

# S-520-3 号機観測ロケット実験の初期結果報告

齋藤義文 小嶋浩嗣 小川泰信  
浅村和史 阿部琢美 石坂圭吾  
栗田怜 熊本篤志 田中真  
野村麗子 細川敬祐 松岡彩子  
横田勝一郎 Moen Joran  
Trondsen Espen Miloch Wojciech  
滑川拓

## 1. SS-520-3 号機観測ロケット実験の目的

過去の観測ロケット実験や、衛星観測によって大量の電離圏イオンが極域の電離圏特にオーロラ上空やカusp領域から磁気圏へ逃げ出していることが知られている。極域のカusp領域は、昼間側の磁気圏界面に磁力線がつながった領域であり、太陽風のエネルギーが直接注入される領域である。電離大気の加速・流出現象は、地球のみならず火星、水星を含む他惑星や月を含む衛星周辺でも起こる普遍的な現象であることが最近の国内外の観測で次第に明らかとなってきた。しかしながら、その流出機構については、それぞれの天体の条件で様々に変化し、それらの機構を理解することは天体周辺大気の変遷を理解・予測する上で必要不可欠である。SS-520-3 号機観測ロケット実験は、地球で主要な電離大気流出が起きている極冠オーロラ上空又は極域カusp周辺領域において、電離大気流出の原因として理論的に想定されている波動-粒子相互作用を、人工衛星ミッションに向けて新たに開発された観測装置を用いて、世界で初めてその場で検出、解明することを目指したミッションである。これらの波動-粒子相互作用は、高度 700km 以上の高度で効果的に起こることが予想されているため、本実験には最高高度 700km を超えることのできる 2 段式の SS-520 ロケットが必要である。また、朝側の極冠オーロラ上空・昼間側のカusp領域を通過するように SS-520 を打ち上げることのできる射場はスピッツベルゲン諸島スバルバードのニーオレスン実験場しかない。なお、本観測ロケット実験は、地上のレーダや光学観測を含む包括的な観測キャンペーンの一環として打ち上げられ、Grand Challenge Initiative-Cusp (GCI-Cusp) と呼ばれる国際的な共同科学観測プロジェクトにも参加している。

図 1 に搭載観測装置の PI 部ブロック図を示す。SS-520-3 観測ロケットには、デジタル方式フラックスゲート磁力計 (DFG)、低周波波動解析システム (LFAS: Low Frequency Analyzer System)、熱的イオン分析器 (TSA: Thermal Ion Spectrum Analyzer)、低エネルギーイオン/電子計測器 (LEP: Low Energy Particle experiment)、低エネルギーイオンエネルギー質量分析器 (IMS: Ion Mass Spectrometer)、高速ラング

ミュアプローブ (FLP : Fast Langmuir Probe)、針状ラングミュアプローブ (NLP : Needle Langmuir Probe)、高周波プラズマ波動・インピーダンスプローブ (PWM : Plasma and Wave Monitor) の各観測装置と、姿勢決定のための太陽センサー (SAS : Sun Aspect Sensor) を搭載する。このうち、NLP はノルウェーから提供される国外の観測装置である。また、LFAS と TSA/IMS の双方で取得されるデータを高速にメモリに保存し、メモリに保存されたデータを地上に送って解析することで、これらの観測装置は、WPIA (Wave Particle Interaction Analyzer : 波動粒子相関器) として機能する。

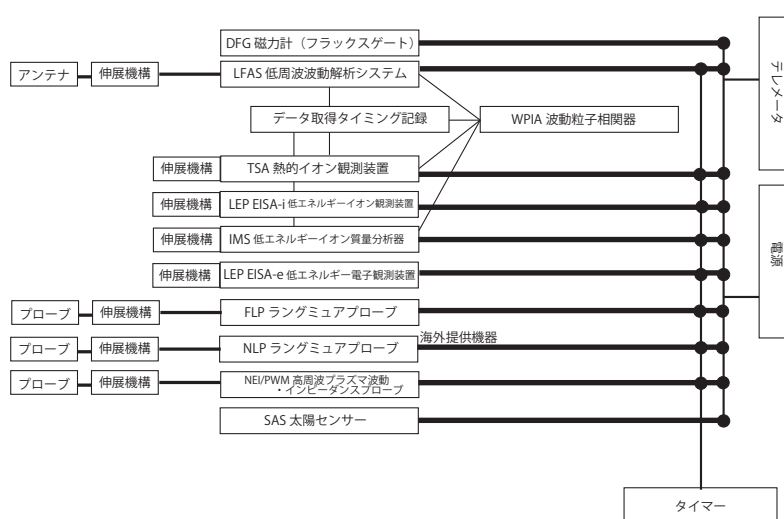


図 1 SS520-3 搭載観測装置ブロック図

## 2. SS-520-3 号機観測ロケット実験フライトオペレーション概要

SS-520-3号機観測ロケットは2021年11月4日(木)現地時間11時09分25秒にノルウェーのニーオルスロケット実験場から打ち上げられた。実験班は、日本国内での2週間の自己隔離の後、10月8日の飛行機でオスロに到着。その後空港近くのホテルでの10日間の隔離を経て射場のあるニーオルスンに向かい、10月20日にメンバー全員が到着した後、急ピッチで打ち上げに向けての準備が始まった。図2にランチャーに搭載されたSS-520-3号機観測ロケットの写真を示す。2週間の打ち上げウィンドウ開始前日の11月2日には電波テストが実施されたが、天気は大荒れ・吹雪の状態で、ランチャーを立てることができなかった。翌3日のウィンドウ初日も風が強く、打ち上げは断念することとなった。地上の天気の条件に加えて、ターゲットとなるイオンの加速・加熱の起こる磁気圏のカスプ領域がロケット軌道の頂点付近に位置するという打ち上げ条件は地球の磁気的な活動度がかなり高くないと満たされないことから、理想的な打ち上げタイミングを見つけるのはかなり困難であると予測していたが、非常に幸運なことに、ウィンドウ

開始の1日前に太陽でMクラスのフレアが発生ししかもこのフレアに伴いHalo CMEが太陽から地球に向けて放出された。この結果、11月4日は磁気嵐となり、地球の磁気的な活動度が非常に高くなり打ち上げの条件が満たされることとなった。図3に、SS-520-3観測ロケットが打ち上げられた時の、太陽風のデータを示す。一方でこの日の天気予報は風も強く打ち上げは絶望的であると思われたが、予報よりも早く天候が回復したことで、もともと予定していた打ち上げ時間を1時間30分延長してもらい打ち上げることができた。ロケットは無事打ち上がり、飛行中もいい条件が続き、搭載機器もほぼ全て正常に動作した。SS-520-3号機観測ロケット実験は、極冠オーロラ上空又は極域カस्प周辺領域をターゲットとしていたが、最終的に極域カस्प周辺領域をターゲットとして打ち上げることにし、カस्प中を飛行することに成功した。

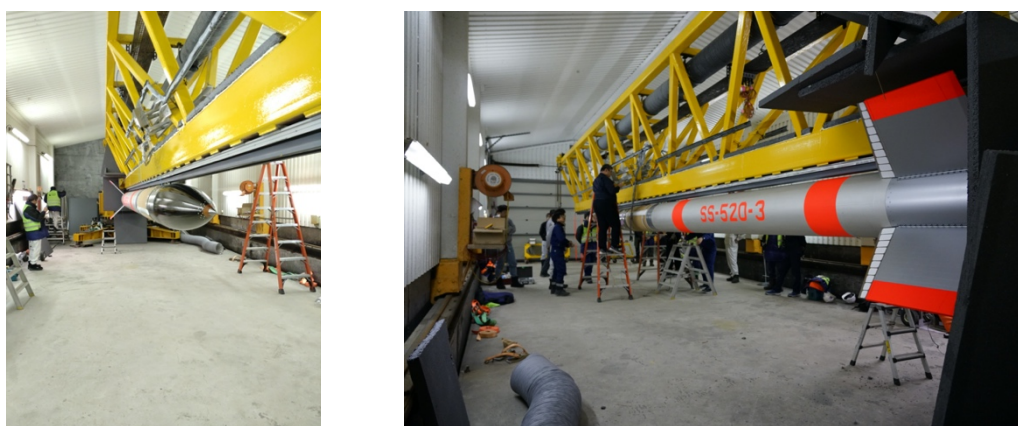


図 2 ランチャーに搭載された SS-520-3 号機観測ロケット

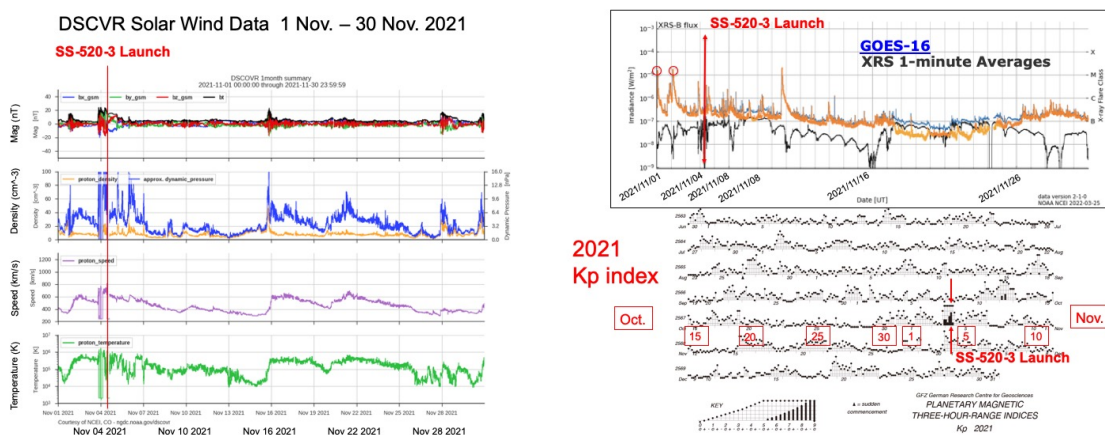


図 3 左：SS-520-3 号機観測ロケットが打ち上がった際の太陽風のデータ。右：GOES-16 で観測された太陽 X 線強度と、地球の時期活動度の指標である Kp 指数。打ち上げ2日と3日前に発生した M クラスフレアと、2日前のフレアに伴って太陽から放出された Halo CME の地球到達によって磁気嵐が発生し、良い条件の下で打ち上げることができた。

### 3. SS-520-3 号機観測ロケットの飛翔結果概要

SS-520-3 号機観測ロケットはほぼ予定していた軌道に沿って飛翔し、到達最高高度も要求の 700km 以上を満たす 742km に、打ち上げ後 487 秒に到達した。図 4 に SS-520-3 号機観測ロケットの軌道を示す。

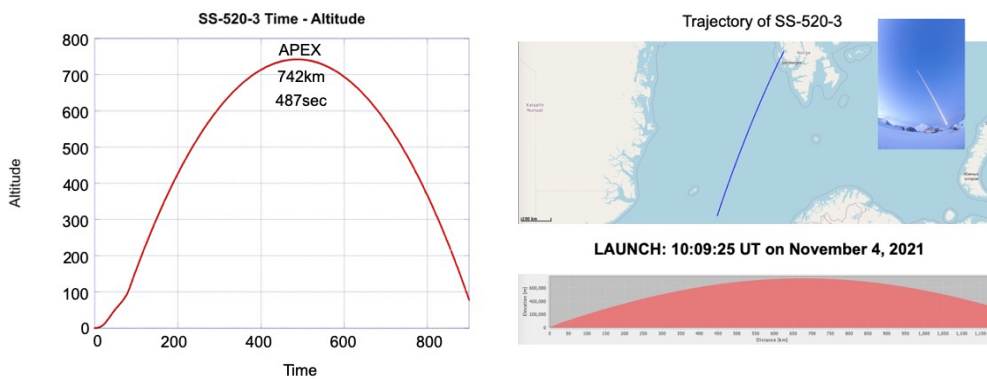


図 4 SS-520-3 号機観測ロケットの軌道

### 4. SS-520-3 号機観測ロケットの観測結果概要

SS-520-3 号機観測ロケットの打ち上げタイミングは、EISCAT SVALBARD レーダーで観測された、観測ロケットの軌道上の最高高度付近の領域と磁力線につながった、350 km 高度の領域のデータを見ることで決定した。図 5 に打ち上げ時のレーダー観測データを示す。打上げ時刻(10:09:25 UT)の電子温度の赤色は、電子温度が上昇していたことを表しており、イオン流出を引き起こす降下電子が生じていたことを示している。

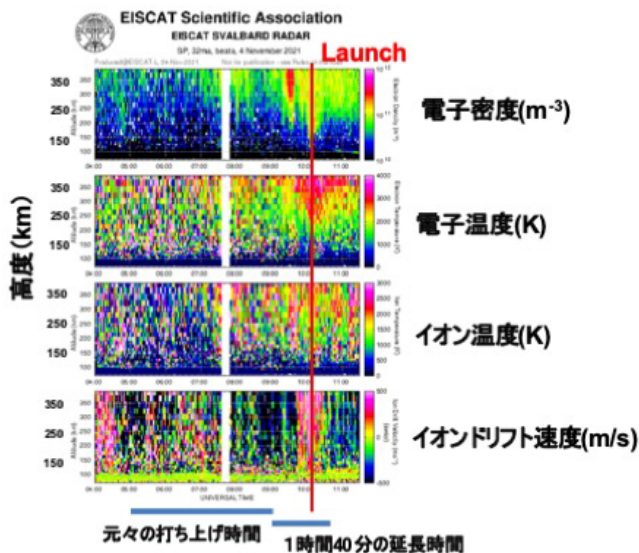


図 5 打ち上げ時に EISCAT SVALBARD レーダー (32m) で観測されたデータ。EISCAT レーダーの高度 350 km の観測領域が、ロケット軌道上の最高到達地点付近での観測となる。

図 6 に搭載観測装置である、低エネルギーイオン、電子の観測データを示す。LEP-EISA-i、IMS のデータには、カスプ領域に特有の高緯度でエネルギーが低く、低緯度に行くに

したがってエネルギーが上がって行く降下イオンが観測されており、これらのデータから、SS-520-3 観測ロケットがカスプの観測に成功したことがわかる。

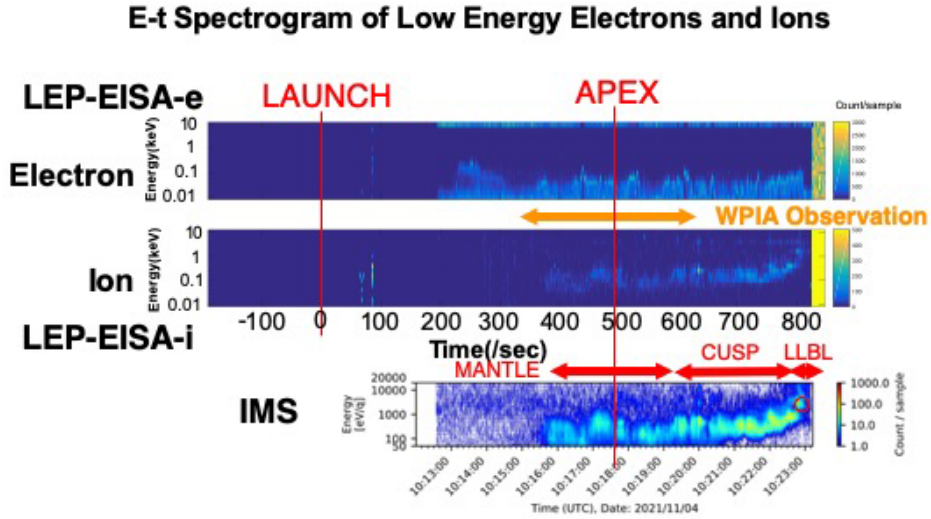


図 6 SS-520-3 号機観測ロケットがカスプ領域を飛行したことを示す観測データ。

図 7 には搭載観測装置である DFG、FLP、TSA の観測データを示す。

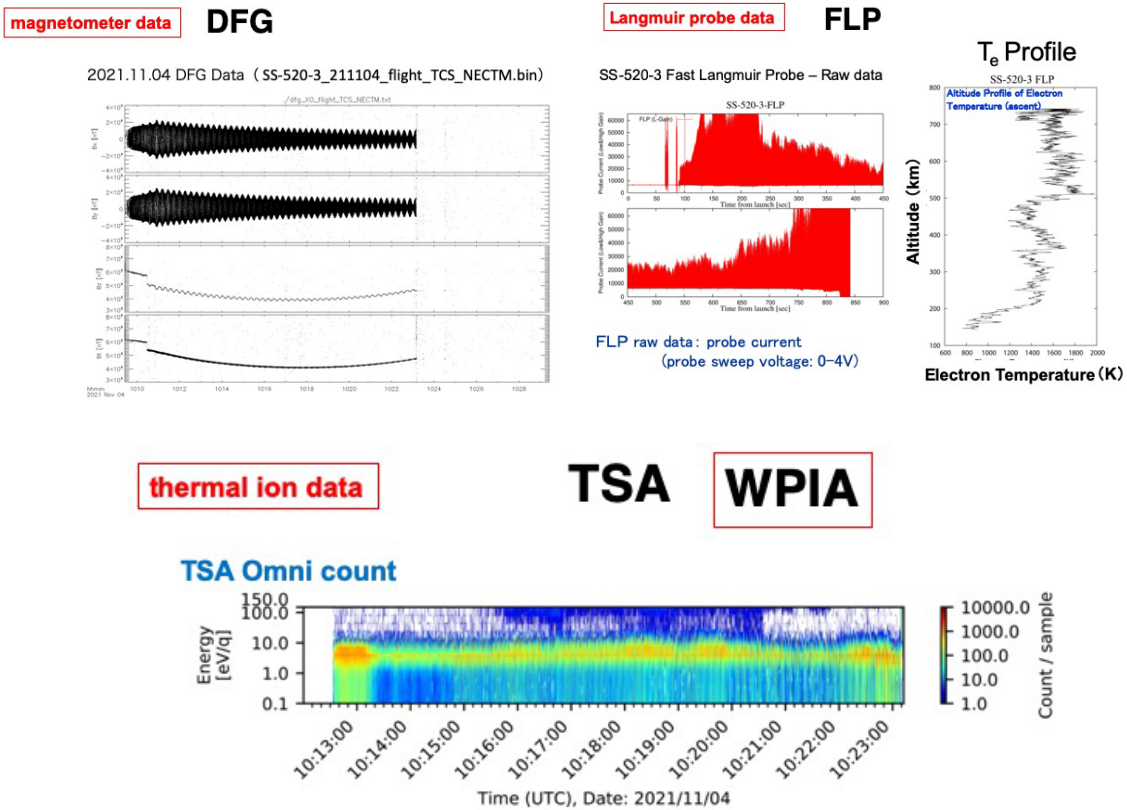


図 7 磁デジタル方式フラックスゲート磁力計 DFG、高速ラングミュアプローブ FLP、熱的イオン分析器 TSA のデータ。

図 8 には NEI/PWM と LFAS の観測データを示す。

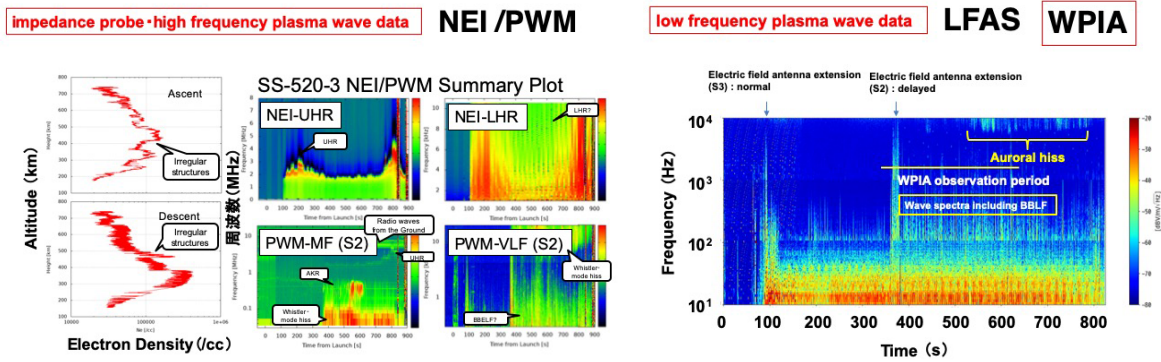


図 8 左図：インピーダンスプローブ・高周波波動モニターNEI/PWM の観測データ。右図：低周波波動解析システム LFAS の観測データ。

低周波プラズマ波動観測装置 LFAS のアンテナ 4 本のうち 2 本が伸展しなかったが、伸展した 2 本のアンテナで計測された観測データを用いることで、予定していたデータの解析は問題なくできる見込みである。伸展しなかった 2 本のアンテナについては原因の究明中であるが、これを究明することで今後の観測ロケット・衛星計画搭載観測装置の開発において役立つ貴重なデータが得られることになる。

## 5. まとめ

SS-520-3 号機観測ロケットは 2021 年 11 月 4 日 10:09:25UT にノルウェースピッツベルゲン島のニーオルスンから打ち上げられた。ターゲットとしていたカスプを飛行することができ、搭載観測装置はほぼ全て観測データの取得に成功したことから、今後の詳細なデータの解析の結果が期待できる。

今回の実験は、コロナウイルス禍下における実験となり、ノルウェー宇宙庁、アンドーヤスペース、在ノルウェー大使館、国立極地研究所、JAXA内部の各部署等から多大なご支援とご協力を頂き、実施することができた。この場を借りて深く感謝する。