

3-3-5 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

3-3-5 Regional Reference Total Electron Content Model over Japan Using Solar EUV Proxies

丸山 隆

MARUYAMA Takashi

要旨

情報通信研究機構では国土地理院の GPS 衛星受信機網 (GEONET) で得られるデータをもとにして緯度および経度 2 度の格子点毎に日本上空の電離圏全電子数 (TEC) を 15 分間隔で定常的に求めている。太陽活動の 1 周期 (11 年) 以上に亘るこの TEC データを用いて電離圏形成のエネルギー源である太陽極端紫外線 (EUV) の変動が如何に TEC 変動をもたらすかについて調べ、経験的な標準 TEC モデルを構築した。太陽活動度指標として、太陽黒点数、 $F_{10.7}$ 指数、Mg II の吸収線データ (Mg II core-to-wing ratio)、および SOHO 衛星による EUV 強度を評価した。さまざまな太陽活動度指標を組み合わせることで、TEC の変動を高精度で予測することが可能になった。

Solar proxies and indices describing extreme ultraviolet (EUV) irradiance that affects the ionospheric total electron content (TEC) were examined through training an artificial neural network (ANN). A TEC database was constructed from a dense GPS receiver network over Japan from April 1997 to March 2008, covering an entire 11-year solar activity cycle. In the present study, ANN training for predicting TEC as a target parameter was done by including new solar proxies/indices in the input space that were based on direct measurements of solar EUV/UV flux, SOHO_SEM₂₆₋₃₄ (the integrated 26-34 nm EUV emission), and Mg II cwr (the core-to-wing ratio of Mg II 280 nm line), as well as the traditional indices $F_{10.7}$ and sunspot number. General improvements were obtained by combining different types of proxies and their short- and long-term means. The best combination was the 3-day smoothed daily, 7-day and 27-day backward mean values of Mg II cwr, SOHO_SEM₂₆₋₃₄, and the 10.7-cm radio flux.

[キーワード]

全電子数, $F_{10.7}$, 太陽黒点数, Mg II cwr, SOHO_SEM₂₆₋₃₄Total electron content, $F_{10.7}$, Sunspot number, Mg II cwr, SOHO_SEM₂₆₋₃₄

1 緒言

電離圏全電子数 (TEC: total electron content) は電離圏の状態を表す基本的なパラメータであり、宇宙天気予報の観点からは、GPS 衛星の高精度利用などにおいて電離圏を通過する電波の遅延により生じる誤差を評価する上で重要である。TEC の変動の最も大きな要因は中性大気を電離する波長 102.5 nm 以下の極端紫外線 (EUV: extreme ultraviolet) の放射流束変動である。地球

上のある地点に入射する EUV 放射流束はさまざまな時間スケールで変動する。それらには、太陽活動度変動の 11 年周期、太陽の自転による 27 日周期のほかに、季節・日周変動 (太陽天頂角依存性) などがあげられる。季節による中性大気 (熱圏大気) 組成の変化による電離圏プラズマの再結合係数変化なども TEC 変動の重要な要因である。電離圏の主イオンである O^+ の再結合過程として N_2 および O_2 との衝突による電荷交換 (組み換え衝突) で作られる分子イオン (NO^+ および O_2^+) の

解離再結合が重要である。これら分子イオンの解離再結合は組み替え衝突による電荷交換反応に比べて速やかに進行するから $[O]/[N_2]$ で代表される大気組成比が TEC の変動に大きく関与する。大気組成は温度やそのほかの熱圏の状態に大きく影響されるが、熱圏も太陽 UV/EUV の支配下にある。高度 170 から 300 km では EUV による中性大気の電離反応が主な熱源である[1]。吸収された EUV エネルギーは光電子エネルギーとイオン電子対の化学エネルギーに分配されるが、その割合は EUV の波長に依存する。最終的に、波長 102.5 nm 以下の光子は電離によって全て大気に吸収される[2]。O、 N_2 および O_2 の電離断面積は波長 40 から 70 nm 付近に緩やかなピークを持つ。これより短い波長では電離断面積は小さくなり、放射流束のエネルギーが吸収される高度は低くなる。高度が下がるにつれてイオンの消滅係数が大きくなり、電子密度変動への寄与は相対的に小さくなる。

高度 170 km 付近より下層ではシューマン・ランゲ連続帯 (Schumann-Runge continuum; 波長 130 ~ 175 nm) の FUV (far ultraviolet) 放射による O_2 の解離反応が主な熱源となる。この反応は、同時に $[O]/[N_2]$ の値にも影響を与え、したがって、電子密度変動にも寄与する。このように太陽紫外線は直接的 (電離反応) のみならず、間接的 (熱圏の変動) にも TEC の変動に寄与している。広い波長域にわたる太陽紫外線放射スペクトルと TEC の関係はこのように極めて複雑であるから、本稿では特定の波長を意識せず、概念的に電離圏に寄与する紫外線 (IE-EUV: ionospheric-effective EUV) として太陽エネルギー放射流束を取り扱う。本稿の主題とするところは、IE-EUV がさまざまな太陽活動度指標にたいしてどのように振舞うかを調べ、経験的な TEC 変動モデルを構築することにある。

ここで問題としている太陽紫外線の大部分は地球の超高層大気で吸収され、また、衛星による大気圏外での太陽紫外線の観測データは常に得られるわけではない。そこで、これまでの多くの電離圏-熱圏の理論的あるいは経験的モデルでは代理指標 (proxy) が用いられてきた。代表的なものが太陽黒点数 (R) と波長 10.7cm の電波雑音 ($F_{10.7}$) である。熱圏の経験モデルのひとつである MSIS

(Mass Spectrometer and Incoherent Scatter radar)[3][4] では、その日の $F_{10.7}$ 指数と前後 81 日間 (太陽の 3 自転周期) の平均値の二つのパラメータが紫外線による加熱の指標として用いられている。国際標準電離圏モデル (IRI: International Reference Ionosphere)[5] では、太陽黒点数の 12 ヶ月平均値が太陽活動度の指標として用いられている。また、Richards 他[2] の超高層大気のための太陽紫外線モデル (EUVAC: EUV model for aeronautical calculations) では、その日の $F_{10.7}$ と前後 81 日間平均値の算術平均をひとつのパラメータとして用いて紫外線放射流束のスペクトル強度が得られるようになっている。

近年、衛星観測による太陽放射流束の観測データが超高層大気との絡みで精力的に調べられている。1995 年の末からラグランジュ点に打ち上げられた SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 衛星の SEM (Solar Extreme Ultraviolet Monitor) による波長 26 - 34 nm の放射流束データが利用可能になった。SOHO_SEM のデータは他の代理指標と異なり、観測波長域が先に述べた地球超高層大気の電離に関わる波長域と重なり合う。Bowman 他[6] は経験的な熱圏モデルの入力とするため、SOHO_SEM の 26 - 34 nm 積分放射流束の値を $F_{10.7}$ の長期間変動幅に規格化し新しい指数 $S_{10.7}$ を導入している。他の重要な太陽活動度指標として Mg II の core-to-wing ratio (Mg II crw) がしばしば取り上げられる。これは波長 280 nm 近傍の Mg II の吸収線中心とその両側の翼部の比を用いるもので、Heath と Schlesinger[7] によって彩層領域の太陽活動度を良く表す指標として最初に提案された。Mg II crw と他の波長域の紫外線の変動あるいは $F_{10.7}$ との関係は多くの研究者によって調べられている[8]-[12]。Emmert 他[13] は TIMED 衛星の SEE 観測による波長 0 - 120 nm の積分 EUV エネルギーと Mg II crw との良い相関を示している。Lean 他[14] は彩層の活動度指数は、単独あるいは $F_{10.7}$ 指数との組み合わせで、従来より精密に EUV 放射流束を表現し得ることを指摘している。このように多くの研究から Mg II crw が太陽活動度の良い指標であることが分かっている。

しかし、Floyd 他[12] が示すように、Mg II crw、 $F_{10.7}$ 、 R 、そして He 1083 の太陽活動度指数はそ

それぞれ異なった長期変動特性を持っている。また、これら指数の太陽自転周期の数回にわたる短周期変動もまた異なることが分かっている [12][15]。このような振舞の違いは、それぞれの観測に関わるエネルギーの放射域が太陽の異なった領域にあることがひとつの原因である。大気モデルの構築にあたって、Tobiska 他 [16] は時間変動に関して異なった振舞を示す活動度指数を組み合わせる指標に使うことが肝要であると指摘している。

経験モデルで太陽活動度指標を用いるにあたって、注意を払わなければならないもうひとつの点は長期変動と短期変動との振幅関係である。すなわち、太陽の自転に伴って現れる 27 日周期変動と太陽活動度が極大・極小期を繰り返す 11 年周期変動の振幅比は波長ごとに異なる [17] - [19]。その結果として、ある指標の短周期変動成分と長周期変動成分を単純に足し合わせても IE-EUV の正確な指標にはなりえない。これを解決しようとしたひとつの試みが、太陽 EUV の代理指標として $F_{10.7}$ 指数を用いる際にその日の値と前後 81 日間の平均値を組み合わせる方法であった [3][4]。

電離圏に比べれば、熱圏では太陽放射流束変動に対する応答の研究が広く行われていると言える。太陽活動度変動による熱圏変動と電離圏変動とは強く関係しているが、エネルギーの流れは複雑で、必ずしも同じではない [1] から、二つの変動も異なる。それゆえ、電離圏変動モデルを記述する太陽活動度指標は熱圏のそれと完全には一致しないはずである。太陽活動度が電離圏に与える影響を統計的に調べる上で、SOHO_SEM₂₆₋₃₄ あるいは Mg II cwr が他の太陽放射流束観測に比べて有利な点は、そのデータの連続性にある。すなわち、これら観測データは太陽活動度の 11 年周期にわたってほぼ連続的に得られており、我々の TEC データ・セットの期間と完全に重なる。本稿では、IE-EUV を記述できる最適な太陽活動度代理指標を、従来の太陽黒点数および 10.7 cm 電波強度とともに SOHO_SEM₂₆₋₃₄、Mg II cwr およびそれらの組み合わせの中から求める。また経験的な太陽放射流束モデルである SOLAR2000 [20] の出力についても評価する。

電離圏/熱圏システムの太陽代理指標に対する応答は極めて複雑であるから、ここでは、人工

ニューラル・ネットワーク (ANN: artificial neural network) の手法を用いることにする。最も広く使われている ANN は多層パーセプトロン [21] で、これを電離圏の問題に応用する場合は f_0F_2 、 $h'F_2$ あるいは TEC などの観測量がターゲット・パラメータとなる。入力パラメータとしては太陽活動度指数、季節、時刻 (local time)、緯度/経度などの電離圏に影響を与える因子が選ばれる。しかし、最初に我々の目的とするところは、最適な太陽活動度代理指標を見つけ出すことであり、入力空間には季節と太陽活動度指数を用い、そのほかの因子はターゲット・パラメータに含ませることにする。2 ではこの ANN 手法について述べ、3 でさまざまな代理指標に対する ANN 学習結果の比較を、4 では得られた結果の物理的な解釈を議論する。5 では ANN 予測値と観測値の比較を行い、6 はまとめと展望を述べる。

2 TEC データベースと ANN 手法

わが国では、国土地理院によって全土を網羅する二周波 GPS 受信機網 (GEONET: GPS Earth Observation Network) が整備され、1997年 4 月以降のデータが公開されている。この太陽活動極大/極小の 1 周期に亘る期間について、全 GEONET 受信機の中から分布が均一になるように選び出した約 300 の受信機を用いて TEC を求めた。GPS 受信信号から TEC を推定する際の最も大きな課題は、衛星および受信機に固有の周波数間バイアスと、受信機 - 衛星を結ぶ斜め伝播路上の電子密度積分値 (sTEC: slant TEC) を鉛直方向の TEC (vTEC) に変換する手法である。ここでは、伝播路が 400 km の高度を横切る点 (IPP: ionospheric piecing point) で sTEC を vTEC に換算し、緯度/経度 2×2 度の範囲では TEC は均一であると仮定する。さらに 24 時間以内では衛星および受信機の周波数間バイアスは一定であるとして、15 分毎の TEC 値を求めた。この手法については Ma と Maruyama [22] に詳しく述べられている。このようにして求めた各格子点の値を gTEC (grid TEC) と呼ぶことにする。図 1 に用いた格子点の分布を示す。

TEC 変動の主な要因は太陽活動度、季節、時刻、地理/地磁気座標などである。これらの多く

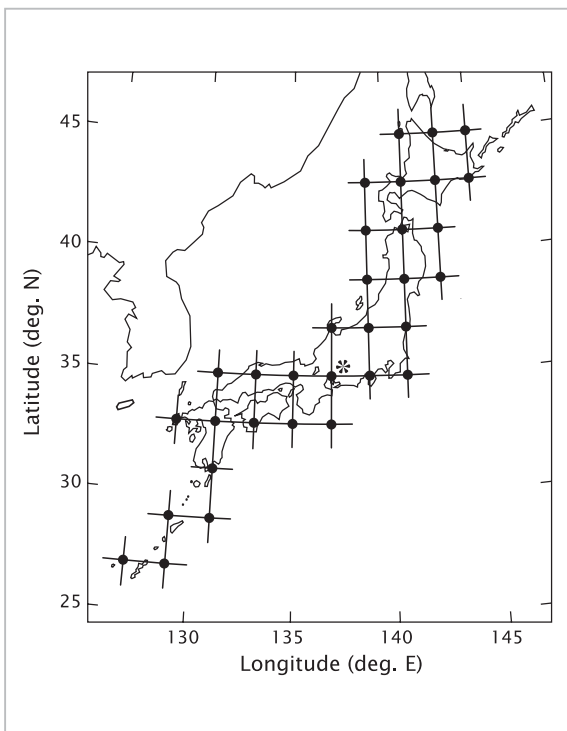


図1 全電子数(TEC)を求めるための32個の格子点

それぞれの格子点について15分ごとにTECを導出。
*印の格子点(北緯35度、東経137度)の値をニューラル・ネットワークの学習評価に用いた。

の要素を取り扱うのに人工ニューラル・ネットワーク(ANN)[21][23]を応用する。このようなANNは上に述べたような地球物理的要素(入力)とTECや f_oF_2 などの観測値(ターゲット)の関係を近似し、電離圏の状態を明示的に記述するのにしばしば用いられてきた[24]–[26]。しかし、ここでは、時刻と地理/地磁気座標はターゲットの中に埋め込むことにする。日本上空の局所的なTEC変動を取り扱うだけであるから、時刻と経度は互いに置き換えられるものとし、さらに地磁気緯度と地理緯度の差は一定であると仮定して、TECの時刻–緯度分布を二次元マップで表すことにする。すなわち、二次元マップがANNのターゲットになる。2003年の代表的な季節について、TECマップの例を図2に示す。各々下段が観測値、上段はこれから述べる学習したANNからの出力結果である。

TECの二次元マップを生成するには次式で表される球函数展開を用いる。

$$TEC = \sum_{m=0}^M \sum_{n=m}^N (A_{nm} \cos m\phi + B_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

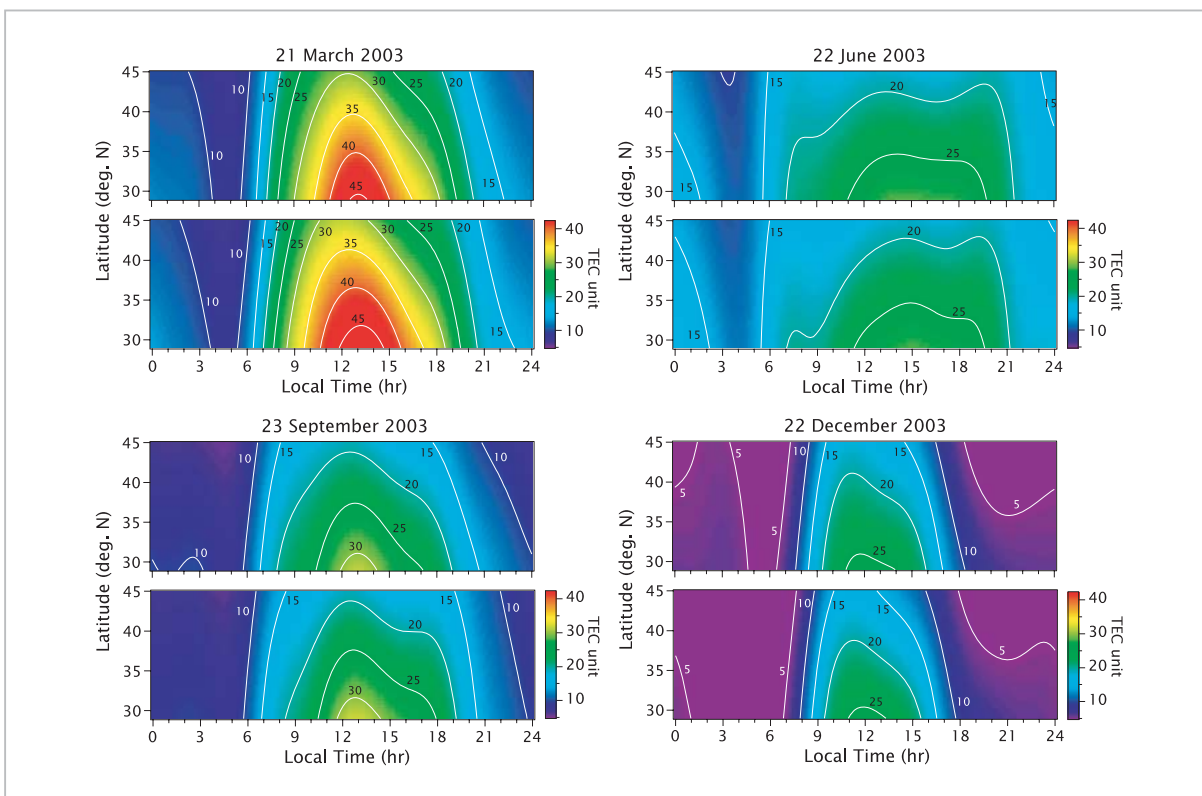


図2 球函数による全電子数の緯度–時間変化マップ

4つの季節ごとの図は上段がニューラル・ネットワークによるモデルの結果、下段が観測値。

ここで、 P はルジャンドル陪函数、経度パラメータは各格子点の経度に対応した太陽時 (LMT : local mean time)、すなわち $\phi = 2\pi \times (\text{LMT}/24)$ 、 θ は余緯度、 $N = M = 7$ である。上式で A_{nm} および B_{nm} を最小自乗法で決めれば TEC マップが得られるから、この係数を実際のターゲット・パラメータとして採用する。計算の便宜上、緯度 29 - 45 度の外側は外挿し、データの無い南半球には南北対称になるようにダミー・データを入れて函数近似しているため、 $n+m$ が奇数になる係数はゼロになる。したがって、二次元 TEC マップを表すのに必要なターゲットの数 (出力層のノード) は 36 となる。二次元マップは 3 日分の TEC データで作成し、移動平均をとる。これの 11 年分 (1997 年 4 月 1 日から 2008 年 3 月 31 日) が ANN の学習と評価のデータ・セットになる。

ANN の構成は図 3 に示したように、上に述べた出力層 36 ノード、隠れ層 (hidden layer) 100 ノード、入力層は用いる太陽活動度代理指標の数に応じて 3 から 18 ノードまで変化する。ANN の学習は 2 段階に分けて行う。最初は一組の入力とターゲット・データを与えるたびにニューロンの重みを更新するパターン・モード [21] で行い、ある程度収束してきたら 11 年分の全データを与えた後に重みを更新するバッチ・モード [21] で学習する。バッチ・モードでは学習定数およびモーメントを 0.9 とした。出力層 36 ノードの教師データと ANN 出力の自乗誤差の和を 11 年分について評価し、重み更新ごとの自乗誤差の変化が 10^{-5} になったとき学習を完了する。バッチ・モード学習は誤差収束の振舞いが単調であるため、本稿のような入力パラメータの比較検討に適しているが、大量のデータを用いるバッチ・モード学習はターゲット・パラメータを二次元マップにすることで初めて可能となった。

学習の達成度を評価するために、11 年分の全データを学習用のセットと評価用のセットに分割する。このとき、学習および評価が太陽活動度変化の全ての位相と季節変化を隈なく含むようにするため、10 日に 1 日の割合で評価用のデータを抜き出した。学習結果の評価は通常行われているようなターゲット・パラメータに対してではなく、ルジャンドル係数から TEC マップを再構成

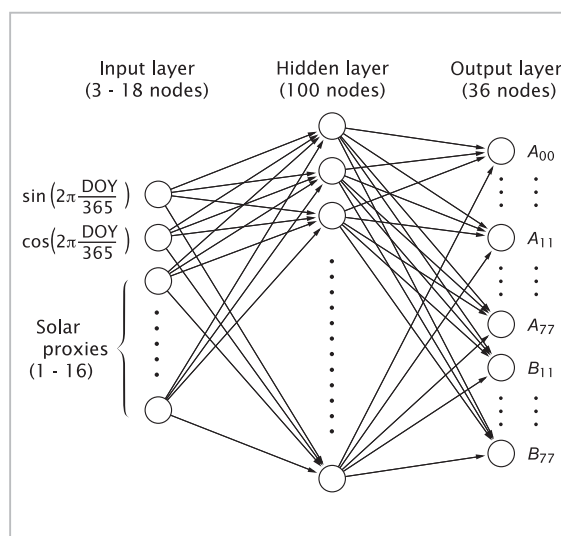


図3 学習に用いたニューラル・ネットワークの構成

し、TEC の 1 時間値に対して平均自乗誤差の平方根 (RMSE : root mean square error) を求めて行った。ANN の学習では、ニューロンの重みの初期値を乱数で与える。そのため、学習結果は太陽活動度指標の選び方だけでなく、与えられた初期条件によっても異なる。また、評価が再構成した TEC マップで行われるため、より正確な比較評価を行うのに、独立した 11 回の学習結果の中での最も高い評価 (最小の RMSE) をもって達成度とした。

比較する太陽活動度代理指標は、観測に基づくものとして太陽黒点数、10.7 cm 太陽電波雑音、SOHO_SEM の 26 - 34 nm 積分 EUV 強度、Mg II cwr である。太陽黒点数はベルギーの SIDC (Solar Influence Data Analysis Center) が世界の観測ネットワークをもとに統計的に算出した International Sunspot Number (R_i) を採用する。10.7 cm 電波雑音指数 ($F_{10.7}$) はカナダの Penticton で観測した 20 時 UT の値である。この値は古くから連続観測されており標準的なデータ・セットとして高く評価されている。ANN の計算では入力およびターゲット・データは 0 と 1 の間の値をとるように規格化する必要があるため、 R_i および $F_{10.7}$ は実際の計算では 11 年周期の中での最大値で除した値を用いる。Mg II cwr は NOAA 衛星によって 1 日 2 回の観測が行われている。SOHO_SEM 観測装置は 26 - 34 nm の EUV 強度をさらに高い時間分解能で観測しているため、24 時間平均を用いる。

Tobiska 他 [16] はこれら紫外線の観測値を一次処理して $F_{10.7}$ 指数の長期変動に規格化した $M_{10.7}$ および $S_{10.7}$ 指数を作り出している。ここでは $F_{10.7}$ 同様に $M_{10.7}$ および $S_{10.7}$ の値をそれぞれの 11 年周期中の最大値で除した値を用いる。SOHO_SEM には一部データの欠落期間があるが、この部分については、次に述べる経験モデル SOLAR2000 から得られる S_{euV} 指数値を用いて、欠落部分の前後のデータと比較した上で補完する。補完後の指数を $S^*_{10.7}$ と呼ぶことにする。

SOLAR2000 (<http://www.spacewx.com/solar2000.html>) はライマン α と $F_{10.7}$ を入力に用いた太陽紫外線スペクトル強度の経験モデルである [20]。SOHO_SEM の観測値に対応する値が前述の S_{euV} 指数として出力される他に、地球超高層大気の電離に与る 1 - 105 nm の積分値 $E_{10.7}$ が計算される。これら二つの指数についても観測に基づく指数同様に TEC モデルへの入力としての適/不適を評価する。

既に述べたように TEC マップは 3 日の平均として作成したことから、太陽活動度指数も 3 日平均を用い、便宜上これを当日の値 (daily value) と呼ぶことにする。当日の太陽活動度指数に加えて、TEC 値の日付から過去に遡った 7、27、81 日間の平均値 (後方平均) および TEC 値の日付を中心にした 7、27、81 日間の平均値 (中央平均) を ANN 入力に用いる。ここで、27 および 81 日は 1 および 3 太陽自転周期に対応し、7 日 (1/4 太陽自転周期) 遡った平均値は IE-EUV に対する熱圏/電離圏応答の積分効果を見ようとするものである。積分効果の検証のために、7 日の後方平均を 3 日と 4 日に分けた値も検討する。これらの平均値を求めた期間を図 4 にまとめて示す。6 個の太

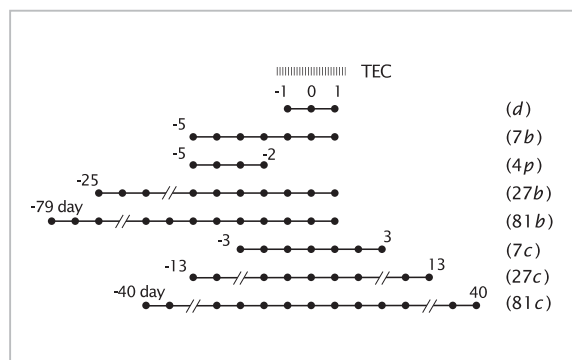


図4 短周期変動を平均するための期間

陽活動度指数とそれぞれ 8 期間の平均値、合計 48 パラメータの組み合わせが評価対象になるので、原理的に $2^{48} - 1$ ($\sim 10^{14}$) 個の組み合わせが出来る。さらに、それらの時間遅れまでを考慮すると、入力パラメータの組み合わせはさらに多くなる。言うまでも無く、これらの組み合わせを全て試すことは現実的でない。本稿では、単一パラメータから最大 16 個 (4 指数 \times 4 期間平均パラメータ) まで、段階を追って絞り込み、約 300 の組み合わせパターンについて ANN 学習と結果の評価を行った。

3 結果

3.1 単一指標を用いた場合の比較

単一の太陽活動度指数を IE-EUV の代理指標とするのが最も単純に TEC 変動をモデル化する手法である。図 5 に 5 つの指数についての比較を示す。横軸のゼロは TEC の観測日と同じ日の指数を表

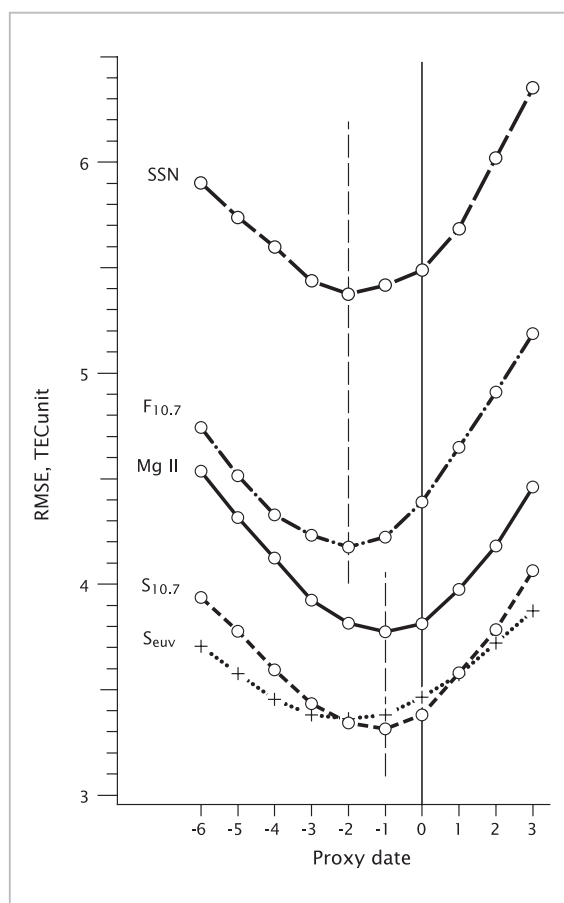


図5 単一指標を用いた場合の指標ごとの学習結果

1 ~ 2 日の応答遅れが見られる。

し、負の数はそれより前の、正の数は後の日付の指数を入力した場合である。縦軸の RMSE は ANN 学習の達成度で、数字が小さいほど TEC のモデル化に適した指標であると考えられる。これまでの研究から容易に分かるように、太陽黒点数が IE-EUV を表すのに最も不適である。F_{10.7} 指数はこれよりは良い結果であるが、依然 RMSE が大きい。最も良い結果は SOHO_SEM₂₆₋₃₄ の場合であり、観測波長が大気電離に寄与する EUV の波長と重なり合うことから納得できる。Mg II cwr は観測波長が 280 nm と、電離に寄与する波長帯の外であることもあって、F_{10.7} と SOHO_SEM₂₆₋₃₄ の中間の結果となった。SOHO_SEM₂₆₋₃₄ と比較するために SOLAR2000 の S_{ew} が点線で示されており、これも全体として良い結果であるが、SOHO に比べて曲線が平らであることに気づく。

地球超高層大気の変動が太陽 EUV の変動に対して数日の応答遅れを示すことは以前から知られていたが、図 5 においても最適な指標は時間遅れを持っていることが表れている。この遅れ時間には指標によって違いがあり、太陽黒点数、F_{10.7}、そして SOLAR2000 からの S_{ew} は 1.5 ~ 2 日前の値を用いた場合に最も学習の達成度が高く、紫外線の観測値に基づく S_{10.7} と M_{10.7} では 1 日の遅れ時間で最も学習の達成度が高い。

3.2 期間平均値の併用によるモデルの改善

図 6a は ANN の入力として TEC 観測日前日(前述の電離圏応答の遅れを考慮)の指数値のほかに、幾つかの期間平均値を併用した場合の結果をそれぞれの指標について示している。横軸は図 4 に示した期間平均の組み合わせであり、1 は前日の指数 (*d*)、2 はこれに 7 日後方平均 (*d+7b*)、3 はさらに 27 日後方平均 (*d+7b+27b*)、4 は 7、27、81 日後方平均の全て (*d+7b+27b+81b*) を入力した場合を表す。入力パラメータの数を増やすことによって概して学習の改善が見られるが、その効果には指標によって違いも見られる。太陽黒点数と F_{10.7} ではグラフ上ではっきりした右肩下りの傾向があり、最も良い結果は組み合わせ 4 で得られた。これに対して Mg II cwr では組み合わせ 3 が最良であり、81 日平均を追加併用すると寧ろ結果が悪くなる。SOLAR2000 の出力から 1 - 105 nm の EUV 強度を積分して得られた E_{10.7} と

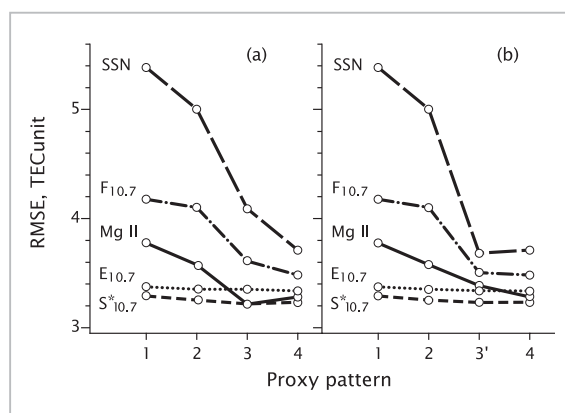


図6 指標ごとに異なる期間の平均値を併用した場合の学習の改善

SOHOの 26 - 34 nm の観測に基づく S*_{10.7} (ここでは欠落データを補完している) では、期間平均を併用しても大きな改善が見られない。その日の指数だけで EUV 変動が良く表されているとも言える。

図 6b は組み合わせ 3 が 3' として異なる場合は図 6a と同じである。組み合わせ 3' では 7 日後方平均と 81 日後方平均が用いられている (*d+7b+81b*)。図から、太陽黒点数については 81 日平均の効果が大きく、27 日平均を加えると寧ろ学習は悪化することが分かる。F_{10.7} についても 81 日平均の効果は大きく、27 日平均を追加したことの効果は殆ど見られない。図 6a、b を総合すると、IE-EUV の代理指標としての太陽黒点数と F_{10.7} ではより長期間の平均的な振舞が重要であり、紫外線観測に基づく S*_{10.7} と Mg II cwr では少し短く 27 日の平均値が重要であると結論できる。

ここまでは、期間平均として、後方の幾日かを選択したが、これまでの経験モデルでは、TEC などの観測日を中心にした期間平均が用いられてきた。表 1 は後方平均と中央平均の比較の結果である。組み合わせの数字と記号は図 4 に準拠している。黒点数と F_{10.7} については 81 日平均が、また M_{10.7} については 27 日平均が重要である点は既に述べたとおりであるが、黒点数の場合で後方平均が中央平均に勝っている以外、後方平均と中央平均とで大きな差は認められない。これは ANN の入力として、一日(観測日の前日)の指数と併用した場合であって、平均値単独で相関を調べた場合には中央平均の方が相関係数は高くなることに注意しておく。

表1 後方平均と中心平均の比較

指標	組み合わせ ⁽¹⁾				
	d	$d+27b$	$d+27c$	$d+81b$	$d+81c$
R_i	5.38	4.05	4.29	3.72	3.94
$F_{10.7}$	4.18	3.54	3.67	3.48	3.48
$M_{10.7}$	3.77	3.26	3.26	3.41	3.30
$S_{10.7}^*$	3.28	3.23	3.24	3.23	3.27

(1) 各変数の意味については図4を参照。

3.3 二つ以上の異なる指標を用いた場合

ここまでは、入力に用いた指標は単一種類の指数であり、 $M_{10.7}$ あるいは $S_{10.7}^*$ それぞれ TEC 観測日の前日の指数に7日後方平均と27日後方平均を用いた場合に ANN の学習結果が良好であった。次に、異なる指標の組み合わせで学習結果がどのようになるかを表2に示す。表の最初の4行 (Run 1-1 ~ 1-4) は比較のために単一指標についての結果を再掲したもので、続く6行 (Run 2-1 ~ 2-6) は二つの指標を、その次の2行 (Run 3-1 および 3-2) は3つの指標を、最後は全ての指標を組み合わせさせた場合である。黒点数と $F_{10.7}$ について組み合わせの効果を見ると、Run 2-6 ではそれぞれ単独の使用 (Run 1-1 および 1-2) より良い結果が得られている。しかし、黒点数と $S_{10.7}^*$ あるいは $M_{10.7}$ の組み合わせでは紫外線観測による指数を単独で用いた場合より僅かに結果が劣り、黒点数はここでも活動度代理指標としては劣っていることが分かる。黒点数を含まない他の指標の組み合わせでは一様に良い結果が得られ、 $S_{10.7}^*$ を組み合わせることが特に有効である。次に3つあるいは4つの指標の組み合わせでは、やはり、黒点数を含まない場合に良い結果が得られ、 $F_{10.7}$ 、 $S_{10.7}^*$ および $M_{10.7}$ の d 、 $7b$ 、 $27b$ 、合計9つのパラメータの併用 (Run 3-2) が全ての場合を通じて最良の入力パターンであった。

4 結果の物理的な解釈

4.1 電離圏応答の時間遅れ

太陽活動度の変化によって引き起こされる TEC の変動をモデル化するのに最適な IE-EUV の代理指標を ANN の手法を応用して評価した。

表2 複数の指標の組み合わせ効果

Run	指標				RMSE
	R_i	$F_{10.7}$	$S_{10.7}^*$	$M_{10.7}$	
1-1	✓				4.09
1-2		✓			3.61
1-3			✓		3.22
1-4				✓	3.21
2-1	✓			✓	3.23
2-2		✓		✓	3.20
2-3			✓	✓	3.16
2-4	✓		✓		3.24
2-5		✓	✓		3.17
2-6	✓	✓			3.52
3-1	✓		✓	✓	3.16
3-2		✓	✓	✓	3.12
4-1	✓	✓	✓	✓	3.16

各指標は 図4 の d 、 $7b$ 、 $27b$ からなる。

その前提として、ANN への入力パラメータがターゲット・パラメータと良い相関関係を持っていれば、学習した ANN の出力と観測値との誤差 (RMSE) が小さくなる筈であると仮定している。Wu と Lundstedt^[27] は太陽風パラメータの変動と地磁気嵐の関係を同様な手法で調べ、相互相関係数の比較と ANN の RMSE の比較とは矛盾しない結果を与えることを示した。本稿の図5に示した太陽活動度に対する TEC 応答の遅れも相関解析の結果と比べることが出来る。Jacchia 他^[28] あるいは Paul 他^[29] は衛星軌道の変化を解析して27日周期の太陽紫外線強度の変調に対して熱圏密度の変動に1ないし2日の遅れのあることを見出

している。経験的な熱圏モデル MSIS のシリーズ[3]でも前日の $F_{10.7}$ 指数が用いられている。Bowman 他[6]は彼らの熱圏密度モデルの中で、 $F_{10.7}$ および $S_{10.7}$ については 1 日前の、 $M_{10.7}$ については 5 日前の値を用いている。同様に電離圏の太陽活動度応答についても遅れのあることが報告されている[30]–[32]。Min 他[32]は熱圏大気密度および TEC の太陽活動度応答について相関解析を行っているが、相関強度を示した彼らの図 6 は 180 度回転させると本稿の図 5 と極めて良く似ている。このように、図 5 に示した時間遅れの特性は基本的にこれまでの解析と一致するもので、RMSE を用いる比較解析の妥当性を裏付けている。

TEC の太陽活動度応答の時間遅れを詳細に見ると、これまでの研究との定量的な違い、あるいは今回の結果の中でも指標ごとに違いのあることが分かる。定量的な議論を行うには、それぞれの指標の代表する時間 (T , time tag) について注意する必要がある。10.7 cm 電波雑音強度は 20 時 UT に観測されたものであり、 $S_{10.7}$ は 5 分ごとの SOHO_SEM₂₆₋₃₄ の観測値を平均して 1 日の値を決めている。同様に Mg II cwr では 07 および 16 時 UT の観測値から 1 日の値を決めている。 R_i は全地球的な観測網の結果を統計的に処理して算出しているが、どの時間を代表しているかについては明示されていない。これに対して、本稿の TEC データは東経 135° を中心とした領域であるから、太陽活動が大気の電離に最も大きく寄与するのは 03 時 UT 付近である。

このような各指標の代表する時間を考慮すると、 $F_{10.7}$ ($T = 20$ 時 UT) には $S_{10.7}$ および $M_{10.7}$ ($T = 12$ UT) より見かけ上 8 時間の余分な時間遅れの出ることが予想される。しかし、実際には図 5 に見られるように、 $F_{10.7}$ に対する TEC の応答遅れは $S_{10.7}$ および $M_{10.7}$ のそれと比較して約 1 日長い。 R_i についても $F_{10.7}$ より僅かに短いものの、 $M_{10.7}$ あるいは $S_{10.7}$ に比較して長い応答遅れ時間を示している。このような応答遅れについては、大きく二つの原因があげられる。第一は熱圏/電離圏側にある積分効果であり、他は太陽活動度指標の持つ特性である。 $S_{10.7}$ を算出している EUV の波長は中性大気を電離する波長域と重なることから、 $S_{10.7}$ および $M_{10.7}$ に対する応答遅れは熱圏/電離圏システム側に原因があると考えら

れる。 $F_{10.7}$ および R_i における余分な遅れ時間は 10.7 cm の電波あるいは白色光で観測した太陽活動度が IE-EUV の活動度と比べて異なった時間推移で成長/衰退を繰り返すことによると考えられる。実際、Donnelly 他[33] および Floyd 他[12] は黒点数および 10.7 cm 電波強度の短周期変動が UV/EUV に比べて早くピークに達することを幾つかの事象をあげて述べている。また、205 nm の UV 流束が太陽の自転に伴って 27 日の周期で変調される特性を相互相関解析した結果、 $F_{10.7}$ および黒点数は前自転周期の値と相関を持っていることも示されている[15]。この UV 流速と $F_{10.7}$ の相互相関の (zero time lag に対する) 非対称性は太陽面上でのプラージュの寿命が黒点の寿命に比べて長いことに起因している。

SOLAR2000 経験モデルはコロナの活動度の指標として $F_{10.7}$ 指数を、彩層の活動度の指標としてライマン α 線の強度を用いている。図 5 において $S_{10.7}$ に対応するモデル値である S_{env} の応答遅れ時間が $S_{10.7}$ よりも $F_{10.7}$ のそれに近いのは多分に $F_{10.7}$ の特性によるものと思われる。

4.2 短周期および長周期変動成分の組み合わせによる改善

Hedin[34] は $F_{10.7}$ と EUV の相関を表す直線の傾きが、短周期変動と長周期変動で異なることを見出した。さらに、Donnelly 他[17] は長周期変動の振幅と短周期変動の振幅の関係が波長によって異なることを指摘している。このようなことから、代理指標を用いて IE-EUV を推定するのに、短周期変動特性を延長して長周期変動に当て嵌めることは大きな誤差原因となる[19][35]。MSIS などの大気モデルで用いられている代理指標の短周期/長周期変動振幅特性の違いを補償するひとつの手法は、求めようとする日にちの指数に加えて太陽自転の 3 周期分について平均した値のふたつのパラメータを用いることである。Bowman 他[6] は彼らの熱圏温度モデルを開発する際に $F_{10.7}$ 、 $M_{10.7}$ 、 $S_{10.7}$ について 54、81、108 日の中央平均値 (対象とする日にちを中心とした期間) を比較した結果、81 日の中央平均が最も良く長周期変動成分を表していると結論した。

本稿で述べている ANN モデルでも基本的に短周期変動成分と長周期変動成分を入力空間に加え

ることで図6に示すような改善された結果が得られた。しかし、すでに述べたように、改善効果が得られる長周期変動成分を求めるための期間は表1に示したように指標によって異なる。 R_i と $F_{10.7}$ では81日平均が最も効果的であったのに対して、紫外線観測に基づく $M_{10.7}$ と $S_{10.7}$ では27日平均が効果的であった。また、これまでのモデルでは中央平均が良いとされてきたが、表から見る限り、後方平均と中央平均では有意な差は見られない。モデルをリアルタイムで利用する際に、観測値だけから求まる後方平均を用いるモデルの方が予測値の併用が必要な中央平均を用いるモデルより明らかに有利である。

太陽紫外線の変動は経度方向に分散しているアクティブ・ネットワークと局在しているプラージュによって特徴付けられる。短期変動は太陽の自転によるプラージュ由来のエネルギー流束の変調が主であり、これより長期的な変動にはプラージュとネットワークの両方の寄与がある[36]。Woods 他[19]はアクティブ・ネットワークからの変動成分への寄与は遷移領域からのものが彩層からのものより大きいと述べている。したがって、代理指標が太陽大気のどの領域の活動を代表するかによって長周期変動成分と短周期変動成分の比率が異なってくる。活動領域の発展に伴ってプラージュがアクティブ・ネットワークに衰退し経度方向に分散するのに1~3太陽自転周期かかり、アクティブ・ネットワークはさらに数太陽自転周期に亘って存在し続ける[19]。Donnelly 他[15]とLeanとRepoff[37]は黒点数、 $F_{10.7}$ 、UV強度のそれぞれの時間発展を解析し、UVに比べて黒点と $F_{10.7}$ のほうが27日変動より長い変動成分を強く持つことを見出した。本稿に示した結果は、代理指標とIE-EUVの間の短周期変動成分と長周期変動成分の違いを補償するとき、持続するアクティブ・ネットワークからのUV/EUVでは27日平均で十分であるのに対して、より変動の大きい黒点数および $F_{10.7}$ では81日間に亘って平均する必要があることを示している。図6で、 $E_{10.7}$ と $S_{10.7}$ では長周期変動成分を加えてもANN学習の改善が顕著でないことから、これらの指標については短周期と長周期変動成分の関係がIE-EUVのそれに近いと考えられる。

4.3 複数の異なる指標の組み合わせによる改善

地球大気の電離に関わるIE-EUVも彩層、遷移領域、およびコロナから放射されるが、それぞれの領域の短周期および長周期変動への寄与は互いに異なる。これはアクティブ・ネットワークとプラージュのコントラストが太陽大気の領域によって異なるためである[19]。したがって、IE-EUVの変動をより正確に表現するには異なった放射源(太陽大気層)を代表する複数の代理指標を組み合わせることが有効である。

彩層からの放射の変動はMg II cwrと極めて類似性が高く、Mg II cwrは彩層の活動度の良い指標とされる(例えば、文献[19])。SOHO_SEM₂₆₋₃₄への主な寄与は遷移領域のHe II輝線(30.4 nm)とコロナのFe XV輝線(28.4 nm)である。10.7 cm電波は主に遷移領域とコロナからとされる[18]。代理指標の表す領域の詳しい議論は本稿の範囲を越えるが、太陽大気の広い範囲の活動を捉えようとしたら、なるべく異なった振舞をする複数の指標を組み合わせることが肝要である。この意味で、 $F_{10.7}$ 、 $M_{10.7}$ 、 $S_{10.7}$ およびそれらの幾つかの長さの期間平均の組み合わせを用いることで最良のANN学習結果が得られたものと解釈される。

4.4 7日後方平均の役割

太陽放射の変化に対する地球超高層大気の応答遅れは良く知られた現象[6][28]–[32][38][39]であり、本稿の中でも図5に示されたように再確認された。この応答遅れは主に太陽の自転によって変調された27日周期の放射流束変動とそれに対する地球超高層大気中での蓄積効果との組み合わせで現れると考えられる。太陽自転周期より短く3日より長い期間の指標の平均値(実際には7日後方平均が用いられた)が入力空間に加えられたとするとANNは蓄積効果を学習するものと期待される。実際、図6において各指標で左から2番目の点は蓄積効果を表している可能性がある。このことをさらに詳しく調べるために、幾つかの短周期平均を用いてANN学習を行った。その結果を表3に示す。ここで指標の数字と記号は前出の図4のとおりであり、指標の組み合わせには全ての場合で $F_{10.7}$ 、 $S^*_{10.7}$ 、 $M_{10.7}$ が含まれる。表から分かるように、自転周期より短い短周期平均を併用しない場合(Run 5-2)学習達成度が低くなる。7

表3 短期変動パラメータの動き

Run	指標の期間パターン*					RMSE
	d	4p	7b	7c	27b	
3-2	✓		✓		✓	3.12
5-1	✓	✓			✓	3.12
5-2	✓				✓	3.19
5-3	✓			✓	✓	3.14
5-4	✓	✓		✓	✓	3.12

* $F_{10.7}$ 、 $S_{10.7}^*$ および $M_{10.7}$ について共通

日中央平均 (Run 5-3) でも十分でなく、4-7 日前の平均値 (Run 5-1) では 7 日後方平均値 (Run 3-2) と同じ結果が得られたことから、何らかの蓄積効果が学習されていると推測できる。

7 日後方平均の役割として考えられるもうひとつの効果として、太陽の周辺部での放射強度変化 (limb darkening/brightening) の学習の可能性があげられる。Donnelly 他 [17] は活動領域からの (地球方向への) 放射流束が活動領域の中央子午線からの距離 (CMD: central meridian distance) によって如何に変化するかを議論している。この CMD 特性は波長によって異なり、光学的に厚い放射は周辺部での減光が大きく、狭い CMD 特性を持っている [17][40][41]。もし用いる代理指標が光学的に厚い輝線に基づくものであったなら、活動領域が周辺部に近づくにつれて、IE-EUV は小さめに見積もられる。したがって、活動領域の CMD 情報が与えられれば ANN モデルは改善されると期待できる。表 3 にはこのような効果も含まれていると思われるが次の節で議論するような他の要因による誤差 (磁気嵐や下層大気による擾乱) が RMSE の下限を抑えているので、これら誤差要因が取り除かれれば CMD 特性の学習効果も鮮明になると期待できる。

5 ANN 予測と観測値の比較

図 2 に代表的な季節について TEC マップの例を示した。各季節ともに観測に基づく TEC マップ (下段) に対応させて ANN 出力の係数から再構成した TEC マップを上段に示した。季節、時刻 (LT)、緯度の特徴がよく再現 (学習) されていて、球函数近似の係数を学習させる手法が適切である

ことが分かる。

次に、日々変動を含めて比較するため図 7a に示したのは、最も良い学習結果の得られた入力パラメータ ($F_{10.7}$ 、 $S_{10.7}^*$ 、 $M_{10.7}$ 各々 3、7、27 日後方平均、合計 9 パラメータ) を用いたときの 30 太陽自転周期に亘る ANN 出力と実際の観測データである。比較に用いたデータは緯度 35°N、03 時 UT (12 時 LT) の ANN 出力結果と図 1 に *印で示した格子点の観測値である。図の上段は ANN (実線) および観測値 (○) とその差 (Δ TEC)、中段は用いた指標 (3 日移動平均のみ)、下段は地磁気擾乱を表す A_p 指数である。緩やかな季節変動と太陽の自転に伴う 27 日周期の変動が良く再現できていることが分かる。しかし、誤差が大きくなる場合が時折あり、それらの幾つかでは A_p 指数との比較から地磁気擾乱との関連が見られるが、また他ではその関連が明瞭でない。この期間で最も大きな地磁気擾乱は 2001 年 3 月 31 日に発生し、その前後 1 カ月の間に幾つかの地磁気擾乱と電離圏擾乱が連発している。このときの最も強い磁気嵐に伴って弱い正相電離圏嵐が、またその前後の地磁気擾乱に伴っていくつかの強い負相電離圏嵐が報告されている [42]。これらの電離圏嵐は Δ TEC のプロットに ANN 予測誤差として見ることができる。二つ目の大きな地磁気擾乱は 2001 年 11 月 6 日に起こり、このときは強い TEC の増加 (TEC storm) が発生している [43]。しかし、11 月 7 日から 24 日まで継続して見られる負の Δ TEC を地磁気擾乱に結び付けることは困難である。そのため、11 月 24 日の地磁気擾乱 (この期間で 3 番目に大きい擾乱) に対応する TEC の変動もはっきりしない。2002 年 1 月から 2 月の大きな正および負の Δ TEC は地磁気擾乱とは対応していない。

図 6b は次の 30 太陽自転周期について示したもので、太陽活動度は中程度まで落ちている。2003 年 10 月 29 ~ 31 日の「ハロウィーン嵐」と呼ばれた大地磁気擾乱に伴って負の Δ TEC が見られる。しかし、1 自転周期後の 11 月 20 日前後では負の Δ TEC が 10 日以上継続しているので、これを単純に地磁気擾乱と結び付けるのは難しい。2003 年 12 月末の大きな Δ TEC もまた地磁気擾乱とは結び付けられない。この期間で二つ目に大きい地磁気擾乱となった 2004 年 7 月 27 日では TEC 予測誤差がほとんど見られない。2004 年 11 月 8

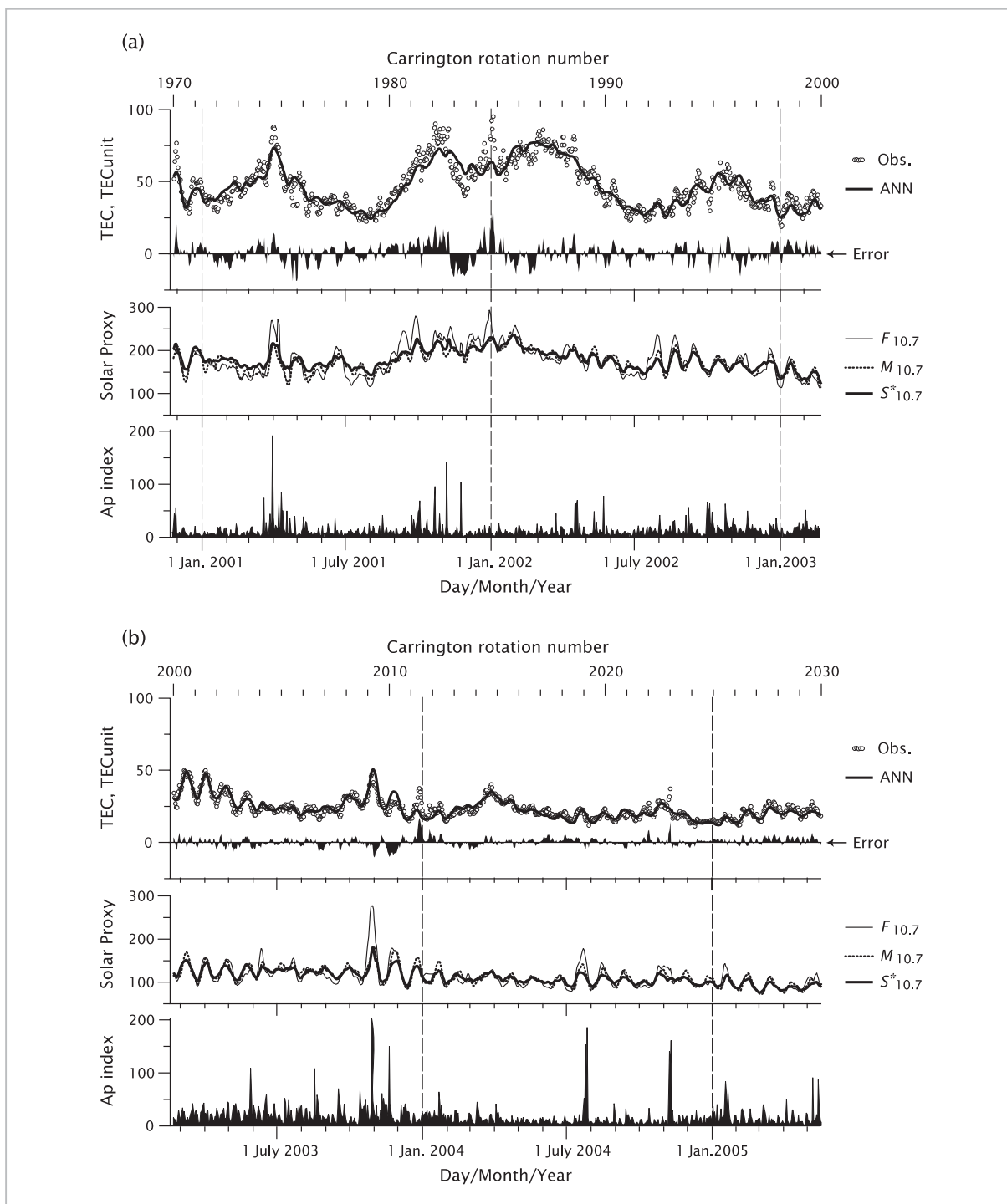


図7 観測値とニューラル・ネットワークの結果の日々変動比較

図(a)は太陽活動度の極大期、(b)は中間ないし極小期である。それぞれ、上段が観測(白丸)とニューラル・ネットワーク(実線)の全電子数およびそれらの差(黒の塗りつぶし)、中段はニューラル・ネットワークの入力に用いた指標(3日移動平均のみ図示)、下段は地磁気活動度指数。

日のパルス的な正の ΔTEC は地磁気擾乱によるもので、同日の日没後に SED (storm enhanced density) と呼ばれる極めて強い正の ΔTEC が日本上空で初めて確認された事象でもある [44]。

以上のように、地磁気擾乱によって ANN の TEC 予測誤差が増大する(電離圏嵐)ことはしばしば起こるが、それ以外の原因による誤差も必ずしも小さくない。図6をさらに調べると、誤差が

準周期的に変動している個所がある。ここで用いた代理指標が十分に IE-EUV を表していないことは必ずしも否定できないが、これら幾つかの周期的な誤差増加は下層大気からの影響を受けた結果と推測される [45][46]。このことは、逆に、代理指標 ANN モデルを用いて IE-EUV の効果を取り除いた Δ TEC の振る舞いを解析することにより電離圏 - 下層大気結合が解明できる可能性を示している。本モデルを標準モデル (reference model) と呼んだ所以である。下層大気の運動が駆動する TEC 変動が明らかになれば、その結果は TEC 予測モデルのさらなる改善にフィードバックできる。地磁気擾乱の効果を予測モデルに練り込むこととあわせて次の課題である。

6 まとめと展望

人工ニューラル・ネットワーク (ANN) の手法を用いて、太陽活動に依存する電離圏全電子数 (TEC) の予測モデルを開発した。太陽活動度代理指標として幾つかの指数を検討した結果、10.7 cm 太陽電波雑音指数 ($F_{10.7}$)、Mg II cwr ($M_{10.7}$)、SOHO 衛星による 26 - 34 nm EUV 観測の値 ($S_{10.7}$) を TEC 観測の前日、前 7 日 (7 日間遡った期間) 平均、同様に前 27 日に亘って平均して ANN の入力としたときに最も良い学習結果が得られた。太陽放射に関するこれまでの多くの研究成果から、入力に用いた各パラメータの持つ物理的な意味も議論した。このモデルでは太陽活動度指数として予測対象の日付より古いものを用いるから、リアルタイムでの TEC 予測 (宇宙天気予報) にすぐに応用できるものである。今回の版では、太陽活動度変動だけをモデル化したので、電離圏嵐を評価するための、あるいは下層大気との結合を調べるための標準 TEC モデル (reference model) と位置づけることも出来る。また、次のステップとして地磁気活動による電離圏嵐の効果および下層大気との結合による変動を取り込むことで、さらなる宇宙天気予報のツールと

しての予測モデルの改善を進める必要がある。

ANN を効率的に学習させるため、日本上空の TEC 分布を球函数展開の形で表現した。この表現方法には ANN の学習効率という点だけでなく、36 個のルジャンドル係数だけで任意の緯度/経度/時刻の TEC 予測値を伝えることができるから、測位衛星の電離圏遅延誤差の補正情報として予測結果を測位信号に重畳して放送するような応用も考えられる。

もうひとつの今後の課題として、新たな指数の開発が挙げられる。ANN を応用して TEC の予測が可能になったが、ANN は必ずしも一般的な手法ではなく、入力に太陽活動度指標だけでも 9 つのパラメータが必要であることは広い応用を妨げるものである。図 6 から、 $F_{10.7}$ 指数も幾つかの期間平均値を併用すれば、Mg II cwr の単独使用よりも IE-EUV の代理指標として優れていることが分かった。ANN では顕わでない函数形を探し出すことにより $F_{10.7}$ 値の時系列データから新たな補正指数を作り出すことが出来る筈である。 $F_{10.7}$ は UV/EUV 観測を元にした指数に比べて遥かに長い期間にわたってデータが得られており、ここから新しく補正指数が導出されれば地球超高層大気の長期変動解析などへ応用できるものと期待される。この補正指数のプロトタイプは既に完成していて、その改良と評価が今後の課題である。

謝辞

太陽黒点数は Solar Influences Data Analysis Center、WDC for the Sunspot Index、Royal Observatory of Belgium から提供されたものである。10.7 cm 太陽電波強度指数は Dominion Radio Astrophysical Observatory、Canada により観測され National Geophysical Data Center、NOAA、USA によって提供されたものである。 $M_{10.7}$ 、 $S_{10.7}$ 、 S_{ew} および $E_{10.7}$ の各指標は Solar Irradiance Platform (SIP) によるもので、SIP quick link <http://spacewx.com> からダウンロードした。

参考文献

- 1 R. S. Stolarski, P. B. Hays, and R. G. Roble, "Atmospheric heating by solar EUV radiation", J. Geophys. Res., Vol.80, pp.2266-2276, 1975.

- 2 P. G. Richards, J. A. Fennelly, and D. G. Torr, "EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations", *J. Geophys. Res.*, Vol.99, No.A5, pp.8981-8992, 1994.
- 3 A. E. Hedin, J. E. Salah, J. V. Evans, C. A. Reber, G. P. Newton, N. W. Spencer, D. C. Kayser, D. Alcaydé, P. Bauer, L. Cogger, and J. P. McClure, "A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data, MSIS 1. N₂ density and temperature", *J. Geophys. Res.*, Vol.82, pp.2139-2147, 1977.
- 4 J. M. Picone, A. E. Hedin, and D. P. Drob, "NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues", *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.A12, 1468, doi:10.1029/2002JA009430, 2002.
- 5 D. Bilitza, and B. W. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters", *Adv. Space Res.*, Vol.42, pp.599-609, 2008.
- 6 B. R. Bowman, W. K. Tobiska, F. A. Marcos, and C. Valladares, "The JB2006 empirical thermospheric density model", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.70, pp.774-793, 2008.
- 7 D. F. Heath, and B. M. Schlessinger, "The Mg 280-nm doublet as a monitor of changes in solar ultraviolet irradiance", *J. Geophys. Res.*, Vol.91, No.D8, pp.8672-8682, 1986.
- 8 J. Lean, M. VanHoosier, G. Brueckner, D. Prinz, L. Floyd, and K. Edlow, "SUSIM/UARS observations of the 120 to 300 nm flux variations during the maximum of the solar cycle: Inferences for the 11-year cycle", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.19, pp.2203-2206, 1992.
- 9 R. P. Cebula, M. T. DeLand, B. M. Schlessinger, "Estimates of solar variability using the solar backscatter ultraviolet (SBUV) 2 Mg II index from the NOAA 9 satellite", *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.D11, pp.11,613-11,620, 1992.
- 10 R. Viereck, L. Puga, D. McMullin, D. Judge, M. Weber, and W. K. Tobiska, "The Mg II index: A proxy for solar EUV", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp.1343-1346, 2001.
- 11 G. Thuillier, and S. Bruinsma, "The Mg II index for upper atmosphere modeling", *Ann. Geophys.*, Vol.19, pp.219-228, 2001.
- 12 L. Floyd, J. Newmark, J. Cook, L. Herring, and D. McMullin, "Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.67, pp.3-15, 2005.
- 13 J. T. Emmert, J. L. Lean, and J. M. Picone, "Comment on "Oscillations of global mean TEC" by K. Hocke", *J. Geophys. Res.*, Vol.114, A01309, doi:10.1029/2008JA013679, 2009.
- 14 J. L. Lean, O. R. White, W. C. Livingston, and J. M. Picone, "Variability of a composite chromospheric irradiance index during the 11-year activity cycle and over longer time periods", *J. Geophys. Res.*, Vol.106, No.A6, pp.10,645-10,658, 2001.
- 15 R. F. Donnelly, J. W. Harvey, D. F. Heath, and T. P. Repoff, "Temporal characteristics of the solar UV flux and He I line at 1083 nm", *J. Geophys. Res.*, Vol.90, No.A7, pp.6267-6273, 1985.
- 16 W. K. Tobiska, S. D. Bouwer, and B. R. Bowman, "The development of new solar indices for use in thermospheric density modeling", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.70, pp.803-819, 2008.
- 17 R. F. Donnelly, H. E. Hinteregger, and D. F. Heath, "Temporal variations of solar EUV, UV, and 10,830-Å radiations", *J. Geophys. Res.*, Vol.91, No.A5, pp.5567-5578, 1986.
- 18 J. Lean, "Solar ultraviolet irradiance variations: A review", *J. Geophys. Res.*, Vol.92, No.D1, pp.839-868, 1987.
- 19 T. N. Woods, W. K. Tobiska, G. J. Rottman, and J. R. Worden, "Improved solar Lyman α irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations", *J. Geophys. Res.*, Vol.105, No.A12, pp.27,195-27,215, 2000.

- 20 W. K. Tobiska, T. Woods, F. Eparvier, R. Viereck, L. Floyd, D. Bouwer, G. Rottman, and O. R. White, "The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.62, pp.1233-1250, 2000.
- 21 S. Haykin, "Neural networks – A comprehensive foundation", Macmillan College Publishing Company, Inc., 1994.
- 22 G. Ma, and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", *Ann. Geophys.*, Vol.21, pp.2083-2093, 2003.
- 23 D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors", *Nature*, Vol.323, No.9, pp.533-536, 1986.
- 24 L. -A. McKinnell, and A. W. V. Poole, "Predicting the ionospheric F layer using neural networks", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, A08308, doi:10.1029/2004JA010445, 2004.
- 25 E. O. Oyeyemi, A. W. V. Poole, and McKinnell, L. A., "On the global model for f_oF_2 using neural networks", *Radio Sci.*, Vol.40, RS6011, doi:10.1029/2004RS003223, 2005.
- 26 M. Nakamura, T. Maruyama, and Y. Shidama, "Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan", *Earth Planets Space*, Vol.59, pp.1231-1239, 2007.
- 27 J. -G. Wu, and H. Lundstedt, "Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks", *J. Geophys. Res.*, Vol.102, No.A7, pp.14,255-14,268, 1997.
- 28 L. G. Jacchia, J. W. Slowey, and I. G. Campbell, "An analysis of the solar-activity effects in the upper atmosphere", *Planet. Space Sci.*, Vol.21, pp.1835-1842, 1973.
- 29 G. Paul, H. Volland, and M. Roemer, "A study of the time lag between the 27-day variations of thermospheric density and 10.7 cm solar radiation", *Space Res.*, Vol.14, pp.189-193, 1974.
- 30 N. Jakowski, S. Heise, A. Wehrenpfennig, S. Schlüer, and R. Reimer, "GPS/GLONASS-based TEC measurements as a contributor for space weather forecast", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.64, pp.729-735, 2002.
- 31 E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, A. V. Oinats, Yu. V. Yasukevich, and I. V. Zhivetiev, "Global electron content: a new conception to track solar activity", *Ann. Geophys.*, Vol.26, pp.335-344, 2008.
- 32 K. Min, J. Park, H. Kim, V. Kim, H. Kil, J. Lee, S. Rentz, H. Lühr, and L. Paxton, "The 27-day modulation of the low-latitude ionosphere during a solar maximum", *J. Geophys. Res.*, Vol.114, A04317, doi:10.1029/2008JA013881, 2009.
- 33 R. F. Donnelly, D. F. Heath, J. L. Lean, and G. J. Rottman, "Differences in the temporal variations of solar UV flux, 10.7-cm solar radio flux, sunspot number, and Ca-K plage data caused by solar rotation and active region evolution", *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.A12, pp.9883-9888, 1983.
- 34 A. E. Hedin, "Correlations between thermospheric density and temperature, solar EUV flux, and 10.7-cm flux variations", *J. Geophys. Res.*, Vol.89, No.A11, pp.9828-9834, 1984.
- 35 T. N. Woods, "Recent advances in observations and modeling of the solar ultraviolet and X-ray spectral irradiance", *Adv. Space Res.*, Vol.42, pp.895-902, 2008.
- 36 J. L. Lean, and A. Skumanich, "Variability of the Lyman alpha flux with solar activity", *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.A7, pp.5751-5759, 1983.
- 37 J. L. Lean, and T. P. Repoff, "A statistical analysis of solar flux variations over time scales of solar rotation: 1978–1982", *J. Geophys. Res.*, Vol.92, No.D5, pp.5555-5563, 1987.

- 38 N. Jakowski, B. Fichtelmann, and A. Jungstand, "Solar activity control of ionospheric and thermospheric processes", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.53, pp.1125-1130, 1991.
- 39 F. J. Rich, P. J. Sultan, and W. J. Burke, "The 27-day variations of plasma densities and temperatures in the topside ionosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol.108, No.A7, 1297, doi:10.1029/2002JA009731, 2003.
- 40 P. C. Crane, L. E. Floyd, J. W. Cook, L. C. Herring, E. H. Avrett, and D. K. Prinz, "The center-to-limb behavior of solar active regions at ultraviolet wavelengths", *Astronomy Astrophys.*, Vol.419, pp.735-746, doi:10.1051/0004-6361:20040012, 2004.
- 41 T. N. Woods, F. G. Eparvier, S. M. Bailey, P. C. Chamberlin, J. Lean, G. J. Rottman, S. C. Solomon, W. K. Tobiska, and D. L. Woodraska, "Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, A01312, doi:10.1029/2004JA010765, 2005.
- 42 T. Maruyama, and M. Nakamura, "Conditions for intense ionospheric storms expanding to lower midlatitudes", *J. Geophys. Res.*, Vol.112, A05310, doi:10.1029/2006JA012226, 2007.
- 43 T. Maruyama, G. Ma, and M. Nakamura, "Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, A10302, doi:10.1029/2004JA010451, 2004.
- 44 T. Maruyama, "Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 November 2004 and its connection with storm enhanced density", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, L20111, doi:10.1029/2006GL027367, 2006.
- 45 J. Laštovička, "Forcing of the ionosphere by waves from below", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.68, pp.479-497, 2006.
- 46 C. Borries, N. Jakowski, Ch. Jacobi, P. Hoffmann, and A. Pogoreltsev, "Spectral analysis of planetary waves seen in ionospheric total electron content (TEC): First results using GPS differential TEC and stratospheric reanalyses", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.69, pp.2442-2451, 2007.

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