

「低軌道からの大気汚染と気候変動物質の3次元観測：ミッションフェジビリティ検討研究」の成果について

研究
開発
体制

主管研究機関
共同研究機関

国立大学法人千葉大学

情報通信研究機構、国立環境研究所

研究
開発
期間

平成24年度～
平成26年度
(3年間)

研究
開発
規模

予算総額 (契約額) 2.5 百万円

1 年目	2 年目	3 年目
6 百万円	1.1 百万円	8 百万円

研究開発の背景・全体目標

対流圏オゾン、メタン、ブラックカーボンなどの短寿命気候汚染物質 (Short-Lived Climate Pollutants; SLCPs) は、今後約20年間に人間活動が原因で起こる地球温暖化の約半分に寄与すると考えられているため、各国が首脳レベルで協力して、二酸化炭素などの長寿命温室効果ガスの排出抑制と同時にSLCPsの排出量を削減し、短期的な地球温暖化抑制の成果を得ることを目指している。さらに、SLCPsは呼吸器疾患を引き起こすなど人類の健康にも悪影響を与え、穀物生産にも甚大な被害をもたらすため、SLCPsを全球で高空間分解能かつ高精度に観測することが急務となっている。そこで本研究では、1-2 kmの高水平空間分解能観測を実現できる低軌道衛星や国際宇宙ステーションをプラットフォームとして想定して、従来の人工衛星搭載型大気汚染観測センサーによる観測では不可能であった、道路や工場などの単位でのSLCPs放出源の特定、さらにはSLCPsのひとつである対流圏オゾンの「健康や農作物への被害」と「温暖化影響」の分離を実現できる観測システムを提案し、観測システム実現性の具体的かつ包括的なフェジビリティ検討を実施する。低軌道プラットフォームに搭載するための紫外・可視波長域から赤外波長域、マイクロ波波長域までのフルスペクトルセンシングを実現できるセンサーを設計し、それぞれの波長帯が有するSLCPs(対流圏オゾン)の観測感度の高度分布の違いを利用して、鉛直分解能3 kmで対流圏オゾンを観測するためのシステムの開発を目的とする。

研究開発の全体概要と期待される効果

本研究では、従来の人工衛星搭載型大気汚染観測センサーによる観測では不可能であった、主要なSLCPsである対流圏オゾンの高精度三次元観測を目指して、低軌道からの、紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長帯の組み合わせによるオゾン濃度のフルスペクトル観測を提案していた。本研究で実施したシミュレーションの結果、我々が提案するフルスペクトルのシナジー観測が対流圏のオゾン濃度を最も精度よく知ることができると実証され、最下部対流圏、下部対流圏、上部対流圏のオゾンの濃度情報を分離して得られる可能性があることを示すことができた。SLCPs及び大気汚染物質の高精度観測を目指して、行政に対しても国際宇宙ステーション (ISS) の新規ミッションとしてAPOLLO (大型ミッション) やuvSCOPE (中型ミッション) という複数のミッションの提案を行ってきた。uvSCOPEは2017年のISS中型ミッション搭載機器の第一候補となっている (APOLLOは大型ミッションの第二候補となっている)。本研究は、これらの新規ミッション提案にあたっての基礎となるフェジビリティ検討であり、ミッション提案にあたって非常に大きな役割を果たした。

「国民との科学・技術対話」の推進に関する取組について

本研究では、行政等からのSLCPs観測に対するニーズを踏まえてSLCPsの観測要求精度の検討を行った上で、要求を満たす観測センサーの仕様の策定およびアルゴリズムの開発を行ってきた。さらに、研究成果をもとに新規ISSミッション (センサー) の提案を行うなど、積極的に宇宙行政・政策への働きかけを行った。

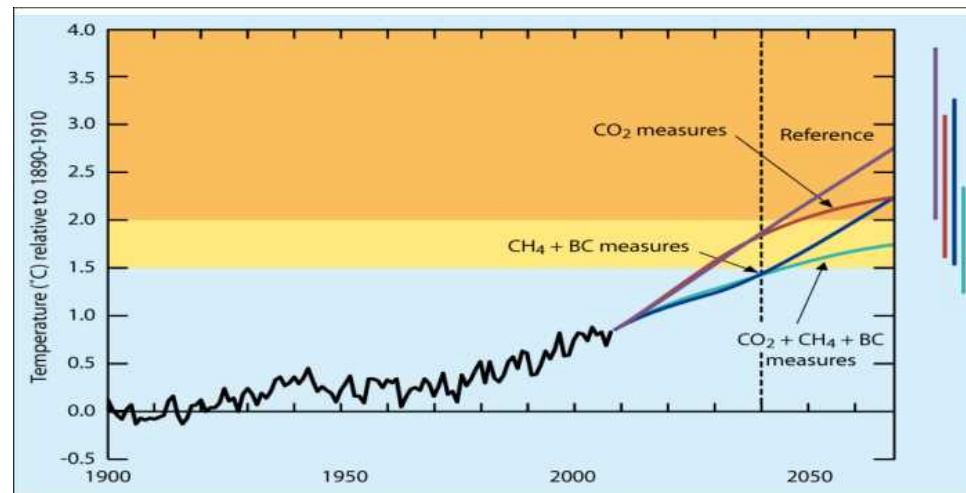


図1. 1890-1910年に対する気温の偏差 (正の値が温暖化傾向を意味する)。紫線が二酸化炭素などの長寿命温室効果ガスの排出に対して無対策の場合、赤線が長寿命温室効果ガスの排出に対して対策を施した場合、青線が短寿命気候汚染物質 (SLCPs) の排出に対して対策を施した場合、緑線が長寿命温室効果ガスの排出、SLCPsの排出の両方に対して対策を施した場合をそれぞれ示す。(UNEP/WMO資料より引用)

① 「シナジー解析アルゴリズム検討研究」

実施内容及び主な研究開発成果

■ 紫外・可視波長域のオゾン吸収特性を利用したオゾンのカラム量の導出検討

紫外・可視波長域で太陽光の反射光の吸収に基づいたSLCPsオゾン及び大気汚染物質の観測における、地表面反射率(アルベド)の仮定による影響について検討を行った。実大気モデルに基づく紫外・可視波長帯での太陽光の反射光の吸収特性を利用したSLCPsオゾン及び大気汚染物質のリトリーバル誤差評価を実施し、衛星による大気汚染物質観測において地表面特性の違いが及ぼす影響について評価した。さらに、地上分光観測装置で取得した太陽光の実観測データに基づいて、紫外・可視波長域の大気汚染物質のリトリーバルアルゴリズムの高精度化を実施した。

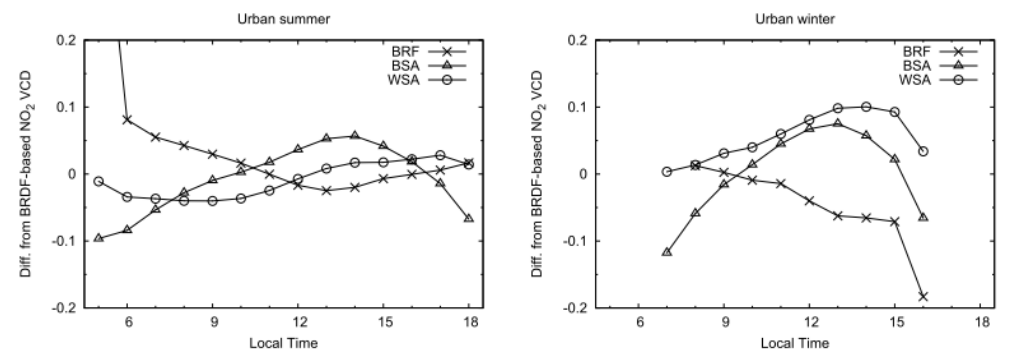


図2. BRDFを用いたときと、各種の地表面反射特性の近似を用いたときの対流圏二酸化窒素の気柱量の差(相対値)。夏季(左)と冬季(右)における対流圏二酸化窒素観測を想定している。

■ 赤外波長域のオゾン吸収特性を利用した自由対流圏から下部成層圏のオゾン濃度の導出検討

赤外波長帯で地球放射の吸収に基づいたオゾンのヤコビアン行列を十分な精度で計算するための検討を行った。さらに、より現実的な実大気モデルを仮定して、オゾンの地球放射の吸収特性を利用したオゾンのリトリーバル誤差を評価した。開発したアルゴリズムを赤外波長帯の実観測データに適用したところ、北半球の夏季には一部の領域で対流圏オゾン濃度の明瞭な増大が見られる一方、冬季のオゾンデータには濃度増大は見られないなど、熱赤外センサー単独でも700 hPaより上層の対流圏のオゾン濃度について有意な情報が得られることが実証された。

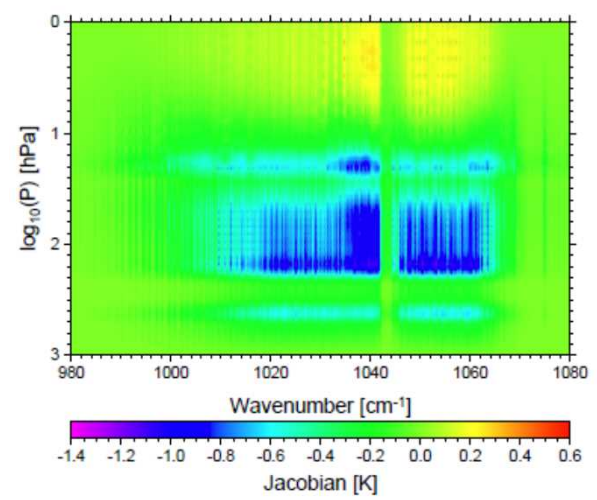


図3. 赤外波長域のオゾンのヤコビアン行列。

■ マイクロ波波長域のオゾン吸収特性を利用した上部対流圏以上のオゾン濃度の導出検討

マイクロ波波長帯で地球放射の吸収に基づいたオゾンのヤコビアン行列を十分な精度で計算するための検討を実施した。本研究での現実的な実大気モデルを仮定したシミュレーションの結果、マイクロ波波長帯での下方視観測はSLCPsオゾンの観測感度の向上には大きな寄与がないことが明らかになり、むしろ周縁光観測による高高度分解能を活かした観測が有効であることがわかった。

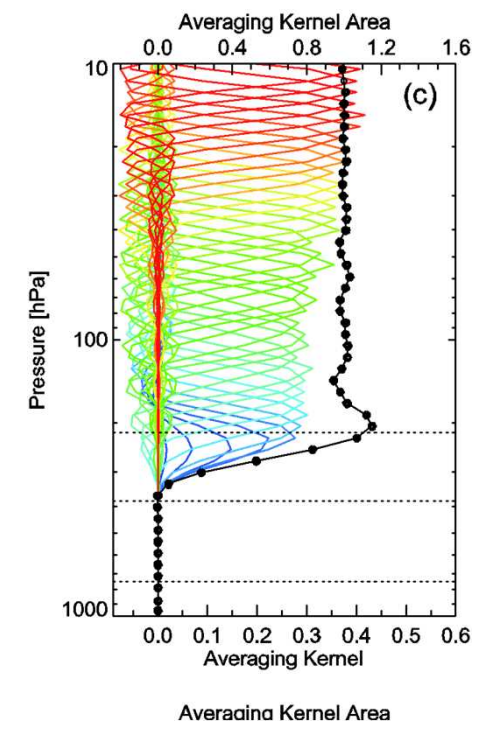


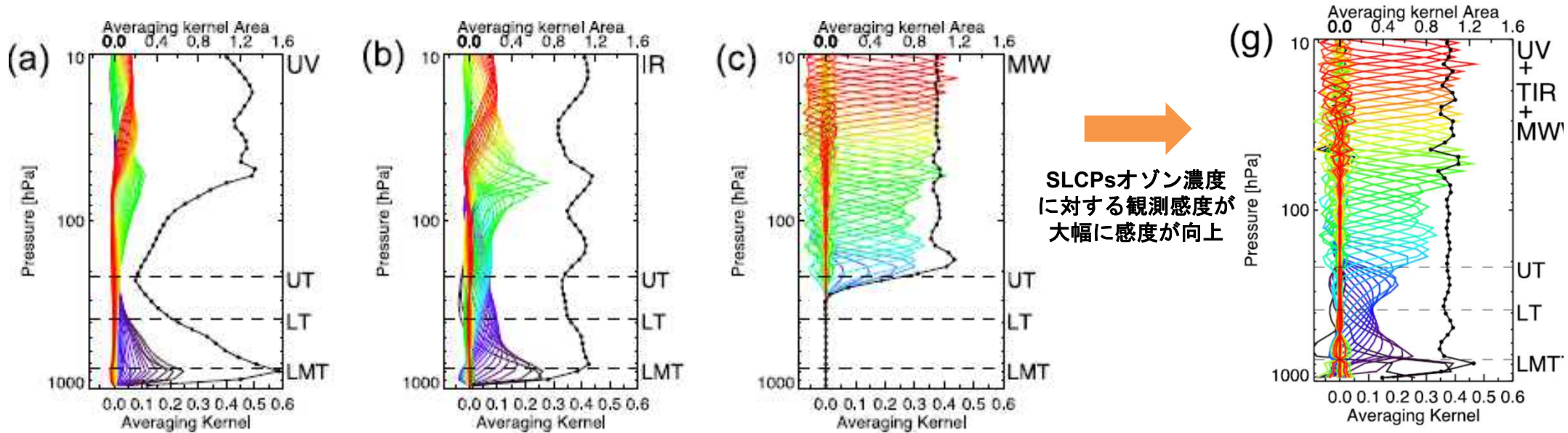
図4. マイクロ波センサーのリム観測を想定した場合のオゾンのアベレージングカーネル。

② 「シナジー解析アルゴリズム検討を踏まえた理論的な観測実現性の検討」

実施内容及び主な研究開発成果

■ フルスペクトルを利用したオゾンのシナジーリトリバーバル

紫外線波長帯 (UV)、赤外線波長帯 (TIR)、マイクロ波波長帯 (MW) の「フルスペクトル」を利用した、SLCPsオゾンのシナジーリトリバーバルを実現するために、まず異なる波長帯の観測スペクトルを扱う上での数値計算上の問題について検討した。さらに様々な大気条件のもとで、UV、TIR、MWの各波長帯の単独観測、および各波長帯を組み合わせた場合のSLCPsオゾン観測のリトリバーバルシミュレーションを実施した。各波長帯で計算したヤコビアン行列を用いて、各波長帯単独で観測を実施した場合、各波長帯を組み合わせて観測を実施した場合のオゾン濃度の観測の情報量を各高度領域別 (上部対流圏、下部対流圏、境界層内) に計算した結果、仮定した大気のプロファイルによってシナジー観測の効果は異なるものの、UV、TIR、MWをすべて組み合わせた「フルスペクトル」によるオゾンシナジー観測の場合 (図5g) が、上部対流圏、下部対流圏、境界層内のいずれの高度領域においても最も高い観測情報量が得られる可能性が高いことを明らかにすることができた。



SLCPsオゾン濃度
に対する観測感度が
大幅に感度が向上

従来型センサー (a: 紫外のみ、b: 赤外のみ、c: マイクロ波のみ) の対流圏オゾン濃度観測の感度

本研究で提案しているセンサー (紫外～赤外～マイクロ波) の対流圏オゾン濃度観測の感度

図5. 紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長帯、それぞれ単独の観測の場合と複数の波長帯を組み合わせた観測の場合について計算したアベレージングカーネル。

③ 「シナジー観測測器検討」

実施内容及び主な研究開発成果

■ シナジー観測測器検討

国際宇宙ステーション (ISS) 等の低軌道プラットフォームからの観測を想定した最適なセンサーハードウェア仕様の検討を実施した。超小型マイクロ波波長センサーのアンテナのハードウェア設計に関して、サブミリ波観測においてはアンテナの材料がクリティカル要素となる。本研究では、サブミリ波観測用のアンテナ試作のための試験ピースを購入して、低軌道プラットフォームからの観測を想定して設計した超小型マイクロ波波長センサーのハードウェアの実現性・有効性を実証するために、実際にサブミリ波観測用アンテナを試作し(図6)、マイクロ波波長帯に吸収特性を持つ大気分子の観測の試験を実施した(図7)。

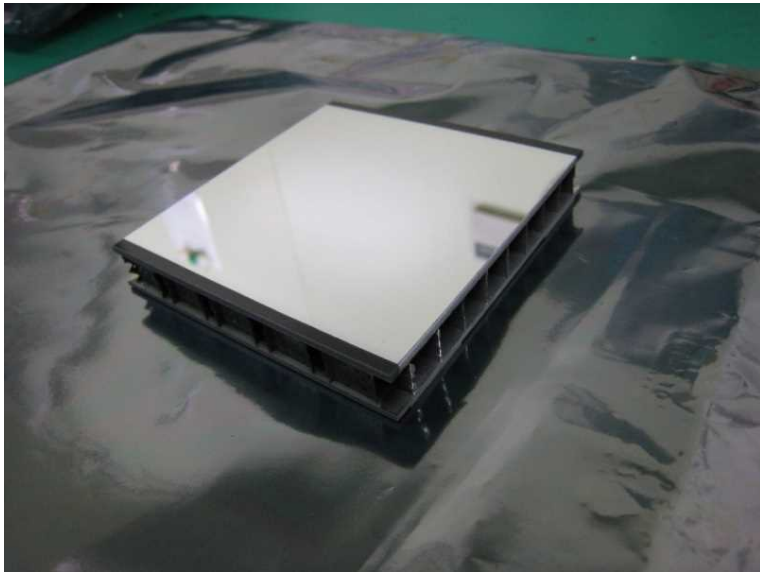


図5. 製作したサブミリ波観測アンテナ材料試験ピース。



図6. サブミリ波反射率測定の様子。

■ 大気汚染物質観測測器検討

本研究では、都市からバックグラウンドリモート地域までの広域における、主要なSLCPsである対流圏オゾンの生成を決定するNO₂等の窒素酸化物(NO_x)にも着目し、都市内外に分布するNO_x発生源情報を網羅的に観測する新しい手法として宇宙からの高精度観測を提案した。ISSのような低軌道観測によって従来よりも10倍以上良い水平分解能(1×1 km程度)でNO₂を面的に連続で計測し、NO_x排出のホットスポットを宇宙から検出するセンサーを確立するために、ミッションの目的及び意義とセンサーの観測要求の検討を実施した。観測精度のフィジビリティ検討を行った結果、1 kmスケール分解能での対流圏NO₂カラムホットスポット検出を世界で初めて実現することが可能であることが示された。

その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会出展
	国内：0 国際：0	国内：0 国際：11	国内：14 国際：7	国内：0 国際：0	国内：0 国際：0	国内：0 国際：0
	受賞・表彰リスト		2012 Best Poster Award in Atmospheric Chemistry: 佐藤ら、他、大気汚染と気候変動ミッションAPOLLOによる対流圏オゾン のシナジー解析手法の検討(2012年度大気化学討論会にて受賞)			

成果展開の状況について

■ ワークショップの開催

最終年度に「下部対流圏オゾン導出セミナー(Lower-tropospheric ozone detection from space)」と題した小規模な国際ワークショップを開催し、本研究の研究成果を発表するとともに、国内外の研究者と対流圏オゾンに関する最新の研究成果について議論した。

■ 国際宇宙ステーション新規ミッションの提案

本研究の研究成果であるSLCPs観測のフィジビリティ検討をもとに、国際宇宙ステーション(ISS)の新規ミッションとして二つのセンサー(APOLLO、uvSCOPE)を提案した。提案の結果、uv-SCOPEは2017年のISS中型ミッション搭載機器の第一候補となった。APOLLO(右図はISS/APOLLOによる観測イメージ)はISS大型ミッション搭載機器の第二候補となった。

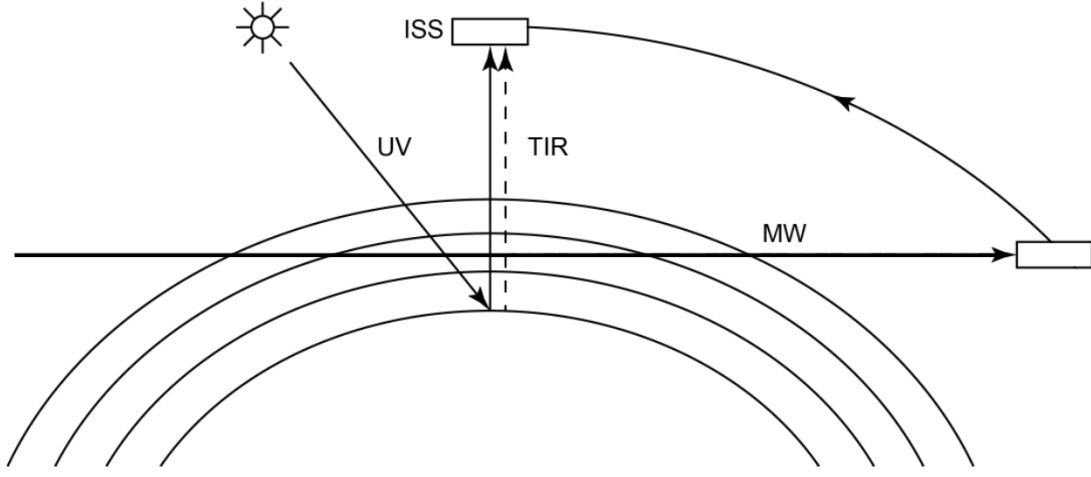


図8. 国際宇宙ステーション(ISS)に搭載された場合のAPOLLOセンサーのSLCPs観測イメージ。UV、TIRは下方視観測、MWはリム観測を行う。

今後の研究開発計画

本研究の枠組みの中で、ISSの低軌道をいかして従来よりも10倍以上良い水平分解能(1×1 km程度)で大気汚染物質であるNO₂を面的に連続で計測し、NO_x排出のホットスポットを世界で初めて宇宙から検出することを目的としたISS中型ミッション搭載機器である「uvSCOPE」の実現化を目指す。また、主要なSLCPsである対流圏オゾン宇宙から高精度で観測するために、本研究で開発したアルゴリズムを既存のUV、TIR、MWセンサーのシナジー観測データに適用し、実データに基づいた評価を行って、次世代の人工衛星搭載センサーの提案につなげたいと考えている。

事後評価票

※「4. (2) 成果」以外については平成27年3月末現在で記載

1. 課題名 低軌道からの大気汚染と気候変動物質の3次元観測：ミッションフィージビリティ検討研究
2. 主管研究機関 国立大学法人千葉大学
3. 事業期間 平成24年度～平成26年度
4. 総事業費 25百万円
5. 課題の実施結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 本研究では、従来の人工衛星搭載型大気汚染観測センサーによる観測では不可能であった、主要な短寿命気候汚染物質（Short-Lived Climate Pollutants; SLCPs）である対流圏オゾンの高精度三次元観測を目指して、低軌道からの紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長帯の組み合わせによるオゾン濃度のフルスペクトル観測が提案された。本研究で実施したシミュレーションの結果、本研究で提案されたフルスペクトルのシナジー観測が対流圏のオゾン濃度を最も精度よく評価できる最良の方法である（最大観測情報量が実現できる）ことが実証され、最下部対流圏、下部対流圏、上部対流圏のオゾンの濃度情報を分離して得られる可能性が示された。本研究で想定した仕様（波長範囲や波長分解能）のセンサーが実現すれば、対流圏オゾン濃度を三層に分けて観測することが可能である。
「必要性」 対流圏オゾン、メタン、ブラックカーボンなどのSLCPsは、今後約20年間に人間活動が原因で起こる地球温暖化の約半分に寄与すると考えられているため、各国が首脳レベルで協力して、二酸化炭素などの長寿命温室効果ガスの排出抑制と同時にSLCPsの排出量を削減し、短期的な地球温暖化抑制の成果を得ることを目指している。さらに、SLCPsは呼吸器疾患を引き起こすなど人類の健康にも悪影響を与え、穀物生産にも甚大な被害をもたらしうるため、SLCPsを全球で高空間分解能かつ高精度に観測することが急務となっている。そこで本研究では、1-2 kmの高水平空間分解能観測を実現できる低軌道衛星や国際宇宙ステーションをプラットフォームとして想定して、従来の人工衛星搭載型大気汚染観測センサーによる観測では不可能であった、道路や工場などの単位でのSLCPs放出源の特定を目指した。SLCPsのひとつである対流圏オゾンが高い水平分解能で観測することに加えて、地上付近と中上部対流圏に分離して濃度を観測することで、地上付近のオゾンが原因となる「健康や農作物へ

の被害」への影響と地上～中上部対流圏のオゾンが原因となる「温暖化影響」への影響の分離を実現できる観測センサーを考案し、社会的な要請に答えられる観測システムの提案を行った。

「有効性」

本課題では、主要な SLCPs であるオゾン及び大気汚染物質の窒素酸化物の高精度観測を目指して、フイージビリティ研究や観測要求・センサーの検討を行った上で、行政に対して国際宇宙ステーション (ISS) の新規ミッションとして APOLLO (大型ミッション) や uvSCOPE (中型ミッション) という複数のミッションの提案を行った。uvSCOPE は 2017 年の ISS 中型ミッション搭載機器の第一候補となり、APOLLO は大型ミッションの第二候補となっている。本研究は、これらの新規ミッション提案にあたっての基礎となるフイージビリティ検討であり、ミッション提案にあたって非常に大きな役割を果たしたといえる。

「効率性」

本研究では、各研究機関がそれぞれの強みを生かし、紫外・可視波長帯観測の検討、赤外波長帯観測の検討、マイクロ波波長帯観測の検討をそれぞれ別機関で実施した。さらに、これらの検討結果を統合し、さらにすべての波長帯での「フルスペクトル」観測を検討する段階では、研究代表者及び研究分担者が直接顔を合わせて議論する機会を定期的に (全体の打ち合わせを年に 2、3 回、別途各作業につき関係者のみの個別の打ち合わせをそれぞれ年に 2 回程度実施) 設けることで、リトリバル (気体濃度の導出) アルゴリズムの詳細な物理的・数学的検討を行った。リトリバルシミュレーションに基づいた観測システムの検討については当初の目標を達成できたが、測器の材質等に関わる具体的なハードウェアの検討に踏み込むことは十分にできていない。

(2) 成果

※平成 27 年 1 月 1 日現在

「アウトプット」

紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長帯の各波長帯単独で SLCPs オゾンの観測を実施した場合、各波長帯を組み合わせて観測を実施した場合の観測の情報量を、上部対流圏、下部対流圏、境界層内に分けて計算した結果、本研究で提案した紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長のすべてを組み合わせた「フルスペクトル」によるオゾンシナジー観測の場合が、上部対流圏、下部対流圏、境界層内のいずれの高度領域においても最も高い観測情報量が得られる可能性が高いことを明らかにした。「フルスペクトル」による観測シミュレーションは世界的にも実施例がなく、新規性の高い成果が得られている。

さらに、本課題のアドバイザーである研究者とともに、大気汚染物質である窒素酸化物の発生源情報を網羅的に観測する新しい手法として宇宙からの高精度観測を提案し、提案した観測センサーの観測精度のフイージビリティ検討を行った結果、1 km スケール分解能での対流圏 NO₂ のカラムホットスポット検出の実現可能性を世界で初めて示すことができた。

これらの結果を踏まえて、最終年度に「下部対流圏オゾン導出セミナー (Lower-tropospheric ozone

detection from space)」と題した小規模な国際ワークショップが開催され、本研究の研究成果が発表された。

「アウトカム」

本研究の研究成果である SLCPs 観測のフィージビリティ検討をもとに、国際宇宙ステーション (ISS) の新規ミッションとして二つのセンサー (APOLLO、uvSCOPE) が提案された。提案の結果、大気汚染物質である窒素酸化物 NO₂ の高空間分解能観測を実現する uvSCOPE は 2017 年の ISS 中型ミッション搭載機器の第一候補として採択された。

宇宙からの SLCPs 観測に対しては行政側からのニーズも高く、本研究は我が国における取組のひとつとしての役割を果たすことができた。

(3) 今後の展望

本研究の枠組みの中でミッションを提案し、採択された ISS 中型ミッション搭載機器である「uvSCOPE」の実現化を目指し、大気汚染物質の観測研究を行っている研究者コミュニティの中でさらに詳細な測器の検討やリトリバルアルゴリズムの開発がなされるものと期待される。また、主要な SLCPs である対流圏オゾン宇宙から高精度で観測するために、既存の紫外・可視波長帯、赤外波長帯、マイクロ波波長帯のセンサーによる同期観測データに本研究で開発したリトリバルアルゴリズムを適用し、実観測データに基づいた SLCPs 導出精度の評価を行って、次世代の人工衛星搭載センサーの提案につなげることが期待される。

5. 評価点

A

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

評価理由

近い将来の地球温暖化対策として、全球で高空間分解能かつ高精度に観測することが急務となっている SLCPs を、宇宙から高精度に観測するシステムを提案し、実大気に近い条件でのシミュレーション検討の結果、提案した3波長帯のフルスペクトル観測システムが最適であることを示した。さらに、大気汚染物質である窒素酸化物の高精度観測についても、最適な観測センサーを提案し、実際に国際宇宙ステーションの中型ミッションとして採択されるなど、専門的に高い成果を挙げており、宇宙航空利用の促進に貢献している。

今後、オゾン濃度に対する観測センサーの開発が大きく進化することを期待する。