

3 電離圏電波伝播に関する研究開発

3 *Studies of Ionospheric Variations for Radio Propagation*

3-1 電離圏研究と社会的意義

3-1 *Requirements of Ionospheric Studies for Society*

3-1-1 通信放送・測位・航空管制における電離圏効果の重要性

3-1-1 *Effects of the Ionosphere on Telecommunications, Satellite Positioning, and Electric Navigations*

石井 守

ISHII Mamoru

要旨

情報通信研究機構の組織としての起源は、海外との短波通信回線確保のための電離圏の監視業務から始まった。衛星通信や海底ケーブル等の通信網が発達した現在において短波通信の利用は限定的になりつつあるが、現状も重要なインフラとして機能している。またその一方で、衛星測位利用における電離圏の影響が注目されてきている。衛星測位技術は、安心安全な社会の構築における基盤情報として広範な応用の可能性を持っている。その一つとして衛星測位を用いた航空機の自動操縦(電子航法)が挙げられる。航空機上での測位は地上測位で可能な補正情報を得ることが制限されることから、電離圏変動の影響を強く受ける。衛星測位情報を今後更に高度に利用するためには、電離圏変動情報を正確かつ即時に得る必要性がある。

The origin of NICT is in the routine monitoring and studies of the ionosphere for keeping long distance telecommunications with shortwaves. This role has been decreasing with the development and wide uses of satellite communication, however, it is still fundamental infrastructure. In addition, the study of behavior of ionosphere become important in the utilities of satellite navigation. The global navigation satellite system(GNSS) is expected as an important and fundamental technique to build the secure and safety society. One is the example of the utility is electric navigation with GNSS. Because it is difficult for electric navigations to use any additional information from the ground station, the improvement of positioning precision become important. It is necessary to provide the ionospheric information precisely and on real time for contributing the next-generation utilities with GNSS.

[キーワード]

電離圏, 衛星測位, 電子航法, プラズマバブル, 通信

Ionosphere, Satellite navigation, Electric navigation, Plasma bubble, Telecommunications

1 まえがき

情報通信研究機構の起源は 1896 年に逓信省電気試験所において無線電信の研究が始められたところにある [1]。その主な業務は電離圏観測であった。これは、海外との長距離通信の手段が電離圏と地表の間の多重反射を利用した短波通信に限られていたため、その回線を確保・監視するために電離圏を観測することが国の重要な業務であったことに起因する。海底ケーブルや衛星通信など近年の通信網の整備により、短波通信の利用は減少した一方で、近年は衛星測位における重要性が高まってきている。GPS 等衛星測位で用いられる 1.2 ~ 1.5 GHz の電波は電離圏で遅延を受けるが、電離圏が乱れることにより遅延量がモデルで得られた値からはずれ、これが測位誤差の原因となる。今後の衛星測位の高度利用のためには、電離圏の影響を検討することが不可欠となっている。

地球に流れ込むエネルギーはほぼその全てが太陽からやってくる。地球を取り巻く空間の電磁現象についても、その原因は太陽から直接放射される電磁波や、太陽風と呼ばれる電荷を持った高温の大気が引き金となっている [2]。ただしこれらの原因と、実際に生じる現象との間には図 1 に示すような何段階ものプロセスを経る複雑なメカニズムが存在し、これらのプロセスの中には現在も未解明なものも少なくない。実際に、太陽の状況がほぼ同じ場合でも、電離圏の状態が大きく異なる

例は枚挙に暇がないため、太陽のみを精密に測定していても電離圏擾乱を長期にわたって正確に予測することは出来ない。

現在の電離圏擾乱の研究としては、静穏時・擾乱時を含め可能な限り長期(少なくとも太陽活動周期と呼ばれる 11 年以上)にわたり観測を行い、現象を整理する手法と、シミュレーションによる現象の再現からその原因を追究する手法が多く取られている。

2 電波利用に影響を与える電離圏変動

2.1 電離圏あらし

電離圏あらしは、電子密度の推移が平均的な振る舞いから大きく外れる現象を指す。電離圏を作るエネルギー源は太陽放射と太陽風が主である。このうち太陽放射は電離圏の規則正しい変動の源となる。一方太陽風は地球磁気圏と複雑な相互作用をもたらし、規則性を乱す原因となる。

図 2 は、1980 年 4 月 9 日 - 11 日に稚内と沖縄のイオノゾンデで観測された電離圏 F2 層での臨界周波数 f_oF_2 の変化を示している。実線は 1 ヶ月の平均的な日変化(月中央値)を現す。稚内では、4 月 10 日 2 時から 24 時間以上にわたって臨界周波数が平均より低下していることが分かる。一方沖縄では、4 月 9 日 18 時 - 翌 10 日 2 時にかけて平均より上昇していることが分かる。このような f_oF_2 の変動は日本のような中緯度における電離圏

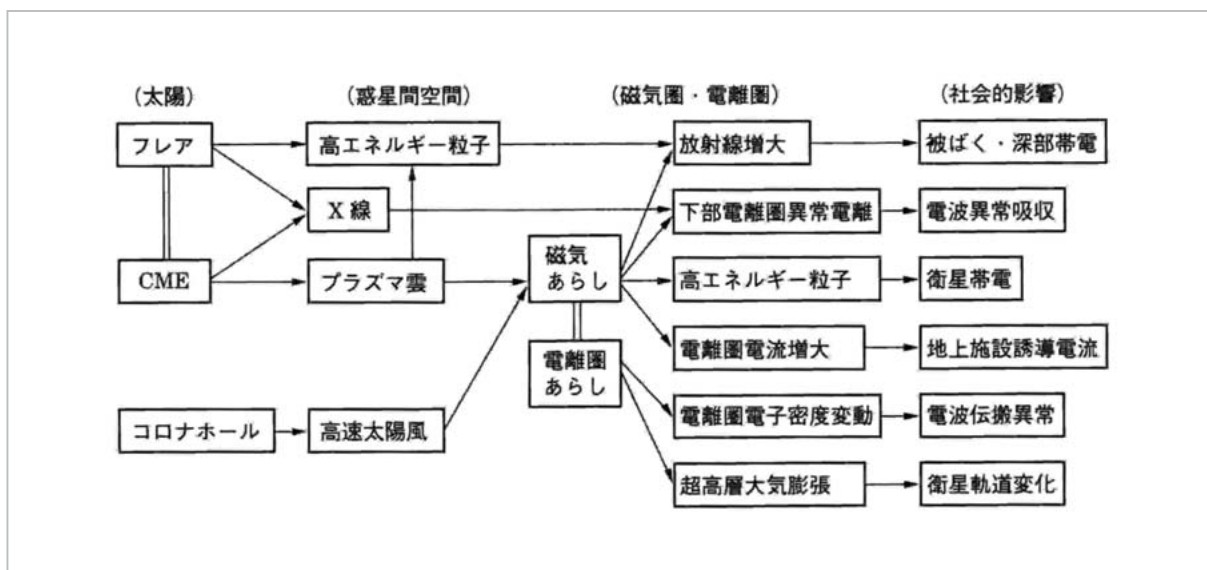


図 1 太陽の現象から宇宙環境擾乱までの諸現象の連鎖 (文献 [2] より引用)

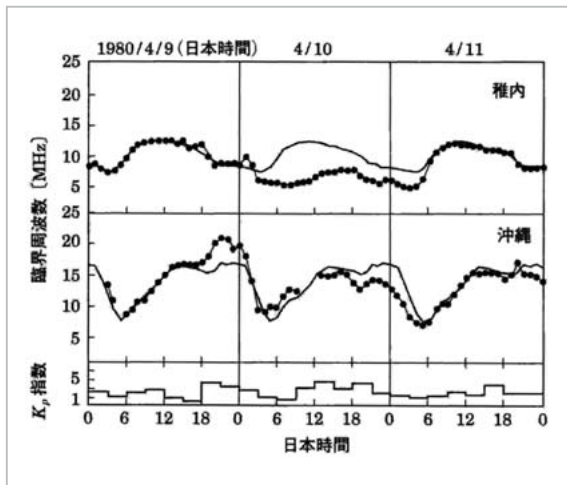


図2 電離圏あらしの例(文献[2]より引用)

あらしの典型的な様相であり、foF₂が平均より減少することを負相(ネガティブストーム)、上昇することを正相(ポジティブストーム)と呼ぶ。

(ア) ポジティブストーム

ポジティブストームは、プラズマが高高度に移動することによって生じると説明できる。このような運動の原因としては、以下に述べる2つが考えられる。一つは、極域から赤道に向かう熱圏水平風によって、中性大気がイオンと衝突し磁力線方向に押し上げる効果である。このような熱圏水平風は磁気あらしに伴う極域への急激なエネルギー流入が原因となって発生することが知られている。もう一つは、磁気圏起源の電場が $E \times B$ ドリフトをもたらし、プラズマが上昇する効果である。これらにより、高度が上昇するにしたがって再結合係数が小さくなり高高度のプラズマ密度が上昇する一方で、下層では日中の電離生成によりプラズマが供給され、全体としての電子密度が上昇する。

(イ) ネガティブストーム

ネガティブストームの原因にはイオン化学反応が関係している。F領域の電子の生成は酸素原子(O)密度、消滅は主に窒素分子(N₂)密度で決まる。オーロラ活動に伴い、極域に流入してきたエネルギーは熱圏中性大気を加熱させる。この時の大気の熱膨張によって、中性大気粒子の高度分布が変わると共に地球規模での大気の運動(大気大循環)が変化する。電離圏高度ではOよりもN₂の増加が大きくなり、再結合係数を増加させ、電子密度

を減少させる。この現象は特に高緯度で強く現れる。夏半球では低緯度地域まで発達することがあるが、冬半球では多くの場合高緯度に留まる。

2.2 デリンジャー現象

高度 80 km 付近にある D 領域は大気密度が高いため、電子と中性大気との衝突周波数が高く短波帯の電波を吸収する効果がある。このため、太陽面爆発(フレア)で放射された X 線によって D 領域の電離が進むと短波通信が途絶えるデリンジャー現象が発生する。この現象はフレア発生後 10 分程度で発生し、短波吸収は 30 分程度継続する。また、現象はフレア発生時に太陽を向いている昼間の領域での影響に限られる。

2.3 スポラディック E 層

スポラディック E 層は、高度 100 km 付近に、夏季の日中〜夕方に発生する電子密度の高い領域をさす。その発生は、中性大気のウィンドシアによるものであると考えられているが、定量的な評価は未だなされておらず、その予測も困難な状況にある。スポラディック E 層が発生すると遠く(例えば中国など近隣諸国)のテレビ電波が受信機に入りこむなどしてテレビ画像が乱れるなどの障害が発生することが知られている。また FM 放送でも同様の現象が生じ、普段聞こえない遠方局の放送が聞こえることがある。

2.4 赤道異常発達とその日日変化

TEC の全球分布を作成してみると、磁気赤道(地球主磁場を基準とした座標における赤道)を挟んで南北両半球 10-15° 付近に TEC の高い領域が帯状に存在する。これは赤道異常と呼ばれ、東西方向の電場による $E \times B$ ドリフトと磁力線に沿った拡散で説明が出来る。赤道周辺の電離圏 F 領域では、昼に東向き、夜に西向きの電場がかかる。赤道域では水平北向きの磁場が存在するため、昼間の東向き電場は鉛直上向きの $E \times B$ ドリフトを引き起こす。上昇したプラズマは磁力線に沿って下降し赤道異常の構造をもたらす。「異常」という名称ではあるが、これは単純なモデルから外れた現象という意味であり、赤道異常自体は珍しいものではない。

赤道異常の発生する領域およびその電子密度の

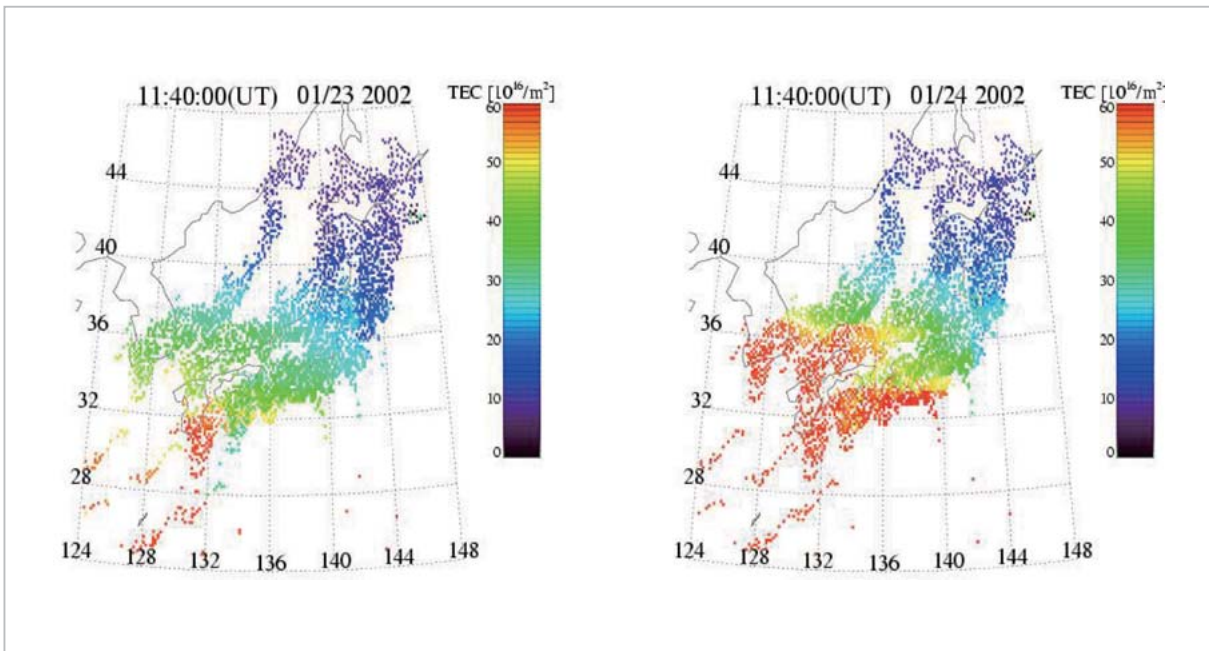


図3 赤道異常帯の日々変動の観測例(文献[2]より引用)

大きさについては、長期的には太陽活動周期に対応して変化するが、短期的に見ると日によって非常に大きく変動することが知られている。この日々変動については、磁気あらしとの関連が低いことが知られており、中性風など他の要因が大きく影響していると考えられる。

日本付近は、赤道異常帯の日々変動の影響を大きく受ける領域に位置している。その一例として、図3を示す。これは、磁氣的に静穏な状況での赤道異常の日々変動(2002年1月23日・24日20:45 JST)を示している。この時の電離圏によるGPS L1電波の遅延量は緯度30度で19.7mであり、その緯度方向の勾配は3.2m/degであった。この勾配はIRIモデルから予測される値よりも1桁近く大きい。

2.5 SED(Storm Enhanced Density)

SEDとは、磁気あらしに伴い低緯度の赤道異常プラズマが対流電場によって昼間側に流される現象を指す。図4に2003年10月30日にアメリカで発生したSEDの観測例を示す。SEDは太陽活動が活発な時期に起こりやすいことが知られている。前回活発期にはアメリカで10例ほど、日本でも数例程度と言われ、余り頻繁ではない。継続時間は数時間程度である。SEDの発生メカニズムは未解明であるが、経度依存性がある可能性

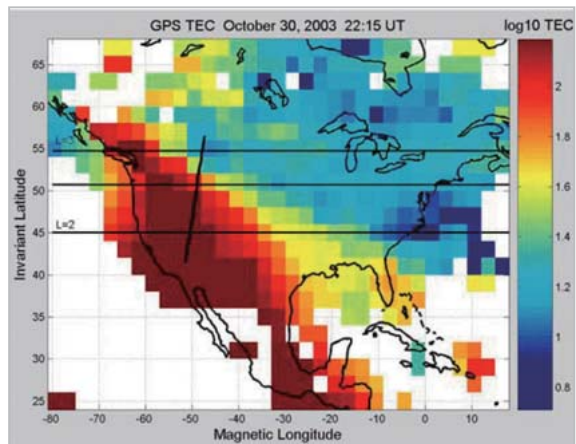


図4 SEDの観測例(文献[5]より引用)

が示唆されている。

2.6 プラズマバブル

プラズマバブル(Equatorial Plasma Bubble:以下EPB)は磁気赤道付近の電離圏で発生する電離圏の「泡」であり、電離圏下部下層の電子密度の低い領域が上昇する現象である[3]。その発生は季節依存性があり、その季節依存性は経度で変わることが知られている[4]。日本付近の経度ではEPBは春および秋に多く発生し、磁力線に沿って短時間に南北に数千~10000kmほど広がるが東西方向には100km程度の規模である。発生後は電離圏電場により東方向に時速100km程度で伝播す

る。EPB の発生はレイリーテラー不安定によるものであり基本的な発生メカニズムは理解されているが、EPB を引き起こすトリガーについて十分解明されておらず、発生予報を行うことは現在でも困難である。

3 各利用に対する電離圏効果の重要性

これまで述べてきたように、電離圏擾乱はその大元は太陽活動にあるものの、地球磁気圏との相互作用および熱圏風などの要因に大きく影響を受けるため、その予測については非常に困難というのが現状である。現実的な対策としては、利用の対象にとってもっとも深刻な影響を及ぼす現象にしばって、その発生を逐次モニタリングし、伝播方向及び速度から電離圏擾乱の到達を「早期警戒」するシステムの構築が挙げられる。

3.1 通信・放送

短波帯を用いた通信は、地表と電離圏の間の多重反射を用いて遠距離通信を行うことから、電離圏変動の影響を強く受ける。よって、電離圏あらしや EPB の影響を強く受ける。EPB については、測位利用のように電離圏遅延は問題にならないが、境界付近の急激な電子密度の違いによる散乱や、EPB に沿った異常伝播があることが知られている。

テレビ放送については、伝播距離が 100 km 前後と比較的短く、周波数も高いことから電離圏の影響は少ないが、スポラディック E 層の発達の原因となる異常伝播による混信が問題になる。

3.2 衛星測位

衛星測位の利用は大きく分けて電子測量に代表される精密測位と、電子航法に代表されるリアルタイムな情報利用がある。衛星測位で用いられる周波数帯は 1.2、1.5 GHz であり、電離圏での伝播

遅延が発生すると直接測位精度に影響を与える[5]。

精密測位の場合には、期間を変えた複数回の計測を行い電離圏遅延の影響を補完している。しかしながら電離圏の影響が前もって把握可能となれば業務運営に反映しコストを下げるのが可能となる。一方リアルタイムの利用においては、例えばカーナビに代表される地上利用であれば疑似灯台を用いたディファレンシャル GPS、あるいは自動車の距離計などの補完情報を用いたシステム化により精度が上がってきているのが現状である。しかしながら海上を飛ぶ航空管制での利用ではこれらの手法が使えず、電子航法では電離圏の影響を如何に回避するかが大きな問題となっている。これについては次項に述べる。

3.3 航空管制

電子航法への電離圏情報利用を考えた場合、上に挙げた現象のうちネガティブストームは測位誤差への影響は小さい。また SED は発生頻度が 1 太陽活動極大期に数回と少ないが非常に激しい現象である。重要度としては赤道異常の日々変化とポジティブストームに焦点を当てた早期警戒システムを構築すると共に、これと平行して発生メカニズムを研究し、将来的には電離圏擾乱予測システム構築へ発展すべきである。

4 むすび

人工衛星による測位精度において最大の誤差要因は電離圏による伝播遅延であり、今後の測位情報の高度利活用のために電離圏擾乱のモニタリングおよび予測技術の向上は今後の重要な課題である。有用なシステム開発に当たっては、どのような情報の提供が可能か、どのような情報を必要とするかなど、開発者とユーザーとの密接な情報交流が不可欠であり、今後の更なる協力関係が進展していくことが必要である。

参考文献

- 1 “電波研究所二十年史”，郵政省電波研究所，研文社，1975.
- 2 恩藤忠典／丸橋克英編著，“ウェーブサミット講座 宇宙環境科学”，オーム社，Mar. 25, 2000.
- 3 Woodman, R. F. and C. La Hoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities", J. Geophys. Res., vol.81, pp.5447-5466, 1976.
- 4 Burke, W. J., C. Y. Huang, L. C. Gentile, and L. Bauer, "Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles", Ann. Geophys., 22, 3089-3098, 2004.
- 5 Foster, J. C., A. J. Coster, P. J. Erickson, J. M. Holt, F. D. Lind, W. Rideout, M. McCready, A. van Eyken, R. J. Barnes, R. A. Greenwald, and F. J. Rich, "Multiradar observations of the polar tongue of ionization", J. Geophys. Res.110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928, 2005.

石井 守

電磁波計測研究センター推進室室長
博士（理学）
超高層大気物理学