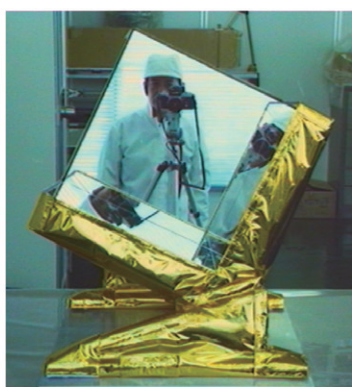
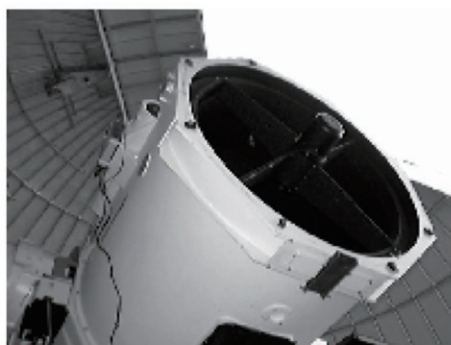


レーザセンシング学会誌

2023
Vol.4 No.2



RIS



1.5-m tracking system at CRL



Laser transmitter/receiver system

64 ページの記事参照

レーザセンシング学会誌
Journal of Laser Radar Society of Japan
Volume 4, Number 2 (October 2023)

◆**訃報**

小林喬郎先生の逝去を悼む

浅井和弘 60

◆**巻頭言**

Prefatory note

「巻頭言」を考えてみる

Consider the “Preface”

阿保 真 Makoto Abo 62

◆**解説**

Technical Review

地上衛星間レーザー長光路吸収法による大気微量ガス測定

Earth-to-satellite laser long-path absorption method for measuring atmospheric trace gases

杉本伸夫 Nobuo Sugimoto 64

◆**ニュース**

レーザセンシング学会論文賞を受賞して

左成信之 77

Aeolus Science Conference 2023 参加報告

岡部いづみ, 石井昌憲 78

Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2023 参加報告

清水 厚 80

◆学会だより 81

- ・学会誌への投稿案内
- ・論文賞の公募案内
- ・会員数の状況

編集後記 84

小林喬郎先生の逝去を悼む

小林喬郎先生（福井大学名誉教授）は、去る2023年9月7日に81歳でご逝去されました。先生は、一般社団法人レーザセンシング学会の前身であるレーザ・レーダ研究会の会長を務められ、現在は学会名誉会員・理事としてご活躍されていました。先生は、1972年に開催された第1回レーザ・レーダシンポジウム（仙台）から60年間にわたって、量子エレクトロニクス研究やレーザレーダ研究の分野において日本の科学技術の発展に貢献されました。ご葬儀は、先生が最晩年に住まわれた御殿場で、9月11日に家族葬として執り行われました。



先生は1941年に東京で生まれ、1964年に東北大学工学部通信工学科を卒業されました。1966年に同大学大学院工学研究科修士課程を修了、1968年に博士課程を中途退学された後、同大学電気通信研究所助手になられ、1975年には東北大学から工学博士の学位を授与、1976年から1978年までエール大学に留学されて最新の量子エレクトロニクス研究に取り組みられました。帰国後、1981年に東北大学電気通信研究所助教授、同年10月に福井大学工学部電気工学科教授として移籍、2002年には福井大学大学院工学研究科ファイバースペシャル工学専攻教授、この間の2003年から2005年まで同大学ベンチャービジネスラボラトリーセンター長を務められておられます。2007年に福井大学を退官、同年福井大学名誉教授の称号を授与、同年4月からは同大学特任教授として活躍されておられました。

先生のご研究は、量子エレクトロニクスとレーザレーダの分野において、1) 東北大学時代には新波長発振レーザの開発やその応用分野の探求、2) 福井大学時代には固体レーザの小型化や気温計測ラマンレーザレーダの開発など、産学連携や企業化を目指した研究の展開などに大別することができます。詳細については後述いたしますが、先生は国際的な学術交流においても優れた業績を残されておられます。これまでに多数の国際会議で招待講演者として登壇され、中国や東南アジアの著名な大学で招待教授として教鞭をとられると共に、これらの国々からの留学生に対して積極的に受け入れられ熱心に指導されました。さらに国際輻射委員会・レーザ大気研究国際調整グループ（ICLAS:International Coordination group for Laser Atmospheric Studies）の日本代表委員として長年にわたって活動され、2006年にはその貢献が認められて“Lifetime Achievement Award”を授与されました。

まず1) 東北大学時代ですが、先生はレーザ研究の歩みを振り返った手記（東北大学電気通信研究所、稲場研究室20周年記念冊子、「わだち1985」）で、レーザ研究の始まりを以下のように述べられています。「3年生後期、卒業研究のテーマを決めるために、スタンフォード大学から帰国したばかりの若き稲場先生の研究室に見学に行きました。狭い部屋の隅にある、液体窒素で冷やされたルビーレーザヘッドを数分間眺めていると、“一、二、三”というカウントダウンの後に、“ポカン！”という音とともに、壁に貼られた紙に真っ赤な光の点がぱっと現れるのを見せていただきました。1962年の頃だったと思いますが、これがおそらく日本初のルビーレーザだったのではないのでしょうか。その時から私は、女性と同じくらいにルビーの赤い光に魅了されてしまいました（一部引用）。“レーザ”という新しい光源の誕生を目の当たりにされ、新しい電磁波に夢を感じ取られた先生は、先見の明があったと言えます。その後、様々なレーザ媒質（固体、気体、液体）を使って新しい波長で発振するレーザの研究に取り組みながら、同時にこれらのコヒーレント光源を利用した大気レーザレーダの応用研究も力強く推し進めました。

特に注目すべきは、Natureに掲載された論文“H. Inaba and T. Kobayashi, Laser-Raman radar for chemical analysis of polluted air, Nature, **224**, 170-172 (1969)”で、大気汚染ガス検出のためのレーザ・ラマンレーダの提案と実証結果です。当時大気汚染は世界的な社会問題となっていて、時間-鉛直濃度分布や時間-視線方向

濃度分布などの測定可能性、掃引方式や航空機搭載による三次元的な大気汚染ガス観測法の実現性/有用性が論議されていました。先生らは世界に先駆けてこの手法を考案し、実際に紫外や可視域のレーザー光を使って発電所から出る二酸化硫黄 (SO_2) や自動車から出る二酸化窒素 (NO_2) などの汚染物質を遠隔測定することに成功されました。私が覚えている限りでは、この論文は、“Nature”で紹介された二番目の大気レーザーレーダの論文でした。ちなみに最初に掲載された論文は、“G. Fiocco and L. D. Smullin, Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60–140 km) by Optical Radar, Nature, **199**, 1275–1276 (1963)”です。私が小林先生にお会いしたのは、このレーザー・ラマンレーダ研究が始まる前後の1968年-1972年の4年半を稲場研究室で研究生、助手として在籍していた時で、以来レーザーリモートセンシング研究を通してずっと一緒にさせて頂きました。先生は当時まだ博士課程2年の院生でしたが研究室の長兄的存在として後輩の面倒をよくみておられ、助手になられてからも自身のレーザー・ラマンレーダの研究が理論的にも実験的にも急激な進捗がみられ多忙なころでしたが、院生や学部生の研究を丁寧に指導されていました。

次は、2) 福井大学に移られた後の輝かしい業績について顕します。先生は常日頃、「学問における真理の追求と実社会で役立つ研究は、大学人である私たちの大切な使命」とのお考えでした。そのモットーは、先生と研究室全員の努力で見事に花を咲かせ結実させたと言えるでしょう。1999年福井市において海外の著名な量子エレクトロニクス研究者を招いた国際レーザーセンシングシンポジウムを開催し、彼らと県内企業の技術者や大学院生たちが技術交流する機会を提供されました。また2000年から5年間、大学では加工光源用高輝度Yb:YAG固体レーザーの研究を進め、この光源を用いた超高精度加工、高機能加工、高速加工、新機能創成、クリーン加工といった特徴を有する機能性材料創製と加工技術の開発を県内工業界との地域連携プロジェクトを推進されました。ベンチャービジネスラボラトリーのセンター長時代は、産学連携での大学発の先進技術を民間企業に移転させる主導役を存分に発揮されました。先生はアイデアが湧き出る方で、新方式の干渉型光ファイバセンサシステムの研究にも精力的に取り組みられ、研究室の実験成果を基に2006年には大学6番目のベンチャー企業「株式会社オプテレ」を設立、ご自身が代表取締役となられ、将来的には医療現場、特に介護分野をも視野に入れた商品開発を目指しました。一方、ラマン散乱レーザーレーダの実用化研究は、先生の生涯にわたる大事なテーマでした。ご存知のように、多くの人は地表面から1500m位までにある風速や気温の鉛直勾配がとくに大きく乱流が発生し易い大気境界層内で生活をしています。気象学、環境学を始め多くの分野からこの層内での任意の方向、任意の高さでの気温に対する情報が渴望されていました。先生は、 N_2 分子と O_2 分子の回転ラマン散乱強度の違いに着目して大気温度計測用回転ラマンライダーを提案し、院生たちと実証実験を通して基礎技術の確立を図り、最終的に気象測器会社に技術移転を行い商品化に取り組みまれていました。この様に、先生は現状に満足せず常に新しい分野での技術開発に挑戦をする方でありました。

先生は石巻高等学校（宮城県立）では山岳部所属だったくらい山登りが大好きで、福井に行かれてからも毎年県内の登山イベントには研究室の学生たちと参加していたそうです。奇遇にも、私の娘が通っていた高等学校の校長先生がなんと小林先生の恩師で山岳部顧問だったことが判り、山岳部時代の小林少年についてよくお話をしていただきました。先生は退官後に富士山麓の御殿場市に居を移されましたが、研究意欲は衰えずその後も千葉大の久世先生、椎名先生や千葉大の学生さんたちと富士山頂をベースとした大気環境計測の研究活動を続け、また毎年学生さんたちとも一緒に元気に登山を楽しまれていたそうです。そして、亡くなられる前年2022年夏には箱根の山を制覇したようです。先生の最後の研究発表として、NPO法人・富士山測候所を活用する会主催による第16回成果報告会プログラム（2023年3月、中野サンプラザ）に「小林喬郎、椎名達夫、久世宏明ほか、“富士山域の温室効果ガスの小型吸収ライダーによる観測”」と掲載されていました。

先生がこよなく愛した富士山に見守られ、安らかな眠りにつかれますようにお祈り申し上げ追悼の言葉とさせていただきます。合掌。

浅井和弘（東北工業大学名誉教授）

「巻頭言」を考えてみる

阿保 真

東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Consider the “Preface”

Makoto Abo

Tokyo Metropolitan University,
6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

(Received September 22, 2023)

What is the preface of the journal? I review the preface of the Journal of Laser Sensing Society of Japan and discuss the future of laser sensing technology.

キーワード：巻頭言，レーザセンシング

Key Words: Preface, Laser Sensing

レーザ・レーダ研究会からレーザセンシング学会になり一番変わったのは、学会誌が発行されたことだと思う。レーザセンシングに関して、まとまった日本語の専門書が無く、大学では学生にこれを読めば良いと薦められる教科書が無かったのが悩みの種であったが、本学会誌の解説記事は初心者にも大変分かり易く、レーザセンシングに関する知の集大成となっている。これまで学会誌の企画編集に関わられた編集委員の皆様方の努力に頭が下がる。そんな編集委員会から今回巻頭言の執筆依頼を受け気安く引き受けてしまったが、巻頭言というものを書いたことが無い私は、いざ書くとすると出発点が見つからない。そこで、まず学会誌における「巻頭言」とは何だろうか考えてみたい。今までの本会学会誌の巻頭言を振り返ってみると、以下のとおりとなる。

1巻1号 特集：エアロゾル計測Ⅰ，「レーザセンシングする」を考えてみる，岩坂 泰信
 1巻2号 特集：衛星搭載ライダー，日本における衛星搭載ライダーの実現に向けて，内野 修
 2巻1号 特集：ライダー技術Ⅰ，ライダー技術の発展と産業応用，平野 嘉仁
 2巻2号 特集：光センシングⅠ，様々な光センシング技術の発展への期待，藤井 隆
 3巻1号 特集：ライダー観測Ⅰ，環境リモートセンシングとレーザセンシング，久世 宏明
 3巻2号 特集：産業応用ライダー，産業応用ライダー特集：緒言，小林 喬郎
 4巻1号 特集：ライダーデータ利用Ⅰ（エアロゾル・雲），巻頭言：ライダー観測とデータ利用，杉本 伸夫
 基本的には、特集号のテーマに沿った内容である。ところが本号は、本学会誌初めての特集テーマのない号である。そもそも、自分は他の学会誌も含めて巻頭言を意識的に読んだことが無かったので、これを機会に目を通してみた。私は現在13の国内学会に所属しているが、そのうち学会誌を発行しているのは12である。本学会誌はオンラインのみであるが、昔に比べて薄くなったが冊子の学会誌を送って来る学会は10である。

まず、各学会誌の最新号の巻頭言に相当する内容を分類してみた。①特集記事の紹介：3（応用物理学会，日本光学会，レーザセンシング学会），②講演会実行委員長のあいさつ：2（日本エアロゾル学会，大気環境学会），③編集委員長のコメント：2（日本リモートセンシング学会，日本火山学会），④新会長挨拶：1（日本赤外線学会），⑤テーマ無しのコラム：2（電子情報通信学会，レーザー学会），⑥巻頭言なし：2（日本気象学会，計測自動制御学会）となった。総会後・講演会前の時期を反映しているが、自由テーマの巻頭言は

少なく、巻頭言の無い学会誌もあるのは意外であった。

次に今回執筆依頼を受け、本学会の学会誌全ての巻頭言に目を通した。特集テーマに関する記述がメインであるが、テーマに関連して学会の歴史的な経緯や、そこから導き出される学会の将来に対する展望が示されているものも多いことが分かった。そこで、この巻頭言は私の気になった巻頭言から一部を引用し、そこに私の感想を加えることにした。

岩坂氏¹⁾は、レーザセンシングの対象物は直接手に取り観察できないものが多い、それがどこにあり、どんな状態なのかを知る必要性は、極めて広い分野で生じているに違いないと述べた。そして、未開拓領域として、各種構造物/建造物の内部や表面、森林内や呼吸器管内などの微小物質（エアロゾル）の振る舞いを例として挙げている。ライダーはエアロゾルの観測が得意分野と言われているが、まだまだ未開拓領域がある事に気付かされた。ライダーの未開拓領域として私が思いつくのは、農業環境、生体内部、微生物などの顕微領域、火山ガスや火山内部、水域である。これらはすでにレーザセンシングが試みられているが、まだまだ開拓の余地があると考えている。

平野氏²⁾は、遠隔からみえないものを見る技術として、ライダーの産業応用での最新の進化について述べている。そこではレーザや検出器の技術の進化に伴い、適用範囲の拡がり期待できる事例が示されている。例えば、イメージセンサの進化と連携したフラッシュライダーは、センサの進化無しでは実現しない事例だろう。さらに今後の進展について、フォトニクス結晶面発光レーザによる高出力半導体レーザのアレイ化による大気散乱計測、DFC 構造素子と大口径PPLNによるフラッシュライダーの実現は、大気ライダーの小型化につながり夢が膨らむ。また、LiDARが拡張現実（AR）生成などの用途で注目を集めていることが、冒頭に述べられている。これに関して思い浮かべるのが、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムによる、人間中心の社会 Society 5.0の提案である。これを実現するには、3DグラフィックやARゴーグルが象徴的ではあるが、実際には、現実空間のセンシング技術が重要となるはずである。現状の単物体の形状や位置計測にとどまらず、現実空間のあらゆる情報（例えば温度、湿度、ガス濃度、エアロゾル濃度など）のセンシングが、究極の身近なレーザセンシングになるのではないだろうか。

藤井氏³⁾は、ライダーの分野で培われてきた優れた遠隔計測技術を、他の光センシング技術に適用することが出来れば、新たな技術の開発が可能になると述べている。レーザセンシングの依拠する物理/化学現象は、すでに利用されている散乱、吸収、蛍光、ラマン以外にも、まだ有るはずである。最近では、LIBSや共鳴ラマンなどの利用が試みられているが、常に最新の科学技術動向をセンシングすることも、重要であると考えさせられる。

久世氏⁴⁾は、ライダー技術やライダーによって取得される環境データの共通プラットフォームの提供が進展すれば、環境リモートセンシング分野の発展と社会貢献が期待される、と述べている。地球環境問題は、温暖化とそれに伴う極端気象現象の増加で、人類の存亡にもなり得る大きな課題として顕在化しつつある。これらの対策を効果的に進めるためにも、他のリモートセンシングシステムとレーザセンシングの効果的な組み合わせの検討が、急務であると実感させられる。

最後に、レーザセンシング技術とあまり関係のなさそうなキーワードを、思いつくままに挙げてみる。ChatGPTに代表される生成系AIが脚光を浴びているが、機械学習技術をデータ処理だけではなく、特に経験や熟練の技が必要とされるレーザセンシング機器の調整やメンテナンスに利用できないだろうか？ 少子高齢化に伴う働き手不足、高齢者の介護、不十分なインフラの管理など、少ない人手をカバーする支援技術にレーザセンシングが生かせないだろうか？ 極端気象による災害が常態化、深刻化しているが、よりきめ細かな災害警報システムにレーザセンシングが生かせないか？ レーザセンシング技術は、他のセンサ技術に比べればまだまだ黎明期であり、これからが実応用に進むべき技術だと、私は信じている。

引用文献

- 1) 岩坂泰信, 「レーザセンシングする」を考えてみる, レーザセンシング学会誌, **1** (1), 1-3 (2020).
- 2) 平野嘉仁, 「ライダー技術の発展と産業応用」, レーザセンシング学会誌, **2** (1), 1-3 (2021).
- 3) 藤井隆, 「様々な光センシング技術の発展への期待」, レーザセンシング学会誌, **2** (2), 38 (2021).
- 4) 久世宏明, 「環境リモートセンシングとレーザセンシング」, レーザセンシング学会誌, **3** (1), 1-2 (2022).

地上衛星間レーザー長光路吸収法による 大気微量ガス測定

杉本 伸夫*

国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Earth-to-satellite laser long-path absorption method
for measuring atmospheric trace gases

Nobuo Sugimoto*

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

*Corresponding author

(Received May 25, 2023, Revised July 20, 2023, Accepted July 28, 2023)

Atmospheric trace gas measurement methods using earth-to-satellite laser long-path absorption are reviewed. An experiment using a retroreflector on a polar orbit satellite was performed in the Retroreflector In Space Experiment in 1996. Absorption spectrum of ozone in 9- μm region was successfully measured using TEA CO₂ lasers. However, the optical efficiency and the efficiency of operation were low as an observation system. One way long-path absorption to a receiver on a geosynchronous satellite is much efficient. Multiplexing of the measurements from multiple ground stations is also possible using time sharing of pulsed integrated path differential absorption (IPDA) method. The use of dual comb spectroscopy would be also possible, though multiplexing of ground stations is not possible. The geosynchronous satellite system can provide continuous column concentration data over the ground stations. The data will be complementary to space borne IPDA lidars and passive sensors, and also useful for validation of passive sensors.

キーワード：レーザー長光路吸収, 大気微量ガス, 人工衛星, 長光路差分吸収, デュアルコム分光

Key Words: Laser Long-Path Absorption, Atmospheric Trace Gases, Satellite, Integrated Path Differential Absorption, Dual Comb Spectroscopy

1. はじめに

本文では、地上から人工衛星に送信したレーザー光を用いて大気微量ガスの分光測定を行う地上衛星間レーザー長光路吸収法について解説する。地上衛星間レーザー長光路吸収測定の方法は、1976年に出版された E. D. Hinkley 編の書籍“Laser Monitoring of the Atmosphere”の第6章で提示されているものがおそらく最初であろう¹⁾。そこでは分光手法や測定対象の具体的な検討については記述されていないが、太陽光や大気放射を光源とする衛星搭載受動センサーに比べて高感度の測定の可能性を予感させるものであった。筆者はこれに触発されて、静止軌道衛星を用いた地上衛星間レーザー長光路吸収による計測システムの概念を提案した²⁾。これは地上に配置した多数のレーザー局と静止軌道衛星に搭載した検出器で観測システムを構成するもので、多数の地上局を区別するためにアダマール変換光学を用いるものであった。この手法は、光源をアダマールコードで変調する能動アダマール変換分光法^{3,4)}の拡張として考案したものであった。なお、能動アダマール変換光学は、疑似ランダム変調ライダー⁵⁾と類似した手法でもあった。しかしながら、静止

衛星へのセンサーの搭載は現実的には極めて困難であったため、レトロリフレクター Retroreflector in Space (RIS) を ADEOS (Advanced Earth Observation Satellite) に搭載して往復の光路で分光測定実験を行うことを提案することとなった。

静止軌道衛星への片道のレーザー長光路吸収測定と低軌道衛星搭載リフレクターによる地上衛星間の往復の測定では、レーザー送受信システムも、分光測定手法も大きく異なる。低軌道衛星搭載レトロリフレクターを用いた測定では、衛星が高速で移動するために生じる反射光のドップラーシフトが大きく、ドップラーシフトは地上局から見た衛星の位置に依存して変化するため、これを考慮した分光測定手法が必要である。また、地上局には大口径で高速高精度の衛星追尾システムが必要である。RIS 実験では、東京都小金井市にある通信総合研究所 (CRL) (現情報通信研究機構 (NICT)) の口径 1.5 m の衛星追尾望遠鏡を利用し、単一縦モードパルス炭酸ガスレーザーを光源とする送受信システムを新たに開発して分光測定実験を行った⁶⁾。反射光のドップラーシフトを利用して波長掃引する手法によりオゾンの吸収線の測定に成功した。ADEOS 衛星は、太陽電池パドルの破断のため約 10 ヶ月で運用停止となったため当初計画した実験の一部分しか実施できなかったが、技術実証としては成功したと言える。しかしながら、レトロリフレクターを用いる大気微量ガスの測定は、測定系の光学的効率、運用効率 (測定可能時間/衛星の運用時間) とともに非常に低いため、実用的な観測システムとは言い難いものであった。一方、衛星側で地上からのレーザー光を受信する方法ではレトロリフレクターを用いる方法に比べて送受信の光学的な効率が高く、地上局に大規模な衛星追尾望遠鏡を必要としない。静止軌道衛星で受信する方法は運用効率が高く、また、多数の地上局との間の測定を多重化して同時に行うことも可能である。

RIS 実験以降、筆者らの研究を除くと、地上衛星間、あるいは衛星・衛星間のレーザー長光路吸収に関する研究の報告は少ないが、Hoffmann ら⁷⁾は、衛星間でレトロリフレクターを用いたレーザー長光路吸収による上層大気の水蒸気の測定の可能性を検討している。また、Satoh ら⁸⁾は装置の観点から、衛星から地表面反射を用いて往復で測定する方式 (衛星搭載長光路差分吸収ライダー: Integrated Path Differential Absorption (IPDA) lidar)、地上から衛星搭載レトロリフレクターを用いて測定する方式、地上からのレーザー光を衛星で受信する方式を考察し、衛星搭載 IPDA ライダーとともに、地上から衛星への片道の測定方式の妥当性を示している。

現在、衛星搭載受動センサーによって、多くの大気微量ガスが測定されている。例えば JAXA の GOSAT、GOSAT-2⁹⁾、NASA の OCO2¹⁰⁾、EUMETSAT の GOME-2¹¹⁾、Sentinel-5P の TROPOMI¹²⁾、Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) 衛星搭載の Cross-track Infrared Sounder (CrIS)¹³⁾、静止軌道衛星では韓国の Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS)¹⁴⁾、最近打ち上げられた米国の Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (TEMPO)¹⁵⁾ などである。また、衛星搭載 IPDA ライダーについては、2022 年 4 月に炭酸ガス観測 IPDA ライダーが搭載された中国の Daqi 1 (大気 1) 英語名 Atmospheric Environment Monitoring Satellite 1 (AEMS 1) が打ち上げられた他¹⁶⁾、2028 年には欧州のメタン観測ミッション Methane Remote Sensing Lidar Mission (MERLIN) が計画されている¹⁷⁾。地上衛星間のレーザー長光路吸収法を考えるにあたっては、これらの受動センサーや衛星搭載 IPDA ライダーとの連携を考えることが重要である。

太陽光を光源とする受動方式に対するレーザー長光路吸収法の利点は、原理的に高感度の測定が可能であること、昼夜を問わずほぼ同じ条件で測定が可能であること、大気微量ガスの導出において複雑な放射伝達の解析を必要としないこと、部分的に雲があるような状況や光学的に厚いエアロゾルがある場合にも測定の可能性があること等である。一方、地上衛星間レーザー長光路吸収法の欠点は測定が地上局の上空のみで行えないことであるが、静止軌道衛星を用いるシステムでは受動センサーや衛星搭載 IPDA ライダーとは異なる切り口で時間的に連続したデータが得られる。また、多数の地上局の測定を多重化すれば、都市や発生源近傍などの局所的なスケールの現象の観測や監視にも応用できる。また、受動方式の衛星センサーの検証にレーザー長光路吸収法を用いることも意義が大きいと考えられる。

本文では、まず第 2 節で ADEOS 搭載レトロリフレクター RIS を用いた実験の概要と成果を紹介する。次に第 3 節で衛星に検出器を搭載する地上衛星間レーザー長光路吸収法について光学的な効率を考察する。また、様々な大気微量ガスの測定の可能性の検討結果を紹介する。第 4 節では静止軌道衛星に検出器を搭載したシステムにおける分光手法について考察する。ここでは、複数の波長のレーザーを用いる差分吸収方式を

中心に考察するが、光周波数コムの利用の可能性についても触れる。第5節で今後の課題と展望を述べる。

2. RIS 実験の概要と成果

RIS 実験は、軌道高度約 800 km の極軌道衛星 ADEOS (「みどり」1996 年 8 月 17 日打ち上げ) に搭載したレトロリフレクター RIS に地上からレーザーを送信し、反射光を受信することによって、大気中の微量ガスの濃度を測定する実験であった⁶⁾。Fig. 1 に RIS 実験の概念を示す。これを実現するためには以下のような課題があった。

- 1) 高速高精度の大口径の衛星追尾システムが必要 (そこで CRL (現 NICT) の口径 1.5 m の衛星追尾望遠鏡 (Contraves 社) を利用した。)
- 2) 衛星搭載レトロリフレクターの最適化 (衛星が約 7 km/s の速度で進行するため、地上局から送信したレーザーの反射光の光行差が大きく、最大約 60 μ rad となる。このため完全なレトロリフレクターでは反射光が地上局に戻らない。そこで衛星までの距離が 800 km の場合反射ビームは約 50 m ずれる。そこで曲面の入ったコーナーキューブを新たに開発した。)
- 3) 反射光のドップラーシフトを考慮した分光手法の開発 (衛星の移動速度が速いので反射光のドップラーシフトも大きい。そこでレーザー波長は固定し、衛星の進行に伴って変化するドップラーシフトを利用して吸収線を掃引する手法を考案した。)

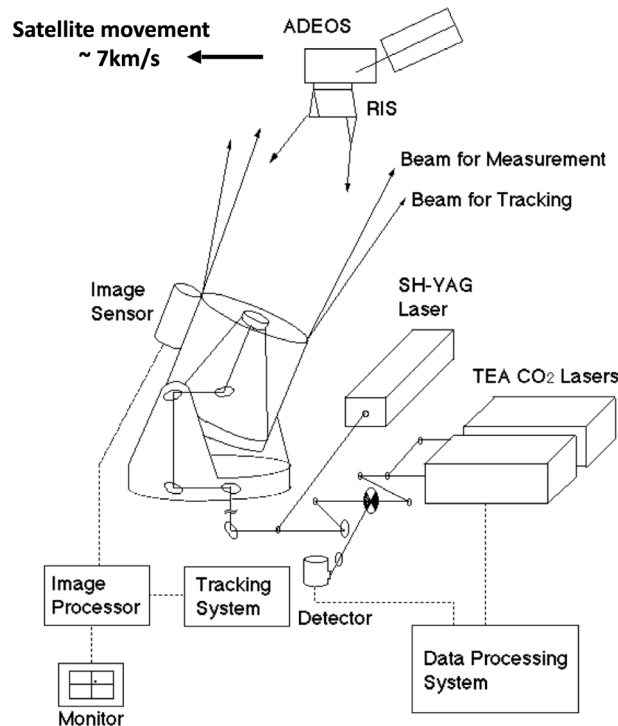


Fig. 1 Concept of the Retroreflector in Space Experiment.

2.1 RIS の光学設計

反射光の地上パターンを最適化するために RIS のコーナーキューブのひとつの面にわずかな曲面を入れた¹⁸⁾。Fig. 2 に (a) ADEOS 衛星上の RIS の配置, (b) RIS を正面から見た反射光の波面, (c) RIS の反射光の地上パターンを示す。反射光の遠距離における強度パターンは進行方向の前後 2 つに別れ、後のピークが地上局に戻るよう最適化した。正面から見た RIS の有効径は約 50 cm である。RIS は ADEOS の前方に配置され、ADEOS 搭載の受動センサーへのレーザー光の干渉を避けるため光軸を傾けて取り付けられた。地上局から見て ADEOS が向かって左側を通過するパスにおいて、低仰角で RIS を捕捉した後、地上局を通過するまでの間 (約 3 分間) に分光測定が行われた。Fig. 3 に、RIS に 10 μ m のレーザーを送受信する場合の光学的効率 (後述) のシミュレーション結果を地上局に対する衛星の位置の関数として表示した。効率は衛

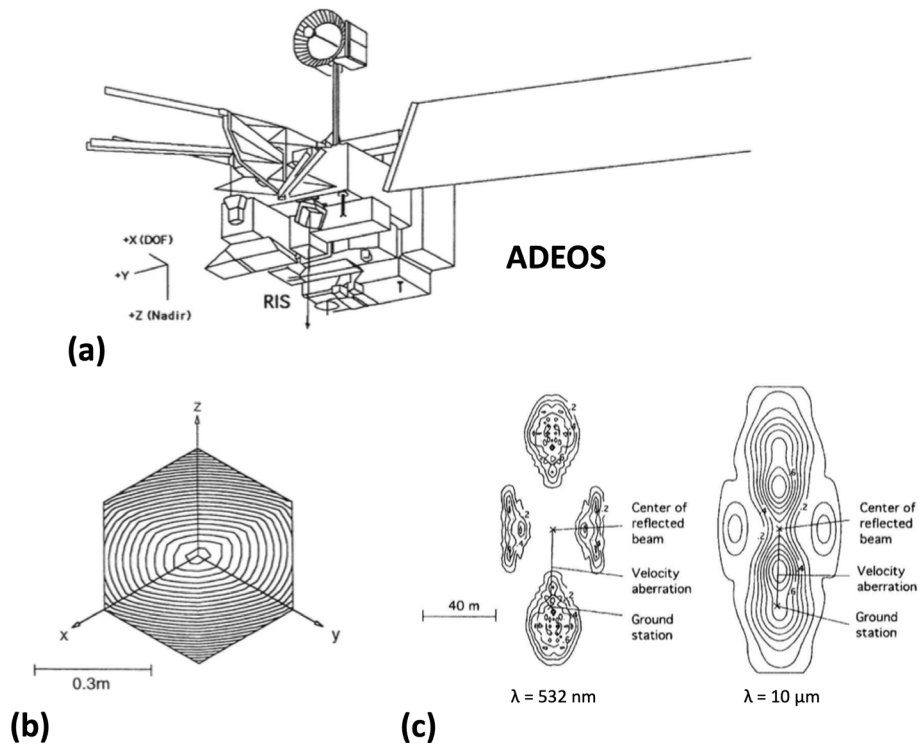


Fig. 2 (a) Configuration of RIS on ADEOS, (b) near-field wave front of the reflected beam from RIS (interferogram at 632 nm), and (c) ground patterns of the reflected beam intensity at 532 nm and $10 \mu\text{m}$ ⁶⁾.

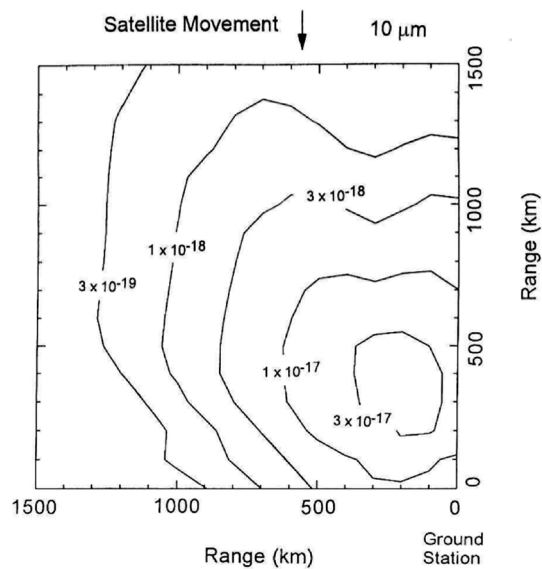


Fig. 3 Simulated efficiency of the reflection of RIS at $10 \mu\text{m}$ as a function of the horizontal position of ADEOS in orbit relative to the ground station¹⁹⁾.

星の位置に依存して2桁程度変化する。RISはホロー型のキューブコーナーレトロリフレクターで、軽量構造の3枚のミラーが接着され一体化されている。製作は米国PLX社で行われた。3枚のうちの進行方向を向いたミラーにわずかな球面が入っている。

2.2 反射光のドップラーシフトを利用した吸収分光手法

衛星の進行速度が速いため反射光のドップラーシフトも大きく、その大きさは衛星から見た地上局の方向と進行方向のなす角度の余弦におよそ比例して変化する。RIS 実験の場合、波長 $10\ \mu\text{m}$ において、最大でおよそ $1.3\ \text{GHz}$ である。これは、例えば成層圏オゾンの孤立した吸収線のドップラー幅に比べてずっと大きい(オゾン分子の運動速度が $\sim 400\ \text{m/s}$ に対して衛星の速度は $\sim 7\ \text{km/s}$)。そこで RIS 実験では、レーザー波長は固定して、衛星の進行に伴う反射光のドップラーシフトの変化を利用して吸収スペクトル測定を行う方法を採用した¹⁹⁾。レーザーには単一縦モードの TEA (Transversely Excited Atmospheric pressure) CO_2 レーザーを 2 台用いた。1 台 (primary レーザー) は測定対象分子の吸収スペクトルがドップラーシフトの波長範囲に入る発振線に同調し、もう一台 (reference レーザー) は参照信号として吸収の小さい発振線に同調した。Fig. 4 に成層圏オゾンの測定に用いた発振線と大気のスเปクトルの例を示す。ドップラーシフトの範囲を点線で示す。Fig. 4 左が吸収測定用、右が参照用の発振線である。Fig. 4 左の $1043.18\ \text{cm}^{-1}$ 付近の鋭い吸収線が成層圏オゾンによるもので、背景に CO_2 の吸収が重なっている。 CO_2 は地上付近に分布するので大きな圧力広がり (数 GHz) を持つ。圧力広がりには衛星の速度によるドップラーシフトと比べても大きい。なお、レーザーはゲインセルを用いたハイブリッド型の単一縦モードの TEA CO_2 レーザーで、パルス動作時以外はゲインセルのゲインを上げて CW 発振させて共振器を制御し、パルス動作時はゲインを下げてピークパワーの大きなパルスが得られるようにした。CW 発振を利用した共振器制御により、発振線をすばやく切り替えることが可能であった²⁰⁾。このレーザーは米国 Laser Science 社で製作された。なお、Laser Science 社は 1960 年に He-Ne レーザーの連続発振に最初に成功した Ali Javan が 1981 年に設立した会社である。

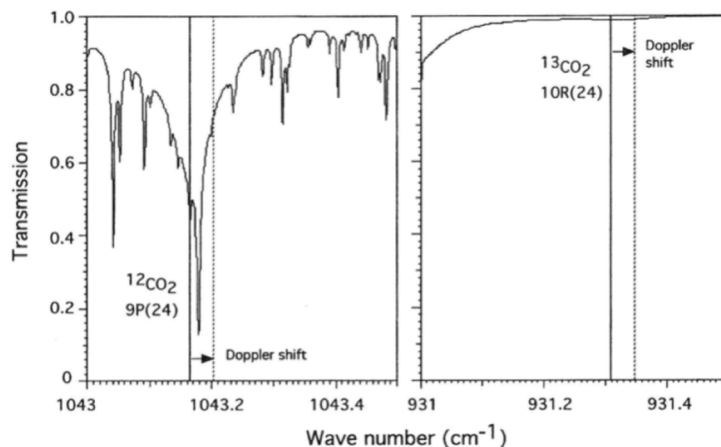


Fig. 4 The CO_2 laser lines used for the ozone measurement and the atmospheric absorption spectrum calculated with HITRAN⁶⁾.

2.3 RIS 実験システム

CRL (現 NICT) 光センターの口径 $1.5\ \text{m}$ の衛星追尾望遠鏡のクーデ室に設置したレーザー送受信部のブロック図を Fig. 5 に示す。RIS の能動追尾 (および測距) 用の $532\ \text{nm}$ のレーザー送受信部と分光計測用の 2 台の TEA CO_2 レーザーの送受信部から構成された。能動追尾では追尾望遠鏡の主鏡脇に取り付けられたガイド望遠鏡も併用した^{6,21)}。Fig. 6 に ADEOS 搭載 RIS のフライトモデル、CRL の $1.5\ \text{m}$ 追尾望遠鏡、レーザー送受信部の写真を示す。

2 台の CO_2 レーザーからのパルスは $200\ \mu\text{s}$ の間隔を開けて送信され、衛星の捕捉から測定終了まで (約 200 秒) の間、繰り返し数 $50\ \text{Hz}$ で送受信パルスをショット毎に記録した。記録にはトランジェントデジタルイザ (デジタルオシロスコープ LeCroy 9310L) をメモリー分割モードで使い、パルス毎に $10\ \mu\text{s}$ の波形 ($50\ \text{MHz}$ で 512 ワード、精度 8 bit) を記録した。必要な時間領域を記録するために衛星軌道要素から受信パルスのタイミングを予測してトリガ信号を与えた。また、全てのパルス信号を逃さず記録するために、デジタルイザ 2 台を交互に切り替えて用いることによってコンピュータへのデータ転送によるデッドタイムが生じないようにした。レーザーの制御とデータ収集にはそれぞれコンピュータ (Macintosh IIVX) を使い、ソフト

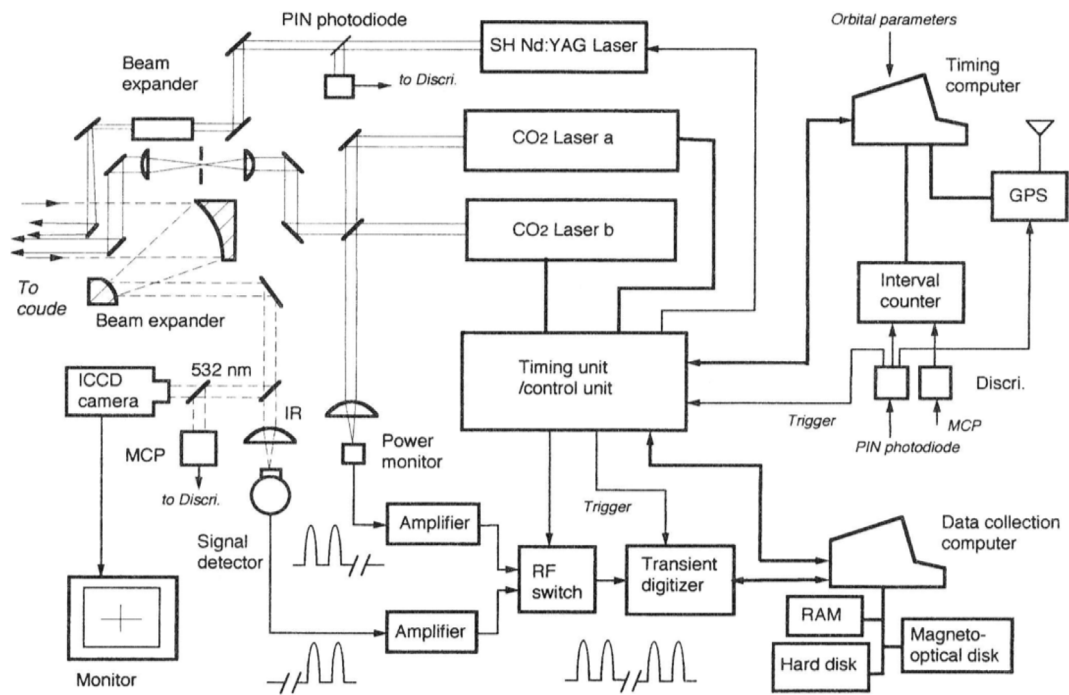
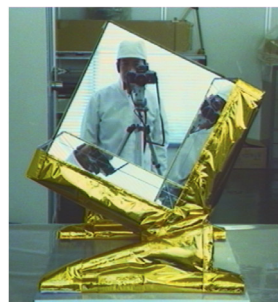


Fig. 5 Block diagram of the laser transmitter/receiver system⁶⁾.



RIS



1.5-m tracking system at CRL



Laser transmitter/receiver system

Fig. 6 Photograph of RIS, 1.5 m tracking telescope at CRL, and the laser transmitter/receiver system for the RIS experiment⁶⁾.

ウェアは LabView を用いて作成された。

2.4 RIS 実験の成果

RIS 実験の主要な成果は、(1) 球面の入った大口径レトロリフレクター RIS を ADEOS に搭載し、地上から送信したレーザー光の反射の受信に成功、(2) 軌道要素に基づく追尾に加えて 532 nm レーザー光の RIS による反射を用いた能動追尾を行い、追尾精度 30 μrad 以上を達成、(3) ADEOS 衛星の多数のパスについて、532 nm の反射光の強度を恒星の明るさと比較して評価し、設計値とほぼ一致する反射光が得られることを確認、(4) CO₂ レーザーを用いてオゾンの差分吸収測定を行い、ドップラーシフトを利用して吸収スペクトルが測定できることを実証、などである。

Fig. 7 に追尾望遠鏡のガイド望遠鏡の ICCD カメラおよびクーデ室の ICCD カメラで捉えた RIS からの 532 nm の反射画像を示す。ガイド望遠鏡の画像の視野は約 12 mrad、クーデ室の画像の視野は約 200 μrad である。

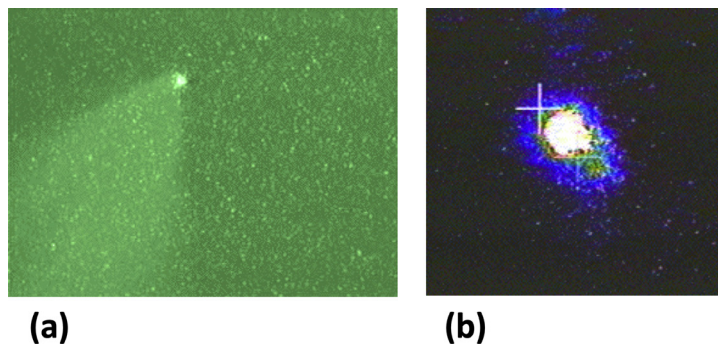


Fig. 7 Image of reflection from RIS at 532 nm taken by the ICCD cameras (a) on the guide telescope and (b) in the coude system.

ガイド望遠鏡で捉えた RIS の ICCD 画像を用いて、軌道上の RIS からの反射光の強度を評価した。予め明るさ（等級）の異なる恒星の画像を取得しておき、これと比較することによって測定された RIS の反射がどの等級に分類されるかを調べた。等級から受信光強度に換算して RIS の反射光の受信効率を求めた。効率 η (m^{-2}) は次式で定義された。

$$P = (16/\pi^2)(P_0/\theta_t^2)T^2\eta_{RIS}A_r\eta_{sys}\eta \quad (1)$$

ここに、 P は受信光強度、 P_0 は送信光強度、 θ_t は送信ビーム広がり（全角）、 T は大気透過率、 η_{RIS} は RIS のミラーの（3 回反射の）反射率、 A_r は受信望遠鏡の面積、 η_{sys} は受信系の光学的な効率である。RIS 実験の場合、532 nm において、 $P_0 = 3 \text{ W}$ (30 mJ, 10 Hz)、 $\theta_t = 0.5 \text{ mrad}$ 、 $A_r = 314 \text{ cm}^2$ （口径 20 cm のガイド望遠鏡）である。また、 $\eta_{RIS} = 0.8$ 、 $T = 0.7$ とした。ガイド鏡の光学系の η_{sys} は恒星の強度測定時と共通なので 1 である。

Fig. 8 に軌道上の RIS の反射光の受信効率 η を RIS の位置（時間）に対してグレースケールで示す。左図が測定値、右図が理論値である。位置は軌道毎の測定終了時刻を原点とする時間で表されている。測定終了時刻は RIS の進行方向と RIS から見た地上局の方向が成す角度が 90 度になる時刻で、図中の最大仰角がこのパスにおける地上局から見た RIS の仰角の最大値である。真上を通過するパスではこれが 90 度になる。RIS の速度は約 7 km/s であるので、真上を通過する軌道の場合、例えば図の横軸の時間が -200 s のとき、地上距離で約 1400 km 離れた位置に RIS があることを意味する。

Fig. 8 に示すように測定結果は、部分的に雲の影響や追尾エラーによる効率の低下が見られるが、ほぼ理論と整合する結果が得られた。

10 μm 帯の TEA CO₂ レーザーによる分光測定実験の結果の例を Fig. 9 に示す。この例では、primary レーザーは ¹²CO₂ 9P (24)、reference レーザーは ¹³CO₂ 10R (24) に同調した。Fig. 9 (a) は 2 台の TEA CO₂ レーザーからの送信パルス波形と対応する受信信号パルスの一例である。Fig. 9 (b) にショット毎に送信パ

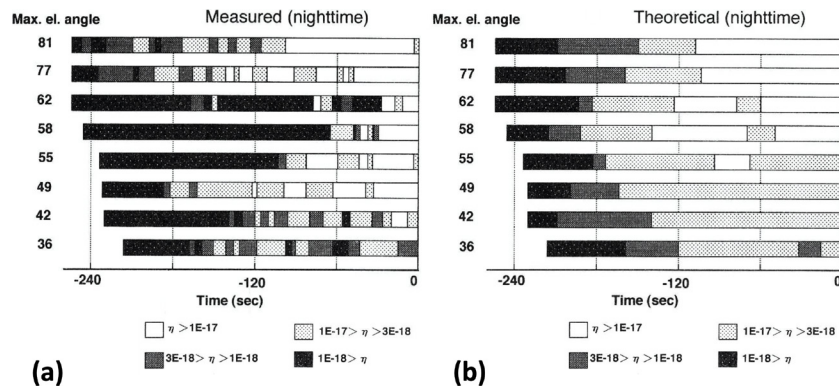


Fig. 8 (left) Measured and (right) theoretical efficiency of reflection of the RIS for nighttime paths⁶⁾.

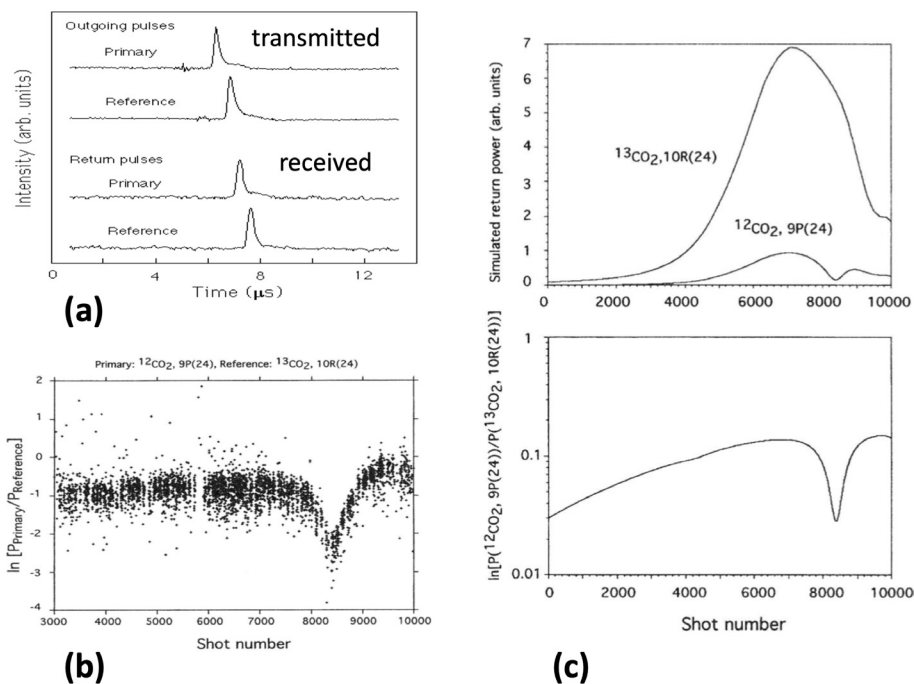


Fig. 9 (a) Example of the recorded waveforms of a pair of transmitted and received CO₂ laser pulses in the measurement with the RIS at 10 μm, (b) Spectrum of ozone measured with RIS (Dec. 23, 1996), (c) Simulated signals for the RIS measurement.⁶⁾.

ルス強度で規格化した受信信号強度の primary と reference の比をショット数の関数として示した。反射光は RIS が移動することによるドップラーシフトを受け、その大きさは RIS の位置に依存して変化する。RIS を低仰角で補足した時にドップラーシフトは最大 (約 0.04 cm⁻¹) で、地上局に近づくにしたがって小さくなる。測定時間は、この例では 140 秒である。

Fig. 9 (c) に、Fig. 4 に示した大気の透過スペクトルと衛星の位置による RIS の効率の変化を考慮した受信信号のシミュレーション結果を示す。(上) は primary および reference レーザーの受信信号強度、(下) はそれらの比である。Fig. 9 (c) (下) が測定結果 Fig. 9 (b) に対応する。両者は良く一致した。

RIS 実験の当初の計画では、TEA CO₂ レーザーを用いてオゾンの他、CO₂、HNO₃、CFC12、TEA CO₂ レーザーの第二高調波を用いて、CO、N₂O、第三高調波を用いて CH₄ の測定実験が計画されていた¹⁹⁾。しかしながら、ADEOS が太陽電池パドルの破断のため 1997 年 6 月 30 日に運用停止となったため計画の多くは実施することができなかった。

この節の最後に、RIS 実験におけるレーザー光の送受信の全体としての効率についてまとめておく。Fig.

3に示したRISの効率と、送信TEA CO₂レーザーのビーム広がり(100 μrad)、受信望遠鏡口径(1.5 m)を用いて、レーザー送受信の効率(受信信号パワー/送信レーザーパワー)を評価すると、10⁻¹¹~3×10⁻⁹となる。効率は最大値でも3×10⁻⁹と小さな値である。しかしこの値は、後方散乱ライダーで1 km離れた反射率1のハードターゲットのランバート反射を口径10 cmの望遠鏡で受信するのと同程度の効率であるので、一般的な後方散乱ライダー測定と比較するならば小さな値ではない。RISを用いた長光路吸収測定を計測システムと考える時の最大の問題点は運用効率の低さである。測定が可能なのは衛星が地上局付近を通過する数分間のみで、また晴天である必要がある。さらに、衛星の進行に伴うドップラーシフトの変化を利用して分光測定を行うため、部分的に雲がある場合にも測定条件は完全ではない。

3. 衛星に検出器を搭載する地上衛星間レーザー長光路吸収法

衛星側に検出器を搭載してレーザー光を受信する地上衛星間レーザー長光路吸収法では、送信レーザー光の受信効率はレトロリフレクターを用いる場合に比べて格段に高い。Table 1に衛星までの距離が36,000 kmの静止衛星の場合と1,000 kmの低軌道衛星の場合の送受信の光学的効率の評価結果を掲げる。ここで静止衛星については搭載受信システムの受光望遠鏡口径を20 cm、低軌道衛星については10 cmとした。また、地上からの送信ビームの広がりはいずれも100 μradとした。光学的効率は静止衛星の場合でもRIS実験の効率の最大値と同等の3×10⁻⁹である。低軌道衛星では1×10⁻⁶である。これらを後方散乱ライダーの光学的効率と比較すると、受信望遠鏡口径10 cmのライダーで、前者では距離1 km、後者では距離50 mの反射率1のハードターゲットのランバート反射を受信するのと同等である。なお、この他に準天頂衛星も考えられるが、軌道高度は遠点高度で約39,000 kmで静止軌道の高度とほぼ同じであるので光学的な効率について大差はない。

Table 1 Optical efficiency of ground-to-satellite laser transmission.

Distance to Satellite	Transmitted Beam Divergence (full angle), and Diameter of Receiver on Satellite	Optical Efficiency
36,000 km	100 μrad, 20 cm	~ 3 × 10 ⁻⁹
1,000 km	100 μrad, 10 cm	~ 1 × 10 ⁻⁶

衛星で地上から送信するレーザー光を受信する方法のもうひとつの大きな利点は、地上に大口徑の追尾システムが不要であることである。送信ビーム広がり100 μradとすると、波長10 μmでも(回折限界の場合)送信ビームの口径は15 cm程度で良い。静止軌道衛星の場合は高速の追尾は必要なく、追尾の角度範囲も狭くて良い。しかしながら、低軌道衛星では、高速の衛星追尾が必要であるだけでなく、衛星側の受信系でも地上局を追尾する必要がある。また、RIS実験と同様に、衛星が地上局上空を通過する限られた時間にしか測定ができないという欠点があり、運用効率が非常に低い。これに対して静止軌道の場合は常時運用が可能であり測定システムとして格段に優れていると言える。静止軌道衛星の問題は、1基でカバーできる領域が全球の3分の1以下であること、高緯度では地上局から見た衛星の仰角が低くなることである。地上から送信するレーザー光を衛星側の検出器で受信する方法では、いずれの衛星軌道でも測定対象ガスを透過するレーザー光が衛星の移動によるドップラーシフトを受けないことではないので、レーザー光の波長を掃引する、あるいは切り替えるような分光手法が必要となる。

地上衛星間レーザー長光路吸収法で大気中のどの分子が測定できるかについては、筆者らの1995年の論文で考察された²²⁾。そこでは、大気微量分子の吸収線データベース HITRAN92 と吸収スペクトル計算プログラム FASCOD を用いて、地上衛星間の光路で、1~20 μm の波長領域において、大気中の分子毎に強い吸収線を探し、干渉となる分子の吸収も考慮して、それぞれの測定可能性を評価した。測定にはパルスの単一波長レーザーを用い、測定対象分子の吸収線のまわりの波長領域を掃引する方法を想定した。

吸収の大きい H₂O, CO₂, O₃, CH₄, N₂O, CO については、測定に適する強さの吸収線を選ぶことによってカラム量の測定が可能である。またオゾンのように高高度まで分布する分子では吸収線幅の圧力広がり

りを利用して高度プロファイルを推定することも可能である。また、 NO_2 , HNO_3 , HF , HCl , OCS , C_2H_2 , NH_3 , NO , C_2H_2 , H_2CO , HOCl についてはカラム量の測定が可能であるが、 HCN , SO_2 などについては波長1~20 μm では測定は不可能である²²⁾。一方、この文献では検討されていないが、ブロードな吸収を持つCFCについても、やや広い波長領域をカバーする分光手法を用いて測定が可能である。RIS実験でも、918.7-923.1 cm^{-1} の領域で、 CO_2 レーザーの10R(6)-10R(12)を切替えてCFC12を測定することが検討されていた¹⁹⁾。この他、測定領域を可視紫外に広げると、 NO_2 , SO_2 , O_3 , BrO , HCHO などの測定の可能性がある^{11, 15)}。

4. 静止軌道衛星に検出器を搭載したレーザー長光路吸収測定における分光手法

本節では地上から静止軌道衛星へのレーザー長光路吸収測定のための分光測定手法について考察する。分光測定手法は測定対象ガスに依存するが、ここでは、単一の吸収線が測定できる CO_2 や CH_4 などの測定を想定する。

4.1 IPDAの応用

測定対象ガスの吸収線の波長と吸収のない参照波長の2波長（あるいは吸収線のまわりの複数の波長）のレーザーを切り替えて測定する手法が最も簡単であると考えられる。これは、航空機や衛星からの CO_2 やメタンの測定手法として開発されているIPDAライダー^{16, 17, 23, 24)}に用いられる手法を、受信系を静止軌道衛星に搭載して片道のパスで行うものである。なお、RIS実験も、反射光のドップラーシフトによる波長掃引を除けば、往復のIPDAである。太陽光による背景光雑音の観点からパルスレーザーを用いる方法が有利である。吸収のon, offのパルスペア（あるいは吸収線のまわりの複数のパルス）を短い時間内にあらかじめ設定したタイミングで送信する。受信系では波形を記録し、それぞれの波長の受信信号強度を測定して地上に伝送する。この手法の利点は、衛星側の受信光学系を（背景光雑音や検出器雑音の許す限り）広角にできること（従って、衛星側での地上局のポインティングは不要であること）、またタイミングを割り当てることで受信視野内の複数の地上局の測定を多重化できることである。例えば、パルスペアの送信を100 μs 以内に行い、繰り返し数が100 Hzである場合、ひとつの受信視野内の100の地上局を多重化できる。測定の多重化は、局所スケールから都市スケールの現象への応用を考える上で非常に有用であると考えられる。

4.2 光周波数コムの利用

RIS実験の検討段階で、極単パルスレーザーのスペクトル広がりを利用した分光手法を検討したことがあった²⁵⁾。測定対象分子のスペクトル幅が数GHzであるので、ヘテロダイン信号の帯域は10GHz程度が必要で、検出系にもその帯域が要求されるため現実的ではなかった。1990年代前半であったので光周波数コムには考えが至らなかったわけであるが、現在ではDual comb spectroscopy (DCS)の利用が考えられる²⁶⁾。DCSは周波数間隔のわずかに異なる（時間領域ではパルスの間隔がわずかに異なる）2つの光周波数コム干渉を利用した分光法である。DCSにはsymmetricとasymmetricの2つの方式がある。違いは吸収測定の対象が光学系のどこに入るかである。Fig. 10に地上衛星間長光路吸収に利用する場合の概念を示す²⁷⁾。Symmetric DCSの場合は、2つの光周波数コムが地上局にあるが、asymmetricでは衛星の受信系に独立の光周波数コムを用いる。

Fig. 10 (b)に示すasymmetric DCSは、ヘテロダイン検波を複数の波長に多重化したものと考えられることができる。コムモード毎にビート周波数が少しずつシフトするようにローカル光のコムを設定することによって、光の波長帯の分光をビート周波数であるラジオ波の帯域に変換して行なうことができる。ヘテロダイン検波ではローカル光強度が十分に強いことが必要であるので、ローカル光用の光周波数コムは衛星に搭載することになる。この場合、ヘテロダイン検波のローカル光として周波数領域で用いるのみで、また測定対象分子のスペクトルはあらかじめ分かっているため、衛星搭載光コムに要求される精度は高くはない。なお、コム波長帯は測定対象分子の吸収線の測定に必要な波長領域に制限し、不必要な波長のローカル光によるショット雑音をできるだけ抑えることが望まれる。Asymmetric DCS方式は、高感度が期待されるが、衛星側から地上局の精密なポインティングが必要なのが難点である。また、複数の地上局からの測定を多重化することは不可能で、地上局を順次、精密にポインティングして測定を行う必要がある。

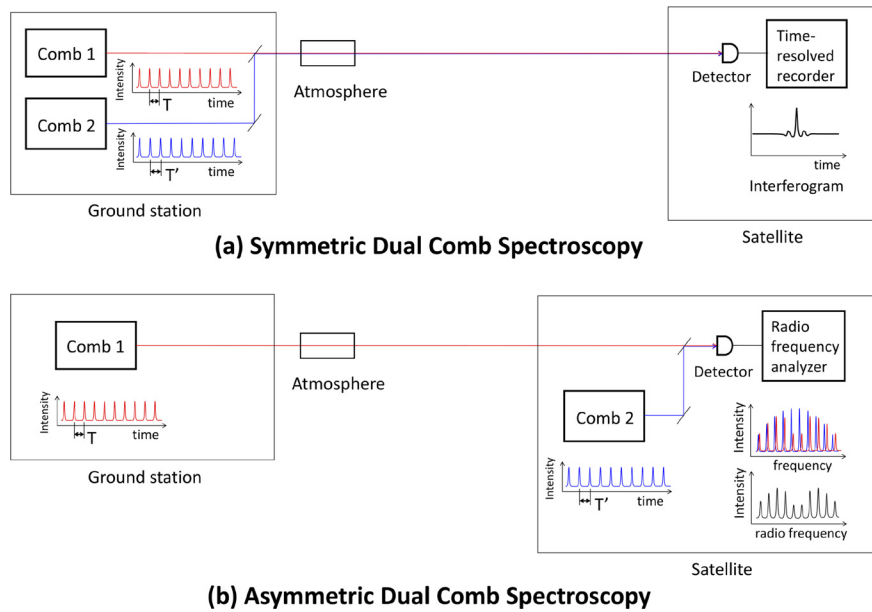


Fig. 10 Concept of applying dual comb spectroscopy to earth-to-satellite long-path absorption measurement²⁷⁾.

Fig. 10 (a) に示す symmetric DCS の場合は 2 つの光周波数コムは地上局にあり、衛星側の受信系は検出器と波形記録装置のみで構成される。2 つのコムの特徴が等しく、パルス間隔がわずかに異なるのみであるとすると、symmetric DCS は、時間領域で見ると、一つの光コムと干渉計を用いて、干渉計の片方のアームを連続的に掃引するフーリエ変換分光法 (FTS) と同等であることが分かる。すなわち、interferogram が繰り返し測定されることになる。光コムの特長が広いと想定して FTS との類似性を考えるならば、コムモード間隔 (パルス列の周期の逆数) でスペクトル測定の分解能が決まり、2 つのコムのパルス列が回帰するまでのパルス数 (すなわち interferogram 測定の分解能) からスペクトル測定の最短波長が決まることになる。衛星での受信光強度が低い場合、測定感度は asymmetric DCS よりも低いと考えられるが、衛星側の受信系に必要なのは、コムのパルス列の周波数程度の応答速度を持つ検出器と波形記録装置で比較的簡単である。また、この方法では、ヘテロダイン検波ほどの精度は要求されないと考えられるが、やはり衛星側から地上局のポインティングが必要である。

5. 今後の課題と展望

静止軌道衛星を用いて、IPDA 方式の地上局を用いる地上衛星間レーザー長光路吸収方法が、測定の多重化の観点から有効であると考えられる。測定対象を CO₂ とメタンに限っても、衛星搭載受動センサーや衛星搭載 IPDA を補完し、領域スケール、局所スケールの詳細な情報を得るための有用な手法となると期待される。

Fig. 11 は、筆者の 1987 年の論文²⁾に掲載された概念図である。当初の提案は CW レーザーでアダマール変換光学を使って多数の地上局からの測定を多重化するというものであったが、パルスレーザーで時間分割により多重化する方法がより簡単で、SN 比の観点からも有利である。詳細については今後の検討が必要であるが、受光システムでは、例えば広い視野をカバーする 2 次元アレイを用いて、素子毎に高速で時間分解測定を行う。地上局は IPDA 方式の送信システムで、地上局毎にタイミングを割り当ててレーザーパルスペアを送信する。これによって、一つの素子の受信視野内の複数の地上局からの測定を多重化する。測定波長が近赤外であれば、送信ビームの口径は数 cm で十分である。静止軌道衛星は大きく移動することはないが、高精度の追尾が必要であるので、追尾のためのマーカー信号などの方法を検討することも必要である。

受動センサーの検証やグローバルな大気環境の監視などの目的などでは、地上局の数は限られるが、symmetric DCS の利用が有用であるかもしれない。ある程度の広いスペクトル領域で、時間を問わず能動的な FTS 測定ができるのは非常に魅力的であろう。この場合、背景光雑音が測定感度を制限する可能性があり、

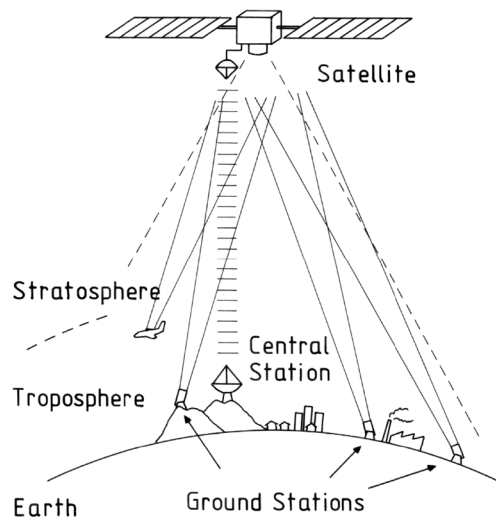


Fig. 11 Concept of earth-to-satellite laser long-path absorption system using a detection system on a geosynchronous satellite²⁾.

地上から送信する光周波数コムのパワーが十分に大きいことが必要となる。今後、具体的に測定対象や波長領域を設定して検討する必要がある。3節で述べたように送受信の光学的効率は、受信望遠鏡口径10 cmの後方散乱ライダーで距離1 kmの反射率1のハードターゲットのランバート反射を受信するのと同等であるので、ハードターゲットを用いて基礎実験を行うことが有用であると考えられる。

IPDA方式の地上局を多数配置する場合、地上局の小型化や低コスト化が課題である。この場合もハードターゲットを用いたライダーによる基礎研究が有用であろう。また、曇天時に雲底の散乱を利用したIPDA測定の可能性の検討なども有用である。最近、ドローン搭載レトロリフレクターを用いた長光路吸収法による漏洩ガスのマッピングが報告されている²⁸⁾。この論文では、IPDAではなく波長が高速で変化する半導体レーザーを用いた分光方式が用いられているが、IPDAでも同様の応用が可能であろう。

RIS実験から既に27年が経つ。この間にレーザーやIPDAライダーの技術には大きな進歩があり、静止軌道衛星を用いた測定システムも技術的には実現可能であると考えられる。また、現在既に静止軌道衛星からの受動センサーによる大気微量ガスの観測が行われている他、将来に向けたセンサーの開発も進められている。このような中で、地上静止軌道衛星間レーザー長光路吸収法が果たすべき役割は大きいと考えられる。今後、具体的な検討が進められることを期待する。

引用文献

- 1) E. D. Hinkley (ed.), "Laser Monitoring of the Atmosphere," Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1976).
- 2) N. Sugimoto, "Atmospheric environment monitoring system based on an earth-to-satellite Hadamard transform laser long-path absorption spectrometer: a proposal," *App. Opt.*, **26**, 763-764 (1987).
- 3) N. Sugimoto, "Hadamard transform active long-path absorption spectrometer system for measurements of atmospheric trace species," *Appl. Opt.*, **26** (6), 863-865 (1986).
- 4) 杉本伸夫, "大気中微量分子測定用アダマール変換能動型長光路吸収分光計: 室内実験と測定感度の評価," *分光研究*, **36** (2), 112-122 (1987).
- 5) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba, and K. Sakurai, "Random modulation CW lidar," *Appl. Opt.*, **22**, 1382-1386 (1983).
- 6) N. Sugimoto, N. Koga, I. Matsui, Y. Sasano, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, A. Nomura, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, I. Murata, and H. Fukunishi, "Earth-Satellite-Earth Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) on the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS)," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **1**, 201-209 (1999).
- 7) A. Hoffmann, D. Clifford, J. Aulinas, J. G. Carton, F. Deconinck, B. Esen, J. Hüsing, K. Kern, S. Kox, D. Krejci, T. Krings, S. Lohrey, P. Romano, R. Topham, and C. Weitnauer, "A Novel Satellite Mission Concept for Upper Air Water Vapour, Aerosol and Cloud Observations Using Integrated Path Differential Absorption LiDAR Limb Sounding," *Remote Sens.*, **4**, 867-910 (2012).
- 8) Y. Satoh, Y. Chishiki, D. Sakaizawa, and S. Yamakawa, "Mission Study of Up-link Laser Differential Absorption Sensing,"

- International Conference on Space Optics (ICOS), Proc. SPIE, **105564**, 1056433, (2012).
- 9) S. Noël, M. Reuter, M. Buchwitz, et al., "XCO₂ retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm," *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3837–3869 (2021).
 - 10) D. Crisp, H. R. Pollock, R. Rosenberg, L. Chapsky, R. A. M. Lee, F. A. Oyafo, C. Frankenberg, C. W. O'Dell, C. J. Bruegge, G. B. Doran, A. Eldering, B. M. Fisher, D. Fu, M. R. Gunson, L. Mandrake, G. B. Osterman, F. M. Schwandner, K. Sun, T. E. Taylor, P. O. Wennberg, and D. Wunch, "The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products," *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 59–81 (2017).
 - 11) K. L. Chan, P. Valks, K.-P. Heue, et al., "Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) Daily and Monthly Level 3 Products of Atmospheric Trace Gas Columns," *Earth Sys. Sci. Data*, **15**, 1831–1870 (2023).
 - 12) Arnoud, A., Mattia, P., Maarten, S., Veeffkind, J. P., Loyola, D., and Wang, P.: Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual KNMI level 2 support products, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, the Netherlands, ATBD (2017).
 - 13) D. Fu, D. B. Millet, K. C. Wells, V. H. Payne, S. Yu, A. Guenther, and A. Eldering, "Direct retrieval of isoprene from satellite-based infrared measurements," *Nat. Commun.*, **10**, 3811 (2019).
 - 14) Jhoon Kim, et al., "New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bulletin of the American Meteorological Society*," **101** (1), E1-E22 (2020).
 - 15) P. Zoogman, X. Liu, R. M. Suleiman, et al., "Tropospheric emissions: Monitoring of pollution (TEMPO)," *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **186**, 17–39 (2017).
 - 16) S. Wang, J. Ke, S. Chen, Z. Zheng, C. Cheng, B. Tong, J. Liu, D. Liu, and W. Chen, "Performance Evaluation of Spaceborne Integrated Path Differential Absorption Lidar for Carbon Dioxide Detection at 1572 nm," *Remote Sens.*, **12**, 2527 (2020).
 - 17) G. Ehret, et al., "MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane," *Remote Sens.*, **9**, 1052 (2017).
 - 18) A. Minato, N. Sugimoto, and Y. Sasano, "Optical design of cube-corner retroreflectors having curved mirror surfaces," *Appl. Opt.*, **31**, 6015–6020 (1992).
 - 19) N. Sugimoto and A. Minato, "Data reduction method for the laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species using the Retroreflector in Space," *IEICE Trans. Commun.*, **E78-B** (12), 1585–1590 (1995).
 - 20) R. J. Nordstrom, L. J. Berg, A. F. DeSimone, and N. Sugimoto, "Time-gated gain cell for frequency stable, single-longitudinal-mode operation of a transverse, electric, atmospheric CO₂ laser," *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (6), 1663–1664 (1993).
 - 21) K. Ozawa, N. Koga, N. Sugimoto, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, A. Minato, Y. Kubota, Y. Saito, and A. Nomura, "Optical characteristics of the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS satellite," *Proc. SPIE*, **3218**, 2–9 (1997).
 - 22) N. Sugimoto, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, and A. Nomura, "Theoretical evaluation of earth-to-satellite laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species in the infrared region," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (5R), 2329–2334 (1995).
 - 23) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima, "Development of 1.6 μm continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing," *Opt. Lett.*, **34** (10), 1513–1515 (2009).
 - 24) X. Sun, J. B. Abshire, A. Ramanathan, S. R. Kawa, and J. Mao, "Retrieval algorithm for the column CO₂ mixing ratio from pulsed multi-wavelength lidar measurements," *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3909–3922 (2021).
 - 25) N. Sugimoto, A. Minato, Y. Saito, and A. Nomura, "Heterodyne spectroscopy using spectral spread of short laser pulse," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (11B), L1602-L1603 (1994).
 - 26) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica*, **3** (4), 414–426 (2016).
 - 27) N. Sugimoto, "A comb heterodyne receiver on a geosynchronous satellite? for long-path absorption measurements of atmospheric trace gases: a feasibility study," 19th Coherent Laser Radar Conference, CLRC (2018).
 - 28) M. G. Soskind, N. P. Li, D. P. Moore, Y. Chen, L. P. Wendt, J. McSpurr, M. A. Zondlo, and G. Wosocki, "Stationary and drone-assisted methane plume localization with dispersion spectroscopy," *Remote Sens. Environ.*, **289**, 113513 (2023).

杉本伸夫

1978年大阪大学大学院基礎工学研究科修士終了。1979年国立公害研究所(現国立環境研究所)入所。1985年理学博士(東京大学理学系研究科)。レーザーを用いた能動遠隔計測手法の開発と大気の大気観測研究に従事。大気汚染NO₂の差分吸収ライダー、成層圏オゾンライダーの開発、ADEOS衛星搭載レトロリフレクター(RIS)を用いた地上衛星間レーザー長光路吸収実験などを手掛けた。また、対流圏エアロゾル観測ライダーネットワーク(AD-Net)を構築し、黄砂や越境大気汚染エアロゾルの研究を推進した。2014年に定年退職後、2019年3月までフェローとして国立環境研究所に勤務。現在は、国立環境研究所客員研究員および名古屋大学宇宙地球環境研究所客員教授。日本気象学会、日本エアロゾル学会、日本リモートセンシング学会会員、OPTICAシニア会員、SPIEシニア会員。

レーザセンシング学会論文賞を受賞して

左成 信之

(柴田科学株式会社)

(Received July 28, 2023)

この度は、「工場内浮遊粒子状物質の測定を目的とする小型ミー散乱ライダーの開発」に対して、2022年度レーザセンシング学会論文賞という名誉ある賞を賜り大変光栄に存じます。共同研究者を代表して、深謝申し上げます。

本論文では、溶接ヒューム、オイルミスト、研磨材の吹付けなどの比較的高濃度のエアロゾルが発生するような工場の屋内作業場などにおけるエアロゾル分布の計測を目的としたライダーの開発について報告しました。浮遊粒子（エアロゾル）の濃度は室内環境の指標の一つであり、生活の大部分を過ごす室内では吸入曝露の時間が長いことから、エアロゾルの人体への健康影響を把握する上で濃度の計測が重要です。また、屋内作業場のエアロゾルの計測では通常は粉じん計が用いられますが、空間分布を把握することが必要である場合や粉じん計のコンタミネーションが問題になるような状況もあり、遠隔で計測できるライダーへの期待が高まっています。目に対する安全性が比較的高い紫外レーザーを光源とする掃引測定が可能な実験システムを構築し、模擬エアロゾルを用いた実験により性能評価を行い、ライダー装置の小型化の可能性を検討しました。また、3Dマッピング用の市販の小型LiDARと組み合わせて、3D空間の中でエアロゾル分布を表示する手法についても検討を行いました。

本論文に関わる研究成果が、工場作業者の健康影響の改善、さらに、レーザセンシング学会の発展の一助となれば幸いです。今後ともご指導ご鞭撻の程よろしくお願い申し上げます。

Aeolus Science Conference 2023 参加報告

岡部いづみ¹, 石井昌憲²

(¹ 気象研究所, ² 東京都立大学)

(Received August 4, 2023)

Aeolus Science Conference は、欧州宇宙機構 (ESA) が 2018 年に打ち上げた低軌道衛星, Aeolus 衛星の運営状況と今後の計画, データ品質や検証, 更なるデータ解析や同化による数値予測へのインパクト評価など, この衛星に関連した一連の分野から専門家が集まり, 情報共有や意見交換を行う会議であり, 打ち上げ後は年 1 回, 欧州圏で開催されている. 今回は, Aeolus という名前の由来となった風の神アイオロスが登場するギリシャ神話ゆかりの地, ギリシャ・ロードス島にて開催された. 参加者は, ESA やアテネ天文台, Aeolus 衛星データを現業利用している欧州中期予報センター (ECMWF) を始め, それに加盟・協力しているオランダ王立気象研究所やイギリス気象庁, また, アメリカ海洋大気庁や欧州各国の大学に所属する方々が多く, 日本からは気象研究所の岡部と Aeolus CAL/VAL チームから東京都立大学の石井が出席した.

Aeolus には, ドップラー風ライダーが搭載されており, 水平視線風速がメインプロダクトとして配信されている. 岡部は, このデータを用いた研究をしており, 気象庁全球解析予報システムを用いた Aeolus 衛星データの品質調査, 同化のための品質管理手法, 及び, 同化インパクト評価について発表を行った. 特に, 発表の後半で取り上げた台風進路予測への詳細なインパクト評価結果は反響が大きく, ECMWF で同様に Aeolus 衛星データの熱帯低気圧予測へのインパクト評価を実施している Chiara 氏と, 実験設定や統計手法について両者の結果をより詳細に比較し議論できたことは有益であった.

その他, ミッション・ステータスのセッションでは Aeolus 衛星観測ミッションは今年 4 月末で完了し, 7 月には大気再突入が計画されていること (当時) が報告された. 搭載された 2 つのレーザー (FM-A, FM-B) の運用状況についても報告があり, 特に FM-B レーザーへの切り替え後は出力の安定化が計られ, 3 年以上の長期間, 宇宙環境下で 80 mJ を超える出力 (最高出力 130 mJ/pulse を実証) で紫外線レーザーを世界で初めて運用し, 風速の観測データを継続して取得できたことが強調された. レーザー開発担当者の報告では, 高出力の宇宙用レーザー開発の困難さと, その困難さに立ち向かう彼らの気概とたくましさを改めて



会場内に設置された案内板



発表会場 (会議前)



発表中の岡部



世界遺産を示す案内板



旧市街から見えるエーゲ海



旧市街を守る城壁の一部

感じた。最新の測器パフォーマンスやデータ検証に関する報告は、Aeolus DISC (Data, Innovation, and Science Cluster の頭文字から命名) による 5th DISC Cal/Val Synthetic Report (2022 年 11 月発行) に纏められている。科学的探究のセッションでは、Aeolus の観測データを用いた風以外の要素、Ocean Color や海上エアロゾルの光学的厚さのリトリブ可能性や、Aeolus による全球規模の風プロファイルを活用した各再解析データの大規模循環場の再現性検証などの報告があった。数値予測へのインパクトのセッションでは、Aeolus が大規模循環場を捉えモデル初期値に反映させることが、データ数の割に大きな改善インパクトを与えているとする報告があった。

本会議では、Aeolus 衛星の打ち上げ・運用成功のアピールに加えて、これまでに得られた知見をいかに後継衛星の打ち上げに活かすか、という視点の発表が多いのが印象的であった。2031 年以降、Aeolus 2 ミッションとして 2 機の打ち上げが計画されているとのことである。

最後に、今夏の熱波により 7 月後半に発生したロードス島での山火事により、3 万人以上の住民や観光客が避難を余儀なくされたとのニュースを見て、一刻も早く事態が沈下し、皆さんが元の生活に戻れるようお願い申し上げます。

Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2023 参加報告

清水厚

(国立環境研究所)

(Received August 7, 2023)

2023年7月30日から8月4日にかけて、シンガポール SUNTEC 国際会議場において第20回アジア・オセアニア地球惑星科学連合年次大会(AOGS2023)が開かれた。同大会は西太平洋周辺の地球惑星科学関連学会の連合体(Asia Oceania Geosciences Society)が運営し、2年に一度はシンガポール、それ以外の年に太平洋西岸の都市において開かれる。コロナ禍でバーチャル開催が続いていたが本年は以前のような対面形式に戻った(講演のオンライン配信はなし)。参加総数は3297名、セッションは7月31日から8月4日まで組み立てられ、口頭発表は午前と午後に2スロットずつ、うち午後の最後はポスターセッション(ビール提供あり)と同時という形式である。日本から初参加したという火山科学者によれば、JpGUやAGUと比べて固体地球関連のセッションが少ない印象を受けたそうである。筆者はNASA等が主導するMIRA (Models, In situ, and Remote sensing of Aerosols, ちなみに発音は「マイラ」)プロジェクトのセッション(8月3日)に招待され、同セッション内でいくつかライダー関連の発表があったのでここに報告する。冒頭、Trepte (NASA)がMIRAの目的(分野横断型のモデル・観測統合)や将来像を紹介するとともに、2日前の8月1日に17年に渡ったCALIPSOのサイエンスミッションが終了したことを報告した。清水(環境研)は日本国内のライダーによる黄砂とローカルダストの判別に関する発表を行った。M.H. Kim (SNU)はAD-NetライダーとAERONET/SKYNET放射計を組み合わせて行った北東アジア域におけるエアロゾルのライダー比推定について報告し、S.J. Park (SNU)はWisconsin大と共同で2016-18年にソウルで行ったHSRL観測の結果から境界層構造の日変動やMEE(質量消散効率)の推定に関する結果を示した。またSchuster (NASA)はCALIOP解析におけるエアロゾル種類別ライダー比の見直しについて説明した。ライダー以外にも話題を広げると、韓国のGEMSや日本のひまわり等静止軌道衛星からの大気汚染物質の観測に関する発表が目立ち、ラグランジュポイントから地球を観測するDSCOVRの応用例も紹介されるなど、大気汚染監視において低軌道以外の衛星の重要性が示された会合であった。またポスター発表では温暖化シナリオに基づくモデル計算により2030年代までの黄砂発生量年々変動を予測した中国の学生による発表が興味深かった。参加者の顔ぶれを見ると男女を問わず若い世代が多く見受けられ、高齢化に悩む日本国内の学会との差を感じずには居られなかった。次回2024年のAOGSは韓国・平昌(2018年冬季オリンピック開催地)で開催が予定されており、また2028年には二度目の日本開催を福岡に誘致する動きもあると聞いた。大規模な国際学会の中では日本との時差が少ない都市で開かれることもあり、進境著しいアジア域研究者との交流に興味がある方は次回以降の参加を検討されてはいかがだろうか。



学会誌への投稿案内

レーザセンシング学会誌では、レーザセンシングに関する研究・技術や最新の研究成果に関する、「論文」、「総説（レビュー）」、「小論文（レター）」、および「解説」記事を、会員・非会員を問わず随時応募しています。投稿に関する手続きや要件については、学会ホームページをご参照ください。皆様の投稿をお待ちしています。

学会誌

<https://laser-sensing.jp/gakkaishi.html>

*最新版の投稿規定、執筆要領、テンプレート、および投稿フォームは、画面上部のリンクからダウンロードいただけます。

論文賞の公募案内

2023年度の論文賞を下記により公募します。

- ◆対象は、レーザセンシング学会誌4巻1号・2号に掲載された論文および解説記事です。
- ◆表彰件数は、2件を上限とします。
- ◆正会員または賛助会員は、下記の内容を記した推薦書（A4サイズ pdf、様式任意）を表彰等審査委員会宛にご送付ください。推薦書には以下の内容をご記載ください。
 - ・推薦者の所属・氏名・会員番号
 - ・推薦する論文・解説記事の学会誌の巻号、ページ、著者、タイトル
 - ・推薦理由（分野での位置づけ、新規性・独創性、レーザセンシングに関わる科学と技術の発展への貢献を含め、400字程度）
- ◆応募先メールアドレスは、award@laser-sensing.jp
- ◆締切は、2024年3月29日（金）



会員数の状況

会員

(2023年9月8日現在)

正会員 113名
学生会員 12名
賛助会員 9社
名誉会員 9名(内正会員6名)

入会会員

(2022年9月3日から2023年9月8日まで)

正会員 19名
学生会員 7名
賛助会員 1社

(正会員)

甲斐 芳英 (なし)
安富 啓太 (静岡大学)
山本 智一 (横河計測)
鷲尾 邦彦 (パラダイムレーザーリサーチ)
松下 勉 (ホシデン九州)
早川 雅之 (オムロン)
Menaka De Zoysa (京都大学)
井上 晃 (三菱電機)
中道 治久 (京都大学)
福部 博 (なし)
中里 真久 (気象大学校)
高橋 考二 (浜松ホトニクス)
藤本 敏文 (国立環境研究所)
佐藤 行 (日産自動車)
片岡 拓弥 (小糸製作所)
伊藤 晃典 (小糸製作所)
志方 良彰 (住友電気工業)
日暮 明子 (国立環境研究所)
岡部 いづみ (気象庁気象研究所)

(学生会員)

三好 咲也子 (電気通信大学)
渡部 蓮 (電気通信大学)
渋谷 颯 (東北工業大学)
六笠 駿大 (東京都立大学)
坂本 陸哉 (東京都立大学)
佐藤 諒典 (東京都立大学)
YUE GUANGHAN (九州大学)

(賛助会員)

DiO

退会会員

(2022年9月3日から2023年9月8日まで)

正会員 0名
学生会員 5名
賛助会員 0社
名誉会員 0名

(学生会員)

山中 沙羅 (東京都立大学大学院)
平間 圭悟 (東北工業大学大学院)
高田 直輝 (東京都立大学大学院)
水庭 彰吾 (東京都立大学大学院)
瀧上 駿 (大阪大学大学院)

会員資格の喪失

(2022年9月3日から2023年9月8日まで)

正会員 1名
学生会員 0名
賛助会員 0社
名誉会員 1名(内正会員1名)

(名誉会員)

小林 喬郎 (福井大学名誉教授) *2023年9月7日逝去

●●● 編集後記 ●●●

まず始めに、今号の冒頭記事にありますように、小林喬郎・名誉会員（福井大学名誉教授）が9月7日にご逝去されました（享年81歳）。謹んで心よりご冥福を申し上げます。

レーザーセンシング学会では、定期刊行物として本学会誌と共にニュースレターを編集・刊行してきました（学会HP「ニュースレター」を参照）。ニュースレターも学会誌と同様に年2回の発刊ですが（ただし、発刊時期は学会誌とずらし冬と夏）、学会の開催・参加報告と共に、個々研究者が取り組んでいる研究についてのざっくばらんな紹介・経験談や個々研究者を取り巻く研究環境への意見など（「私の研究ノート」を参照）、学会誌とは趣の異なる情報を届けてきました。これらニュースレター・学会誌の今後の展開や発展について編集委員会で協議を重ね、ニュースレターを学会誌に統合すること、今号から新たな学会誌として刊行していくことになりました。夏・冬のニュースレターの発刊を楽しみにして頂いていた「ニュースレター・ファン」の方々には大変残念なお知らせになってしまい申し訳ございません。しかし、その内容は学会誌に引き継がれますので、今後は是非「学会誌・ファン」になって頂ければ大変幸いです。

編集委員会 副委員長 西澤 智明

■編集兼発行人：レーザーセンシング学会（<http://laser-sensing.jp/>）

■企画：レーザーセンシング学会編集委員会

石井昌憲（委員長）、佐藤 篤（副委員長）、西澤智明（副委員長）、矢吹正教（副委員長）、
亀山俊平、及川栄治、伊澤 淳、今奥貴志、香川直己

■連絡先：〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部
第3研究室気付 レーザーセンシング学会編集委員会

■電子メール：lrsj-edit_office@laser-sensing