

4-1-2 イオノグラム自動読取・・・モード分離の試み

4-1-2 *Automatic Scaling of Echo Traces on Ionogram: An Attempt to Separate Propagation Modes*

上本純平 久保田 実 丸山 隆 石井 守

UEMOTO Jyunpei, KUBOTA Minoru, MARUYAMA Takashi, and ISHII Mamoru

要旨

イオノゾンデ観測によって取得されるイオノグラムから電離圏反射エコーを自動的に読み取り、電離圏電子密度の高度プロファイルを導出するアルゴリズムは、古くから研究が進められているものの、反射エコーの複雑性の為、既存のアルゴリズムの読取性能は各々一長一短を有するのが現状である。本稿では、既存のアルゴリズムの限界から、今後開発されるべき自動読取アルゴリズムに必要とされる性能についてまとめ、そのようなアルゴリズムの開発にとって鍵となる電離圏反射エコーの伝播モードを自動的に分離する方法について述べる。

Ionogram scaling algorithms which enable us to derive automatically the ionospheric vertical electron density profile have been developed for past several decades. However, the complexity of the ionospheric echoes on ionograms confines the robustness of these algorithms. In this paper, we summarize what functions are required for a new automatic scaling algorithm based on the limitations of the existent algorithms, and introduce a method for automatically tagging the propagation modes of the ionospheric echoes which is an important key for developing a new automatic scaling algorithm.

[キーワード]

イオノゾンデ, イオノグラム, 自動読取
Ionosonde, Ionogram, Automatic scaling

1 はじめに

1920年代にその観測手法が確立されて以来、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世界中で広く行われてきており、電離圏電子密度の基本構造に関する今日の我々の知見は、イオノゾンデ観測によってもたらされたと言っても過言ではない。近年においては、GPS信号等に悪影響を与える電離圏電子密度の不規則構造のモニタリング、観測の困難な電離圏高度における熱圏中性大気風の推定等にも応用されており、依然として電離圏研究において最も有効な観測手段の一つとしての役割を担っている。またイオノゾンデ観測データの解析から電離圏の長期変動と地球温暖化の関連性が文献[1]によって報告される等、イオノゾン

デ観測の継続は近年益々その重要性を増している。

イオノゾンデ観測の基本原理は、周波数を掃引させながら電波を上空に送信し、送信電波が電離圏で反射されて地上に戻ってくるまでの時間(遅延時間)を計測するというものであり(図1a)、通常観測データは、縦軸に見掛けの高さ(遅延時間に光速 c を乗じて算出される地上-反射点間往復距離の1/2の値)、横軸に周波数を取り、信号強度をコンターで表すイオノグラムとよばれる図として表される(図1b)。

図1b中に矢印で示された曲線が電離圏F領域からの反射エコーであり、この反射エコーは電離圏電子密度の高度分布($N(h)$ プロファイル)の情報を反映している。イオノグラムは電離圏電子密度構造の概要を判断するには非常に便利

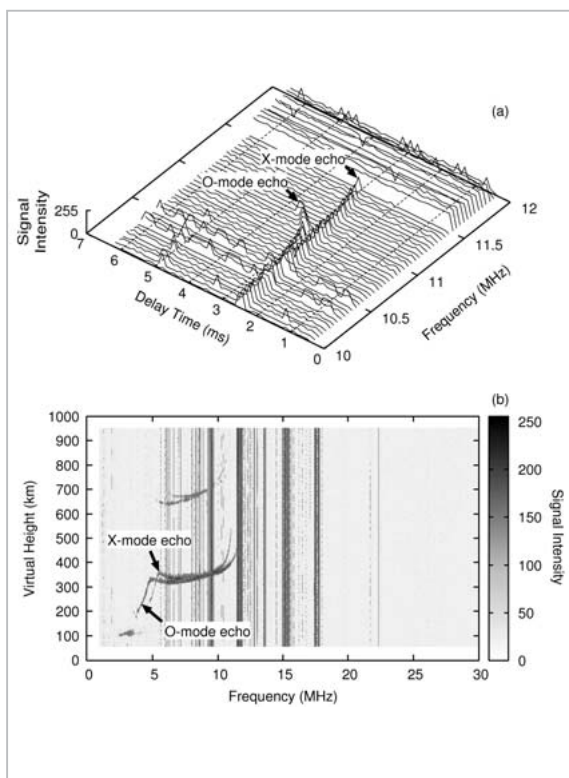


図1 (a) イオノゾンデ観測データを3次元的に表した図。1本1本の線は各周波数における遅延時間の計測結果を示している。(b) 2005年4月7日11時45分(日本時間)に沖縄で取得されたイオノグラム。矢印で示した高度200 km-600 km付近のトレースが電離圏F領域からの反射エコーである。

なフォーマットである。しかしながら、送信電波の伝播速度は電離圏電子密度や磁場の関数となっている為、図2に示したような $N(h)$ プロファイルを数値データとして得るには、反射エコーの周波数と遅延時間を逐一読み取り、伝播速度を考慮し、 $N(h)$ プロファイルに変換するプロセスが必要とされる。

これは、換言すれば反射エコーの読み取りを行わない限り、イオノグラムから電離圏電子密度の高度分布に関する数値データを得ることはできないという事であるが、反射エコーの読み取りは時間のかかる煩雑な作業であり、また正確な読み取りを行う為には熟練を要する。この為、反射エコーを自動的に読み取るアルゴリズムが古くから開発されてきた(例えば、文献[2]-[6])。反射エコーの自動読み取りの実現は、GPSに代表される衛星通信システムの安定利用を脅かす電離圏電子密度不規則構造のリアルタイムアラートの実現

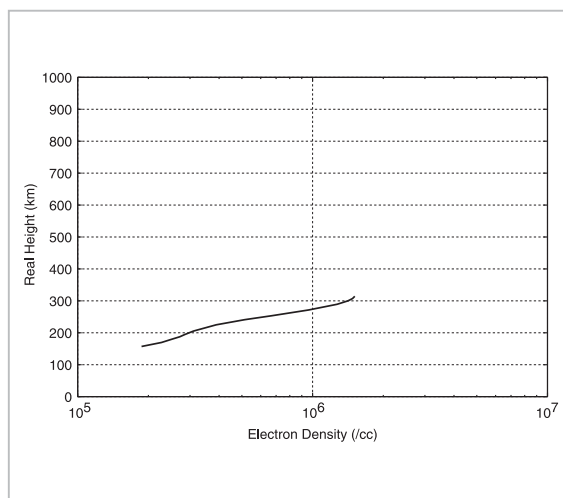


図2 図1bに示したイオノグラムのOモード反射エコーを手動で読み取り、導出した $N(h)$ プロファイル

にとって必要不可欠であるのみならず、近年明らかにされつつある超長期的な電離圏変動と温暖化の関連性の解明にとっても非常に有益である。しかしながら、イオノグラムに含まれる不要なノイズ、反射エコーの部分的な欠落、反射エコー形状の複雑性及び複数の伝播モードによる反射エコーの重畳等の為、自動読み取りは困難を極め、未だ既存のアルゴリズムの読み取り性能は各々一長一短を有するのが現状である。

本稿では、既存のアルゴリズムの限界から、今後開発されるべき自動読み取りアルゴリズムに必要とされる性能についてまとめ、そのようなアルゴリズムの開発にとって鍵となる電離圏反射エコーの伝播モードを自動的に分離する方法について述べる。

2 イオノゾンデ観測の基本原則

はじめにイオノゾンデ観測の基本原則の詳細について述べる。1でも述べたように、イオノゾンデ観測の基本原則は、上空に送信した電波の遅延時間を、送信周波数を掃引しながら計測するというものである。送信電波の周波数を f 、遅延時間を $d(f)$ 、見かけの高さ $h'(f)$ とすると、 f 、 $d(f)$ 及び $h'(f)$ の関係は以下の式で表される。

$$h'(f) = \frac{c}{2} d(f) = \int_0^{h_r} \frac{c}{V_g} dh = \int_0^{h_r} n' dh \quad (1)$$

ここで、 h は地上からの高度、 h_r は送信電波の反射点の実高度、 V_g は群速度である。係数の $1/2$ は往復分である。 $n' = (c/V_g)$ は群屈折率と呼ばれており、プラズマ中の屈折率 n と送信周波数 f を用いて以下の式で表される。

$$n' = n + f \frac{\partial n}{\partial f} \quad (2)$$

屈折率 n は電子密度 $N(h)$ 、磁場強度 $B(h)$ 、磁場と送信波の成す角 θ の関数であり、以下の式で表される。

$$n = \sqrt{1 - \frac{X}{1 - \frac{Y^2 \cos^2 \theta}{2(1-X)} \pm \sqrt{\left[\frac{Y^2 \cos^2 \theta}{2(1-X)}\right]^2 + Y^2 \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

ここで、 X 、 Y はそれぞれプラズマ周波数 f_p 、電子サイクロトロン周波数 f_c を用いて以下のように定義されている。

$$X \equiv \frac{f_p^2}{f^2} \quad (4)$$

$$Y \equiv \frac{f_c}{f} \quad (5)$$

(3)式はアップルトン・ハートレーの式として知られているコールドプラズマの分散関係式であり、イオノグラム上に現れる反射エコーの形状の複雑性は、この分散関係式の複雑性による。(3)式に現れる複号はプラスの場合正常波(Oモード)を、マイナスの場合異常波(Z、Xモード)の屈折率を定義している。これはプラズマ中の伝播モードには複数のモードが存在することを表しており、図1b中に反射エコーが2つ現れているのはこの為である(なお、Zモードの伝播に関してはトップサイドイオノグラムでは良く見られるものの、地上からのイオノゾンデ観測で得られるイオノグラムには殆ど見受けられない為、本稿では無視する)。送信電波の反射条件は、 $n=0$ であり、周波数を用いて表すとO、Xモードの反射条件はそれぞれ以下のように表される。

$$f = f_p \equiv f_o \quad (6)$$

$$f = \frac{f_c + \sqrt{f_c^2 + 4f_p^2}}{2} \equiv f_x \quad (7)$$

ここでO、Xモードの反射条件を満たす周波数をそれぞれ f_o 、 f_x と定義した。図2の $N(h)$ プロファイルについて、送信周波数を 10 MHz とした場合のO、Xモードそれぞれの V_g の高度変化の計算結果を図3に示す。なお、簡単の為、 f_c は 1.13 MHz で一定として計算している。図3から明らかなように、電子密度の低い低高度領域においては、 V_g は光速に近い値となるものの、反射高度付近に近づくにつれ、小さい値となっていくことが分かる。

言い換えると、遅延時間への寄与は反射点付近で大きくなる事が見て取れる。 $N(h)$ プロファイルはO、Xモードの何れの反射エコーを用いても導出できるが、イオノグラム上の反射エコーがどちらの伝播モードのエコーかを区別する必要がある。地上からのイオノゾンデ観測の場合、比較的強い信号強度で取得されるOモードの反射エコーがよく用いられる。しかし、図1bから明らかなように、O、Xモードの反射エコーは複雑に絡み合い、その遅延時間の長さは周波数に依存し入れ替わる。この複雑な絡み合いが、自動読取の実現を困難にしている大きな原因の一つである。

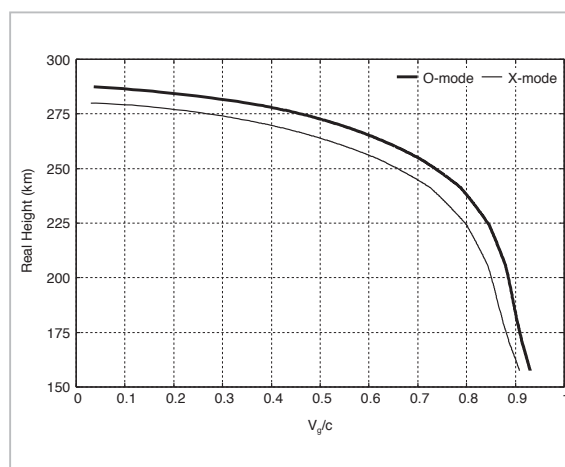


図3 図2の $N(h)$ プロファイルについて、送信周波数を 10 MHz として計算したO、Xモードそれぞれの V_g の高度変化

V_g は光速 c で規格化している。簡単の為、 f_c の高度変化は無視しており、 $f_c = 1.13$ MHz として計算している。

3 O、X モード自動分離アルゴリズム開発の必要性

これまで開発されてきた自動読取アルゴリズムの中で、 $N(h)$ プロファイルの自動導出に特化したアルゴリズムとしては、ARTIST4.5(文献[4]参照)、Autoscala(文献[5]参照)が挙げられる。先に述べたように、 $N(h)$ プロファイルの自動導出実現にとっての大きな問題の一つは、O、Xモードを如何に分離するかである。ARTIST4.5では、予めハードウェア的に偏波分離が行われたイオノグラムを用いる事でこの問題の解決を図っている。しかしながら、ハードウェアでの偏波分離に失敗した場合、 $N(h)$ プロファイルの導出に失敗する可能性がある事が知られており(文献[7]の図7参照)、また、これまで蓄積されてきたイオノグラムの多くが偏波情報を含まない事を考慮すると、ソフトウェア的に偏波分離できる事が望ましいと言える。一方、Autoscalaは予め複数のパラメータで構成されるモデル $N(h)$ プロファイルを用意し、そのモデルプロファイルからO、Xモード反射エコーを計算し、イオノグラムと比較しながらイオノグラム上の反射エコーを最も良く再現するパラメータを求めるアルゴリズムを採用している。但し、このアルゴリズムの場合、低磁気緯度領域でしばしば観測されるF1.5層等のような予め用意したモデルプロファイルから逸脱する反射エコーに関しては、自動読取に失敗する事が指摘されている[5]。

以上述べた既存の自動読取アルゴリズムの限界、及びこれまで蓄積されてきたイオノグラムの多くが偏波情報を含まない事を踏まえると、ソフトウェア的にO、Xモードを自動分離でき、かつF1.5層等のようなイレギュラーな反射エコーに対応できる性能を持つ自動読取アルゴリズムの開発が新たに必要であり、更にそのようなアルゴリズムの開発には、モデル $N(h)$ プロファイルを用いる事無く、イオノグラム上のO、Xモード反射エコーを自動分離する手法の開発が必要とされる事が分かる。以下、本稿では現在開発を進めているO、Xモードの自動分離アルゴリズムの詳細を述べる。

4 O、X モード自動分離アルゴリズム

O、Xモード反射エコーの分離を行う下準備として、反射エコーをノイズから分離し、反射エコー候補点を抽出する必要があるが、ここで注意すべき点は、信号強度が比較的小さくなる f_oF1 や、 f_oF2 付近の反射エコーの情報を失わないようなノイズ除去が第一段階の処理として必要な事である。その後、第二段階として残されたノイズから反射エコー候補点の抽出を行い、得られた反射エコー候補点についてモード分離を行う。

4.1 ノイズ除去処理

図4にO、Xモード自動分離アルゴリズムの流れを示す。

まず初めに各周波数について平均強度を算出し、求められた平均強度の2倍以上の強度を持つ点のみを抽出する(図4b)。次に抽出された全ての点に対して以下の式で定義されるconnectednessと呼ばれる点の連結性に関する評価値を計算する。

$$c(x_i, y_i) = \sum_{x(x_i), y(y_i)} \frac{1}{\sqrt{(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)}} \frac{s(x_i, y_i)s(x_j, y_j)}{1 + |s(x_i, y_i) - s(x_j, y_j)|} \quad (8)$$

ここで (x_i, y_i) は考えている画素の座標、 (x_j, y_j) は (x_i, y_i) を中心としたある範囲にある任意の座標、 $c(x_i, y_i)$ はconnectedness、 $s(x, y)$ は画素の強度を表している。(8)式を見れば分かるように、考えている画素の強度が大きければ大きいほど、また近くに同じような強度の画素が多ければ多いほど、connectednessは大きい値となる。このconnectednessを評価する事によって、信号強度の比較的小さい臨界周波数付近の反射エコー、及びスプレッドFのようなぼやけた反射エコーがノイズ除去処理の段階で欠落してしまう事を防ぐことができる。周波数毎に残された点を数え、その数が多い場合は、(8)式から求められるconnectednessに適切な閾値を決め、閾値以下の点をノイズとして落とす(図4c)。更に、ランダムノイズの除去処理を行った後、最後に残った点に関して細線化を施し、二値化する(図4d)。

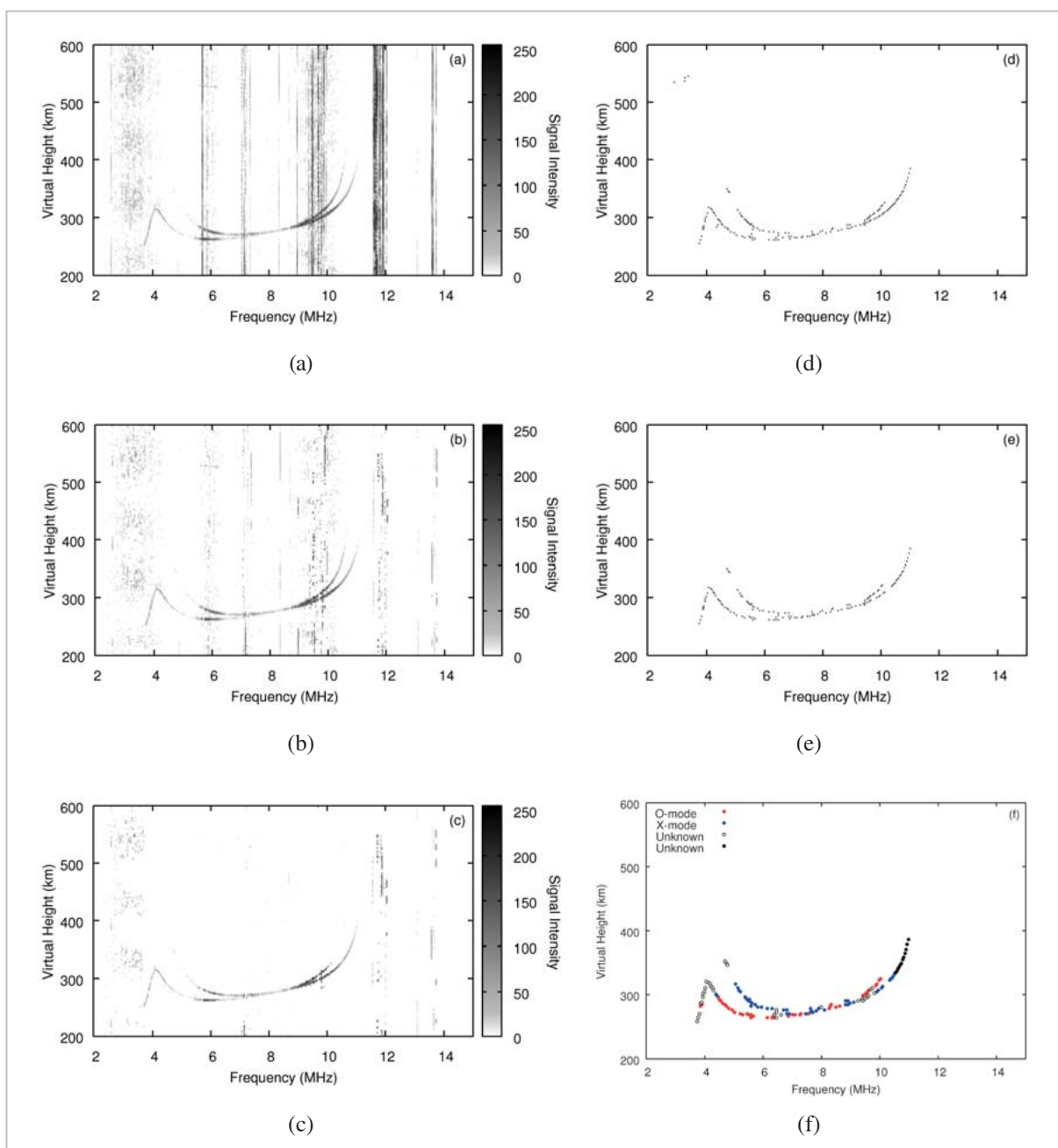


図4 ノイズ除去処理、反射エコー候補点の抽出、及びO、Xモード自動分離の一連の過程

(a)から(f)に向かって処理が進行する。(a)は、2009年2月5日8時UTにタイのチェンマイで得られたイオノグラムから周波数2-15 MHz、見掛けの高度200-600 kmの部分を取り出した図である。パネル(f)の赤点、青点は、それぞれ自動分離アルゴリズムによって、Oモード(P_o)、Xモード(P_x)と判定された点、白抜きの点は、 P_U を表す。黒点は、 P_o と判定された点の最高周波数より周波数が高い P_U を示す。

4.2 反射エコー候補点の抽出

次に、第二段階の処理として、上記の第一段階の処理で得られたイオノグラムから、反射エコー候補点の抽出を行う。この第二段階の処理は、ノイズを含む画像から複数かつ任意の不連続曲線を抽出する画像処理と捉えることができ

る。ここでは、文献[8]に述べられている手法を第一段階処理後のイオノグラムに適用する。文献[8]の手法は、投票処理に基づくものであり、Hough変換では行えないような、任意曲線を抽出できる点において優れている。この手法では、まず任意に2点を選択し、画像内の残りの点を

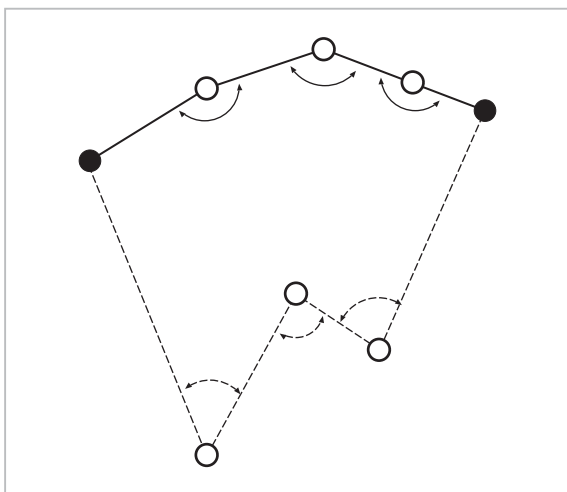


図5 曲線の尤もらしさの評価方法に関する模式図

黒点は曲線の始点、終点、矢印付きの円弧は2直線の内角、実線、鎖線は曲線を構成する2点間の直線をそれぞれ示している。

任意に用いながら尤もらしい曲線を形成させる。次に形成された曲線の尤もらしさを評価し、曲線を形成する全座標にその評価値を投票する。曲線の尤もらしさの評価は、視覚的な曲線認識に重要な役割を果たしている近接要因、及び連続性要因に基づいて行われる。近接要因とは、点間の距離の近さを表し、連続性要因とは、3点を結んだ時にできる2直線の滑らかさ、即ち、2直線の成す角がどれくらい180度に近いかを表す。例えば図5に示された二曲線の尤もらしさを比較した場合、実線で表された曲線の方が、近接要因、連続性要因の点で優れており、より尤もらしい曲線として評価される事になる。

上記の曲線形成及び投票を画像内の全ての任意の2点の組み合わせについて行い、最終的に投票値の高い点のみを反射エコー候補点として抽出する。但し、イオノグラムにこの手法を適用する際は、信号の受かっていない点が曲線候補として残るのを防ぐ為、投票は曲線を形成する全座標に行うのではなく、第一段階処理後に残された点についてのみ行う。第二段階処理後のイオノグラムを図4eに示す。

4.3 O、Xモード自動分離

図4eに示された第二段階処理後のイオノグラムからO、Xモードの反射エコーを自動分離するアルゴリズムについて述べる。O、Xモード自

動分離とは、具体的に言い換えると、第二段階処理後に残った全ての点をO、Xモードの点 P_o 、 P_x 、または、ノイズ及びどちらとも判別がつかない点 P_U として自動的に分類することである。方法としては、まずイオノグラム上の任意の点 P をOモードの点 P_o と仮定する。この点 P_o に対応するXモードの点 P_x がイオノグラム上に見つかった場合、それぞれの点をO、Xモードの点と見なす。逆に対応するXモードの点が見つからなかった場合は、選択した点 P は P_U と見なす。以上の判別を全ての点について行い、全点を P_o 、 P_x 及び P_U に分類する。つまり、この自動分離アルゴリズムの鍵は、如何に P_o から対応する P_x を算出するかという事である。以下、 P_o から P_x を算出する方法の詳細について述べる。

任意の点 P をOモードの点 P_o と仮定した時、任意に選んだ点 P は、Oモードの反射条件を満たしていることになり、送信周波数 f は(6)式で定義した f_o に等しくなる。従って(6)式から反射点における電子密度 $N(h_r)$ を求めることが出来る。また、 P_o は $P_o(f_o, h_o'(f_o))$ と表すことができ、 $h_o'(f_o)$ は(1)式から以下のように表すことができる。

$$h_o'(f_o) = \int_0^{h_r} n_o'(f_o, N(h), B(h), \theta(h)) dh \quad (9)$$

ここで、 n_o' はOモードの群屈折率であり、(2)、(3)式から群屈折率を計算する際に、(3)式中の複合は正号の方を用いて計算する事を意味する。(9)式の右辺を見れば分かるように、 $h_o'(f_o)$ は地上から高度 h_r の高度範囲における $N(h)$ の関数である(磁場はIGRF等のモデルから計算する)。一方、Xモードの伝播に関するこの高度範囲における積分も(9)式と同様に表すことができる。この積分範囲でのXモードの反射を取り扱う場合、考えるべき送信周波数 f はXモードの反射条件を満たす周波数 f_x であり、今反射点における電子密度 $N(h_r)$ は既知であるから、(7)式より f_x を計算することができる。なお、厳密には磁場に関する数値は未知であるが、地球半径の半径約6370kmに対して、実高度と見掛けの高度の差はせいぜい100km以下のオーダーなので、磁場に関する関数は見掛けの高度からの値を代用する。(1)式から $h_x'(f_x)$ は以下のように表すことができる。

$$h_X'(f_X) = \int_0^{h_r} n_X'(f_X, N(h), B(h), \theta(h)) dh \quad (10)$$

ここで、 n_X' は Xモードの群屈折率である。従って、Oモードであると見なした故に既知である点 $P_O(f_O, h_O'(f_O))$ の情報を基に、(9)、(10)式から点 P_O に対応する Xモードの点 $P_X(f_X, h_X'(f_X))$ を計算し、イオノグラム上にこの点が存在するかどうか判断すれば良い。しかし、言うまでも無く $N(h)$ 及び実反射高度 h_r は未知である為、(9)、(10)式の右辺の高度積分を行うことはできない。この事実は、 P_O に対応する点 P_X の算出は原理的には不可能であることを意味する。従って、何らかの仮定を考え、近似計算を行う必要がある。ここでは、図3に見られるように、プラズマ中を伝播する送信電波の速度は、反射点付近で小さくなる性質を利用する事を考える。この性質は、(9)及び(10)式右辺の高度積分値において、反射点付近の積分値の占める割合が大きい事を意味する。従って本アルゴリズムでは、(9)、(10)式右辺の高度積分を、反射点近傍の群屈折率の定数倍で表すことができると仮定する。今、反射点の密度 N_r を $N_r = N_r' + \Delta N$ とすると、この仮定の下では、(9)、(10)式はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$h_O'(f_O) \cong \alpha n_O'(f_O, N_{r'}, B, \theta) \quad (11)$$

$$h_X'(f_X) \cong \beta n_X'(f_X, N_{r'}, B, \theta) \quad (12)$$

ここで、 α 、 β はそれぞれ(9)、(10)式右辺の高度積分値に占める反射点近傍の群屈折率の割合に関する係数である。(11)、(12)式右辺の群屈折率は解析的に計算でき、ここで更に $\alpha \approx \beta$ を仮定すると、(11)、(12)式から $h_X'(f_X)$ は、 $P_O(f_O, h_O'(f_O))$ から以下の式のように計算できる。

$$h_X'(f_X) \cong \frac{n_X'}{n_O'} h_O'(f_O) \quad (13)$$

この関係式を用いて、全点を P_O 、 P_X 及び P_U に分類する。

(13)式の適用例として、図1bに示したイオノグラムのOモード反射エコーを手動で読み取り、

計算したXモードを図6に示す。

図6中の赤線、青線はそれぞれ図1bに示したイオノグラムから手動で読み取ったO、Xモード反射エコー、水色線は(13)式から計算されたXモード反射エコーを示している。総じて計算されたXモードの反射エコーは観測されたそれと良い対応を示しており、この結果は、ここで述べたO、Xモード自動分離アルゴリズムが有用であることを表している。

図4fは、図4eに示される反射エコー候補点にO、Xモード自動分離を適用した結果である。赤点、青点はそれぞれ本アルゴリズムによって分類された P_O 、 P_X であり、白抜きの点は P_U である。また、黒点は、 P_U のうち、 P_O と判定された点の最高周波数より周波数が高い P_U を示す。なお、 f_{oF1} 以下の周波数帯におけるXモードの欠落の為、この周波数帯において、 P_U が多く見られるものの、正確に自動分離が行われた事が見て取れる。

以上、O、Xモード自動分離アルゴリズムについて述べてきた。しかし、O、Xモードを分離しただけではまだ $N(h)$ プロファイルを自動で導出する事はできない。その為には、 P_U と判定された点を更にノイズ及び P_O に分類する必要がある。なぜなら、図4fに見られるように、Xモードの欠落があった場合、 P_O となるべき点が P_U と判定されてしまうからである。 P_U の分類につい

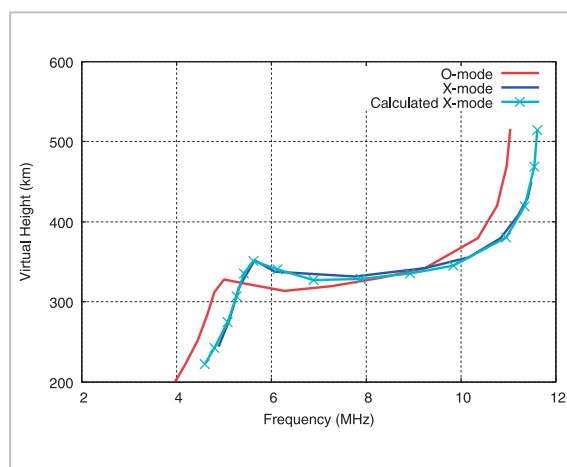


図6 図1(b)に示されたイオノグラムについて(13)式を適用した結果

赤線、青線はそれぞれ手動で読み取ったO、Xモードの反射エコーを示し、バツ印付きの水色線は(13)式に基づいて計算されたXモードの反射エコーを示している。

ては、文献[9]の手法を応用したアルゴリズムを現在開発中であり、そのアルゴリズムの開発と自動読取から得られる $N(h)$ プロファイルの信頼性を評価するアルゴリズムの開発が今後の課題である。一方、 P_o 及び P_u で構成される画像は、僅かにノイズを含むものの、偏波分離観測によって得られた O モードのイオノグラムと見なすことが出来る。従って、本稿で述べた O 、 X モード自動分離アルゴリズムによって得られる O モードのイオノグラムに ARTIST4.5、または文献[6]のアルゴリズムを適用する事によって、 $N(h)$ プロファイルの自動導出が実現できる可能性もある。そのような既存のアルゴリズムとの組み合わせによる $N(h)$ プロファイルの自動導出についても今後検討を行う必要がある。

5 むすび

$N(h)$ プロファイルの自動導出の実現は、今後のイオノゾンデ観測研究にとって必要不可欠であるが、その一方で、反射エコーの複雑性の為、既存のアルゴリズムの読取性能は各々一長一短を有するのが現状である。既存のアルゴリズム

の限界及びこれまで蓄積されてきたイオノグラムの多くが偏波情報を含まない事を踏まえ、ソフトウェア的に O 、 X モードを自動分離でき、かつ F1.5 層等のようなイレギュラーな反射エコーに対応できる性能を持つ自動読取アルゴリズムの開発が新たに必要であり、そのようなアルゴリズムの開発には、モデル $N(h)$ プロファイルに頼る事無く、イオノグラム上の O 、 X モード反射エコーを自動分離する手法の開発が必要とされる事を指摘した。本稿で述べた O 、 X モード自動分離アルゴリズムは、プラズマ中を伝播する送信電波の速度が反射点付近で急激に小さくなる性質に基づいており、モデル $N(h)$ プロファイルに頼る事無く O 、 X モードの自動分離を可能にするアルゴリズムである。今後は、このアルゴリズムによってモード分離されたイオノグラムから $N(h)$ プロファイルを自動導出するアルゴリズム、及び自動導出の信頼性を評価するアルゴリズムの開発を進めつつ、本稿で述べた O 、 X モード自動分離アルゴリズムによって得られる O モードのイオノグラムと既存のアルゴリズムとの組み合わせによる $N(h)$ プロファイルの自動導出についても検討を行う。

参考文献

- 1 Alfonsi, L., G. De Franceschi, and L. Perrone, "Long term trend in the high latitude ionosphere", Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, Vol.26, pp.303-307, 2001.
- 2 Galkin, I. A., and N. I. Dvinskikh, "Interpretation of vertical incidence sounding data by electronic computing machine BECM-2M", Studies in Geomagnetism and Aeronautical Physics, Vol.Sun3, pp.109-143, 1968.
- 3 吉田寛, "電離層パラメータの自動読取", 通信総合研究所季報, Vol.35, pp.33-40, 1989.
- 4 Reinisch, B. W., X. Huang, I. A. Galkin, V. Paznukhov, and 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.
- 5 Scotto, C., "Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis", Advances in Space Research, Vol.44, pp.756-766, 2009.
- 6 加藤久雄, 滝口結花, 深山大元, 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, 本特集号, 4-1-1, 2009.
- 7 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, doi:10.1029/2006RS003581, 2007.

- 8 齊藤文彦, “点間の近接と連続性評価に基づく投票処理による主観的曲線の抽出”, 電気学会論文誌(C), Vol.120-C, pp.1257-1264, 2000.
- 9 齊藤文彦, “視覚的群化要因に基づくGAを用いた高速な曲線抽出”, 画像電子学会誌, Vol.28. pp.405-413, 1999.

うえ ちとじゆん べい
上本純平

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ専攻研究員 博士(理学)超
高層大気物理



くぼた みつる
久保田 実

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ主任研究員 博士(理学)超
高層大気物理

まる やま たかし
丸山 隆

上席研究員 博士(工学)
超高層大気物理

いし じ けん
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