

3-4-3 南極・昭和基地における電離圏の長期データ解析

3-4-3 Long-term Data Analysis of Ionosphere over Syowa Station, Antarctica

元場哲郎

MOTOBA Tetsuo

要旨

電離圏とは、高度約 60 km 以上に位置する電子や陽子で構成された弱電離プラズマ領域である。電離圏観測装置の 1 つであるイオノゾンデは、短波帯 (HF 帯: 1–30 MHz) の電波を上空に周波数を変えながら連続的に送信し、電離圏から返ってくる反射波を受信することで、電離圏の電子密度や見かけ上の高さの振舞を地上からモニタリングすることができる。代表的なパラメータである F2 層臨界周波数 (foF2) は、電離圏 F 層領域の最大電子密度に対応している。本稿では、1959 年から 2002 年において、南極・昭和基地 (南緯 69.0°、東経 39.6°) でほぼ連続的に定常観測されてきた foF2 の長期間データベースを基に、南極域での様々な電離圏 F2 層の振舞い (季節変化、地方時変化の太陽・地磁気活動依存性、更には数 10 年スケールに及ぶ長期的変化傾向など) について述べる。

The Earth's ionosphere is a partially ionized gas (electrons and ions) that forms several regions between the atmosphere and space over about 70 km height. The ionosonde is one of the radar techniques to monitor the ionospheric electron density as a function of height. The ionosonde transmits HF radio wave (1–30 MHz) vertically and receives echoes reflected from the various ionized layers. The F2-layer critical frequency (foF2), which is a principal parameter obtained from the ionosondes, corresponds to F2-layer peak electron density. In this study, we present ionospheric F2-layer variability (in particular, solar/geomagnetic activity dependence of the local time and seasonal behavior, and a long-term trend) over Syowa Station (69.0°S, 39.6°E), Antarctica, on the basis of long-term ionospheric database in 1959–2002.

[キーワード]

電離圏変動, イオノゾンデ, F2 層臨界周波数, 昭和基地
Ionospheric variability, Ionosonde, foF2, Syowa Station

1 まえがき

地球の高層大気には、高度約 60 km 以上のところに高い電気伝導度をもった領域が存在する。これは太陽の極端紫外線 (extreme ultraviolet: EUV, 波長 10 ~ 120 nm) や X 線によって大気が電離されるためであり、「電離圏 (ionosphere)」と呼ばれている。電離圏は、電子密度の高度分布に従っていくつかの層に分類されており、おおよそ高度 90 ~ 130 km を E 層、130 ~ 1000 km を F 層と呼ぶ。昼間には E 層の下層域 (高度 60 ~ 90 km) に D 層と

呼ばれる領域が出現し、F 層も冬季を除く昼間には F1 層 (高度 130 ~ 210 km)、F2 層 (高度 210 ~ 1000 km) の 2 つに分かれる。基本的な電離圏プラズマ構造は、太陽放射 (特に EUV や X 線) による生成機構、光化学過程による損失機構、イオンと電子の再結合、重力、拡散、電磁気力による輸送機構などのバランスによって決まる。しかし電離圏とは言え、その電子密度は周りの中性大気密度に比べて圧倒的に少なく (約 0.1 % 以下)、「弱電離プラズマ領域」と言える。そのため、電離圏変動には中性大気の運動が大きな役割を担ってい

る。電離圏は、上層からの影響(太陽活動、地磁気活動など)や下層からの影響(潮汐波、重力波、プラネタリー波など)も受けるため、それらの影響の重ね合わせ効果によって複雑な時間、地域、季節変動を示す。

イオノゾンデ(ionosonde)による電離圏観測は、歴史も長く、電離圏電子密度変動をモニタリングする最も簡易な手法として、現在でも世界各地で行われている[1]。イオノゾンデは、短波帯周波数(1~30 MHz)のパルス電波を掃引しつつ送信し、電離圏で鏡面反射したエコーを観測する一種のレーダーで、電離圏サウンダー(ionospheric sounder)とも呼ばれている。イオノゾンデにより、エコーの遅延時間から電波の反射高度が求まるが、電離圏中を進む電波の群速度が光速よりも小さいため、遅延時間と反射高度の関係はそれほど単純ではない。例えば、周波数 f のパルス電波について、エコーの遅延時間の半分(反射点までの伝播時間)に光速を乗じた値 $h'(f)$ を見掛けの反射高度とすれば、 $h'(f)$ は真の反射高度 $h(f)$ よりも高くなる。また、送信する電波には右旋と左旋の偏波の違いにより、臨界周波数(突抜け周波数)が電子プラズマ周波数に一致するものと、磁場の影響で電子プラズマ周波数よりも高いものがあり、前者を正常波モード(O-mode: ordinary mode)、後者を異常波モード(X-mode: extraordinary mode)と呼ぶ。イオノゾンデでは、右旋と左旋の結合した直線偏波が用いられる。

イオノゾンデは、周波数を低いものから高いものへ変化させながらパルス電波を順次鉛直方向に送信するため、各周波数に対応する電子密度の高度からエコーを得ることができる。地上から観測できる高度は、電離圏電子密度が最大となる高度(200~400 km)より下側になる。電離圏で反射したエコーが得られる最大周波数(臨界周波数)は、最大電子密度に対応し、これより高い周波数の電波は電離圏を突き抜けてしまう。受信エコーの遅延時間を周波数 f と見掛けの反射高度 $h'(f)$ の関係で表したものを、イオノグラム(ionogram)と呼ぶ。イオノグラムからは、正常波モードに対応したF2層の臨界周波数(foF2)、正常波モードの見掛けの反射高度の最低値($h'F2$)、昼間ではF1層及びE層の臨界周波数や見掛けの反射高度の最低値などを直接的に読み取ることができる。特に

foF2は、F2層電離圏電子密度の最大値(NmF2)と、 $NmF2(m^{-3}) \approx 1.24 \times 10^{10} \times [foF2(MHz)]^2$ という関係で表わすことができる。

1957~58年の国際地球観測年(IGY: International Geophysical Year)を機に、南極・昭和基地ではイオノゾンデによる電離圏の定常観測がほぼ連続的に行われている。現在に至るまで、約半世紀分のイオノゾンデデータが蓄積されており、南極域電離圏の長期的な変動をモニターする基礎データの1つとして重要な役割を担っている。本稿では、1959年から2002年における、南極・昭和基地(南緯69.0°、東経39.6°)でのイオノゾンデ長期観測データを基に、オーロラ帯域における様々な電離圏変動について述べる。特に、foF2から昭和基地上空の電離圏F2層電子密度における季節変化・地方時変化の太陽・地磁気活動による影響などに加え、数10年スケールにおける長期的変化傾向(トレンド)について述べる。現在、社会的にも深刻な問題となっている人為起源による地球温暖化やそれに伴う様々な地球規模での環境変化・破壊。それらの間接的な影響が、昭和基地上空の電離圏高度でどのように(または、どの程度)現れるかについても、数10年スケールにおける電離圏長期トレンド解析から検証する。

2 南極・昭和基地での様々な電離圏変動

2.1 太陽活動サイクルとの関係

本節ではまず、昭和基地におけるイオノゾンデで観測された長期データセットについて述べる。15分毎の観測からイオノグラムと呼ばれる周波数-高度プロファイルを生成し、そのプロファイルからfoF2などの各層の電離圏パラメータを得ることができる。図1には、1959年から2002年における昭和基地での1時間値foF2データの、各地方時に対する年間データ取得率(%)を示している。もし仮にfoF2データがある地方時で1年間(365日)連続観測されると、その取得率は100%となる。図中の1962年から1968年までのデータが連続していない部分は、観測停止などに伴うデータ欠損である。また1997年以降、全地方時を通してデータ取得率が向上しているのは、観測機器がアナログ方式(フィルム記録)からデジ

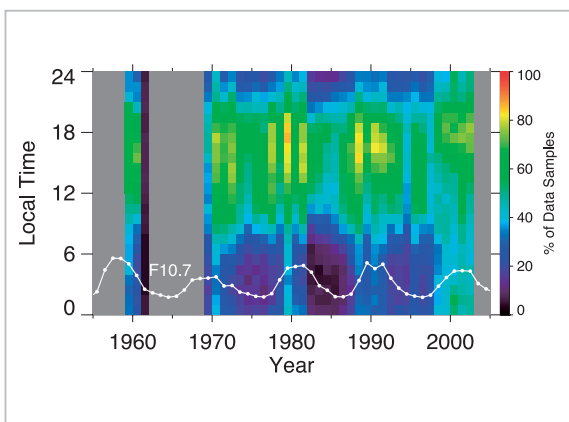


図1 1959年から2002年における昭和基地での1時間値foF2データの各地方時に対する年間データ取得率(%)

タル方式に移行し、データ受信感度がより高くなったためである。この図からもわかるように、foF2のデータ取得状況は各年、各地方時で大きく変動する。昼前から夕方過ぎ(約10~20時)におけるデータ数は安定して多く(取得率60%以上)、真夜中前から明け方(約22~06時)ではデータ数が少なくなる傾向を示し、夜中側では取得率が20%を割る期間もある。夜間におけるデータ取得率減少の主な原因は、F層の電子密度がイオノゾンの測定限界以下に下がってしまうか、若しくはオーロラ活動に伴う高いエネルギー(10 keV以上)を持った荷電粒子の降り込みによって電離圏下部(特にD層)の電子密度が異常増加し、F層に届く電波が電離圏下部で吸収され全く反射波の無い、いわゆるブラックアウトによるものと考えられる。また、夜間極域のオーロラ活動に伴って現れるE層付近の異常電離現象、オーロラスポラディックE(auroral sporadic E;オーロラEs)によってF層に到達すべき電波が散乱されることも、しばしばF層観測ができなくなる大きな要因となっている。図1の下に、F10.7太陽電波フラックス(白線)の年平均値の長期変動を示す。F10.7は、波長10.7 cm (2.8 GHz)の太陽電波フラックス強度(1太陽フラックスユニット(SFU) = $10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)であり、太陽EUV放射の変動を表す代表的な指標の1つである。F10.7が高い期間は太陽極大期、低い期間は太陽極小期に対応する。F10.7と昭和基地におけるfoF2データ取得率を比較すると、太陽活動極大期の方が極小期比べ、全地方時でデータ取得率が高くなる傾向を示

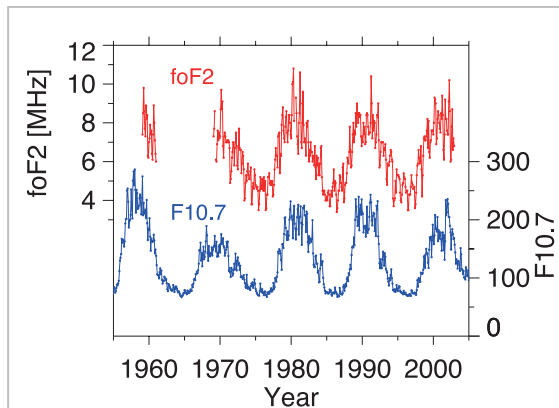


図2 昭和基地における正午付近(11~13時)のfoF2の月中央値とF10.7の長期変動の比較

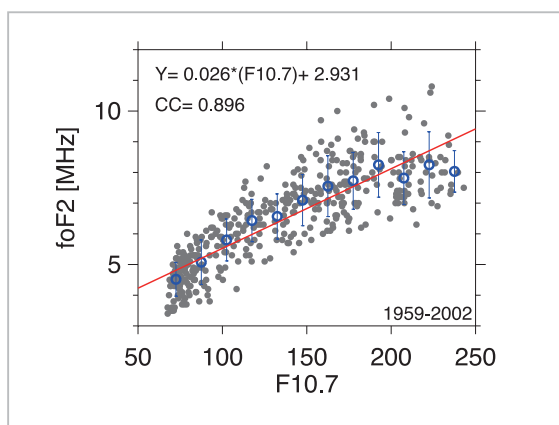


図3 foF2とF10.7との関係を表した散布図

した。太陽極大期には電離圏高度全体が上昇し、F層高度の観測が効率よくできるのに対して、太陽極小期には電離圏高度が下降するため、特に夜間におけるF層高度の観測が困難になる。そのため、太陽極小期においてデータ取得率が減少していると考えられる。

図2に、南極・昭和基地における正午付近(11~13時)のfoF2の月中央値(赤線)を用いて、1959年から2002年までのfoF2の長期的な変動の様子を示す。また、図2の下にF10.7太陽電波フラックス(青線)の月平均値の長期変動を示す。この図から、foF2の長期変動が、約11年の周期で極大・極小期を繰り返す規則的な太陽活動サイクルと正の相関で同期して変動する様子が見てとれる。この結果は、太陽極大期(極小期)におけるEUV放射量の増加(減少)によって、電離圏F層電子密度の生成量が増加(減少)していることを表している。

次に、横軸 F10.7、縦軸 foF2 の散布図を示す (図 3)。赤色の直線は、 $Y = aX + b$ の回帰直線 ($a = 0.026, b = 2.931$) を示しており、両者間の相関係数は 0.896 であった。また青丸は F10.7 を 15 SFU 毎に区分した時の foF2 の平均値であり、エラーバーはそれぞれの分散である。図 3 からわかるように、F10.7 が約 180 SFU 以下においては、多少のバラつきはあるものの、foF2 と F10.7 はほぼ線形の関係を示す。しかし、F10.7 が約 180 SFU 以上になると、F10.7 がいくら大きくなって foF2 の増加量は小さく、ほぼ横這いになる (サチュレーションを起こす)。このような、太陽活動指数 (F10.7 や太陽黒点数) の高い値における電離圏のサチュレーション効果については、過去の研究によっても報告されている [2] - [4]。理論的には、太陽 EUV 放射が増加すれば、それに伴って生成される昼間の F 層電子密度 (foF2) は線形的に増加することが期待されるが、F10.7 の高い値ではその線形関係が崩れている。この F10.7 の値に対する電離圏サチュレーション効果は、赤道異常帯 (equatorial anomaly region) 周辺でしばしば顕著になるという報告もある [4]。一方、F10.7 と経験モデルや直接観測による太陽 EUV 放射量を比較した場合、両者の関係は必ずしも線形ではなく、foF2 と同様に、F10.7 の高い値で太陽 EUV 放射量がサチュレーションを起こすという結果も報告されている [3][5]。この結果は、特に太陽活動度が高い時の F10.7 値が、定量的に太陽 EUV 放射量をうまく反映していないということの意味する。つまり、電離圏のサチュレーション効果が F10.7 そのものに起因していることとなり、太陽活動と電離圏変動との関係を定量的に議論する際には注意が必要となる。F10.7 以外に、より太陽 EUV 放射量を反映した指標についての詳細な説明は、2.3 で述べる。

2.2 季節変化と地方時変化

本節では、南極・昭和基地における foF2 の季節変化・地方時変化について述べる。通常、比較的低高度の電離圏 E 層電子密度の日変化は、正午付近で最大となり、夜間になるにつれて低くなる。これは、オーロラ粒子降り込みによる影響が表れる高緯度域を除く地域において、E 層電子密度の構造が太陽放射による生成と消滅 (再結合) の

バランスによってのみ決まるためである。一方、F2 層電子密度の日変化は E 層のように単純ではなく、より複雑な変化をする。これは、F2 層電子密度の構造が上記の生成・消滅機構に加え、熱圏の中性大気の風系に大きく影響を受けるためである。F2 層電子密度の季節変化は、年変動や半年変動を示すことが知られている。季節変化においては、熱圏の中性大気の組成 (特に、酸素原子と窒素分子の比 ($[O] / [N_2]$)) の影響が重要になる [6]。こうした中性大気による影響に加え、昭和基地が位置するオーロラ帯では、中・低緯度域に比べ、磁気圏からの粒子・電磁エネルギー流入による影響も受ける。またこの他の影響として、下層大気から伝わる重力波や潮汐波、大気乱流の変化などが挙げられる [7]。

図 4 の上段に、太陽活動の極小期 (左図: $F10.7 < 100$) と極大期 (右図: $F10.7 > 150$) における、南極・昭和基地での foF2 の平均的な季節変化・地方時変化を示す。白いコンターは 0.5 MHz 毎に描いている。また、黒の波線は、日の出と日の入時間を示している。昭和基地は南半球であるため、11 ~ 2 月が夏季、3 ~ 4 月が秋季、5 ~ 8 月が冬季、9 ~ 10 月が春季に対応する。それらを考慮し、横軸の月を北半球の四季に合わせるように 6 カ月ずらしている。比較のために、日本の中・低緯度に位置する北海道・稚内 (北緯 45.2°、東経 141.8°; 1960 年 ~ 2003 年)、東京都・国分寺 (北緯 35.7°、東経 139.5°; 1959 年 ~ 2003 年) の foF2 の平均的な季節変化・地方時変化を、それぞれ図 4 の中段、下段に示す。稚内や国分寺では、昭和基地とほぼ同期間の foF2 長期間データを使用した。白いコンター間隔と黒の波線は、昭和基地のフォーマットと同じである。稚内と国分寺における foF2 の主な振舞いは、以下の通りである。

- ① 太陽活動極大期・極小期に関わらず、06 ~ 18 時の季節変化は、春季 (3 月) と秋季 (10 月) にピークを持つ半年変動を示す。一方、夜間の 18 ~ 06 時では、夏季 (5 ~ 6 月) にピークを持つ年変動を示す。
- ② 太陽活動極大期・極小期に関わらず、秋季、冬季、春季における地方時変化は、12 時付近でピークを示し、夜中になるにつれて低くなる傾向を示す。

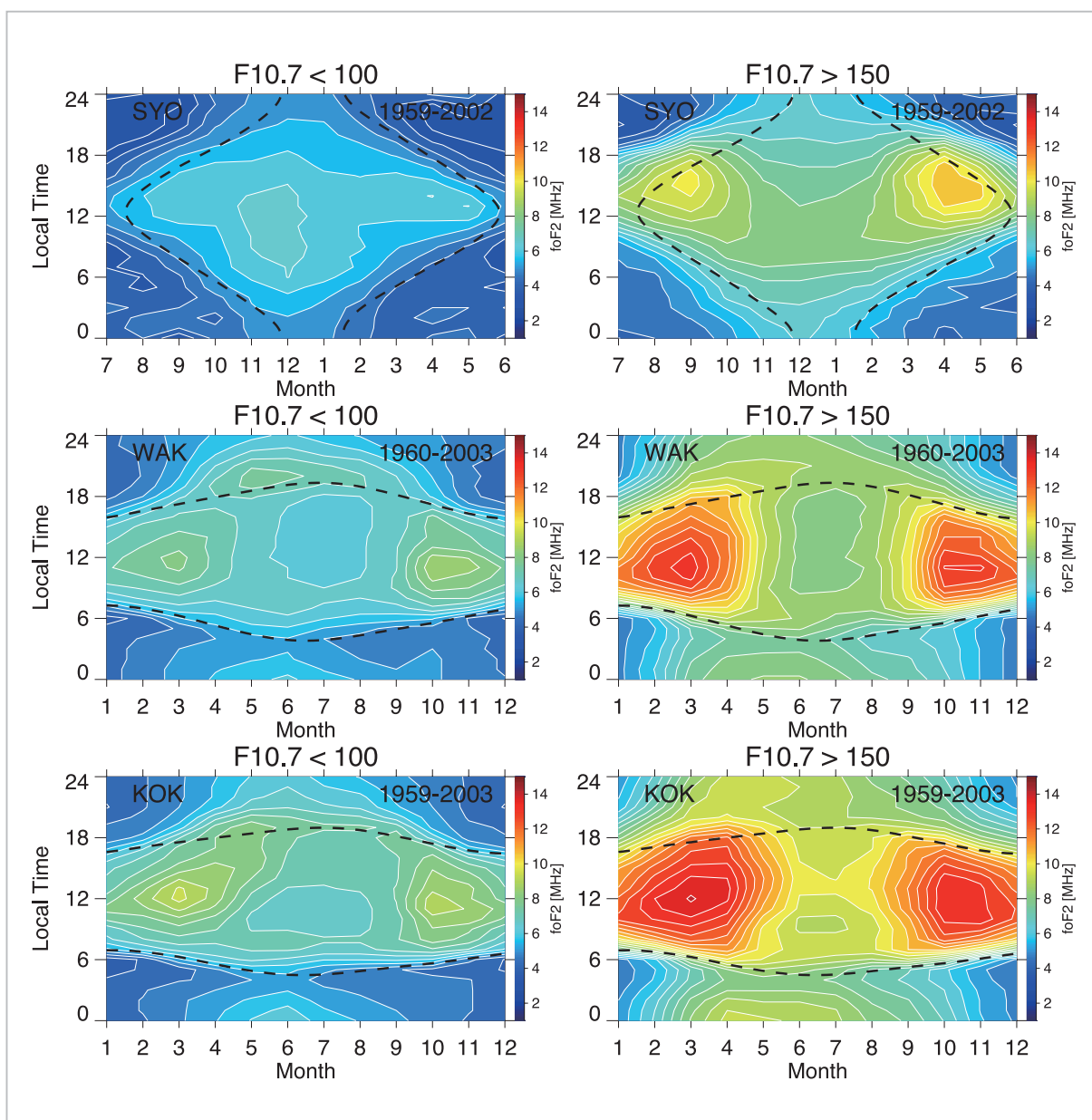


図4 太陽活動の極小期(左図: $F10.7 < 100$)と極大期(右図: $F10.7 > 150$)における foF2 の平均的な季節変化・地方時変化

(上段)南極・昭和基地、(中段)稚内、(下段)国分寺。

- ③ 稚内の夏季においては、06～08時と18～20時付近に2つのピークが現れる。太陽極小期における国分寺の夏季も、ほぼ同様の変化を示す。
- ④ 太陽活動極大期になると、国分寺の夏季だけに顕著な12時付近のピークが現れ、真夜中付近のピークとともに複数ピーク構造を形成する。

昭和基地における foF2 の季節変化・地方時変

化は、中低緯度と類似する点と類似しない点がある。図4から、特に大きな違いを挙げると、全体的に昭和基地での foF2 値が稚内や国分寺の foF2 値よりも7、8割ほど低いこと、そして太陽活動極小期における変化傾向が全く異なっていることである。昭和基地での foF2 の季節変化・地方時変化の主な特徴は、以下の通りである。

- ① 太陽活動極小期の foF2 は、全般的に夏季に高く冬季になるにつれて低くなる年変動を示

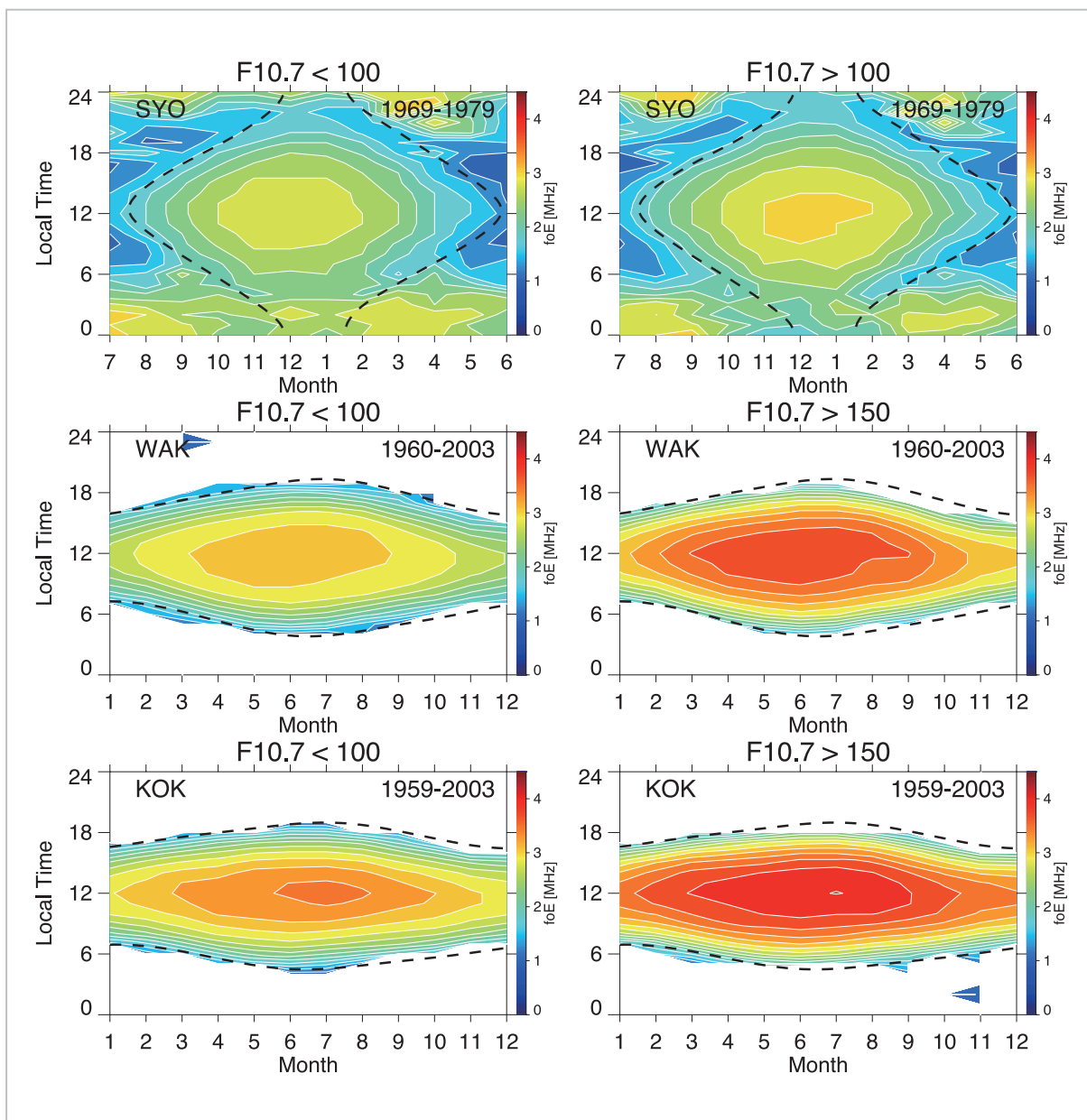


図5 太陽活動の極小期(左図：F10.7<100)と極大期(右図：F10.7>150)におけるfoEの平均的な季節変化・地方時変化

(上段)南極・昭和基地、(中段)稚内、(下段)国分寺。

す。

- ② 太陽活動極大期の昼間におけるfoF2は、秋季(4月)と春季(9月)にピークをもつ半年変動を示す。
- ③ 太陽活動極大期の昼間におけるfoF2は、夏季よりも冬季の方が高い。
- ④ 太陽活動極大期の夜間におけるfoF2は、夏季に高く冬季に低くなる年変動を示す。
- ⑤ 太陽活動極大期・極小期に関わらず、foF2日変化のピーク時間は季節によって変化し、夏

季は約10～11時、春季や秋季は15～16時、冬季は13～14時で最大となる。

太陽活動極大期の昼間におけるfoF2が夏季よりも冬季の方が高い傾向は、異なる3観測点で共通している。これは、夏半球から冬半球への酸素原子の輸送によって引き起こる[O]/[N₂]比の増加によるものと考えられる[8]。一方、夏季においては電離生成に寄与する酸素原子密度が減少し、消滅に寄与する窒素分子密度が増加するため、夏

季の [O] / [N₂] 比が著しく減少する。また、F 層高度の酸素原子の季節変化は春季と秋季にピークを持つ半年変動を示し、太陽活動度が増加すると酸素原子密度も増加する傾向を示す。その結果として、太陽活動極大期における昼間の foF2 が夏季に減少し春季と秋季にピークを持つ半年変動を示すと考えられる。ただし、太陽活動極小期の昭和基地でのみ、foF2 が冬季に比べて夏季に高くなる傾向が見られる。破線で示した日の出・日の入の時間と比較すると、太陽活動極小期に見られる高い foF2 の時間帯及び季節が、ほぼ日照時間帯に対応していることが分かる。このことから、昭和基地のみで見られる太陽活動極小期における夏季 foF2 の増大は、中性大気組成変化による影響よりも、長く継続する日照効果による電離の影響が支配的であると考えられる。この foF2 の特徴は、中・低緯度の変化と大きく異なる。

参考として、図 5 には昭和基地、稚内、国分寺における foE の平均的な季節変化・地方時変化を示す。ただし、昭和基地における foE のデータ期間は先に示した foF2 と異なり、1969 年から 1979 年の 10 年分である。foE は、E 層電子密度ピークと対応している。この図のフォーマットは図 4 と同じであるが、コンター間隔だけは 0.25 MHz としている。この図から、3 つの観測点における foE の変化が、太陽の日照時間にほぼ支配されていることがわかる。ただし、オーロラ帯に位置する昭和基地の夜側では、春季と秋季付近において foE が高くなる。この傾向は、春季と秋季にピークとなる地磁気活動度と関係しているのかもしれない。つまり、地磁気活動増加に伴ってオーロラ粒子がより降り込み、夜側 E 層高度の中性粒子を電離していることが考えられる。

2.3 太陽活動・地磁気活動の依存性

2.1 で述べたように、F10.7 の高い値において foF2 はサチュレーションする。この 1 つの原因として、太陽活動指数である F10.7 が電離圏の生成に最も影響する太陽 EUV 放射量の変動を完全に再現できていないことが挙げられる。文献[9]は、4 つの太陽活動度指数、太陽黒点数(SSN)、F10.7、Mg II (Mg II core-to-wing ratio)、He I (1083) 輝線を使って、衛星で観測された太陽 EUV 放射量との比較を行った。太陽黒点数とは、太陽表面を観測

した時に黒い点や塊のように見える部分のことで、単に黒点とも呼ぶこともある。実際にはこの部分も光を放っているが、周囲よりも弱い光のため黒く見える。太陽黒点の温度は周りに比べて低く、磁場が強い領域でもある。Mg II は、紫外(UV)域のマグネシウム輝線の波長(280 nm 付近)の放射量を指数化したデータである[10]。Mg II データは、異なる観測機器が搭載された異なる衛星によって観測された太陽 UV 放射量データを結合することによって、1978 年の 11 月以降から現在まで、約 30 年近くに及ぶ長期間データベースが構築されている。He I (1083) 輝線は、赤外吸収線(1083 nm)の等価幅(equivalent width)であり、地上で観測された太陽表面画像から求められる[11]。He I (1083) は F10.7 や SSN よりも、太陽 UV 放射量の時系列変動をよく再現することが知られている[12]。1995 年に打ち上げられた太陽観測衛星の SOHO 衛星には、電離圏電子密度生成に寄与する太陽放射の中で最も重要と考えられている、太陽 EUV 放射量を計測する測器(solar EUV monitor SEM)が搭載されている。SEM で観測された太陽 EUV 放射量の変動と太陽活動指数であ

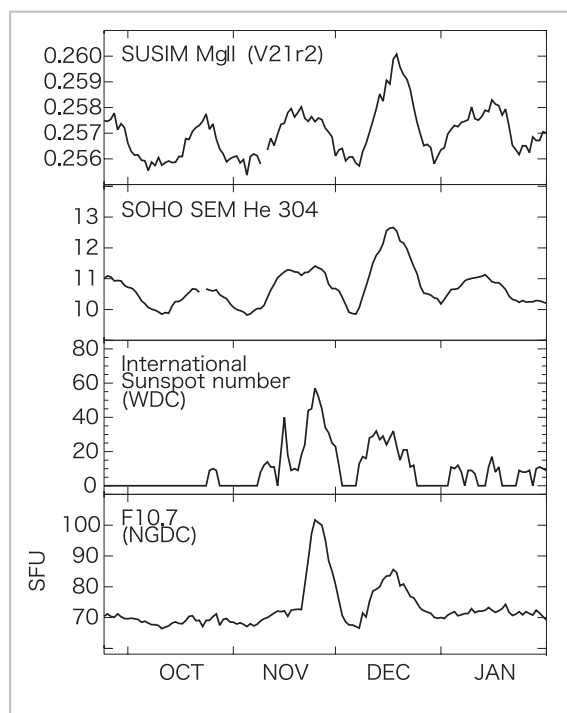


図6 1996年10月から1997年1月までの約4カ月における、Mg II、太陽EUV放射量、SSN、F10.7の比較(文献[9]の図5を改訂)

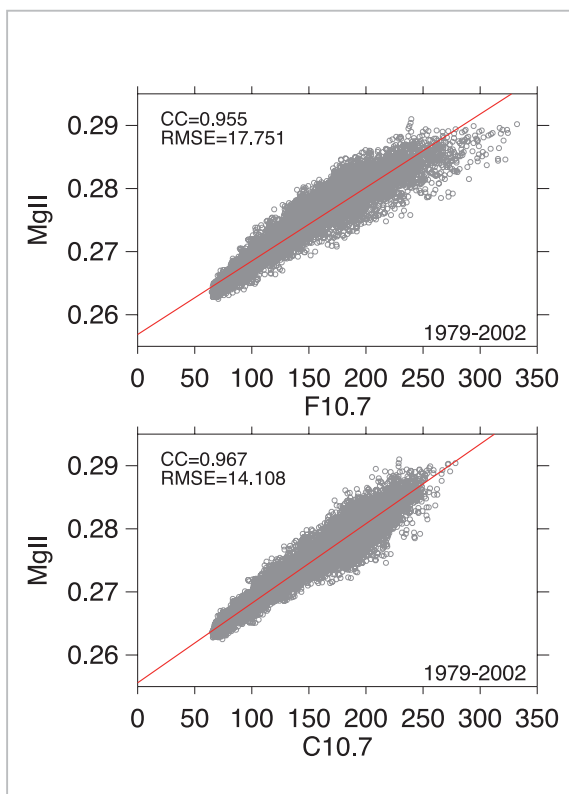


図7 (上段) 1979年から2002年におけるF10.7とMgIIとの比較、(下段)同期間におけるC10.7とMgIIとの比較

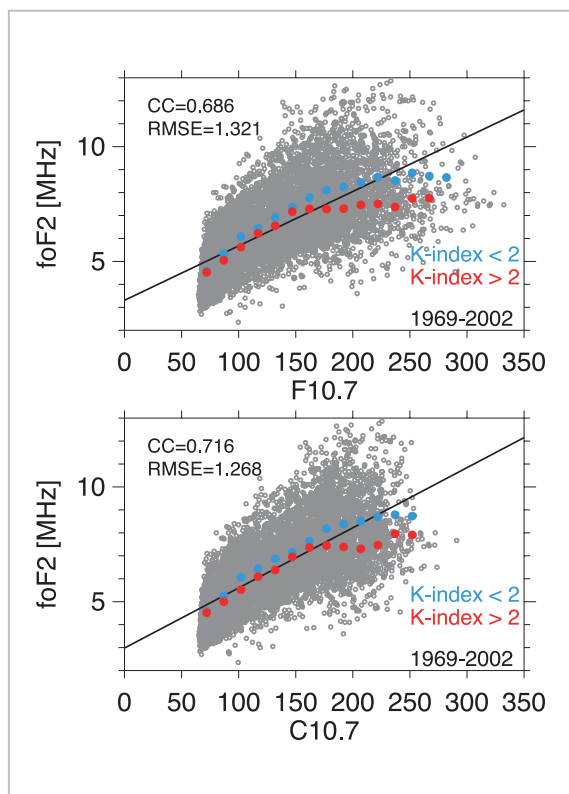


図8 (上段) 1969年から2002年におけるF10.7とfoF2との比較、(下段)同期間におけるC10.7とfoF2の比較

る F10.7 や MgII の変動と比較すると、MgII の方が F10.7 に比べ太陽 EUV 放射量変化のより良い指標となることが知られている [9][13]。例として、図 6 に文献 [9] の図を示す。この図 6 では、1996 年 10 月から 1997 年 1 月までの約 4 カ月における MgII、SEM で観測された太陽 EUV 放射量、SSN、F10.7 の変動を比較している。この図からもわかるように、F10.7 や太陽黒点数は、太陽自転周期である約 27 日周期を示す太陽 EUV 放射の短期的な変動やその振幅をうまく再現できていない。一方、MgII は短期的な太陽 EUV 放射量の時間変動をうまく再現している。

しかし、MgII はデータ期間が 1978 年以降に限られるという欠点がある。1959 年以降から揃う電離圏長期データと比較するためには、F10.7 のような長期間の太陽活動指数データが必要となる。最近、F10.7 の長期時系列データから、ニューラルネットワークを用いた経験モデルを基に新しい太陽活動指数 C10.7 (corrected solar flux index) を導出する試みがなされた [14]。C10.7 は、F10.7 と太陽 EUV 放射量の統計的な性質に基づいて、

F10.7 から 27 日の太陽自転周期変動成分と緩やかな変動成分を分離し、SOHO の SEM で観測された太陽 EUV 放射量の変動と比較することによって導出される指数である。現在も開発段階である C10.7 は、今後より太陽 EUV 放射量変動に近づくように改良が進んでいる。ここではまず、C10.7 の初期版と MgII とを比較し、C10.7 の妥当性を検証する。図 7 は、1979 年から 2002 年における F10.7 と MgII、C10.7 と MgII のそれぞれの散布図を示す。MgII との相関は、F10.7 よりも C10.7 の方が高く、データのばらつき度合いの指標となる平均 2 乗誤差の平方根 (RMSE) も小さい。また F10.7 が高くなると、MgII がサチュレーションを起こす様子が見て取れるが、C10.7 にはそれが無い。

そこで、長期間連続で、且つ太陽 EUV 放射量変動をより表わす太陽活動指数データである C10.7 の初期版を用いて、1969 年から 2002 年における foF2 の太陽活動度依存性を再調査した。この解析では、foF2 (11 - 13 時の平均値)、F10.7、C10.7 の 3 つデータが共通して存在するデータ

セットを基に、F10.7 と C10.7 のそれぞれに対する昼間の foF2 の応答の違いを調べた。図 8 の上段と下段には、F10.7 と foF2、C10.7 と foF2 の関係を表す散布図(グレーの丸)を示す。それぞれの図中に示す直線は、線形回帰直線である。このデータ期間における F10.7 と foF2 の相関係数は、0.686 であった。図 3 と同様に、F10.7 の値が高くなると foF2 の値がサチュレーションを起こしている様子が見て取れる。また、F10.7 が 150 SFU から 200 SFU の間で foF2 のばらつきが大きく、特に foF2 の高い値 (10 MHz 以上) が多く分布している。一方、C10.7 と foF2 の相関係数は 0.716 であり、F10.7 の場合に比べ若干高くなる。F10.7 の場合と異なり、C10.7 の値が大きな場合における foF2 のサチュレーション効果は小さく、全体的にほぼ線形の関係になっていることがわかる。また RMSE から、F10.7 に比べ C10.7 の方がばらつき(誤差)が小さくなることを示している。

次に、地磁気活動度による違いを調べた。ここでは地磁気活動度の指標として、昭和基地の K 指数(K-index)を用いる。K 指数は、各地磁気観測点における地磁気の水平磁場変動から地磁気活動度を 3 時間毎に 0 から 9 の数字で表した指標であり、地磁気活動が静穏の時は K 指数が小さく、活発になると大きくなる。図中の青丸と赤丸は、それぞれ地磁気活動度による foF2 の太陽活動度依存性の違いを表している。青丸が地磁気静穏時(K 指数が 0 から 2)、赤丸が地磁気擾乱時(K 指数が 2 から 4)で、それぞれ 15 SFU 毎に区分した時の foF2 の平均値である。F10.7 の場合、地磁気擾乱時に比べ、地磁気静穏時には foF2 のサチュレーション効果が小さくなる傾向を示すが、200 SFU 以上では若干サチュレーション効果が見られる(図上段の青丸)。一方、C10.7 の場合、地磁気活動静穏時には foF2 のサチュレーション効果がほとんど見られず、C10.7 と foF2 の関係がほぼ線形になることがわかる(図下段の青丸)。また地磁気擾乱時においても、C10.7 が低い値の場合(180 以下)は、地磁気静穏時と同じ値でほぼ線形に変化する。しかし、C10.7 が高くなると(180 以上)、foF2 のサチュレーション効果が現れ、地磁気静穏時よりも foF2 が約 1~2MHz 程度低くなる。前述したように、C10.7 と太陽 EUV 放射量とがほぼ同じような変動を示すことから、

C10.7 の場合に見られる foF2 のサチュレーション効果は、地磁気擾乱に起因していると考えられる。一般的に、地磁気活動度が高くなると(オーロラ活動や磁気嵐など)、磁気圏から極域電離圏に流入する電磁エネルギーが増加する。もし電磁エネルギー流入が増加すれば、極域熱圏では中性大気温度の増加や [O] / [N₂] 比の減少を伴う大気組成の変化が起こり、F 層高度の電子密度を減少(foF2 の減少)させる(負の電離圏嵐; 文献[6]を参照)。つまり、foF2 の長期時系列データから地磁気擾乱(またはそれに起因する電離圏嵐)に伴う foF2 の変動をできるだけ取り除くためには、少なくとも地磁気静穏時(K 指数で 2 以下)のみのデータを選定する必要がある。これは、次節で述べる foF2 長期トレンドの抽出手法に関係する。

3 長期的変化傾向(トレンド)ー地球温暖化との関係ー

3.1 長期トレンド研究に関するレビュー

1980 年代後半、地表から放出される温室効果ガスの増加が、対流圏の温暖化と成層圏、更には中間圏・熱圏の寒冷化を同時に引き起こすという説が提唱された。代表的な温室効果ガスである二酸化炭素には、地球放射(赤外線)を吸収・放射する性質がある。対流圏における温室効果ガスは、地球放射による赤外線を大量に吸収することによって大気を昇温させる。一方、中層・超高層大気では、対流圏に比べ地球放射による赤外線量が相対的に少ないために、赤外線の吸収量よりも宇宙空間への放射量が多くなり、結果として冷却化が促進される。また、成層圏における寒冷化は、この温室効果ガスによる直接的な影響に加え、塩素系化合物によるオゾン減少・消失に伴う間接的な影響も寄与する。これはオゾン減少によって、成層圏オゾンの太陽紫外線吸収による加熱効果が減衰するためである。もし現在のペースで温室効果ガスの増加が進行すれば、中層・超高層大気高度では寒冷化が促進されるだけでなく、中性大気密度や大気組成の変質、更にはプラズマ環境の変化など、様々な地球周辺環境の変化をもたらすのではと懸念されている。従って、超高層大気圏・電離圏自身の「場」が、過去数 10 年の長期スケールでどのような変動をしていたかを明らかにし、そ

の長期的変化傾向(トレンド)に含まれる自然起源(太陽・地磁気活動など)や人為起源(温室効果ガス)に起因する影響を定量的に理解する必要がある。

文献[15]では、中間圏・熱圏・電離圏を結合システムとする全球平均(1次元)大気モデルを用いて、温室効果ガス増加が及ぼす高度60~500 kmにおける大気環境への影響を初めて定量的に見積もった。この数値シミュレーションでは、高度60 kmで温室効果ガス濃度を倍増した場合(21世紀中に到達すると予想されている値)、中間圏高度で約10~15 K、熱圏高度で約20~50 Kの温度減少が起こると予測した。また同時に、寒冷化に伴って大気の収縮が起こり、熱圏高度における大気の主成分である窒素分子や酸素分子・原子の密度が30~50%程度減少する。こうした温室効果ガス増加に伴う超高層大気の変化に関連し、大気収縮に伴う電離圏高度の降下、酸素原子と窒素分子の密度比の変化に伴う電離圏電子密度の変化、メタンや水蒸気密度の増加と中間圏界面の温度低下に伴う夜光雲発生頻度の増加などが起こると推測されている。

文献[16]では、文献[15]の数値計算予測と標準的な電離圏理論を用いて、温室効果ガス増加による電離圏への影響を概算的に見積もった。もし将来的に温室効果ガスが倍増した場合、電離圏E層とF2層の電子密度ピーク高度が、それぞれ約2 kmと15~20 km降下することが推定された。一方、中性大気温度変化に対して過敏に反応しない電子密度はほとんど変化しない。その後、3次元熱圏-電離圏統合モデルにおいて全球的な電離圏への影響が検証されたが、上記の推定と同様に、温室効果ガス濃度の倍増に伴って電離圏のF2層のピーク高度が全球的に約10~20 km降下するという結果が得られており[17]、温室効果ガスによる電離圏の影響が注目され始めた。もしこのような電離圏変化が将来的に起こるとすると、実利用化されている電波通信などへの影響が懸念される。

熱圏の中性大気密度は、熱圏高度を飛翔する低高度衛星の軌道データから、衛星にかかる大気抗力による軌道半径の変化率を求めることによって推定可能である。文献[18]は、過去3回の太陽活動極小期(1976、1986、1996年)における衛星軌道

データから、高度300~400 kmの大気密度が平均的に約0.45%/年で減少することを明らかにした。もしこの密度減少率で線形的に熱圏大気密度が減少すると、21世紀の終わりには寒冷化によって約40 kmも熱圏大気高度が降下することになる。この熱圏大気密度の減少率の大きさは、地磁気活動、地方時、季節に対しほとんど影響されないが、高度や太陽活動度に依存する傾向を示す。例えば、大気密度の減少率は高度が高くなるに連れて大きくなる傾向や、大気密度の減少率が太陽活動極大期よりも極小期に大きくなる傾向がある[19]。これらの傾向は、文献[17]のモデルから推定される結果と定性的に良い一致を示すが、観測から推定される密度の減少率の大きさは、モデル結果よりも若干大きい。文献[17]のモデル研究以降、地上観測データを基に電離圏の長期トレンドの検出を試みる研究が盛んになった。電離圏の長期トレンドを検出する際、多くの場合、重回帰分析手法が用いられる。重回帰分析は、従属変数とそれに影響を与えると考えられる1つ以上の独立した説明変数との関係を調べ、それらの間の関係式(重回帰式)を求める手法である。この手法を基に、モデル計算から予想される超高層大気圏の寒冷化によって引き起こる電離圏高度の低下を支持する観測結果が、文献[20]によってはじめて報告された。文献[20]ではIGY以降、中緯度で観測されたイオノゾンデの長期(1957~1990年)データを用いて、過去30年間に電離圏F2層のピーク高度が緩やかな減少傾向を示すことを明らかにした。また、この電離圏F2層のピーク高度の年間降下率は、夏季(-0.12 km/Yr)よりも冬季(-0.45 km/Yr)の方がより顕著になるという結果も示している。その後も、北欧に位置するソダンキラ(北緯67°、東経27°)で1958年以降に観測されたイオノゾンデデータを用いて、電離圏F2層のピーク高度が長期的に降下しているという結果が報告された[21][22]。

文献[23]は、1935年から2001年におけるトロムソ(北緯69°、東経19°)の長期イオノゾンデデータを用いて、foF2が長期的に減少する傾向を示した(-0.0078 MHz/Yr)。文献[23]では、このfoF2の減少傾向は温室効果ガスの増加や、酸素原子・窒素分子の変化によって引き起こると考えられた。文献[24]は、北半球に位置する多点イオノ

ゾンデ観測網のデータを用いて、foF2 長期トレンドの緯度変化を調査した。ほとんどの観測点で foF2 長期トレンドが減少傾向を示すと同時に、緯度が高くなるにつれて foF2 長期トレンドの減少率が大きくなる傾向も示された。このような foF2 長期トレンドの緯度依存性は地磁気活動に伴う電離圏嵐の効果として解釈されている。

しかし、世界各地に設置されたイオノゾンデの多点観測網を用いた解析から、F2 層ピーク高度の長期トレンドが全球的に単調な負のトレンドを示すのではなく、正のトレンドを示す観測点もあることが報告されている [25]–[27]。文献 [27] は、F2 層ピーク高度トレンドにおける世界分布を示し、F2 層ピーク高度の成長トレンドには緯度・経度依存性がないものの、ある程度の地域性があるということを指摘している。しかし、この地域性を説明するメカニズムは未だ理解されていない。こうした複雑なトレンド分布は、温室効果ガス増加によって全球規模の超高層大気が寒冷化すると予想した文献 [15] [17] の数値モデル結果と矛盾する。そのため、ある者は、F2 層ピーク高度の長期トレンドが温室効果ガス増加に伴う超高層大気の寒冷化による影響ではなく、地磁気活動の長期変化による影響であるとする研究成果も報告されている [24] [28]。

このように、衛星軌道データから求められた全球的な熱圏大気密度の長期トレンドと異なり、イオノゾンデから求められる電離圏 F2 層長期トレンドにおける統一的な見解は、未だ得られていないのが現状である。

3.2 昭和基地における電離圏長期トレンド

上記に述べた過去の研究では、様々な手法から電離圏長期トレンドの推定が試みられてきた。電離圏の長期トレンド推定において、もっとも重要なことは、電離圏の変動成分から如何にして太陽活動・地磁気活動に依存する成分を取り除くかである。特にオーロラ帯に位置する昭和基地では、地磁気活動による影響が大きく効いてくる。これまでの長期トレンド研究においてほぼ共通している点は、太陽活動に起因する foF2 の変動を表す際に、foF2 と太陽活動指数 (SSN や F10.7) との線形関係を仮定しているところである。しかし図 3、図 8 で示したように、F10.7 が高い値になると、

foF2 のサチュレーション効果が大きくなり、線形関係が崩れてしまう。そのため SSN や F10.7 を使用した場合に、太陽活動に依存する foF2 変動をうまく表すことができない。更に、**2.3** でも示したように、地磁気活動度が高くなると foF2 のサチュレーション効果がより大きくなる (図 8 参照)。そこで本解析では、太陽活動指数として太陽 EUV 放射の変動をより正しく再現している指数、C10.7 を用いる。また、foF2 は 1 日毎に地方時 11 ~ 13 時における地磁気静穏時 ($0 \leq K$ 指数 ≤ 2) のデータのみを使用することにより、地磁気擾乱の影響を出来るだけ少なくした。一般的に、地磁気擾乱が起こった後もある程度の時定数を持って電離圏擾乱は継続することが知られているが、ここではその効果は無視する。両者の条件から、まずは K 指数が利用できる 1969 年から 2002 年までの foF2 長期トレンドの導出を行った。詳細な導出方法は以下の通りである。

- ① 観測された foF2 データ (foF2_{obs}) から地磁気静穏時 ($0 \leq K$ 指数 ≤ 2) のデータのみを選ぶ。
- ② C10.7 と foF2 との間の線形関係を仮定し、観測された foF2 から太陽活動だけに依存して変動する成分 (foF2_{mod} = $\alpha_1 \cdot C10.7 + b_1$) を求める。
- ③ 観測された foF2_{obs} から foF2_{mod} を差し引いた残差成分 (Δ foF2 = foF2_{obs} - foF2_{mod}) を、太陽活動・地磁気活動に依存しない変動とみなす。
- ④ 残差成分 Δ foF2 の直線回帰式 (Δ foF2 = $A + B \cdot (\text{year} - 1969)$) を求め、その傾き B を foF2 長期トレンドとする。

図 9 (a) に、1969 年から 2002 年に観測された foF2 の変動 (foF2_{obs}: グレーの丸) と F10.7 を用いて求められた foF2 の太陽活動に依存する成分 (foF2_{mod}: 青線) を示す。また、図 9 (b) に foF2 の残差成分 (Δ foF2: グレーの丸) とそれから得られる直線トレンド (青線) を示す。一方、図 9 (c) と (d) には C10.7 を用いた場合における foF2 の太陽活動に依存する成分 (foF2_{mod}: 赤線) とその直線トレンド (赤線) を示す。この解析手法から推定された 1969 年から 2002 年における foF2 の直線トレンドは、F10.7 を使用した場合、1 年で -0.0002 ± 0.0018 MHz 減少する傾向を示した。しかしこの場合、誤差よりもトレンド成分が小さいため、長

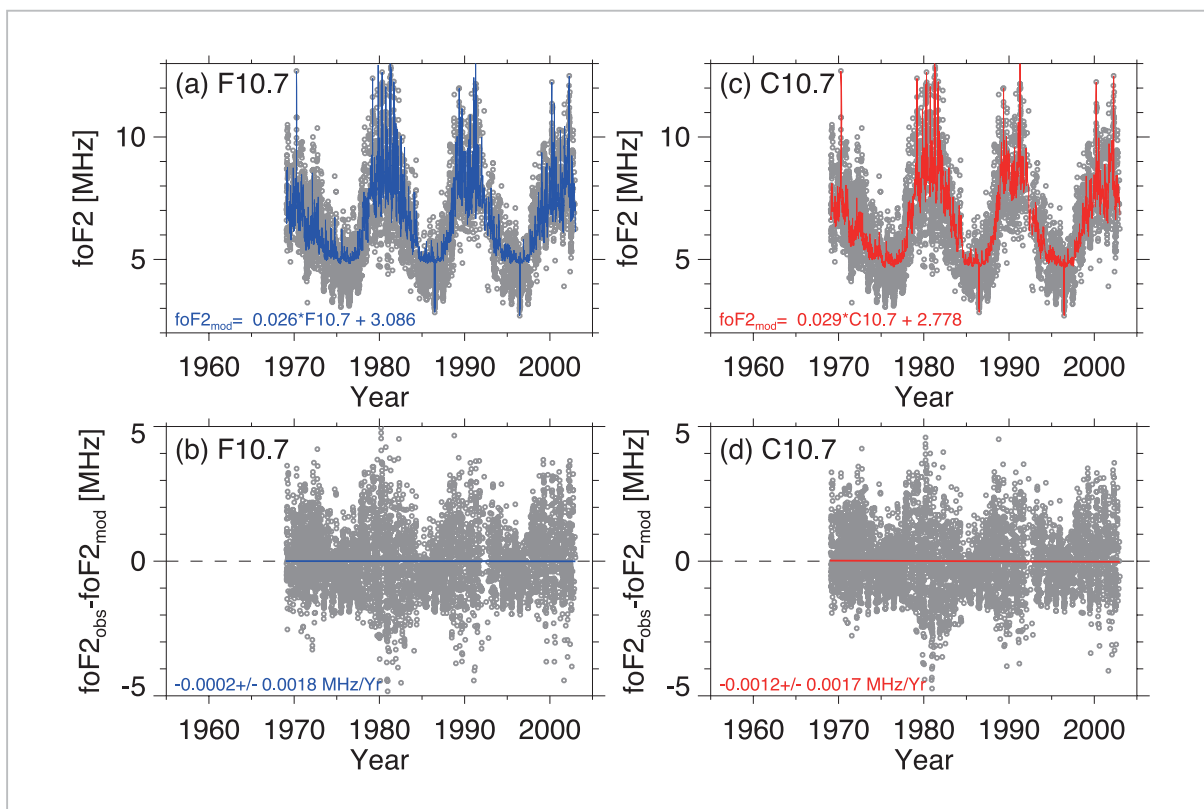


図9 (a) 1969年から2002年に観測されたfoF2の変動(foF2_{obs}:グレーの丸)とF10.7を用いて求められたfoF2の太陽活動に依存する成分(foF2_{mod}:青線)。(b)foF2の残差成分(ΔfoF2:グレーの丸)と直線トレンド(青線)。(c)1969年から2002年に観測されたfoF2の変動(foF2_{obs}:グレーの丸)とC10.7を用いて求められたfoF2の太陽活動に依存する成分(foF2_{mod}:赤線)。(d)foF2の残差成分(ΔfoF2:グレーの丸)と直線トレンド(赤線)

期トレンド成分はほぼゼロとみなすことができる。一方、C10.7を使用した場合、foF2の長期トレンドは1年で -0.0012 ± 0.0017 MHz減少と、F10.7の場合よりも減少率(傾き)が約6倍も増加した。この結果からも、どの太陽活動指数を選定するかで、長期トレンドの傾向が変わることが分かる。これは、これまでの解析手法を再検討する必要があるということを示唆している。しかしC10.7の場合も、誤差よりもトレンド成分が若干小さいことから、1969年から2002年においてfoF2が有意に減少傾向を示しているとは必ずしも言いきれない。異なる手法ではあるが、文献^[23]が1935年から2001年におけるトロムソのfoF2長期データから有意なfoF2の減少トレンド(1年で -0.0078 ± 0.0041 MHzの減少)を導出した結果とは異なる。

次に、いくつか異なるトレンド抽出手法や、使うデータの期間、太陽活動指数の違いによって、導出されるfoF2の長期トレンドにどの程度影響

を与えるかについて調べた。用いたデータは、太陽活動指数のF10.7とC10.7、地磁気活動指数のK指数とap指数である。ap指数は、世界12ヶ国の地磁気観測所の観測を基にした地磁気の活動度を示す3時間毎の値であり、0~400 nTの間で28区分されている。この解析では、地磁気静穏時をap指数が10 nT以下とした。表1は、それぞれのfoF2の長期トレンド値をまとめた結果である。foF2のモデル値(foF2_{mod})においては、3つのケースを考えた。モデル1では、太陽活動・地磁気活動に依存する成分を、 $foF2_{mod} = a_1 \cdot (\text{太陽活動指数}) + b_1 \cdot (\text{地磁気活動指数: ap指数}) + c_1$ の形式で表し、それらを観測値から差し引くことによってトレンド成分を求めた。これは、これまでの電離圏長期トレンド研究でよく用いられている手法の一つである。モデル2とモデル3は地磁気活動静穏時のfoF2だけを取り出すために、それぞれap指数(ap指数が10以下)とK指数(K指数が2以下)を用いて判定した。その後

表1 異なるトレンド抽出手法、使用データの期間、太陽活動指数の違いによって導出される昭和基地における foF2 の長期トレンド

	用いる太陽活動指数 (S)	Model 1: foF2 _{mod} = aS + bap + c	Model 2: foF2 _{mod} = aS + b ap 指数 ≤ 10	Model 3: foF2 _{mod} = aS + b K 指数 ≤ 2
1959年～2002年	F10.7	-0.0033±0.0013 MHz/Yr	-0.0066±0.0016 MHz/Yr	
	C10.7	-0.0028±0.0013 MHz/Yr	-0.0063±0.0015 MHz/Yr	
1969年～2002年	F10.7	-0.0016±0.0016 MHz/Yr	-0.0040±0.0018 MHz/Yr	-0.0002±0.0018 MHz/Yr
	C10.7	-0.0033±0.0015 MHz/Yr	-0.0053±0.0017 MHz/Yr	-0.0012±0.0017 MHz/Yr

の手法は最初に示した手法と同じである。表1を見るとわかるように、どの手法を用いても foF2 の長期トレンド成分は減少傾向を示しているが、そのトレンドの減少率は観測データ期間、太陽活動指数、トレンド抽出手法の違いによって大きく異なる。もっとも大きな減少傾向を示したケースが、モデル2を用いる手法であり、次いでモデル1の手法となる。モデル3の手法においては、foF2 長期トレンドがほぼゼロという傾向となる。1959年から2002年までの長期トレンドでは、太陽活動指数の違いからくる差はそれほど大きくはないが、1969年から2002年までのデータ期間で区切るとその差は大きくなる。

以上の結果は、今後の長期トレンド解析を進める上で重要なヒントを与えている。特に、全球的な電離圏長期トレンドの導出においては、(1)それぞれの観測点におけるデータ観測期間を揃えること、(2)太陽・地磁気活動に依存する成分を取り除く手法、(3)太陽・地磁気活動指数の選定、などを確立してから再検証する必要がある。

4 むすび

電離圏は、通信・電波伝播に重要な影響を与える領域で、上層の太陽放射及び磁気圏、下層の大気圏の双方の影響を受け日々変動や季節変動などは複雑な振舞いを示す。また近年、長い時間スケールでの地球超高層大気(電離圏)の変遷に、人為起源による温室効果ガス増加が重要な役割を果たしている可能性を指摘する研究者もいる。このように、電離圏は地球大気上下結合における境界領域として大変重要である。

本章では、1959年から2002年における、南極・昭和基地(南緯 69.0°、東経 39.6°)でのイオノゾンデ長期観測データを基に、オーロラ帯域の様々な電離圏 F2 層の変動について紹介した。foF2 の平均的な地方時・季節変化は、他の観測点でも見られるような複雑な変化を示し、更には太陽活動・地磁気活動に大きく影響している様子が分かった。また、地球温暖化に関わってくると考えられている電離圏長期トレンドは、科学的なテーマであると同時に社会的にも関心の高い問題である。今後は、南極・昭和基地における電離圏観測が継続され、さらに長い時間スケールに及ぶ電離圏の変遷を明らかにすると同時に、その物理プロセスを理解するためには数値モデルによるアプローチも必要となる。

謝辞

F10.7 指数、Mg II は、NOAA の国際地球物理データセンター(NGDC)の提供によるものです。南極・昭和基地のイオノゾンデデータは、情報通信研究機構・電磁波計測研究センター推進室の石井守室長、同機構・光・時空標準グループの中村真帆専攻研究員により提供して頂きました。本稿執筆にあたり、有用な助言を頂きました情報通信研究機構の丸山隆上席研究員、中村真帆専攻研究員に深く感謝致します。長年にわたり、昭和基地イオノグラムデータの読み取り作業をして頂いている、情報通信研究機構の福嶋さんに感謝いたします。最後に、昭和基地におけるイオノゾンデ観測機器の設置・保守作業に従事されてきたすべての南極観測隊員に感謝致します。

参考文献

- 1 Rishbeth, H., "The centenary of solar-terrestrial physics", *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 63, 1883-1890, 2001.
- 2 Lakshmi, D. R., B. M. Reddy, and R. S. Dabas, "On the possible use of recent EUV data for ionospheric predictions", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50, 207-213, 1988.
- 3 Balan, N., G. J. Bailey, B. Jenkins, P. B. Rao, and R. J. Moffett, "Variations of Ionospheric Ionization and Related Solar Fluxes During an Intense Solar Cycle", *J. Geophys. Res.*, 99(A2), 2243-2253, 1994.
- 4 Liu, J. Y., Y. I. Chen, and J. S. Lin, "Statistical investigation of the saturation effect in the ionospheric foF2 versus sunspot, solar radio noise, and solar EUV radiation", *J. Geophys. Res.*, 108(A2), 1067, doi:10.1029/2001JA007543, 2003.
- 5 Richards, P. G., J. A. Fennelly, and D. G. Torr, "EUVAC: A Solar EUV Flux Model for Aeronomic Calculations", *J. Geophys. Res.*, 99(A5), 8981-8992, 1994.
- 6 Rishbeth, H., "How the thermospheric composition affects the ionospheric F2-layer", *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 60, 1385-1402, 1998.
- 7 Rishbeth, H., and M. Mendillo, "Patterns of F2-layer variability", *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 63, 1661-1680, 2001.
- 8 Torr, M. R. and D. G. Torr, "The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 35, 2237-2251, 1973.
- 9 Floyd, L., J. Newmark, J. Cook, L. Herring, and D. McMullin, "Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices", *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 67, 3-15, 2005.
- 10 Heath, D. F., and B. M. Schlesinger, "The Mg 280 nm doublet as a monitor of changes in the solar ultraviolet irradiance", *J. Geophys. Res.*, 91, 8672-8682, 1986.
- 11 Harvey, J. W., and W. C. Livingston, "Variability of the solar He I 10830 angstrom triplet, IAU Symposium 154, Infrared Solar Physics", 59, 1994.
- 12 Donnelly, R. F., T. P. Repoff, J. W. Harvey, D. F. Heath, "Temporal characteristics of the solar UV flux and He I line at 1083 nm", *J. Geophys. Res.*, 90, 6267-6273, 1985.
- 13 Viereck, R., L. Puga, D. McMullin, D. Judge, M. Weber, and W. K. Tobiska, "The Mg II index: A proxy for solar EUV", *Geophys. Res. Lett.*, 28(7), 1343-1346, 2001.
- 14 丸山隆, "太陽 EUV 代理指標を用いた日本上空の標準電離圏全電子数モデル", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-3-5, 2009.
- 15 Roble, R. G., and R. E. Dickinson, "How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere ?", *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1441-1444, 1989.
- 16 Rishbeth, H., "A greenhouse effect in the ionosphere ?", *Planet. Space Sci.*, 38, 945-948, 1990.
- 17 Rishbeth, H., and R. G. Roble, "Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases -Modeling of thermospheric and ionospheric effects", *Planet. Space Sci.*, 40, 1011-1026, 1992.
- 18 Keating, G. M., R. H. Tolson, and M. S. Bradford, "Evidence of long term global decline in the Earth's thermospheric densities apparently related to anthropogenic effects", *Geophys. Res. Lett.*, 27(10), 1523-1526, 2000.

- 19 Emmert, J. T., J. M. Picone, J. L. Lean, and S. H. Knowles, "Global change in the thermosphere: Compelling evidence of a secular decrease in density", J. Geophys. Res., 109, A02301, doi:10.1029/2003JA010176, 2004.
- 20 Bremer, J., "Ionospheric trends in mid-latitudes as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect", J. Atmos. Terr., Phys., 54, 1505-1511, 1992.
- 21 Ulich, T., and E. Turunen, "Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionosonde data", Geophys. Res. Lett., 24, 1103-1106, 1997.
- 22 Ulich, T., M. Cliver, and H. Rishbeth, "Determining long-term change in the ionosphere", EOS, 84, 581, 2003.
- 23 Hall, C. M., and P. S. Cannon, "Trends in foF2 above Tromsø(69°N 19°E)", Geophys. Res. Lett., 29, 2128, doi:10.1029/2002GL016259, 2002.
- 24 Mikhailov, A. V., and D. Marin, "Geomagnetic control of the foF2 long-term trends", Ann. Geophys., 18, 653-665, 2000.
- 25 Bremer, J., "Trends in the ionospheric E and F regions over Europe", Ann. Geophys., 16, 986-996, 1998.
- 26 Upadhyay, H. O., and K. K. Mahajan, "Atmospheric greenhouse effect and ionospheric trends", Geophys. Res. Lett., 25, 3375-3378, 1998.
- 27 Bremer, J., "Investigations of long-term trends in the ionosphere with world-wide ionosonde observations", Adv. Radio Sci., 2, 253-258, 2004.
- 28 Mikhailov, A. V., and D. Marin, "An interpretation of the foF2 and hmF2 long-term trends in the framework of the geomagnetic control concept", Ann. Geophys., 19, 733-748, 2001.

もとばてつお
元場哲郎

国立極地研究所宙空圏研究グループ
特任研究員 博士(理学)
超高層大気物理