

情報通信研究機構における 宇宙天気予報研究の取組

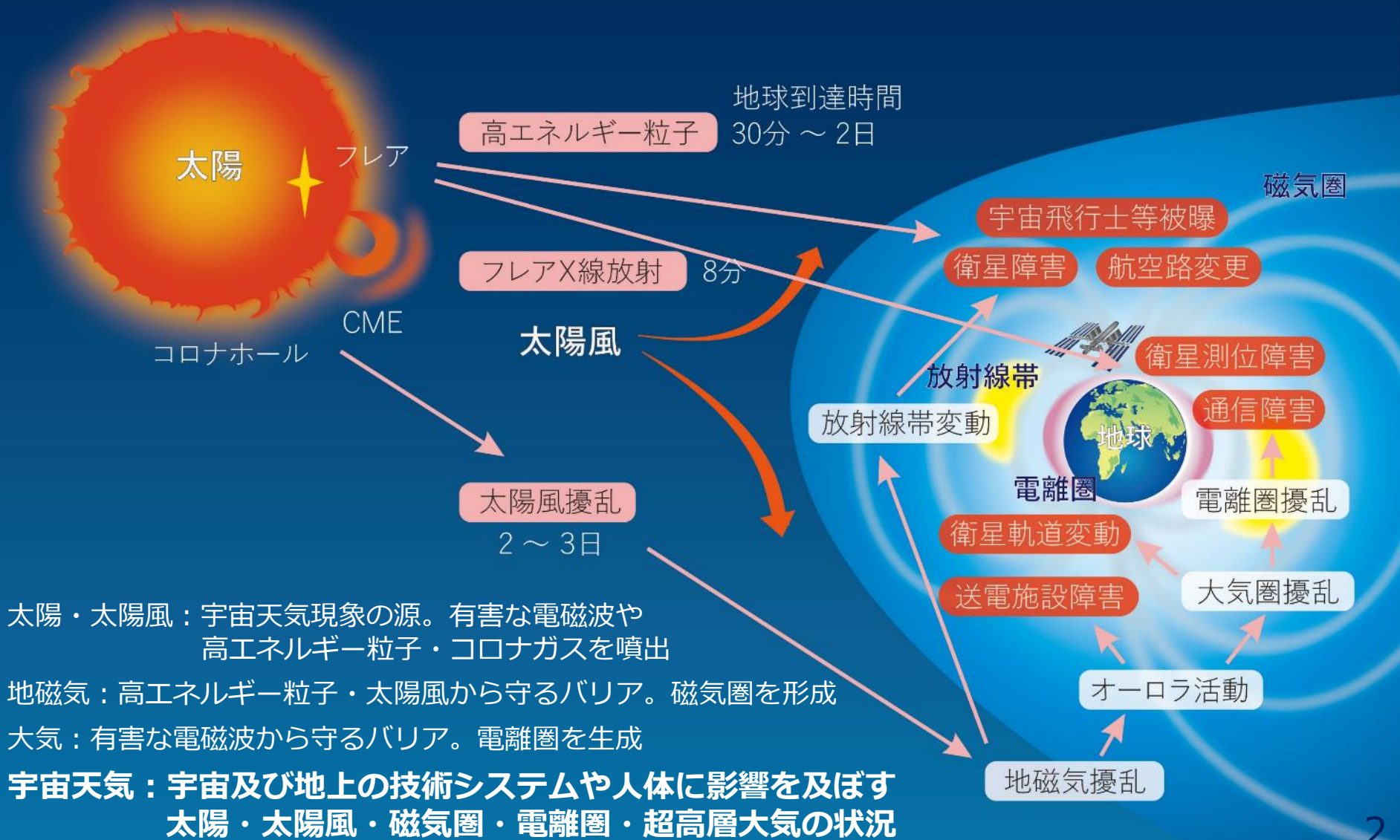
国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）

電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター

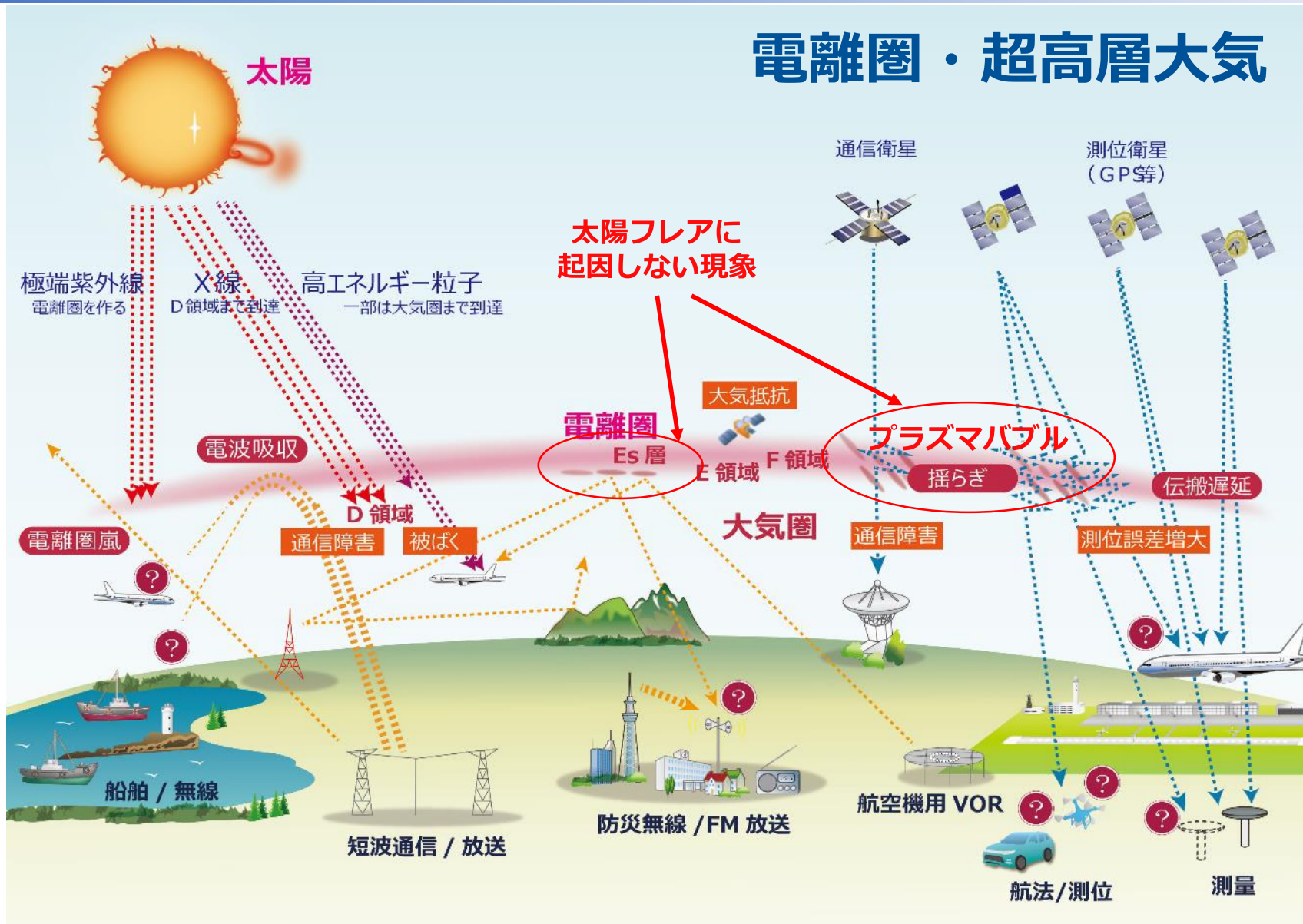
宇宙環境研究室長

津川 卓也

宇宙天気の研究領域



電離圏・超高層大気



NICT宇宙天気予報研究計画(R3-7年度)

目的：宇宙天気予報精度向上とニーズに即したサービス提供



太陽

太陽風

磁気圏・電離圏

観測：**衛星・飛行体による定常宇宙天気監視の検討**
国際協力のもと地上観測の拡充

予測：観測と数値予報モデルを用いた**データ同化手法の開発**による精度向上
過去の観測結果を教師データとした**AIを用いた経験モデル開発**

提供：ユーザーとの対話によるニーズの調査
ユーザーニーズに即した**アプリケーションの開発、情報提供**

必要とされる情報を必要とされる頻度・精度で必要とされるユーザーに提供

準天頂衛星によるアジア・オセアニア域での高精度測位

人工衛星・月・深宇宙探査への宇宙環境情報提供

宇宙天気災害ベンチマーク作成による防災・減災

課題

目標

発展

衛星による宇宙天気監視の検討



CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites)のメンバーとして現在運用中の気象衛星の配置図。赤丸で囲われた衛星は宇宙環境モニタを搭載。

太陽高エネルギー陽子センサ開発

- 衛星の運用・寿命
- 宇宙機・航空機における有人被ばく
- 主に極域での短波通信への影響

放射線帯電子センサ

- 衛星の運用・寿命
- 宇宙機における有人被ばく

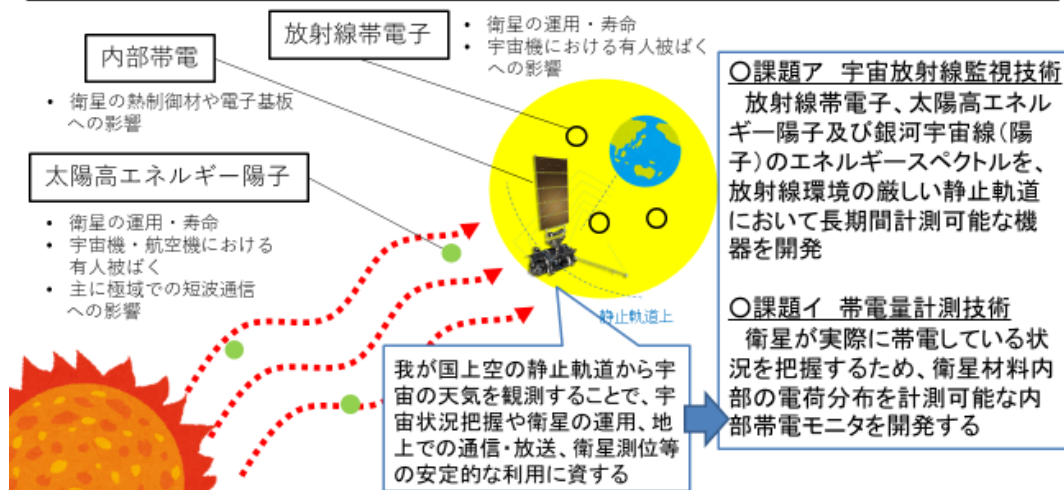
衛星帯電センサ

- 衛星の熱制御材や電子基板の影響評価

- 宇宙天気予報や社会インフラへの影響を予測するためには、衛星軌道上の宇宙環境モニタが必要となるが、日本上空には宇宙環境モニタを搭載した実利用衛星がない。
- 現状は、米国上空にあるGOES衛星のデータを利用している状況。
→ 気象庁と日本の宇宙天気を観測するための衛星搭載センサー開発について検討。

衛星による宇宙天気監視の検討

- 宇宙状況把握や衛星の運用、地上での通信・放送、衛星測位等の安定的な利用には、太陽活動、電離圏、磁気圏の状況に関するより精度の高い宇宙天気予報が重要。
- 宇宙天気の監視を静止軌道上で常時行い、必要に応じて警報を発信すること、また宇宙環境と衛星帯電の関係を詳細に調査することで、電波利用を始めとする社会インフラの安定運用に寄与することが重要。



ひまわりの高機能化研究技術開発

イメージ図

https://www.soumu.go.jp/main_content/000755476.pdf

- 内閣府の宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）「ひまわりの高機能化研究技術開発」は国土交通省（気象庁）と総務省の連名で提案。R3年度 気象庁1.3億円、総務省1.2億円、R3から3年間の計画。
- 総務省「令和3年度情報通信技術の研究開発：ひまわりの高機能化研究技術開発」にNICTと東京都市大学の共同提案が採択（9月）、EM開発を推進中。
- FM製造・打ち上げ・定常運用を実現するための枠組みを検討。

ひまわりの高機能化技術開発（EM開発）

FM開発・統合試験



打ち上げ 運用・サービス開始

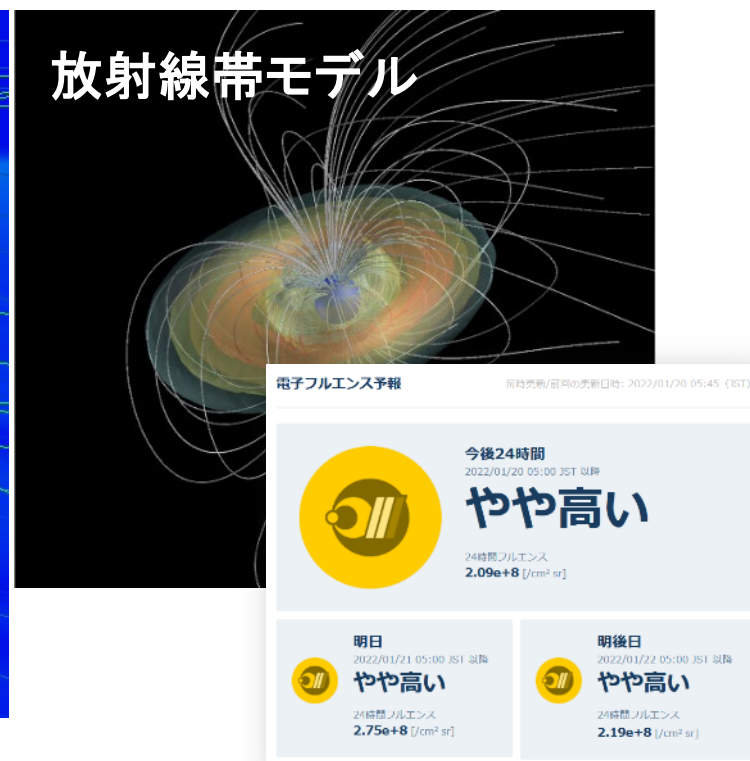
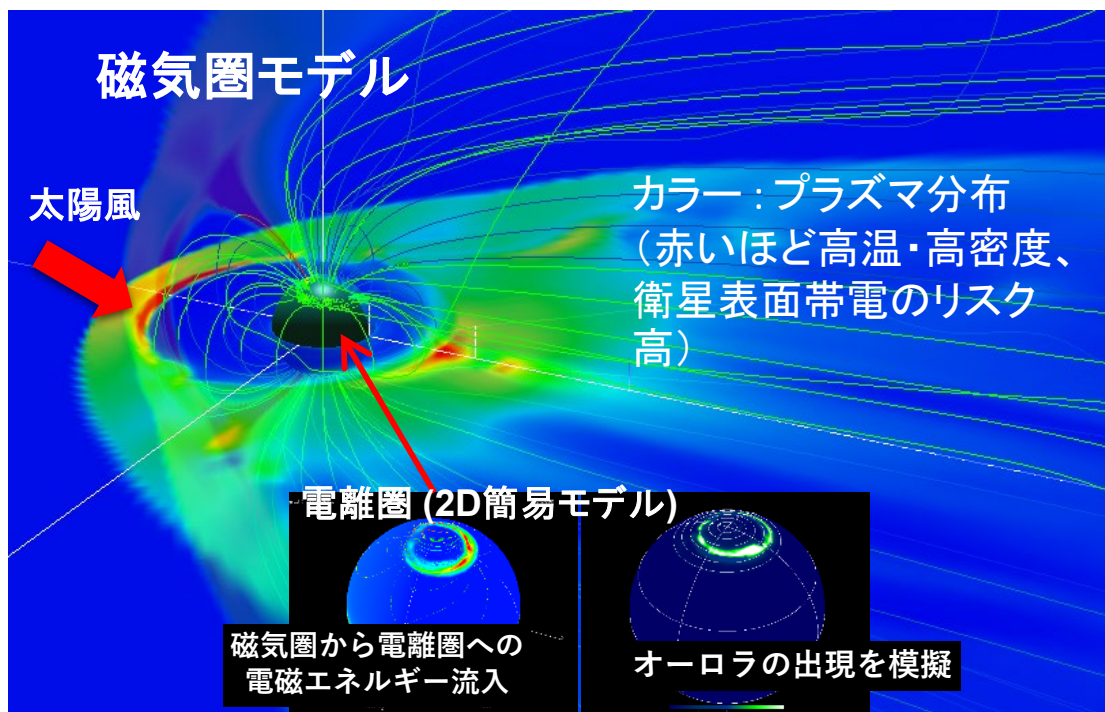


2021～（期間：3年間）

2024

2028（予定）

磁気圏・放射線帯モデル



<https://radi.nict.go.jp/>

- L1地点のDSCOVR衛星の太陽風データを入力として、磁気圏プラズマ環境（衛星表面帯電の要因）、極域への電磁エネルギー流入（オーロラ等）、GICにつながる極域地磁気変動を算出。
→ 1時間先の磁気圏環境を導出

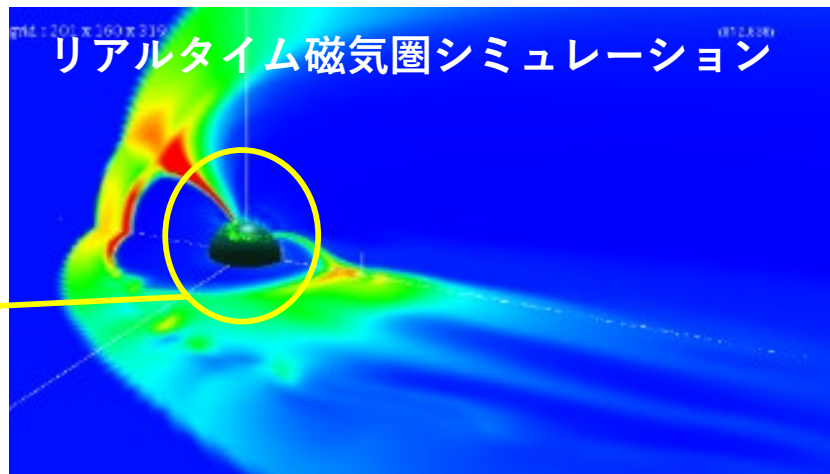
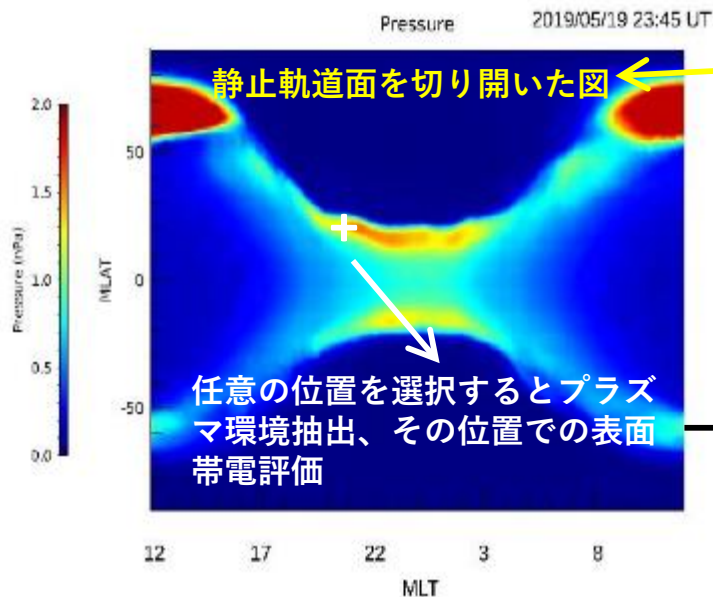
- 静止軌道上の高エネルギー電子フラックスの変動を予測。
- 衛星データを利用し、中軌道の高エネルギー電子フラックスの数日先の予測値も算出。

衛星帯電評価リアルタイム表示システム : SECURES

<https://aer-nc-web.nict.go.jp/ssc/>

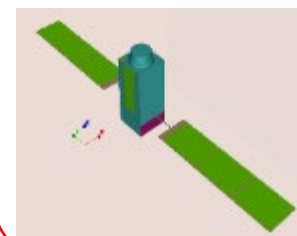
衛星表面帯電評価

衛星が密集する静止軌道のプラズマ環境を抽出し、衛星帯電モデルと組み合わせ、帯電状況を評価。
(#衛星スペックは模擬的なものを使用)



【出力イメージ】
位置 : 6.6Re, 磁気緯度10度、
経度135度
電子密度・温度 : 1/cc、10keV
イオン温度・密度 : 1/cc、20keV
表面帯電値 : 800eV

衛星帯電
モデル



→ 「ひまわりの高機能化研究技術開発」で進める静止軌道の宇宙放射線・衛星帯電量計測計画と、磁気圏・放射線帯モデルの高度化を進め、衛星事業者等ユーザーのニーズに沿う高精度な情報を提供

NICT宇宙天気観測網



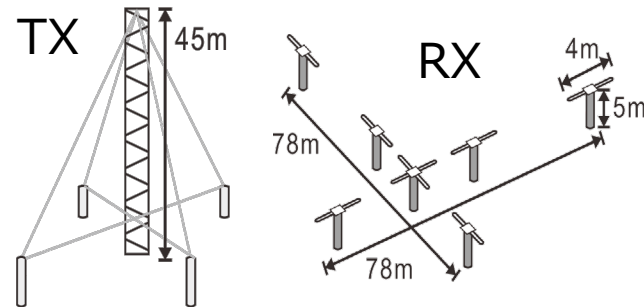
- 国際協力による宇宙天気観測網や衛星観測により、太陽・太陽風、磁気圏及び電離圏の状態をリアルタイムに監視。
- 宇宙天気の状態を迅速かつ正確に把握する技術を研究開発。

地上観測：国内定常電離圏観測

イオノゾンデ国内定常電離圏観測



VIPIR2型
イオノゾンデ

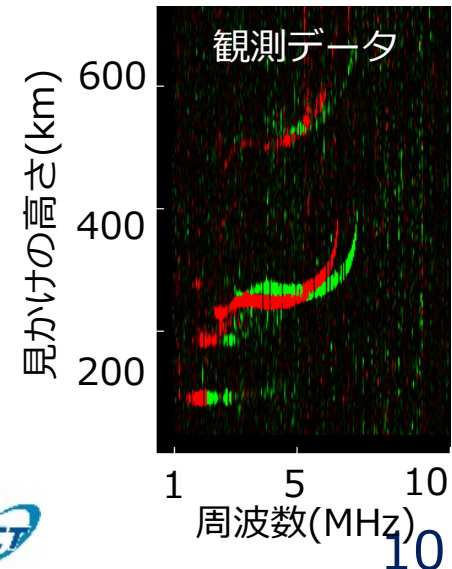
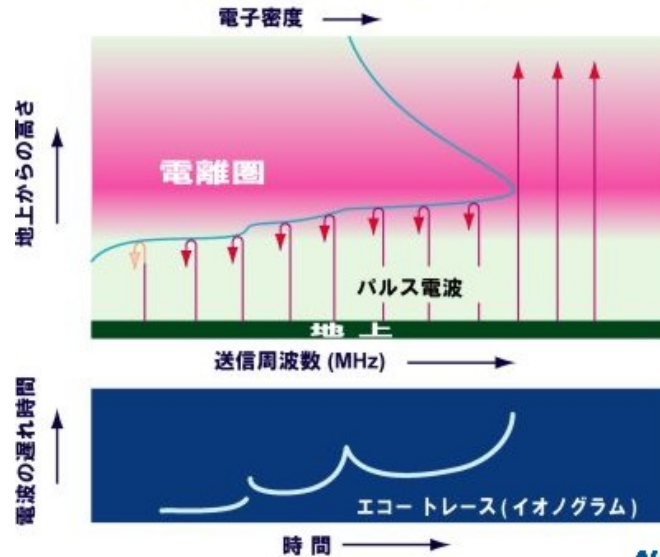


電離圏観測施設

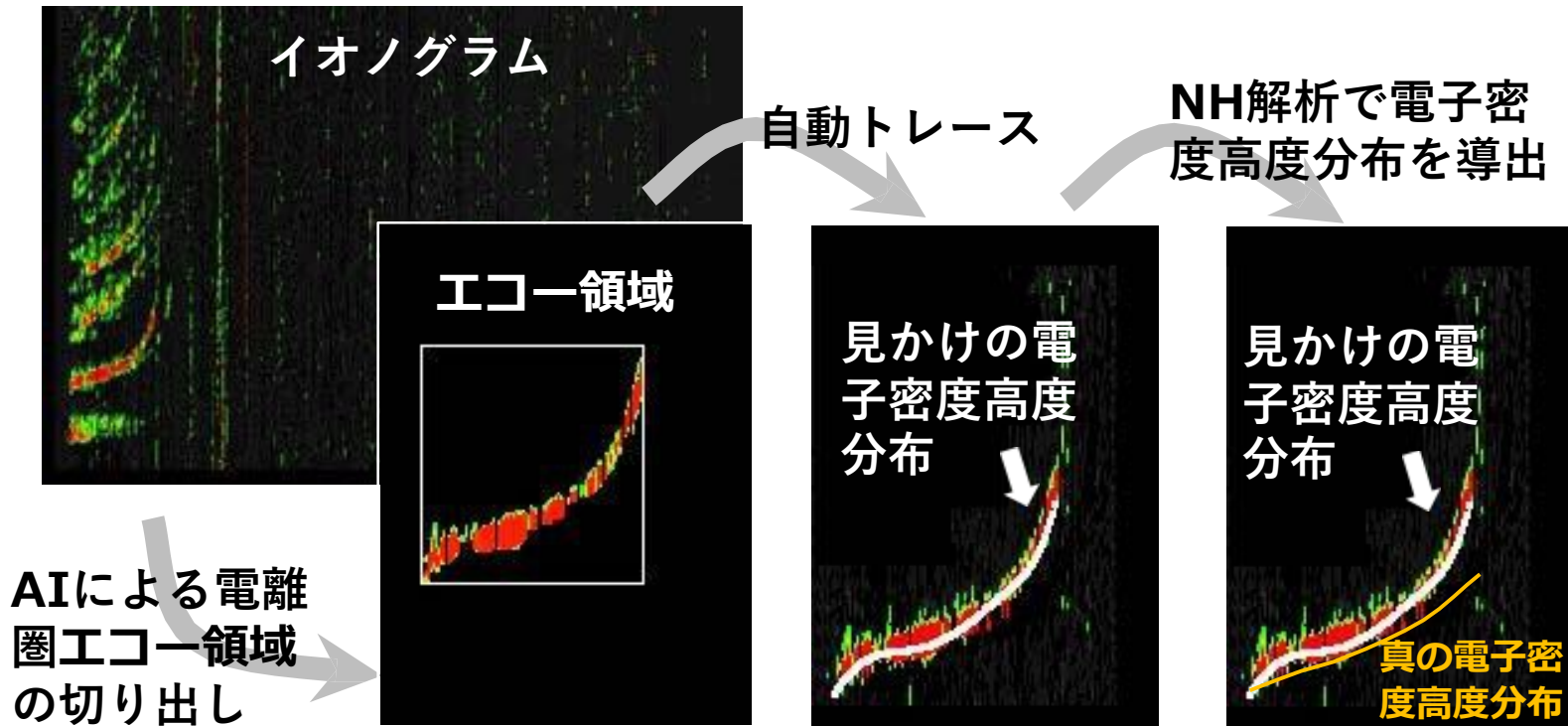


- 1930年代より電離圏観測開始し、良質で長期的なデータを持つ世界有数の観測拠点。
- 1~30MHzの間で周波数を掃引しながら電波を上空に送信し、電離圏エコーを観測し、電子密度高度分布を計測する。
- 2020年より観測間隔を15分から5分に向上。

電離圏の観測 (イオノゾンデ)



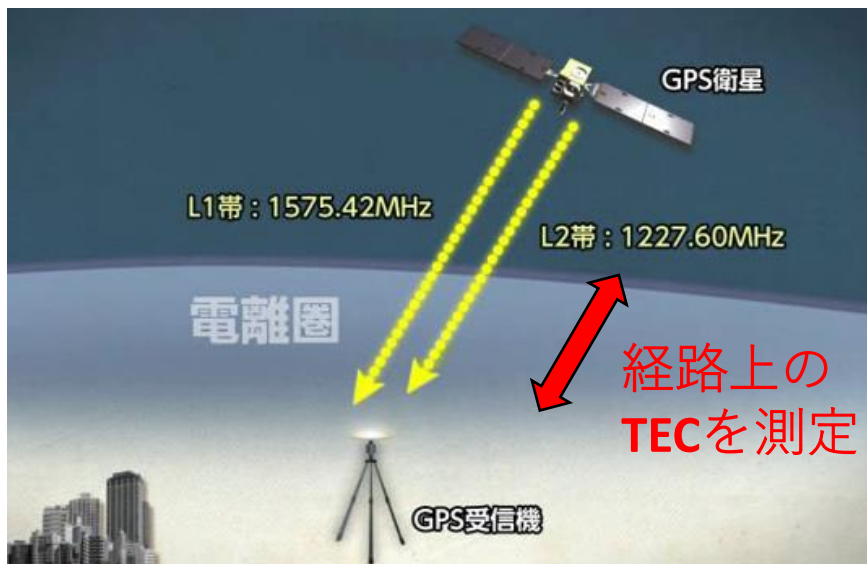
電離圏パラメータ自動抽出の高度化



- AI技術を用い熟練が手動読取したデータを学習し、イオノグラムから電離圏エコー領域を切り出すことに成功。NH解析により、自動で電離圏密度の高度分布を導出するシステムを構築。定常運用化を進める。
- 長年の課題であったイオノグラム自動読み取り成功率・精度が飛躍的に向上。

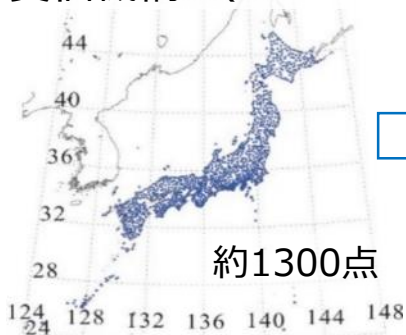
地上観測：GNSS電離圏全電子数観測 *NICT*

GNSS受信機網を利用した電離圏全電子数（TEC）観測

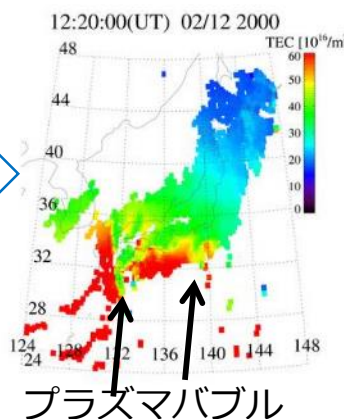


- 電波の周波数に応じた屈折率の変化を利用し、GNSS衛星の2周波のデータから、電波経路上の全電子数（TEC）を測定。
- GNSS受信機網のリアルタイムデータを利用し、高空間解像度で面的な電離圏の観測データを提供。

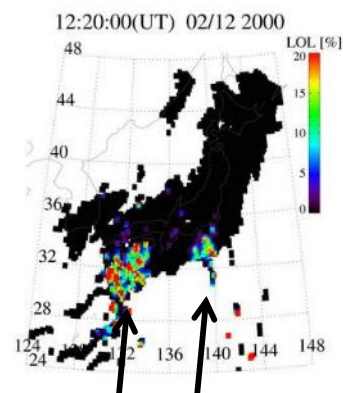
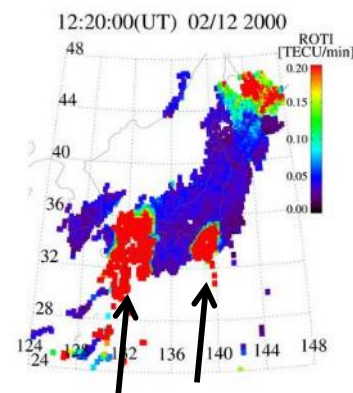
国土地理院のGNSS
受信機網（GEONET）



TEC絶対値



電離圏擾乱指数 GPSロック損失率



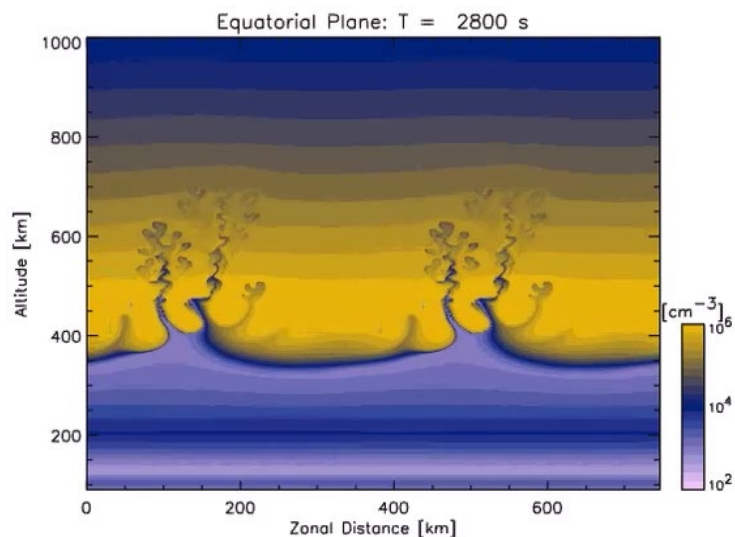
国際協力のもと観測の拡充

東南アジア域電離圏観測網 (SEALION) (SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network)

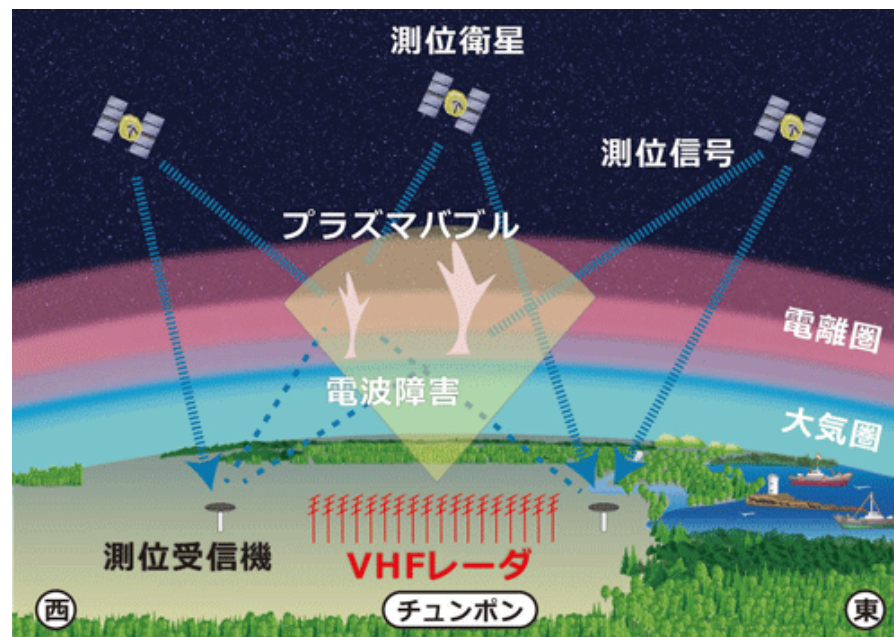


- 赤道域で発生し日本まで到達し得るプラズマバブルなどの低緯度域電離圏現象を観測するため、国際協力のもと東南アジア域に電離圏観測網を構築。
- NICTのASEAN IVOプロジェクトを活用し、タイが主導して周辺国へGNSS受信機を設置するなど、観測網が広がりつつある。

GNSS測位の安定利用に向けたプラズマバブル監視

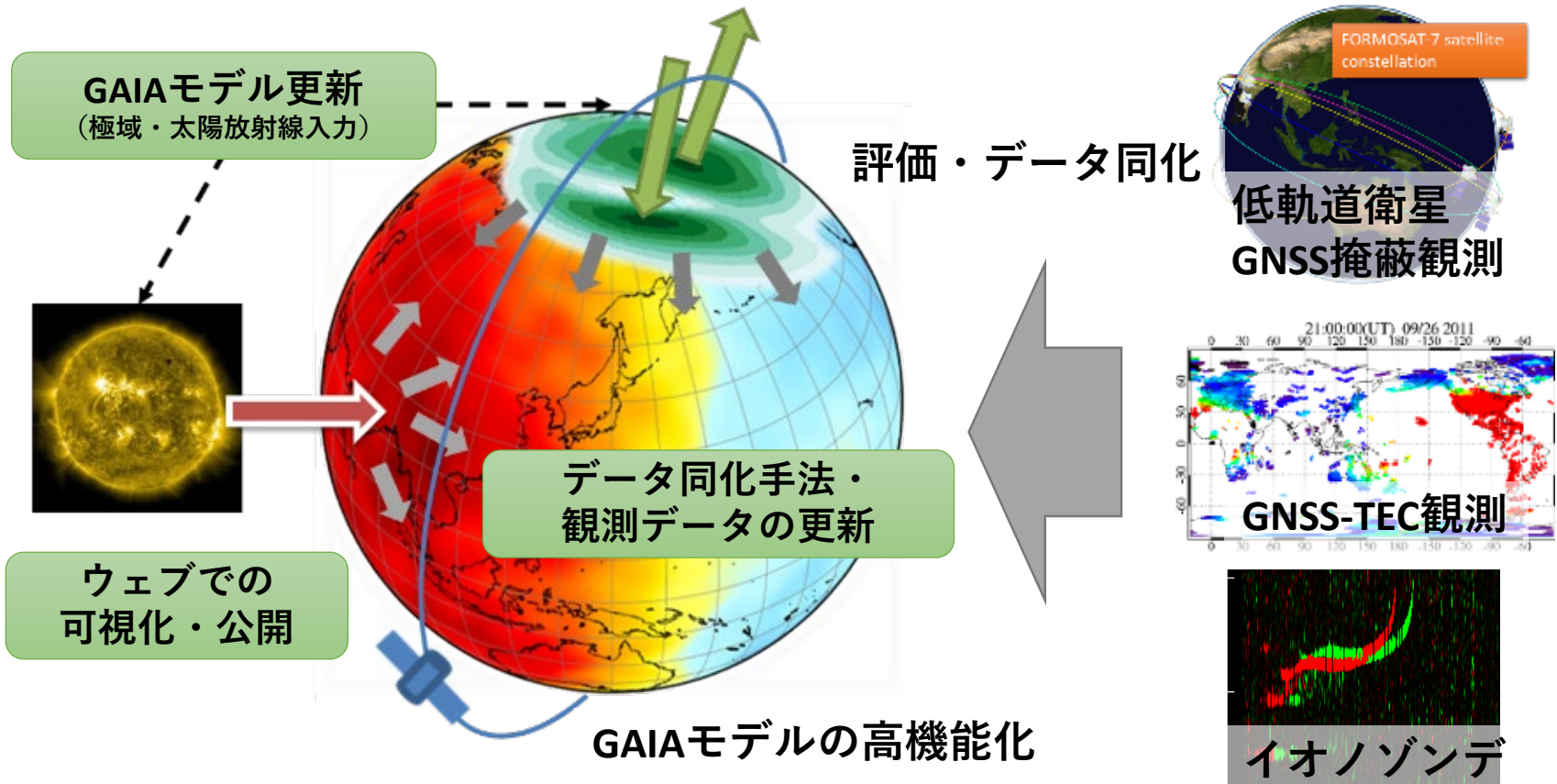


プラズマバブル生成のシミュレーション
[Yokoyama et al., 2015]



- プラズマバブルが発生する磁気赤道に近いタイ・チュンポンへプラズマバブル監視用VHFレーダーを設置（2020年1月）。
- イオノゾンデ、GNSS受信機、VHFレーダーを利用したプラズマバブル監視及びGNSS測位の安定した利用に向けた指標や補正技術の研究開発を進める。

GAIAデータ同化モデルの実運用化



- 大気圏・電離圏結合モデル (GAIA) の空間分解能向上など高度化を進めるとともに、データ同化モデルプロトタイプを開発。
- 観測データを入力パラメータとして、宇宙天気予報のためのGAIAデータ同化モデルの実運用をR7年度までに開始。

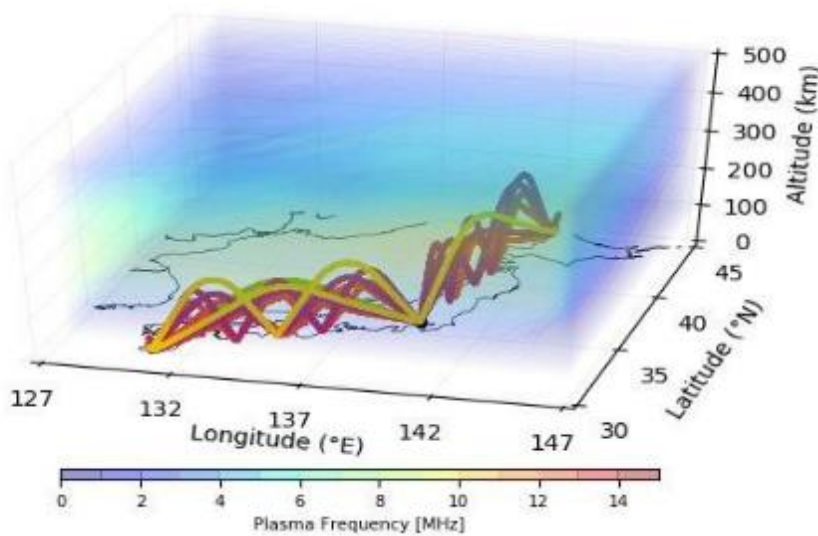
電波伝搬ユーザー向けアプリケーション

電波伝搬シミュレータ：HF-START

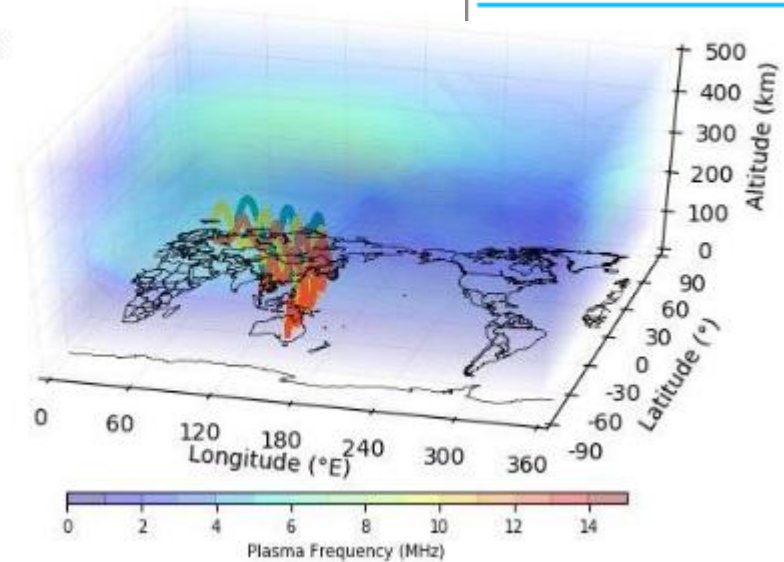
<http://hfstart.nict.go.jp/>



● 3 MHz
● 6 MHz
● 9 MHz
● 12 MHz

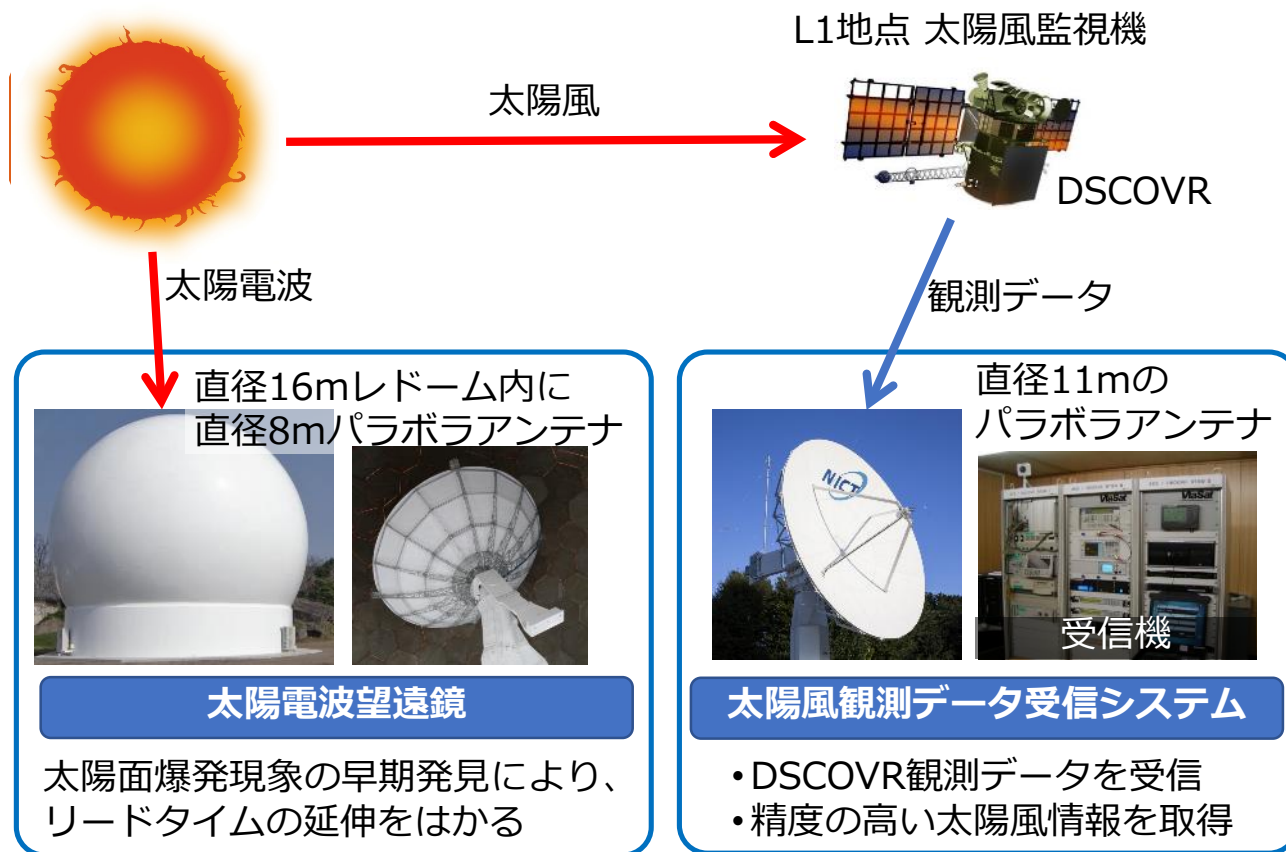


● 3 MHz
● 9 MHz
● 15 MHz



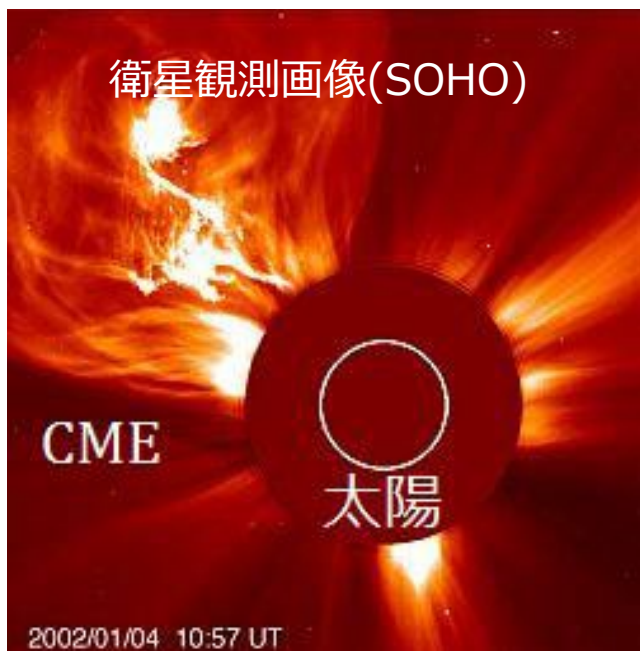
- 任意の2地点間における短波帯電波伝搬のリアルタイム推定が可能な電波伝搬シミュレータウェブツール。過去の日時も指定可能。
- 日本上空版の電子密度分布は、GEONETを利用したリアルタイム電離圏トモグラフィーにより導出。
- 全球版は、GAIAによるリアルタイム電離圏データを利用。1日先までの予測も可能。

太陽電波観測・太陽風観測データ受信システム

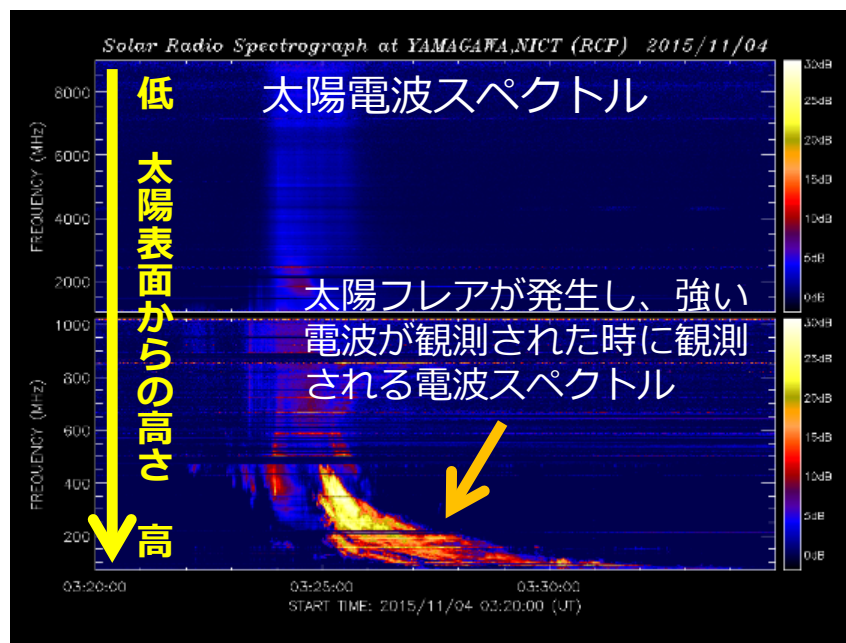


- 世界最高水準の広帯域を超高時間分解能を持つ太陽電波望遠鏡により、太陽フレア発生を約8分後に検知、早期警戒態勢をとる。
- L1地点に位置する米国・DSCOVR探査機により取得される精度の高い太陽風観測データを、国際協力により24時間途切れることなく取得・共有。

太陽電波スペクトル解析によるCME発生・到達予測



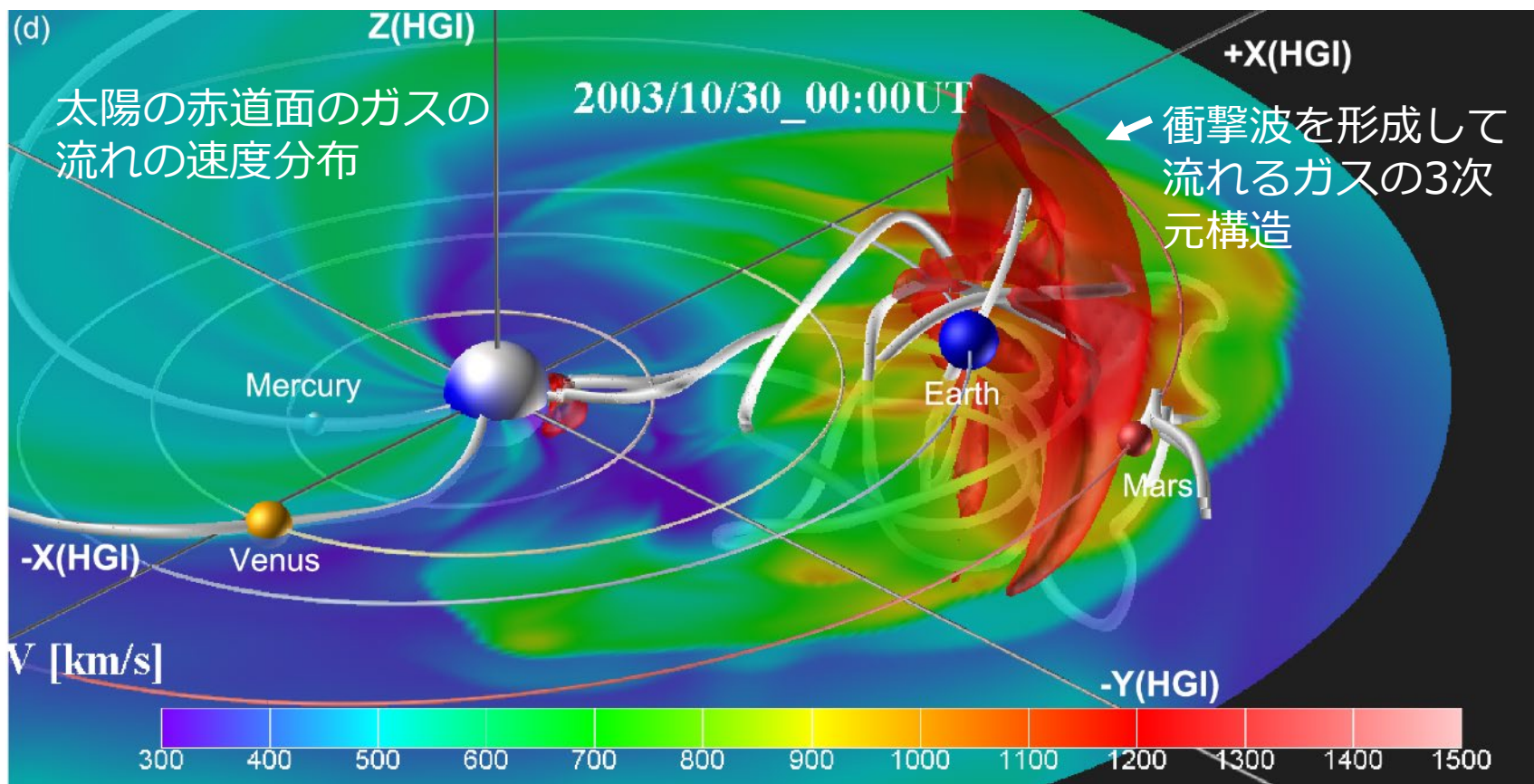
CME噴出方向識別
⇒ CMEの見かけの速度



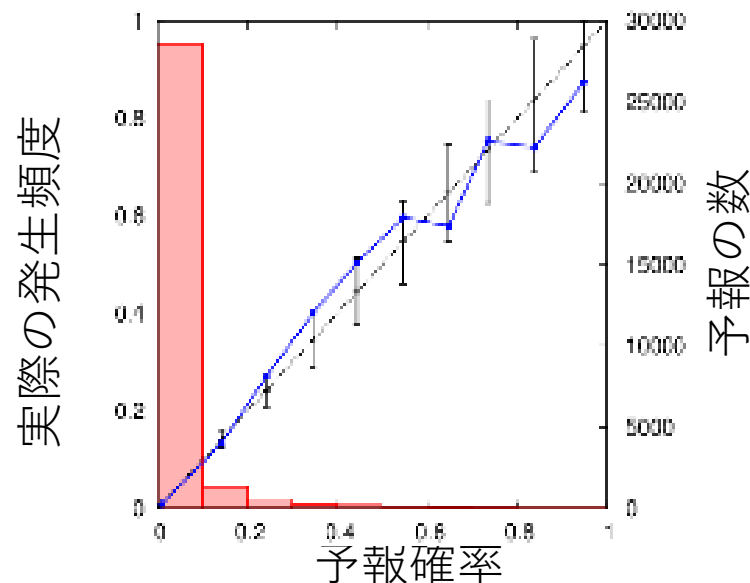
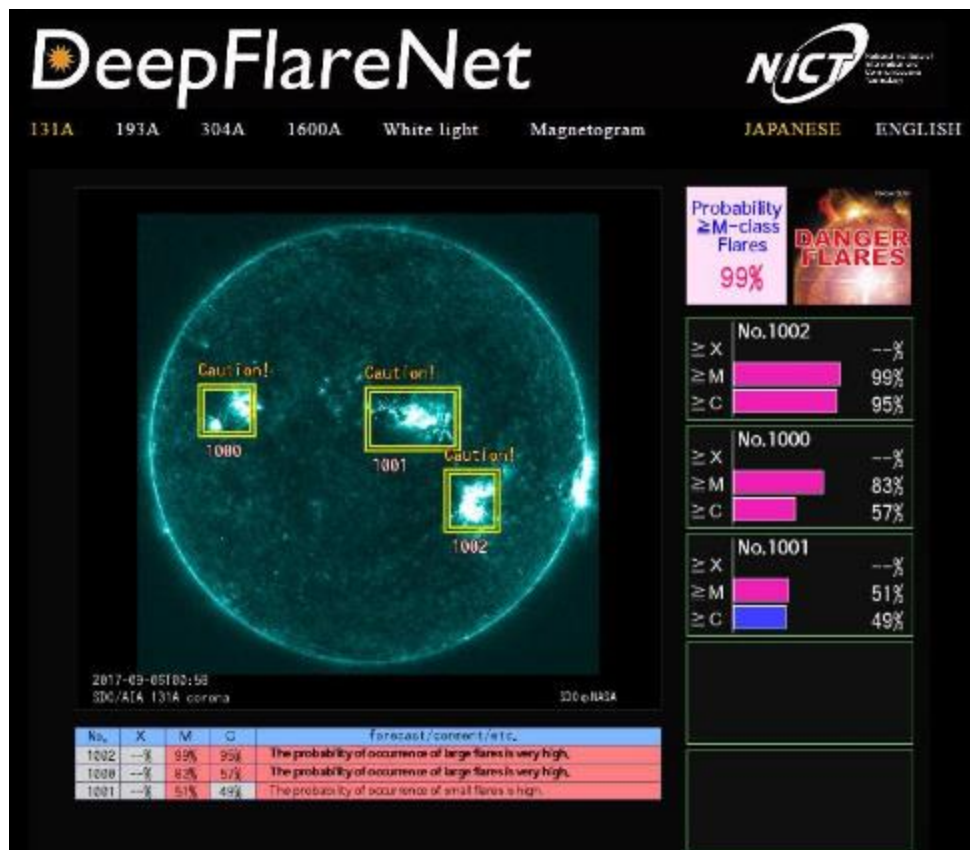
スペクトルの傾き(自動検出化)
⇒ CMEの視線方向速度

- 太陽フレアが発生し、強い電波が観測された時に観測される電波スペクトルの傾きを自動検出、太陽コロナ質量放出 (CME) の視線方向の速度を推定。
- 太陽フレア発生検知 (約8分後) に地球へのCME到来予測が可能。

コロナガス到来予測モデル



- 太陽表面の磁場の分布と太陽コロナの観測に基づいた数値シミュレーションを行い、太陽からのガスの流れの速度と磁力線の3次元構造を導出。
- 太陽コロナガスが地球へ到来する前に、複数のパターンのシミュレーションを実行してアンサンブル予測を行うことで、CMEの太陽から地球への伝搬過程を推定し、地球への影響を予測する。

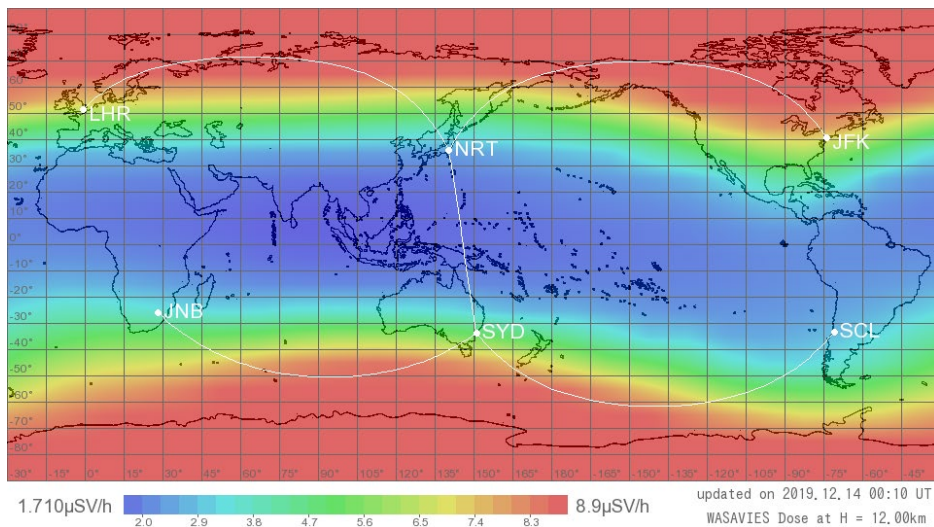


確率予報信頼度の大幅向上に成功。
[Nishizuka+2020ApJ]

- SDOの太陽画像データセット（30万枚）と深層学習法を用いた太陽フレア予報モデル DeepFlareNetを開発。宇宙天気予報での議論に利用。
- さらに、予報信頼度向上させたAI予報モデルの開発を進めるとともに、磁気圏や電離圏への応用を進めていく。

太陽放射線被ばく警報システム：WASAVIES

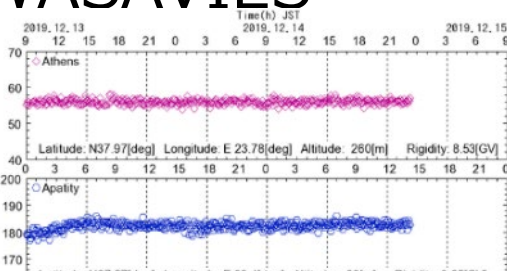
<https://wasavies.nict.go.jp/>



航空機高度の被ばく線量率

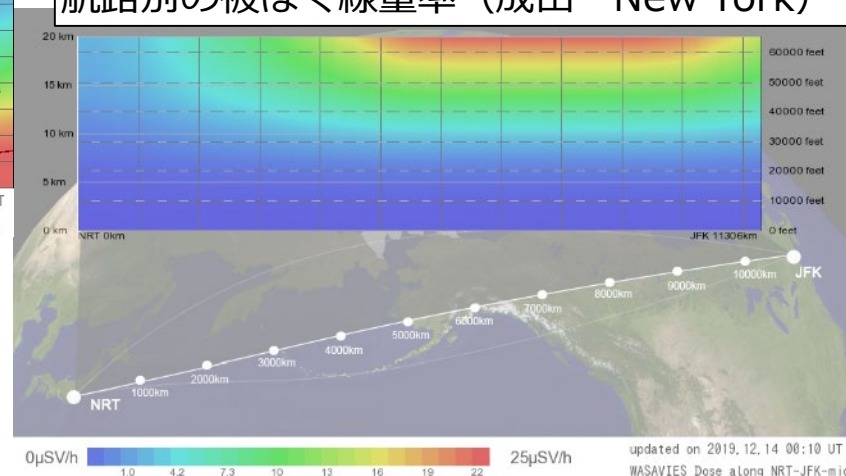
- GOES Proton fluxと地上の中性子モニタのリアルタイム観測データから大気中の任意の点における被ばく線量率を表示するシステム

- 1日1回更新、GLE発生時は5分ごとにデータを更新。GLE発生時は、発生時刻からの線量率の時間変化が確認可能。
- ICAO宇宙天気センターにおけるアドバイザリ発出に寄与。



中性子モニタの線量率時間変化

航路別の被ばく線量率（成田—New York）



- 宇宙天気ユーザーズフォーラム
 - 宇宙天気情報の正しい使い方の講習・啓発活動
 - ゲストスピーカーによる講演
 - 広く一般に制限なく参加可能
- 宇宙天気ユーザー協議会
 - PSTEPにおいて、宇宙天気情報についてユーザーとの双方向コミュニケーションを形成するために2015年に設立。2021年11月までに12回開催。
 - 宇宙天気情報に関するニーズ・シーズマッチングおよび関連アプリケーションのフィードバック等の活動を実施。
 - 各分野で更に発展した検討を行う場合には個別にNDA等を結び対応



第14回宇宙天気ユーザーズフォーラム(2019.11.11)



第8回宇宙天気ユーザー協議会(2020.2.21)

- 2021年4月より、NICTは第5期中期研究期間を開始。
- より精度の高い宇宙天気予報のための研究開発として、観測と予測についてそれぞれ2つの課題を設定し、研究開発を進めている。
 - 観測：衛星搭載センサによる定常観測に向けた取組
国際協力のもと地上観測の拡充
 - 予測：観測と数値モデルを用いたデータ同化手法による精度向上
過去の観測結果を利用したAIを用いた経験モデル開発
- 研究開発結果をユーザーのニーズに沿う形で提供するためのアプリケーションの研究開発。
- 「宇宙天気ユースフォーラム」及び「宇宙天気ユーザー協議会」の場でユーザーとの対話・ニーズ調査を進めている。