

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20403008

研究課題名(和文)

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

研究課題名(英文) Local Circulations and Dust Storm in the Taklimakan Desert

研究代表者：

甲斐 憲次(Kenji KAI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：50214242

研究成果の概要(和文)：タクラマカン砂漠は、主要な黄砂の発生源であり、天山山脈・パミール高原・崑崙山脈など5000m級の急峻な山脈に囲まれたタリム盆地の大部分を占める。その3次元地形に起因する局地循環は、黄砂の発生に大きな役割を果たしている。本研究では、現地ライダー観測・衛星観測・数値シミュレーションを用いて、タクラマカン砂漠の黄砂層の微細構造、境界層・局地循環による黄砂の発生、および黄砂の長距離輸送を解明した。

研究成果の概要(英文)：The Taklimakan Desert is one of the important sources of Asian dust. It occupies most of the Tarim Basin, which is surrounded by Tianshan Mountains in north, Pamir Plateau in west, and Kunlun Mountains in south, exceeding an altitude of 5000 m. The local circulations due to the large three-dimensional geomorphology play an important role in causing the dust storms. Combining the ground / space lidars with numerical models (LES, WRF, GCM *etc.*) made clear the optical properties of the Taklimakan dust, fine structure of the dust layer, dust devils caused by boundary-layer and local circulation processes, and long range transport of the dust.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：気象学・気候学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：タクラマカン砂漠、黄砂、局地循環、ライダー

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、大規模な黄砂が頻発する傾向にあり、東アジアの深刻な環境問題のひとつとして認識されている。中国北西部に位置するタクラマカン砂漠とゴビ砂漠は、有力な黄砂

発生源である。近年、黄砂による被害を軽減するため、中国、韓国、日本の気象庁等で、黄砂予報が現業で開始されている。平成12-16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評価と気候への影響に

関する研究（略称：風送ダスト）」が実施され(代表者：三上正男)、黄砂の発生・輸送および気候学的影響に関する総合的な研究が行われた。その研究成果の一部は平成17年から開始された気象庁の黄砂予報に生かされている。

(2) 研究代表者のグループは、「風送ダスト」プロジェクトの一環として、砂漠のような過酷な環境でも動作するライダーを開発し、中国科学院新疆生態地理研究所のアクス水文気象観測所（中国新疆ウイグル自治区）に設置した。このライダーは、世界で初めて黄砂の発生源地域に設置されたもので、黄砂の詳細な高度分布が得られた。ライダーの観測結果と数値モデルを組み合わせることにより、局地循環が黄砂の発生と輸送に果たす役割を解明できる可能性が示された。

2. 研究の目的

タクラマカン砂漠は、天山山脈・パミール高原・崑崙山脈など 5000m 級の急峻な山脈に囲まれたタリム盆地の大部分を占め、その面積はほぼ日本全土に相当する。その3次元地形に起因する局地循環は黄砂の発生に大きな役割を果たしている。本申請では、①タクラマカン砂漠における黄砂の光学特性と黄砂層の微細構造、②タクラマカン砂漠を取り巻く3次元地形に起因する局地循環と黄砂の発生、③中央アジアという地理的位置に起因する黄砂の長距離輸送を研究する。

3. 研究の方法

(1) 二波長・偏光ライダーの開発と応用

アクスに設置された既存のライダー（波長 532nm の後方散乱と偏光）に 1064nm の受信光学系（アバランシフोटダイオード APD）を追加し、二波長・偏光ライダーに改造する。新システムを用いて、NASA の衛星 CALIPSO と同期した検証観測を実施する。

(2) 高解像モデルによる数値実験

高解像モデルを用いて、局地循環や境界層現象（ダストデビル）をシミュレートし、その妥当性を観測データで検証する。様々な気象状況でのダストの舞い上がりの過程を解明する。

(3) 全球モデルによる数値実験

全球モデルを用いて、タクラマカン砂漠を起源とする黄砂の長距離輸送をシミュレートする。また、温暖化ダウンスケーリングも行う。

(4) 国際ワークショップの開催

衛星/地上ライダーの研究者と数値モデルの研究者を招へいし、タクラマカン砂漠起

源の黄砂の役割を議論する。

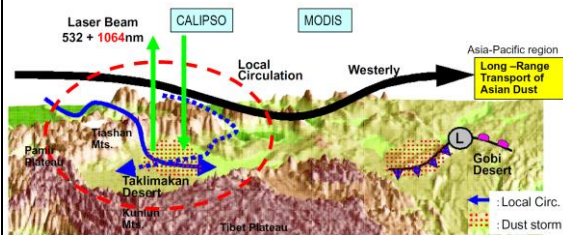


図1 研究対象地域と研究方法

4. 研究成果

(1) 二波長・偏光ライダーの開発と応用【甲斐】

2009年3月、アクスに設置された既存のライダー（波長 532nm の後方散乱と偏光）に 1064nm の受信光学系（アバランシフोटダイオード APD）を追加し、二波長・偏光ライダーに改造した。新システムを用いて、3月23～25日、スペースライダーCALIPSO と同期した検証観測を実施した(図2)。この観測より、タクラマカン黄砂の光学特性、黄砂層の微細構造と局地循環を解明した。

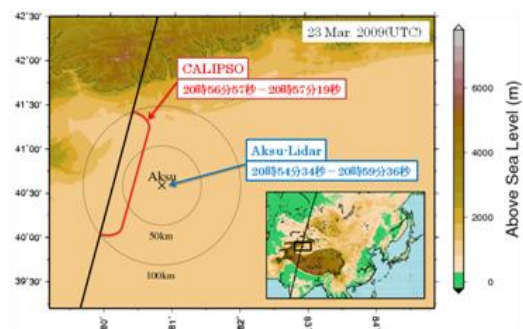


図2 地上設置ライダーと CALIPSO の軌道 (2009年3月)

図2に示すように地上設置ライダーから100km以内にあるCALIPSOデータを使用し、両者を比較検証した。この際、二つの仮定を用いた。一つ目は、CALIPSOと地上設置ライダーは同じ大気を見ていること。二つ目は、ライダー比は高さによって変わらないことである。

図3は、Fernald(1984)の解法により、CALIPSO(前方積分法)と地上設置ライダー(後方積分法)について後方散乱係数を算出し、比較したものである。地上設置ライダーとCALIPSOの後方散乱係数のプロファイルはよく一致した。このとき得られたライダー比は、532nmに対して 41.97 ± 3.0 、1064nmに対しては 45.86 ± 9.1 であった。この値は、Liu et al. (2008)がサハラ砂漠の黄砂に対

して求めた 41 ± 3 (532nm), 52 ± 5 (1064nm) の値に近い。

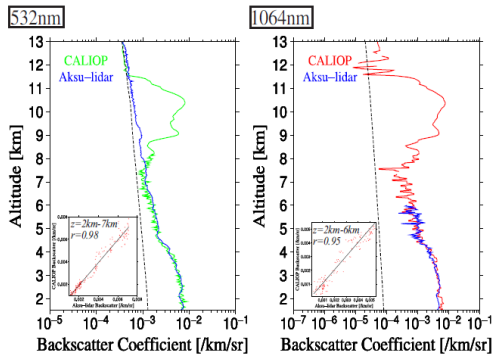


図3 波長 1064nm と 532nm における地上設置ライダーと CALIPSO の後方散乱係数

図4にカラー比(1064nm/532nm)と後方散乱係数(532nm)との関係を示す。カラー比は、粒子の大きさに関する情報を与える。エアロゾルの種類によって、カラー比の値は異なる。図より、境界層内の黄砂、自由対流圏のエアロゾル、雲(巻雲)の3つに分類できそうである。この結果より、カラー比と後方散乱係数の関係を利用して、粒子の判別ができる可能性が示された。

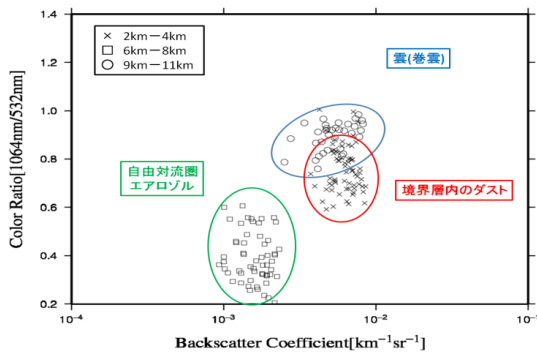


図4 後方散乱係数とカラー比によるダストの分類

黄砂などのエアロゾルは、散乱や吸収によって地球の放射収支に影響を及ぼすとともに、凝結核や氷晶核としての役割も果たす。タクラマカン砂漠は、周りを5000m級の山脈や高原に囲まれた大きな盆地であり、そこで起きる局地循環によって黄砂が5kmよりも高く舞い上げられることがわかっている。ゆえに、他の砂漠で発生したダストよりも凝結核や氷晶核として働くことが多い可能性がある。

図5に全偏光解消度の高度-時間変化を示す。上層(5km~)に雲が、下層(~5km)には黄砂が存在している。また、夜間(1200UTC

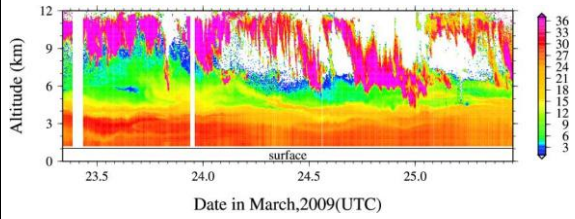


図5 全偏光解消度の高度-時間変化

~2400UTC、現地時間は+8時間)において、黄砂が高度6kmよりも高く舞い上げられている。一方で、日中(0000UTC~1200UTC)においては、夜間に舞い上げられた黄砂が下がってくる傾向が見られた。これらの日変化は、盆地における局地循環が要因だと考えられる(Kai et al., 2008)。また、10km付近にある雲の高度が下がってくることもあり、5km~6km付近において黄砂と雲が混ざり合っている可能性がある。

(2) 高解像モデルによる数値実験【竹見】

局地循環の基礎となる大気境界層における微細規模擾乱の高解像度シミュレーションを行った。水平解像度を2mとして乱流の挙動を詳細に表現できるラージ・エディ・シミュレーション(LES)の手法を用いて、領域気象モデルWRFによる数値シミュレーションをおこなった。砂漠のような乾燥状態では、地面からの顕熱輸送により対流混合層が発達し、その内部でダストデビルと呼ばれる微細規模の渦状擾乱が多数形成される。ここでは、ダストデビルの強化と維持の物理機構を調べた。図6は、複数の渦が融合することによって渦が強められる様子を示している。ダストデビルの強化には、複数個の渦が融合する過程が重要であることが分かった。

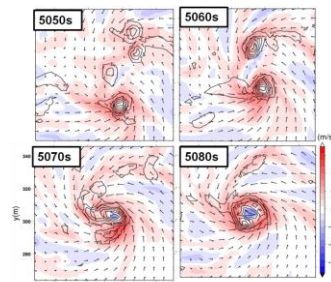


図6 高度50mにおける水平風速(ベクトル)と鉛直風速(カラー)の水平断面図。

次に、タリム盆地での局地循環の高解像度シミュレーションをWRFモデルにより行った。アクスでの観測期間に対応した2009年3月23日0000UTC~3月26日1200UTC

の期間の計算をした。ネスト領域を設定し、内側領域としてタリム盆地の大半を含む領域を格子間隔 2 km で解像した。図 7 は、観測地点アクスに対応した計算格子点における仮温位の鉛直分布の時間変化を示す。仮温位をみることにより、大気境界層の発達高度やその日変化を調べることができる。この図より、日中には地上からの高度 2-3 km に達する深い対流混合層が発達することが分かる。また、対流混合層は日没後には急速に消滅し、境界層は大きく日変化していることが分かる。

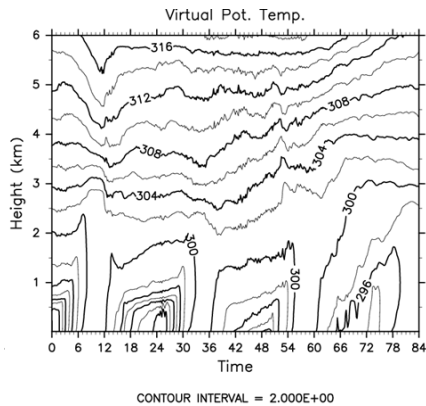


図 7 アクス地点における仮温位の時間・高度断面図。横軸は時刻で、2009年3月23日0000 UTCからの時刻(時間)を示している。

(3) 全球モデルによる数値実験
【田中・常松】

シミュレーション結果からは、タクラマカン砂漠を起源とする黄砂は春季から秋季にかけて、1間あたり12回程度の頻度で間歇的に輸送されることが示唆された。

図 8 は、(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 地表面近傍におけるタクラマカン砂漠を起源とするダスト濃度(赤)とゴビ砂漠を起源とするダスト濃度(青)の時系列を示す。タクラマカン砂漠を起源とするダストは、ゴビ砂漠を起源とするダストよりも高い高度まで輸送され、そのため寿命が長くなる傾向にあることが示された。

タクラマカン砂漠は高い高度に位置し、東を除いた周囲を急峻な山岳に取り囲まれている。このため、ダストストームが発生し、山岳を上昇するような強い風が吹いた場合には、暖められた空気塊が山岳を越えて高い高度まで到達すると考えられる。図 9 は、2009年5月28日のダスト輸送現象のシミュレーション結果を示す。タクラマカン砂漠のダスト(薄茶色)は高い高度に到達すると、氷晶核として作用し、巻雲等の光学的特性に影響を与え、ひいては地球の放射収支にも影響していると考えられる。

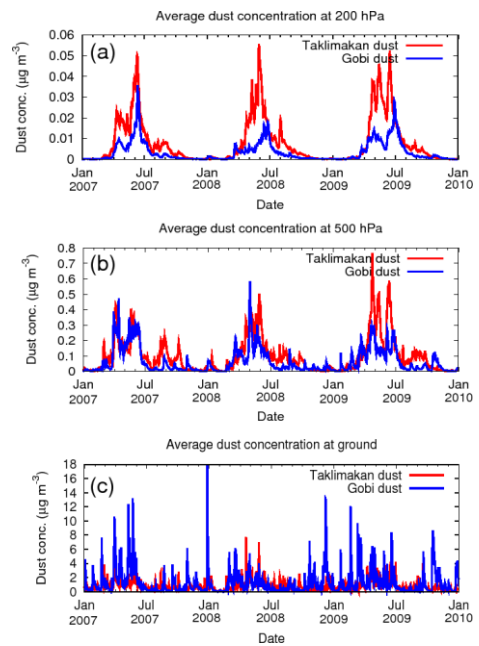


図 8 タクラマカン砂漠を起源とするダスト濃度(赤)とゴビ砂漠を起源とするダスト濃度(青)の時系列変化。(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 地表面近傍。

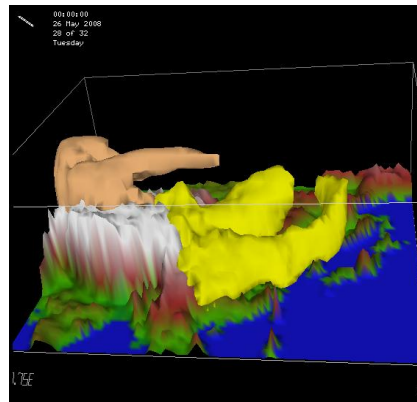


図 9 2009年5月28日のダスト輸送現象のシミュレーション結果。タクラマカン砂漠を起源とするダストを薄茶色、ゴビ砂漠起源のダストを黄色で示している。地形は低地から高地にかけて緑・茶色・白で示されている。

全球気候モデルによる将来気候予測データを、黄砂現象をシミュレートすることができる領域気象モデルにダウンスケーリング³⁾することにより、黄砂発生量の将来変化を予測した。また、将来予測に先だて、過去に発生した顕著な黄砂イベントを再現シミュレーションし、黄砂シミュレーションに対する WRF-Chem モデルの精度評価を行った。

1) MIROC (Model for Interdisciplinary

Research on Climate) の A1B シナリオ実験による将来予測データ (2091~2100 年) と 20 世紀再現実験による現在気候データ (1991~2000 年) を用いた。

2) WRF (Weather Research and Forecasting modeling system) に搭載された大気化学輸送モデル (WRF-Chem) を用いた。

3) 全球気候モデルの出力データを境界条件にして領域モデルによるシミュレーションを行うことで、気候の再現および将来予測の空間詳細化を行う、「力学的ダウンスケーリング」の手法を用いた。

図 10 に 2007 年 3 月 29 日~4 月 2 日に発生した黄砂現象の再現シミュレーション結果を示す。「砂の壁」が日本列島を襲う様子がシミュレートされている。

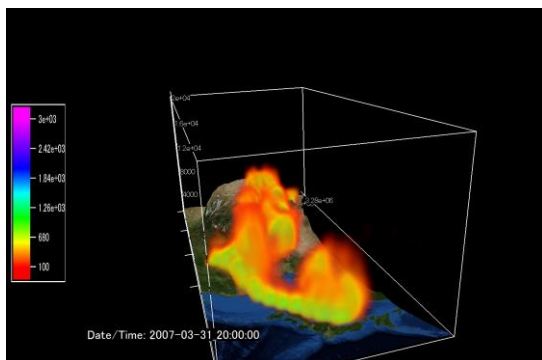


図 10 2007 年 3 月 29 日~4 月 2 日に発生した黄砂現象の再現シミュレーション結果 (3D 画像; 2007 年 3 月 31 日 2000 世界標準時のスナップショット)。カラーは土壌性ダスト (黄砂) の質量濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$) を表す。

図 11 に、(a) 黄砂発生地域における土壌性ダスト発生フラックスの将来変化量 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、(b) 地上風速の将来変化量 (m s^{-1})、(c) 海面更正気圧の将来変化量 (hPa)、(d) 地上気温の将来変化量 (K) を示す。バイカル湖やモンゴル西部、ジュンガル盆地では、将来、春季における地上気温の上昇が比較的大きいことが予測されており、特にこのことが、それらの地域の南側に存在する黄砂主要発生源 (タクラマカン砂漠やゴビ砂漠) との間の南北地上気圧差を小さくする。その結果、黄砂主要発生源では、寒気の吹き出しに伴う強い北風の風速が低下し、このことが、将来気候下において、黄砂の発生量を減少させるものと推察される。

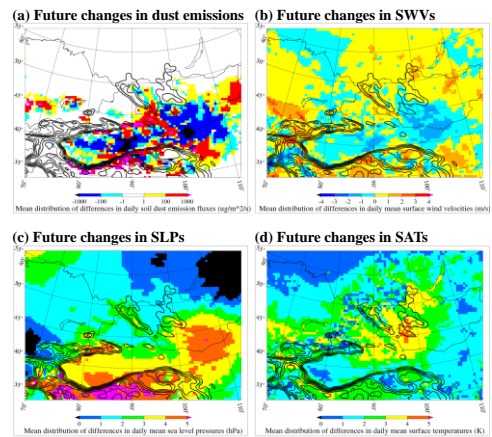


図 11 (a) 黄砂発生地域における土壌性ダスト発生フラックスの将来変化量 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、(b) 地上風速の将来変化量 (m s^{-1})、(c) 海面更正気圧の将来変化量 (hPa)、(d) 地上気温の将来変化量 (K)

(4) 国際ワークショップの開催【甲斐ほか】
黄砂に関する国際ワークショップ (International Nagoya-Workshop on Asian Dust) を 2011 年 3 月 3~4 日、名古屋大学環境総合館で開催した。海外からは、ダスト飛散モデルの第一人者・Shao 教授 (ケルン大学)、スペースライダー-CALIPSO を用いたダスト研究の Liu 博士 (NASA Langley 研究センター/NIS)、タクラマカン砂漠の水文気象の Zhou 教授 (中国科学院新疆生態地理研究所) を招へいた。研究発表は、次の 3 つのセッションで行われた。①地上/スペースライダーを用いた黄砂時空間分布の観測、②数値モデルを用いた黄砂とダストイベントの研究、③アジアにおける乾燥地域の環境。

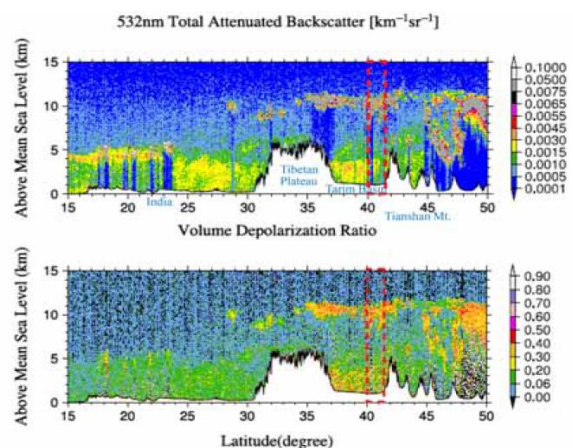


図 12 スペースライダー-CALIPSO で観測されたインド亜大陸-チベット高原-タリム盆地-天山山脈-ロシア平原におけるダストの高度分布と衛星・地上ライダーの同期観測。

コンパクトではあるが、専門性の高い議論が2日間にわたって行われた。先端の観測技術(ライダー)と高分解能数値モデルの融合により、黄砂の詳細な時空間分布が解明されることが示唆された(図12)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7件)

①大野 洋, 竹見哲也, 数値計算パラメータによって変化する塵旋風の構造の感度実験, 京都大学防災研究所年報, 査読無, 52B, 2009, 465-470

②Tsunematsu, N., H. Iwai, S. Ishii, M. Yasui, Y. Murayama, and K. Mizutani, Influence of surface-based stable layer development on Asian dust behavior over Tokyo, Boundary-Layer Meteorology, 査読有, 131, 2009, 263-275

③Jin, Y., 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: Part II, SPIE, 査読有, 7856, 2010, 785609-7856010

④Jin, Y., 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, 査読有, 6, 2010, 121-124

⑤Zhang, K., K. Kai, J. Qu., Y. Ling, and Q. Niu., Formative environment and dynamic process of a simple linear sand Dune, Arid Land and Geography, 査読有, 33, 2010, 340-345

⑥Ohno, H., and T. Takemi, Mechanisms for intensification and maintenance of numerically simulated dust devils, Atmospheric Science Letter, 査読有, 11, 2010, 27-32

⑦Ohno, H., and T. Takemi, Numerical study for the effects of mean wind on the intensity and evolution of dust devils, SOLA, 査読有, 6A, 2010, 5-8

[学会発表] (計 43件)

①Jin, Y., J., K. Kai, T. Shibata, K. Zhang, and H. Zhou, Validation of the dust layer structure over the Taklimakan desert, China from the space-borne lidar CALIPSO using a ground-based lidar, 25th International Laser Radar conference, 2010年7月5日, Saint Petersburg Hotel (ロシア)

②Kai, K., Y. Iwanaga, Y. Jin, and H. Zou, Lidar observation and numerical simulation of a dust storm in the Taklimakan Desert, China, in summer 2004, The 91st American Meteorological Society Annual Meeting, 2011年1月25日, Washington State Convention Center, Seattle(アメリカ)

③Takemi, T., High-Resolution Modeling Study of Dust Devils and Boundary-Layer Processes, International Nagoya-Workshop on Asian Dust, 2011年3月3日, 名古屋大学(名古屋市千種区)

④Tanaka, T., Numerical simulation of the seasonal variation of elevated dust aerosol from Taklimakan desert, 同上.

⑤Tsunematsu, N., M. Hayasaki, T. Sato, H. Kuze, F. Cui, A. Kondoh, and K. Sakamoto, Model Experiments on Potential Impact of Future Atmospheric Warming on Asian Dust Emission, 同上.

[図書] (計 3件)

①甲斐憲次, 清水弘文堂書房, 「アジアの砂塵-黄砂-」分担執筆、アサヒ・エコ・ブックス『地球変動研究の最前線を訪ねる』, 2010, 368-383

②Kai, K., Z. Liu, Y. Jin, T. Shibata, N. Sugimoto, Y. Shao, H. Iwanaga, T. Takemi, T. Y. Tanaka, N. Tsunematsu, H. Zhou, Proceedings of International Nagoya - Workshop on Asian, 3-4 March 2011, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, 総頁 48

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

[その他] ホームページ等

http://www7a.biglobe.ne.jp/~kai_lab_nagoya-u/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 憲次 (Kai Kenji)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 50214242

(2) 研究分担者

山口 靖 (Yamaguchi Yasushi)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 80283472

竹見 哲也 (Takemi Tetsuya)

京都大学・防災研究所・助教授
研究者番号: 10314361

田中 泰宙 (Tanaka Taichu)

気象庁・気象研究所・主任研究官
研究者番号: 50435591

常松 展充 (Tsunematsu Nobumitsu)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・客員准教授
研究者番号: 80524462

(3) 連携研究者

柴田 隆 (Shibata Takashi)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 70167443