

地球と宇宙の境界を診る

横山 竜宏^{1*}

A diagnosis of the Earth-space interface

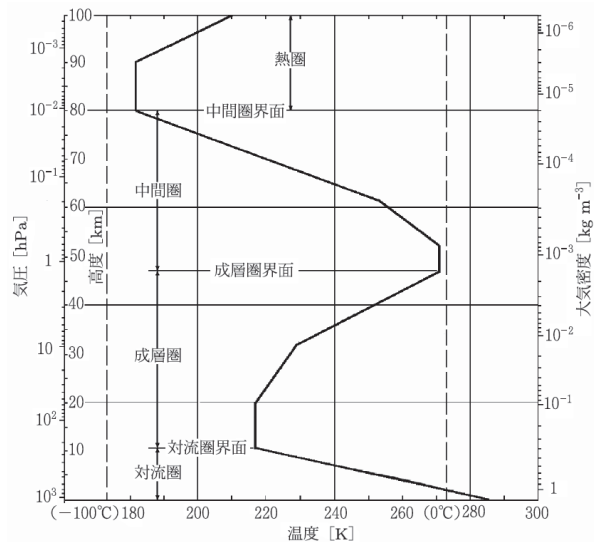
Tatsuhiko Yokoyama^{1*}

概要

地球と宇宙の境界はどこにあるのだろうか。国際航空連盟という組織は、高度 100km 以上を宇宙空間と定義し、ここを境として航空機と宇宙機を区別している。一方、地球の大気圏は高度 1000km 付近まで広がっており、非常に希薄な気体が地球の重力圏に留まっている。この大気圏でもあり宇宙空間でもある領域では、太陽からの強烈な紫外線を受けるため、地上では起こり得ない様々な現象が発生する。また、国際宇宙ステーションをはじめとする、多数の人工衛星が飛翔する領域であり、GPS 等の測位衛星や静止軌道上の気象衛星等がデータを送信する際に、電波の通り道となる領域でもある。この境界領域が我々の日常生活に及ぼす影響と、様々な観測・研究手法について紹介する。

1. 地球大気の上端

地上から標高の高い場所に行くと、気温と気圧が徐々に減少することは、日常生活から頻りに経験するところである。富士山の頂上では地上と比べて約 22 度気温が低く、気圧が下がるため水の沸点は約 88 度にまで下がる。では、さらに高度が高い場所へ向かうと、気温と気圧はそのまま減少し続け、そのまま宇宙空間へとつながるのだろうか。気圧については、大気自身の重さと地球の重力がバランスすることで基本的な分布が決まるため、上空に向かうほど気圧は単調に減少する。しかし、気温は図 1 に示すように複雑な変化をする。高度 15km 付近からは成層圏と呼ばれる領域に入り、高度とともに気温は上昇し始める。この温度上昇は、成層圏のオゾン層が太陽紫外線を効率よく吸収することに起因する。高度約 50km から 90km の領域は中間圏と呼ばれ、気温は再び減少を始める。高度 90km 付近の中間圏界面は地球大気で最も気温が低い領域であり、夜光雲とよばれる特殊な雲が発生することもある。高度 90km 以上からは再び気温の上昇が始まり、熱圏と呼ばれる領域に入る。図 1 では高度 100km までの

図 1：大気の鉛直構造¹⁾

2020年6月24日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野。

* E-mail: yokoyama@rish.kyoto-u.ac.jp

温度構造が示されているが、図2(左)には、高度100km以上の温度構造が分かりやすいように、縦軸と横軸のスケールを変えて示している。気温は1000度付近にまで急激に上昇し、熱圏は高度1000km付近にまで達している。この高度約1000kmが地球大気圏上端の一つの目安であり、地球の重力が大気を構成する原子・分子を引き止めている高度の限界とも言うことができる。太陽の活動度や季節、緯度によってこの温度構造は変化するため、大気の上端高度を明確に定義することは難しい。

2. 宇宙空間の下端

それでは、宇宙はどこから始まるのであろうか。こちらは便宜上明確に定義されている。国際航空連盟という組織は、高度100kmより上空を宇宙、それより下を大気圏と定め、航空機と宇宙機を識別している。近年盛んに開発されている民間の宇宙ロケットが、高度100kmに到達することを目標に掲げているのもこうした理由からである。また、高度100km付近から、大気の物理的・化学的性質にも変化が見られ始める。まず、太陽からの強いX線や紫外線の影響で、大気を構成する原子・分子の一部から電子が飛び出し、正イオンと電子に分離した状態となる。電離した大気をプラズマと呼び、電離した大気が存在するこの領域を電離圏と呼ぶ。熱圏と電離圏は、それぞれ温度と電子密度に着目した命名であり、高度範囲はほぼ一致している。図2(右)は、大気の一部電離することで作られるプラズマの密度を示している。このプラズマは、電波を反射させたり屈折させたりする性質があり、電離圏での反射を利用した短波による長距離通信に利用されてきた。また、電離圏はGPS等の測位衛星からの電波の伝搬にも影響を及ぼし、無視できない誤差の要因となることが知られている。数cm級の精密測位を実現するためには、電離圏の影響による誤差を取り除く必要があるが、そのためには、電離圏の電子密度の正確な分布を知る必要がある。

一方、大気の組成にも変化が見られ始める。地表から高度100km付近までは、大気は良く混合されており、大気の組成比は窒素分子(約80%)、酸素分子(約20%)とその他の微量成分がほぼ一定の割合で存在している。しかし、高度100km付近を超えると、大気は混ざりにくくなり、重い成分が下方へ、軽い成分が上方へと分離を始める。大気とプラズマの組成分布を図3に示している。イオンの組成は、酸素原子イオン、酸素分子イオン、一酸化窒素分子イオンが主要な要素である。窒素分子イオンがほとんど存在しないのは、電離したイオンがすぐに化学反応を起こして他種のイオンへと変化するためである。電子密度が最大となる高度300-400km付近では、酸素原子が主要な成分となり、さらに高度が上がると水素原子やヘリウム原子が主要な成分となる。電子密度が最大となる高度であっても、電離度は0.1%程度であり、僅かに電離した大気が電波の伝搬に影響を及ぼしていることが分かる。また、高度400km付近は国際宇宙ステーション

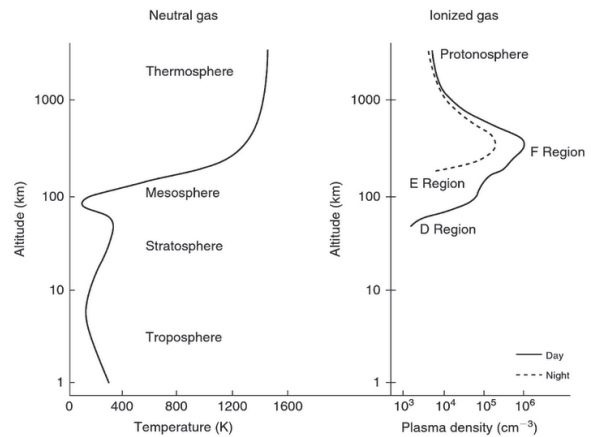


図2：超高度大気温度構造と電子密度分布²⁾

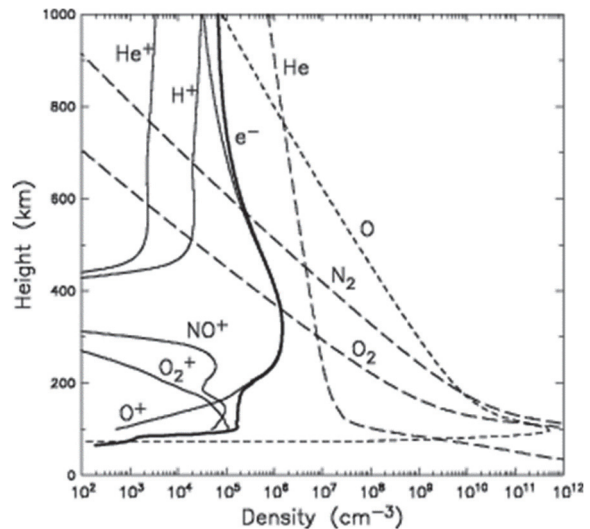


図3：超高度大気の組成分布 (MSIS、IRIモデルによる)

ンを始めとする多数の人工衛星が周回している高度であり、将来の人類の宇宙進出を見据えた場合、衛星や宇宙飛行士の周辺環境を理解するという点においても、電離圏は重要な領域である。

3. 電離圏と電波伝搬

前節で簡単に触れたように、電離圏のプラズマは電波の伝搬に影響を及ぼす。その概略を図4に示している。電離圏は数 MHz 以下の電波を反射する性質があるため、海外との長距離通信に利用されてきた一方、海外の放送波が混信する等の望ましくない影響も発生する。近年は、GPS 等の測位衛星に対する影響が大きな問題となっている。電離圏を伝搬する電波は、電離圏のプラズマ密度に応じて伝搬遅延が生じるため、測位に誤差が生じる。特に、大規模な太陽フレアや磁気嵐が発生した場合、電離圏のプラズマ密度が大きく変動する電離圏嵐が発生し、誤差が非常に大きくなる。実際、2017年9月に発生した大規模太陽フレアの場合、その2日後に電離圏のプラズマ密度が大幅に増加し、GPSの測位誤差が最大で3倍程度となったことが国土地理院より報告されている³⁾。また、低い高度でプラズマ密度が増加すると電波が吸収される現象が発生し、航空機や船舶との通信が途絶する恐れもある。プラズマ密度の増減だけでなく、背景の電場や磁場との相互作用により密度分布が不安定となり、微細な不規則構造を形成する場合もある。このような現象が生じた場合、電波の振幅や位相にシンチレーションと呼ばれる激しい変動が生じ、測位衛星の電波を捕捉することが不可能となる場合がある。このような現象の発生に備えて、電離圏の状況を正確に把握し現象の発生を予測することは、実用面においても非常に重要である。

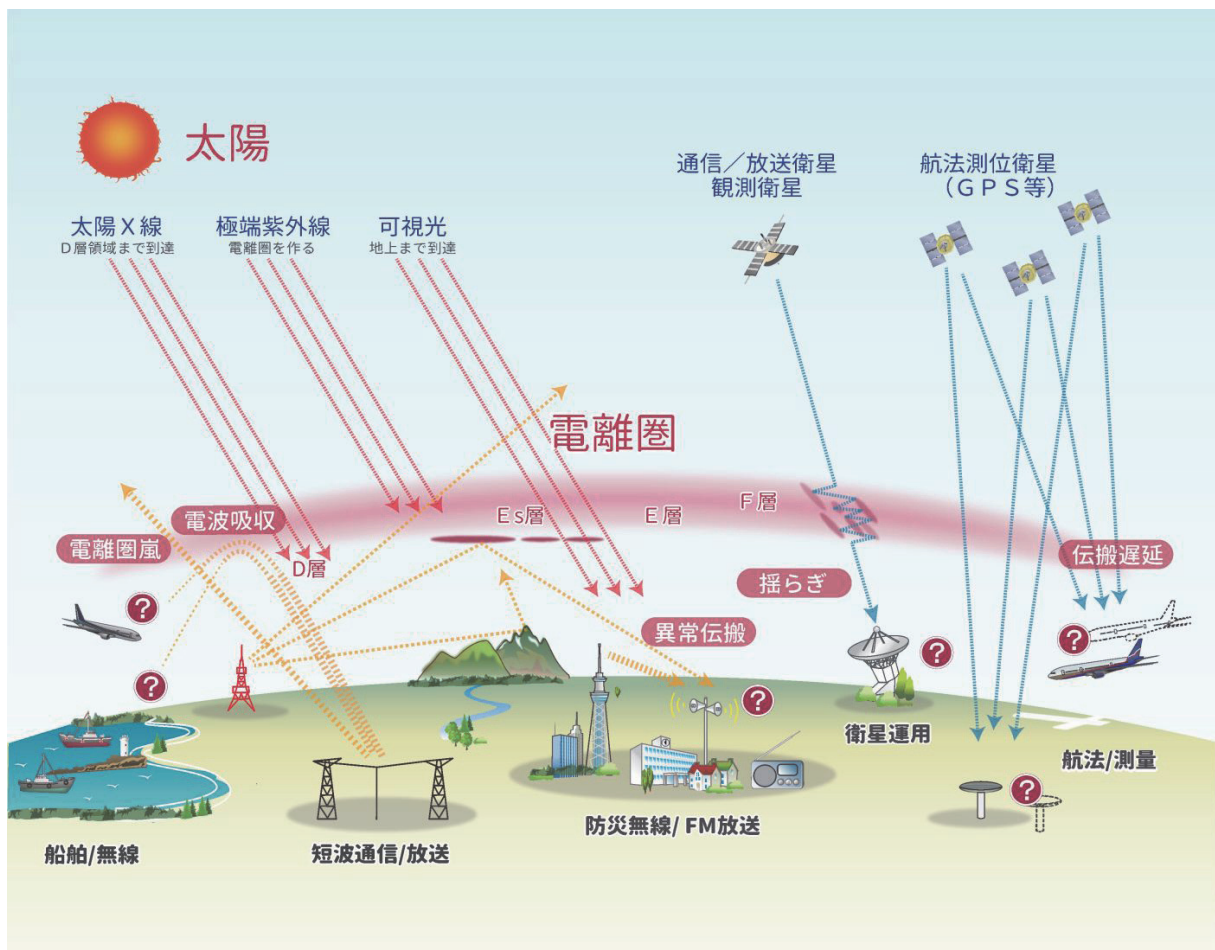


図4：電離圏と電波伝搬 (宇宙天気予報センターウェブサイトより <http://swc.nict.go.jp/>)

4. 電離圏の観測手法

電離圏の状況を観測する手段として、観測装置を直接送り込む手法と、電波や光を利用して地上や宇宙空間から観測する手法（リモートセンシング）がある。直接観測では、電離圏プラズマの密度、温度、速度の他、電場、磁場、組成等の情報を得ることができるが、装置を送り込むことができる手段が限られており、コストも非常に高い。リモートセンシングでは、得られる情報は限られているが、地上からの定常観測や、宇宙空間からのグローバルな観測が可能であり、長期間・全地球規模の観測が可能となる。

4.1 電離圏の直接観測

電離圏の情報を直接観測する装置は、地上での開発・試験が行われた後、観測ロケットあるいは人工衛星に搭載される。電離圏高度に到達後、アンテナ等の観測装置が展開され、観測ロケットの場合はその軌道に沿ってデータを取得しながら地上に転送する。ロケット1機につき1度のみの観測であるが、近年は再利用可能なロケットも開発が進められている。人工衛星の場合は周回軌道に沿ってデータを取得する。通常、数年間の運用期間が設定されており、期間中は観測とデータ転送が行われる。高度300km以下では、大気抵抗が大きく人工衛星の高度がすぐに低下してしまうため、人工衛星による観測は難しく、観測ロケットが唯一の直接観測手段である。図5に宇宙航空研究開発機構が開発したS-310型観測ロケットの外観を示す。現在運用されている観測ロケットの中では最も小型のタイプであり、直径310mmで高度150kmに到達する能力を有している。主に鹿児島県肝付町の内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられるが、海外との共同研究の場合には海外の射場から打ち上げられる場合もある。



図5：観測ロケットの外観
(JAXA ウェブサイトより)

4.2 電離圏のリモートセンシング

観測ロケットや人工衛星による観測では、様々な観測データを同時に得ることができるが、コストが高く、頻繁に実施することは不可能である。そこで、電波や光を用いたリモートセンシング技術が広く利用されている。電離圏の存在が発見された経緯も、電波が反射されることによる長距離伝搬がきっかけであったことから、電波を用いた様々な観測手段が開発されてきた。最も古くから利用されてきた観測装置はイオノゾンデと呼ばれるタイプで、1MHzから30MHzまで周波数を変化させながら電波を上空に発射し、反射して地上に戻ってくるまでの時間差からその周波数の電波の反射高度を得る。電離圏のプラズマ密度に応じて反射する電波の周波数が変化するため、この手法を用いて電離圏プラズマの高度方向の構造を知ることができる。ただし、最大の密度に対応する周波数以上の電波は宇宙空間に突き抜けてしまうため、プラズマ密度最大の高度よりも上の構造を知ることができない。世界各地で観測が実施されており、日本では、情報通信研究機構が国内4ヶ所と南極昭



図6：MUレーダーの外観

和基地で定常観測を実施している。

イオノゾンは、比較的簡単なシステムで電離圏のプラズマ密度分布を知ることができるが、温度や速度等のその他の情報についてはより高度な観測システムを用いる必要がある。図6は滋賀県甲賀市信楽町に位置するMUレーダーの外観である。MUレーダーは中層(Middle)と超高層(Upper)大気を観測するために作られた大型大気観測レーダーで、下層の対流圏も詳細に観測することができる世界最高性能かつアジア域最大の大気観測レーダーである。MUレーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機(合計475個)を個別に制御することにより、1秒間に2500回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能な点である。生存圏研究所が運用し、1984年の完成以来「全国共同利用装置」として国内外の研究者に利用され、超高層物理学、気象学、天文学、電気・電子工学、宇宙物理学など、広範な分野にわたる多くの成果に貢献してきた。

MUレーダーのような大型観測設備は、高度方向の構造を詳細に観測することが可能であるが、1地点のみの観測であるため、水平方向の構造については限られた情報しか得られない。電離圏の水平構造は、高感度の全天カメラや複数のGPS受信機を用いて観測することが可能である。全天カメラは、大気原子が放射する微弱な大気光を撮像することで、ある高度における電子密度の水平分布や大気中を伝搬する大気波動を観測することが可能である。GPSを用いた観測は、電離圏中の電波の伝搬遅延が周波数に依存する性質を利用して、2つの周波数の電波の遅延時間の差からGPS衛星と地上受信機間の全電子数を算出する。国内では、国土地理院が1200ヶ所以上のGPS受信機を展開しており、これらのデータを統合することで、全電子数の詳細な水平分布を得ることができる。このように、複数の観測手段を組み合わせることで、電離圏の3次元構造を推定することが可能となる。

5. 電離圏の数値シミュレーション

前節で電離圏の様々な観測手法について述べたが、観測結果を適切に活用するためには、電離圏の物理・化学過程を支配する法則に基づいて現象を理解する必要がある。特に、電離圏は観測手段が限られているため、得られる情報が時間・空間的に断片的であり、観測結果のみから全容を理解することは難しい。数値シミュレーションはそのような特徴を持つ電離圏の理解の助けとして非常に有用であり、観測との比較、現象の理解、数値予報等、様々な面で利用されている。再現したい現象に応じて様々なタイプのシミュレーションモデルがあり、地球全体の大気圏—電離圏の相互作用を対象としたモデル、ある特定の地域上空の電離圏を再現したモデル、電波障害の原因となる微細構造の再現を目指したモデル等がある。計算機性能の発展に伴ってシミュレーションの再現精度も向上しており、より高解像度で現実との差が小さい数値シミュレーションモデルの開発が進められている。図7は赤道域において電波障害の主要な原因であるプラズマバブル

と呼ばれる現象を再現した例である。密度が低い領域が、泡のように高い高度まで上昇し、その内部には微細な構造が現れている様子が見られる。この結果は人工衛星やレーダーで観測される現象をよく再現しており、現象の発生予測に活用されることが期待されている。このような数値シミュレーションは、多くの計算時間とメモリを必要とするため、各大学等が保有するスーパーコンピュータを利

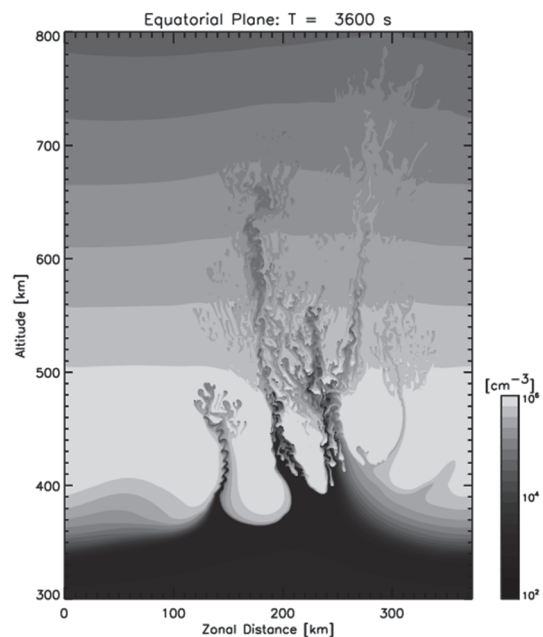


図7: プラズマバブルを再現した数値シミュレーション結果⁴⁾

用して計算されている。

6. おわりに

地球と宇宙の境界領域、つまり高度 100km から 1000km の領域は、複雑な物理・化学過程が入り混じった領域である。大気の温度構造の観点からは、気温が急激に増加する熱圏と呼ばれる領域であり、一方、大気が一部電離することで生じるプラズマの分布の観点からは電離圏と呼ばれる領域である。太陽からのエネルギーと下層大気から上方に伝搬するエネルギーの両者を受け取るため、複雑な大気・プラズマ現象が混在しており、未だ未解明の現象が多く存在している。GPS 等の測位衛星は、自動車の自動運転、農業、ドローン等、様々な分野へと応用されており、準天頂衛星「みちびき」の運用開始により、原理的には数 cm 程度の精度での測位が実現可能となっている。しかし、そのような精密測位のためには、電離圏による誤差の影響をより正確に補正する必要がある。電離圏の状況を正確に観測・診断し、そこでの物理・化学現象を理解することは、今後の宇宙利用の発展において欠かせない課題であると言える。

参考文献

- 1) 深尾, 浜津, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp.491.
- 2) Kelley, M. C., “The Earth’s Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics”, 2nd Edition, Int. Geophys. Ser. Vol. 96, Academic Press, 2009, pp. 556.
- 3) 国土地理院 報道発表資料, <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi40001.html>
- 4) Yokoyama, T., A review on the numerical simulation of equatorial plasma bubbles toward scintillation evaluation and forecasting, *Progress in Earth and Planetary Science*, **4**, 37, 2017.

著者プロフィール



横山 竜宏 (Tatsuhiko Yokoyama)

<略歴> 1999 年京都大学工学部電気電子工学科卒業／2004 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了 (博士 (情報学))／京都大学生存圏研究所、名古屋大学太陽地球環境研究所、米国コーネル大学、NASA ゴダード宇宙飛行センター、情報通信研究機構において研究に従事／2018 年京都大学生存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマ>電離圏擾乱現象の観測とシミュレーション。<趣味など>将棋、麻雀、国内旅行。