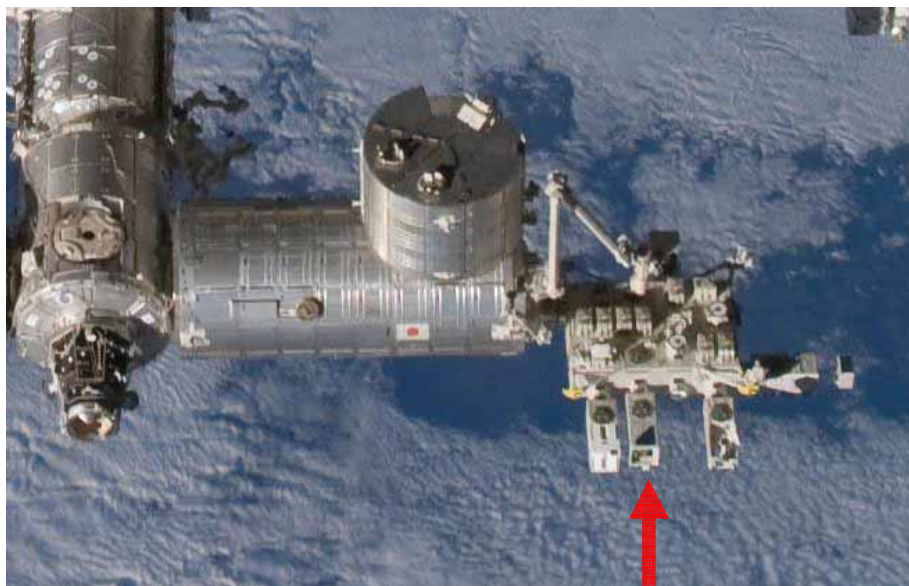


超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) の サブミリ波受信系異常の現状について



SMILES

平成22年 5月26日

情報通信研究機構

理事 熊谷 博

宇宙航空研究開発機構

理事 白木 邦明

目次

1. 概要
2. SMILES運用経緯
3. サブミリ波受信系異常後の経緯
4. 調査進捗状況
5. SMILES実験ミッションへの影響評価
6. 今後の計画

概要

・超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES):
Superconducting Submillimeter-Wave Limb-
Emission Sounder

・情報通信研究機構(NICT)と宇宙航空研究
開発機構(JAXA)による共同開発

・成層圏のオゾン破壊の理解のため大気微量
成分の観測が重要
→非常に微量なため従来の衛星観測では
とらえられないものがある

・従来の衛星にはない高い測定感度が必要
→宇宙での超伝導動作による低雑音での大気観測技術を実現・実証

SMILESプロジェクトの目的

- 4K機械式冷凍機と超伝導技術を用いたサブミリ波帯リム放射サウンダの世界で初めての軌道上技術実証
- 成層圏大気微量気体成分の空間分布の全地球的規模における同時観測



SMILESのハードウェア開発分担

EM、PFM開発分担：

JAXA	NICT
<ul style="list-style-type: none">・NICTが担当する部分以外のSMILES構成部の開発・サブミリ波受信系インテグレーション・SMILESシステムインテグレーション・SMILES試験装置の開発	<ul style="list-style-type: none">・受信部バイアス電源の開発・常温アンプの開発・サブミリ波局部発振器系の開発・常温光学系の開発・冷却光学系の開発・中間周波変換増幅系の開発

- SMILESミッションシステムは、JAXAとNICTが共同して設計した。
- BBM開発では、下記以外は、上の表と同じ：
 - 中間周波変換増幅系の開発→JAXA
 - サブミリ波受信系インテグレーション→NICT

SMILES運用経緯

- 平成21年9月11日 H-IIBによる打ち上げ
- 平成21年9月25日 「きぼう」JEMへ取り付け。電源投入
- 平成21年10月10日 大気観測開始
高感度を生かし、北半球の冬季から春季にかけての成層圏オゾン他微量ガス高度分布データを取得、観測データは大気科学研究者等へ順次公開
- 平成21年11月6日 定常運用移行
- 平成22年1月21日 公募課題提案研究者へのL2(大気微量成分量)データ配信開始

サブミリ波受信系異常後の経緯

4月21日17:59 JST 定常観測中に、サブミリ波局部発振器系が、過電流検出回路の動作により待機モードとなった[事象1]。他の機器のテレメトリ等に異常は認められなかった。

4月22日17:37 JST サブミリ波局部発振器系の電源を再投入し、テレメトリを確認 → 過大な電流値が確認された[事象2]。

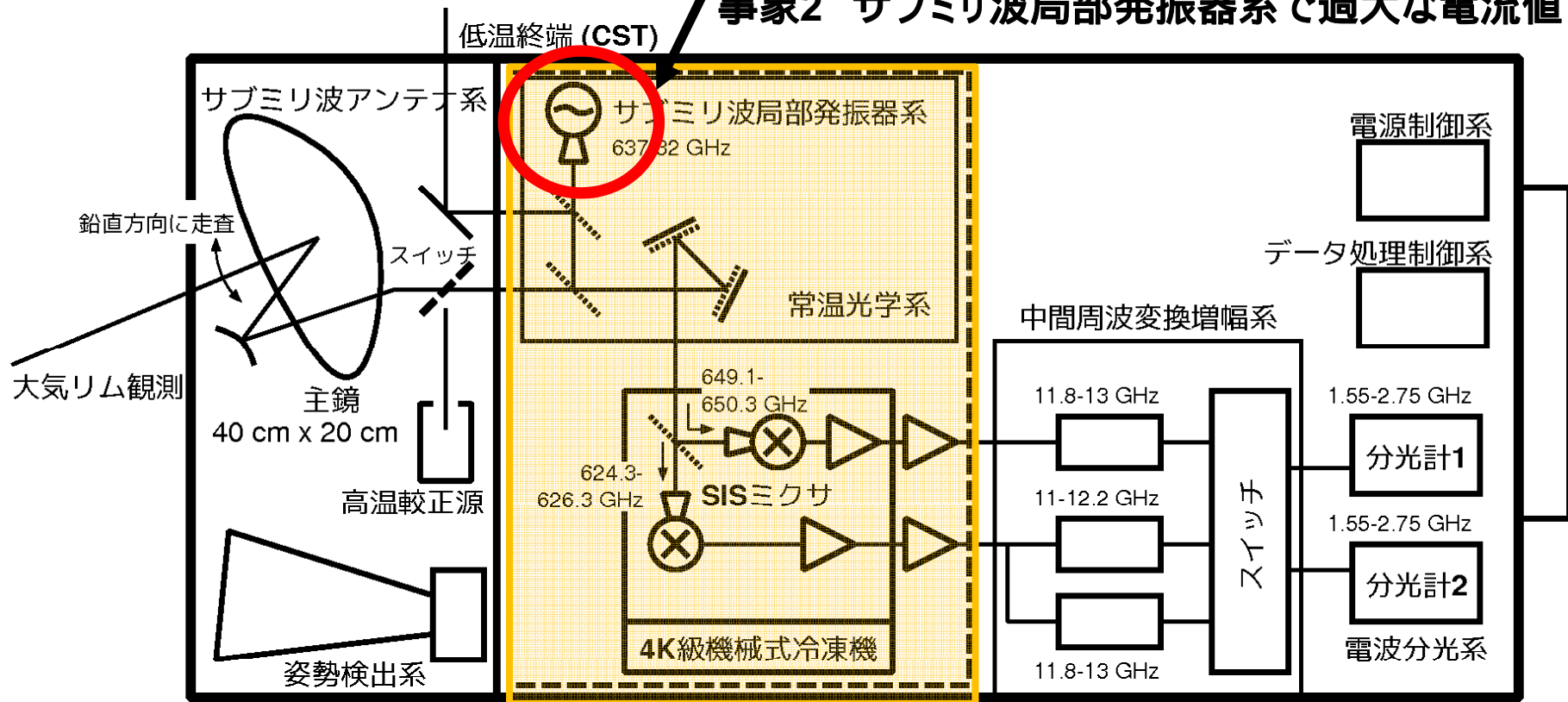
4月23日 NICT信頼性対策チーム会合にて事象を報告。SMILES対策本部(本部長:宮原理事長)設置を決定(今後必要に応じて開催予定)。

4月27日 NICT信頼性対策チーム会合にて異常箇所切り分けのための電源再投入の必要性を確認。

4月29日 10:42 JST サブミリ波局部発振器系の電源再投入実施。
→4月22日と同様、過大な電流値を確認。

調査進捗状況：異常発生箇所

- 事象1 サブミリ波局部発振器系が待機モード
- 事象2 サブミリ波局部発振器系で過大な電流値



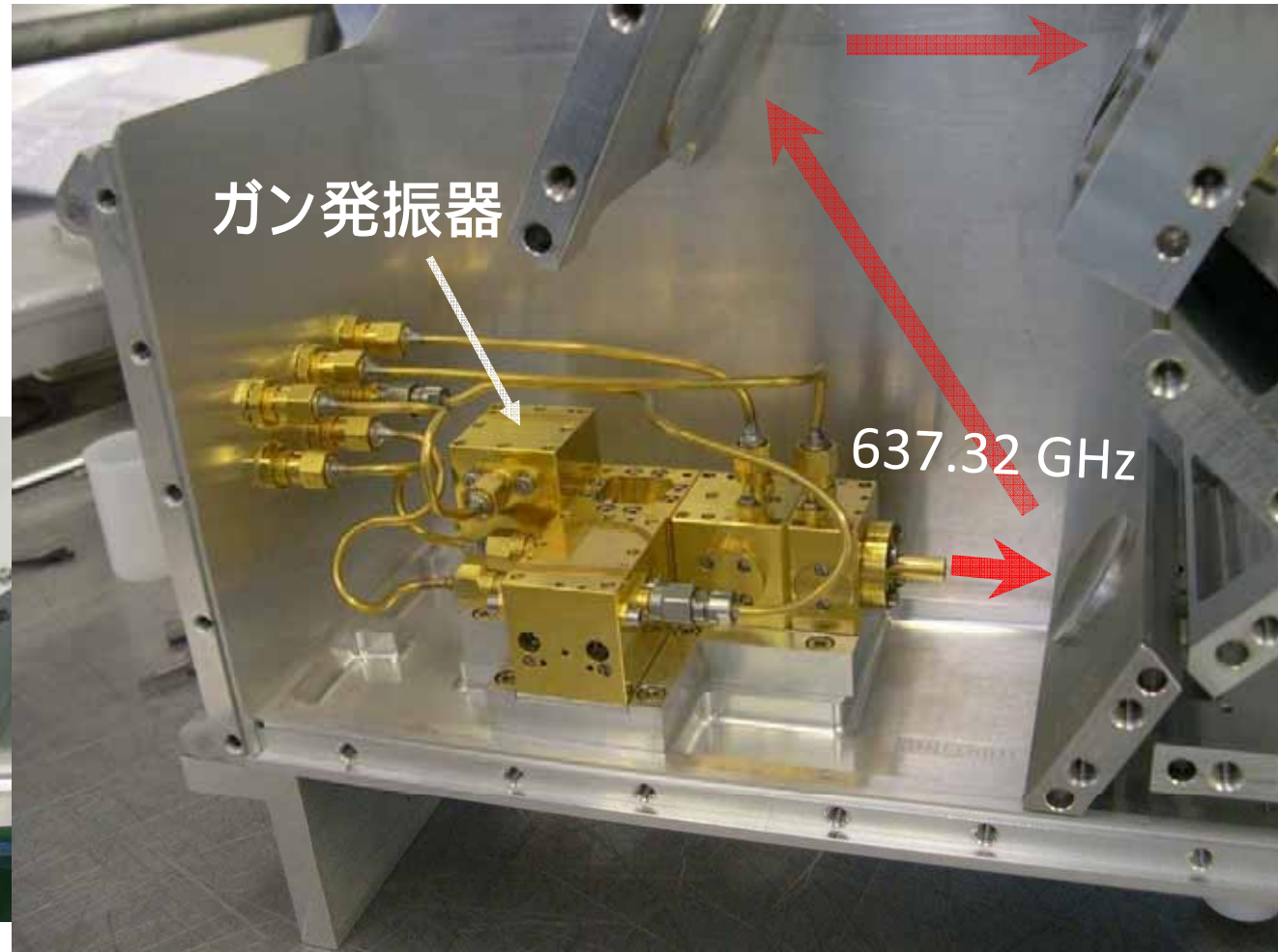
サブミリ波受信系

サブミリ波受信系では、大気からのサブミリ波信号と、サブミリ波局部発振器系による基準信号の差周波の信号を、超伝導ミクサ (SISミクサ) によって作り出す。差周波の信号を、検出・解析することにより、大気中分子の存在量などが得られる。

サブミリ波局部発振器系



サブミリ波局部発振器
制御部(SLOC)



サブミリ波局部発振器 (SLO)

調査進捗状況：不具合原因の推定

● サブミリ波局部発振器制御部 (SLOC) の健全性の確認 (正常)

- 事象1では、SLOCの過電流保護回路が働いて電源部がOFFとなり、サブミリ波局部発振器系が待機モードとなったと思われる。
- この動作は、電源部により一次側(システム側)を保護する機能が正常に作動したことを示している。
- 後日の電源再投入時のステータス、電圧値、コマンド応答から、SLOCの健全性を確認した。

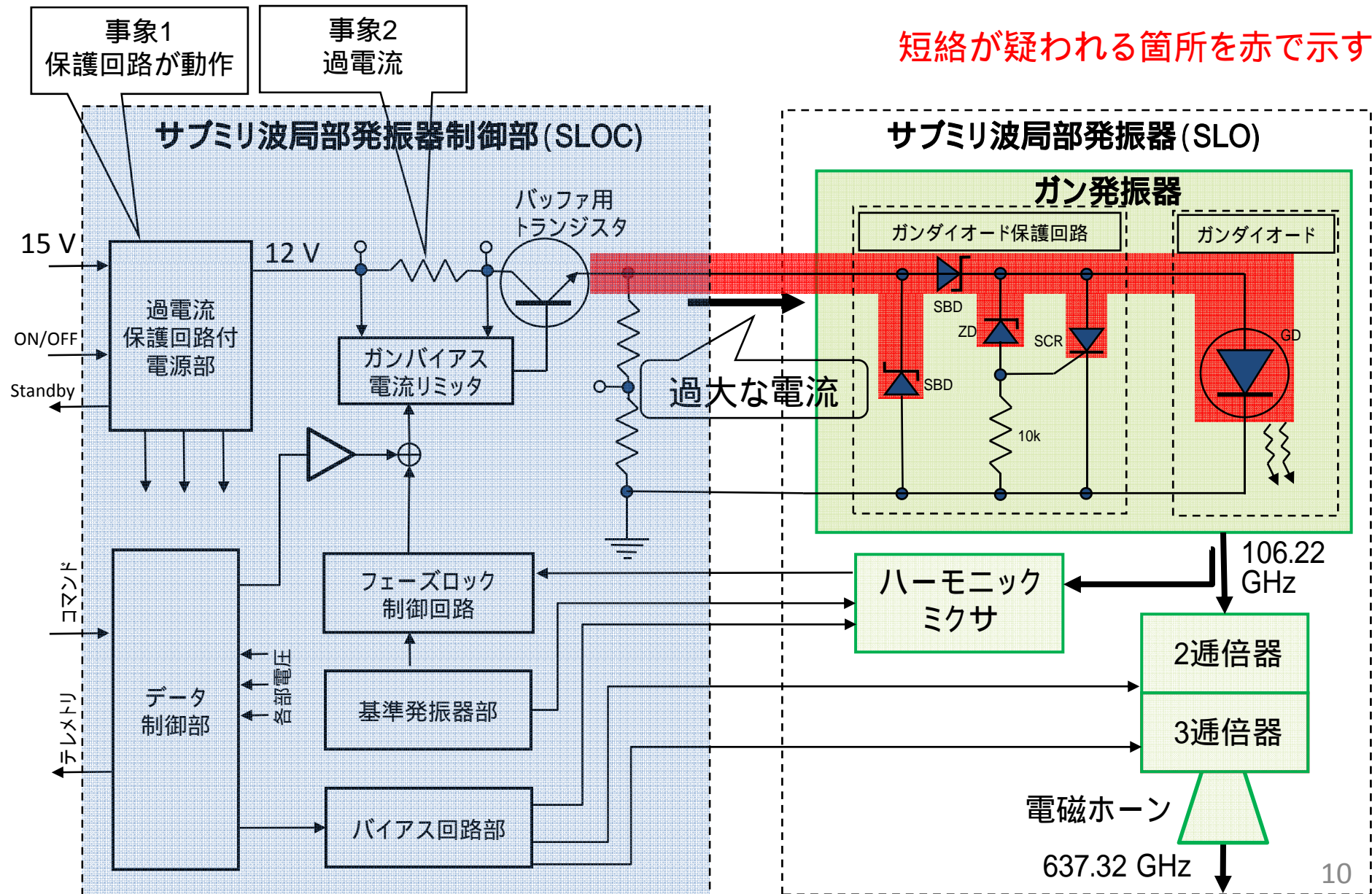
● サブミリ波局部発振器 (SLO) の健全性の確認 (異常)

- 事象2では、SLO内部のガン発振器へ流れ込む電流値が過大(350 mA)であることを検出(正常時は約90 mA)。
- 電流350 mAは、ガンバイアス電流リミッタの動作電流であることから、バッファ用トランジスタより下流側で短絡が生じていると推定される。
- ガン発振器以外は異常のないことを確認。

これらの結果、SLO内部のガン発振器において短絡が生じたと推定される。

サブミリ波局部発振器系の回路構成と短絡が疑われる箇所

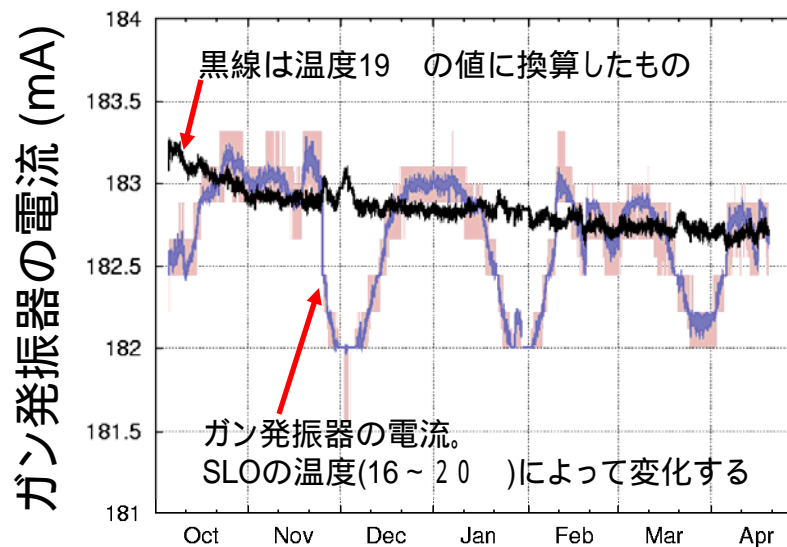
短絡が疑われる箇所を赤で示す



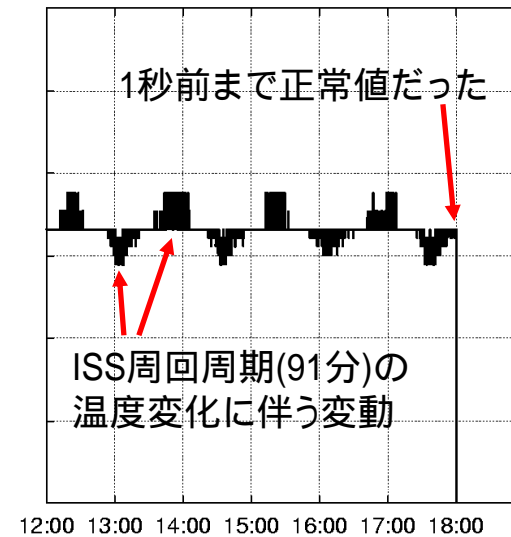
調査進捗状況：不具合発生までの状況

●不具合発生までの状況の調査

- 4月21日の事象1(待機モードへ遷移)以前にサブミリ波局部発振器系を含むすべてのテレメトリに異常は確認されなかった。
- ガン発振器の地上試験及び軌道上での履歴を確認。
 - ▶ ガン発振器へ流れ込む電流は、打ち上げ後から事象1直前まで増加傾向は見られなかった。



軌道上電源投入から約半年の推移



4月21日(17:59に事象1発生)

調査進捗状況：部品の信頼性

•サブミリ波局部発振器系の信頼性、品質保証要求との適合

サブミリ波局部発振器系は海外の衛星でフライト実績があることから、「宇宙ステーション取付型実験モジュール(JEM)ペイロード安全・開発保証要求書」における、既開発品の使用に分類され、既開発品適用性審査報告書(既開発品信頼性品質保証管理要求立証文書)による以下の技術審査に合格していることを確認した。

- ✓性能要求、インタフェース要求
- ✓使用されているEEE部品の選定基準とグレード
- ✓使用されているEEE部品のスクリーニング
- ✓使用されている部品のディレーティング
- ✓使用されている部品の適用上の制約
- ✓フライト実績

•サブミリ波局部発振器系は、スウェーデン等が2001年に打ち上げた Odin衛星に搭載実績があり、現在も稼働中。なお、Odin衛星のガン発振器には不具合は生じていない。

SMILES実験ミッションへの影響評価

	項目	現在までに実施したこと	今回の事態による影響
4K機械式 冷凍機と超 伝導技術 を用いたサ ブミリ波帯 リム放射サ ウндаの軌 道上技術 実証	冷凍機の連 続運転	正常な連続運転を確認してきた。	影響なし
	SISミクサに よるサブミリ 波検出の実 証	サブミリ波スペクトルを取得することで、サブミリ波の検出を実証した。	影響なし
成層圏大 気微量気 体成分の グローバル な時空間 分布に関 する観測 実験	大気微量成 分観測	観測データから、標準プロダクト (オゾンを始めとする11種類の 大気微量成分)の高度分布等を導 出することができた。	これまでの観測データを用いて、 新たな科学的知見を得ることは 可能。 ただし、今後も機能が復旧しな い場合、観測実験の継続は不 可能。

今後の計画

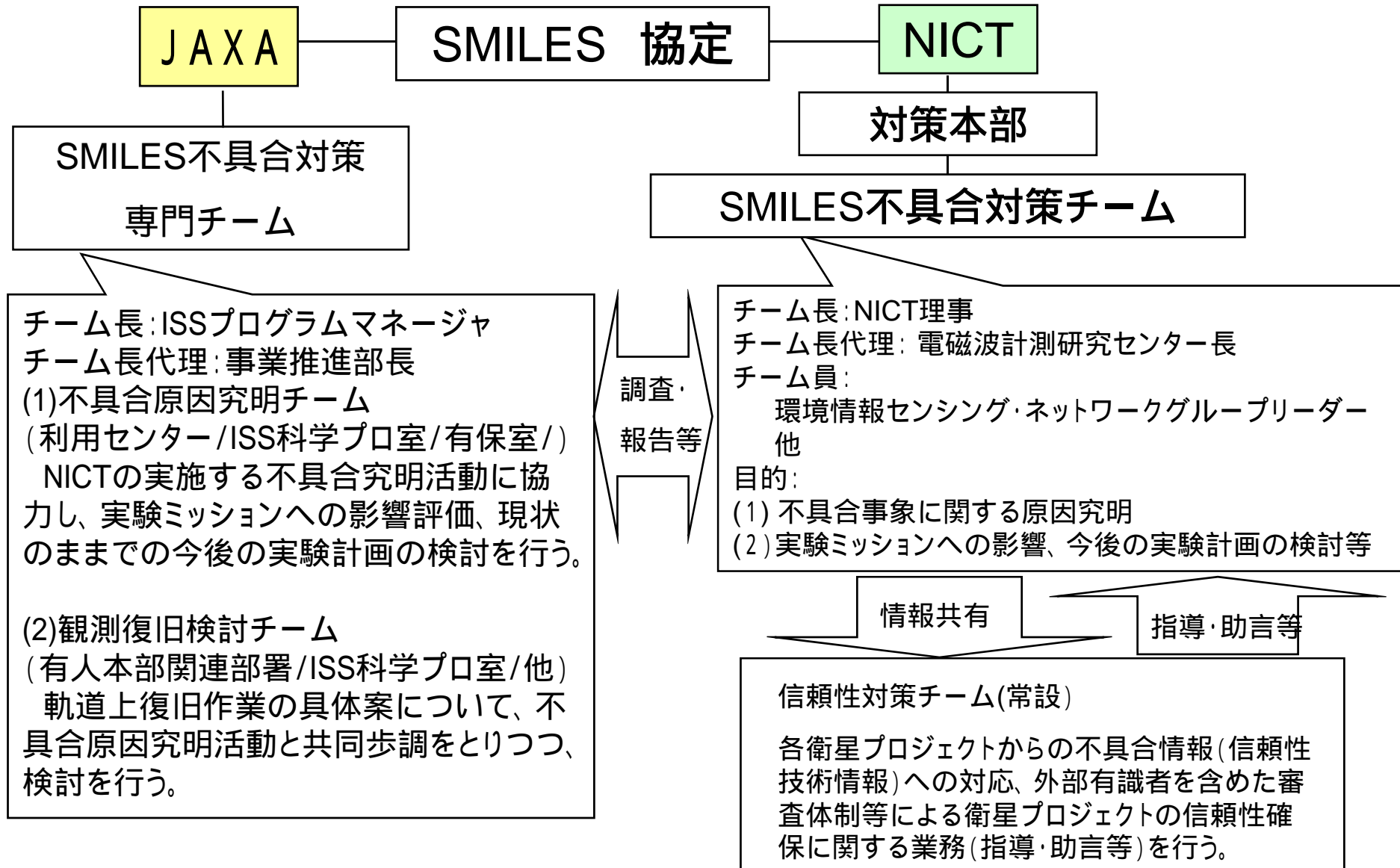
1. サブミリ波局部発振器系の異常の原因究明

- 関連事例の調査、専門家の意見等を集めつつ、搭載機器を模擬した地上試験の実施などを視野に入れ原因究明の検討を引き続き実施していく。

2. 今後の実験計画

- 冷凍機の運転等、実証実験継続について検討していく。

SMILES不具合対策の体制について

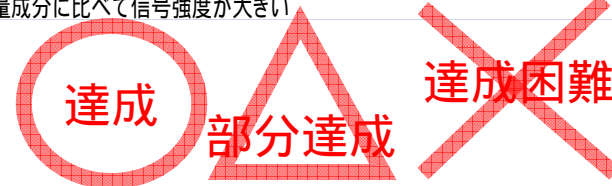


参考

SMILESサクセスクライテリア達成状況

	要求基準	具体的要求			期待される成果の例
		エンジニアリング	大気観測データの取得	大気科学成果への貢献	
ミニムサクセス	(A1) 極低温と超伝導の技術を用いたサブミリ波受信機系が機能すること。 (A2) アンテナ系、中間周波変換増幅系、電波分光系、データ処理制御系を含む全観測系が機能すること。 (A3) 地球大気の高輝線スペクトルの高度プロフィールが得られること。 (A4) 代表的な大気微量成分の高度分布が観測できること。	冷凍機が4.8 K以下に冷却でき、O ₃ , HCl, または ClOの高輝線スペクトルが確認できること ^{*1} (A1,A2)	接線高度を走査した有効なスペクトルデータを1日以上取得 (A3)	既存の観測より精度の高い、O ₃ , HCl, または ClOの高度分布を観測 ^{*1} (A4)	・機械式冷凍機を用いた超伝導ミキサの世界初の宇宙実証。 ・サブミリ波受信技術の宇宙実証。 ・成層圏における塩素化合物の分布を高精度に知ることにより、オゾン層の将来予測に重要な塩素化学を検証する。
フルサクセス	(B1) サブミリ波の観測機能が1年間継続すること。 (B2) 観測パラメータの精度・分解能が仕様を完全に満足すること。 (B3) 成層圏微量分子に関するグローバルなデータが蓄積されること。 (B4) これらのデータにより大気科学上の研究成果が得られること。	冷凍機を含む全観測系が1年間継続して機能し、誤差1 Krms以下の輝線スペクトルを取得できること。 (B1,B2)	1年間継続して有効なスペクトルデータを蓄積 (B3)	従来観測例の少ない微量成分を含む大気成分の全球分布、日変化を観測 (B4)	・塩素化合物の日変化、季節変化の観測により、不確定な要素のある塩素化学プロセスに新知見。 ・オゾン層化学に重要と知られているものの観測例の少ない臭素化学に新知見。 ・大気化学モデルを精緻化し、オゾン層将来予測に貢献する。
エクストラサクセス	(C1) サブミリ波観測装置が1年を超えて性能を継続し、より長寿命、高精度・高確度のサブミリ波観測を実現するための新たな知見が得られること。 (C2) 上部対流圏～成層圏～下部中間圏大気微量成分のグローバルなデータが1年を超えて蓄積されること。 (C3) 大気科学における新たな知見を見出すこと。	冷凍機を含む全観測系が1年を超えて機能し、1日分相当の積分により誤差0.1 Krms以下の輝線スペクトルを取得できること。(C1)	1年を超える有効なスペクトルデータの蓄積 (C2)	予測されていない、微量成分濃度分布、現象等の発見 (C3)	・次世代型宇宙用ジュールトムソン冷却機へのフィードバック。 ・地球大気放射収支の高精度化によって、気候変動予測の精緻化に貢献する。 ・予想しない大気化学プロセスの発見。

*1 SMILESの観測分子の中では、O₃, HCl, ClOは他の微量成分に比べて信号強度が大きい



SMILESの観測で得られた科学的成果

- 大気科学面の目標:

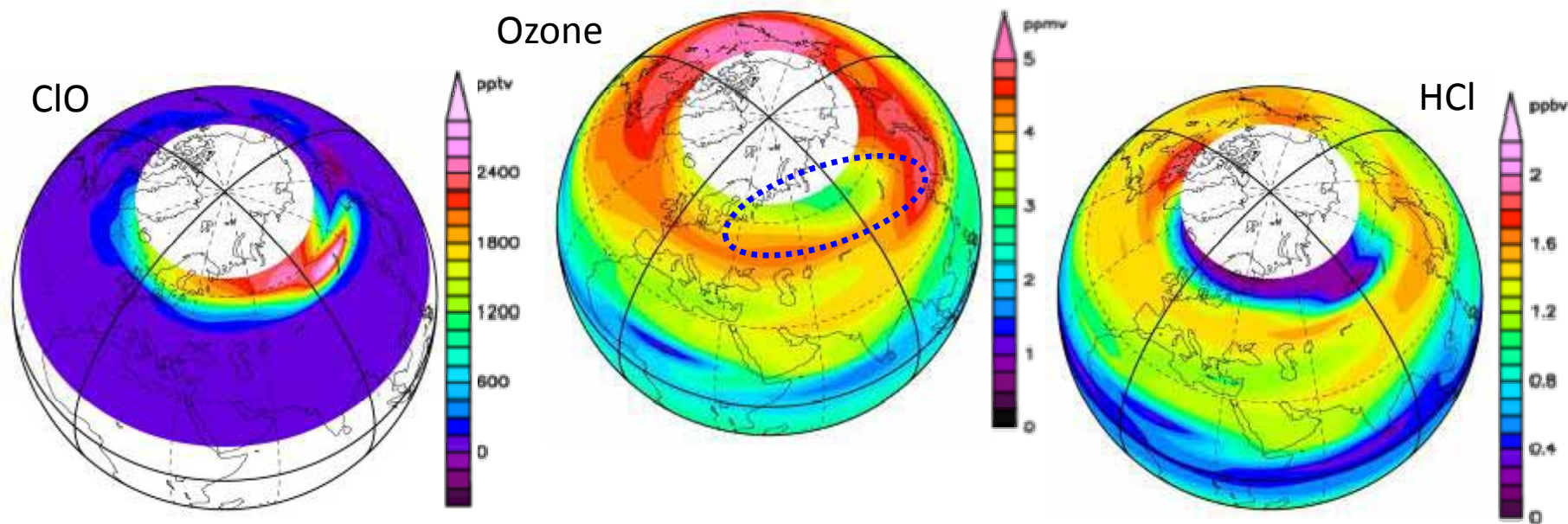
1. 低雑音・高精度のサブミリ波スペクトルを観測する。
2. オゾン層の破壊と回復の傾向を、他の観測と補いあって監視する。
3. オゾンと関連する大気成分 (塩素・臭素化合物) など、オゾン層で起こっている化学反応を総合的に観測する。

- SMILES観測で得られた成果:

1. SMILES は期待された観測性能を發揮。
世界初の機械式冷凍機による超伝導技術が実証され、超伝導素子を使って、これまでにない低雑音・高精度のサブミリ波 (電磁波) スペクトルデータを観測できた。
 - 従来の衛星観測ではデータを1ヶ月平均して得られる品質を1日程度の観測で実現した。(例えば北極域でのオゾン層の変動や赤道上空での気流など)
2. 北極圏の冬季～春季において、オゾンや関連する大気成分を高精度に観測
 - 成層圏オゾンの状況を多面的に観測し、今後のオゾン破壊・回復予測に貢献。
3. 成層圏オゾン破壊に關与する臭素化合物 (観測例がほとんどなかった) の振舞いを秋季～春季にわたり観測
 - オゾン層における化学反応の理解に貢献。

【成果の一例】

塩素化合物の化学反応によるオゾン破壊現象 (2010/01/23)



今年 (2010 年) 1 月 23 日の観測データにより、ヨーロッパおよびロシア上空で成層圏オゾンが減少していることが判明した。これは、高緯度側の大気が中緯度側に流れ出したことによる。この大気中では一酸化塩素 (ClO) が多く、塩化水素 (HCl) が少ないことから、オゾン破壊が進行中であることを示す。この結果、中緯度域の一部でオゾンが破壊され減少した。

このような現象は、従来の地球観測衛星では精度に限界があり把握が難しかったが、SMILES ではその世界初の高感度を生かして、オゾンそのものの減少だけでなく多面的な観測結果を出すことができた。

北極でのオゾンホール現象は、南半球と比べて複雑であり予測も困難。観測事実を積み重ねて、オゾン化学理論の将来的な発展に寄与する必要がある。今回 SMILES は、他の衛星では為しえなかった良好な観測結果を得ることができた。