

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：62611

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13575

研究課題名(和文) 中間圏・熱圏間鉛直輸送研究のボトルネック「鉛直風」の絶対値観測への挑戦

研究課題名(英文) Development of laser frequency monitoring system for measuring absolute vertical wind with a resonance scattering lidar

研究代表者

江尻 省 (Ejiri, Mitsumu K.)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：80391077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：中間圏・下部熱圏領域の鉛直風は、地球表層環境とジオスペース(地球周囲の宇宙空間)の圏間相互作用の議論に不可欠な物理量である。共鳴散乱ライダーは鉛直風を高度情報と共に測定可能な唯一の観測手段だが、絶対値の測定精度向上のためには送信レーザー周波数を極めて正確に知る必要がある。このために、絶対周波数が校正されている種レーザーとの周波数差を測定する光ヘテロダイン干渉法によるビート測定システムを開発した。更に、この設計を改良して共鳴散乱ライダーシステムに組み込むことで、鉛直風の絶対値を $\sim 5$  m/s以内の精度で観測可能にした。今後、極域オーロラ活動に伴う強い鉛直風の観測に挑戦する。

研究成果の概要(英文)：Vertical wind in the mesosphere and lower-thermosphere (MLT) region is quite important for understanding interactions between the earth's atmosphere and geospace. Only resonance scattering lidar can measure vertical distributions of the vertical winds, and its measurements require precise absolute value of transmitter laser frequency. We applied optical heterodyne method to develop a monitoring system of beat signals generated by frequency differences between transmitter laser pulse and well calibrated seeder laser (cw). The monitoring system design was improved and built into a resonance scattering lidar system. As a result, absolute vertical wind can be measured within accuracy of  $\sim 5$  m/s. Using the developed lidar system, we will challenge measuring relatively strong vertical winds that are generated associated with aurora activities in the MLT region in the high latitudes.

研究分野：超高層大気科学

キーワード：鉛直風 共鳴散乱ライダー観測 中間圏・下部熱圏領域 光ヘテロダイン干渉法

### 1. 研究開始当初の背景

地球表層環境の上端(中間圏)とジオスペース(地球周囲の宇宙空間)の下端(熱圏)の境界領域では、下層から上方伝搬してきた大気波動が、下層の運動量や力学エネルギーを輸送・再配分する一方、高エネルギー粒子の降り込みや流星等による、宇宙空間からのエネルギーや物質の流入に対して応答している。この圏間相互作用を定量的に議論するために必要な基礎物理量が温度と風速である。特に鉛直風は、圏境をまたぐエネルギーや物質のフラックスを見積もる上で欠かせない物理量であるが、観測が極めて難しいため、実測値に基づいた定量的な議論・研究は膠着状態に陥っている。

これまでに鉛直風の変動量観測に成功している観測装置は、ファブリペロー干渉計と共鳴散乱ライダーである。例えば極域では、オーロラ活動を伴うような宇宙空間からの高エネルギー粒子の降り込みによって、中間圏の中性大気が短時間で急激に加熱された可能性がOH大気光回転温度計による観測から示唆され[Suzuki et al., 2010]、また、このような加熱の結果、十数 m/s から数十 m/s の強烈な鉛直風が巻き起こることがファブリペロー干渉計による酸素原子の発光輝線(557.7 nm)の観測結果として報告されている[e.g., Oyama et al., 2010]。ただし、ファブリペロー干渉計観測は上空の発光現象を分光観測する受動的な観測であり、発光の高度情報は得られない。そのため、発光輝度や継続時間を IS レイダーによる電子密度分布観測やフォトメーター観測から推定された降り込み粒子のエネルギーなどの背景情報と合わせて議論することでおおよその高度を推定しているが、仮定の僅かな違いで数 km から十数 km は変わり得るほど不確実性が大きく、鉛直輸送を議論するには至っていない。中・低緯度帯の鉛直風は平均的には 0 m/s と仮定できるほど小さいと考えられており、極域以上に観測が困難であるが、近年、共鳴散乱ライダーによる挑戦が始まっている[e.g., Liu et al., 2005; Gardner et al., 2014]。これらの先行研究では、平均鉛直風を 0 m/s と仮定出来ることを積極定期に利用して、鉛直風速の摂動成分のみを抽出し、大気波動を介した熱や大気微量成分の鉛直フラックスを議論する試みがなされているが、送信レーザーの振周波数の数 MHz の揺らぎが、鉛直風観測では数 m/s の不確実性になるため、絶対値の観測には成功しておらず、中間圏・熱圏間をつなぐ鉛直輸送の定量的な研究には踏み込めていない。

### 2. 研究の目的

中間圏・熱圏間のエネルギーや物質の鉛直輸送は、地球周囲の宇宙空間と地球表層環境を直接的につなぐ重要な圏間相互作用である。これを定量的に理解するためには、鉛直

風の絶対値を測定し、その時空間変動のネット量を明らかにする必要がある。しかしこの領域は、鉛直風観測のためのトレーサーとなる物質や観測手段が極めて少なく、時空間変動のネット量測定は未だに成功例が無い。本研究では、この鉛直風を高度情報と共に実測できる唯一の観測装置である共鳴散乱ライダーについて、これまで絶対値観測を妨げていた発振レーザー周波数の種レーザーからのシフト量を光ヘテロダイン干渉法により厳密に測定し、中間圏・熱圏の圏間相互作用研究のボトルネックとなっている鉛直風絶対値の時空間構造を地上から測定することに挑戦、鉛直輸送の定量的な研究へのプレイクスルーを目指す。

### 3. 研究の方法

共鳴散乱ライダーによる鉛直風の測定法として、半値幅 1-2 GHz の共鳴散乱スペクトル内の 3 周波数に送信レーザー周波数を同調させ、観測された散乱信号の強度比から共鳴散乱スペクトルのドップラーシフト量とドップラー広がりを見積もり、視線方向の風速と温度を同時に導出する 3 周波法 [She and Yu, 1994] を採用する。共鳴散乱ライダーとしては、国立極地研究所で南極観測事業第 1 期重点研究観測の一環として開発中の高機能ライダー(鉄(Fe)の共鳴散乱を観測可能)を利用する。このライダーシステムでは、送信レーザーにフラッシュランプ励起のアレキサンドライト・リングレーザーを使っており、3 周波温度・風速観測を行うために、種レーザーを用いたインジェクション・シーディングによりレーザー光の単一モード化を図っている。種レーザーの周波数は波長計によってフィードバック制御されており、波長計の絶対値は、金属蒸気セルを使った飽和吸収スペクトル計測により校正している。従って、種レーザーの周波数は厳密に調整されているのだが、インジェクション・シーディング後のレーザーパルスの周波数は、この種レーザー周波数から僅かに (~50-100 MHz) ずれることが分かっている。この差は、共鳴散乱スペクトルの半値幅 (~1.5 GHz) に比べて十分小さいので、温度の測定では問題にならないが、風速の絶対値測定には大きな誤差(オフセット)となる。しかし、逆に考えると、この周波数差さえ解消することが出来れば、風速の絶対値が測定可能になるのである。そこで本研究では、まずこの周波数差を測定するシステムを設計、製作した。次に、これを改良、小型化して高機能ライダーに組み込み、最後に共鳴散乱ライダー観測と同時に周波数測定試験を行い、開発したシステムの有用性を確認した。

### 4. 研究成果

僅かに異なる周波数を持つ 2 つのレーザー光(種レーザー(連続光)と送信レーザー(パルス光))の周波数差を厳密に測定するため

に、光ヘテロダイン干渉法を用いたビート検出システムを開発した。光ファイバーとビームスプリッターキューブを用いてフォトディテクター上で2つのレーザー光を重ね、ベンチ型オシロスコープでビート信号の検出を試みた。この実験により、送信レーザー(パルス光)としては共鳴散乱ライダー観測時にレーザー光を打ち上げミラーまで導くステアリングミラー(98%反射)からの抜け光で十分検出可能なビート信号が得られることが分かった。しかし、このビート検出システムは稼働中の高機能ライダーに付加的に組み込むには大がかりでかつ光軸の調整が難しいため設置場所を選ぶ必要があった。そこでビームスプリッターキューブ系を偏光保持シングルモード分岐ファイバーに、ベンチ型オシロスコープを制御パソコンに内蔵可能なデジタルオシロスコープに置き換えることで、よりコンパクトで設置場所を選ばないシステムに改良した。

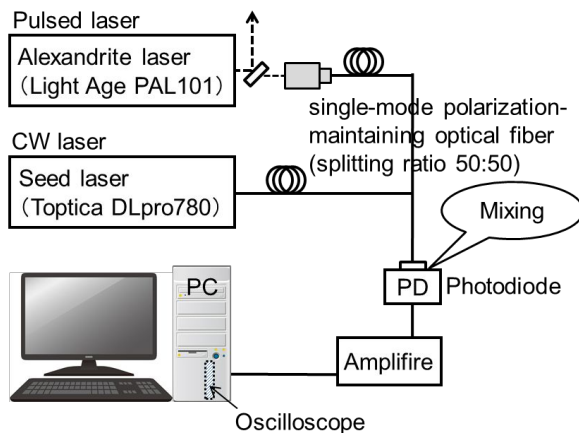


図 1: 改良型ビート検出システムのブロック図

改良型ビート検出システムを高機能ライダーに組み込み、共鳴散乱ライダー観測(鉛直風観測)と並行してビート信号検出試験を行った。結果、鉛直風を0 m/sと仮定した場合の送信レーザーパルスと種レーザーの周

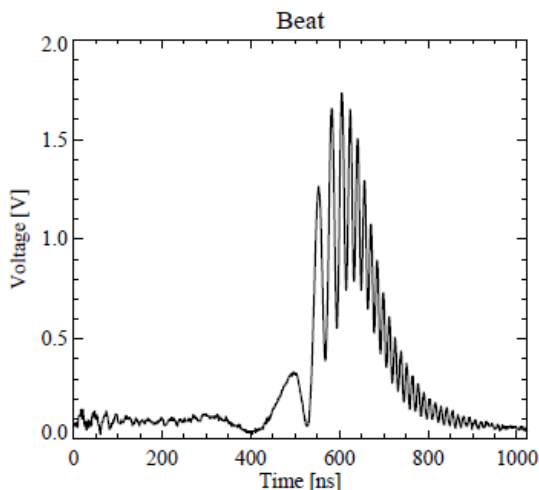


図 2: 2016年8月25日鉄(Fe)層の観測時に得られた種レーザーと送信レーザーの周波数差によるビート信号の例。

波数差と、ビート信号から算出された両者の周波数差は5 MHz(風速~5 m/s)以内の精度で一致し、極域でオーロラ活動に伴って生じる大きな鉛直風についてはその高度分布を明らかにできる可能性が示された。この結果については国内学会・研究会、および国際シンポジウムで報告した。一方で、検出するべきビート信号の直前に、これと似た周期を持つノイズが存在しており、これを除去するこ

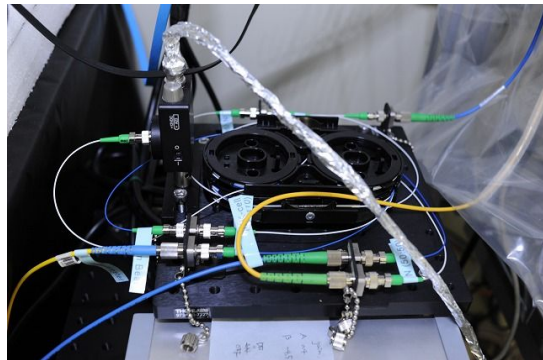


図 3: 昭和基地で稼働中の改良型ビート検出システム

とにより高精度な測定結果を得られる可能性があった。このノイズはレーザー発振時にかかる高電圧起源と考えられるため、同軸信号ケーブルにフェライトコアを用いる物理的なノイズ対策と、信号解析時にビート信号部のみを取り出す解析的なノイズ除去を並行して試みている。

開発したビート検出システムは、高機能ライダーの一部として、南極昭和基地に移設され、2017年3月から実験を始めている。実験室環境(特に室内の温度変化)が大きく変わり、送信レーザー自体の発振が安定しないため鉛直風観測と同時に行う測定試験には至っていないが、国内での実験時と同様にビート信号が取得できることは確認できている。今後、共鳴散乱ライダー観測を行う中で、更なる検証実験を行いつつ、極域における中間圏・下部熱圏領域の鉛直風観測に挑戦する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 7件)

(1) 江尻省, 西山尚典, 津野克彦, 津田卓雄, 高橋透, 阿保真, 和田智之, 小川貴代, 川原琢也, 中村卓司, 波長可変共鳴散乱ライダーにおける送信レーザー周波数モニタシステムの開発 ~極域MLT領域の鉛直風観測を目指して~, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学伊都キャンパス, 2016年11月19-23日

(2) Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama,

Takuo T. Tsuda, Makoto Abo, Katsuhiko Tsuno, Satoshi Wada, Takayo Ogawa, Takuya Kawahara, Takuji Nakamura, Observed fine-structures in sporadic Ca<sup>+</sup> ion layers by a frequency-tunable resonance scattering lidar in the midlatitude, International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA), Ito Hall, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 14-16 September 2016

(3) 江尻省, 西山尚典, 津田卓雄, 阿保真, 津野克彦, 和田智之, 小川貴代, 川原琢也, 中村卓司, 波長可変共鳴散乱ライダーによる国内観測試験～第58次南極地域観測隊での昭和基地導入に向けて～, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張メッセ, 2016年5月20-26日

(4) Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama, Takuo T. Tsuda, Makoto Abo, Katsuhiko Tsuno, Satoshi Wada, Takayo Ogawa, Takuya Kawahara, Takuji Nakamura, Fine structures in the E-region plasma density of the ionosphere observed by a Ca<sup>+</sup> resonance scattering lidar observation, Japan Geoscience Union Meeting 2016, May 20nd-26th, Makuhari Messe

(5) 江尻省, 西山尚典, 津野克彦, 津田卓雄, 阿保真, 和田智之, 小川貴代, 中村卓司, 波長可変共鳴散乱ライダー観測の改良～光ヘテロダイン干渉法による発振レーザー周波数の測定～, 第20回大気ライダー研究会, 日野, 2016年2月16日

(6) Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama, Takuo T. Tsuda, Makoto Abo, Takuya D. Kawahara and Takuji Nakamura, Current status of development of frequency tunable resonance scattering lidar for functionality expansion of atmosphere lidar observation at Syowa, The Sixth Symposium on Polar Science, Tachikawa, November 2015

(7) 江尻省, 西山尚典, 津野克彦, 津田卓雄, 阿保真, 中村卓司, 光ヘテロダイン法による波長可変共鳴散乱ライダーの送信周波数校正実験, 第137回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2015年10月31日-11月3日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

江尻省 (EJIRI, Mitsumu)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号: 80391077

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

中村卓司 (NAKAMURA, Takuji)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 40217857

阿保真 (ABO, Makoto)

首都大学東京・システムデザイン研究科・

教授

研究者番号: 20167951

西山尚典 (NISHIYAMA, Takanori)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号: 00704876

津田卓雄 (TSUDA, Takuo)

電気通信大学・情報理工学研究科・助教

研究者番号: 90444421

### (4) 研究協力者

なし