

4 宇宙天気と情報処理・情報通信技術

4 *Space Weather with Informatics, Information and Communications Technology*

4-1 データ処理技術とデータ利活用技術

4-1 *Technologies of Data Processing and Data Application*

4-1-1 電離圏ファクタ自動解析ソフトウェアの開発

4-1-1 *Development of Automatic Scaling Software of Ionospheric Parameters*

加藤久雄 滝口結花 深山大元 清水由紀子 丸山 隆 石井 守
KATO Hisao, TAKIGUCHI Yuka, FUKAYAMA Daigen, SHIMIZU Yukiko,
MARUYAMA Takashi, and ISHII Mamoru

要旨

電離圏観測データ(イオノグラム)から電離圏ファクタを自動解析するソフトウェアを開発した。衛星測位等に重大な悪影響を及ぼす恐れのある電離圏の擾乱現象を把握することはこれまでも増して重要になってきている。NICTでは東南アジアの電離圏擾乱現象監視システムを構築し、早期警戒情報を提供するプロジェクトを遂行しているが、このプロジェクトでは得られた電離圏観測データの自動解析が必要不可欠である。本自動解析ソフトウェアはウェーブレット変換ノイズ除去、2次元ローパスフィルタノイズ除去、E/F層エコートレース抽出、E/F層マルチエコー除去、論理オミットフィルタから構成される。手動解析電離圏ファクタ値との比較を行った結果、本ソフトウェアの性能は既存の自動解析処理のそれを大幅に上回ることが確認された。

We have developed a new automatic scaling software of ionospheric parameters. Automatic monitoring of ionospheric irregularities has become more important since the ionospheric irregularities cause severe disturbances for recent sophisticated communication and navigation systems. NICT carries out a project to monitor the ionosphere in South-East Asia for early warning of occurrences of ionospheric irregularities. In this project, developing the automatic scaling software of ionogram occupies one of the important parts. In this paper, we report the new automatic scaling software of ionospheric parameters in detail. This software consists of noise reduction by wavelet transform and 2-D low-pass filter, detection of E/F-region echo traces, reduction of E/F-region multi-echoes and logical error omitting filter. We demonstrate its higher performance than old one by comparing automatically and manually scaled ionospheric parameters.

[キーワード]

電離圏, 電離圏擾乱, イオノグラム, 自動解析
Ionosphere, Ionospheric disturbances, Ionograms, Automatic scaling

1 まえがき

航空機の効率的な運行に必要とされる電子航法や、見通しの効かない山間地でも利用可能な高精度電子測量などに代表される様に、近年衛星測位の高度利用化が進んでいる。一方で上空 80 [km] ~ 1000 [km] の電離圏における擾乱現象がこれらの電波利用に対して障害となることが知られており、電離圏擾乱現象を把握することは重要度を増している。

我々は電離圏擾乱現象の監視システムを構築し、早期警戒情報を提供するプロジェクトを遂行している。このプロジェクトでは国内及び東南アジアにイオノゾンデを始めとする観測装置を展開し電離圏の状況をモニターしているが、警戒情報を早期に提供するためには得られた電離圏観測データ(イオノグラム)を即座に解析し判断する必要があるため、電離圏ファクタ値を自動解析することが必須となる。

情報通信研究機構(およびその前身)では過去約 70 年にわたって電離圏観測を継続実施している。1980 年代後半からは電離圏ファクタ自動解析処理^{[1][2]}の運用を開始し、更新した観測装置と改良を施したプリプロセスにより逐次安定度を増してきているが、今回新たに電離圏主要層(E 層および F 層)の輪郭抽出に的を絞った解析処理の開発に取り組み、既存自動解析処理^[3]を上回る結果を得られるようになったのでその概要を述べる。

2 システム構成と解析処理の概略

システムのブロックダイアグラム概略を図 1 に示す。

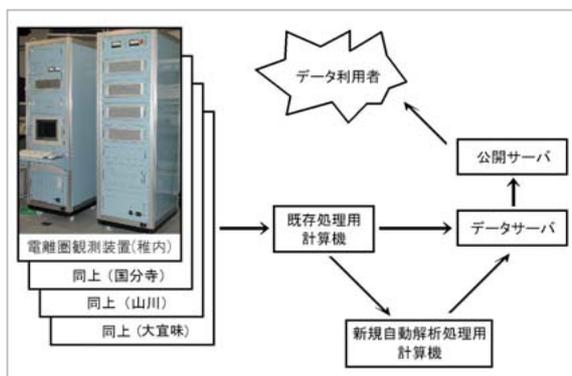


図1 ブロックダイアグラム概略

国内 4 観測施設(稚内[北海道]、国分寺[東京]、山川[鹿児島]、大宜味[沖縄])の電離圏観測装置により得られたイオノグラムは既存の各サーバを経由し、様々な形態に加工され準リアルタイムで利用者に提供されている。電離圏ファクタ自動解析ソフトウェアは図中の「新規自動解析処理用計算機」で実行され、開発は既存の各処理を妨げないよう留意しつつ行われた。

また解析ソフトウェアの各種処理過程概略を図 2 に示す。

後述する様に入力されたイオノグラムは、ウェーブレット変換ノイズ除去、2次元ローパスフィルタノイズ除去、E/F 層エコートレース抽出、E/F 層マルチエコー除去、論理オミットフィルタなどの各処理を経て自動解析される。

3 解析ソフトウェア

観測されたイオノグラムには大量の不要成分(ノイズやマルチエコー)が含まれており、本解析ソフトウェア開発においては多くの努力をこの不要成分除去に費やした。

また全ての処理過程が全てのイオノグラムに対して均等な処理結果をもたらすとは限らず副作用となって現れる場合もあるので、ソフトウェア開発とパラメータ調整には慎重を要する。

3.1 ウェーブレット変換によるノイズ除去処理

イオノグラムに多く含まれる縦線状の混変調ノイズは従来フーリエ変換を用いて除去していたが、本システムではウェーブレット変換を用いて除去することとした。フーリエ変換による場合、不要成分除去の過程で高周波成分を落してしまうことによるエコー強度の弱まり現象、およびノイズ強度が飽和しているとエコー成分を検出できないことによるエコーの中抜け現象が発生してしまう。一方ウェーブレット変換を用いた場合、処理時間に約 2 倍を要するもののイオノグラムのような局所的信号抽出によく適合し、フーリエ変換を用いた場合の欠点を補うことができる。

3.2 二次元ローパスフィルタによるノイズ除去

ウェーブレット変換によるノイズ除去処理後にもイオノグラム上には細かなランダムノイズが残

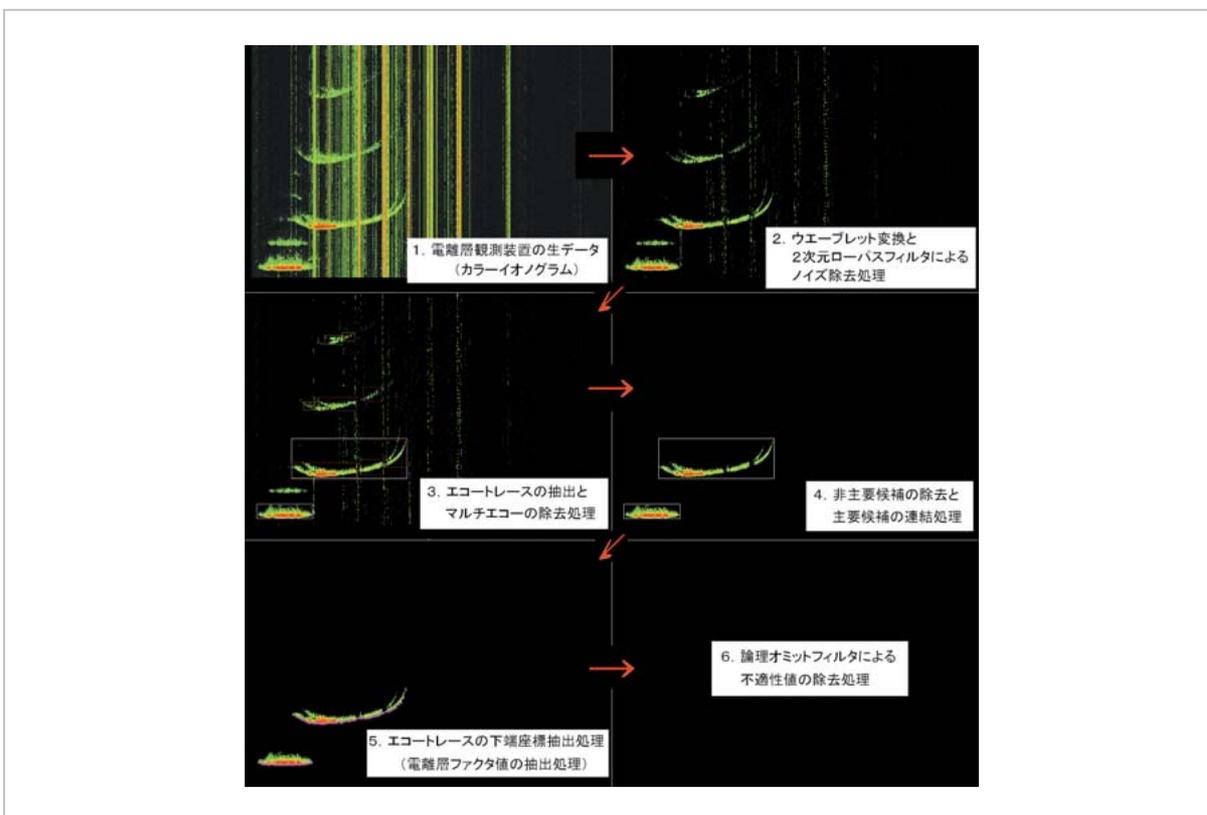


図2 各種処理過程概略

る。この種のノイズは注目する画素とその近隣画素の状態を判定して除去する二次元ローパスフィルタ処理を全画素に対して施すことによって効果的に除去することができる。

3.3 E層エコーの抽出

高度 100 [km] 前後に存在する E 層エコーを抽出するために以下の各処理を行う。

- (1) 強度値が閾値以下 (デフォルト = 128、強度値は 8 ビット = 0 ~ 255 の値を持つ) で周波数方向幅が閾値以下 (デフォルト = 3) の領域をノイズとする。
- (2) 高度方向幅が閾値以上 (デフォルト = 4) で周波数方向幅が閾値未満 (デフォルト = 10) の領域をノイズとする。
- (3) 残った領域の中から中心となる連続域を決定する。
- (4) 中心連続域から周波数方向に閾値以上 (デフォルト = 40) 離れている領域をノイズとする。
- (5) 周波数方向幅が閾値未満 (デフォルト = 10) の領域の内、中心連続域から高度方向に重複し

ない領域をノイズとする。

- (6) 全領域の合計面積が閾値未満 (デフォルト = 30) ならば E 層無しと判定する。
- (7) 面積が全領域合計面積の閾値未満 (デフォルト = 5%) の領域をノイズとする。
- (8) 面積が閾値未満 (デフォルト = 50) で全領域合計面積の閾値未満 (デフォルト = 1%) の領域をノイズとする。

3.4 E層マルチエコーの除去

観測電波が E 層と地表との間を複数回往復して生じる E 層マルチエコーを除去するために以下の各処理を行う。

- (1) E 層マルチエコーの出現予想域を求める。
- (2) 出現予想域に収まる領域は E 層マルチエコーとする。
- (3) 出現予想域付近の領域について出現域からのみ出し率を算出する。
- (4) はみ出し率が閾値未満 (デフォルト = 20%) なら E 層マルチエコーとする。
- (5) はみ出し率が閾値以上 (デフォルト = 80%) なら F 層の可能性があるので保留する。

- (6) はみ出し率が下限閾値以上(デフォルト = 20%)、上限閾値以下(デフォルト = 80%)でF層エコーと重複していなければE層マルチエコーとする。

3.5 F層エコーの抽出

概ね高度150[km]以上に存在するF層エコーを抽出するために以下の各処理を行う。

- (1) 高度方向幅が閾値以上(デフォルト = 10)で周波数方向幅が閾値未満(デフォルト = 10)の領域はノイズとする。
- (2) 高度方向幅が閾値以上(デフォルト = 20)で周波数方向幅が閾値以上(デフォルト = 20)の領域をF層候補とする。
- (3) 周波数方向幅が閾値以上(デフォルト = 10)または強度の最大値が閾値以上(デフォルト = 128)の領域を準F層候補とする。
- (4) 各候補について両端以外に存在する周波数方向幅が閾値以下(デフォルト = 3)の細い縦線をノイズとする。
- (5) 準F層候補同士で条件に合うものを結合し、F層候補条件「(2)」に合えばF層候補とする。
- (6) F層候補と準F層候補で条件に合うものを結合する。
- (7) F層候補同士で条件に合うものを結合する。
- (8) 準F層候補のみが存在する場合は平均強度 = 最大、面積 = 最大、回帰分析勾配 = 正の条件を満たすものをF層候補とする。
- (9) E層マルチエコー領域周囲の閾値以内(デフォルト = 20)に収まり最大強度値が閾値未満(デフォルト = 100)のF層候補はE層マルチエコーの一部とする。

3.6 F層マルチエコーの除去

観測電波がF層と地表との間を複数回往復して生じるF層マルチエコーを除去するために以下の各処理を行う。

- (1) F層マルチエコーの出現予想域を求める。
- (2) 出現予想域に収まる領域はF層マルチエコーとする。
- (3) ただし近接するF層マルチエコーが重複している場合は出現予想域内のみの領域をF層マルチエコーとする。

3.7 F層からのノイズ除去

F層候補領域内に存在する縦棒状のノイズを除去するために以下の各処理を行う。

- (1) エコー底辺の周波数方向の傾きを求め、周波数方向幅が閾値以内(デフォルト = 15)で傾きが負で始まり正で終わる領域を縦線ノイズとする。
- (2) ただしエコー左端においてエコー底辺の傾きが負で始まっていた場合、エコー上端の傾きも負で始まっていればノイズとしない。

3.8 F層候補からF層の選定

F層候補の中から最適なものを選定するために以下の各処理を行う。

- (1) F層候補のうち面積が最大で平均強度も最大のものでF層とする。
- (2) 「(1)」の条件に合うF層候補が存在しない場合は各F層候補についてエコーの勾配を求めて勾配が負のものを除外する。
- (3) 残ったF層候補のうちで最も低高度かつ最も低周波数帯に存在するものをF層とする。

3.9 電離圏ファクタ値の抽出

上記各処理を施すことにより電離圏主要層であるE層およびF層の領域選定が成される。これら各領域の下端トレース座標値を抽出すると共に高度方向および周波数方向の各最小値・最大値を求めると概ね電離圏ファクタ値の一部となる。本論ではそれぞれを以下の様に記す。

F層領域の最低反射周波数	fminF
F層領域の最高反射周波数	fmaxF
F層領域の最低反射高度	hminF
E層領域の最低反射周波数	fminE
E層領域の最高反射周波数	fmaxE
E層領域の最低反射高度	hminE

3.10 論理オミットフィルタ

「3.9」までの各処理では電離圏の論理的特性をほとんど考慮していないため、除去しきれなかったノイズやマルチエコーの影響によっては誤った値を抽出している場合がある。そのため得られた各トレース情報・高度値・周波数値をそれぞれ電離圏特性と照らし合わせて検証し、論理的にあり得ない値や疑わしい値の除去を行って確度を向上

させる。

4 自動解析値の比較結果

この様に自動解析して得られた電離圏ファクタ値(以下、新自動値)がどの程度の精度を有するかを、旧来の自動解析値(以下、旧自動値)および人による目視解析値(以下、目視値)と比較して検証した。

尚目視値解析者ごとの偏差に基づく検証誤差を小さくするために、目視値と各自動解析値の差の中央値をオフセット値とし、合致とみなす誤差範囲を高度系ファクタにおいて ± 25 [km]、周波数

系ファクタにおいて ± 500 [kHz]として合致率を算出した。

4.1 fmaxE

高度 100 [km] 前後に存在する E 層エコーの最高反射周波数を表す電離圏ファクタ値「fmaxE」に関しては、新自動値・旧自動値・目視値共に E 層系周波数の各最高値をもって比較・検証した。

国分寺における 2005 年 3 月の比較グラフを図 3 に示す。

上下段共に赤点は目視値、上段青点は旧自動値、下段青点は新自動値を示している。一見して判る様に新自動値の方が読取率は高く、目視値の読取

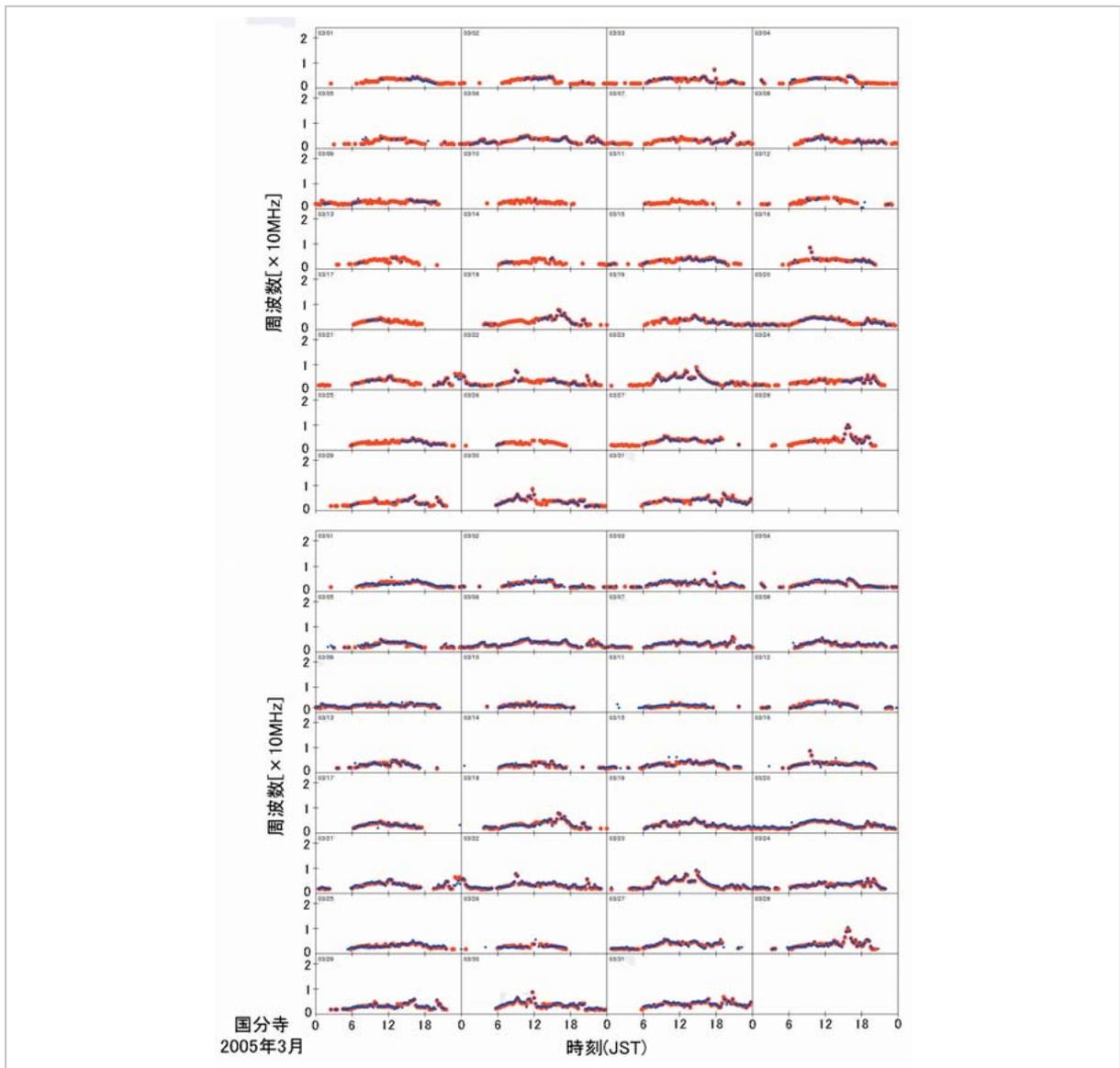


図3 fmaxE 読取値比較

(赤点=目視値、上段青点=旧自動値、下段青点=新自動値)

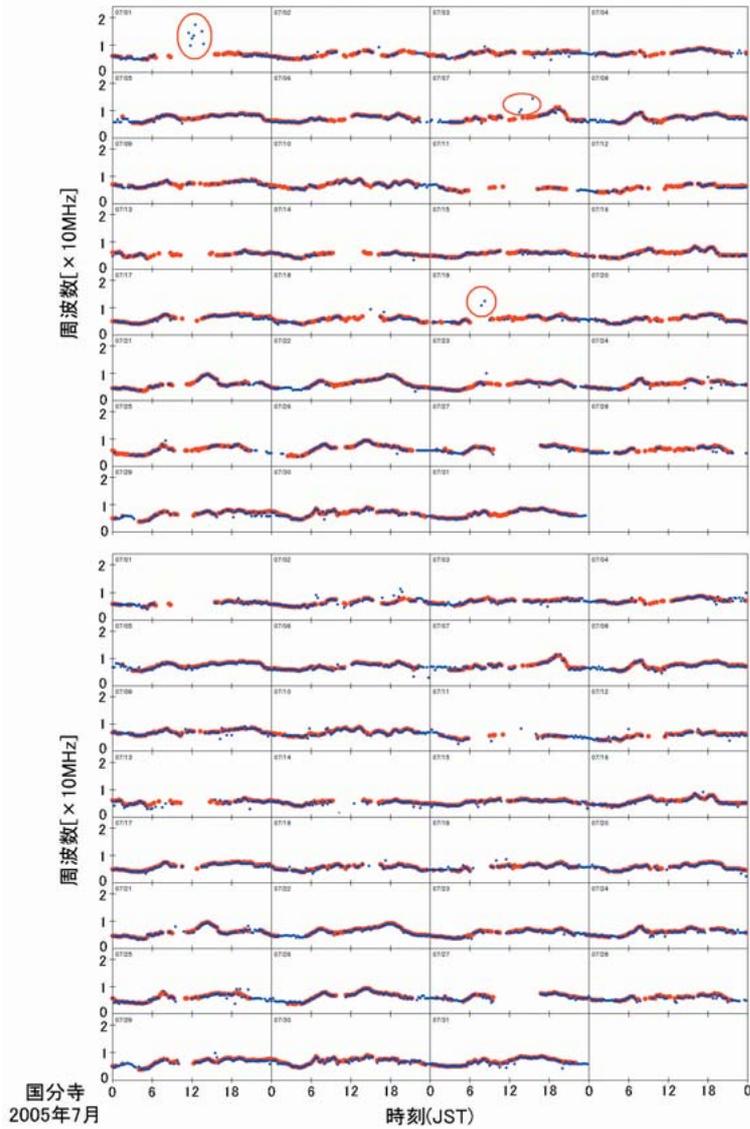


図4 fmaxF 読取値比較

(赤点=目視値、上段青点=旧自動値、下段青点=新自動値)

表1 主要ファクタ値の読取率・合致率比較

	fmaxE読取率[%]			fmaxF読取率[%]			hminF読取率[%]		
	旧自動	新自動	人	旧自動	新自動	人	旧自動	新自動	人
2005年1月	16	54	53	73	94	94	24	94	92
2005年2月	13	61	61	88	98	96	17	98	97
2005年3月	30	69	69	92	99	98	19	99	95
2005年4月	49	80	82	91	97	95	22	97	85
2005年5月	71	90	92	69	84	81	15	84	68
2005年6月	83	97	98	58	76	67	12	76	60
2005年7月	69	90	92	64	83	76	9	83	72
2005年8月	70	93	93	66	84	78	9	84	72
2005年9月	41	79	79	75	92	92	12	92	86
2005年10月	39	77	76	81	96	94	19	96	91
2005年11月	28	72	70	76	98	95	22	98	94
2005年12月	44	82	81	68	94	93	24	94	92

	fmaxE合致率[%]		fmaxF合致率[%]		hminF合致率[%]	
	旧自動	新自動	旧自動	新自動	旧自動	新自動
2005年1月	25	75	74	92	19	91
2005年2月	19	74	86	95	14	92
2005年3月	39	80	90	95	17	87
2005年4月	55	82	87	93	18	82
2005年5月	68	83	71	84	12	68
2005年6月	72	80	64	79	6	60
2005年7月	64	79	66	83	5	56
2005年8月	64	79	69	83	6	68
2005年9月	46	82	74	88	10	76
2005年10月	44	83	80	92	17	87
2005年11月	35	84	73	93	17	91
2005年12月	47	86	67	91	19	89

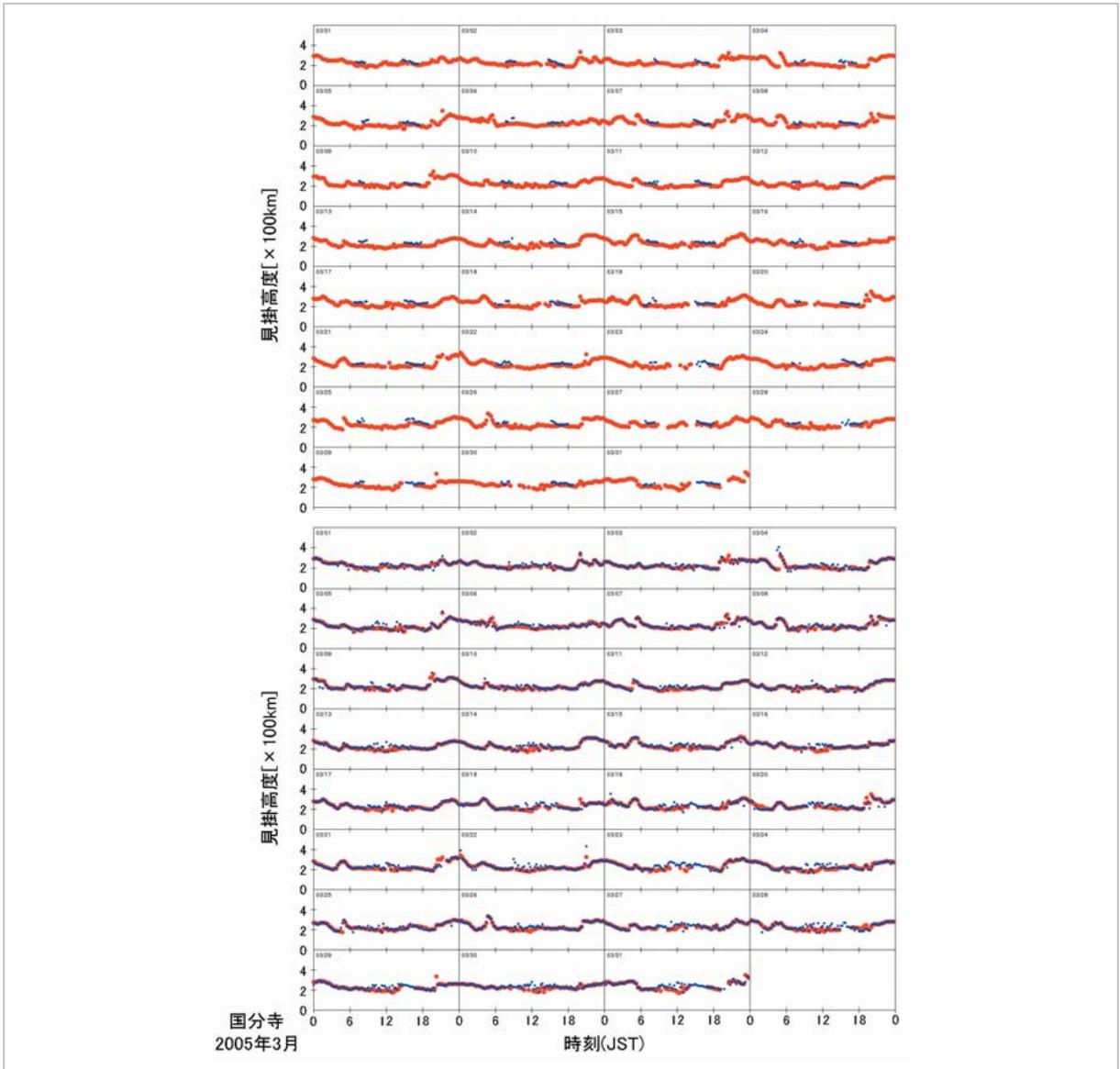


図5 hminF 読取值比較

(赤点=目視値、上段青点=旧自動値、下段青点=新自動値)

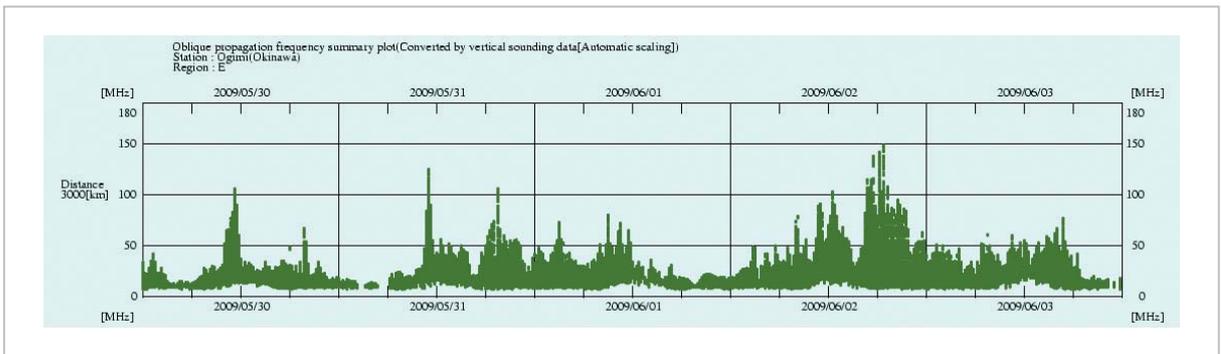


図6 本自動解析値から推定される遠距離通信の伝播可能周波数

率にほぼ等しい。また表 1 に示す様に合致率も旧自動値に比較して大幅に向上しており、平均 80 %以上の結果を得ている。また fmaxE の目視値は解析者のポリシーなどによる偏差が大きいが、元イオノグラムにまで遡って仔細に検証した結果、実際の新自動値の確度は表 1 に示す合致率よりも高くなることが確認された。

4.2 fmaxF

概ね高度 150 [km] 以上に存在する F 層エコーの最高反射周波数を表す電離圏ファクタ値「fmaxF」に関しては、新自動値・旧自動値・目視値共に F 層系周波数の各最高値をもって比較・検証した。

F 層系のファクタ値解析はスポラディック E 層が卓越する夏季の処理に困難を伴う。これは強い E 層マルチエコーが F 層エコーと重なり合った際に判定を誤り、E 層マルチエコーを F 層と混同して残してしまう場合と、F 層の一部を E 層マルチエコーと混同して除去してしまう場合があるためである。

国分寺における 2005 年 7 月の比較グラフを図 4 に示す。

新自動値の読取率および合致率は表 1 から判る様に旧自動値から概ね平均 15 %改善しており平均合致率は 90 %近い。読取率に関しては目視値の読取率を上回ることもあるが、これは前述の「E 層マルチエコーを F 層と混同して残してしまう場合」があることによる。また図 4 赤丸で示す部分の様に、旧自動値に存在する突出した誤りを、新自動値では論理オミットフィルタの働きによって効果的に抑制している。

4.3 hminF

F 層エコーの最低反射高度を表す電離圏ファクタ値「hminF」に関しては、新自動値・旧自動値・目視値共に F 層系高度の各最小値をもって比較・検証した。

国分寺における 2005 年 3 月の比較グラフを図 5 に示す。

新自動値の読取率・合致率はともに旧自動値に比較して大幅に向上しているが、fmaxF と同様の理由により夏季の処理に困難を伴う。また hminF を解析すべき領域が E 層マルチエコーと重なり

合う確率が非常に高いためもあって他の電離圏ファクタ値よりも夏季における確度低下が大きい。

5 本ソフトウェアのリアルタイム応用例

図 6 に、本自動解析ソフトウェアで得られる出力を用いたリアルタイム応用例を示す。

電離圏垂直観測イオノグラム各層のエコートレース情報を変換し、「その垂直観測点上空の電離層反射による電波伝播」を仮定した場合の、通信地点間距離別伝播可能周波数の推定プロットである。

本図は「通信地点間距離 3000 [km] における E 層反射の場合」をプロットしている。電離圏垂直観測イオノグラムには周波数 30 [MHz] までしか観測データは存在しないが、電離圏の状態および通信地点間距離によっては周波数 150 [MHz] に及ぶ通信が E 層反射により可能な事を示している。見方を変えれば通常なら到達しない筈の距離間・周波数帯 (例えば FM 放送、TV アナログ地上波放送、防災無線) において、予想外の混信が引き起こされる可能性がある事を意味する。

6 むすび

はじめに述べた様に衛星測位の高度利用が進められている現在、電離圏擾乱現象の把握と情報提供は重要度を増しており、そのためには電離圏ファクタの自動解析が必須である。今回新たに開発したソフトウェアは電離圏主要層の輪郭を抽出することに的を絞ったため、エコーの正常波・異常波の分離認識、F1 層・F2 層の分離認識、およびエコーの散乱など繊細な電離圏特性や現象の把握には至っていない。高度と上限・下限周波数に限定すれば本ソフトウェアを用いることによって既存解析処理を上回る結果を得られるようになった。我々は今後も解析処理の改良を継続すると共に、準リアルタイムに得られる電離圏ファクタ自動解析値を用いて衛星測位誤差や衛星データ通信劣化などを引き起こす電離圏嵐のみならず、VHF 帯電波の異常伝播などを引き起こすスポラディック E、船舶航空無線・海外放送の途絶などを引き

起こすデリンジャー現象などの顕著な電離圏現象を高精度に自動検出する計画である。また得られた結果をWEB ホームページおよび電子メールなどを介して公表することにより、電離圏の諸現象

とそれらが及ぼす各種社会的影響に関する警戒情報を広くかつ迅速に周知でき、宇宙天気予報への貢献が図れるものと考えている。

参考文献

- 1 猪木誠二, 加藤久雄, 吉田實, “イオノグラム自動処理システムの開発, 5. 主計算機での電離層データ処理ソフトウェア”, 通信総研季, 35, 174, pp.25-32, 1989.
- 2 猪木誠二, 小泉徳次, 皆越尚紀, 吉田實, “イオノグラム自動処理システムの開発, 7. 電離層パラメータの自動/目視読取りの比較”, 通信総研季, 35, 174, pp.41-50, 1989.
- 3 吉田實, “イオノグラム自動処理システムの開発, 6. 電離層パラメータの自動読取り”, 通信総研季, 35, 174, pp.33-40, 1989.

かとう ひさお
加藤久雄

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

たきぐち ゆか
滝口結花

株式会社情報数理研究所



ふかやま だいげん
深山大元

株式会社計算力学研究センター(元株式会社情報数理研究所) 博士(理学)
乱流の統計理論、計算熱力学

しみず ゆきこ
清水由紀子

YSクリエーション(元株式会社情報数理研究所)

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

みらい まさる
右井 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