2 電離圈研究

2 Research for the Ionosphere

2-1 VIPIR2 による国内電離圏定常観測

2-1 Ionospheric Observation by VIPIR2

西岡未知 前野英生 山川浩幸 津川卓也

NISHIOKA Michi, MAENO Hideo, YAMAKAWA Hiroyuki, and TSUGAWA Takuya

イオノゾンデによる国内電離圏定常観測の長い歴史の流れの中で、最前線として設置された VIPIR2 について、その概要と観測の現状をまとめた。VIPIR2 の特徴の一つは、受信アンテナのア レイ構成によりマルチチャンネル受信が可能なことである。これにより、これまで定常観測の課 題であった電波モードの分離が可能となり、電離圏変動をよりリアルタイムに正確に捉えること ができるようになった。本稿では、VIPIR2 の概要について示した後、電波モード分離の詳細につ いて示し、VIPIR2 によって捉えられた電離圏の短時間変動と電波到来方向の推定について紹介す る。また、電波モード分離されたイオノグラムと機械学習の手法を用いた自動読み取り手法の改 善についても取り上げる。

This paper summarizes the outline of VIPIR2 installed as the forefront in the long history of routine observation of the domestic ionosphere by ionosondes. One of the features of VIPIR2 is that multi-channel reception system is available because of its antenna array configuration. As a result, it has become possible to separate radio modes, which has been a problem in routine observation. In this paper, we provide the overview of VIPIR2, the details of the radio mode separation, and other new results of VIPIR2 observation. One of the focus is on an improvement of automatic scaling method of mode-separated ionograms, which is developed using machine learning technique.

1 まえがき

イオノゾンデ観測は、電離圏電子密度構造の観測手 段の一つとして、古くから世界中で広く行われてきた。 その観測原理は、短波帯電波の周波数を掃引させなが ら上空に送信し、送信電波が電離圏に反射されて地上 に戻ってくるまでの時間(遅延時間)を計測するもので ある。通常、観測データは、横軸を周波数、縦軸を見 かけの高さ(遅延時間に光速を乗じて算出される距離 の半分)とした画像で信号強度を示すもので、イオノ グラムと呼ばれる。イオノグラムの電離圏エコーの周 波数・見かけの高さを見ることで、電離圏の見かけの 電子密度プロファイルの情報を得る仕組みである[1]。

日本におけるイオノゾンデ観測は 1931 年に始まり、 世界的にも早い段階で、本格的に定常観測が開始され た。長い歴史の中で、観測機器やシステムは常に進化 している [2]。観測開始当初は、4 人がかりの手動作業 でアナログデータを取得する観測であったが、1950年 代には全てが自動化され、1970年代後半には、送信部 分を除き真空管が半導体に置き換わった[2][3]。観測シ ステムの観点では、1970年代にはPCが活用されるよ うになり、1990年代にはフィルムを用いたアナログ データがデジタルデータに置き換わった[4][5]。さら に、1990年後半には、インターネットの普及により地 方観測施設のデータ転送が可能となり、観測施設が無 人でも運用が可能となった[4]-[6]。データの質も向上 し、当初は1ビットのデジタルデータだったものが 2001年には8ビットデータとなり[7]、2017年には16 ビットデータとなっている。

このイオノゾンデ観測の歴史の中で、最新型の観測 システムが、2016-2017年に導入されたVIPIR2(Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar 2)である。VIPIR2 は米国のNOAAで開発されてきたものであり、受信ア ンテナのアレイ構成によりマルチチャンネル受信が可

-	VIPIR2	10C	
パルス	シングルパルス	シングルパルス	
観測モード	垂直/斜入射	垂直/斜入射	
平均/尖頭電力	32W / 4kW	80W / 10kW	
掃引周波数	1-30 MHz	1-30 MHz	
レンジ	60-1500km	60-1500km	
解像度	16 bit	8 bit	
掃引時間	~15 sec	~15 sec	
パルス繰返周波数	50-100 Hz	50, 100 Hz	
送信チャンネル	1 チャンネル	1 チャンネル	
受信チャンネル	8 チャンネル	2 チャンネル	

表 1 VIPIR2 と 10 C の諸元比較

能であることが特徴の一つである。VIPIR2 とその先 行機である「10 C」との諸元比較を表1に示す。VIPIR2 のマルチチャンネルを活用すると、これまでのイオノ ゾンデシステムでは不可能であった、電波の偏波モー ド分離や到来方向の推定などが可能となる。

国内定常観測は、現在4観測所で行っている。その うちの1観測所はNICT本部構内に位置する。NICT 本部の住所は東京都小金井市に存在するが、交通機関 や電話局の関係で国分寺市に依存する面が多く、観測 所としては慣習的に「国分寺局」と呼ばれている[2]た め、本稿でも「国分寺局」と記す。国分寺局における観 測機器の配置と概観を図1に示す。アンテナは(a)送 信用の高さ45メートルデルタアンテナ、(b)受信用の 高さ5メートル、長さ4メートルのダイポールアンテ ナ8基で、構内に図1(c)のように配置される。受信用 のダイポールアンテナは、中央がクロスダイポールと なっており、それぞれの基線上にさらに3基ずつ配置 されるアレイ構成である。(d)「観測棟」には各観測機 材が配置され、それらは送信機・受信機・リファレン スなどのユニット化された各機器により構成される。 国分寺局以外の3観測所は、北海道天塩郡豊富町のサ ロベツ観測施設、鹿児島指宿市山川の山川観測施設、 沖縄県国頭郡大宜味村の大宜味観測施設に位置する。 観測施設の位置を図2(a)の赤丸で示し、(b)、(c)、(d) と(e)にそれぞれの観測施設における送信アンテナ・ 受信アンテナアレイ、「観測棟」の位置を示す。大宜味 観測施設のみ、設置場所の都合上、送信所と受信所が 600メートルほど離れた位置にある。

本稿では、このような VIPIR2 について、2 でその 機能と、それを活用した観測例を示す。3 では、VIPIR2 の最大の強みであるモード分離機能と、近年技術発展 の著しい機械学習の技術を用いた、イオノグラムの自 動読み取り手法の改善について紹介する。最後に4 で 今後の展望について述べる。

VIPIR2 の概要とそれを活用した 2 観測結果

2.1 電波モード分離

図3に(a) VIPIR2及び(b) 10 C によって同時観測さ れたイオノグラムの例を示す。両者ともに高度 100 km 付近に E 層が、高度 230 km から 400 km にか けて F 層が観測されている。一般に電波は、電離大気 と磁場のある空間を伝搬する際、複数の伝搬モードを 持つ。電離圏を伝搬する電波の場合も同様で、地球磁



図 1 国内定常イオノゾンデ観測 [国分寺局] の様子 (c) に NICT 小金井本部構内における各機器の設置図、 (a), (b), (d) にそれぞれ 送信アンテナ、受信アンテナ、各観測ユニットの様子を示す



図 2 国内定常イオノゾンデ観測所の配置図と地方観測施設内の各機器の配置図 (a) に各観測点の場所 (赤丸) 及び斜入射観測時の観測点 (青丸) を示す。(a),(b), (c),(d),(e) はそれぞれ、サロベツ電波観測施設、山川電波観測施設、大宜味電波観測施設、大宜味大気観測施設の様子



図 3 (a) VIPIR2 及び (b) 10 C によって同時観測されたイオノグラム 2016 年 10 月 1 日 16:30 JST、国分寺における観測例

場の影響を受けない伝搬モードの電波「正常波」及び地 球磁場の影響を受ける伝搬モードの電波「異常波」が混 在する。正常波と異常波はそれぞれ偏波の旋回方向が 異なるため、VIPIR2の直交アンテナで受信された電 波の位相解析を行うことで、両者の分離が可能である。 その結果を示したものが図3(a)で、赤色と緑色でそれ ぞれ正常波と異常波の信号強度を示している。一方、 VIPIR2の先行機である10Cでは1チャンネル受信に よる運用であったため、正常波と異常波を区別するこ とが不可能で、図3(b)では、受信された信号強度の 情報のみを色で示している。一般に、地球磁場の影響 を受けない正常波の方が、地球磁場の影響を受ける異 常波よりも利用しやすいため、正常波と異常波が混在 している図3(b)よりも正常波のみが自動で抽出でき る図3(a)の方が活用しやすい。

2.2 電離圏の短周期変動観測

イオノゾンデの定常観測が始まった当初は手動での 観測であったこともあり、1時間に1回の頻度であっ た。しかし、1950年代に自動観測が可能となると頻度 の高い観測が可能となり、一部の特別観測期間を除き、 原則15分ごとの観測を運用していた。国内で運用する 4 観測所(1993年までは5 観測所)全ての観測点で混信 を起こさないために、図4(a)のようにそれぞれの観測 点で75秒ずつ時間をずらして観測を実施していた。な お、各時刻の観測時、送信局は、送信・受信と同一局 で行う「鉛直観測」(いわゆる通常の「イオノゾンデ観 測」)を行うが、送信局以外の3局については、受信の みを行う「斜入射観測」を行っている。図4で、鉛直観 測は赤色で、斜入射観測は青色で示した。送信所と受 信所の中間の電離圏を観測していると解釈でき、その 観測場所は図2(a)の青丸で示す位置である。

電離圏は太陽の活動や地磁気の活動によって変動を 受けるほか、太陽天頂角の変化や、電離圏内の大部分 を占める中性大気のダイナミクスや下層大気からの影 響も受け、日々刻刻と変動している。数時間周期の変 動に加え、数十分、数分周期の変動も頻発することが 知られており、より短周期な電離圏変動を定常的に捉 えるためには、より頻度の高い観測が必要である。そ こで、電離圏のより短周期な変動を検出するため、 2019年より5分間隔の観測の検討を開始し、2020年6 月より、5分間隔の観測を開始した。5分間隔の観測を 実現するために、図4(b)のように各観測点75秒の送 信間隔を40秒に短縮した。斜入射観測も同様に40秒 の間隔で実施している。

図5(a) に、VIPIR2の5分間隔観測によって捉えら れた電離圏の短周期変動の一例を示す。2020年6月21 日の部分日食時の国分寺局の観測である。図は、比較 的ノイズの少ない 4.0 MHz-4.2 MHz での正常波モー ドの平均信号強度で、見かけ高さ100 km-350 km にお ける時間変化を示している。横軸は12時 IST からの 10 時間の時刻に対応していて、(i)、(ii)、(iii)で示す縦 線がそれぞれ、食の始め(16:11 JST)、食最大 (17:10 JST)、食の終わり(18:03 JST)に対応する。最 大時の食の面積は全体の 36 % であった [9]。12 JST か ら 16 JST までは、高度 100 km 付近に強いスポラ ディックE層によりF層が遮へいされているが、スポ ラディック E 層はその後消失し、食の始まるころから F層が観測され始める。F層エコーは、(i)に示す食の 始めから下降が始まり、(iii)で示す食の終わりととも にいったん上昇、その後、19時頃の日没に伴い再び下



図 4 定常観測のスケジュール (a) 2020 年 5 月までの 15 分間隔、(b) 2020 年 6 月以降の 5 分間隔スケジュール。



図5 イオノゾンデによって捉えられた高度100-350kmにおける4.0 MHz-0.2 MHzの正常波モードの受信信号の時間変化2020年6月21日 12:00 JST-20:00 JSTの国分寺での観測による。

降することがはっきり見てとれる。また、(ii)で示す食 最大のタイミングより、十数分スケールで層が上下す る変動が複数見られ、日食による層の上下動に加え、 更に細かいスケールで上下動していることが示唆され る。一方図5(b)は、図5(a)で示した5分間隔の観測 を仮想的に15分間隔の観測として作図したものであ り、食に伴う層の上下動がかろうじて捉えられる程度 であることがわかる。

このように、定常観測の観測間隔を5分に短縮する ことによって、電離圏に頻発する十数分のスケールの 変動も定常的に捉えられるようになった。特に、 VIPIR2では、正常波と異常波の分離が可能であるた め正常波の時間変動のみを自動で抽出することができ、 観測頻度を短縮することで、より容易に正常波の短周 期の変動を捉えることが可能となった。

2.3 電波到来方向の推定

マルチ受信システムを用いる利点の一つは、電波到 来方向の推定が可能となることである。電波到来方向 の推定手法には複数あるが、ここでは最もシンプルな 位相合成方法であるフーリエ法 [10] を用いて、その手 法が VIPIR2 の観測に適用可能であることを示した例 を紹介する。

フーリエ法は、図6にその概略を示すように、各 チャンネルで受信された信号にフーリエ映像フィルタ と呼ばれる重みを付けて、その出力パワーを求める方 法である。電波到来方向がほぼ明らかな斜入射観測の イオノグラムに対して、フーリエ法を適応した結果を 図7に示す。図7(a-1)、(b-1)、(c-1)では、それぞれ サロベツ、山川、大宜味で送信された電波を国分寺局 にて受信したイオノグラムを示す。国分寺局から各送 信局までの距離は、サロベツ、山川、大宜味の順に、そ れぞれ 1,068 km、963 km、1,480 km であり、この距 離に対応して電離層エコーの現れる「見かけの高さ」が 高くなる。例えば図7(a-1)のサロベツの場合、見かけ の高さ 600 km よりも少し低い所にスポラディック E 層のエコーが見られ、600 km よりも少し高い所に F 層のエコーが見られる。図7(a-1)の四角形で囲まれた F層エコー領域を拡大して図7(a-1)の右上に示す。白 丸で示す点のうち、8.8 MHz で見かけ高度 620 km の 部分の信号にフーリエ法を適用した結果を図7(a-2) に示す。図7(a-2)は、観測点直上から下を見下ろした 図で、右上 - 左下、左上 - 右下の白線が国分寺局での 受信アンテナの基線の方向に対応する。方位角・天頂 角ともに5度ごとに刻んだグリッド上で、フーリエ映 像フィルタを適用して出力パワーを算出し、色で示し、 天頂角は70度以内のデータを描画している。図7 (a-2)で、出力パワーが最大となるのが、方位角7度



各信号 s_i^p (iはアレイ番号、pはパルス番号)に重みづけをすると、アレイ出力信号 y^p は、

$$y^p = \sum_{i}^{8} s_i^p w_i$$
たたし、 $w_i = e^{-j \vec{k} \cdot \vec{d_i}}$

このときの輝度は出力パワーに相当し、

$$P = \sum_{p}^{N_p} y^p y^{p*}$$

Pを任意の所望ベクトルkに対して計算する。

図6 フーリエ映像法による電波到来方向推定の概念図



図 7 VIPIR による斜入射観測のイオノグラム (a-1), (b-1), (c-1)及びそれぞれの F 層エコーからフーリエ映像法により電波到来方向を推定 した結果 (a-2,3), (b-2,3), (c-2,3)

(北を0度、東回りにとった角度)、天頂角65度である。 国分寺局から見たサロベツ局の方位角は6度であるの で、この電波到来推定方向は適切であると言える。次 に図7(a-1)右上の拡大図で白丸を付した6点のデータ について同様の解析をし、出力パワーが最大となる位 置を重ね書きしたのが図7(a-3)である。大多数の点が 方位6度のサロベツの方向から来たことがわかり、統 計的にもフーリエ法の妥当性が示される。

同様の解析を図7(b-1)及び(c-1)に対して行ったも のが図7(b-2)と(b-3)、図7(c-2)と(c-3)である。国 分寺局から見た山川局、大宜味局の方位角はそれぞれ、 245度、232度であるのに対し、(b-2)及び(c-2)で出力 パワーが極大を示す方位角は242度、232度、と、良 い一致が見られ、方位角に対して10度程度の分解能が



図8 イオノグラムの手動読取り値と自動読み取り値の比較(a)-(c)はモード未分離のイオノグラムに旧自動読み取り手法を適用した結果。(d)-(e)は(a)-(c)と それぞれ同じ観測でモード分離イオノグラムに新自動読み取り手法を適用した結果。

あることがわかった。また、複数の点に対しても (b-3)及び(c-3)に示すように、出力パワーが極大とな る方向はそれぞれの送信局の位置と一致し、フーリエ 法適用の妥当性が示唆される。

OX モード分離のイオノグラムを用いた 3 電離圏パラメータ自動抽出手法の改善

3.1 従来の自動読み取りとその課題

イオノグラムから電離圏の状態を定量的に評価する ためには、電離圏エコーの各パラメータを読み取る必 要がある。歴史的には、読み取り専門家がイオノグラ ムから目視で読み取る「手動読み取り」を継続してお り、その「手動読み取り値」は、毎月、電離圏月報とし て出版されている[11]。電離圏月報に掲載される電離 圏パラメータは、地球環境の長期的な変動を監視する 上で、また、短波帯無線通信の重要な情報源として貴 重な存在である。一方、読み取り専門家には、訓練及 び熟練が必要なため、その人材には限りがある。また、 観測技術やインフラの向上により観測頻度が増加して いるイオノグラムを全て手動読み取りすることはでき ない。さらに、「手動読み取り」を行うには時間がかか るため、宇宙天気情報のリアルタイム性を要請される 昨今では、より一層「自動読み取り」の必要性が高まっ ている。

自動読み取りの必要性は1970年代後半より指摘されており、その開発はNICTの前身である通信総合研

究所時代から行われていた [12][13]。1980 年後半には、 画像の多段階処理により14のパラメータを自動抽出 する手法を完成させ、定常観測のシステムに組み込ん だ[14][15]。当時はフィルムで取得したイオノグラムを 2値のデジタルデータに変換し、読み取りを行ってい た。その後、イオノグラム自体がデジタル化され、イ オノグラムの解像度も8ビット、16ビットと向上した。 高解像度化したイオノグラムにフィルタなどを適用し、 2値のイオノグラムにすることで、1980年代後半に開 発された読み取り手法を活用し続けていた[8]。本自動 読み取り手法の課題は、段階画像処理の最終段階で読 み取るパラメータ、特に高さに関するパラメータの精 度であった [13]。特に、スポラディック E 層が出現し て F 層をマスクしてしまう場合や、スポラディック E 層の2回反射がF層と共存してしまう場合は特に読み 取り精度が悪かった。図8の(a)(b)(c)に、電波モー ド未分離の3種類のイオノグラムと、それぞれのfoF2 とh'Fの手動読み取り値と自動読み取り値の比較を示 す。ここで、foF2は、正常波のF層エコーの最も高い 周波数(臨界周波数)、h'Fは正常波のF層エコーの最 も低い見かけの高度である [1]。図 8 (a) では foF2 も h'Fも自動読み取り手法と手動読み取り手法に大差は ないものの、図 8 (b) では 200 km 付近に現れた二回反 射のスポラディック E 層を F 層と取り違えてしまい、 自動読み取りでは foF2 を過小評価し、h'F は読み取り に失敗している。さらに図8(c)の例では、発達したス ポラディックE層の存在によりF層は存在しないと判

断し、foF2もh'Fも読み取りに失敗している。

自動読み取り手法は国内外の研究者により開発され ており[16]-[19]、観測的な電波モードの分離可否が読 み取り手法の精度の鍵を握ることは示唆されてい た[19]。そこで、VIPIR2の正常波・異常波分離後のイ オノグラムを用いると解決されると期待できる。図8 (d)(e)(f)は、図3(a)と同様に、正常波を赤で、異常 波を緑色で示したイオノグラムで、それぞれ、図8(a) (b)(c)に対応している。例えば図8(f)を用いると、 図8(b)で発生したようなスポラディックE層とF層 の混同が起こりにくくなると期待され、図8(g)を用 いると、F層の存在が明確に認識できる。さらに、近 年技術開発の著しい機械学習の技術を用いて「画像認 識」を試みることで、これまでの「画像処理」では捉え られなかった特徴を捉えられると期待でき、従来の手 法の課題解決が期待される。以後、1980年代に実装化 された従来の自動読み取り手法を「旧自動読み取り手 法」と記す。

3.2 機械学習を用いた自動読み取り手法

今回開発した、正常波・異常波分離イオノグラムと 機械学習を用いた自動読み取り手法(以後、「新自動読 み取り手法」と記す)の流れを図9に示す。まず、受信 された全ての信号のイオノグラム(a)から、ノイズ除 去したイオノグラム(b)、さらに正常波成分のみを抽 出したイオノグラム(c)と異常波成分のみを抽出した イオノグラム(d)を作成する。それぞれをE領域検出 モデル、正常波 F 領域検出モデル、異常波 F 領域検出 モデルの入力とする。モデルは、Faster-RCNN(Region with Convolution Neural Network)と呼ばれる一般物 体検出モデル [20] で、画像の中から、何がどの位置に あるかを検出する。例えば、図 9(c)のイオノグラムを 入力とする F 領域正常波検出モデルであれば、図 9(e) で示すように、正常波の F 層のエコーがどこにあるか を矩形で出力する。その出力を受け、矩形の右限の周 波数と下限の見かけ高さを読み取ることで、foF2 と h' F とする。

モデルの構築のためには、入力となるイオノグラム と、その出力矩形の位置が既知であるデータセットが 必要である。そこで、読み取り専門家による手動読み 取りデータを用いて再現した矩形データと、それに対 応するイオノグラムを教師データとして用いた。対象 のイオノグラムは、2018年1年間に国内4観測点で取 得されたイオノグラムである。特徴の似ているイオノ グラムを多数教師データとしても学習効果は低いため、 特徴の異なるイオノグラムを手動で10,000枚抽出し た。モデル構築には Python の Torchvision v0.4.1[21] を用い、モデルの損失関数の値の減少が頭打ちになっ たところで学習を完了とした。

3.3 機械学習による自動読み取り手法の精度

新自動読み取り手法を用いて、図8(d)、(e)、(f)の イオノグラムから foF2及び h'Fを読み取った結果を それぞれの図中に示す。読み取りに成功していた(a)



図 9 新自動読み取り手法の流れ (a) は観測データ、(b),(c),(d) は、3 種類のモデルの入力となるノイズ除去イオノグラム、正常波成分イオノグラム、異常波イ オノグラム。(e), (f), (g) では、それぞれのエコーの位置が矩形で示されている。

では手動読み取りや旧手法読み取りと大差はないが、 旧手法の読み取りに失敗していた(b)及び(c)に読み 取り結果の旧手法との差が顕著にみられる。

図10に、図8の3例を含む、2019年9月1か月間 に18:00 JSTの大宜味で観測されたイオノグラムから 読み取られた(a) foF2と(b) h'Fの読み取り値の比較 を示す。黒線、青線、赤線で、それぞれ、手動読み取 り値、旧自動読み取り値、新自動読み取り値を示す。 灰色でハッチした(i)、(ii)及び(ii)は、図8のイオノ グラム(a)(d)、(b)(e)及び(c)(f)に対応する。図10 (a)に示す foF2は、旧自動読み取り値は、手動読み取 り値とおおむね一致するものの、(ii)のように値が 乖離したり、(iii)のように読み取りに失敗したりする 例もある。一方、新自動手法のfoF2は手動読み取りの それとおおむね一致する。図10(b)に示す h'Fには、 さらに新自動読み取り手法による改善が顕著にみられ る。旧自動読み取り手法では、大部分の日で読み取り



図 10 大宜味 18 JST、2019 年 9 月 1 か月分における (a) foF2, (b) h' F の 手動読取り、自動読取り値比較 (i), (ii), (iii) は図 8 の (a) / (d), (b) / (e), (c) / (f) のイオノグラムに対応する。

に失 敗している一方、新手法では 10-20 km の誤差範 囲で一致することがわかる。

次に、これらの結果を統計的・定量的に評価してい く。統計的に評価をする方法はいくつもあるが、ここ では読み取りの成功率を評価するための「成功率」及び 読み取りを成功したパラメータの精度を評価するため の「誤差」に注目する。

まず「成功率」を見ていく。あるイオノグラムに下層 が存在し、例えばfoF2等のパラメータが存在する場合 を「陽性 (positive)」、スポラディックE層などにマス クされてF層が見えずにfoF2等のパラメータが存在 しない場合を「陰性 (negative)」と定義する。例えば、 図8に示したイオノグラムのF層パラメータは全て 「陽性 (positive)」である。しかし、この「陽性」全てを 自動読み取りで認識できるとは限らない。パラメータ の陽性・陰性と自動読み取り値の成功・失敗は、以下 の4通りに分類できる。

- 「陽性」で自動読み取りでも読み取れる場合:「真 陽性(True Positive)」
- 「陽性」だが、自動読み取りに失敗する場合:「偽 陰性(False Negative)」
- 「陰性」にも関わらず自動読み取りしてしまう場合:
 「擬陽性 (False Positive)」
- 「陰性」で、自動読み取りで読み取れない場合:「真 陰性(True Negative)」

例えば foF2 については、図8の(c) 以外の5事例は、 「真陽性」、図8の(c) は「偽陰性」である。また、h'F については、図8の(b) と(c) は「偽陰性」でそれ以外 は「真陽性」となる。2019年1年間の大宜味における正 時に観測されたイオノグラムの全てを、TP、FN、TN、 FPの4通りに分類し、その数を2×2の表、いわゆ る「混同行列」にまとめたものが表2である。(a) と(b) が foF2、(c) と(d) が h'F に関するもので、(a) と(c) は旧自動読み取りについて、(b) と(d) は新自動読み取 りについてである。(a) と(b) 及び(c) と(d) を比較す



図 11 foF2 及び h'Fの手動読取り値と自動読み取り値の誤差累積分布 旧自動読み取り値のものを青色で、新自動読み取り値のものを赤色で示す。

表 2 自動読み取りと手動読取りの混合行列 (a) と (b) は foF2、(c) と (d) は h' F、(a) と (c) は旧自動読み取り手法、(b) と (d) は新自動読み 取り手法によるもの。

(a)foF2, lE	自動読み	取り手法	(b)foF2,	新自動読み	+取り手法
旧自動 手動	成功	失敗	新自動 手動	成功	失敗
成功	(TP) 5175	(FN) 2649	成功	(TP) 7675	(FN) 149
失敗	(FP) 70	(TN) 695	失敗	(FP) 642	(TN) 123
(c) h′F, l⊟	自動読み	取り手法	(d) h′F, 亲	所自動読み	取り手法
旧自動 手動	成功	失敗	新自動 手動	成功	失敗
成功	(TP) 480	(FN) 6627	成功	(TP) 6980	(FN) 127
失敗	(FP)	(TN)	失敗	(FP) 1337	(TN) 145

ると、「TP」のサンプル数が (a) (c) から (b) (d) で増加 している。一方で、(a) (c) に多く存在する「FN」が (b) (d) では顕著に減少していることがわかる。

混合行列から評価できる定量的な指標はいくつかあ るが、ここでは「成功率」(精度、Accuracy ともいう) を採用する。成功率は(TP+TN)/(TP+FN+FP+TN) で定義される。表2(a)と(b)から計算される成功率は 68%と91%、表2(c)と(d)から計算される成功率は 22%と83%である。foF2もh'Fも成功率は上昇、特 にh'Fの成功率が飛躍的に向上したと言える。

次に、TPに分類されたイオノグラム、つまり手動 読み取り値も自動読み取り値も存在するデータに対し、 それぞれの読み取り値の誤差の分布で評価を行う。 図11は、手動読み取り値と自動読み取り値の差の絶対 値の累積分布を示したもの、(a)はfoF2について、(b) はh'Fについてである。(a)では分解能は0.2 MHz、目 安として誤差が0.5 MHzの部分に縦線を引いている。 旧自動読み取りでは、誤差が0.5 MHz以下となるもの が92%であったのに対し、新自動読み取り手法では 95%にまで上昇している。これは、世界的に広く使わ れている読み取りソフト「ARTIST」の90%[22]を上 回り、世界的に見ても良い読み取り手法であると言え る。ただし、「ARTIST」は、電子密度プロファイルを 読み取る機能を有しており、ここでは、パラメータ抽 出機能についてのみ比較を行っている。

図11(b)では、h'Fについて1 kmの分解能で手動 読み取り値と自動読み取り値の誤差の絶対値の累積分 布を示しており、誤差が10 kmのところに縦線を引い ている。誤差が10 kmとなるものは旧手法では35% しかなかったものが新手法では68%となっており、 飛躍的に誤差も小さくなったことがわかる。ここでは foF2とh'FのF層の主要なパラメータの結果のみを 示したが、他のパラメータ fmin、foEs、h'Esも同様に 成功率及び誤差が改善している [23]。ここで、fmin と はイオノグラムに記録された電離圏エコーの最低周波 数、foEs とは、スポラディック E 反射正常波成分の最 も高い周波数、h' Es は foEs を読み取ったエコーの最 も低い見かけ高さのことである [1]。

3.4 宇宙天気情報としての提供

本手法は 2020 年 1 月 1 日以降、イオノゾンデ観測 データに適用され、自動読み取り手法として公開して いる [24]。図 12 にその例を示す。赤色が新自動読み取 り手法によって読み取られた foF2、黒線が基準値とし ての過去 27 日間の中央値である。赤点と黒線の値に応 じて、背景に灰色で基準が示されており、基準より foF2 が大きく(小さく)なると電離圏嵐基準が明記さ れる仕組みとなっている。図 12 のカラーバーの右側に 示すように電離圏嵐の基準には 7 段階 (I_N3 、 I_N2 、 I_N1 、 I0、 I_P1 、 I_P2 、 I_P3)あり、月に 1 回程度の頻度で起きる 規模の正相嵐 (負相嵐)を I_P2 (I_N2)、年に 1 回程度の頻 度で起きる規模の正相嵐 (負相嵐)を I_P3 (I_N3) と定義し ている [25][26]。図 12 の場合は、月に 1 回程度の正相 嵐が起きたことがわかる。

4 まとめ

本稿では、イオノゾンデ観測の長い歴史の流れの中 で、最前線として設置された VIPIR2 について、その 概要と観測の現状をまとめた。VIPIR2 の強みの一つ、 マルチチャンネルを利用し、VIPIR2 ならではの新し い観測結果を複数示した。モード分離のイオノグラム と機械学習の機能を用いて、長年の課題であった自動 読み取り手法の技術も飛躍的に向上した。本稿で扱っ た項目以外にも、近年では、電子密度プロファイルの 導出やソフトウェア受信機による斜入射観測の充実な ど、研究開発を進めている。長年継続しているイオノ ゾンデ観測の歴史を守りつつ、新しい技術を取り入れ て、より高度な電離圏観測を行っていきたい。

謝辞

現在、イオノゾンデによる定常観測業務は総務省からの委託業務「電波伝搬の観測・分析の推進」に基づき 実施されております(R1-0155-0112、R2-0155-0133)。 VIPIR2の導入においては、石井守電磁波伝搬研究セ ンター長、加藤久雄元主任研究員、近藤巧元研究技術 員、丸山隆協力研究員、Scion 社の Robert Livingston 氏、米国海洋大気庁の Terry Bullet 氏にご尽力いただ きました。データ解析においては、リモートセンシン グ室の山本真之主任研究員に多数のご助言をいただき



図 12 新自動読み取り手法でリアルタイムに表示される 4 観測点における foF2 の値、6 日間の時系列プロット上から、サロベツ局、国分寺局、山川局、大宜味局。

ました。また、自動読み取り手法の開発に貢献された 日本エヌ・ユー・エス株式会社の斯波宇司氏、武藤泰 司氏、岩崎一晴氏及びイオノグラムの手動読み取り担 当の福嶋公子氏、山崎一郎氏、西牟田一三氏に心より 感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 イオノゾンデ・イオノグラムについて https://wdc.nict.go.jp/IONO/ HP2009/contents/lonogram.html
- 2 郵政省電波研究所編,"我が国における電離層観測機の変遷,"1984.
- 3 古関照男,竹内鉄雄,石澤薫,伊藤勝一,倉谷康和,"9-B型電離層観測機," 電波研究所季報, no.26, vol.139, 1980.
- 4 五十嵐喜良, 加藤久雄, 山崎亮三, "電離圏観測データネットワーク (IONET)," 通信総合研究所季報, no.41, vol.4, 1995.
- 5 加藤久雄,五十嵐喜良,大谷晃, "電離層観測データ分散処理システムの開発,"通信総合研究所季報, no.41, vol.4, 1995.
- 6 永山幹敏, 加藤久雄, 大谷晃, 五十嵐喜良, "10 型電離層観測装置," 通信総 合研究機構季報, no.41, vol.4, 1995.
- 7 加藤久雄, "電離層観測と観測情報処理システム,"宇宙天気特集 II, 通信 総合研究機構季報, no.148, vol.4, 2002.
- 8 加藤久雄, 滝口結花, 深山元, 清水由紀子, 丸山隆, 石井守, "電離圏ファク タ自動解析ソフトウェアの開発," 情報通信研究機構季報, no.55, 2009.
- 9 国立天文台星空情報 (2020 年 6 月) https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2020/06-topics03.html
- 10 深尾昌一郎, 浜津享助, "気象と大気のレーダーリモートセンシング,"京 都大学学術出版社、2005.
- 11 WDC for lonosphere and Space Weather
- https://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/index.html 12 吉田宮、"雷離層パラメータの自動読み取り
- 12 吉田實, "電離層パラメータの自動読み取り,"通信総合研究所季報, vol.35, no.174, 1989.
- 13 猪木誠二, 小泉徳次, 皆越尚紀, 吉田實, "電離層パラメータの自動 / 目視 読取りの比較,"通信総合研究所季報, vol.35, no.174, 1989.
- 14 高橋寛子, 栗城功, "イオノグラム自動処理システムの開発、システムの

概要,"通信総合研究所季報, vol.35, no.174, 1989.

- 15 猪木誠二, 加藤久雄, 吉田實, "主計算機での電離層データ処理ソフトウェ ア," no.35, vol.174, 1989.
- 16 B. W. Reinisch and X. Huang, "Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 3. Processing of bottomside ionograms," Radio Science, vol.18, pp.477–492, 1983.
- 17 Pezzopane, M. and C. Scotto, "Automatic scaling of critical frequency foF2 and MUF (3000) F2: A comparison between Autoscala and ARTIST 4.5 on Roma data," Radio Science, vol.42, 2007. doi:10.1029/2006RS003581,
- 18 Galkin, I.A., Reinisch, B.W., Grinstein, G., Khmyrov, G., Kozlov, A., Huang, X., Fung, S., "Automated exploration of the radio plasma imager data," Journal of Geophysical Research ,vol.109, JA010439, 2004.
- 19 上本順平, 久保田実, 丸山隆, 石井守, "イオノグラム自動読取…モード分離の試み,"情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, pp.429-436, 2009.
- 20 Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Jun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," 2015, https://arxiv.org/abs/1506.01497
- 21 PyTorch, https://pytorch.org/vision/stable/index.html
- 22 B.W. Reinisch_, X. Huang, I.A. Galkin, V. Paznukhov, A. Kozlov, "Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol.67, pp.1054–1062, 2005.
- 23 西岡未知, 前野英生, 津川卓也, 石井守, "OX モード分離のイオノグラムを 用いた電離圏パラメータ自動抽出手法の改善,"地球電磁気・地球惑星圏 学会, 第 148 回総会・講演会, 2020.
- 24 国内定常観測自動読み取り値

https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/auto_txt.html

- 25 Nishioka, M., T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," Space Weather, vol.15, pp.228–239, 2017. doi:10.1002/2016SW001536
- 26 電離圏嵐指標について, https://swc.nict.go.jp/knowledge/i-scale.html



西岡未知 (にしおか みち) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 主任研究員 博士(理学) 超高層大気物理



前野英生 (まえの ひでお) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 博士(工学) 電波工学



山川浩幸 (やまかわ ひろゆき) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 有期研究技術員



津川卓也 (つがわ たくや)
 電磁波研究所
 電磁波伝搬研究センター
 宇宙環境研究室
 室長
 博士(理学)
 超高層大気物理