

IUGONET データ解析システムを用いた地球大気環境の長期変動に関する研究

-地磁気日変化振幅に見られる電離圏・熱圏の長期変動-*

新堀 淳樹**

A study on the long-term variation of the earth's atmospheric environment using the IUGONET data analysis system

-Long-term variation in the ionosphere and thermosphere as seen in the amplitude of geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation-*

Atsuki Shinbori**

概要

地球大気圏の中でも高度 100 km 以上の領域は、超高層大気と呼ばれ、そこで観測される様々な大気擾乱現象は、太陽活動と下層大気を起源とする大気波動による両者の影響を受けながら、複雑な物理過程を経て発生する。そのため、超高層大気の長期変動を解明するためには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データを組み合わせた総合解析を行うことが必要不可欠である。このような分野横断型研究を促進する研究基盤を構築するために、2009年5月から大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」が開始された。本プロジェクトでは、様々な地上観測データからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、種々の地上観測データを相互参照できるようにした。また、異種の観測データを可視化、相関解析を行う解析ソフトウェアを開発した。本研究では、IUGONET データ解析システムを活用して、長期の太陽活動度と地磁気の日変化振幅のデータ解析を行うことで、地磁気日変化振幅に見られる超高層大気の長期変動特性を調べた。その結果、全ての観測点での地磁気日変化振幅は、顕著な11年太陽活動周期性を示すとともに、太陽活動23/24サイクル極小期において約60年間の中で地磁気日変化振幅が最も小さくなっていた。一方、太陽活動成分を除去した地磁気日変化振幅は、約75%の観測点にて負のトレンドを示し、その傾向がヨーロッパ、北米東部などで強いことがわかった。本総説では、IUGONET プロダクトの概要と地磁気日変化振幅の長期変動特性について解説する。

1. はじめに

地球大気圏は、一般に温度構造によって下層から対流圏、成層圏、中間圏、及び熱圏に区分され、

* 2015年7月21日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。 E-mail: shinbori@rish.kyoto-u.ac.jp

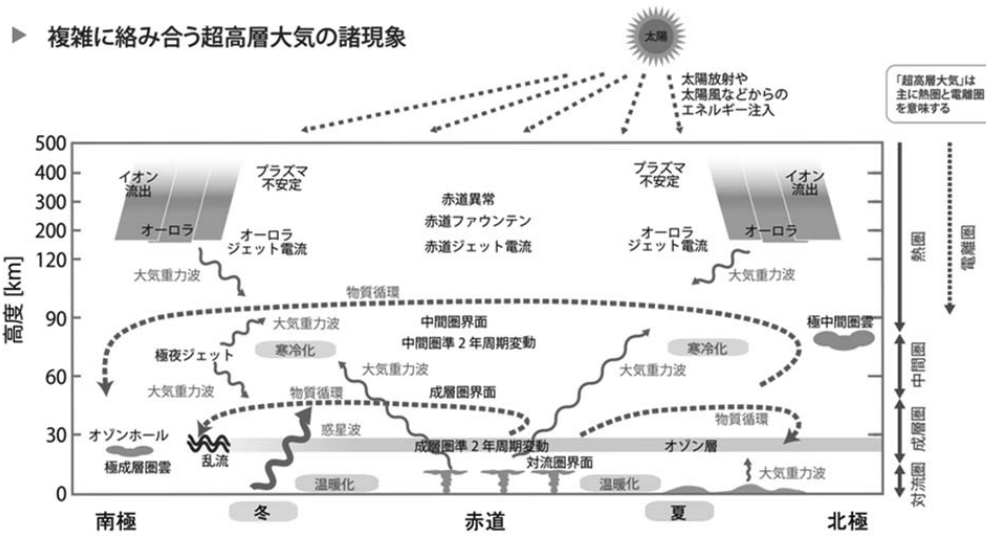


図 1： 高度 500km にまでの地球大気中で観測される諸現象と各大気層の位置関係。横軸は緯度、縦軸は高度を示す。

太陽紫外線などによって中間圏・熱圏の一部の大気が電離し、電離圏を構成している。とりわけ、高度 100km 以上の大気圏を超高層大気と呼ばれている。図 1 に示すように高度 500km までの地球大気中で観測される電離圏擾乱、オーロラ、夜間大気光、夜光雲、成層圏突然昇温といった様々な地球大気の諸現象は、太陽から地球に向かって絶えず降り注ぐ太陽放射や太陽風のエネルギーを駆動源としている。

地球が受け取る太陽放射エネルギーは、極域で最小、赤道域で最大となるため、約 20km 以下の赤道大気では、その太陽放射エネルギー源とする活発な積雲対流現象が発生している。この大気擾乱を起源とする大気重力波は、上層大気へ運動量を輸送し、力学的摩擦効果によって中層大気(10-100 km)における大気大循環に重要な役割を果たしていることがこれまでの研究から明らかにされている¹⁾。一方、太陽風-磁気圏相互作用によって生み出された電磁エネルギーや荷電粒子の降下が極域の超高層大気に集中する。このように地球大気に入射する太陽エネルギーは、地球をとりまく空間(大気圏・電離圏・磁気圏)の中をその形態を変えながら伝搬し、多様な物理現象を引き起こす。また、地球大気は、異なる大気層間の結合が強いグローバルな複合系をなしており、そこで生じる変動現象の物理過程を解き明かすためにはこれらの大気層の間の物質輸送や運動量輸送などの相互作用の実体を調査する必要がある。したがって、太陽活動や地球温暖化などに伴う超高層大気の長期変動とその物理機構を理解するためには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データ(電離・中性大気、大気組成、オーロラ、地磁気、太陽風、太陽紫外線等)を組み合わせた分野間にまたがる総合解析を行うことが必要不可欠である。

しかしながら、このような分野をまたがるデータの総合解析を行う上で必要な観測データベースが観測を実施した各研究機関で独自に管理され分散していたため、専門分野外の観測データの検索・取得・解析に多大な労力が必要であった。また、観測データの多くは特定の機関や分野での利用に留まり、一部は未公開まま有効に活用されないケースもあった。そのため、多様な観測データを必要とする学際的研究が困難であり、研究遂行上の障壁となっていた。

そこで、2009 年度から開始された大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」²⁾では、上記の問題を解決するために、図 2 に示すように観測デー

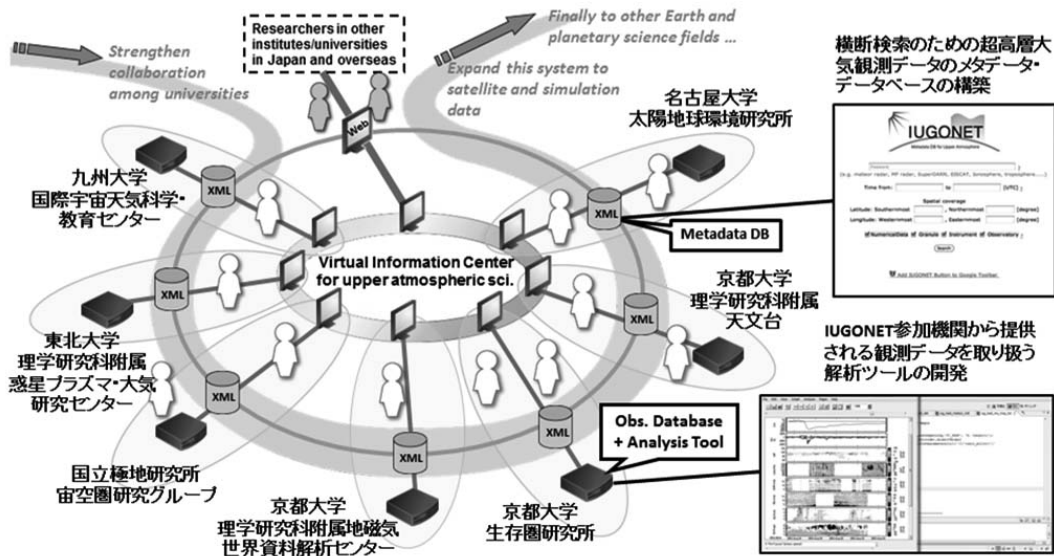


図2： IUGONET プロジェクトの概念図。IUGONETでは、横断検索のための超高層大気観測データのメタデータデータベースを構築し、それをインターネット上に共有することで各観測データの相互参照を可能にしている。

タからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、各機関が国際地球観測年（1957-1958年）以来蓄積してきた種々の地上観測データを相互参照できるようにした。さらに、それらを含めた観測データを一元的に取り扱うことが可能な解析ソフトウェアを開発し、容易に多種多様の観測データの描画や相関解析ができるようになった。

2. IUGONET データ解析システムの概要

本章では、IUGONET プロジェクトで開発されたメタデータ・データベースとデータ解析ソフトウェアの概要について説明する。

2.1 横断検索のためのメタデータ・データベースとその利用法

前述のように IUGONET では、観測データからメタデータを抽出してデータベース化し、インターネット上で共有するシステム（=IUGONET メタデータ・データベース）を構築している³⁾。IUGONET メタデータは、観測データそのもの（実データ）ではなく、そのデータに付帯した情報を記述した、いわばデータのカatalogに相当する。太陽地球大気観測データのメタデータに含まれる項目としては、観測日時、観測地点、装置の種類、観測データの所在などが挙げられる。各機関が所有する個々の観測データからメタデータを抽出し、データベース化するためには、共通のフォーマットを策定する必要がある。そこで IUGONET では、欧米の太陽地球系物理学の研究者らによる国際コンソーシアムである SPASE (Space Physics Archive Search and Extract)によって作成されたデータモデルに超高層大気や太陽の地上観測データの特徴に沿うように修正を加え、これを IUGONET メタデータ基本フォーマットとした。また、IUGONET メタデータは、1つのデータセットを記述するメタデータの他に、観測装置、観測サイト、人的リソース、実データのデータベースなどの情報のカテゴリー毎に独立している。これらのカテゴリー分けされたメタデータは個別の XML ファイルとして記述され、相互参照できる

構造を持っている。一方、個々のデータファイルに付随したメタデータ (Granule) も定義されており、データファイル毎のメタデータをアーカイブすることで、データファイル単位の検索も可能である。IUGONET メタデータを介して各機関が所有する観測データにたどり着くためにはまず、



図 3 : IUGONET メタデータ検索ページのトップ画面。検索に必要な入力事項や活用方法などの説明が吹き出しの中に書かれている。

IUGONET メタデータ検索ページ(<http://search.iugonet.org/iugonet/>)にアクセスする。アクセスに成功すれば、図 3 のような検索ページがブラウザの画面に現れる。ここにアクセスするにあたり、特に、ユーザー登録などは不要で、誰でも自由にアクセスし、メタデータ検索を行うことができる。検索したいメタデータに合わせて、キーワード、日時、地球や太陽面上の緯度・経度、データタイプなどの条件を入力し、検索(Search)ボタンをクリックする。すると、入力した条件を満たすメタデータのリストが現れるので、該当するメタデータに記載された実データの所在地 (URL など) から観測データに容易にアクセスすることができる。このメタデータ検索システムを利用する利点として、IUGONET 参加機関と協力機関が所有する観測データに関するメタデータを、1 度の問い合わせで横断的に検索できる点である。

2.2 データ解析ソフトウェア – UDAS

IUGONET Data Analysis Software (UDAS)は、Interactive Data Language (IDL)で書かれた太陽地球環境データ解析ソフトウェア (Space Physics Environment Data Analysis Software : SPEDAS)のプラグインソフトウェアで、IUGONET参加機関が提供する様々な地上観測データのロード関数、および高度なスペクトル解析ツールや統計検証パッケージから構成されている。これにより、IUGONET地上観測データの表示や解析を行うことができる。実際の操作では、コマンドラインだけでなく、Graphical User Interface (GUI)ツールも利用することができ、未経験者にとっても直感的に操作しやすい仕様になって

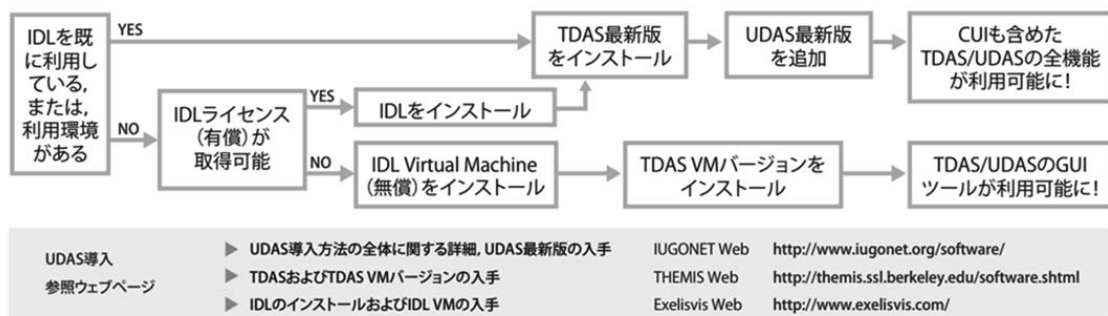


図 4 : UDAS を各個人のパソコンにインストールするまでの手順。インストールすべき各ソフトウェアの入手先 URL が記載されている。

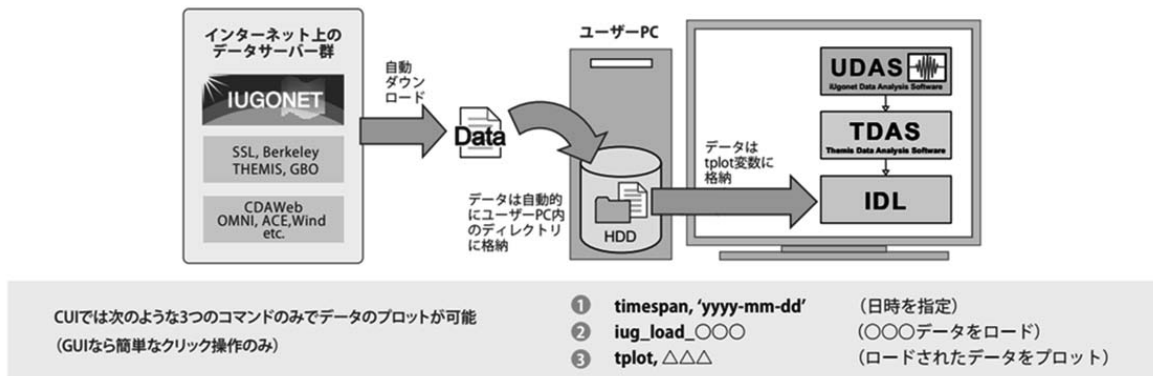


図 5： UDAS を用いた観測データのロードのイメージ。

いる。以下の手順に従って UDAS を各個人の PC へ導入することができる(図 4)。現在、SPEDAS VM バージョンが <http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml> から入手可能となっており、IDL VM をインストールしなくても動作する仕様となっている。

UDASの最大の特徴は、ユーザーがデータの所在地やデータファイルのフォーマットを気にすることなくデータの自動的にダウンロード、表示や解析することができる点である。図5には、UDASを用いた観測データのロードのイメージ図を示している。この図が示すようにユーザーは、たった3つのコマンドを打つことにより、データをダウンロードし、時系列プロットに表示することができる。これにより、SPEDASでロードできる衛星データも含めた異種データの並列プロットを容易に作成でき、各データ間の相関を一目でみることができる。現在、IUGONETのホームページから公開されている UDAS v3.00.3 (TDAS v8.00対応版) で提供しているUDASロード関数は25種目に及んでいる。詳しくは、IUGONETホームページ(<http://www.iugonet.org/software.html>)、及び学術論文⁴⁾を参照されたい。

3. 地磁気静穏日変化に見られる超高層大気の長期変動特性

3.1 地磁気静穏日変化に関連した過去の研究と本研究の目的

地磁気日変化(Geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation)は、中性大気と電離大気との相互作用を通じた電離圏ダイナモ作用を基に生じた電場が作る電離圏電流によって引き起こされる。このSq電流は、



図 6： 地磁気日変化のグローバルな電離圏電流⁹⁾。電流の流れる方向を矢印で示している。

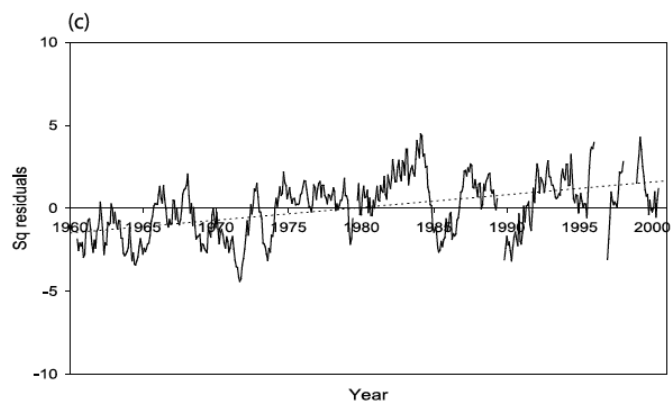


図 7： 太陽活動成分を除去した Hermanus における地磁気日変化振幅の長期変動¹¹⁾。図中の点線は、線形フィッティング線を表している。

高度90-140 kmの電離圏E領域を流れており、図6に示すように、北半球では反時計まわり方向に、南半球では時計まわりの方向に流れている。そのため、Sq電流による水平南北成分の磁場変化は、赤道と低緯度では正の変化、中緯度では負の変化となる。Sq磁場振幅を決める要素は、オームの法則から電離圏電気伝導度、ダイナモ電場、太陽潮汐波による風速変化、並びに電離圏電子密度である。したがって、Sq磁場振幅の長期変化を調べることによって、高度90-140 kmにおける超高層大気の長期変動のシグナル(太陽活動、地球温暖化)を捉えることができる。

これまで、Sq磁場振幅の長期変動は、地球の主磁場の永年変化による赤道ジェット電流の移動や太陽活動に関連していることが明らかにされてきた^{6,7,8,9,10,11,12}。Sellekは、赤道、および低緯度の地磁気観測点(Huancayo, Hermanus, San Juan)で観測されたSq磁場振幅に顕著なトレンドがあることを見出し、それが地球主磁場の永年変化によって引き起こされることを理論計算によってはじめて確かめた⁶。Schlappらは、Sellekよりも8点多い11の地磁気観測点から得られた地磁気データを解析し、地球主磁場の永年変化によってSq磁場振幅の長期変化がもたらされていることを示した⁷。近年になって、Eliasらは、低緯度に分布する3つの地磁気観測点(Apia, Fredericksburg, Hermanus)から得られた約40年にわたる長期の地磁気データを解析し、図7に示すように太陽活動を除去したSq磁場振幅には正のトレンドが存在することを見出した。さらに、彼女らは、電離圏電気伝導度モデル値との比較から、そのSq磁場振幅のトレンドの約90%が地球主磁場の永年変化によるものであり、残りの10%が地球温暖化による電離圏E領域における電子密度の増加によるものであることを示した。

Cnossenらは、磁気圏-電離圏-熱圏結合モデル(CMIT)を用いて定量的にグローバルなSq磁場振幅変化に対する地球主磁場の役割について最初に解析を行った¹²。その結果、地球磁場強度の増加に対してSq磁場振幅が減少する傾向を示し、これまで理論的に説明されていた事実と矛盾のない結果を得ている。さらに、De Haro Barbasらは、このCMITモデルから算出された1958年と2008年におけるグローバルなSq磁場振幅の差分を計算し、50年間にわたるSq磁場振幅の変化分のグローバルな分布を示した¹³。この研究結果によれば、図8に示すように最も振幅の変動の大きな領域は、南米からアフリカにかけての赤道に沿って分布し、南米東部から大西洋においてその変動が顕著である。その最大変動量は、赤道の北側で25nT、南側で-25nTであった。また、北磁極に近い北米から北大西洋にかけての領域においてもSq磁場振幅の変動が比較的大きくなっており、磁極周辺でその変動幅が20nTに達している。

しかしながら、これまでのSqに関する地磁気データの長期解析研究にはいくつかの問題点がある。第1点目は、Sq磁場振幅に含まれている太陽活動成分を取り除く際に、太陽活動度指数とSq磁場振幅の関係について線形性が仮定されており、非線形効果が含まれているとすれば、これは長期トレンド解析の誤差の原因となる。また、太陽活動指数に太陽黒点数が用いられており、その指数は、Sqの振幅変化をもたらす電離圏形成過程との物理的関係が全くない。第2点目は、Sqの長期変動の原因について電離圏電気伝導度の変化に重点が置かれており、電離圏電流の源となる起電力($U \times B$)の寄与について議論がなされていない。第3点目は、解析に用いている地磁気観測点が3-11点と少なく、赤道域から両半球にまたがる中緯度領域にかけての観測事実に基づいた、Sq磁場振幅の長期変動の全球的な描像は明らかとなっていない。これらの問題点を解決するために、本研究では、IUGONETプロジェクトによってアーカイブされた全球にわたる長期の地磁気データ、中間圏・下部熱圏における風速データ、及び太陽活動度指数を用いて、Sq

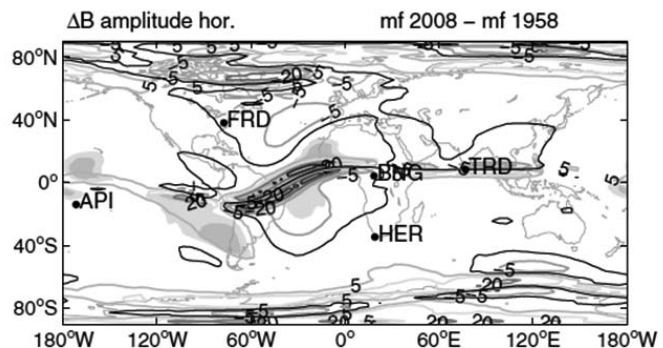


図8 : CMITモデルから算出された1958年と2008年におけるSq振幅の差分についての全球分布¹²。

の磁場振幅の長期変動特性を明らかにする。また、このSq磁場振幅の長期変動から電離圏・熱圏高度領域における超高層大気の長期変動のシグナルを捉え、その物理機構を解明する。

3.2 観測データと解析手法

本研究では、京大地磁気センターが整備している1890年から現在に至る長期の地磁気1時間値を使用した。使用可能な地磁気観測点は、各年代によって異なるが、1950年以降では概ね200点程度存在する。また、地磁気静穏日を選定するために、地磁気指数としてKp指数を用いた。Kp指数は京大地磁気センターから提供されたものを使用した。また、太陽活動とSq磁場振幅との関連性を調べるために、NGDC/NOAAから提供されたF10.7指数(1947年-2014年)を使用した。

一方、解析手法として地磁気静穏日を、各1日を通じてKp指数の最大値が4未満である日として定義し、その日の地磁気水平成分の最大と最小値の差をSqの振幅とした。また、太陽活動に依存する成分を除去したSq磁場振幅の長期的な変動成分を調べるために、Kp指数の閾値から同定された地磁気静穏日に該当するF10.7指数の1ヶ月平均値とSq磁場振幅の相関関係から線形、および2次回帰曲線を決定した。この2次回帰曲線からのずれ(残差)をresidual Sq (res-Sq)と定義して、その長期トレンドを解析した。

3.3 Sq磁場振幅の長期変動特性

図9は、低緯度に分布する4つの地磁気観測点から得られたSq磁場振幅と太陽活動度指数F10.7の1ヶ月平均値の時系列プロットである。縦の点線は、各太陽活動サイクルにおいてF10.7の最小値から決定した太陽活動極小時期を表す。この図から見て取れるように、全ての観測点におけるSq磁場振幅は、F10.7指数が示すように太陽活動極大期に増加し、極小期に減少するという約11年の太陽活動周期性を示している。特に、太陽活動サイクル23/24の極小期において、このデータ解析期間(約60年)の中でSq磁場振幅が最も小さくなっている。これは、Sq磁場振幅を決める要素の一つである電離圏電子密度がこの時期に最も小さくなったことを意味している。近年の太陽紫外線の衛星観測によれば、この太陽活動極小期(2008-2009)における太陽紫外線強度が前の極小期に比べて約15-20%も減少していることが示されている¹³⁾。したがって、超高層大気の電離に関係する太陽紫外線強度が極端に減少したことによって、通常よりもSq電流が流れる電離圏E領域の電子密度が減少したことが、Sq磁場振幅の減少をもたらしたと考えることができる。

さらに、太陽活動成分を除去したres-Sq磁場振幅の長期トレンド解析を行った結果、赤道域から中緯度に分布する69地磁気観測点のうち40点が顕著な長期トレンドを示した。その中でも、負のトレンドを示した観測点は、約75%占めていた。特に、カナダ北東部、ヨーロッパ、インド、及びニュージーランドにおいてres-Sq磁場振幅の減少量が大きく、地域性が存在することがわかった。また、全球的に見ると、res-Sq磁場振幅のトレンドは必ずしも正の

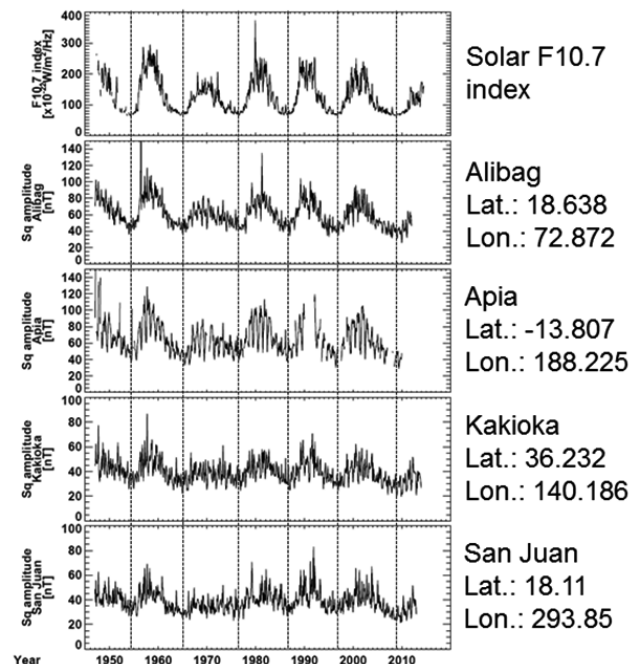


図 9： 低緯度に分布する 4 つの地磁気観測点から得られた Sq 磁場振幅と太陽活動度指数 F10.7 の 1 ヶ月平均値の時系列プロット。縦の点線は、各太陽活動サイクルにおいて F10.7 の最小値から決定した太陽活動極小時期を示す。

トレンドを示すとは限らず、本研究では、先行研究によって得られた結果は、全ての観測点に当てはまらないことを示した。

3.4 今後の方針

これまでの解析では、太陽活動成分を取り除いたres-Sq磁場振幅の長期トレンドの全球分布には各観測点の位置によって異なるという地域性が見出された。今後は、この要因を定量的に明らかにするため、IUGONETプロジェクトの活動の一環として開発された電離圏電気伝導度モデル計算ツール¹⁴⁾を用いて、電離圏電気伝導度の変化による成分を分離し、電離圏ダイナモ電場の長期変動特性を調べていく予定である。さらに、中間圏・下部熱圏風変動との関連性についても調査する予定である。

4. まとめ

超高層大気において観測される様々な大気擾乱現象は、太陽活動と下層大気を起源とする大気波動による両者の影響を受けながら、複雑な物理過程を経て発生する。そのため、超高層大気の長期変動を解明するには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データを組み合わせた総合解析を行うことが必要不可欠である。このような分野横断型研究を促進する研究基盤を構築するために、2009年5月から大学間連携プロジェクト「IUGONET」が開始された。本プロジェクトでは、様々な地上観測データからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、種々の地上観測データを相互参照できるようにした。また、異種の観測データを可視化、相関解析を行う解析ソフトウェアを開発した。本研究では、IUGONETデータ解析システムを活用することによって、長期の太陽活動度と地磁気のデータ解析を行い、Sq磁場振幅に見られる超高層大気の長期変動特性を調べた。その結果、全ての観測点におけるSq磁場振幅は、顕著な11年太陽活動周期性を示すとともに、太陽活動23/24サイクル極小期において約60年間の中でSq磁場振幅が最小であった。一方、太陽活動成分を除去したSq磁場振幅は、約75%の観測点において負のトレンドを示し、その傾向がヨーロッパ、北米東部などで強いことがわかった。

参考文献

- 1) Fritts, D. C., and M. J. Alexander, Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, **41**, doi:10.1029/2001RG000106, 2003.
- 2) Hayashi, H., Y. Koyama, T. Hori, Y. Tanaka, S. Abe, A. Shinbori, M. Kagitani, T. Kouno, D. Yoshida, S. UeNo, N. Kaneda, M. Yoneda, N. Umemura, H. Tadokoro, T. Motoba, and IUGONET project team, Inter-university Upper Atmosphere Global Observation NETwork (IUGONET), *Data Sci. J.*, **12**, WDS179—WDS184, 2013.
- 3) Abe, S., N. Umemura, Y. Koyama, Y. Tanaka, M. Yagi, A. Yatagai, A. Shinbori, S. UeNo, Y. Sato, and N. Kaneda, Progress of the IUGONET system - metadata database for upper atmosphere ground-based observation data, *Earth, Planets and Space*, **66**, doi:10.1186/1880-5981-66-133, 2014.
- 4) Tanaka, Y., A. Shinbori, T. Hori, Y. Koyama, S. Abe, N. Umemura, Y. Sato, M. Yagi, S. Ueno, A. Yatagai, Y. Ogawa, and Y. Miyoshi, Analysis software for upper atmospheric data developed by the IUGONET project and its application to polar science, *Adv. Polar Sci.*, **24**, 231-240, doi:10.3724/SP.J.1085.2013.00231, 2013.
- 5) Richmond, A. D., and J. P. Thayer, Ionospheric electro-dynamics: A Tutorial, in *Magnetospheric Current Systems*, S.-I. Ohtani et al., Eds. AGU, Washington, DC, 131-155, 2000.
- 6) Sellek, R., Secular trends in daily geomagnetic variations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **42**, 689–695, 1980.
- 7) Schlapp, D. M., R. Sellek, and E. C. Butcher, Studies of worldwide secular trends in the solar daily geomagnetic variation, *Geophys. J. Int.*, **100**, 469–475, 1990.
- 8) Macmillan, S., and A. Droujinina, Long-term trends in geomagnetic daily variation, *Earth Planets Space*, **59**, 391–395, 2007.

- 9) Torta, J. M., L. R. Gaya-Pique, J. J. Curto, and D. Altadill, An inspection of the long-term behaviour of the range of the daily geomagnetic field variation from comprehensive modelling, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **71**, 1497–1510, 2009.
- 10) Elias, A. G., M. Zossi de Artigas, and B. F. de Haro Barbas, Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gases, *J. Geophys. Res.*, **115**, A08316, doi:10.1029/2009JA015136, 2010.
- 11) Cnossen, I., A. D. Richmond, and M. Wiltberger, The dependence of the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system on the Earth's magnetic dipole moment, *J. Geophys. Res.*, **117**, A05302, doi:10.1029/2012JA017555, 2012.
- 12) De Haro Barbas, B. F., A. G. Elias, I. Cnossen, and M. Z. de Artigas, Long-term changes in solar quiet (Sq) geomagnetic variations related to Earth's magnetic field secular variation, *J. Geophys. Res.*, **118**, 3712–3718, doi:10.1002/jgra.50352, 2013.
- 13) Solomon, S. C., T. N. Woods, L. V. Didkovsky, J. T. Emmert, and L. Qian, Anomalously low solar extreme - ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L16103, doi:10.1029/2010GL044468, 2010.