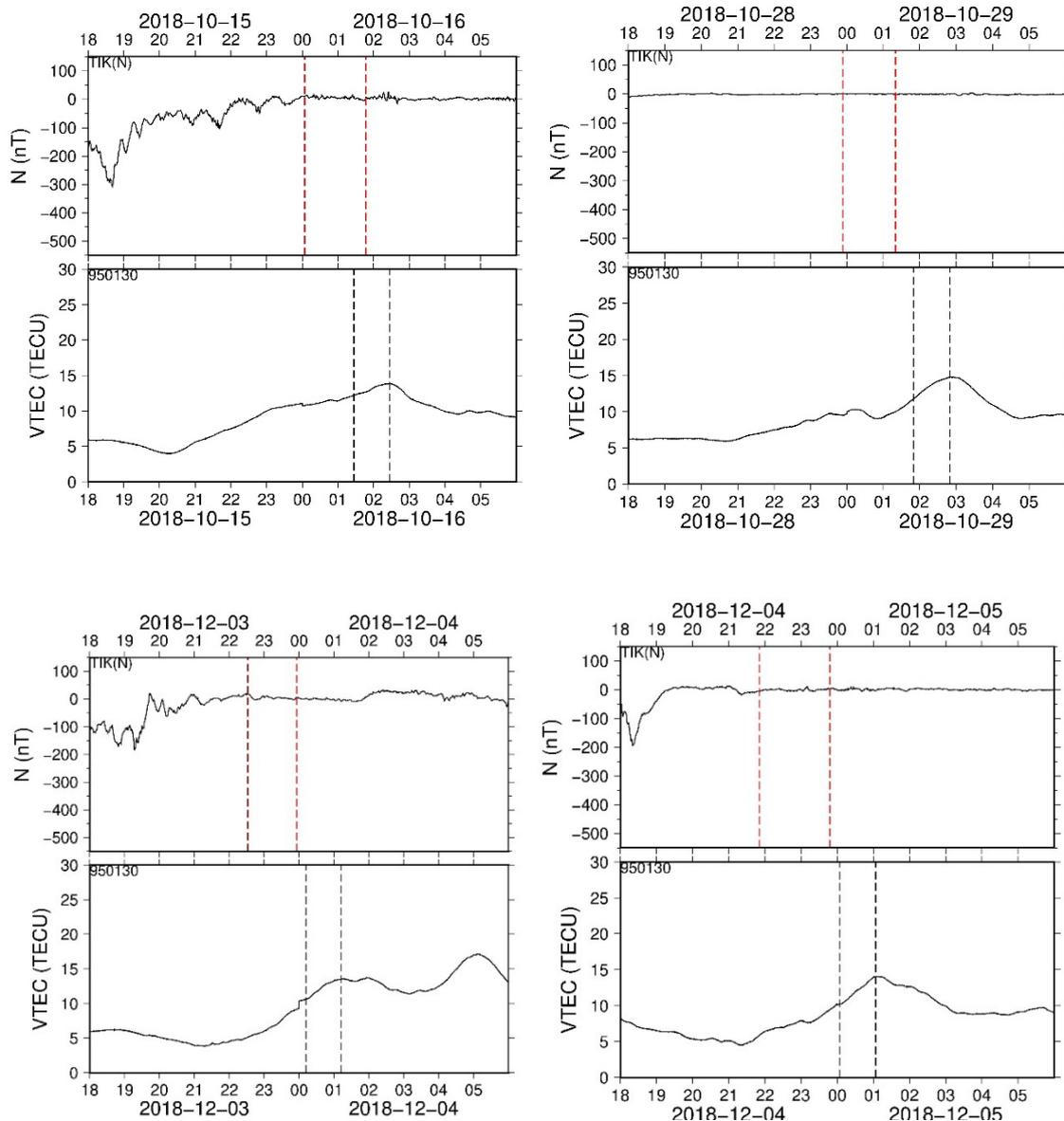


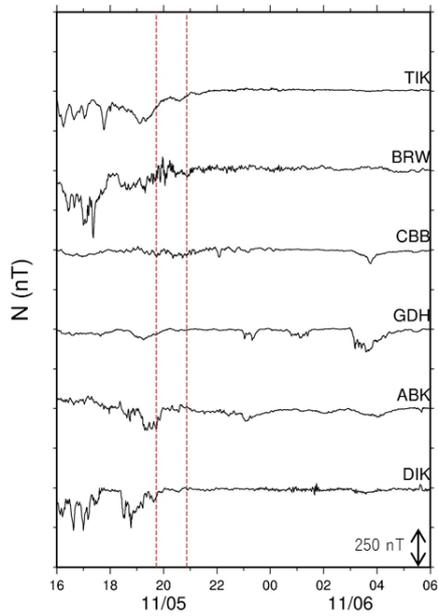
図 4.5 TIK 局の地磁気南北成分(上図)と 950130 局の VTEC 変動(下図)。黒い破線で囲まれた時間帯は 950130 局で LSTID を観測開始した時間帯を示す。赤い破線で囲まれた時間帯は、日本の LSTID 発生時刻から逆算してオーロラ帯で LSTID が励起されたと推定される時間帯を示す。

#### 4.5 他の地磁気観測点との比較

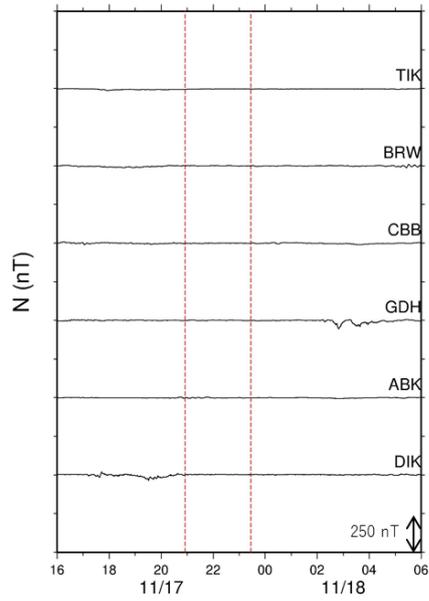
LSTID は基本的に南向きに伝播するが、真南に伝播するのではなく、東西方向にも広範囲に伝播される。TIK 局はほぼ日本の真北方向に位置する地磁気観測点である。また、オーロラサブストームは局所的に発生することがわかっているので、TIK 局以外の観測点付近でオーロラサブストームが発生し、LSTID が日本まで伝播されている可能性がある。したがって、

TIK 局以外のオーロラ帯に位置する 5 点の地磁気観測点の地磁気南北成分とも比較してみました。

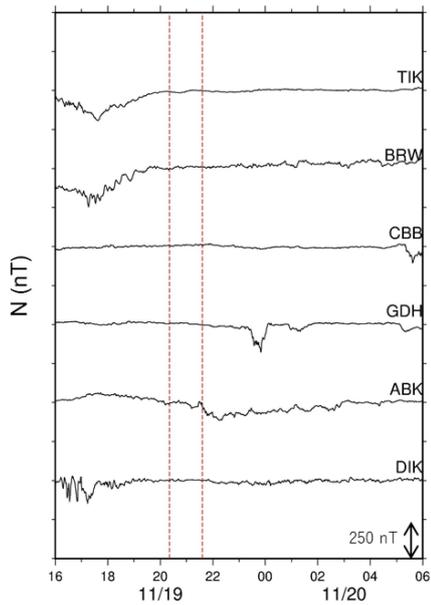
その結果を代表として 10 例の中から 11 月の 4 例について図 4.6 までに示す。TIK 局だけではなく他の 5 点の地磁気観測点の地磁気南北成分についても地磁気擾乱が推定される時間帯には有意に地磁気変動が発生していないことがわかる。また、図 4.6(a)(c)で示される 11 月 6 日と 11 月 20 日のものは推定される前の時間に複数の局で地磁気変動がみられる。図 4.6(a)11 月 6 日は 16-19UT において TIK 局以外でも BRW、ABK、DIK 局で地磁気変動が生じている。図 4.6(c)11 月 20 日は 16-18UT にて TIK、BRW、DIK 局で地磁気変動が生じている。同様に推定される時間帯に地磁気擾乱が発生していないが、その時間帯前後に地磁気擾乱が発生している日は 2018 年 10 月 15 日、10 月 16 日、12 月 4 日、12 月 5 日の観測例で観測できた。また、図 4.6(b)(d)で示すような地磁気擾乱が推定される時間帯の前後数時間においても地磁気変動が生じていないような観測例は 10 月 27 日、10 月 29 日、11 月 18 日、11 月 22 日において観測した。



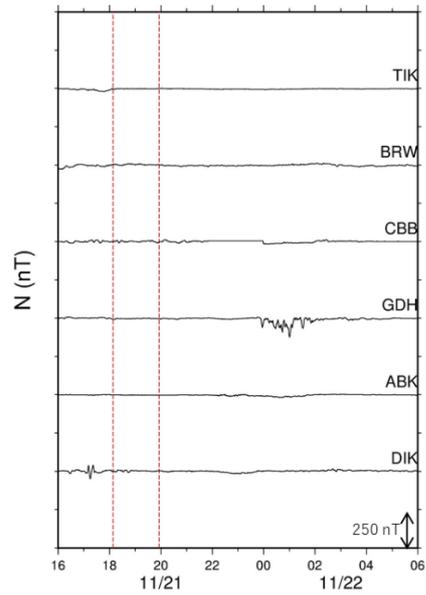
(a)



(b)



(c)



(d)

図 4.6 6点 (TIK, BRW, CBB, GDH, ABK, DIK) の地磁気観測点の地磁気南北成分。赤い破線で囲まれた時間帯は 4.3 節でオーロラ帯において LSTID が発生したと推定される時間帯を示す。(a)2018/11/6、(b)11/18、(c)11/20、(d)11/22 に観測した LSTID のときの変動を示す。

また、前節で TIK 局で推定される時間帯に地磁気変動が発生した 4 例においても、他の地磁気観測点の南北成分と比較してみた (図 4.7)。TIK 局に近い BRW 局でも同じ時間帯に地磁気変動が生じていたことがわかる。また、11 月 4 日では ABK、DIK 局が少し、11 月 10 日では DIK 局でも地磁気変動が発生している。だが、CBB や GDH 局では該当する時間に地磁気変動が生じていないことがわかる。

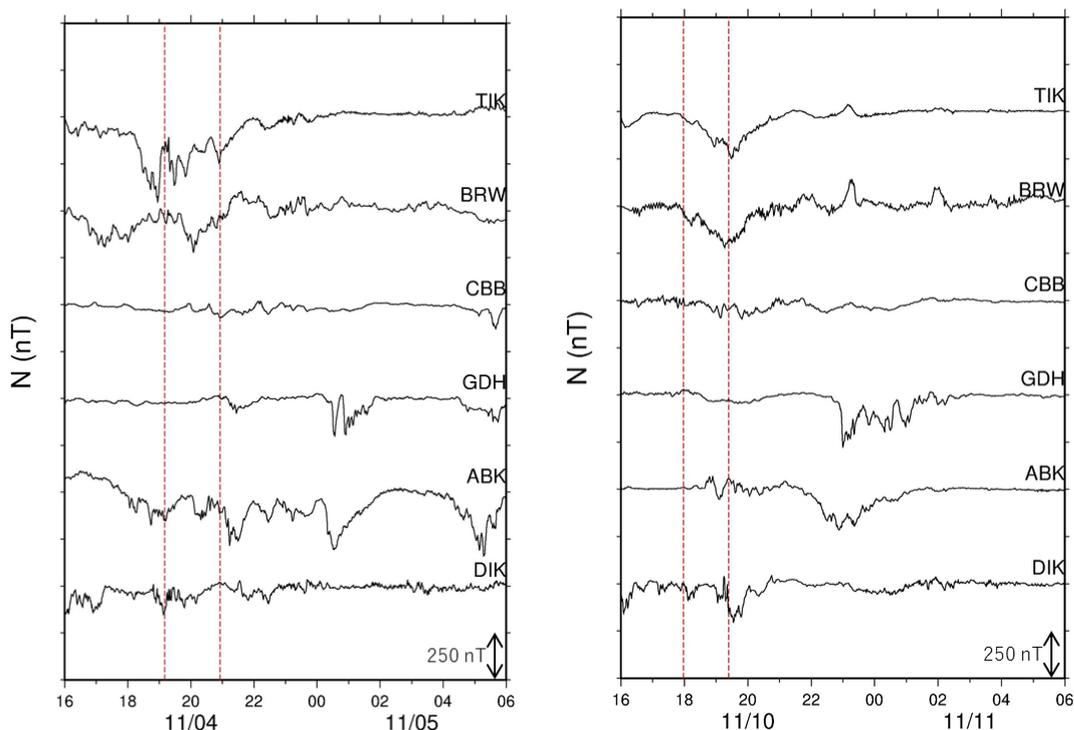


図 4.7 4.3 節でオーロラ帯において LSTID が発生したと推定される時間帯に地磁気変動が発生した日時の 6 点 (TIK, BRW, CBB, GDH, ABK, DIK) の地磁気観測点の地磁気南北成分。赤い破線で囲まれた時間帯はオーロラ帯において LSTID が発生したと推定される時間帯を示す。

## 5 考察

3 章と 4 章における観測結果から考えられることを述べる。まず 3 章において AE 指数が 2000nT 以上を超えるオーロラサブストームが活発な時、22 例中 5 例で LSTID による TEC 変動がつくばの GNSS 観測点で確認された。また、この観測例から AE 指数のピークより 1、2 時間後に LSTID が日本に伝播されていることが判明した。続いて 4 章の観測結果から連続 TEC データより観測された 14 例の LSTID において、日本北上のオーロラ帯に位置する地磁気観測点 TIK 局でその LSTID の発生要因と考えられる地磁気変動が発生している 4 例を確認

した。この 4 例についてはオーロラ帯で LSTID が発生し、日本で南下し伝搬してきたと考えることができる。ほかの 10 例の観測された LSTID についてはほかの地磁気観測点とも比較した結果、他の地磁気観測点でも地磁気変動が生じていなかったことが確認された。LSTID の発生メカニズムからオーロラサブストームが活発であり、すなわち AE 指数が高い値を示すとき、または地磁気南北成分が大きく変動をしている場合に電離圏擾乱が発生し、日本まで LSTID が伝播されるのは妥当である。しかし、本研究の観測結果においてこの 10 例はそれに該当しないものである。

この地磁気擾乱が確認されなかった 10 例については、推定される時間の周辺の時間帯に注目すると、さらに 2 つに分類することができるだろう。図 4.6(a)(c)で示されるような推定される時間帯前に地磁気変動がみられる 6 例と図 4.6(b)(d)で示される全くどの局でも地磁気変動が生じていない 4 例である。

まず図 4.6(a)(c)で示されるような推定される時間帯前に地磁気変動がみられる例について考えてみる。図 5.1 はその 1 例である 10 月 16 日に LSTID を観測した日の TIK 局の地磁気南北成分と 950130 局の VTEC 変動を示す。この日の LSTID の観測開始時間帯はおおよそ 1.5-2.5UT であり、オーロラ帯で地磁気変動が予想される時間帯はおおよそ 0-2UT である。この 0-2UT において地磁気変動は観測できていないが、前日の 18-19UT において地磁気変動が生じていることが確認できる。18-19UT においてオーロラサブストームの活動により LSTID が発生していた場合、3 章の観測結果や先行研究で示される伝播速度から同日 19-21UT において日本に LSTID が伝搬される可能性が高いだろう。だが、しかしこの日の 950130 局では多少その時間帯に LSTID による TEC 変動がみられなくもないが、有意には TEC 変動は発生していない。これは TEC の日変化による影響ではないかと考える。19-21UT は日本では真夜中から朝方にかけての時間帯であり、TEC が日変化として増加する時間帯である。この日変化が LSTID による TEC 変動より卓越しており、LSTID が確認できない可能性が高い。また、日変化により日中と夜間における TEC 量の違いも関係してくるだろう。日中は元来の TEC 量が多く、LSTID による電離圏擾乱の変動を示しやすいが、同時に夜間は TEC 量が少なく LSTID による変動が TEC 変化として同定しづらい。

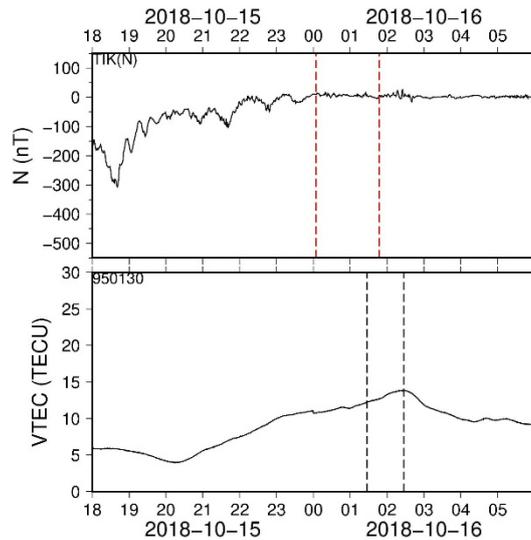


図 5.1 TIK 局の地磁気南北成分(上図)と 950130 局の VTEC 変動(下図)。赤い破線で囲まれた時間帯はオーロラ帯で LSTID が発生したと推定される時間帯を示す。黒い破線で囲まれた時間帯は 950130 局で LSTID を観測開始した時間帯を示す。

同様に、他の推定される時間帯前に地磁気変動がみられる 5 例についても、おおよそ同じような時間帯で観測されている。したがって推定される時間帯前に地磁気変動が生じている 6 例については、オーロラ帯の地磁気変動から日本に LSTID が伝播され観測される時間帯は LSTID を観測した前日の大体 18-24 UT 付近である可能性が高い。しかし 18-24 UT は日本では真夜中かから朝方にかけての時間であり、TEC が日変化として増加する時間帯であり、日中より TEC 量が少ないので LSTID による TEC 変動が確認できない可能性が高いと言える。だが、日中に TEC 量が多くなると、変動が有意に見えるようになり LSTID による変動を相互相関より検出できたのではないだろうか。こうして考えると 14 例中 6 例で推定される時間帯において地磁気擾乱が発生していなかったことについて説明がつく。

ここで、本研究の 4 章で同定した LSTID の観測した時間に注目してみる。表 4.1 で示したように連続 TEC データから LSTID を同定した 14 例の時間帯は 1 例を除き、すべて 0-4 UT または 0-6 UT の時間帯で、日中の時間帯である。これは先ほど述べたように日中ではない TEC 量の少ない夜間や日変化として TEC が増加する時間帯では LSTID による変動が確認されづらく、LSTID を同定できなかったためではないだろうか。

また、TIK 局等の日本付近の経度のオーロラ帯で地磁気変動が活発になる時間も決まっている。基本的にオーロラジェット電流は磁力線に沿って、真夜中の少し前から真夜中過ぎの時間帯に位置するオーロラ帯の電離圏内を流れる。したがって、日本付近の経度のオーロラ帯でオーロラジェット電流が流れやすく、地磁気変動が起りやすい時間帯は大体

17-19 UT である。3 章の結果や 4 章で観測された LSTID の伝搬速度からオーロラ帯での地磁気変動から 1、2 時間後に日本に LSTID が到達されることが予測される。つまり日本で LSTID が発生しやすい時間帯は 18 UT から 21 UT 付近と考えられる。日本時間で言えば夜中の 3 時から 6 時と考えられる。この考えは 1 章で紹介した Tsugawa et al. (2004) で示した LSTID が昼より夜の時間帯に発生しやすいという観測とも一致する。だが、本研究で用いた LSTID 同定方法では、先ほど述べたように夜の時間に LSTID を同定することがあまり出来なかった。これはオーロラ帯で発生するオーロラサブストームと日本で観測される LSTID の関係を捉える上で、LSTID が発生しやすい夜間の時間帯において LSTID を同定しにくいというのは手法の本質的な問題である。よって、今後は連続 TEC データから LSTID を同定する際に、夜間においても微弱な LSTID による TEC 変動を捉えるような同定方法をさらに考える必要があるだろう。また、本研究では 3 局の観測点でしか観測していないが、多くの局が密に存在する GEONET の特性を生かし切れてないことについても手法を再考する必要がある。

図 5.2 は推定される時間帯に地磁気擾乱が発生していた 11 月 5 日の LSTID による 3 局の VTEC 変動を示したものである。3 局のデータの相互相関より LSTID が同定された時間帯は 11 月 5 日の 0-6 UT においてであるが、前日の 21-23 UT において既に LSTID による変動がみられるので、950130 局での LSTID 観測開始時間をおおよそ 21-22 UT に設定した。しかし、比較した 3 局の TEC データをみると、一番北と南にある 950130 局と 940042 局では LSTID による変動がみられるが 020926 局では LSTID による変動はみられない。そのため、この時間帯では LSTID の同定は出来なかったと考えられる。また、最も南に位置する 940042 局では変動を観測できているのでこの LSTID が伝播過程で減衰し、TEC 変動が発生していなかったとは考えにくい。この観測例では図 5.1 に示すような日変化が発生している時間帯でも LSTID による TEC 変動を観測できている例ではある。しかし、この 020926 局の観測点で LSTID を確認できないことは付近の観測点でも TEC 変動が発生していないのか、たまたま 020926 局で観測できなかったのが判断できない。さらに LSTID が伝播過程において減衰していた場合も LSTID の同定が出来ない。このようなことは 3 局の観測点のデータだけでは不可能だが、観測点のデータを増やすことによってより詳細が確認できると思われる。さらに南北に観測点を増やせば、LSTID の伝播における減衰過程を確認できる可能性がある。

ただ、今までの GNSS-TEC 観測による LSTID を同定する方法に比べて、本研究で用いた LSTID 同定方法は QZSS 静止衛星と 3 局の GEONET 観測点のデータだけを使って、その相互相関をとることにより、客観的な基準で簡単に LSTID を同定できるようになったことは大きな成果であるといえる。

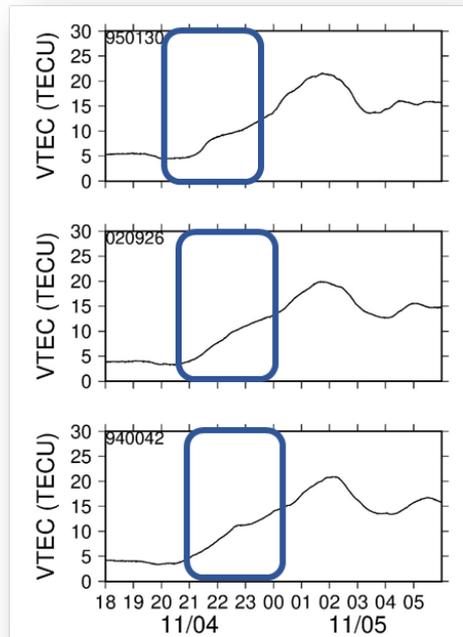


図 5.2 2018/11/5 における 950130 局、020926 局、940042 局の VTEC 変動。青い四角で示す時間帯において 950130 局と 940042 局では LSTID による変動が確認できるが、020926 局では確認できない。

そして最後に地磁気変動が全く生じていなかった 4 例について考える。現段階では疑問が残るが、この 4 例で LSTID の前に地磁気変動が見られない理由について考えられることについて述べていきたい。考えられる原因の一つは、LSTID がオーロラサブストームの活動により発生するというメカニズムとは違った形で生成され、南向きに伝播している可能性である。この場合、他の何らかの現象により電離圏擾乱が発生し、それが LSTID の TEC 変動の形に似ていた可能性が高い。そのような例として巨大竜巻や台風による電離圏擾乱や MSTID (Medium-Scale Traveling Ionosphere disturbance: 中規模伝播性電離圏擾乱) があげられる。Nishioka et al. (2013) には巨大竜巻等が発生後同心円状に電離圏擾乱が広がると指摘されており、その一部として南向きの伝播が観測される可能性がある。しかし、今回の 4 例についてはその時間帯周辺に台風や竜巻が発生した様子はないので可能性が低い。もう 1 つ可能性は、MSTID による変動を LSTID と誤認した可能性である。表 4.1 よりこの 4 例の伝播速度の最低値はそれぞれ 220、420、290、230 m/s である。10 月 29 日の観測例だけ 420 m/s と大きい値だが、その他 3 例については 300 m/s 未満であり、LSTID としては伝播速度が遅い。Tsugawa et al. (2007) よると、日本における MSTID は 2 つのタイプに分類でき、夏の夜によく発生する MSTID の伝播速度は 50-150 m/s で伝播方向は南西方向、冬の日中に

よく発生する MSTID の伝播速度は 100-200 m/s で伝播方向は南から南東方向であると指摘している。LSTID と MSTID では MSTID のほうが伝播速度が遅くその周期は短い。そしてオーロラサブストームの活動とは関係がない。したがって伝播速度の遅かった 3 例については地磁気変動がなかったので LSTID でなく MSTID による変動だった可能性がある。

しかしながら、MSTID は有意に周期が LSTID より短いため、観測された TEC 変動の周期をみる限りこの可能性も低いと考えられる。したがって実際にオーロラ帯で地磁気変動が発生していないにも関わらず LSTID が発生している可能性も無視できない。LSTID はオーロラ帯におけるサブストームが原因であるが、磁気圏から電離圏に流れ込んだプラズマ粒子が引き起こした大気重力波によって電離圏擾乱が伝播する、大気圏、電離圏、磁気圏の 3 領域が絡んだ現象である。本研究ではオーロラ帯におけるオーロラサブストームの活動による地磁気変動と日本における電離圏擾乱の関係について主に考えてきたが、極域に限らず様々なメカニズムで頻繁に生じていると考えられている大気重力波については何も考慮していない。先立つ地磁気変動を伴わない LSTID の発生については大気重力波による影響もあると考えられ、今後の大気圏—電離圏結合の研究の進展や大気重力波の観測技術の発展に期待したい。

## 6. まとめ

本研究ではオーロラ帯で発生するオーロラサブストームと日本で観測される LSTID の関係性について研究を行った。

まずオーロラサブストームの活動度を示す AE 指数から日本において LSTID が発生しているか調べた。2011 年から 2017 年の間で AE 指数が 2000nT 超えるような 22 例について、つくばの観測点で 5 例の LSTID を観測された。全ての観測例について AE 指数のピークからおおよそ 1、2 時間後に LSTID の発生を確認した。また、観測した 2011 年 9 月 26 日の LSTID について伝播速度を計測した結果、AE 指数のピークの時間帯とオーロラ帯で LSTID の発生が予想される時間帯が一致した。

次に 2017 年に打ち上げられた QZSS 静止衛星を用いて、従来の GNSS では成し得なかった連続 TEC データを作成した。この連続 TEC データより 2018 年 10 月から同年 12 月までの期間で 3 局の観測点のデータの相互相関を取ることによって、LSTID と思われる TEC 変動を 14 例同定した。さらに観測した LSTID について南向きの伝播速度を計算し、オーロラ帯で LSTID が発生したと思われる時間を推定した。そして日本北上のオーロラ帯に位置する地磁気観測点 TIK 局の地磁気南北成分と比較した結果、14 例中 4 例については地磁気変動と LSTID の明らかな対応関係がみられた。その他の 10 例については、6 例については周辺時間帯に地磁気変動が見られその関係性が推測することができたが、4 例についてはオーロラ帯の地磁気変動との対応は確認できなかった。本研究によって、確かに LSTID の発生メ

カニズムにあうオーロラ帯におけるオーロラサブストーム活動と日本における LSTID の関係性がわかった。しかし、オーロラ帯においてオーロラサブストームの活動に関係していないと思われる LSTID を観測した。したがってオーロラ帯におけるオーロラサブストームの活動からある程度は日本に伝播される LSTID の発生を予測することはできるが、それだけでは予測できない LSTID がある可能性がわかった。

また Tsugawa et al. (2005)等では主に TEC2 次元マップを用いて LSTID による TEC 変動を観測しているが、本研究では連続 TEC データを用いて LSTID を同定した。従来の GNSS である GPS や GLONASS 等では電離圏の時間変化だけではなく衛星の視線ベクトルの変化も TEC 変動に含まれ、さらに 1 つの衛星と観測点では連続としたデータは数時間しかえられない。そのため、LSTID を観測するには複数の GNSS 観測点や衛星のデータを用いてデータ処理する必要があった。しかし、2017 年に打ちあがった QZSS 静止衛星による TEC 観測は電離圏の時間変化のみを含んだ連続としたデータを得ることができるので、今回は QZSS 静止衛星と 3 局の観測点のデータの相互相関をとることで簡単に LSTID を同定することができた。日本における LSTID とオーロラサブストームの関係性についてはまだまだ議論の余地があるが、本研究において LSTID による TEC 変動を連続 TEC データより同定できたことは重要な点として考えられる。

## 7 謝辞

本研究は多くの方にご指導と助言をいただき達成することができました。この場をお借りして感謝の意を述べさせていただきます。

まず指導教官である日置幸介教授には学部4年生からこの3年間の間大変お世話になりました。Linuxの使い方から研究テーマや研究方法、学会発表の仕方までたくさんのことを教えていただきました。最初は何もわからなかった自分がここまで研究してこれたのは日置先生のご指導、ご協力があったからです。また日置先生にはたくさん学会に参加し、発表する機会を頂きました。学会発表の準備等はとても大変でしたが、様々な研究者の話を直接聞く機会や自分の研究をアピールする場をいただき、学会を通して自身の研究活動の発展や人としてより成長することが出来ました。日置先生の下でこれまで研究が出来たことを嬉しく思います、本当にありがとうございます。

また、同じ宇宙測地学研究室の古屋正人教授、高田陽一郎准教授、そして地震学研究室の蓬田清教授、吉澤和範准教授にもお世話になりました、ゼミでの発表の際、先生方の専門分野ではないにも関わらず私の研究について様々なご指摘や助言をくださり、研究を進める上で大いに参考になりました。感謝申し上げます。

そして、宇宙測地学研究室、地震学研究室に所属する皆様にも心より感謝いたします。3年間ともに研究してきた同期、親切な先輩方、いつも楽しませてくれる後輩たち、皆様がいてくれたからこそ私は3年間充実した研究生生活を過ごすことができました。

最後に改めてこれまで関わった全ての方々に心より感謝申し上げます。

## 8. 引用文献

- Cherniak, I., & Zakharenkova, I. (2018), Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Origin and Propagation: Case Study of the December 2015 Geomagnetic Storm, *Space Weather*, *16*, 1377–1395, doi:10.1029/2018SW001869
- Georges, T. M. (1968), HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbance, *J. Geophys. Res.*, *79*, 5245-5260, doi:10.1029/S0021-9169(68)80029-7.
- Hines, C. O. (1960), Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, *8*, 1441–1481.
- Hunsucker, R. D. (1982), Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review, *Rev. Geophys.*, *20*, 293-315
- Kubota, M., H. Fukunishi, and S. Okano (2001), Characteristics of Medium- and Large-scale TIDs over Japan Derived from OI 630-nm Nightglow Observation, *Earth, Planets and Space*, *53*,741-751
- Maeda, S., and S. Handa (1980), Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric F2-region, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *42*, 853–859.
- Ozeki, M. and K. Heki (2010), Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.*, *115*, A09314, doi:10.1029/2010JA015531.
- Prölss G. W. (2005), On explaining the local time variation of ionospheric storm effects, *Ann. Geophys.*, *23*, 401-417.
- Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki (1998), High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, *25*, 3079–3082.
- Saito, A., et al. (2001), Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.*, *28*, 689–692.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki, and M. C. Kelley (2002), Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime F-region ionosphere with the MU radar and a GPS network, *Earth Planets Space*, *54*, 31– 44.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, N. Balan, K. Igarashi, A. J. Ridley, D. J. Knipp, A. Saito, and K. Yumoto (2002), A large-scale traveling ionospheric disturbance during the magnetic storm of 15 September 1999, *J. Geophys. Res.*, *107*, 1088, doi:10.1029/2001JA000245.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, S. Kawamura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Nakamura, T. Tsuda, N. Balan, K. Igarashi, G. Lu, A. Saito, and K. Yumoto (2003), Thermospheric wind during a storm-time large-scale traveling ionospheric disturbance, *J. Geophys. Res.*, *108*, doi:10.1029/2003JA010001
- Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, and M. Yamamoto (2003), Damping of large-scale traveling ionospheric disturbances detected with GPS networks during the geomagnetic storm, *J. Geophys.*

*Res.*, 108, 1127, doi:10.1029/2002JA009433

Tsugawa, T., A. Saito, and Y. Otsuka (2004), A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan, *J. Geophys. Res.*, 109, A06302, doi:10.1029/2003JA010302

Tsugawa, T., N. Kotake, Y. Otsuka, A. Saito (2007), Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review, *GPS Solut*, 11, 139-144, doi:10.1007/s10291-006-0045-5

Zakharenkova, I., Astafyeva, E., & Cherniak, I. (2016), GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(12), 12,138-12,156, doi:10.1002/2016JA023332