

改良型クライオサンプラー性能実証試験 (2024年度国内申請実験)

菅原敏¹, 森本真司², 青木周司², 本田秀之², 中澤高清², 豊田栄³, 石戸谷重之⁴,
後藤大輔⁵, 梅澤拓⁶, 長谷部文雄⁷, 石島健太郎⁸, 飯嶋一征⁹, 福家英之⁹

¹宮城教育大学, ²東北大学大学院理学研究科, ³東京工業大学物質理工学院, ⁴産業技術総合研究所,
⁵国立極地研究所, ⁶国立環境研究所, ⁷北海道大学大学院地球環境科学研究院, ⁸気象研究所,
⁹宇宙科学研究所

1. クライオサンプリング実験の目的

地球の気候システムにおいて、成層圏は極めて重要な役割をもつ。成層圏と対流圏は物理・化学的な諸過程を通じて強く相互作用している。したがって、現在進行形の地球温暖化が成層圏での物質輸送過程と化学過程に与える長期的な影響を評価することが、全球気候の将来予測の精度を高めるために不可欠である。近年、衛星などにより成層圏オゾンなどの全球観測は可能であるが、そうしたリモートセンシングによって計測できる大気成分はごく一部にすぎない。しかし、成層圏大気を直接採取すれば、分析項目とその精度を飛躍的に増加させることが可能である。そのため、本研究グループは、大気球を用いた日本上空の成層圏大気直接採取実験を過去35年間にわたって継続し、現在は世界的に例をみない30項目以上の気体成分の濃度や同位体の成層圏における分布を明らかにしてきた。さらに、過去に採取・保存していた成層圏大気試料の分析も可能であるため、新たな気球実験で得られる最新の大気試料の解析結果を組み合わせ、全体で過去40年間をカバーするデータセットの構築が可能となる。その結果から得られる科学的な成果は多岐にわたるが、主な4つの目的を挙げる(図1)。(1) CO₂などの温室効果気体が対流圏から成層圏にどのように流入し、長期的にどのような増加傾向を示しているのかを明らかにする。特に、気球によって成層圏の鉛直分布を直接観測することで、成層圏に十分な感度を持たない温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)などを補間する役割も担う。(2) 化学的に安定な複数の気体成分から成層圏大気の年齢(空気塊が熱帯対流圏から成層圏に流入してからの平均経過時間)の変動を明らかにするとともに、我々が発見した成層圏大気組成の重力分離の長期変化を高精度で推定し、数値モデルの計算結果と組み合わせることで、複数の手法によって成層圏の大循環(ブリューワー・ドブソン循環)の長期変化を評価する。(3) 成層圏における化学過程が重要なシンクになっているCH₄、N₂Oの濃度およびその同位体の変動に加え、CO₂の同位体の変動も加え、大気年齢や重力分離と組み合わせで解析することで、成層圏における化学過程の長期変化を明らかにする。(4) 今後も一定期間ごとにクライオ実験を実施し、最新の大気試料の一部を将来のために分割して保存する。研究機関における気体分析技術は日進月歩であり、かつては不可能だった分析が保存試料を用いることで現在は可能になった例が数多くあり、クライオ実験の最大のメリットでもある。

2. 2024年度申請実験の目的

上記の全体の目的のためには、これまで継続してきた質の高い大気採取を維持していかなければならない。80年代に宇宙研において開発された現在の大気採取の技術は、採取されるサンプルの量と質の点で、世界で唯一のものである。一方で、35年以上継続してきた実験であるがゆえに、使用してきた実験機材の老朽化や人員の世代交代、低コスト化の推進、などへの対応が急務となっている。そこで、液体Heを用いて大気を固化するという基本的な原理は踏襲しつつ、搭載回路の小型化、容器バルブの空圧駆動による簡素化と軽量化、大気取入れ口の開口機構の改良などを、2022年度より進めてきた。これらは、いずれも大気採取の成否を左右する中核となる技術の更新

となる。したがって、本申請の実験では、特定の大気物理・化学的な学問的成果を出すことを第1の目的とせず、今後の10～20年間を見据えた大気採取技術の安定した継承を目指して、改良した大気採取システムの基本性能を確認することを実験の目的とする。確認すべき基本性能は、大気試料の(1)量と(2)質に区分される。(1)大気試料の採取速度は現場気圧に大きく依存するため、容器バルブの開閉時間を高度に応じてコントロールして実施する。採取された試料の量は、ゴンドラ回収後、試料を常温常圧に戻した上で、試料の圧力を測定することで確認する。(2)大気試料にコンタミや変質がないことは、試料を国内のラボに輸送して大気成分を均一化した後に、酸素などの大気主成分および温室効果気体の基本濃度分析によって確認する。

なお、試料の量と質に関する十分な基本性能が確認でき、実験の目的を達成できた場合には、従来どおりに、試料の一部を将来のために分割保存するとともに、国内の研究機関に大気サンプルを分配して、各種成分の高精度分析を実施し、科学的な成果につなげる。

3. クライオサンプラーの改良と試験

改良型クライオサンプラーの開発は、以下のように進めている。【搭載回路・システムコントローラー】市販のシングルボードコンピュータを利用した搭載回路を新規に作成する。従来の外部機器とのインターフェースや使用するセンサーは変更せず、旧回路と互換性を持たせつつ、大きさを従来型の3分の1程度にする。搭載回路を地上でコントロールするためのシステムコントローラーも新規に小型化したものを作成する。これにより、放球台車上で嘯み合わせテストなどの作業効率を改善できる。【試料容器バルブ】従来のモーター駆動式の容器バルブを、空圧駆動式のバルブ(Swagelok SS-8BK-VCR)に変更する。ゴンドラ内部に小型の加圧用N₂ポンペを搭載し、搭載回路からパイロット式電磁弁を操作することでバルブを開閉する。大気採取後に試料空気が常温常圧になった場合には、バルブ内蔵のバネによってクローズ状態を維持できる標準圧を上回るため、バルブは複動型(空圧によってバルブをクローズする)を用いて、試料容器内圧が最大4.7MPaでもクローズ状態を維持可能な構造にする。全てのバルブはスチーム洗浄の前処理を施し、試料容器に装着した状態で耐圧試験を実施する。【マニホールド】取入れ口ホースからゴンドラ内に導入される成層圏大気は、マニホールドで各容器に接続される。容器バルブを新しい空圧バルブに変更するに伴い、作業効率を高めるために、フレキシブルホースとVCR継手を用いた新たなマニホールドを製作する。バルブと同様に数週間のスチーム洗浄により、マニホールド内面のガス吸脱着によるコンタミを抑制する。【取入れ口開口機構】成層圏大気はホースの先端部分からゴンドラ内に導入される。この際、できるだけ地上付近の汚染大気の影響を避け、かつ、対流圏内の霧や雲を通過する場合に水滴の吸引や内部配管への結露を防ぐ必要がある。そのため、従来はホース先端を閉じた状態で放球し、上昇中の高度10km以上で気密型の火工品を用いて金属パーツを破壊して開口する方法を用いてきたが、開口の信頼性が必ずしも高くなかった。そこで、新たに気圧差分離型の開口機構を開発する。放球前に開口部をNW25フランジで閉じ、ホースの内部に乾燥空気を入れて内部の気圧を250hPaに設定する。地上付近では気圧差によってNW25のO-リングが圧着され、外気は混入しない。放球後、高度11km付近に達すると、周囲の大気圧とホース内部との差圧がゼロになるため、開口部が自然に分離する。O-リングの圧着によって自然に分離しない場合に備えて、リニアソレノイドでNW25フランジを押し出すことによって確実に分離する。開口の状態は、マイクロスイッチで確認する。

以上のようにシステムを改良した上で、各種の地上試験を実施する予定である。【保存性能試験】試料容器バルブは、採取後に容器内の試料と長時間接触する状態となるため、試料のガスにコンタミや変質がないことを確認する必要がある。バルブのスチーム洗浄を施したのちに、CO₂濃度既知

の標準ガスを容器に充填し、1ヶ月のストアリング試験を実施する。充填直後とのCO₂濃度の変化が0.1ppmv以下であることを確認し、保存性能がこれを満たさない容器については、配管内の余分な空気を除去する吸引ポンプとして使用する。【試料採取試験】地上において、実際のクライオサンプリングを模し、圧力を調整できるチャンバーを用いて、試料採取速度の計測を行う。その結果を容器バルブの開閉の時間などに反映させる。【地上総合試験の実施】全ての搭載機器をゴンドラに組み込み、総合的な動作確認、模擬装置による噛み合わせ試験を行う。(2023年の11～12月頃に宇宙研での実施を計画中)そこでの不具合等について、実施年度の5月頃に実施する最終的な総合試験までに解決する。地上において可能な限りの性能試験を実施した上で、最終的には気球実験によって総合的に試料採取の基本性能を確認することが不可欠である。

4. 技術的成熟度と実施体制

本研究は、長期にわたって継続してきた大気採取実験について、主要な機材を更新することによって、今後も安定に継続してゆくための性能確認実験である。液体ヘリウムを用いた成層圏大気の固化という基本的な技術はこれまでと変更はなく、35年間の実験で培った技術を生かしながら、観測システムの更新を目指すものであり、技術的な成熟度は極めて高い。また、従来のモーター駆動バルブを空圧バルブに変更することについては、すでに南極・赤道海洋上・インドネシアなどで成功している小型クライオサンプラーでも同様のバルブと小型N₂ポンプを用いており、その技術が大型サンプラーに応用されている。

本研究の実施体制を表1にまとめた。本申請の実験は、これまでと同様に、国内の様々な研究機関が協力して進めている。代表者の宮城教育大(菅原)をはじめ、東北大(森本)、東工大(豊田)、産総研(石戸谷)、極地研(後藤)、国環研(梅澤、丹羽)、気象研(石島)のメンバーが中心となっている。主な作業の分担としては、システムの更新・開発・地上試験を菅原・森本・豊田・石戸谷・後藤、温室効果気体濃度の基本分析を森本・菅原、同位体分析を豊田・森本・菅原、大気主成分分析を石戸谷、ハロカーボン類分析を梅澤が担当する。さらに、十分な量と質の大気採取が可能となった場合には、得られた結果を理論的に解釈するために、気象場解析・モデル計算を石島・丹羽が担当する予定である。なお、参加大学を中心に、事前の実験準備、地上試験、大樹での気球実験などに大学院生を数名参加させる予定である。

観測と研究テーマ	役割と分担・協力(所属)
大気採取装置の改造、気球観測の実施	気球実験統括：菅原（宮教大） 装置改造、実験参加：森本（東北大）、豊田（東工大）、石戸谷（産総研）、後藤（極地研）
試料分析体制	CO ₂ 、SF ₆ 濃度：菅原（宮教大）、森本（東北大） CO ₂ の ¹⁴ C：森本（東北大） ハロカーボン類：梅澤（国環研） CH ₄ 、N ₂ O濃度：菅原（宮教大）、森本（東北大） CH ₄ 同位体：森本（東北大）、後藤（極地研）、梅澤（国環研） N ₂ Oアイトポマー：豊田（東工大） 大気主成分：石戸谷（産総研） 希ガス：川村、大藪（極地研[協力者]）、菅原（宮教大）
[1] 輸送過程	大気年齢解析：菅原（宮教大） 重力分離と大気年齢の相関：石戸谷（産総研）、菅原（宮教大） CO ₂ の数値モデル：丹羽（国環研） ハロカーボン類の変動解析：梅澤（国環研） 大気年齢の数値モデル：石島（気象研） 重力分離の数値モデル：石島（気象研）、菅原（宮教大）、石戸谷（産総研）
[2] 化学過程	N ₂ Oの化学過程・長期変動解析：豊田（東工大） CH ₄ の化学過程・長期変動解析：菅原（宮教大）、梅澤（国環研） CO ₂ の同位体分析と重力分離の応用：菅原（宮教大）、森本（東北大）

表 1. 研究の実施体制

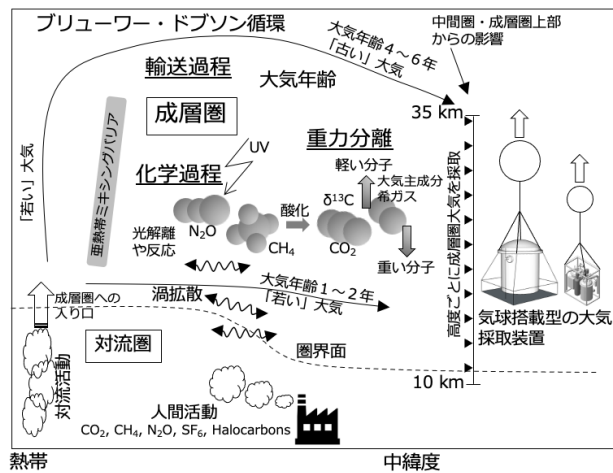


図 1. 成層圏における物質循環の描像と気球実験の概略図

プロジェクト
新型クライオサンプリングの性能実証試験

作成者 菅原
変更日付 2023/08/01

カテゴリ	詳細	2021年度		2022年度		2023年度		2024年度		2025年度	
		前半	後半	前半	後半	前半	後半	前半	後半	前半	後半
1 クライオサンプリングの改修	・新システムの基本設計		基本設計								
	・搭載回路			設計・回路図	製作	動作試験・修正	総合試験				
	・試料容器バルブ			調達・改造	動作試験	洗浄	組立て	排気			
	・新開口機構			部品調達・製作	低温試験・衝撃試験						
	・マニホールド			部品調達・製作	洗浄	組立て	排気				
	・T付きバルブ			部品調達・製作	組立て						
2 総合試験と気球実験	・システムコントローラー					製作	動作試験	総合試験			
	・保存容器					部品調達・製作	洗浄・排気				
	・実験申請関係						実験申請				
	・前年度総合試験						総合試験				
	・総合試験							総合試験			
3 追加の分析と解析	・気球実験							気球実験			
	・性能確認(サンプル量)								測定・分析		
	・性能確認(サンプルの質)									基本濃度分析	
4 成果の発表	・各種分析									各種同位体分析など	
	・数値モデルとの比較・検討									数値モデルとの比較	
	・学会発表										成果の発表
	・論文作成・投稿										

図 2. 2024年度実験の全体スケール