

2-3 全球大気圏 - 電離圏シミュレーション

2-3 Whole Atmosphere-ionosphere Coupled Simulation

陣 英克 埜 千尋

JIN Hidekatsu and TAO Chihiro

地球大気と宇宙空間の境界領域である熱圏と電離圏では、下層大気や太陽面、磁気圏で起きる現象の影響を受けて、大気状態に変動や乱れが生じる。その変動や乱れは、通信や測位等に利用する電波の伝搬状況や、低軌道の人工衛星やスペースデブリの軌道などを変え得るため、宇宙空間を利用する社会活動に影響を及ぼす。我々は、熱圏及び電離圏の状態について現況を把握し、定量的に予測を行うことを目的として、全大気圏及び電離圏の全球領域を対象とする物理モデル GAIA を開発している。本稿では GAIA の概要について紹介し、その実用化の一環として、リアルタイム・予測シミュレーションやウェブを通じた情報提供について紹介する。

Thermosphere and ionosphere are the boundary regions between the Earth's atmosphere and geospace, where the atmospheric state varies and is sometimes disturbed due to the influences from various phenomena in the lower atmosphere, on the solar surface and/or in the magnetosphere. The variations and disturbances in the ionosphere and thermosphere can affect human social activities by changing the radio propagation condition and the air drag against low earth orbiting satellites and space debris. We have developed a global physics-based model of whole atmosphere and ionosphere, called GAIA, for the purpose of nowcasting and forecasting global condition of thermosphere and ionosphere. In this paper, an overview of GAIA is introduced as well as its applications including the real-time and forecast simulation and the data service.

1 まえがき

地球の大気圏は下から対流圏、成層圏、中間圏、熱圏に分けられる。熱圏は高度約 90 km 以上の領域で、非常に希薄なため、大気成分の混合度合いや熱の伝わり方など物理的な性質が下の大気とは変わってくる。熱圏の原子・分子の一部は太陽からの紫外線によって電離し、イオンと電子に分かれた状態になる。この電離した大気が電離圏である。熱圏・電離圏は地球大気と宇宙空間の境界領域であり、下の大気からは大気波動が伝搬して到来し、上からは太陽紫外線や X 線、さらに高緯度地域では地球磁力線に沿って磁気圏の粒子や電流が流入する。この下層大気や太陽、磁気圏からのエネルギー流入によって熱圏・電離圏領域の密度や温度などの状態に変動や乱れが生じる (図 1)。そして、熱圏と電離圏の間では、電離や化学反応、粒子同士の衝突を通じて互いの変動が影響し合っている。

熱圏と電離圏は我々の生活圏から遠く離れた上空にあるものの、そこで起きる大気の変動や乱れは地上の生活に影響を及ぼし得る。電離圏の変動は幅広い周波

数域の電波の伝搬に影響を及ぼす。電離圏での反射を利用する短波通信は、船舶・航空通信や放送などの用途に利用されており、電離圏の状態によって回線の品質、利用できる周波数が変わる。また、人や物の位置を把握するために、カーナビやスマートフォンなどに衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) が使われているが、GNSS で用いる UHF 帯の電波も電離圏の影響を受ける。電離圏の変動・乱れは、測位衛星から地上受信機に信号を伝える電波に対して遅延やシンチレーションを生じ、測位誤差の拡大や信号の受信不可の要因となる。

一方、熱圏大気はそこを通る人工衛星やスペースデブリに対して大気抵抗 (大気ドラッグ) として作用し、それらの軌道や姿勢に影響を及ぼす。低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) の衛星やスペースデブリの数は増加の一途をたどっており、特に近年では通信やリモートセンシングなどの ICT 分野において衛星コンステレーションの計画が続出し、今後更なる増加が見込まれる。このような状況の下、熱圏の変動や乱れは LEO 衛星やスペースデブリの衝突リスク等に影響する [1]。

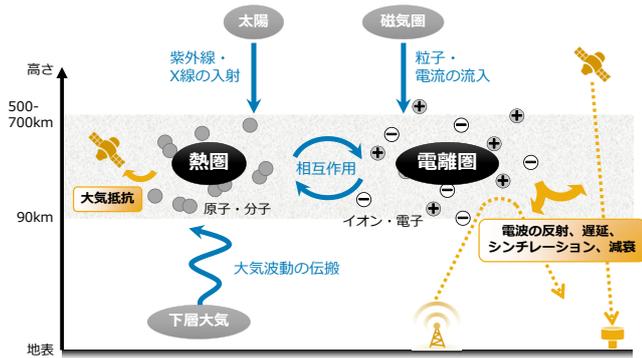


図1 熱圏と電離圏の変動とその影響

以上から分かるように、熱圏と電離圏の状態について現況を正確に把握し、定量的に予測することは、短波の通信や衛星測位システム、LEO衛星が提供するサービスなどの安定な利用に寄与するものである。本稿では、このために開発している大気圏及び電離圏の全球シミュレーションモデルについて紹介する。

2 全球大気圏 – 電離圏モデル GAIA の概要

まず熱圏や電離圏を扱うモデルの種類について述べ、その後に我々の開発している GAIA (Ground-to-top-side model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) について紹介する。

2.1 熱圏・電離圏モデルの種類

熱圏・電離圏モデルの種類を図2にまとめている。本稿では全球モデルを扱う。局所的なじょう乱現象の再現を目的とする電離圏モデルについては本特集号の2-4[2]で扱う。全球の熱圏・電離圏モデルには大きく分けて2つの種類がある。一つは実際の観測データに基づき位置や時間、季節、太陽活動、地磁気じょう乱指数などを変数として統計的に整理したもので、平均的な振る舞いを記述する経験モデルである。もう一つの種類は大気の物理法則に沿って方程式を数値的に解く物理モデルである。一般に経験モデルの方が月平均程度の規則的な大気の振る舞いを良い精度で再現する。一方、物理モデルは太陽や磁気圏など外部からの入力や、下層大気の状態に基づいて理論的に大気の変動を導き出すものであり、規則的な変動だけでなく、数時間程度のじょう乱から数日～数十日の準周期的な変動など不規則的な大気の振る舞いも再現可能とする。

また、モデルが対象とする領域の範囲によってバリエーションがある。熱圏・電離圏のみを対象とするモデル、熱圏を含み中性大気全域を対象とする全大気圏モデル、中性大気全域に加え電離圏も対象とする全大気圏 – 電離圏モデルが存在する。それぞれについて主

		経験モデル	物理モデル			
中性大気	電離圏	①	④	⑥	⑦	
	熱圏	②				⑧
	中間圏・成層圏		③	⑤		
	対流圏					

- ① 電離圏の経験モデルの例 --- IRI[3], NeQuick[4]
- ② 熱圏の経験モデルの例 --- JB2008[5], GTM2013[6]
- ③ 全大気圏の経験モデルの例 --- NRLMSIS[7] (密度、温度)、HWM14[8] (風速)
- ④ 電離圏の物理モデルの例 --- SAMI3[9]
- ⑤ 全大気圏の物理モデルの例 --- WAM[10]
- ⑥ 熱圏-電離圏の物理モデルの例 --- TIE-GCM[11], CTIPe[12], GiTM[13]
- ⑦ 中間圏-熱圏-電離圏の物理モデルの例 --- TIME-GCM[14]
- ⑧ 全大気圏-電離圏の物理モデルの例 --- WACCM-X[15], GAIA[16]

図2 熱圏・電離圏モデルの種類

なモデルの例を図2に掲載している。この中でGAIAは日本の研究チームが開発したものだが、TIE-GCMとTIME-GCM、WACCM-XはNCAR(米国大気研究センター)、WAMとCTIPeはNOAA(米国大気海洋庁)、SAMI3とNRLMSISはNRL(米国海軍研究所)が開発の主体であり、米国での開発が精力的である。このほかに中国や欧州でも独自のモデル開発が進められている。

2.2 開発経緯

熱圏・電離圏の全球物理モデルは歴史的に1980年頃から米国NCARグループや英国と米国NOAAのグループにより研究が始まった。当初は熱圏のみを扱うモデルであったが、1980年～1990年後半にかけて電離圏まで拡張し、さらに中性 – 電離大気の電気的な結合過程や、磁気圏からの入力などの要素が加わり、TIE-GCMやCTIPeといったモデルに至っている。2000年代になると、大気潮汐の伝搬^{ちようせき}について理論的な研究が進んだことや、衛星観測によって地表の影響を示唆するような電離圏の分布が発見されたことにより[17]、対流圏から熱圏・電離圏までの上下結合が注目されるようになった。この頃国内では、九州大学と東北大学のチームが気象予報に用いられる大気大循環モデル(GCM: Global Circulation Model)を熱圏まで拡張することにより、世界に先駆けて全大気圏モデルの開発に成功している[18]。さらに、NICTでは全球の電離圏モデルが開発されており[19]、これらのモデルを結合して相互作用の過程を導入することにより、全大気圏 – 電離圏モデルGAIA[16]が開発された。米国でもNCARやNOAAを中心にWAMやWACCM-Xなどの全大気圏モデル、全大気圏 – 電離圏モデルの開発が進められた。近年では、これらのモデルに観測データを融合し、現実の熱圏・電離圏の状態を再現・予測する試みがなされている。

2.3 GAIA の計算手法・仕様

前述のとおり GAIA は全大気圏モデルと電離圏モデルを結合したものである。全大気圏モデルの詳細については文献 [18] などに記述されている。同モデルは、水平方向には全球を、高度方向には地表から熱圏上部までの中性大気領域を計算範囲とし、その計算領域を緯度・経度・高度方向に沿って細かい格子に区分けしている。空間分解能は水平方向に波数 21、42、106、... まで表現するバージョンがあり（緯度・経度方向に 5.6 度、2.8 度、1.1 度に相当）、高度方向には 0.4 H、0.2 H、...（H はスケールハイトすなわち指数関数的に減少する気圧高度分布の特徴的距離）の分解能を持つバージョンがある。各格子点において流体の方程式（連続式、運動方程式、熱力学方程式）を数値的に解いている。その際に各大気層の物理・化学過程を取り入れており、例えば熱圏では電離圏によるイオン抗力や電流系によるジュール加熱などの過程も計算に含んでいる。

GAIA の電離圏部分についての詳細は文献 [19] に記述されている。同モデルは全球で高度約 100 km から 3,000 km までを計算範囲にとり、水平方向の空間分解能は大気圏モデルと同等、高度分解能は電離圏下端から F 層の電子密度ピークを含む高度 600 km まで 10 km、高度 600 km 以上は高度とともに粗くなるように計算格子を設定している。その各格子点にて電離大気の流体方程式を数値的に解く。イオン成分は電離圏 E 層と F 層の主成分である H^+ 、 He^+ 、 O^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 N_2^+ 、 NO^+ を扱い、それらの電離や化学反応を計算する。

GAIA では全大気圏モデルと電離圏モデルに加え、電気力学モデル [20] も導入している。同モデルは中性大気の運動によって電離圏に電流系が駆動される過程を数値的に解くものである。この要素過程の取り込みにより、下層大気から熱圏まで伝搬した大気波動が電場を生成し、その電場が電離圏の変動を引き起こす過程を再現できる。

全大気圏モデル、電離圏モデル、電気力学モデルの

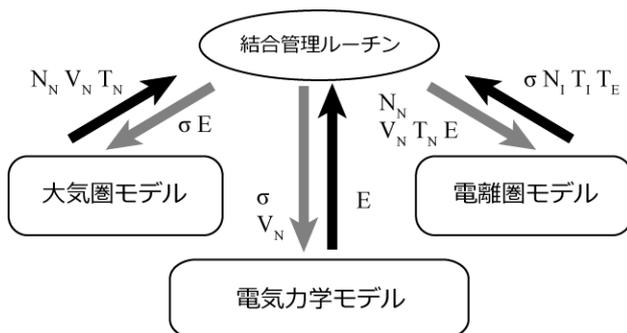


図3 GAIAにおけるモデルの結合方法

結合方法を図3に示す。結合管理ルーチンを導入し、一定の時間間隔で結合管理ルーチンが各モデルの出力変数を取得し、座標を変換して別のモデルに入力する（図中の記号は各モデルの出力変数を表す。Ns, Vs, Ts はそれぞれ密度、速度、温度を示し、s=N, I, E はそれぞれ中性大気、電離圏イオン、電離圏電子を指す。σ は電気伝導度、E は電場を意味する）。この繰り返しを行い、モデル間の相互作用を含めた時間発展を計算する。

3 GAIA による熱圏・電離圏の変動・じょう乱の再現

3.1 下層大気に由来する熱圏・電離圏の変動

2.2 で触れたように 2000 年代に入って衛星観測から地表の影響を示唆する電離圏電子密度分布が発見された。図4はその電離圏電子密度分布を GAIA で再現し、形成過程を調べたものである [16]。図4aの電離圏 F 層の電子密度に経度方向の波数4の構造が見られるが（各経度でローカルタイムが15時となるように図を作成）、これは観測と同様な分布である。GAIA のシミュレーション結果から電離圏の波数4の起源を調べると、下層大気における対流活動の経度分布にたどり着くことが分かった。図4dは GAIA で再現される地表の平均雨量を示すが、アフリカ大陸、東南アジア域、アメリカ大陸付近に雨量が多く、積雲対流の活発な領域が地表の海陸分布に依存していることが見て取れる。これらの対流活動の活発な領域では、雲や雨粒の形成に伴って潜熱が解放され、大気波動のエネルギーとなる。そのような領域が経度方向に波数4に近い間隔で分布しているため、同じローカルタイムで見ると波数4を持つような大気潮汐が励起される。この大気潮汐は熱圏まで伝搬し（図4c）、中性-電離大気の相互作用によって波数4の電場分布を生成する（図4b）。詳細な過程の説明は割愛するが（波数4現象のより詳しい説明が以前の宇宙天気予報特集号に掲載されている [21]）、この電場が電離圏の運動を駆動し、図4aの電子密度の波数4構造の形成につながるものが GAIA より示唆される。

図5は別の下層大気の影響について GAIA で調べた例である [22]。成層圏突然昇温は極域の成層圏において冬季に温度が急上昇する現象である。これは対流圏で地形や海陸の分布によって励起するプラネタリー波と呼ばれる大気波動が成層圏に伝搬し、成層圏・中間圏の子午面循環を駆動して起きるものである。冬季に発生する理由は、冬季にのみ成層圏の東西風の向きがプラネタリー波の伝搬可能な東向きになるためである。2010年頃から成層圏突然昇温の発生時に、熱圏大気の

2 電離圏研究

密度や電離圏の電子密度が通常時と異なる時間変化をする観測例が報告され始めた ([23] など)。GAIA と衛星観測を用いて調べたところ、成層圏突然昇温時に現

れる熱圏・電離圏の密度変化は主に半日周期成分の増幅や位相のずれが顕著であることが分かった。熱圏・電離圏の半日周期変動は主に下層大気で励起する半日周期の大気潮汐が上方に伝搬して到達するものであり、GAIA による解析からは成層圏突然昇温時の子午面循環の変化により、同大気潮汐の伝搬条件が変わって振幅や位相が変調されたものであることが分かった。

3.2 太陽フレアによる熱圏・電離圏の変動

太陽放射光は中低緯度の電離圏と熱圏にとって最も重要な電離及び加熱のエネルギー源である。太陽フレアの発生時には X 線から紫外線に至る幅広い波長域の太陽放射光強度が増加し、大気成分の電離や分子の解離を促進させる。図 6 は 2017 年 9 月 6 日に発生した X9.3 クラスの太陽フレアについて、GAIA を用いて電離圏・熱圏の応答を調べた例である [24][25]。同フレアによる太陽放射スペクトルの変化を図 6 b に示す (太陽放射スペクトルの経験モデル FISM[26] を使用した)。これを GAIA に入力して計算した際の電離率の変化を示したのが図 6 c、d である。

太陽フレアによる電離率の増加は F 層から E 層にかけて高度が下がるほど大きい。この例ではフレア前後で高度 150 km から 100 km にかけて全イオンの電離率が 2 倍 -10 倍程度増加している。このうち F 層は主に波長 20-40 nm の EUV 光の寄与により、 O^+ 、 N_2^+ の電離率が増加している。E 層では波長 15 nm 以下の X 線による N^+ 、 N_2^+ 、 O^+ の電離率 (正確には 2 次的な光電子による電離) が増加している。このように太陽放射光の波長によって作用する大気の高高度域・成分が異なっている。GAIA の計算結果では、赤道域でフレア発生直後に TEC が 12 % 程度増加し、一方熱圏はフレア発生後の 2 時間後に温度と質量密度が最大 6 %、18 % 程度増加した。詳細は文献 [24] に記述している。

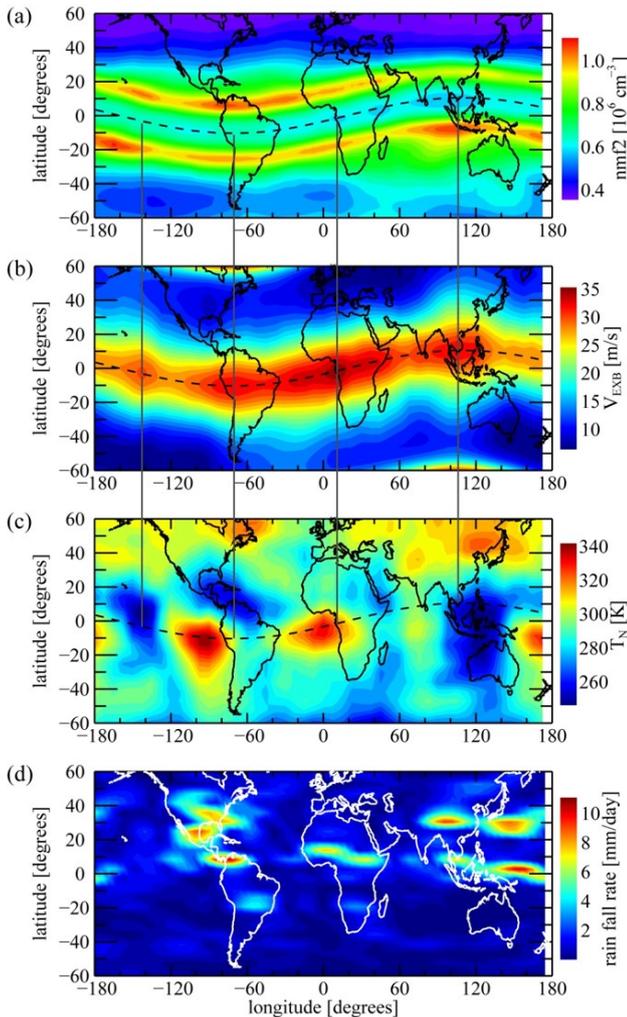


図 4 電離圏の波数 4 構造の形成過程 [16] (a) 電離圏 F 層のピーク電子密度 (ローカルタイム (LT) が 15 時の分布)、(b) 電場ドリフト速度 (鉛直上向き、高度 300 km、11 LT)、(c) 中性大気温度 (高度 110 km、11 LT)、(d) 地表の降水量

3.3 地磁気じょう乱の熱圏・電離圏への影響

電離圏は、下層大気からのじょう乱による影響に加えて、磁気圏からも影響を受ける。磁気圏変動 (地磁気じょう乱) による電離圏・熱圏への影響を含めるため、極域にかかる電場及びオーロラ降込の変化と、電場の中低緯度への侵入効果を新たに GAIA に加えた。極域電場について、観測に基づく経験モデル [27] に、地球に到来する太陽風プラズマ及び磁場成分の観測値を入力して、電場分布を求める。オーロラ粒子降込については、磁気圏活動度の指標である Kp 指数に応じて、観測に基づく経験則 [28] を基に降込総量を変化させている。磁気圏へ流入する電流量からグローバルな電場分布を求めることで、極域に印加された電場が中低緯度まで広がる過程が再現できるようになった。

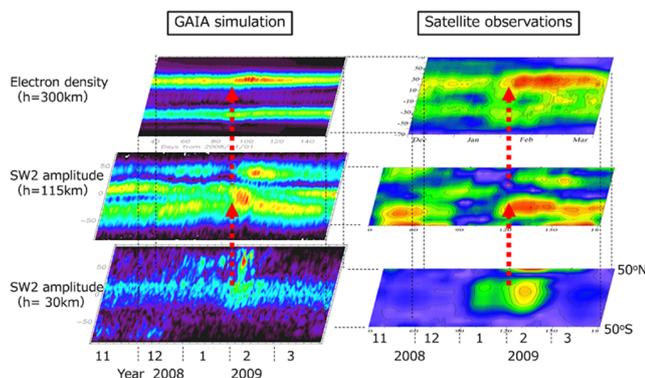


図 5 成層圏突然昇温時の電離圏変動の発生過程 [22] 2009 年 1 月後半に起きた成層圏突然昇温時の半日周期成分の電子密度と半日大気潮汐 (SW2) の振幅を示す。左の列が GAIA による計算結果であり、右の列が衛星による観測 (COSMIC/FORMOSAT2 及び TIMED 衛星) を示す。

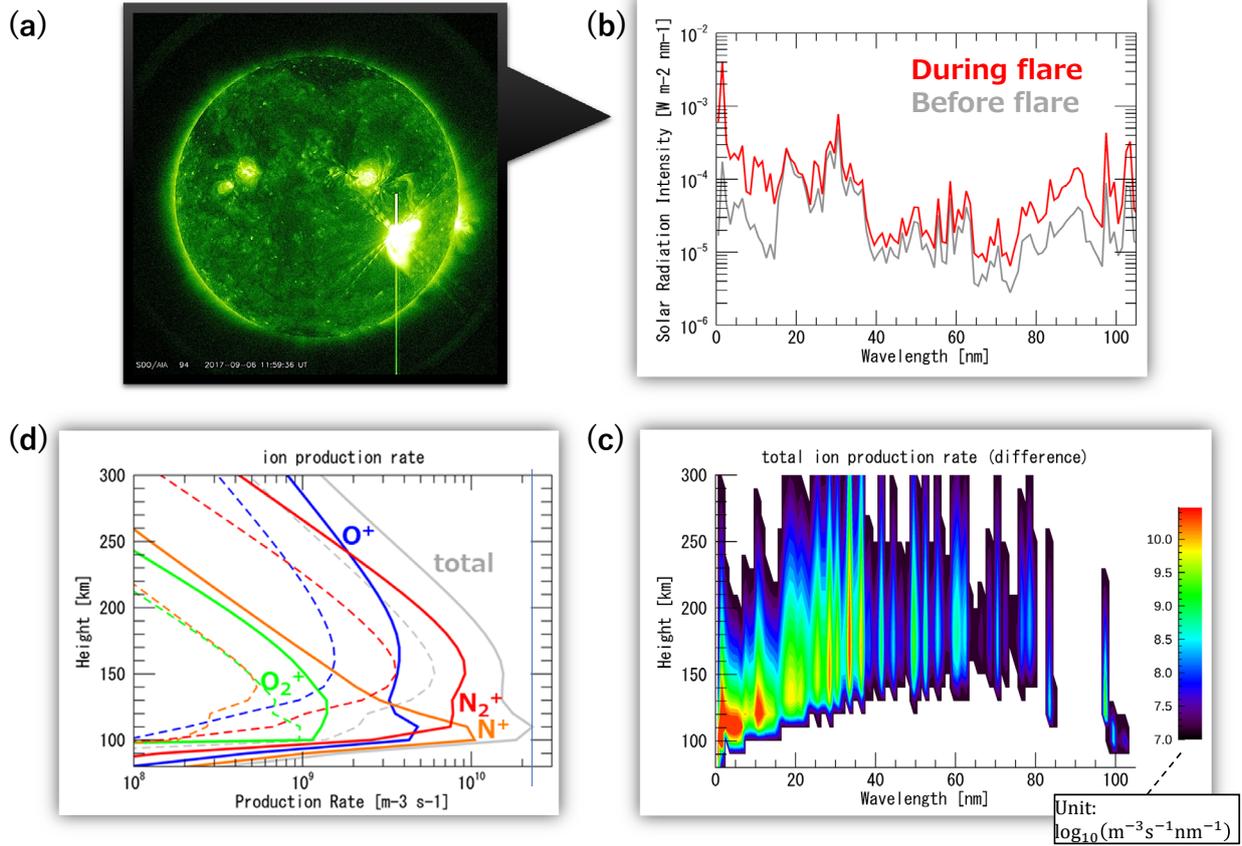


図6 (a) 2017年9月6日に発生したX9.3クラスの太陽フレア (太陽観測衛星SDOによる波長9.4 nmの撮像) (b) 同フレア発生前後の太陽放射スペクトルの変化 (FISMモデルの出力) (c) 各波長の太陽放射光による電離率の高度分布 (GAIAの計算結果同じフレア発生前後の差分を取ったもの。場所は 0°E 、 30°N) (d) 各イオンの電離率の高度分布の変化 各実線はフレア発生直後、各点線はフレア発生前

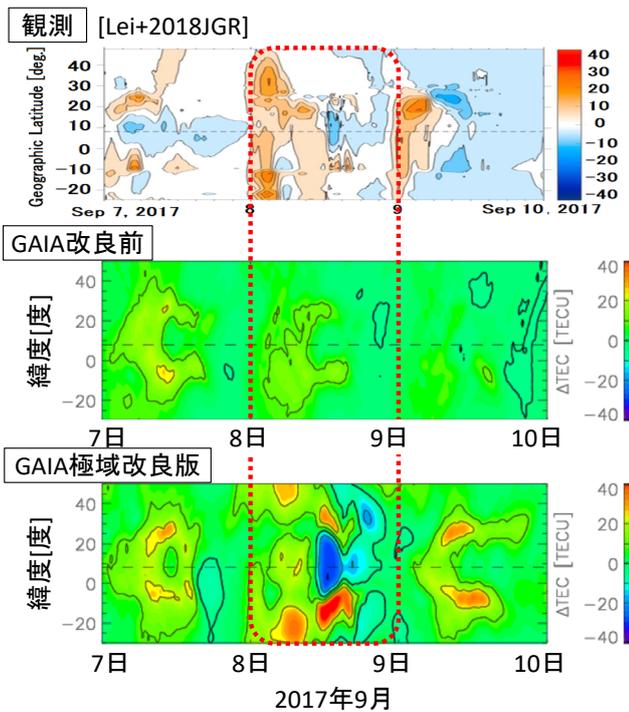


図7 経度115度の中低緯度域におけるTEC変動の緯度分布の時系列 2017年9月7-9日の3日分について、静穏日の日変化を差し引いた変動成分を示す。上から、観測 [29] によるもの、改良前及び極域変動を考慮したGAIA計算結果。

2017年9月に発生したXクラスの太陽フレアに起因する磁気嵐イベントに適用した例を図7に示す。電子密度高度積算値である全電子数 (total electron content, TEC) の中低緯度の分布について、改良前のGAIAでは、大きな変動は特に見られない。それに対して極域変動を考慮した計算では、磁気嵐が発達した9月8日に、まず電子密度が広い緯度帯にわたって増大し、その後赤道域で減少し、その減少傾向は中低緯度までわたって見られる。観測されたTEC変動をよく再現している。このとき、東向き電場が強まり、その後に加熱された極域から赤道域に向かう中性風がみられた。これらはプラズマを高高度に持ち上げる効果を持ち、高高度では中性大気分子成分が減少 (O/N_2 比が増加) してプラズマ消失過程が生じにくくなるため、プラズマ密度が高くなりやすい。さらに、電離圏嵐の後半において、 O/N_2 比の低い大気が極域から低緯度域へ運ばれプラズマ密度が下がるという特徴的な変化も、GAIAで再現された。

地磁気じょう乱時に、太陽圏 - 磁気圏 - 電離圏相互作用の結果として電場・電流エネルギーが電離圏・大気圏へ流入され、さらに、中性大気と電離大気の相互作用により、多様な電離圏じょう乱が引き起こされる。

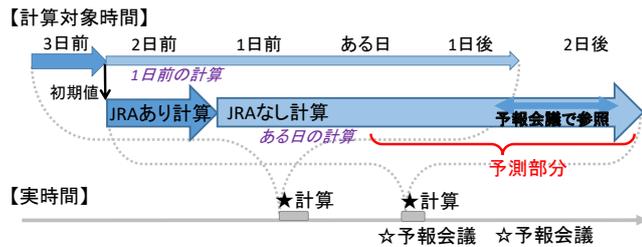


図8 GAIA リアルタイム計算の概要図 上に計算対象時間、下に実時間を示す。例えば、ある日の計算では、前日に行った「JRA あり計算」の結果を初期値として入力し、2日前の「JRA あり計算」と、1日前～2日後の4日間分の「JRA なし計算」を行う。

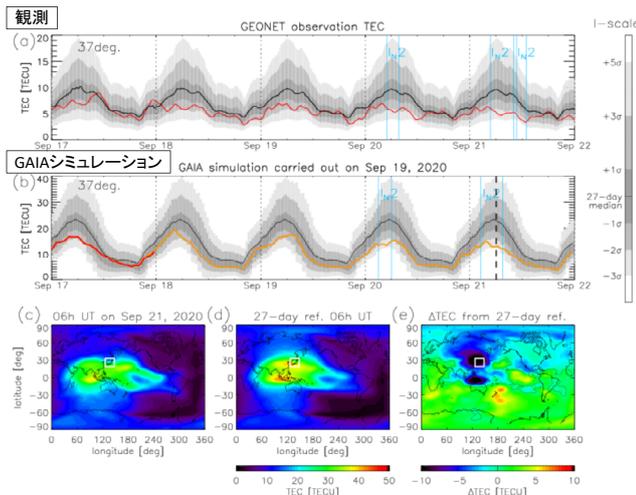


図9 GAIA による電離圏嵐発生予測と観測結果の例 (a) 観測による2020年9月17日から21日にかけての日本上空の緯度37度帯におけるTEC時系列結果。赤線が観測値、黒線は直前27日間の中央値、灰色コンターは電離圏嵐指標 I-scale、青線で負相嵐の発生を示す。(b) GAIA によって、2020年9月19日に計算された、同5日間のTEC時系列分布。赤線が JRA あり計算、橙色の線が JRA なし計算、黒線が GAIA 計算結果の27日間中央値、灰色コンターは GAIA 版の I-scale、青線は負相嵐の発生予測 負相嵐発生を予測した9月21日UT6時の (c) TEC、(d) TEC27日中央値及び (e) 両者の差分値の、全球経度・緯度分布。

GNSS 衛星による詳細な全球 TEC 分布に加えて、複数の衛星・地上観測の連携による解析研究が近年盛んにおこなわれている。観測で見られる現象の背景にある物理を調査し考察することにおいて、GAIA からのアプローチが期待される。また、この改良モデルによる、宇宙天気情報の一つである電離圏嵐の予測精度の改善については、以下の 4.1 で述べる。

4 GAIA による超高層大気予測とデータ提供

4.1 リアルタイム・予測計算

GAIA による大気圏・電離圏情報を NICT の宇宙天気予報に役立てるため、GAIA のリアルタイム・予測計算と電離圏じょう乱予測の利用検討を行っている。電離圏じょう乱として、電離圏嵐については本節で、電波伝搬に影響を及ぼすスプラディック E 層について

は本特集号の 2-5 [30] で紹介する。その他、リアルタイム計算を用いて、3.1 で紹介した成層圏突然昇温現象のモニターや、短波帯の電波伝搬の可視化 [31] も行っている。

リアルタイム計算とは、実時間とほぼ同じタイミングに、その時刻のモデル計算を行うことである。さらに少し先の計算も行うことで、現況の把握に加えて予測情報を得ることができる。ただし、リアルタイム・予測計算は、モデルに入力する観測情報等の利用が限られることがある。その制約の中で、予測精度が十分に発揮できるかが重要である。

GAIA では、太陽紫外線の入力情報として波長 10.7 cm の電波強度観測に基づく F10.7 指標を入力し、現実的な下層大気のじょう乱を考慮するために気象再解析データを入力する。F10.7 指標は1日前まで、気象再解析データは2日前までのものが入手可能である。直近の入手可能なデータを用いて計算を行うために、GAIA のリアルタイム計算を、図8に示すように実装した [32]。気象庁の再解析データ (JRA) について、2日前の世界協定時 (UT) 0, 6, 12, 18時のデータを、日本時間 (JST) 18時過ぎに入手する。最新の F10.7 値を入手し、モデル入力のためのデータ変換及び計算を行う。前日に行った、JRA を入力した GAIA 計算 (「JRA あり計算」と呼ぶ) を初期値に、JRA あり計算を1日間分進める。その後、JRA の入力がない GAIA 計算 (「JRA なし計算」と呼ぶ) を4日間分行う。計算日翌日の JST15 時からの24時間分を、JST14 時半からの NICT 宇宙天気予報会議で予測情報として参照できるようにしている。この5日分の一連の計算を、毎日1回実施する。これを、2019年6月以降、継続して運用している。

電離圏嵐予測の例を図9に示す。この図9b-9eは2020年9月19日に行った計算から得られた結果である。図9bは、日本上空の北緯37度のTECの、9月17日から21日までの時系列プロットである。赤線が JRA あり計算、橙色の線が JRA なし計算の結果である。黒線は、直近27日間の各時刻におけるTEC値の中央値である。黒線と比べて、TECの日変化に加えて局所的な変化がみられている。特に顕著なのは、20日及び21日の昼間の時間帯である。同じプロットに灰色コンターで示すのは、GAIA の電離圏嵐指標 I-scale である。I-scale とは、この場所・季節・時間帯のTEC変化の長期的な統計分布に対する大きさを測るものである ([33] 及び [34])。ここで示している I-scale は、GAIA の1996年から2016年までの長期計算を基に求めたものである [32]。27日中央値の黒線の近傍にある濃い灰色の範囲内にある場合は、変動が統計的に大きくないものである。黒線から大きく外れて薄い灰色及

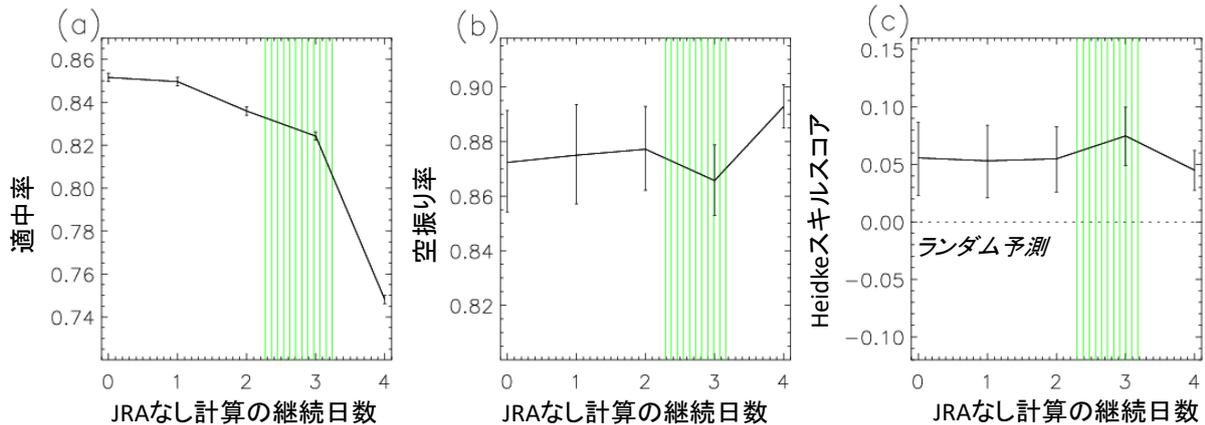


図10 GAIA リアルタイム計算による電離圏嵐発生予測の精度評価 (a) 予測適中率、(b) 空振り率、(c) Heidke スキルスコアについて、「JRA なし計算」の継続日数への依存性を示す。0は「JRA あり計算」の結果を示す。緑の時間帯は、予報会議で参照する期間。エラーバーは、電離圏嵐の適中日 TP を、静穏の適中日 TN と一日分入れ替えた場合の指標の値を、感度の参考として示す。

び白色の領域まで TEC 値が達するものは、顕著な変動である。特に、各場所・季節・時間帯の TEC 変化の標準偏差 σ に対して、 $+3\sigma$ 以上または -2σ 以下の変動が2時間以上継続する場合に、それぞれを電離圏正相嵐・負相嵐の発生と定義し、NICT 宇宙天気情報として報告している。20日及び21日の TEC 減少イベントは、 -2σ の閾値を2時間以上超えており、負相嵐の発生が予測された。

21日の負相嵐発生時の TEC 全球分布が、図9cである。図9dに示す27日中央値の分布と比べて、磁気赤道を挟むように平行してみられる TEC 増大構造である赤道異常がはっきりしない。27日中央値との差分をとると、減少の特徴は明らかである(図9e)。このとき、 O/N_2 比が小さく、21日は特に電場が西向きとなり、TEC 減少に寄与していたことが GAIA から推測される。

この時の観測結果が、図9aである。赤線が各時刻の観測値、黒線が各時刻における直前27日間の中央値である。灰色線は、長期観測結果に基づく I-scale[33]で、20日及び21日は、負相嵐の発生が確認された。GAIA による電離圏嵐発生時刻と比べて2時間程度時間がずれるが、昼間の時間帯における発生を予測できた例である。

他方、GAIA の TEC 絶対値が観測に比べて2倍ほどと、異なっている。これは、モデルに含まれない物理過程等によるモデル誤差と思われる。しかし、電離圏嵐指標を GAIA において定義して利用することで、モデルによる絶対値の再現性に制約がある中で、有意な変化を検出することが可能である。また、この絶対値のずれについては、現在取り組んでいる GAIA への観測データ同化によって、改善するものと期待される。

GAIA リアルタイム計算による電離圏嵐の発生予測精度を、2019年7月から2020年12月までの計算結果

を用いて評価した。電離圏嵐の発生は、日本上空の北緯 $29 \cdot 33 \cdot 37 \cdot 41 \cdot 45$ 度緯度帯のいずれかで、24時間以内に電離圏正相嵐もしくは負相嵐の発生が予測された場合を電離圏嵐発生日、そうでない日を静穏日とする。電離圏嵐の発生予測は、上記したように GAIA の I-scale をもとに判定し、観測による判定結果と比較し、評価する。電離圏嵐を予測して適中した日数を TP、予測したものの発生しなかった誤検出の日数を FP、電離圏嵐の発生があったものの予測できなかった見逃しの日数を FN、静穏の予測が当たった日数を TN、全日数を $N = TP + FP + FN + TN$ として、

$$\text{予測適中率} = (TP + TN)/N、$$

$$\text{空振り率} = FP/(TP+FP)、$$

$$\text{Heidke スキルスコア} = (TP + TN - Sc)/(N - Sc)、$$

$$Sc = (TP+FN)/N \times (TP+FP) + (FP+TN)/N \times (FN + TN)$$

と評価する。

これらの評価指数を、JRA なし計算の継続日数への依存性として示した結果が図10である。予測適中率は大きいほど、空振り率は小さいほど精度がよいことになるが、JRA なし計算が続くほど、精度が下がっていく様子が確認された。Heidke スキルスコアは、ランダム予測の場合に0、それよりも予測精度が高い場合は正の値となる。宇宙天気予測期間(図10の緑の時間帯)は正の値が確認されてランダム予測よりは有意な予測ができることが示されたが、実用には精度向上が必要である。なお、ここでの計算は、地磁気じょう乱に起因する電離圏嵐が含まれていない。3-3で述べた極域変動の考慮によって、電離圏嵐発生予測精度が70%ほど向上することが確認されている。現在、地磁気じょう乱等の影響も含んだリアルタイム計算への改良を進めている。

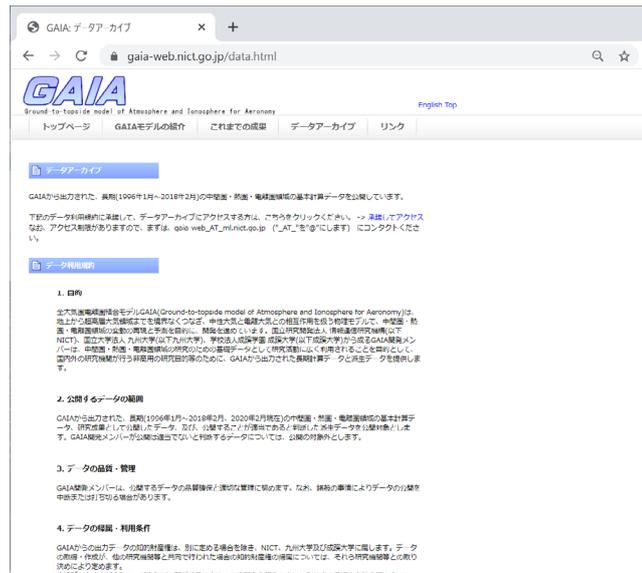


図 11 GAIA ウェブサイトのデータ提供のページ <https://gaia-web.nict.go.jp/data.html>

4.2 Web によるデータ提供

GAIA は、地上から超高層大気までの全球領域をカバーし、モデル内部では様々な物理変数の時空間変化を用いている。GAIA 開発者以外の研究者にも、GAIA の結果を解析等で利用できるよう、計算結果を出力したデータベースを作成し、Web から提供している(図 11)。

現在、過去の長期計算結果(1996 年 1 月～2018 年 2 月)の提供を行っている。今後、研究開発中のものも含めたものに更新していく予定である。

5 今後の展望

本稿では、全球の全大気圏 - 電離圏の物理モデルである GAIA の概要を紹介し、実用化の一環として宇宙天気予報のためのリアルタイム・予測シミュレーションや情報提供について述べた。今後は通信や衛星測位、衛星運用などを念頭に更なる実用化を進めるため、モデルの精度改善や情報提供の改良を行う。その一環として、GAIA の数値手法の改良や未導入の物理過程等の取り込みは継続しつつ、全球的な衛星・地上観測データをモデルに融合し現実に近い大気状態を再現しようとするデータ同化手法の拡張・改良、リアルタイム・予測手法の改良、全球-局所モデルの連携・結合などを進めていく予定である。情報提供についてもよりユーザーニーズに即し、扱いやすい情報・データの提供となるよう改善を進めていきたい。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託業務「電波伝搬の観測・分析等の推進」によって行われたものである。計算の入力に用いる F10.7 値は Natural Resources Canada から、太陽風 OMNI データは NASA CDAweb から、柿岡 K 指数は気象庁地磁気観測所から、気象再解析データは気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) プロジェクトにより、それぞれ提供されたものである。TEC 観測値の導出において、国土地理院の GEONET データを使用した。深く感謝する。

【参考文献】

- 陣英克, "1-2-5. 大気ドラッグ," 太陽地球圏環境予測 オープン・テキストブック, doi: <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/records/2000053>, 2021.
- 横山竜宏, "電離圏局所シミュレーション," 情報通信研究機構研究報告, 本特集号, 2-4, 2021.
- D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, and X. Huang, "International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions," *Space Weather*, vol.15, pp.418-429, 2017. doi:10.1002/2016SW001593
- Nava, B., P. Coisson, and S.M. Radicella, "A new version of the NeQuick ionosphere electron density model," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol.70, issue 15, pp.1856-1862, 2008. doi:10.1016/j.jastp.2008.01.015
- Bowman, B. R., Tobiska, W. K., Marcos, F. A., Huang, C. Y., Lin, C. S., and Burke, W. J., "A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices," In *Aiaa/aas astrodynamics specialist conference and exhibit*, pp.6438, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6438>
- Bruinsma, S., "The DTM-2013 thermosphere model." *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol.5, A1, 2015. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017008>
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C., "NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues," *J. Geophys. Res.*, vol.107, A12, pp.1468, 2002. doi:10.1029/2002JA009430
- Drob, D. P., Emmert, J. T., Meriwether, J. W., Makela, J. J., Doornbos, E., Conde, M., Hernandez, G., Noto, J., Zawdie, K. A., McDonald, S. E., et al., "An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere," *Earth and Space Science*, vol.2, pp.301-319, 2015. doi:10.1002/2014EA000089.
- Huba, J. D., G. Joyce, and J. Krall, "Three-dimensional equatorial spread F modeling," *Geophys. Res. Lett.*, vol.35, L10102, 2008. doi:10.1029/2008GL033509,
- Akmaev, R.A., Fuller-Rowell, T.J., Wu, F., Forbes, J.M., Zhang, X., Anghel, A.F., Iredell, M.D., Moorthi, S., and Juang, H.-M., "Tidal variability in the lower thermosphere: comparison of whole atmosphere model (WAM) simulations with observations from TIMED," *Geophys. Res. Lett.* vol.35, L03810, 2008. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL032584>.
- Richmond, A.D., Ridley, E.C., Roble, R.G., "A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics," *Geophys. Res. Lett.*, vol.19, pp.6011-604, 1992.
- Fuller-Rowell, T.J., Millward, G.H., Richmond, A.D., and Codrescu, M.V., "Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes," *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, vol.64, pp.1383-1391, 2002.
- Ridley, A. J., Y. Deng, and G. Toth., "The Global Ionosphere-Thermosphere Model (GITM)," *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.*, vol.68, pp.839-864, 2006.
- Roble, R. G. and Ridley, E. C., "A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (time-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30-500 km)," *Geophys. Res. Lett.*, vol.21, 417, 1994. doi:10.1029/93GL03391
- Liu, H.-L., Bardeen, C. G., Foster, B. T., Lauritzen, P., Liu, J., Lu, G., ... Wang, W., "Development and validation of the Whole Atmosphere Com-

- munity Climate Model with thermosphere and ionosphere extension (WACCM-X 2.0)," Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol.10, 2018. doi.org/10.1002/2017MS001232
- 16 Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Shinagawa, H., Terada, K., Terada, N., Ishii, M., Otsuka, and Y., Saito, A., "Vertical connection from the tropospheric activities to the ionospheric longitudinal structure simulated by a new Earth's whole atmosphere-ionosphere coupled model," J. Geophys. Res., vol.116, A01316., 2011. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015925>
 - 17 Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, "Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV," J. Geophys. Res., vol.110, A11302, 2005. doi:10.1029/2004JA010848
 - 18 Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, "Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase," Geophys. Res. Lett., vol.30, 1789, 2003. doi:10.1029/2003GL017695,
 - 19 品川裕之, "2-3-6 電離圏シミュレーション," 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
 - 20 陣英克, "2-3-7 電離圏ダイナモについて," 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
 - 21 陣英克, 佐川永一, "3-4-1 地球に固定された波数4の電離圏構造," 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, 2009.
 - 22 Jin, H., Y. Miyoshi, D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, "Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations," J. Geophys. Res., vol.117, A10323, 2002. doi:10.1029/2012JA017650
 - 23 Chau, J. L., Fejer, B. G., and Goncharenko, L. P., "Quiet variability of equatorial $E \times B$ drifts during a sudden stratospheric warming event, Geophys. Res. Lett., vol.36, L05101, 2009. doi:10.1029/2008GL036785
 - 24 陣英克, "2-4-2. 太陽フレアによる電離圏変動," 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, 2021. doi: <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/records/2000063>
 - 25 Watanabe, K., Jin, H., Nishimoto, S. et al., "Model-based reproduction and validation of the total spectra of a solar flare and their impact on the global environment at the X9.3 event of September 6, 2017," Earth, Planets and Space, vol.73, 96, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01376-6>
 - 26 Chamberlin PC, Woods TN, Eparvier FG, "Flare Irradiance Spectral Model (FISM): flare component algorithms and results," Space Weather vol.6, no.5, S05001, 2008.
 - 27 Weimer, D. R., "Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates," J. Geophys. Res., vol.110, A05306, 2005. doi:10.1029/2004JA010884
 - 28 Zhang, Y. and L. J. Paxton, "An empirical Kp-dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data," J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., vol.70, pp.1231-1242, 2008.
 - 29 Lei, J., F. Huang, X. Chen, J. Zhong, D. Ren, W. Wang, et al., "Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017?," J. Geophys. Res.: Space Phys., vol.123, 2018. doi.org/10.1029/2017JA025166
 - 30 品川裕之, "スプラディック E 層の再現," 情報通信研究機構研究報告, 本特集号, 2-5, 2021.
 - 31 穂積Kornyanaat, 埜 千尋, "地上ICTに役立つ宇宙天気予報7," 電波技術協会報 FORN, no.341, 2021.7 月, pp 38-41.
 - 32 Tao, C., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Shinagawa, H. Fujiwara, M. Nishioka, and M. Ishii, "Numerical forecast of the upper atmosphere and ionosphere using GAIA", Earth, Planets and Space, vol.72, article number 178, 2020. doi.org/10.1186/s40623-020-01307-x
 - 33 Nishioka, M., T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," Space Weather, vol.15, pp.228-239, 2017. doi:10.1002/2016SW001536
 - 34 宇宙天気予報センターウェブサイト, ユーザーガイド, 電離圏嵐指標 [I-scale (アイ・スケール)] について, <https://swc.nict.go.jp/knowledge/i-scale.html>

陣 英克 (じん ひでかつ)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
主任研究員
博士 (理学)
超高層大気科学

埜 千尋 (たお ちひろ)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
テニユアトラック研究員
博士 (理学)
超高層大気物理学