

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287111

研究課題名(和文) 瞠目的手法による大気境界層内の鉛直混合が雲・大気質・放射場に及ぼす影響解明

研究課題名(英文) Effect of vertical mixing within the atmospheric boundary layer measured by the marvelous method on clouds, air quality and radiation

研究代表者

藤吉 康志 (Fujiyoshi, Yasushi)

北海道大学・低温科学研究所・名誉教授

研究者番号：40142749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：地上リモートセンサーと同時にグライダーでのin situ 観測を実施することによって、大気境界層内の各種物理量が整合的に変動することが確認できた。さらに、大気境界層上端に発生した強い乱れは、小さな積雲の縁に存在する極めて狭い下降流によってもたらされていたことが分かった。また、エアロゾルの時空間分布と光学的特性の変動要因を解明するため、エアロゾルの量と光吸収特性の鉛直分布を導出するアルゴリズムを開発し、日射による加熱量を推定した。アルゴリズムの検証は、滝川で行ったグライダー観測データで行った。その結果両者にはまだ不一致が見られ、さらなるin situ観測との比較が必要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Simultaneous ground and in situ observations confirmed the consistent variation of many physical properties in the atmosphere. We also found that strong turbulence near the top of atmospheric boundary layer occurred only in the very narrow region adjacent to small cumulus clouds. We also investigated the spatial and temporal variability of the physical and optical properties of aerosols. We developed a new algorithm to estimate the vertical profiles of the aerosol physical and optical properties. Furthermore, the solar heating rate was estimated from the retrievals, which were directly validated by in situ data collected by a glider. The comparison of the retrieved extinction coefficient with that estimated from in situ measurements showed that our algorithm has a bias error due to the optimization of aerosol parameters to the optical thickness measured by the sky radiometer.

研究分野：雲物理学

キーワード：グライダー観測 大気乱流 ドップラーライダー 雲 エアロゾル サーマル 鉛直混合 放射

### 1. 研究開始当初の背景

本申請者も立案・実行コアメンバーとして参加した GAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment)では、大気・陸面相互作用が主な研究テーマであった。しかし、測定が地上から 100 m 前後までであったため、陸面状態の不均一性が大気境界層内全体や更に上空までの乱流輸送に実質的にどれだけ影響を与えているのか、という肝心の課題が手付かずに残ってしまった。

そこで本申請者は、地表から対流圏中層までの大気の 3 次元流を調べるために、2004 年度に 3 次元走査型ドップラーライダー (3DCDL) を導入した。本装置は大気中に浮遊する微小粒子をトレーサーとして、エアロゾルの濃度はもちろん、上空の風と乱れの 3 次元空間分布の時間変化観測が可能である。これまで札幌、長崎、東京で実施してきた 24 時間連続通年観測によって、放射と潜熱・顕熱の収支が合わないインバランス問題を解く鍵である大気境界層内で生ずる組織的乱流 (サーマル、ロール、ストリーク、ダストデビル、海陸風前線、重力波、冷氣外出流等)、さらには竜巻の卵の可視化にも成功した。また、大気質の測定も同時に実施しており、地面付近のエアロゾルやオゾン濃度が短時間に急変する要因として、これらの流れによって引き起こされる鉛直混合が本質的であることも示した。

この鉛直混合過程は、対流が抑制された条件下でも地表に輸送する過程 (トップダウンディフージョン) と共に、大気境界層上空を飛来する黄砂・中国汚染大気・放射性物質といった様々な物質の地上への降下位置や降下量の予測にとって重要である。更に、どのような組成のエアロゾルがどの高度にどれだけ存在するかによって、大気中および地表での放射収支が異なるため、エアロゾルの直接効果の見積もりにも重要である。更に、多層内のエアロゾルの放射特性が、多層構造を維持するのに重要な気温の逆転層を強めたり弱めたりするという観測事例や数値実験結果もある。一方、大気境界層の上端に発生する雲、あるいは、下層大気が上昇することで発生する積雲の降水特性や光学特性を決める雲粒粒径分布は、その空気塊に含まれる雲凝結核の組成と粒径分布および上昇速度に依存し、エアロゾル層と雲との相対的な位置関係によって放射強制力の正負も変わってくる。しかし、上空での直接観測と大気境界層で発生している組織的乱流やその上空の自由大気とのカップリングまでもリアルタイムに同時観測する最適手段がこれまで見つからなかったため、定量的評価が遅れていた。

### 2. 研究の目的

大気境界層内で発生する組織的乱流 (サーマル、ダストデビル、低速ストリーク、ロール状対流、ケルビンヘルムホルツ波、重力波、海陸風などの局地前線等) の検出と内部構造

の解明、それらが引き起こす大気場及び大気質の鉛直分布の変化、それに伴う短波・長波の吸収・散乱による直接効果の大気場へのフィードバック、雲の物理・光学的特性に及ぼす間接効果を定量的に評価することを目的とした。

### 3. 研究の方法

晴天域の風とエアロゾルの測定に優れた 3 次元走査型ドップラーライダーと 2 波長偏波ライダー、鉛直 1 次元ではあるが高時間・空間分解能で雲内の風速 3 成分・乱流構造の測定も可能な改良を加えたウィンドプロファイラー等の各種地上測器を用いて、晴天域から雲域までの風と乱流をシームレスに観測した。上記の地上リモートセンシングを検証するために、滝川スカイパークの有人グライダーによる *in situ* 測定を実施した。

3 次元走査型コヒーレントドップラーライダー (三菱電気製、以下、ドップラーライダーと呼称する) は、近赤外 (波長 1.5  $\mu\text{m}$ ) のアイセーフなパルスレーザーを発振しエアロゾル・雲粒・氷晶・昆虫等を散乱体として、散乱強度・ドップラー速度・速度幅を測定する。コンテナ天井にあるスキャナ部が水平方向および鉛直方向に回転し、空間を走査する。滝川では、仰角 0 度、5 度、20 度で水平 360 度の PPI 走査と、ほぼ直交する 2 方向 (230 度と 310 度) で鉛直 180 度の RHI 走査を繰り返した。観測範囲は半径約 6 km である。

ウィンドプロファイラーとは、レーダーの 1 種で使用する周波帯が VHF/UHF 帯を使用する。電波のビームを鉛直および東西南北の 4 方向に 7~15 度傾けた方向のあわせて 5 方向に送信し、その散乱を捉える装置である。気象レーダーと異なり、長い波長の電波を用いることで、装置上空に存在する空気の気温や湿度の差による密度の変動つまり、大気の乱れにより電波の散乱が発生するので、空気そのものを散乱体として用いることができ、装置直上の風の風向 (水平および鉛直方向) や風速  $\rho n^2$  で表される乱流強度を測定することができる。

グライダーは他の有人航空機に比べ圧倒的に軽量であり、サーマルやウェーブといった上昇流を利用して飛行することを目的として設計されており、空気塊の流れに敏感に反応する。そのため、それ自体を感度の良いセンサーとして活用できる。また、エンジンを搭載しないため、排気ガスを出さないことで、飛行区域の大気環境を乱すことも無い。

観測には、たきかわスカイパークが所有する複座グライダーを使用した。本機は操縦席が前後にあり、前席にパイロットが搭乗し、後席に観測者が観測装置と共に搭乗する。グライダーはエンジンを搭載していないため、離陸時は軽飛行機で曳航され、一定高度 (本観測では約 3000m まで) で切離した後、自由滑空 (落下速度約 0.5m/秒) する。観測フライトの滑空経路すなわち観測経路はドップラーライダーとの同時観測を行うため、ドッ

プラーライダーを中心とする半径 5km の範囲内で折り返ししながら実施した。

グライダーが外部から受ける動揺・振動などを測定するために、3 軸振動計 (MTi-G (XSENS 社製)) を用いて測定した。本計測装置は、X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 方向の加速度を記録し、そこから算出されたロール・ピッチ・ヨーの 3 軸の回転や X、Y、Z の 3 軸の機首方向の変化量なども同時に記録できる。また、GPS 信号を受信する機能も有しており、正確な時刻、座標、高度も記録できる。短時間振動を測定するために、時間分解能 0.01 秒で記録した。設置場所は後席の計器盤の上にゴムテープで動かないように固定した。気温・湿度・気圧は、MSHTDL-16WL (温度 3 系統、湿度 2 系統、気圧 1 系統) と SHTDL-3 (高速熱電対 2 本) (いずれも Syscom 社) を使用した。複数のセンサーで同時に測定することで、冗長性を担保した。MSHTDL-16WL の時間分解能 (記録間隔) は 1 秒であり SHTDL-3 は 0.1 秒である。これらセンサーは通風のために穴を開けたペットボトルにひとまとめに入れて、グライダーの窓から外に出した。なお、このペットボトル内にはエアロゾルカウンターとエアロゾル粒子採取用のチューブも入れた。

エアロゾルの粒径ごとの個数濃度は光学的パーティクルカウンター (福岡大学理学部地球圏科学科気圏物質科学研究室および株式会社山梨技術工房により無人航空機用に製作された OPC) を用いた。エアロゾルサンプラー (福岡大学理学部とアリオス株式会社製作) は、エアロゾルを電子顕微鏡用のメッシュに捕集することができる装置である。捕集用のメッシュをこのノズル直下に設置し、ノズルから吹き出す空気を吹き付け、空気中に含まれる粒子をメッシュに衝突させることで捕集する。メッシュは網目状に開口されているニッケル製の円盤にコロジオン薄膜を貼付したものにカーボンコーティングしたものをを用いた。吸引した空気を適切な口径のノズルを通過させることで粒子を粒径で分別する。本装置では、粗大粒子 (粒径が 2~5 程度の粒子) と微細粒子 (粒径が 0.2~2 程度の粒子) に分けて捕集した。メッシュはホルダーで固定し、回転テーブル上にそれぞれ 16 個設置することができ、1 回の観測フライトで複数の高度で捕集することができる。

#### 4. 研究成果

本研究では各種地上リモートセンシング観測と同時に、各種小型観測装置を搭載したグライダーでの in situ 観測を実施することによって、より細かい大気境界層、サーマルの発達過程や構造を明らかにすることを目的とした。グライダー観測は 2014 年、2015 年、2016 年に各 10 回、合計 30 回実施した。

その結果、大気境界層より上空でライダー画像では一様に見える領域でも、混合比やエアロゾル粒径分布の違う大気が成層構造を

なしていることがわかった。境界層上端の高度についても、ライダー画像で見る反射強度の境界よりもさらに上空に、温度逆転層や混合比やエアロゾル数濃度が急激に変化する領域があることがわかり、in situ 観測の重要性が明らかとなった。

世界中の地上日射観測から、1950 年代以降、地上日射量は減少を続け (Global dimming)、1980 年代に増加傾向 (Global brightening) に転じている (Wild et al. 2005)。この変動要因を解明するため、分光放射計とライダーのデータを複合解析し、エアロゾルの量と光吸収特性の鉛直分布を導出するアルゴリズムを開発し、滝川で行ったグライダー観測データと比較した。図 1 はその結果であり、両者にはまだ不一致が見られ、さらなる in situ 観測との比較が必要であることが明らかとなった (Kudo et al. 2017)。

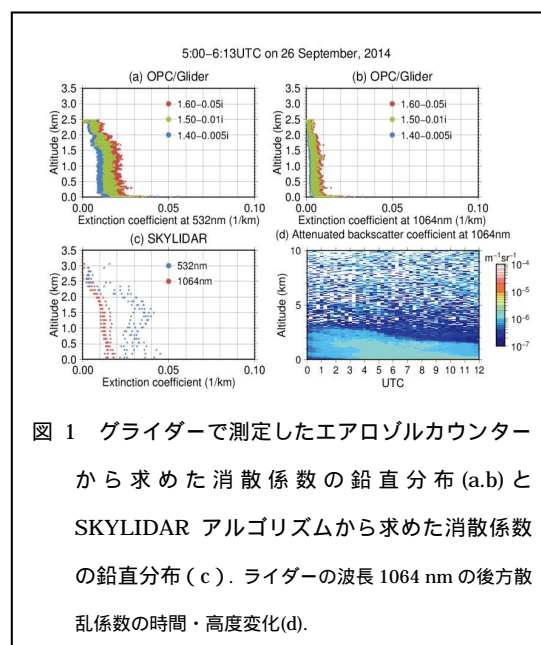


図 1 グライダーで測定したエアロゾルカウンターから求めた消散係数の鉛直分布 (a,b) と SKYLIDAR アルゴリズムから求めた消散係数の鉛直分布 (c)、ライダーの波長 1064 nm の後方散乱係数の時間・高度変化 (d)。

次に、より細かい大気境界層上端のエントレインメント、サーマルの発達過程や内部構造を明らかにすることを目的として、グライダー観測データを調べた。その結果、境界層上部では水平スケール数 km で境界層上端の大気と鉛直混合を起こしていること、また、より地表に近い高度ではパルス状 (数 10 m スケール) のサーマルの存在が、気流の乱れ、気温、混合比、エアロゾル数濃度のデータから総合的に確認することが出来た。

機体の揺れの指標でもある水平方向と鉛直方向の加速度の高度分布を 3D-CDL で観測した大気の水平・鉛直構造と比較した結果、大気境界層内では水平・鉛直のいずれの方向にも大きく揺れたが、自由対流圏では揺れ、特に鉛直方向の揺れが大気境界層内に比べて圧倒的に小さかった。さらに、大気境界層上端で極めて大きな乱れが観測された事例を詳細に調べたところ、境界層上端に発生した小さな積雲の縁に存在する狭い (幅数 10 m 程度) 下降流によってもたらされていたこと

が分かった(図2)。また、自由対流圏はもちろんだが、大気境界層内であっても、成層構造を示している時には、自由対流圏と同様に鉛直方向の乱れは小さかった。

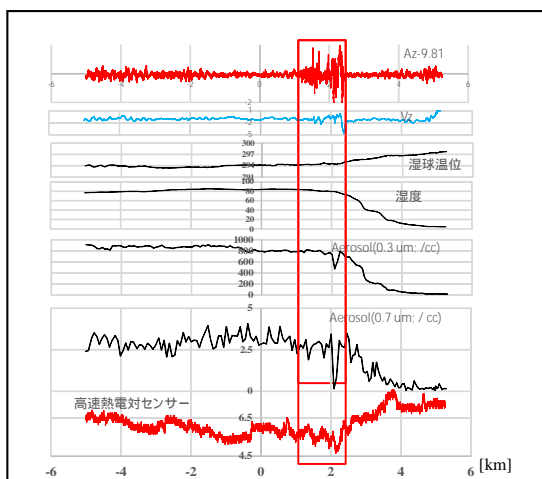


図2 グライダーで測定した各物理量の水平変化。1400～1300mの範囲で大きな乱れ、上部の乱れでは極めて強い下降流(-3m/s)、エアロゾルの数濃度が急激に減少していることから、上空のきれいな空気が侵入していたことが分かる。(下向きのエントレインメント) 温度や湿度には変化が見られないが、熱電対による測定では気温の明瞭な低下検知。

このような水平・鉛直方向の乱れは、運動量やエアロゾルなどの物質の混合にも大きく影響し、エアロゾルを直接採取し電子顕微鏡分析を行ったところ、自由対流圏内であっても異なった高度に存在する成層中の粒子組成に相違があることを見出した。一方、ウィンドプロファイラーの  $C_n^2$  と、グライダー観測のデータから計算した  $C_n^2$  と、および3軸加速度の鉛直分布を比較したところ、ウィンドプロファイラーのデータとグライダー観測のデータの間ではあまり良い一致を見なかった。見ている現象のスケールの違いや感度・精度の違いなど、まだ考慮・検討すべき課題が多く残っている。

#### 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 1 件)

Kudo, R., T. Nishizawa, T. Aoyagi, Y. Fujiyoshi, Y. Higuchi, M. Hayashi, A. Shimizu and K. Aoki, 2017: Remote sensing of aerosol optical properties and solar heating rate estimated by the combination of sky radiometer and lidar measurements, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1810, 060002 (2017); doi: 10.1063/1.4975518

[学会発表](計 18 件)

山本真之, 川村誠治, 岡本 創, 藤吉康志, 2017: 高分解能ウィンドプロファイラーにおけるスペクトルパラメータ推定手法の開発, 日本大気電気学会第 95 回研究発表会, 1月6-7日, 神戸市.

工藤 玲, 2016: 地上日射量の長期変動に対するエアロゾルの影響, 第 14 回環境研究シンポジウム, 11月22日, 東京.

山本真之, 川村誠治, 岡本 創, 藤吉康志, 2016: 高分解能ウィンドプロファイラーにおけるスペクトルパラメータ推定手法の開発. 日本リモートセンシング学会第 61 回学術講演会, 11月1日, 新潟市.

工藤 玲, 2016: CALIPSO-MODIS 複合解析によるエアロゾルプロダクトの開発, 日本気象学会秋季大会, 10月26日, 名古屋.

藤吉康志, 2016: 「風の正体とその姿～突風災害から身を守る」. 第 11 回札幌管区気象台サイエンスカフェ, 9月18日, 紀伊国屋商店札幌本店.

藤吉康志, 2016: 「ドップラーライダー: これまで見てきたこと」(招待講演), 福岡から診る大気環境研究所研究会 9月11日, 福岡大学, 福岡市.

藤吉康志, 佐藤博紀, 2016: 「グライダーとリモートセンサーを用いた下部対流圏の微細構造の観測」, 第 10 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 第 322 回生存圏シンポジウム, 9月9日, 京都大学宇治キャンパス, 宇治市.

工藤 玲, 2016: スカイラジオメータによる雲, エアロゾル, 水蒸気, オゾンの推定, 日本気象学会春季大会, 5月19日, 東京. Kudo, R., T. Nishizawa and T. Aoyagi, 2016: Remote sensing of aerosol optical properties and solar heating rate estimated by the combination of sky radiometer and lidar measurements, International Radiation Symposium, 16-12 Apr., Auckland, New Zealand.

藤吉康志, 2015: 「空のベスト&ビューティを観る」(特別講演) 日本気象学会関西支部研究発表会, 12月18日, 香川大学幸町北キャンパス, 香川市

藤吉康志, 2015: 「雲とエアロゾルの多層構造 - その意味と役割 - 」(招待講演), 第 3 回エアロゾルシンポジウム - 宇宙・空・地表面 -, 11月26日, 江別市酪農学園大学.

藤吉康志, 2015: 「空のエフェメラル 雲を探る」(招待講演), 苫小牧市美術博物館大学講座, 9月26日, 苫小牧市美術博物館.

藤吉康志, 2015: 「雲科学と 3 次元走査型コヒーレントドップラーライダー」(招待講演), 第 33 回レーザセンシングシンポジウム, 9月10日, 東京都大田区産業プラザ PIO コンベンションホール.

藤吉康志, 2015: 「雨、雪そして大気境界層の雲科学的観測」(招待講演), 第 23 回

土木学会地球環境研究シンポジウム, 9月2日, 北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟, 札幌市.

藤吉康志, 2015: 「雲科学が期待するグライダー観測」(招待講演), 北海道滑空協会セミナー, 3月7日, 旭川市民文化会館. Fujiyoshi, Y., 2015: Cloud Scientific observations of rain/snow cloud and ABL. International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, 4-6 March. (invited)

Fujiyoshi, Y., 2014: Trial to identify cloud boundary based on glider observation, EarthCARE Workshop, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, Japan, 17th-19th September.

Fujiyoshi, Y., 2014: In situ observations of vertical profiles of air quality using a glider, AOGS 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, 28 July, Sapporo, (invited)

[図書](計 2 件)

藤吉康志, 2016: 「低温環境の科学事典」(分担執筆)(編集代表河村公隆), 朝倉書店, 411 ページ

藤吉康志, 川島正行, 2015: 「低温科学便覧」(北大・低温研編集)(分担執筆), 218 ページ, 丸善出版.

[産業財産権]

出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤吉 康志 (FUJIYOSHI, Yasushi)

北海道大学・名誉教授  
研究者番号: 40142749

(2) 研究分担者

川島 正行 (KAWASHIMA, Masayuki)  
北海道大学・低温科学研究所・助教  
研究者番号: 10281833

工藤 玲 (KUDO, Rei)  
気象庁・気象研究所・研究官  
研究者番号: 00414508

林 政彦 (HAYASHI, Masahiko)  
福岡大学・理学部・教授  
研究者番号: 50228590

宮崎 雄三 (MIYAZAKI, Yuzo)  
北海道大学・低温科学研究所・助教  
研究者番号: 60376655

青木 一真 (AOKI, Kazuma)  
富山大学・大学院理工学研究部・教授  
研究者番号: 90345546

山本 真之 (YAMAMOTO, Masayuki)  
国立研究開発法人情報通信研究機構・沖縄  
電磁波技術センター・主任研究員  
研究者番号: 90346073

( ) 連携研究者

( )

研究者番号:

( ) 研究協力者

( )