

SMILESの観測ミッション終了と 今後の運用について

平成23年1月19日

宇宙航空研究開発機構 執行役 長谷川 義幸
情報通信研究機構 理事 熊谷 博
京都大学 教授 (SMILES PI) 塩谷 雅人

1. 概要

(1) SMILESとは

- ① 「きぼう」船外実験プラットフォームに搭載された超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES)は、大気中に含まれる微量分子の濃度・量を算出し、成層圏オゾンの動向を解明することを目的としたミッションである。
- ② そのシステムは、大気中の微量分子が放射するサブミリ波観測信号とサブミリ波局部発振器系による基準信号の間の差周波の信号を、極低温冷凍機により冷却された超伝導ミクサによって作り出し、その信号を解析するものである。
- ③ NICTがサブミリ波受信器系等のコンポーネント開発を、JAXAが極低温冷凍機、超伝導ミクサ等の開発を担当した。

(2) これまでの経緯

- ① 平成22年4月21日に発生したサブミリ波局部発振器系の異常により大気観測を中断し、5月26日に状況を宇宙開発委員会に報告した。
- ② 平成22年6月5日に発生した船外実験プラットフォーム熱制御系のサービス一時停止に伴い、SMILES冷凍機の運転を中断した。(6月10日に熱制御系は正常復帰)。
- ③ その後、現在に至るまで、サブミリ波局部発振器異常の調査、軌道上復旧作業の検討、および冷凍機の再立上げを実施してきた。
- ④ 平成22年11月25日、大気観測開始から1年経過後におけるミッションの達成状況と現状確認のため定常運用完了審査会を実施した。

本資料では、SMILESの①これまでに得られたサイエンス成果、②サブミリ波発振器系異常に係る調査結果、③冷凍機の運転状況、④ミッション達成状況、並びに⑤今後の運用について報告する。

2. JEM/SMILESの観測意義

SMILES の観測中断の後も、これまでに取得できた観測データの解析を進めており、さまざまな興味深い結果が得られつつあるが、ここでは成層圏オゾン (オゾン層破壊の問題) に絞って成果を紹介する。

■ 減少が止まったと見られる成層圏オゾン量が今後 年ごとにどう増減するか、詳細が未解明。

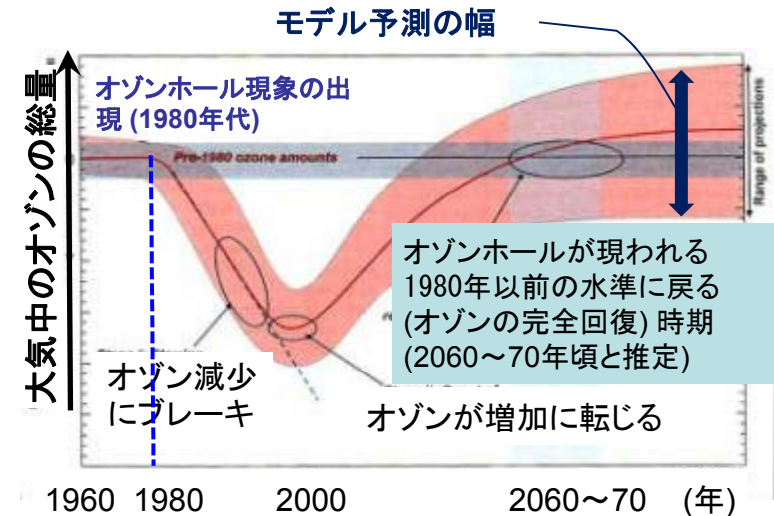
- 将来予測モデル計算によると、成層圏オゾンの量が1980年代なみに戻るのは2060~2070年ごろと推定されているが、それらの年代予測はばらつきが大きい。
- オゾン層問題の鍵となる、成層圏オゾンとその光化学反応に関連する大気微量成分の化学過程 (成層圏オゾン化学) のうち、各成分がどれだけオゾン破壊に関与しているのか、定量的な割合がいまだ明らかになっていない。



- 成層圏オゾン化学に関連する大気微量分子 (オゾン, 一酸化塩素 (ClO), 塩化水素 (HCl), 一酸化臭素 (BrO) 等) の同時観測かつ精密な観測が不可欠。
- この観測データは、オゾン層回復の将来予測の精度向上に寄与する。
- また、成層圏オゾン化学が対流圏の気候に及ぼす影響の解明にも役立つことから、地球温暖化問題にも寄与する可能性がある。



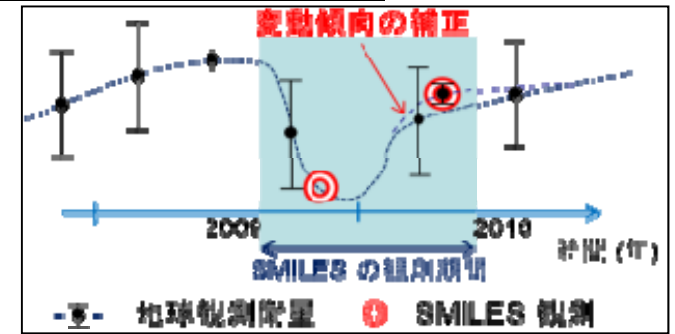
SMILES は、近年 運用した大気観測センサでは、成層圏オゾンの化学過程に焦点をあてた唯一のセンサ。



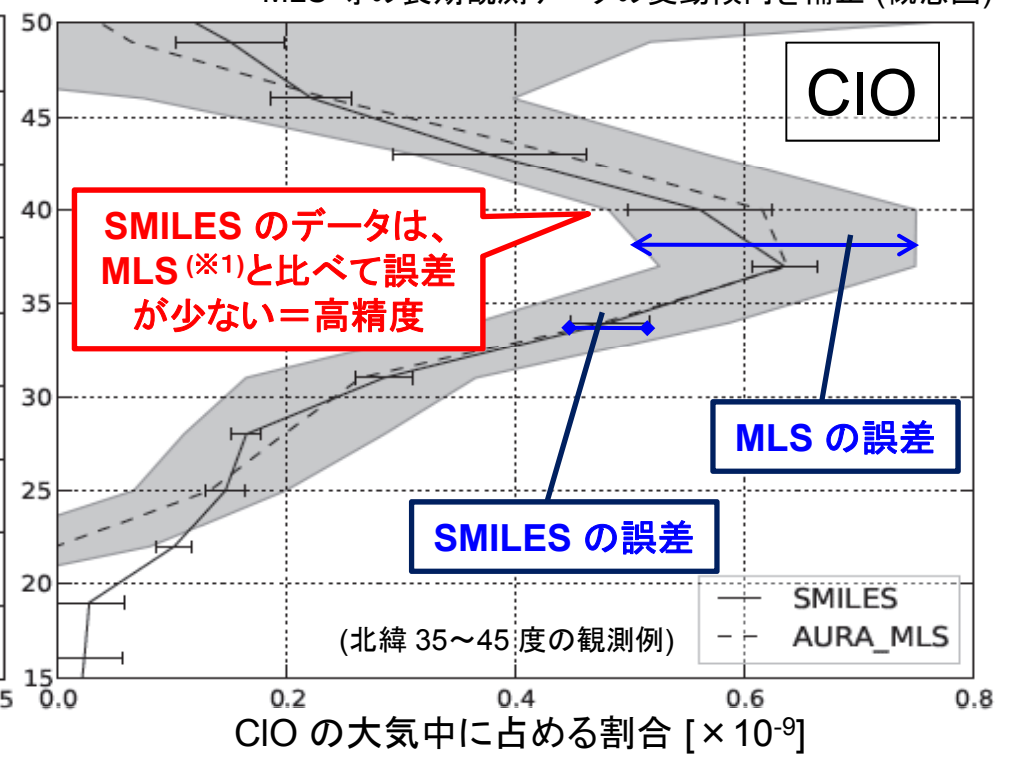
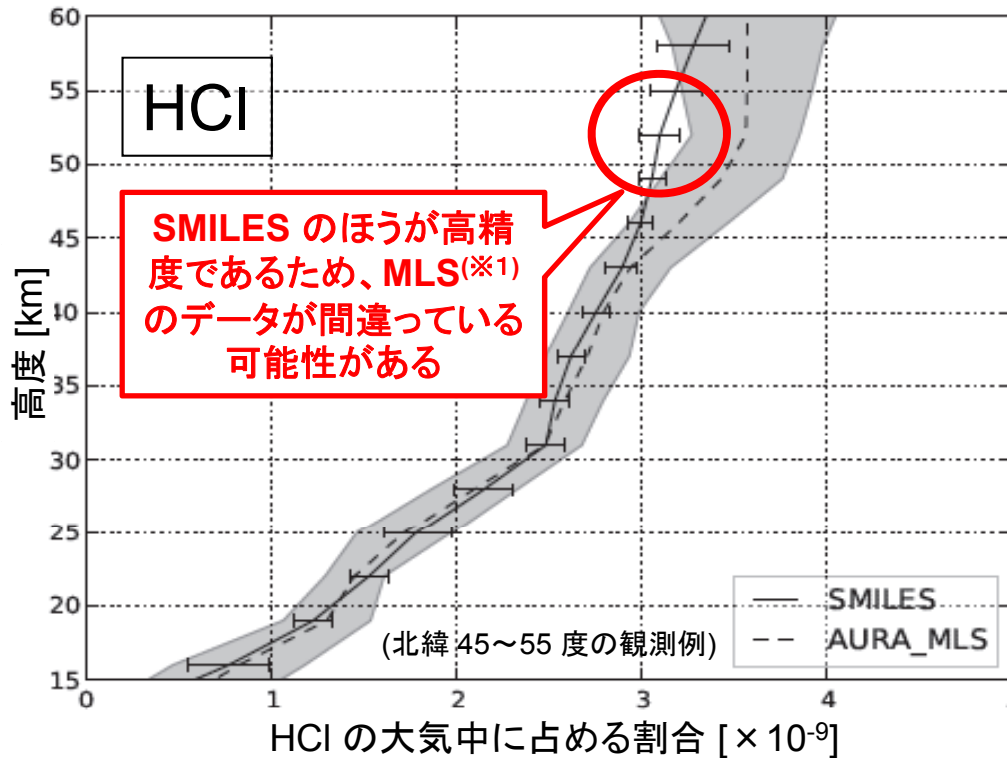
3. サイエンス成果

【成果1】高精度観測データにより衛星長期観測の誤差を補正

- SMILES は、短期間ではあるが高精度の観測ができた。このデータにより、米国の地球観測衛星に搭載の観測装置(※1)などによる長期観測データの誤差を補正できる可能性が出てきた。(オゾン, HCl, ClO 等)
- 約6ヶ月にわたる観測を実施し、「大気観測データの取得」フルサクセスの一部に相当する成果を挙げた。



MLS 等の長期観測データの変動傾向を補正 (概念図)

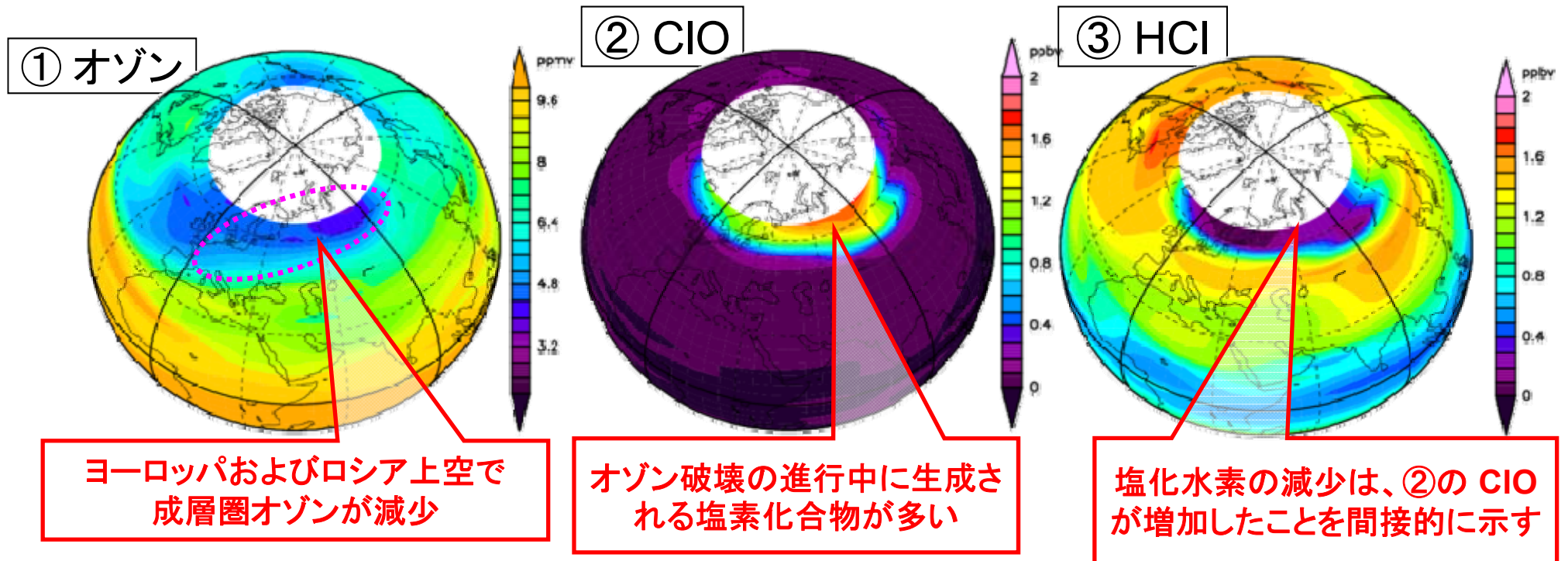


(※1) NASA の地球観測衛星 Aura 搭載の「マイクロ波リムサウンダ」(Microwave Limb Sounder: MLS)

3. サイエンス成果

【成果1】高精度観測データにより衛星長期観測の誤差を補正 (続き)

塩素化合物の化学反応によるオゾン破壊 (2010/01/23: 高度 22km)

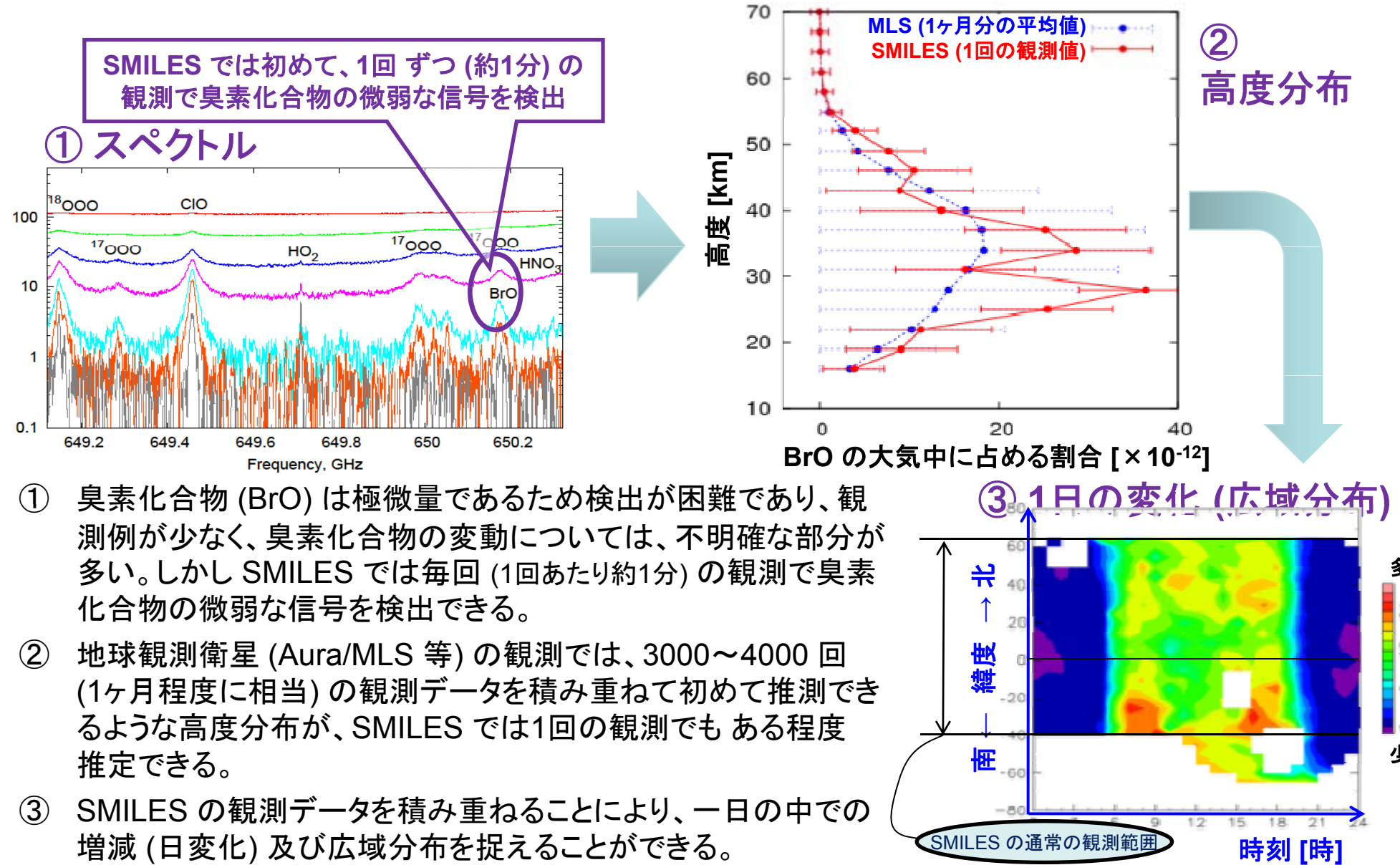


従来の地球観測衛星では、各種塩素化合物の観測精度に限界があり、1日単位での分布の変化を検出することが難しかったが、SMILES は、世界初の高感度を生かし、オゾンそのものの減少 (①) だけでなく、塩素化合物が変化している状況 (②の増加、③の減少) も1日単位で捉え、オゾン破壊現象を多面的に観測することができた。

●オゾン等の全球分布・日変化の把握を行い、「大気科学成果への貢献」フルサクセス相当の成果を挙げている。

3. サイエンス成果

【成果 2】地球観測衛星では検出困難な微量成分の観測の例



- ① 臭素化合物 (BrO) は極微量であるため検出が困難であり、観測例が少なく、臭素化合物の変動については、不明確な部分が多い。しかし SMILES では毎回 (1回あたり約1分) の観測で臭素化合物の微弱な信号を検出できる。
- ② 地球観測衛星 (Aura/MLS 等) の観測では、3000~4000 回 (1ヶ月程度に相当) の観測データを積み重ねて初めて推測できるような高度分布が、SMILES では1回の観測でもある程度推定できる。
- ③ SMILES の観測データを積み重ねることにより、一日の中での増減 (日変化) 及び広域分布を捉えることができる。

3. サイエンス成果(今後の予定)

今後、3年程度をかけて、これまでに取得された半年間の観測データの解析を進め、以下に示す成果の創出、獲得を目指す。

(1) 衛星長期観測データの補正

- オゾン量の正確な観測データを全世界へ発信する。
- 従来のオゾンホール回復傾向(衛星観測データによる予測モデル)を検証し、より確かな将来予測に補正する。

(2) 極めて微量な成分の検出

- オゾン層破壊関連物質(臭素化合物)の観測データにより、成層圏オゾンの化学反応をより正確に把握し、大気オゾンの変動を世界に先駆けるレベルで精密に把握する。

これらの成果獲得を通じて、地球温暖化予測が不確定になっている原因の一つである、成層圏オゾン化学が対流圏の気候に及ぼす影響の解明への貢献が期待できる。

4. SMILESサブミリ波局部発振器系の 不具合調査結果

— NICT 資料 —

5. 冷凍機の運転状況(1/2)

- (1) SMILES の冷凍機は、図1に示すように2段スターリング冷凍機（開発実績あり）及びジュールトムソン（JT）冷凍機（開発実績なし）から構成され、地球観測用としては、世界で初めて我国が開発した4K級極低温冷凍機である。なお、設計寿命は1年である。（付録1参照）
- (2) 平成21年9月28日の目標温度4K台への到達後から、サブミリ波局部発振器系の異常発生後も冷凍機は運転を継続したが、平成22年6月5日に運転を中断した。
- (3) 平成22年6月14日から再立上げを開始したところ、ジュールトムソン冷凍機において最初に冷却される配管部が148K付近になると閉塞が見られ、冷媒のヘリウムガスが十分流れない状態となった。現在まで手順を変更しながら13回の再立上げを試みているが、最低到達温度は13.7Kまでとなっている。
- (4) なお、冷凍機の地上試験結果から冷凍機のコンプレッサに使用されている材料（接着剤、合成樹脂等）から生じる不純ガスが配管内部で徐々に増加し、中でもCO₂が支配的であることが判明している。
- (5) 以上を踏まえ、冷却温度が4K台に到達できないメカニズムについて、推定した。
- ① 軌道上の正常運転中では最低温部である4Kステージに固着していたCO₂が、冷凍機が常温まで昇温されたことにより、全て気体の状態に昇華した。
 - ② この状態から冷却を開始すると、配管内部の昇華したCO₂が、冷却過程の過渡的な状態で最初に温度が低下する配管部に集中的に固着し閉塞状態となった。

5. 冷凍機の運転状況(2/2)

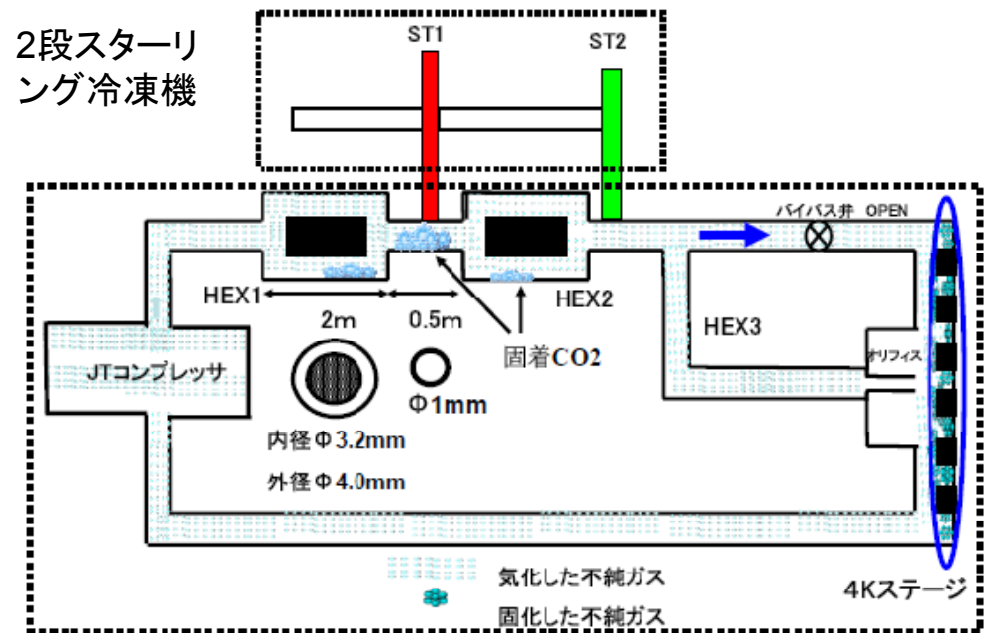
(6) 推定に対する分析

- ①過去の地上試験等の結果および軌道上実機のテレメトリから以下の情報が得られている。
- 冷凍機フライト品の製造時には、ベーキングにより、コンプレッサの材料レベルからの不純ガス低減を行っている。
 - フライト品の地上試験時には、CO2濃度が160ppmの状態です再立上げ及び4Kまでの冷却が達成出来ている。
 - 寿命評価試験モデル(フライト品と同様な工程により製造)による2年間以上の連続運転後のCO2濃度は最大450ppmまで増加していたが、その状態からでも再立上げ出来ている。
- ②上記より、現在の軌道上でのCO2濃度はもっと高いものと推算され、このため閉塞状態が発生しているものと推定している。

- ③ なお、CO2発生源と推定されるコンプレッサの製造時におけるベーキングデータ等を確認しているが、問題となる点は見出されていない。

ジュールトム
ソン冷凍機

図1 SMILES冷凍機の説明図



6. ミッション達成状況

サクセスクライテリア達成状況(大気観測データの取得/大気科学成果への貢献については2項を参照)の概要は、以下のとおりである。(付録2参照)

【エンジニアリング】

(1)「サブミリ波」という新しい周波数の利用

宇宙からの地球大気観測のための新たな電磁波領域の開拓を行い、高精度が要求されるサブミリ波アンテナの軌道上熱環境下における熱変形制御(規則的熱変形)を検証した。

(2)超伝導センサの利用

超低雑音観測手段により自然界の微量大気からの分子線を見る観測装置を実証し、理論的限界に迫る低雑音センサを宇宙で安定に動作させることに成功した。

(3) 4K級極低温冷凍機の利用

宇宙における小型軽量・長寿命の極低温冷却手段として4K級極低温冷凍機の宇宙での運用実績を積み、長寿命化に必要な技術情報(冷媒ガスの劣化等)が得られた。

(4)宇宙ステーションの諸条件の克服

宇宙ステーションの熱環境、姿勢変動下でも実用に耐えうる地球観測が実現できることを実証した。

5. 今後の運用について

(1)大気観測開始からミッション期間1年を経過したことを受け、SMILESの定常段階の運用を本報告を持って終了する。

(2)今後は、4K級極低温冷凍機の軌道上技術実証、及び取得した観測データの解析作業を進める。

【4K級極低温冷凍機の技術実証】

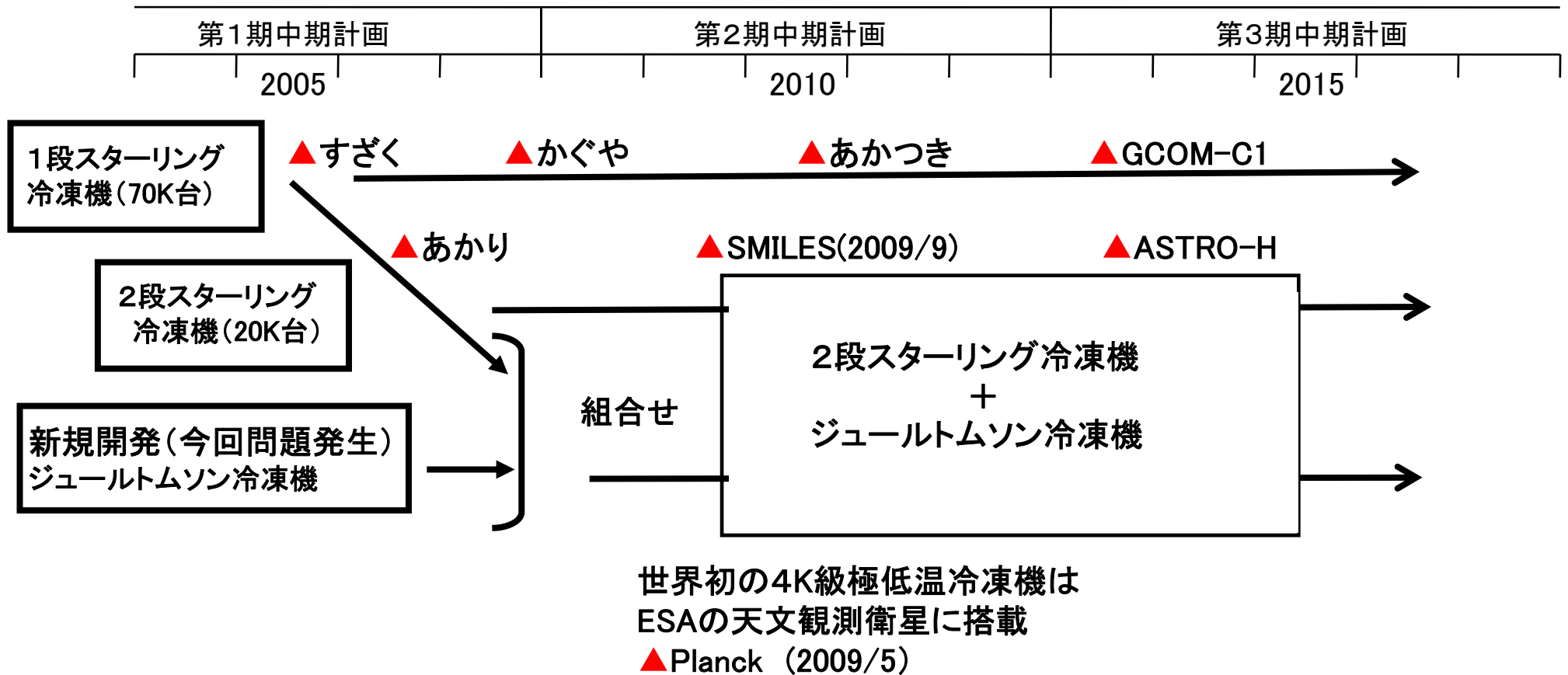
- ・ SMILES冷凍機の復旧作業を進めながら、年度内をめぐりに技術実証運用を行い今後の科学衛星に必要な冷凍機の経年変化データを蓄積する。

【大気科学成果への貢献】

- ・ 観測データの解析を進め、今後3年間をめぐりに大気科学成果の創出、獲得を目指す。また、成果を最大限に挙げるため、利用研究をさらに推進する。

付録

日本の極低温冷凍機開発のロードマップ



ジュールトムソン冷凍機を使用予定であるASTRO-H冷凍機の対策

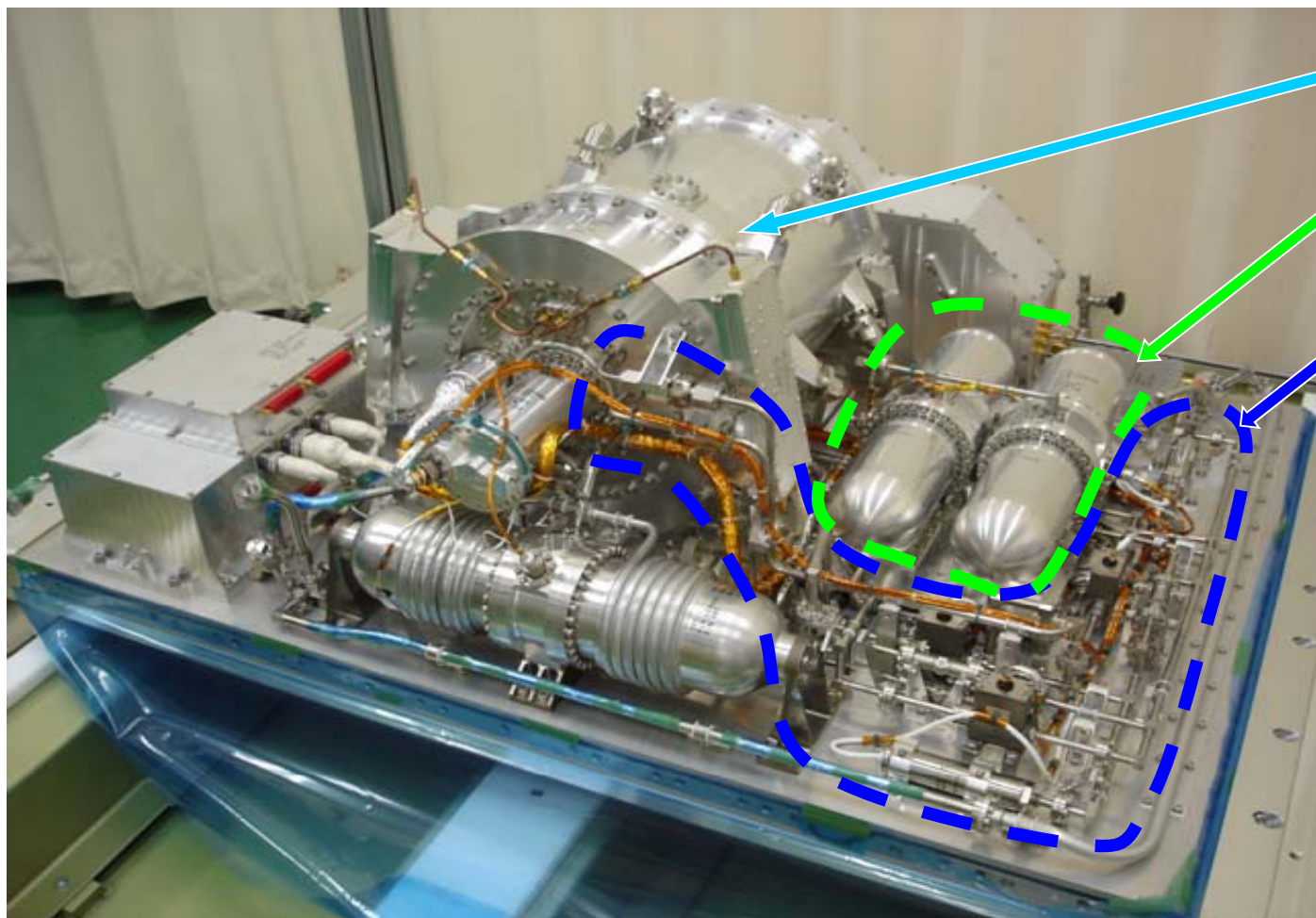
対策1: 冷凍機の機能冗長化

→ジュールトムソン冷凍機の代替として液体ヘリウムを準備

対策2: 不純ガス発生源の削減(およそ1/100)を図った改良型コンプレッサの使用

対策3: 不純ガスを除去する不純ガス捕獲装置を付加

SMILES冷凍機の外観図



ジュールトムソン冷凍機
内部配管 (閉塞箇所)

ジュールトムソン冷凍機
コンプレッサ

ジュールトムソン冷凍機
外部配管

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	
ミニマムサクセス	(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) 地球大気の大気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、O3, HCl, または ClO の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、O3, HCl, または ClO の高度分布を観測 [*] (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) <u>(全観測系を6か月間継続して観測。誤差 1 Krms 以下の輝線スペクトルを取得できた)</u>	・1年間継続して有効なスペクトルデータを蓄積 (B3) <u>(6か月間継続して、有効なスペクトルデータを蓄積できた)</u>	・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) <u>(微量成分を含む大気成分の、全球分布、日変化を観測できた)</u>	・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年間を越えて性能を継続し、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

※ サクセスクライテリアは、平成21年4月15日 JAXA 内での SMILES 開発完了審査会にて設定。
 ※ 達成状況については、平成22年11月25日 SMILES 定常運用完了審査会により評価した。

