

特集 エアロゾル計測 I

アジアダストのライダー観測

甲斐 憲次

茨城大学教育学部(〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1)

Lidar Observation of Asian Dust

Kenji KAI

Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512

(Received January 8, 2020)

The author has carried out lidar observations of the Asian dust since 1986. The present paper described the results of the lidar observations over Tsukuba, Japan, the Taklimakan Desert, China, and Gobi Desert, Mongolia. A combination of the ruby lidar observation at Tsukuba and a three-dimensional numerical simulation showed a long-range transport of the Asian dust from the Gobi Desert to Japan. A Mie-scattering depolarization lidar in Aksu, Xinjiang, China showed the structure of the dust layer in the Taklimakan Desert that was affected by a great local circulation between the Tianshan Mountain and Tarim Basin. A lidar network observation in the Gobi Desert showed a transport of the dust from the atmospheric boundary layer to the free troposphere by a cold frontal system, moving across the desert. Finally, a model of the Mie-scattering depolarization lidar is proposed for observations in the atmospheric boundary layer and lower troposphere.

キーワード:アジアダスト (黄砂), ライダー, 数値シミュレーション **Key Words**: Asian dust (Kosa), Lidar, Numerical simulation

1. はじめに

私は大気境界層の乱流エネルギー収支に関する研 究で学位(理学博士・筑波大学)を取得した後、気 象庁・筑波大学・名古屋大学・茨城大学において、 気象と大気環境に関わる研究・教育・行政に携わっ てきた.この間、中国のタクラマカン砂漠やゴビ砂 漠、モンゴル草原を対象とする大型の研究プロジェ クトに参加する機会を得た.ライダーを用いて、ア ジアダスト(黄砂)の発生と輸送のプロセスを観測 しようと試みた.

観測手法としてのライダーの利点は、ダストなど エアロゾルの高度分布を正確に測ることができるこ とである.通常の気象衛星等はダストの平面的な分 布をとらえることはできるが、その高度分布を正確 に求めることはできない、ダストの気候影響を考察 する際、ダストがどの高度に分布するか、すなわ ち、それは成層圏か、対流圏か、あるいは大気境界 層であるかが決定的に重要である.ダストの輸送を 調べる際にも、その高度分布は重要である.なぜな ら、高度によって、大気の循環系が異なるからだ. まず、本稿で取り上げるアジアダスト(黄砂)を 簡潔に説明したい.その模式図をFig.1に示す¹⁾. シベリア高気圧に覆われた冬が終わり、春になる と、アジア大陸内陸部の乾燥地域に低気圧が侵入し



Fig. 1 Occurence and tranport of the Asian dust¹⁾.

はじめる.低気圧に伴う強風により,乾燥した大地 からしばしば砂塵嵐が発生する.英語では、ダスト ストーム (dust storm/sandstorm) と呼ばれる.巻き 上げられた砂塵は、上空の偏西風に乗って日本、さ らには太平洋域に輸送される.黄砂が発生するため の基本的な条件は、①乾燥地域で砂塵嵐が発生する こと、そして②日本の上空に偏西風帯があることの 2点である.気象学的にみると、黄砂現象は、水平 スケール約3千km、鉛直スケール約5km、時間ス ケール数日から1週間に及ぶ物質の長距離輸送現象 である.

本稿では、ライダーを用いたアジアダストの発生 と輸送に関する研究を紹介し、今後の課題を述べ る.

2. ルビーライダーによるアジアダスト観測

2.1 気象研究所への転勤

私は、1986年4月、気象庁観測部産業気象課か らつくば研究学園都市の気象研究所に転勤した.仕 事の内容は、それまでの気象災害の監視から、ライ ダーの開発と気象業務への応用に変わった.私に とっては全く新しい研究分野への進出であり、学生 時代に戻ったように基礎から勉強を始めた.1年後 の1987年、NASAのラングレー研究センターから 内野修主任研究官(当時)が帰国した.彼は最新の ライダー技術と研究成果を持ち帰った.

気象研究所は 1980 年のつくば研究学園都市移転 に伴い,多額の研究費が投入され,高層観測用大型 ルビーライダーが整備された (Fig. 2). ルビーライ ダー(波長 694.4 nm)は 1982 年から稼働し,成層 圏・対流圏のエアロゾル・雲の観測が行われた³⁾. この装置を用いて,しっかりとした研究成果をあげ なければとの使命感があった.私たちは今後どのよ うな研究をすべきであるか,毎日議論した.とにか く,研究論文を発表しようということなった.ライ



Fig. 2 Lidar system of the Meteorological Research Institute (MRI), $JMA^{2)}$.



ダー研究室は、成層圏エアロゾル・黄砂・対流圏の 雲に焦点を絞り論文をまとめることになった.

私は黄砂研究の担当となり、ライダーを用いた黄 砂研究のレビューを始めた.気象研究所の図書館 で、黄砂に関する論文は手当たり次第に読んだ.先 行研究は大気中での黄砂の高度分布と輸送過程に焦 点が当てられていた.しかし、中国西域のタクラマ カン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原などの発生源地域の 地表面状態に関する研究が著しく不足しているよう に感じた.要するに、「○○あたりで発生した黄砂 が...」の記述がいい加減なのである.地表面状態 が現地データで検証されていない.一方、大気中の ふるまいは丁寧に解析されている.黄砂の先行研究 は「アンバランスだ」と感じながら、文献調査を進 めていた.

2.2 1986年3月のアジアダスト

ライダーデータの吟味を始めると、大変興味深い ダスト現象があった. Fig.3は、1986年3月13日 15時4分から20時48分に観測されたライダー信 号のプロファイルである.通常、ライダー信号は高 度と共に減衰するが、このプロファイルは高度4 km付近に強い散乱層がみられた.この散乱層は、 黄砂がレーザー光線を散乱していると思われた.黄 砂としたら、その数日前に、中国大陸でダストス トームが発生しているはずである.

どのように調べたらよいか.かっての上司・小柴 厚さん(気象庁産業気象課)のアドバイスに従っ て、地上気象通報データ(SYNOP)で黄砂の発生 状況を調べた.SYNOPは、全世界の地上気象デー タが収集されている.通常の気象データのほか、現 在天気・過去天気の情報(砂塵嵐,煙霧など)が あった.SYNOPデータをFig.4(a)の地図にプロッ トしてみた.数字の分布をみると、3月10-11日に ゴビ砂漠と黄河中流でまとまって砂塵嵐が発生し、 3月12-13日、西日本を中心に黄砂が観測されたこ とがわかる.つまり、西日本の黄砂現象が発生する 3日前にゴビ砂漠周辺に砂塵嵐が集中的に発生していた.Fig.4(b)は、アジア大陸における砂漠と黄土



Fig. 3 Profiles of lidar signals, temperature and relative humidity on 13 March 1986²⁾.





Fig. 4 (a) Dates of the occurrence of the duststorms, sandstorms and Kosa during 8–13 March 1986, and (b) geographical distribution of deserts and loesslands in the Asian Continent and the observation site²⁾.

の分布を示す.北緯 35-40 度沿にゴビ砂漠,黄土高 原,タクラマカン砂漠が分布している.アジアダス トの発生情報と発生源分布を見比べながら天気図を 解析すると,ゴビ砂漠で発生した砂塵嵐が上空の偏 西風に乗ってつくば市上空にやってきたと解釈でき た.

この研究をまとめて、日本気象学会の英文誌(J. Meteor. Soc. Japan) に投稿した. しばらくして、編 集委員からレフリーコメントが届いた. そのコメン トによると、「中国で発生した砂塵嵐が日本上空に 達したプロセスの証明がなされていない。あるのは 状況証拠のみではないか」との指摘であった. レフ リーの指摘はまさに正論であるが、ないものねだり に等しかった. 当時, まだだれも黄砂が中国大陸か ら輸送されるプロセスをきちんと数値シミュレー ションで証明したものはいなかった.当時, Duce et al. (1980)⁴⁾や Shaw (1980)⁵⁾の先行研究があった が、古い研究方法(等圧面流跡線解析)が使われて いた. この方法では、おおざっぱな輸送経路しかわ からず、ましてや輸送高度の推定は不可能であっ た. 岩坂泰信名古屋大学教授(当時)は等圧面流跡 線解析よりも高度な等温位面流跡線解析により、黄 砂の輸送高度を推定した⁶⁾.しかし,この方法も専 門的になるが,等温位(空気塊の温位が変化しな い)という仮定の制約があった.黄砂の移動中に低 気圧などで降水現象があると,この方法では正確に 推定することができなかった.

2.3 気象庁数値予報課との共同研究

どうしたら,中国から日本への黄砂の輸送を証明 できるか, 真剣に考えた. 私は気象庁数値予報課の 中村一さん(故人)に相談した。中村さんは、チェ ルノブイリ原子力発電所の事故を契機に、放射性物 質などの大気中での移流拡散モデルの開発を担当さ れていた⁷⁾. 1986年4月26日未明, 旧ソ連のチェ ルノブイリ原子力発電所で大事故が発生し、大量の 放射性物質が大気中に放出された. ご承知のよう に、この事故はその後の原子力政策に大きな影響を 及ぼした.ソ連政府からの情報が乏しく.放射性物 質がどの程度、大気中に放出され、そしてどの国に どの程度の影響が出るのか、予測がつかなかった. ヨーロッパでは、深刻な環境汚染が懸念されたが、 日本への影響はどの程度あるのか. この点にマスコ ミの質問は集中した. 当時の天気予報は、予報官の 経験に頼る部分があり、3日先が実質的な予報の限 界であった. チェルノブイリから日本間までの輸送 時間は約1週間であり、予報することは困難であっ た. この事件の教訓から、気象庁はグローバルス ケールの汚染物質の移動を的確に予報するには、全 球移流拡散モデルを開発するしかないと判断した.

中村さんのグループは,移流拡散モデルを開発 し,実際の現象,たとえば中ソ国境沿いの山火事に よる煙の拡散,火山灰の拡散などに応用を始めた時 期であった.中村さんは「黄砂の高度分布がわかる ライダーデータは,全球移流拡散モデルの検証に使 える」と判断された.こうして,私たちと中村さん のグループの共同研究は始まった.

中村さんと同僚の高杉年且さんは、粒子移流拡散 モデルを用いて、黄砂粒子の長距離輸送を調べた. 私は黄砂の発生地の候補として、ゴビ砂漠・黄土高 原(北緯40度、東経106度)とタクラマカン砂漠 (北緯40度、東経80度)を選んだ.高杉さんらは 候補地にトレーサーの発生源をおき、大量のトレー サーを連続的に放出し、その輸送経路を追跡した. 粒子移流拡散モデルは、気象庁の数値予報モデルか ら供給される3次元の風の場と拡散係数を使用し、 発生源から放出されたトレーサーの3次元のラグラ ンジェ的運動(移流)と鉛直拡散を計算した.

しばらくして、中村さんから電話があった.「ダ メだった.ゴビ砂漠上空1km付近に黄砂の発生源



Fig. 5 Predicted three-dimensional distributions of the tracers. Vertical line segments at the corners indicate the height of 800 hPa²⁾.

をおいて,数値シミュレーションしてみると,黄砂 は日本にはほとんど来なかった. ライダー観測の結 果とは大きく違いが生じた」. 私は中村さんに、「黄 砂の論文を読むと、高度4km付近に舞い上がると の報告があります.ゴビ砂漠上空4kmまで発生源 を置き直して,再度,数値シミュレーションをお願 いできませんでしょうか.」と伝えた.数日後、中 村さんから電話があり、「素晴らしい結果だ.数値 シミュレーションとライダー観測がほぼ一致した.」 との連絡があった. その日の夕方, つくばから大手 町の気象庁に向かった. 中村さんがプリントアウト した図をもとに説明された.思わず息をのむほど, 精密で、美しさのある図である(Fig.5)、数値予報 課が開発したモデルだけのことはあると感じた. 当 時はカラーの図が一般的ではなく、白黒だけで大気 中に浮遊する黄砂の3次元の図を作図することにな る. 黄砂粒子から地上に線を引き, 立体感をだす工 夫がなされた.

黄砂の投稿論文は,数値シミュレーションの結果 を追加して,中村さんらと連名で学会誌に再投稿し た.今度は見事に受理された²⁾.

2.4 黄砂シンポジウム

1988 年 12 月,シンポジウム「偏西風地帯での大陸・海洋間の物質移動―黄砂を例としてー」が名古屋大学水圏科学研究所で開催された.コンビーナーの岩坂先生に連絡を取って,私も飛び込みで参加し



た.シンポジウムには,武田喬男(故人),岩坂泰 信,植松光夫,岡田菊夫,角皆静男(故人),石廣 玉,樋口敬二(故人)ら第一線の研究者が発表され ていた.

「たかが黄砂」と思っていたが、いろいろな見方 があるものだと感心した.大気中で採取した黄砂粒 子1個1個の形状や組成を丁寧に調べる人もいるし (ミクロな見方)、黄砂を雲のような塊としてとらえ る人もいる(マクロな見方).気象学、海洋学、雪 氷学、エアロゾル学、大気化学の分野の研究者の集 まりであるが、それを束ねているコンセプトは「偏 西風地帯での大陸・海洋間の物質移動」である.

このシンポジウムでの研究発表は,専門書『大気 水圏の科学 黄砂』⁸⁾として出版された.

3. タクラマカン砂漠のアジアダスト

タリム盆地は、三方を 5000 m 級の山脈・高原に 囲まれ、その面積はほぼ日本の面積に相当する.広 大なタリム盆地の大半を占めているのが、タクラマ カン砂漠である.地形をみると、ゴビ砂漠が平原に 拡がる開放系の砂漠であるのに対して、タクラマカ ン砂漠は山脈や高原に囲まれた閉鎖系の砂漠と言え る.唯一低くなっているのは、東側の楼蘭~敦煌付 近である.ここがタリム盆地の出口になっている. この地域の大気循環系と 3 次元地形との関係は、気 象学的にも興味深い.

2000-2004 年度科学技術振興調整費「風送ダスト の大気中への供給量と気候への影響に関する研究 (ADEC)」がスタートした⁹⁾.風送ダスト (ADEC) は Fig. 6 に示す通り,中国西域の砂漠域で発生した アジアダストを連続的に観測し,その輸送経路や気 候学的影響を調べようとするものである.



Fig. 6 Japan-China Joint Studies on Aeolian Dust Experiment on Climate Impact (ADEC)⁹⁾.





Fig. 7 Japan-China Joint Studies on Aeolian Dust and its Impact on Climate (ADEC)^{10,11)}.

3.1 タクラマカン砂漠のライダーシステム

筆者のグループは、風送ダストの一環として、 2001年、中国科学院新彊生態地理研究所と共同し て、タクラマカン砂漠にライダーステーションを立 ち上げ、2002年より現地観測を行った. 観測場所 は中国北西部、タクラマカン砂漠のオアシス都市・ アクスにある中国科学院新疆生態地理学研究所アク ス観測所内の圃場(北緯40.6度、東経80.8度、標 高1028m)である. 偶然ではあるが、アクスは、 中村さんらと実施した数値シミュレーションのダス トソースとほぼ一致する²⁾.

タクラマカン砂漠はユーラシア大陸の中央部に位 置している.砂漠の気候は過酷で,夏は40℃を超 え,冬はマイナス10℃以下になる.当然のことな がらレーザー,光学機器などの精密機器は砂塵,温 度変化,電圧変動に弱いので,システム全体を防塵 防水型のコンテナ(6m×2m×2m)に収納し,エ アコンで温度調節を行うなどの工夫を試みた(Fig. 7).ライダーの光源として,ネオジウム・ヤグレー ザー(Nd:YAG)を使用した.このレーザーは,グ リーンのレーザー(波長532nm,1064nm)を発振 する.レーザーパルスを大気中に発射し,後方に散 乱される光を光電子増倍管で受信する.さらに,散 乱強度や偏光特性より,大気中に浮遊する散乱体の 量や形状の情報が得られる.

最下層の大気境界層では、大気中に浮遊する微粒 子が多く、一般に散乱強度が極めて大きい.一方、 成層圏などの上層大気では、空気が澄んでいて、散 乱強度は微弱である.最下層の大気境界層から上空 の成層圏まで連続的に観測しようとすると、散乱強 度(距離自乗で反比例)のレベルは6桁くらい変化 する.タクラマカン砂漠のライダーでは、ダイナ ミックレンジを広げるため、受光用の望遠鏡を二つ 用意した.小さい望遠鏡(直径 20 cm)は下層大気



Fig. 8 Surface wind field around the Taklimakan Desert at a height of 10 m at 18:00 UTC on April 13, 2002, as simulated by MM5. The grid resolution of MM5 is 12 km. The arrows indicate the wind vector¹¹.

(大気境界層,下部対流圏)からの強い散乱信号を, 大きい望遠鏡(直径 35 cm)は上層大気(上部対流 圏から成層圏)からの微弱な散乱信号を受信する. このような工夫により,地表面に極めて近い高度か ら成層圏までの幅広い高度範囲を観測できるよう設 計されている.しかし,後述するように,私たちは ダスト層の光学的厚さを甘く見ていた.

3.2 東風による砂塵嵐とダスト層高度の日変化

2002年4月,科学技術振興調整費「風送ダスト」 の集中観測が,中国北西部から日本に至る領域で, 2週間ほど実施された.観測期間中の4月13日, ダストストームが発生し,ダストはその後数日間, タクラマカン砂漠上に滞留した.

Fig.8は、数値モデルで再現したタクラマカン砂 漠の地上風系である.天山山脈を迂回した気流が東 風となって、タクラマカン砂漠に侵入している.こ の東風が乾燥した砂漠域から大量の砂塵を巻き上げ た.ライダーの観測結果によると、この砂塵嵐の先 端部分はくさび状になっているので、重力流の性質 を持っていた.このことから、タリム盆地の東部か ら重力流のような形で侵入した気流が、タクラマカ ン砂漠の広域にわたって、砂塵嵐を発生させたと推 察される.

Fig.9は、ライダーで観測した、2002年4月 13-16日、激しいダストストームの様子を示す.こ こでは、ライダーで観測されたダスト現象とダスト の除去プロセスを述べる.

ダストストームの前の4月11-12日,快晴で視程 は40kmであった.ダスト層は3-4kmの厚さがあ り,後方散乱比は4-8, 偏光解消度は8-10%で あった.上層雲がしばしば高度10-13km付近に現



アジアダストのライダー観測(甲斐 憲次)



Fig. 9 Time-altitude cross-sections of backscattering ratio (a) and depolarization ratio (b) over Aksu on April 11–21, 2002¹¹⁾.



Fig. 10 Time-altitude cross-sections of backscattering ratio (a) and depolarization ratio (b) over Aksu on April 11–21, 2002¹¹⁾.

れた.この雲は、おそらく周囲の山脈や高原に対応 するものと思われる.

4月13日,上空の雲が高度数kmまで下がった. この現象は,前線面上に雲を伴う気圧の谷が通過したことを示す.これに呼応して14:30地方時,ダストストームが発生した.強い東風が吹き,ピーク時の風速は6m/s以上であった.視程は1kmとなった.このダストストームは4日間続いた.密なダスト層が地上から高度5.5kmまで発達した.後方散乱比は20かそれ以上で,偏光解消度は15-25%であった.密なダストによるレーザー光線の吸収のため、ダストストーム中のライダー観測は、数時間にわたって,できなかった.本研究では、ライダー方程式を直接解くことにより、ダストストーム中の最下層における後方散乱比を推定した.

Fig. 10 は高度 187 m, 1-5 km における後方散乱 比の時間変化を示す.ダストストームの後,ダスト 層上端高度の日変化がはっきりと観測された.この 期間,下層(高度 2 km 以下)のライダー信号は,



Fig. 11 Surface wind fields (a, b) and vertical cross section of wind files in east-west (c, d) and north-west (e, f) at 1300 LST and 2330 LST 11 April 2002 over Aksu. Red dot and thick red arrow indicate the location of Aksu. Black contours and colored contours indicate topography and potential temperature, respectively¹²⁾.

徐々に減衰した. この結果は,地表近くの比較的粒 径の大きいダスト(直径 10 μm かそれ以上の粗大 粒子)が徐々に重力沈降していることを示す.他 方,高度 2-4 km のライダー信号は,夕方から深夜 にピークをもつ,明瞭な日変化を示した.このピー クはほかの場所で巻き上げられた比較的粒径の小さ いダスト(直径 1-10 μm 位)が天山山脈—タリム 盆地の局地循環により移流してきたことが示唆され る.

ダストストーム前の4月11日には、ダスト層高 度の日変化は小さかった。4月18日以降、ダスト 層高度は日中低く、夜間に増加する傾向があった。 この原因を調べるため、メソ気象モデルを用いて数 値シミュレーションを行った(Fig.11)¹²⁾.その結 果、4月11日は、大気混合層が十分発達せず、大 気下層は比較的静穏で、上空の自由対流圏と分離さ れた状態であった。一方、4月18日は上空の空気 の流入と高い山脈に囲まれたタクラマカン砂漠上の 局地循環により、顕著なダスト層の日変化が現れ た.

3.3 パミール越えの気流による砂塵嵐

2003 年 3 月, パミール高原越えの気流により砂 塵嵐が発生した.珍しいケースである.常松展充君





Fig. 12 Time-height cross section of the backscattering ratio (R) at the lidar observation site from 0000 UTC 25 March to 0000 UTC 27 March 2004. An altitude of the observation site is 1028 m ASL¹³.



Fig. 13 Satellite image of the Taklimakan Desert at 0750 UTC 26 March 2004 by MODIS/AQUA: (a) large image and (b) sketch of the large image¹³⁾.

(現・東京都環境科学研究所)が中心となって,こ の砂塵嵐の全容を明らかにした¹³⁾. Fig. 12 に示す通 り,3月26日05UTC,砂塵嵐が侵入し,黄砂は高 度6kmまで舞い上がった.砂塵嵐は6時間継続し, 12UTC 頃終息した.

大気循環系をみると、この時期、上空は偏西風が 卓越している.ところがある条件が加わると、この 強い偏西風が地上に降りて、砂塵嵐を発生させるこ とがある.Fig.13の衛星写真は、このように発生 した砂塵嵐を示している.この写真の乳白色の部分 が砂塵嵐の発生しているところである.タリム盆地 の北西部から東部に向かって分布している.よくみ ると、熱いみそ汁のように、蜂の巣状の対流が発生 している.大気が不安定であることが分かる.

この様子を数値モデルで再現すると, Fig. 14 の ようになる.地上で強風が出現している領域(北西 部から南東部)は,衛星画像で黄砂が発生している 領域に対応する.この強風が黄砂を引き起こしたこ とがわかる.それでは,この強風はどこからやって きたのだろうか.タリム盆地に日射が差し込むと, 砂漠の地上付近が加熱される.夜間に形成された安 定層は次第に破壊される.大気が不安定になる.対 流が発生し,大気混合層が形成される.この大気混 合層は次第に成長し,偏西風が卓越する領域に達す



Fig. 14 Calculated dust distributions in the Taklimakan Desert on 26 March 2004: (a) 0200 UTC, (b) 0400 UTC, (c) 0600 UTC, and (d) 0800 UTC. Each dot represents a dust particle. The star in Figures 10a and 10d indicates the lidar observation site¹³⁾.

る. そうすると, この大気混合層により, 上下の空 気の混合が生じ, 上空の強風が地上に降りてくるこ とが分かった.

砂塵嵐は地上風速が何 m/s になると発生するの であろうか.砂漠の砂塵が舞い上がる風速を臨界風 速という.黄砂の発生を予測するモデルが中国,韓 国,日本で相次いで開発されているが,予報の重要 なポイントはこの臨界風速である¹⁴⁾.従来の研究に よると,地表面状態(乾湿,凹凸,植生など)でば らつきがあるものの,タクラマカン砂漠ではおおよ そ 6.5 m/s とした.この仮定を用いて,数値シミュ レーションを行った結果が Fig. 14 である.黄砂の 分布は,衛星画像に見られる黄砂の水平分布をよく 再現している.

ライダーの連続観測から、タクラマカン砂漠北部 のダスト層高度は、海抜 2.5-5 km の間で変動して おり、それは総観場の気流およびタリム盆地の局地 風循環(山谷風)と関連していることが分かっ た¹⁵⁾.数値モデルにより天山山脈の感度実験(on/ off)を行い、タリム盆地における天山山脈の効果 を明らかにした.

2003 年 3 月,日本の各地で黄砂が観測された. 当初,アジアの砂漠から飛来したものと思われた が,Tanaka et al. (2005)¹⁶⁾は全球ダスト輸送シミュ レーションモデルを用いて,中東を起源とするダス トが輸送されてきたことを示した.途中のアクスの ライダー観測からもそのことが裏付けられた (Fig. 15).



アジアダストのライダー観測(甲斐 憲次)



Fig. 15 Time-height sections of lidar total depolarization ratios d (unit: %) and simulated dust concentrations (unit: mgm⁻³) at (a) Aksu (40.41N, 80.81E), (b) Tsukuba (36.01N, 140.11E), and (c) Naha (26.11N, 127.41E). Exceptionally high d signals correspond to clouds¹⁶.



Fig. 16 CALIPSO ground track and distance circle from the Aksu-lidar station. CALIPSO passed within 100 km of the Aksu-lidar station from 20:56:57 to 20:57:19 (UTC)¹⁸⁾.

3.4 スペースライダー CALIOP との同期観測

2008年、科研費・基盤研究(B)「タクラマカン 砂漠上の局地循環と黄砂の発生機構の解明」が採択 され、アクスでのライダー観測を再開した.その前 年、NASA ラングレー研究センターの Winker さん とお話をする機会があった. 画期的ともいえるス ペースライダー CALIOP が NASA の CALIPSO 衛星 に搭載されている¹⁷⁾.タクラマカン砂漠の地上ライ ダーと CALIOP との同期観測の話をすると、彼は しつこく「いつ現地に行くのか」と尋ねた.私が詳 しい日程を答えると、彼はノートを確認して「良 かった」と言った.幸運なことに、CALIOP のメン テナンス期間は、私たちの観測期間と1週間ずれて いた.

2009年,神慶孝君(現・国立環境研究所)と再 びアクスに行き,ライダーシステムを再稼働した. 地上ライダーとスペースライダー CALIOP との同 期観測を行い(Fig. 16),発生源地域におけるダス



Fig. 17 CALIOP and Aksu-lidar backscattering coefficients at 532 nm and 1,064 nm. The dotted line indicates the molecular backscattering coefficient¹⁸⁾.



Fig. 18 Comparison of color ratio versus backscatter coefficient at 532 nm between model and observation results¹⁸⁾.

トの後方散乱係数,消散係数,ライダー比(消散係 数と後方散乱係数の比),偏光解消度,カラー比な どの光学的特性を推定した(Fig. 17-18)¹⁸⁾.

Fig. 18 は,後方散乱係数とカラー比の散布図より,エアロゾルの種類を分類したものである.これらの結果は,現地観測の空白地帯とも言えるタクラマカン砂漠では,初めて得られたものが多く,学問的にも貴重である

ダストの気候への影響を正しく評価するために は、ダストの鉛直分布に関する情報が不可欠であ る. この同期観測より、NASA が提供している CALIOPの標準雲マスク(VFM)に雲/ダストの誤 判別の問題があることを指摘した. 次いで、 CALIOP データの解析において問題となっている 雲/ダストの誤判別を解決するため、標準雲マスク の改良を試みた.

地上ライダーと CALIOP の同期観測から,タク ラマカン砂漠におけるライダー比を推定すると,波 長 532 nm に対して 42.0 sr,波長 1064 nm に対して 45.9 sr である. このライダー比を使って後方散乱係





Fig. 19 An example of dust misclassification as clouds in the VFM cloud mask. Latitude-altitude cross sections of (a) the attenuated backscattering coefficient at 532 nm, (b) the data mask based on the C2' cloud mask, (c) the data mask based on the VFM cloud mask, and (d) the horizontal resolution in the VFM cloud mask¹⁹⁾.

数を再計算すると、CALIOP level 2 データの後方散 乱係数は本研究による結果と比べて 21% 小さいこ とがわかった. この違いは、CALIOP level 2 データ で使用されている VFM 雲マスクがダストを雲と誤 判別し、ライダー比の選択が誤っていたことが原因 であると示唆される (Fig. 19)¹⁹⁾.

4. ゴビ砂漠のシーロメーター観測

4.1 タクラマカン砂漠からゴビ砂漠へ

2014年, JSPS 研究拠点形成事業「アジアダスト と環境レジームシフトに関する研究拠点の構築」が 採択されると^{20,21)},私はライダー観測のフィールド をモンゴルのゴビ砂漠・草原に移した。ゴビ砂漠は アジアダストの主要な発生源の一つである. アジア ダストは偏西風による長距離輸送を通して、気候シ ステムに直接的・間接的に影響を与える.本事業の 観測概要を Fig. 20 に示す. モンゴル・中国・日本 の研究機関がアジアダストの輸送経路上で地上・大 気境界層・自由対流圏に分布するアジアダストの集 中観測 (IOP) を実施した. モンゴルの研究機関は モンゴル情報・気象水文環境研究所、モンゴル国立 大学,中国は蘭州大学,中国科学院新疆生態地理研 究所,日本は名古屋大学,金沢大学,酪農学園大 学,国立環境研究所等である.各研究機関が所有す るライダー,シーロメーター,PM2.5/PM10 測定 器,パーティクルカウンター,エアロゾルサンプ ラー,係留気球を用いて, IOP を実施した.衛星ラ

イダー CALIOP, 地球観測衛星 MODIS, SPOT 等を 用いてアジアダストと植生の分布を,ホスタイ国立 公園ではモンゴル草原における環境レジームシフト を調査した.発生源地域と風下の能登半島と北海道 でバイオエアロゾルを採取し,遺伝子レベルで解析 した²²⁾.

4.2 シーロメーターによる自動観測

ゴビ砂漠におけるアジアダストの鉛直構造を観測 するために、モンゴル情報・気象水文環境研究所と 共同で、2013年5月、モンゴル南部のダランザド ガド気象台(北緯43度34分、東経104度26分、 海抜1470m)にシーロメーター(Vaisala製CL51, 波長910nm)を設置した。ダランザドガドは、ゴ ビ砂漠の中心に位置し、アルタイ山脈の風下効果で よく低気圧・砂塵嵐が発生する場所である。

この気象台は、この地域の中核的な気象台で、 ルーチン的にラジオゾンデ観測が行われている. 圃 場には、国立環境研究所(NIES)の PM10/PM2.5 計測器および NASA・AERONET のサンフォトメー ターも設置されている. さらに、砂漠地域としては 電気が比較的安定供給されることとホテルがあるこ とも重要な選定理由の一つであった.

次に, 観測システムの選定では, タクラマカン砂 漠での経験から, 次の方針を取った.

- 基本的にメンテナンス・フリーで、タフなシス テムであること。
- 自動観測によりインターネットを通じて日本に データを転送できる.

当時,この条件を満たす装置として,ヴァイサラの シーロメーター CL51 を選んだ.

Fig. 21 は、シーロメーターによる観測とイン ターネットを介したデータ転送のシステムを示す. シーロメーター CL51 は、観測窓の汚れを吹き飛ば す窓ブロワーや凍結防止用の内部ヒーター、約2時 間の電源バッテリーを搭載し、気象条件や電気設備



Fig. 20 Observation plan of the JSPS Core-to-Core Program^{20, 21)}.









Fig. 22 Ceilometer observation at Dalanzadgad on 22–23 May 2013. (a) Time-height cross section of attenuated backscatter coefficient. (b) Observational model of the dust storm²³⁾.

状況の悪い観測場所においても、ほぼメンテナンス フリーの長期連続観測を行うことが可能である.河 合慶君(現・名古屋大学ポスドク)が中心となっ て、観測データを1時間毎にインターネット経由で 名古屋大学に転送し、シーロメーターの稼働状況や 観測結果を web サイト上で確認できるようにした.

4.3 大気境界層から自由対流圏へのダスト輸送

Fig. 22 は、2013 年 5 月 22-23 日に発生したダス トイベントの事例解析である.発達中の低気圧とそ れに伴う寒冷前線の通過によって、ダストストーム がゴビ砂漠で発生した.ダランザドガドでは、22 日午前中から 6 m/s 以上の風の強い状態が続き、ダ ストが舞い上がった.16 時半から 23 時半にかけ て、地上付近で後方散乱が強くなり(Fig. 22 (a)で 赤くなっている部分)、21 時頃には高度 1.5 km ま で上昇した.PM10,PM2.5 の値は地上付近の後方 散乱に対応して大きくなり、22 時にはそれぞれ 119 µg/m³、76 µg/m³に達した.22 時頃から寒気内の クリアな空気がくさび状に入り始め、23 日 2 時に は地上から高度 1.6 km まで後方散乱が弱くなった. この寒気の縁に後方散乱の境界が見られるが、これ は寒冷前線面に対応するものである.また、この寒



Fig. 23 Observational models for (a) Dalanzadgad, (b) Sainshand, and (c) Zamyn-Uud at a height of 0–4 km during the dust event²⁵⁾.

冷前線面上に弱い後方散乱が見られ,一部のダスト が寒冷前線前面の暖気の上昇に伴って上昇したこと がわかる. Fig. 22(b)は,寒冷前線付近の強風で巻 き上げられたダストが寒冷前線面上を上昇して,自 由対流圏に輸送されるプロセスを模式的にまとめた ものである.

ダランザドガドはゴビ砂漠中央部に位置するが, 東部のサインシャンドとザミンウドには AD-Net ラ イダーネットワークの 2 波長ミー散乱偏光ライダー が設置されている²⁴⁾. この 3 台のライダーを使う と,ゴビ砂漠を横断中におけるダストの輸送プロセ スをとらえることができる (Fig. 23). 2013 年 5 月 22-23 日にゴビ砂漠で発生したダストストームは寒 冷前線と共にゴビ砂漠を北西から南東へ移動し,ダ ランザドガド,サインシャンド,ザミンウドの順に 通過した. このダストの分布範囲は,ダランザドガ ドでは高度 1.8 km まで,サインシャンドとザミン ウドでは高度 4 km まで広がり,自由対流圏に到達 していた²⁵⁾.

以上のことから、このダスト層は、寒冷前線シス テムとともにゴビ砂漠を横切る間に自由対流圏まで 発達したことが明らかになった.このメカニズムは 自由対流圏における偏西風によるダストの長距離輸 送をもたらす.

いくつかの観測例を検討すると、ダストが自由対 流圏に輸送されないケースもあった. Fig. 24 は、 2015 年 4 月 29-30 日にゴビ砂漠で発生したダスト イベントの事例である. ダストストームが発生した





Fig. 24 Time-height cross section of attenuated backscatter coefficients observed by the ceilometer at Dalanzadgad on 29–30 April 2015. The letters A-D mark the dust storm, clean air, floating dust layer, and clouds, respectively²⁶⁾.



Fig. 25 JMA Geostationary meteorological satellite Himawari-8 and Advanced Himawari Imager (AHI)^{28, 29)}.

ものの(図の A),高度 1.2-1.5 km 付近の安定層に トラップされ、上空へは到達できず、安定層高度で 漂っている(図の C)²⁶⁾.本事例のようにダストの 鉛直分布は、気象状況、とくに気温の鉛直分布と密 接に関係している.

4.4 ひまわり8号 Dust RGB によるダスト解析

静止気象衛星ひまわり8号に搭載された可視赤外 放射計(AHI)は、観測バンド数の増加と時空間分 解の向上により、きめ細かい観測を可能とし、多く の分野にインパクトをあたえている(Fig. 25)²⁷⁾. ダスト研究の分野でも、ひまわり8号のプロダクト である Dust RGBを用いることにより、広大な砂漠 域で発生する中小規模のダストストームを抽出し、 その輸送過程を詳細に研究することができるように なった.

Fig. 26 は, 高時空間分解能を有する気象衛星 「ひまわり8号」のDust RGB データの解析により, ゴビ砂漠からモンゴル草原にかけてのダストの発生 と輸送を調べたものである³⁰⁾. 図中で, ピンク色で 示される領域がダストである. ダランザドガド付近 を通過した寒冷前線がダストを巻き上げ, 寒冷前線 の後面に分布している (図のbとc). 新しい発見 としては, ゴビ砂漠起源のダストとは独立に, 中国 内モンゴルのホルチン砂地を起源とするダストス



Fig. 26 Dust RGB imagery with sea level pressure (contours; every 4 hPa) and surface wind during 2–7 May 2017. In the Dust RGB imagery, pink indicates dust, whereas yellow, brown, green, and black show clouds. The white lines and double red lines represent cold fronts and troughs, respectively. The red, yellow, and blue circles show dust storms, blowing dust, and floating dust, respectively. The black dotted circle in panel (d) and (e) shows the location of the Horqin Sandy Land³⁰⁾.

トームがあることが分かった(図のd). このダス トの塊は、寒冷前線と共に東に移動し、2017年5 月5-6日、日本全国に黄砂現象をもたらした. この 衛星観測は、地上ライダーや CALIOP との良い対 応が見られた.

5. 終わりに

私は1986年,気象研究所のルビーライダーを用 いたアジアダストの研究を皮切りに,タクラマカン 砂漠やゴビ砂漠の研究プロジェクトに参加する機会 を得た.本稿では、ナラティブとして,現地での体 験や観測成果を中心に述べた.タリム盆地の出口に あたる敦煌での研究成果は、岩坂泰信名古屋大学名 誉教授らによる著書にまとめられている³¹⁾.最後 に、これまでの観測の反省と今後の展望を述べた い.

2000年,科学技術振興調整費「風送ダスト」で は、タクラマカン砂漠にライダーステーションを建 設し,発源地におけるアジアダストのデータをとる というのがミッションンとなった.共同研究者の永 井智広気象研究所主任研究官(当時)と阿保真東京

都立大学助教授(当時)の指導のもと,八十嶋恒和 君(現・トヨタ自動車)らの優秀な院生に恵まれ装 置は完成した.2001年8月,気象研究所でライ ダーの試験観測を行った後,装置をバラバラに分解 して,中国に輸出した.その年の11月,現地アク スでライダーの再組み立てを行い,2002年4月の 集中観測に間に合わせた.2009年には,神慶孝君 らが中心となって地上ライダーと衛星ライダー CALIOPとの同時観測を実施した.

反省点は、ライダーを設計する際、私たちはダス ト層の光学的厚さを甘く見ていたことである. アク スのライダーは、光源として高出力のレーザー(パ ルスエネルギー 300 mJ), 直径 35 cm の受信望遠鏡 を使用した.これがあだとなった.現地でダストス トームが発生すると、昼間でも大量のダストによっ て太陽光が遮られ、夜のようになることがある. レーザー光はほぼ消散されて、このダスト層を通過 できない. また、レーザーパルスは強い後方散乱光 となって戻り、大望遠鏡で受光される. 当然、光電 子増倍管 (PMT) は飽和する. 私たちは, 望遠鏡 や PMT に ND フィル-ターを入れて, 1000 分の1 以下に強度を落として観測した. それでも, 強いダ ストストームの最中は、PMT が飽和して、観測で きなかった.常時観測をするためには、もう少し小 型のレーザー・望遠鏡がよかったかもしれない. ま た、現地の電力とインターネットの事情により、自 動観測はあきらめざるを得なかった.

しかしながら, アクスのライダーにより, タクラ マカン砂漠の貴重なデータが得られた. 欠測の多 い, 不完全なデータではあったが, 発生源での観測 データとして, 多くの研究者に使って頂いたのは幸 いである.

タクラマカン砂漠の反省から、2014年からス タートした JSPS 研究拠点形成事業では、基本的に メンテナンスフリーのシーロメーターを使用した. インターネットで観測データを名古屋大学の研究室 に転送できるので、大変重宝した.私たちのグルー プでは、河合慶君が中心となってシーロメーターと 衛星データ・再解析気象データ等を組み合わせて、 ゴビ砂漠のダストストームの構造と自由対流圏への ダスト輸送を解明した.ただし、1 波長しか使えな いので、エアロゾルの性状を議論することはできな い.ライダーの専門家にとっては物足りないかもし れない.

筆者はライダーのユーザーとして,大気境界層・ 下部対流圏観測用の 500 万円ライダーの実現を提唱 したい. その根拠は次の 3 点である.

1) 人類の生存圏とも言える大気境界層・下部対流





Fig. 27 Attenuated backscattering coefficient at 1064 nm observed for (a) CHM15k and (b) NIES Lidar in August 20 to 29, 2016. Time and height resolutions are 5 min and 30 m, respectively³²⁾.

圏には、大気混合層、大気汚染層、気温逆転層、 海陸風、海陸風、山谷風、積乱雲などの諸現象 があり、大気環境を支配する、ライダーを用い て、これらの現象の時空間構造を正確に調べる ことは極めて重要と考えられる.

- 大学でライダーが手軽に使用できれば、若手研 究者のすそ野が広がる.数千万円もする高額な ライダーを大学の研究室レベルで維持するのは 困難である.
- 3)大学の教員がある程度の研究実績をあげれば、 科研費の基盤研究(B)に手が届く.この申請 額の上限は2000万円である.500万円のライ ダーであれば、設備備品費として無理なく、申 請書に計上することができる.基盤研究(A)の申請額の上限は5000万円であるが、採択率が 低いのであまり期待できない.

候補となるライダーは、独・ルフト社のシーロ メーター CHM15k に偏光機能が追加されたもので ある. Fig. 27 は CHM15k と国立環境研究所のライ ダーの比較観測を示す.かなり良い対応が見られ る³²⁾.印象としては、コンパクトなミー散乱・偏光 ライダーとして大気境界層や下部対流圏のエアロゾ ル観測には十分役立つと思われる.

最後に現金な話になったが,ハードウエアの専門 家にぜひご検討いただきたい.

謝 辞

ここで紹介した研究は、2000-2004 年度科学技術 振興調整費「風送ダストの大気中への供給量と気候 への影響に関する研究 (ADEC)」(代表:三上正 男)、2008-2010 年度科学研究費・基盤研究(B) 「タクラマカン砂漠上の局地循環と黄砂の発生機構 の解明」(No.20403008 代表:甲斐憲次)、2014-2016 年度 JSPS 研究拠点形成事業「アジアダストと 環境レジームシフトに関する研究拠点の構築」

(コーディネーター:甲斐憲次), 2016-2019 年度科 学研究費·基盤研究(A) 海外学術調查「発生源 地域におけるアジアダストと環境レジームシフトの 国際共同研究」(No.16H02703 代表:甲斐憲次) および 2017-2019 年度科学研究費・基盤研究 (A) 海外学術調査「東アジア沙漠地帯における黄砂バイ オエアロゾルの発生過程とその越境輸送ルートの解 明」(No.17H01616 代表:牧輝弥)の支援を受け た. 現地調査では、中国科学院振興生態地理研究所 の H. Zhou 教授, S. Hu 氏, 蘭州大学の J. Huang 教 授, モンゴル情報・気象水文環境研究所のG. Sarantuya 所長, E. Munkhjargal 氏, E. Davaanyam 氏, モンゴル気象環境監視庁の D. Batdorj 部長,柴田隆 名古屋大学名誉教授にお世話になった. 岩坂泰信名 古屋大学名誉教授, 星野仏方酪農学園大学教授, 牧 輝弥金沢大学准教授、杉本伸夫国立環境研究所フェ ローからご助言を頂いた.以上の方々に謝意を表 す.

参考文献

- 甲斐憲次:気象ブックス 018 黄砂の科学(成山堂書店, 2007) p. 146.
- 2) K. Kai, Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi, and Y. Nikaidou: "Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986", J. Meteor. Soc. Japan, 66 (1988) 457.
- O. Uchino, I. Tabata, K. Kai and I. Akita: "Five-year lidar observational results and effects of El Chichon particle on Umkehr ozone data", J. Meteor. Soc. Japan, 66 (1988), 635.3)
- 4) R. A. Duce, C. K. Unni, B. J. Ray, J. M. Prospero, and J. T. Merrill: "Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability", Science, **209** (1980) 1522.
- G. E. Shaw: "Transport of Asian Desert Aerosol to the Hawaiian Islands", J. Appl. Meteor., 19 (1980) 1254.
- 6) Y. Iwasaka, H. Minoura, and K. Nagaya: "The transport and special scale of Asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979", Tellus, **35B** (1983) 189.
- T. Takasugi and H. Nakamura: "A tracer diffusion model couples with the JMA global spectral model", JMA / NWPD Technical Report, 24 (1988).
- 8) 名古屋大学水圏科学研究所編:大気水圏の科学 黄砂』 (古今書院, 1991) p. 328.
- 9) M. Mikami, G.-Y. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, T. Aoki, Y. Tanaka, Y. Kurosaki, K. Masuda, A. Uchiyama, A. Matsuki, T. Sakai, T. Takemi, M. Nakawo, N. Seino, M. Ishizuka, S. Satake, K. Fujita, Y. Hara, K. Kai, S. Kanayama, M. Hayashi, M. Du, Y. Kanai, Y. Yamada, X.-Y. Zhang, Z. Shen, H. Zhou, O. Abe, T. Nagai, Y. Tsutsumi, M. Chiba, and J. Suzuki: "Aeolian dust experiment on climate impact: An Overview of Japan-China joint project ADEC", Global Planetary Change, **52** (2006) 142.
- 10) K. Kai, S. Hu, H. Zhou, T. Yasojima, B. Xu, T. Nagai, and M. Abo: "Development of a new lidar for measuring the aeolian

dust originated from the Taklamakan Desert: test observation at Tsukuba, Japan", J. Arid Land Studies, **11** (2002) 321.

- K. Kai, Y. Nagata, N. Tsunematsu, T. Matsumura, H.-S. Kim, T. Matsumoto, Hu Shunjun, Zhou Hongfei, M. Abo, T. Nagai: "The structure of the dust layer over the Taklimakan Desert during the dust storm in April 2002 as observed using a depolarization lidar", J. Meteor. Soc. Japan, 86 (2008) 1.
- 12) H.-S. Kim, Y. Nagata, and K. Kai: "Variation of dust layer height in the northern Taklimakan Desert in April 2002", Atmos. Env., 43 (2009) 557.
- 13) N. Tsunematsu, T. Sato, F. Kimura, K. Kai, Y. Kurosaki, T. Nagai, and Hongfei Zhou, and M. Mikami: "Extensive dust outbreaks following the morning inversion breakup in the Taklimakan Desert", J. Geophys. Res., **110** (2005), doi:10.1029/2005JD005994.
- 14) D. A. Gillette, J. Adams, D. R. Muhs and R. Kihl: "Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air", J. Geophys. Res., 87 (1982) 9003.
- 15) N. Tsunematsu, K. Kai, and T. Matsumoto: "The influence of synoptic-scale air flow and local circulation on the dust layer height in the north of the Taklimakan Desert", Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 5 (2005) 175.
- 16) T. Y. Tanaka, Y. Kurosaki, M. Chiba, T. Matsumura, T. Nagai, A. Yamazaki, A. Uchiyama, N. Tsunematsu, and K. Kai: "Possible transcontinental dust transport from North Africa and the Middle East Asia", Atmospheric Environment, **39** (2005) 3901.
- 17) D. M. Winker, M. A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu, and K. A. Powell: "Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms", J. Atmos. Oceanic Technol., 26 (2009), 2310.
- 18) Y. Jin, K. Kai, T. Shibata, K. Zhang, and H. Zhou: "Validation of the dust layer structure over the Taklimakan Desert, China by the CALIOP space-borne lidar using ground-based lidar", SOLA, 6 (2010) 121.
- Y. Jin, K. Kai, H. Okamoto, and Y. Hagiwara: "Improvement of CALIPSO cloud masking algorithms for better estimation of dust extinction profiles", J. Meteor. Soc. Japan, **92** (2014) 433.
- 20) K. Kai ed.: "Proceedings of First Seminar of the JSPS Core-to-Core Program", Nagoya University, 4–9 August 2014, 43pp.
- 21)甲斐憲次:アジアダストと環境レジームシフトに関する 国際共同研究,科学(岩波書店),89 (2019) 148.
- 22) T. Maki, K. C. Lee, K. Kawai, K. Onishi, C. S. Hon, Y. Kurosaki, M. Shinoda, K. Kai, Y. Iwasaka, S. Archer, D. Lacap-Bugler, H. Hasegawa, and S. B. Pointing, "Aeolian dispersal of bacteria associated with desert dust and anthropogenic particles over continental and oceanic surfaces", J. Geophys. Res. Atmosphere, https://doi.org/10.1029/2018JD029597, (2019).
- 23) K. Kawai, K. Kai, Y. Jin, N. Sugimoto, and D. Batdorj: "Dust Event in the Gobi Desert on 22–23 May 2015: Transport of Dust from the Atmospheric Boundary Layer to the Free Troposphere by a Cold Front", SOLA, **11** (2015) 156.
- 24) N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, C. Xie, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang, and S.-C. Yoon: "Lidar Network Observations of Troposheric Aerosols", SPIE, 7153 (2008) 71530A-1.



- 25) K. Kawai, K. Kai, Y. Jin, N. Sugimoto, and D. Batdorj: "Lidar network observation of dust layer development over the Gobi Desert in association with a cold frontal system on 22–23 May 2013", J. Meteor. Soc. Japan, **96** (2018) 255.
- 26) K. Kawai, Y. Nishio, K. Kai, J. Noda, E. Munkhjargal, M. Shinoda, N. Sugimoto, A. Shimizu, and E. Davaanyam: "Ceilometer observation of a dust event in the Gobi Desert on 29–30 April 2015: arrival of a developed dust storm and trapping of dust within an inversion layer", SOLA, 15 (2019) 52.
- 27) 関山 剛,吉田真由美,菊池麻紀,弓本桂也:第7章 エーロゾルプロダクト,気象研究ノート「静止気象衛星 号ひまわり8号・9号とその利用」,238 (2018) 85.
- 28) 気象庁:静止気象衛星--ひまわり8号・9号-, リーフ レット, 2017.
- 29) 国立情報学研究所:デジタル台風, http://www.digitaltyphoon.org/
- 30) Y. Minamoto, K. Nakamura, M. Wang, K. Kawai, K. Ohara, J. Noda, E. Davaanyam, N. Sugimoto, and K. Kai: "Large-scale dust event in East Asia in May 2017: Dust emission and transport from multiple source regions", SOLA, 14 (2018) 33.
- 31) 岩坂泰信,西川雅高,山田丸,洪天祥編:黄砂(古今 書院,2009) p. 342.
- 32) Y. Jin, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Nishizawa, K. Kai, K.

Kawai, A. Yamazaki, M. Sakurai, and H. Wille: "Evaluation of ceilometer attenuated backscattering coefficients for aerosol profile measurement", J. Applied Remote Sensing, **12** (2018) 042604–1.



憲次 1952年,島根県生まれ、1981年,筑 波大学大学院博士課程地球科学研究 科修了,理学博士.気象庁観測部運 輪技官,気象庁気象研究所気象衛 星・観測システム研究部主任研究官, 筑波大学地球科学系講師,名古屋大 学大学院環境学研究科教授を経て, 茨城大学教育学部特任教授.人間活

動と大気環境の相互作用という視点から, 黄砂と都市 の大気環境を研究している.専門は気象学・気候学. 【著書】

「スペクトル解析ハンドブック」(2004年分担執筆,朝 倉書店),「黄砂の科学」(2007年単著,成山堂書店), 「二つの温暖化一地球温暖化とヒートアイランド」 (2012年編著,成山堂書店)など.