

## C-5 中国北東地域で発生する黄砂の三次元的輸送機構と環境負荷に関する研究

### (4) ライダーおよび光学的計測手法による黄砂の輸送の研究

独立行政法人国立環境研究所

EF フェロー	陳 岩 (Yan Chen) (H13, H14)
EF フェロー	趙 淑莉 (ZHAO Shuli) (H15)
大気圏環境研究領域 遠隔計測研究室受入研究者	杉本伸夫

平成 13 年度～15 年度総予算 6, 0 4 9 千円

[要旨] 北京に飛来する黄砂の輸送機構を解明するために、北京の日中友好環境保全センターに設置されたライダー等による継続的な観測データの解析を行った。ライダー測定データからエアロゾルに占める黄砂エアロゾルの割合と黄砂エアロゾルの重量濃度を求める手法を用いて、北京における黄砂の高度分布の時系列変化を求めた。得られた高度分布の変化のパターンと地上のアンダーセンサンプラーで測定した粒径分布から、北京で観測される黄砂を4つのパターン、「高空輸送沈降型」、「高空輸送通過型」、「地元舞上り型」、「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」に分類した。これらの分類法を2001年～2003年に北京で観測された黄砂に適用するとともに、化学輸送モデル CFORS によるシミュレーション結果と比較し分類手法の妥当性を評価した。また、この3年の北京の黄砂現象の違いについて考察した。ライダーデータから、地上付近の黄砂および大気汚染エアロゾル濃度（消散係数）の時系列変化を独立に求め、相関を調べたところ、多くのケースでは黄砂時に大気汚染エアロゾルが減少するが、黄砂と同時に比較的高濃度の大気汚染が観測されるケースもあった。これは気象状況に大きく依存することがわかった。

[キーワード] 黄砂、黄砂エアロゾル、偏光ライダー、北京、化学輸送モデル

#### 1. はじめに

近年、北京を含む中国東部においては、中国北西部やモンゴル中南部などの乾燥地域を発生源とすると見られる黄砂の発生頻度が増加する傾向にあるといわれている。そこで、北京に飛来する黄砂を定量化し、発生および輸送の機構を解明するために、ライダーによる連続観測を2001年3月より開始した。ライダーは国立環境研究所が開発した偏光ライダーで、日中友好環境保全センターの屋上において3月から5月にかけて24時間連続的に観測を行った。偏光ライダーは黄砂を含む粒子状物質の散乱係数の高度分布を測定することができる他、散乱偏光の変化（偏光解消度）を利用して全粒子状物質中の黄砂の割合を導出することができる。さらに、ライダーで得られた後方散乱係数を、地上のサンプリングデータと比較することによって換算係数を求め黄砂の重量濃度の高度分布を求めることができる。北京に飛来する黄砂は視程を著しく減少させるだけでなく、黄砂に付着した大気汚染物質を肺や目などに取り込むキャリアーとして働くことも懸念されている。このような現象を理解し対策を講じるためには、黄砂および大気汚染の動態を把握することが必要である。

## 2. 研究目的

本研究では、北京における継続的なライダー観測データを解析することによって、北京に飛来する黄砂の頻度や濃度を客観的、定量的に把握することを目的とする。また、黄砂輸送モデルとの比較により、発生源、輸送経路を推定するとともに、輸送状況と北京への飛来パターン、地上で観測される黄砂の粒径分布などとの関係を明らかにする。また、ライダーで得られる光学的な黄砂量（消散係数）から黄砂の重量濃度への変換の手法について検討する。

## 3. 研究方法

ライダー観測は、北京市内の東北部に位置する日中友好環境保全センターの屋上において黄砂を含むエアロゾルの鉛直分布を連続的に行った。ライダー装置について、2001年12月から1064nmの受信チャンネルを追加し、2波長（532nm、1064nm）の後方散乱と532nmの偏光解消度の測定を行った。観測は15分毎に5分間積算したライダー信号を記録する方法で連続的に行った。

図1にライダーのブロック図を、表1に主な仕様を掲げる。

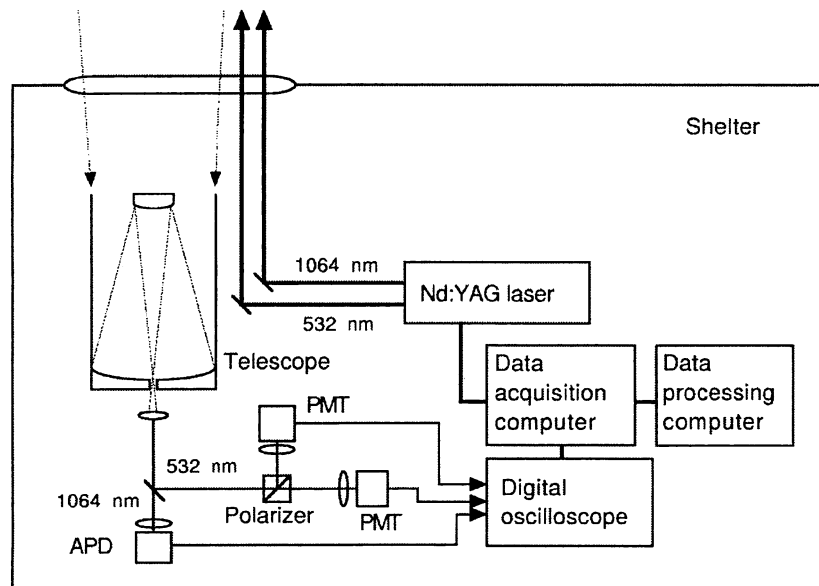


図1 ライダーのブロック図

表1 ライダーの主な仕様

Laser	Flashlamp Pumped	Nd:YAG laser
Wavelength (nm)		532, 1064
Output energy (mJ)		50, 100
Pulse repetition (Hz)		10
Telescope	Schmidt Cassegrain	
Diameter (cm)		20
Field of view (mrad)		0.5-2

ライダー信号強度と偏光解消度から黄砂の消散係数の高度分布を導出し、北京への黄砂の飛来の頻度および飛来状況の特長を解析した。また、黄砂輸送モデル CFORS と比較することによって発生源、飛来経路を解析した。

#### 4. 結果と考察

2001年3月から5月にかけて、本偏光ライダーによって15回の黄砂現象が観測された。黄砂の観測された日数は延べ43日で、3ヶ月間の全観測日数の47%を占めた。観測された黄砂日を表2にまとめて示す。月別に見れば、15回のうち3月が5回、4月が7回、5月が3回であった。回数では、4月が3月より多いが、持続時間では3月が17日間延べ約300時間に対し、4月は約250時間で、3月の黄砂現象が最も顕著であった。

表2 2001年3月から5月に北京のライダーで観測された黄砂

No.	黄砂発生日	継続時間 (時間)	到達高度 (m)
1 (1)*	3/1-3	56	3000
2 (2)*	3/4-6	53	3500
3 (3)*	3/8-9	37	3000
4 (5)*	3/12-14	51	5000
5 (9,10,11,12)*	3/19-24	122	5000
6 (16)*	4/2-4	66	2000
7 (19)*	4/6-8	51	4000
8 (21)*	4/9-11	41	4000
9 (24)*	4/17-19	48	5000
10 (-)*	4/21	6	1000
11 (26)*	4/22-23	18	3000
12 (32)*	4/30-5/1	24	3500
13	5/3-6	64	4000
14	5/14-17	74	5000
15	5/18-19	27	1000

黄砂の影響を評価する上で、上空を含む黄砂の質量濃度を見積ることが重要である。そこで、まずライダーで得られる散乱係数（消散係数）の高度分布のうち、地面付近のデータを地上のサンプラーによる大気エアロゾル濃度（TSP）および地上ダスト計の測定データと比較した。その結果、ライダーで得た消散係数とTSPの間に高い相関が見られた。そこで、消散係数を質量濃度に変換するための換算係数を求めた。得られた係数は、1780 ( $\mu\text{g m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ )であった。一方、ライダーで得られる偏光解消度を用いて、全エアロゾル濃度に占める黄砂の割合を求めた。黄砂の割合  $R$  は次式で求められる。

$$R = \frac{\{(1-\delta_2') \delta - \delta_2'\}}{\{(\delta_1 - \delta_2')(1+\delta)\}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta_1' = \delta_1 / (1 + \delta_1) \dots\dots\dots(2)$$

$$\delta_2' = \delta_2 / (1 + \delta_2) \dots\dots\dots(3)$$

ここに  $\delta_1$  はダストの偏光解消度、 $\delta_2$  はその他のエアロゾルの偏光解消度である。ここでは経験的に、 $\delta_1=0.35$ 、 $\delta_2=0.05$  とした。

図 2 に地上付近のライダーデータ（地上 60–150m）から求めたエアロゾル濃度、黄砂濃度と TSP 濃度の比較を示す。全エアロゾル濃度のうちの黄砂の占める割合は、黄砂時には 100%近くに達する例も見られた。例えば、3月6日、21日、4月10日、5月4日などでは黄砂の占める割合が多い。これに対し、3月10日、4月7日、28日などのように、エアロゾル濃度は高いが黄砂の割合が比較的小さい例も見られた。

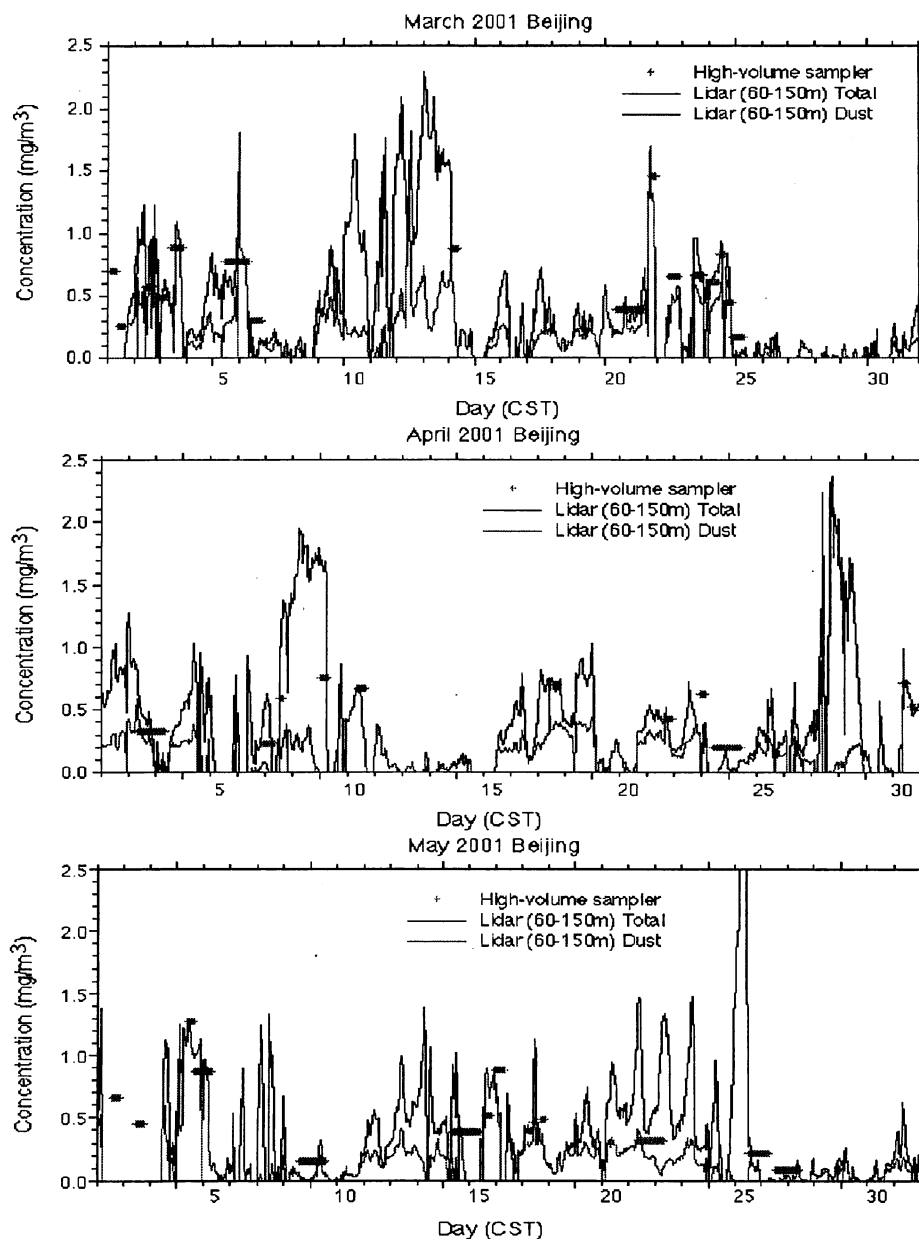


図 2 TSP 濃度およびライダーデータ（60–150m）から換算したエアロゾル濃度と黄砂濃度。

ライダー観測で得られた黄砂の高度分布の時間変化パターンと地上のアンダーセンサーによる粒径分布をもとに、北京の黄砂現象をいくつかの類型に分けることを試みた。その結果、図3に示すように、「高空輸送沈降型」、「高空輸送通過型」、「地元舞上り型」、「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」の4つに分類できた。3月5-6日の黄砂は典型的な「高空輸送沈降型」である。図3の左を見ると、高度約3500mから黄砂が侵入し、時間の経過に伴って濃度ピークは地面に達している。粒径分布は $0.7\mu\text{m}$ と $5.0\mu\text{m}$ にピークがあった。 $0.7\mu\text{m}$ のピークは主に北京の大気汚染エアロゾル、 $5.0\mu\text{m}$ のピークは北西部から輸送されてきた黄砂ダストの寄与を示すと考えられる。この例を含め、表2のNo.2、3、4、5、6、8、9、11、12、13、14がこの型に分類された。

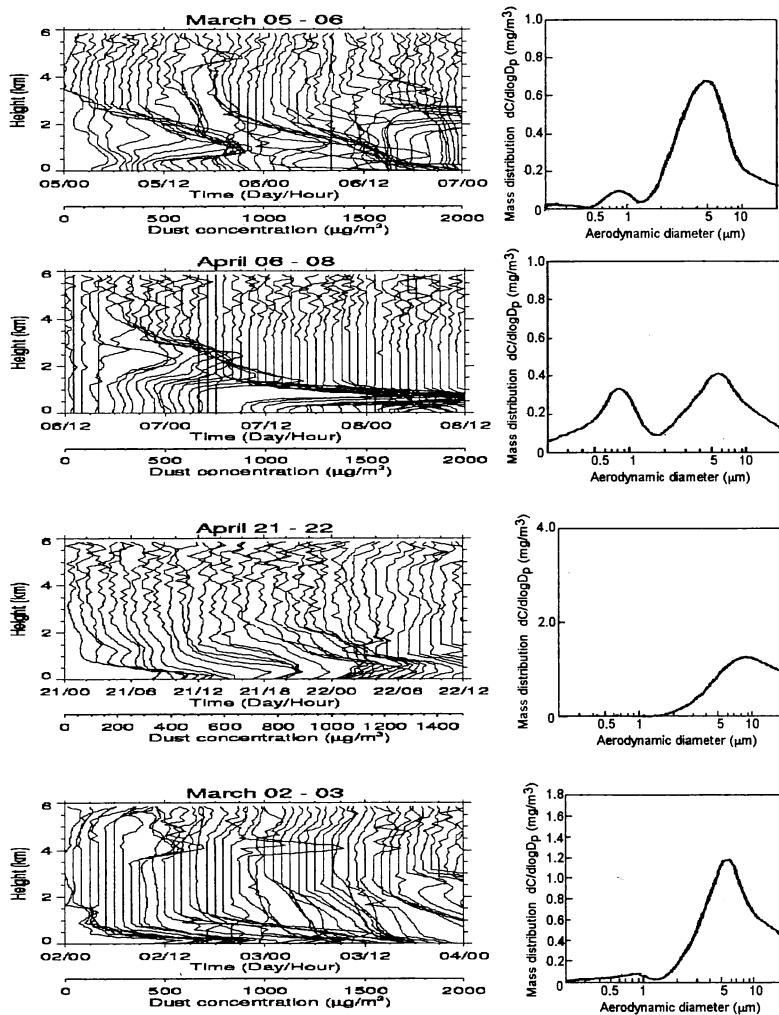


図3 北京の黄砂の四つの類型の例。上から「高空輸送沈降型」、「高空輸送通過型」、「地元舞上り型」「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」。

4月6-7日の黄砂は典型的な「高空輸送通過型」であった。約4000mの高度に黄砂が現れ、時間経過と共に濃度が高くなった。しかし、黄砂は地面に達することなく、上空を通過した。その結果、地上における粒径分布は北京の通常の日とほぼ同様な特徴を示した。この型に分類されたのはこの

例（すなわち、表2のNo.7）のみであった。

4月21日の黄砂は「地元舞上り型」に属する。地上付近で全エアロゾル濃度にしめる黄砂エアロゾル濃度の割合が高くなる現象が観測され、高度は約700m以下に留まっていた。その時の粒径分布のピークは $9\mu\text{m}$ であり、粒径が大きい土壌粒子の寄与が高いことを示した。この例を含め、表2のNo.10, 15がこの型に分類された。

3月1-3日の例は「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」に分類できる。この例は、「高空輸送沈降型」と「地元舞上り型」の両方を重ねたような分布パターンを示した。また、粒径分布は $7.0\mu\text{m}$ のピークから大粒子側に裾を引くような分布を示し、地元の大粒子と輸送された小さい粒子が混合したものと考えられる。この例と表2のNo.1がこの型に分類された。

図4にライダーデータの時間高度表示を示す。また、表3にライダーで観測されたダストイベントをまとめて示す。表3には2002年1月から5月までのイベントを全て示した。また、2001年と同様、ライダーで得られた高度分布の時間変化のパターンから、黄砂の輸送を「高空輸送沈降型」、「高空輸送通過型」、「地元舞上り型」、「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」に分類した結果も示した。

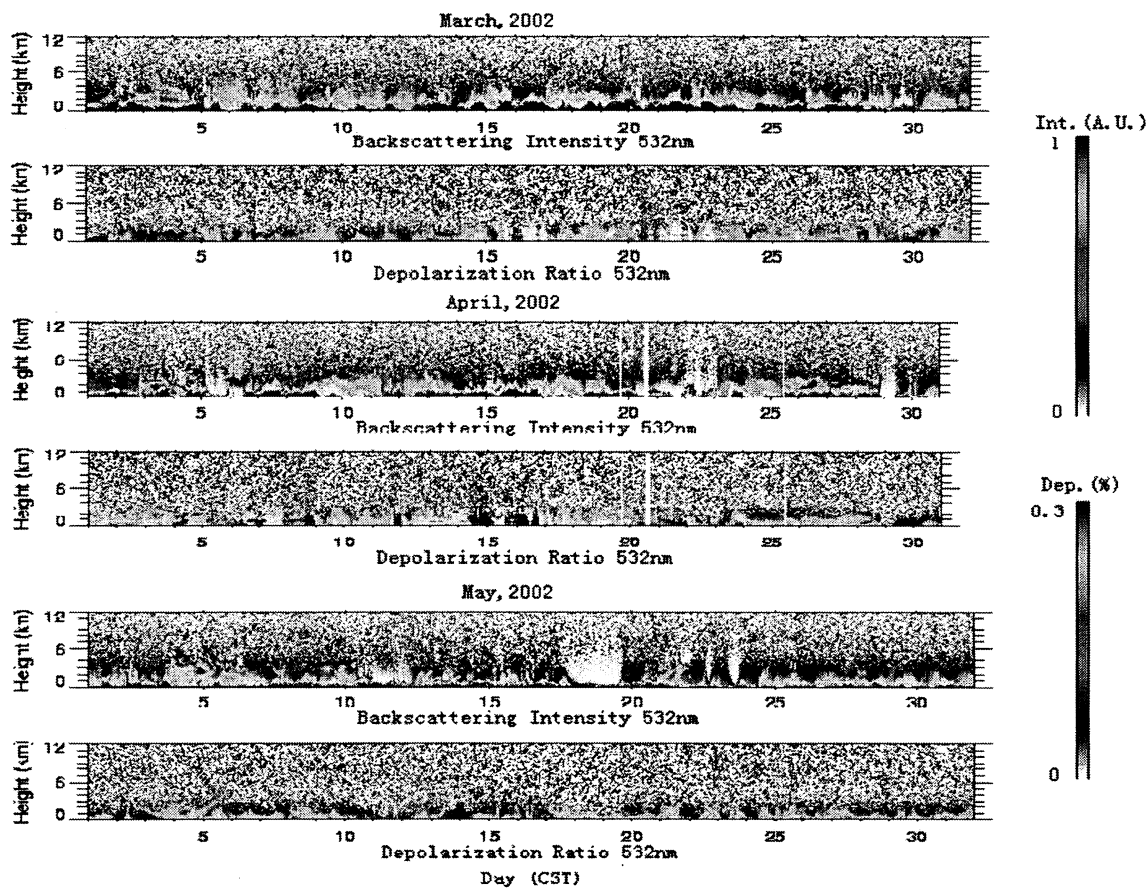


図4 北京で観測された2002年3月、4月、5月のライダー連続観測データ。それぞれの月について、距離補正信号強度（上）と偏光解消度（下）を示す。

表3 2002年3月から5月に北京のライダーで観測された黄砂

No	Mon.	period (day, time)	duration (h)	duration (day)	top height (m)	type	monthly sum (day)	monthly sum (h)
1	Jan.	6, 12:00-7.1:00	13	2	2500	falling	2	23
2		30, 10:00-20:00	10	1	2000	falling-local combination		
3	Feb.	7, 18:00-8.4:00	10	2	2500	falling	5	41
4		9, 18:00-10.3:00	9	2	3000	passing		
5		10, 16:00-20:00	4	1	3000	falling		
6		12, 2:00-10:00	8	1	2500	passing		
7		24, 16:00-19:00	3	1	2500	passing		
8	Mar.	1, 21:00-2, 2.4:00	7	2	2000	passing	8	186
9 (11)*		14, 8:00-23:00	15	1	2500	falling-local combination		
10 (12,13)*		15, 6:00-17.6:00	48	3	4000	falling-local combination		
11 (14)*		17, 8:00-12:00	4		2500	falling		
12 (14)*		18, 22:00-19,18:00	20	2	2000	falling-local combination		
13 (16)*		20, 3:00-22, 7:00	52	3	2500	falling		
14 (16,17)*		22,12:00-23, 18:00	30	2	3500	falling		
15 (20)*		25,19:00-26, 5:00	10	2	1500	falling		
16	Apr.	1, 6:00-2, 20:00	38	2	1000	local	9	348
17		1, 22:00-3, 20:00	22	2	2500	falling		
18 (31)*		6, 12:00-9, 4:00	64	4	2500	falling		
19 (32)*		9, 15:00-23:00	8	1	3000	falling		
20 (38)*		11, 14:00-12, 4:00	14	2	3000	falling		
21 (38)*		12, 6:00-17, 17:00	131	6	4500	falling-local combination		
22		18, 9:00-20.4:00	43	3	3000	falling-local combination		
23		22, 0:00-8:00	8	1	1500	falling		
24		23, 14:00-24, 10:00	20	2	2000	falling-local combination		
25	May.	5, 10:00-22:00	12	1	2000	falling-local combination	4	52
26		20, 21:00-21,15:00	18	2	1500	falling-local combination		
27		25, 6:00-17:00	11	1	2000	local		
28		27, 6:00-17:00	11	1	1000	local		

1月から5月までの間に、北京では28回、総計650時間の黄砂現象が観測された。このうち、3月から5月の間には、21回、590時間の黄砂現象が観測された。これは2001年の3月から5月の18回に比べてやや多いが、持続時間の総計は2001年の720時間よりも少ない。2002年は、大規模なイベントが3月15日、20日、4月6日、12日の4回観測された。これらのケースでは、地上のハイボリュームサンプラーによる顆粒物濃度(TSP)が2.2–11 mg/m<sup>3</sup>に達した。これは、去年の最大値2 mg/m<sup>3</sup>に比べても非常に大きな値であった。イベント毎の持続時間は48–130時間で、表3に示したように、2ケースは「高空輸送沈降型(falling)」、2ケースは「高空輸送沈降/地元舞上り混合型(falling-local combination)」であった。

1月から5月の28回のうちの20回(43%)が「高空輸送沈降型」、9回(32%)が「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」、4回(14%)が「高空輸送通過型」、3回(11%)が「地元舞上り型」に分類された。「高空輸送沈降型」と「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」を合わせた割合は1月から5月の期間では全イベントの75%、3月から5月では88%を占める。この結果は、北京に飛来する黄砂の大部分がモンゴルと内モンゴルで発生するという化学輸送モデル(CFORS)の結果と整合する。

3月15日から17日のイベントは典型的な「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」であったと考えられる。黄砂層は地上から高度約3kmで、黄砂飛来時は地上風速が高く、地元起源の砂塵の寄与もあったと考えられる。TSP値のピークは3.5 mg/m<sup>3</sup>であった。

3月20日から22日の大規模なイベントは「高空輸送沈降型」に分類される。黄砂は地上から高度約3kmまでに分布し、黄砂飛来時には地上の風速は低く、極めて高濃度の黄砂が観測された。TSP値のピーク11mg/m<sup>3</sup>はこの時に観測された。

4月6日のイベントも「高空輸送沈降型」に分類される。この時の地上風速は3月20日のケースに比べると高く、TSPのピークは2.2 mg/m<sup>3</sup>であった。黄砂層は、地上から高度約2.5kmまでであった。

4月12日から17日のケースは「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」であった。表3ではひとつのイベントとして示したが、連続して発生した一連のイベントが複合したものであると考えられる。

CFORSのシミュレーション結果によるとこれらの大規模な黄砂現象は、大きなスケールで見ると共通した特徴を持っている。いずれも北に大きな低気圧があって、低気圧の南側の強い西風によって黄砂が発生、輸送される。3月20日のケースでは中国南部にも低気圧があり、北京は南北の低気圧に挟まれ気圧の傾斜が弱い状況となった。このため、黄砂飛来時に風速が弱く、記録的な高濃度が観測されたと考えられる。上の4つのケースいずれも、韓国および日本に顕著な黄砂現象をもたらした。

2003年に、北京においてライダーで観測された黄砂現象を表4にまとめて示す。2003年は北京において、4月中旬から下旬にかけて黄砂現象が観測されたが、これらは地上モニタリングデータとも良く一致している。CFORSの結果によると、北京で観測されたこれらの比較的規模の大きい黄砂の発生源は内モンゴルのEjinaQi付近の砂漠地域であると推定された。しかし、4月20日にCFORSで発生した黄砂のように北京では顕著に観測されていない例もある。発生地域の地表面状況や輸送途上の沈着がモデルと異なるものと考えられ、今後検討が必要である。

次に、北京における黄砂現象と大気汚染現象の関係を見るために、ライダーから求めた黄砂と大気汚染エアロゾルの消散係数の両方を図5に示す。

表4 ライダーで観測された2003年の北京の黄砂現象

No	Mon.	Period (day)	Dur.ation (day)	Duration (hour)	Height (m)	Mon. Dur.(d)	Mon. Dur.(h)
1	Mar.	1/0:00-2/0:00	1	24	500	5	84
2		19/0:00-20/0:00	1	24	500		
3		25/12:0-26/0:0	1	12	500		
4		29/0:00-31/0:00	2	24	500		
1	Apr.	5/0:00-7/0:00	2	48	500	12	281
2		11/18:0-12/6:00	1	11	3000		
3		14/0:00-17/0:00	3	72	1000		
4		23/0:00-29/6:0	6	150	500		
1	May	1/0:00-4/12:00	3	84	500	7	180
3		20/0:00-22/0:00	2	48	500		
4		26/0:00-28/0:00	2	48	500		

例えば、4月14-17日の黄砂のケースでは黄砂の期間の大気汚染濃度は非常に低下している。このケースでは地上風速が8m/s以上で、西よりの風によって大気汚染が吹き飛ばされたものと考えられる。一方、4月23-29日のケースでは風速が6m/s以下で、比較的高濃度の大気汚染が黄砂と同じ期間に観測されている。このように気象条件に依存して状況が異なると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究ではライダーデータをもとに黄砂の高度別重量濃度を推定する手法を開発した。また、高度別黄砂割合分布パターンと地上の粒径分布データとを基準として北京の黄砂を4つのパターンに分類した。2001年3月～5月の観測では、北京において約15回の黄砂イベントが認められ、その75%は「高空輸送沈降型」に分類された。これは、北京においても長距離輸送された黄砂の寄与が大きいことを示す。しかし、「地元舞上り型」による高濃度の黄砂が観測される例もみられ、地元のダストの寄与も無視できない。

2002年の黄砂についてライダー観測データの解析を行った結果、1月から5月に28回、総計650時間の黄砂現象が観測された。このうち、3月から5月は21回、500時間であった。また、3月から5月の黄砂の約90%がモンゴル、内モンゴルなどから輸送されたものであることが分かった。2001年と2002年を比較すると、2002年の方が発生回数は多少多く、持続時間の総計は多少小さい。2002年には4回の大きなイベントが観測された(3月15日、20日、4月6日、12日)。このうち、3月20日には記録的な高濃度が記録された。4つのイベントのいずれも、「高空輸送沈降型」または「高空輸送沈降/地元舞上り混合型」で、輸送された黄砂の寄与が大きい。これはイベントのスケールを考えると理解される。

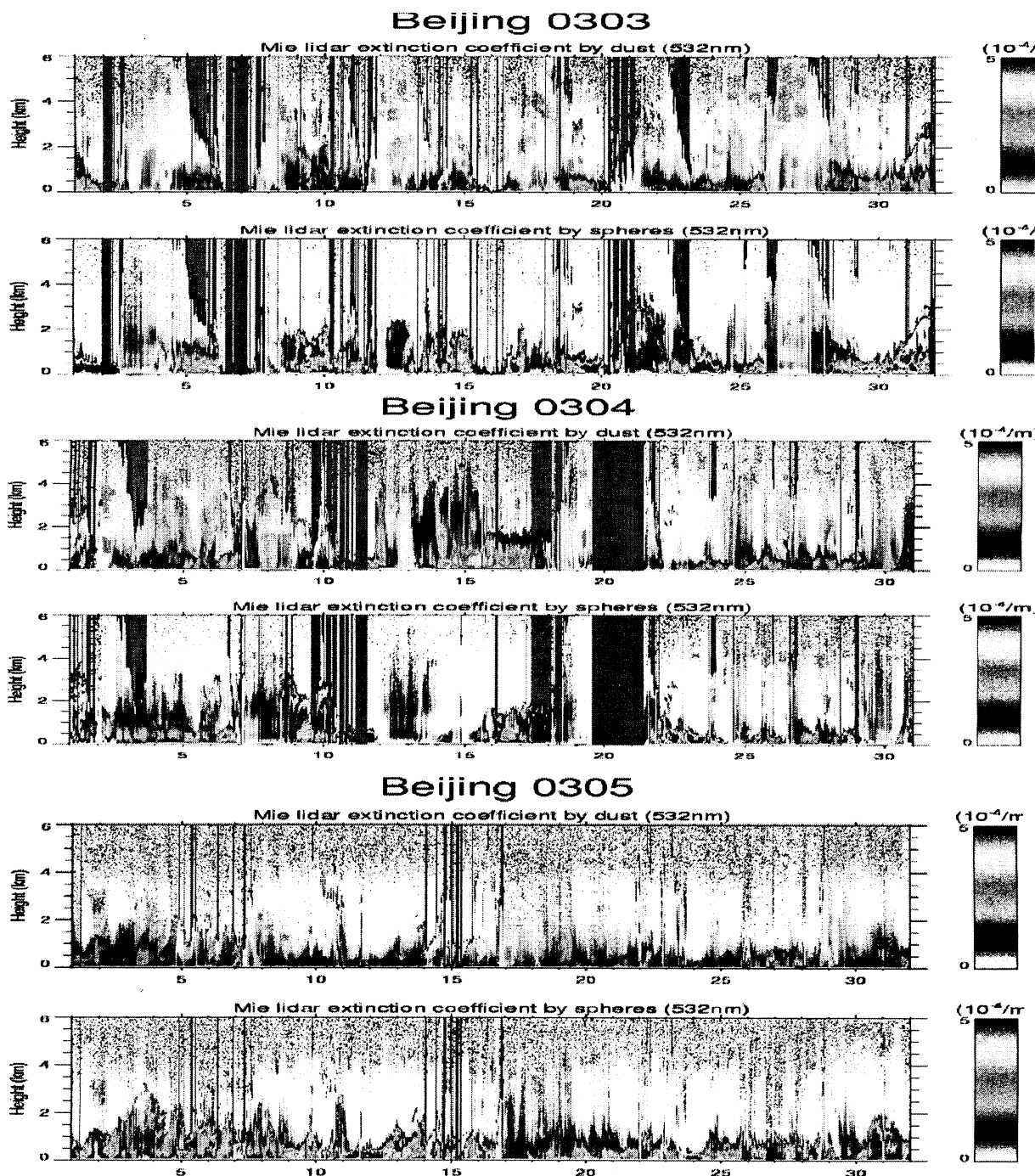


図5 ライダーから求めた黄砂と大気汚染エアロゾルの消散係数。2003年3月、4月、5月それぞれについて上段が黄砂、下段が大気汚染エアロゾルの消散係数。横軸は日付。

2003年は大規模な黄砂が少なく、モデルによる再現性の悪いケースが多く見られた。これらについては地上風速との相関が良く、主にローカルな発生源によるものと推定された。ライダーデータから、黄砂および大気汚染エアロゾル濃度（消散係数）の時系列変化を独立に求め、相関を調べたところ、多くのケースでは黄砂時に大気汚染エアロゾルが減少するが、気象状況によっては黄砂と同時に

比較的高濃度の大気汚染が観測されるケースもあった。黄砂と大気汚染の相互作用を考える上では、このような継続的なライダー観測結果が非常に重要である。

## 6. 国際共同研究等の状況

ライダー観測に係る日中友好環境保全センター、国家環境監視総站との協力

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

- 1) Nobuo Sugimoto, Itsushi Uno, Masataka Nishikawa, Atsushi Shimizu, Ichiro Matsui, Xuhui Dong, Yan Chen, Hao Quan: *Geophys. Res. Lett.* 30(12), 42-1–42-4 (2003)

“Record Heavy Asian Dust in Beijing in 2002 -Observations and Model Analysis of Recent Events-”

### (2) 口頭発表（学会）

- 1) 陳 岩、全 浩、董旭輝、杉本伸夫、松井一郎、清水厚：第 20 回レーザーセンシングシンポジウム、松山、(2001)

「偏光ライダーによる北京における黄砂の連続観測」

- 2) Y. Chen, H. Quan, X. Dong, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu: Nagasaki Workshop, Nagasaki, (2001)

“Continuous Measurement of Dust Aerosols with a Dual-Polarization Lidar in Beijing”

- 3) 杉本伸夫、松井一郎、清水厚、陳 岩、全 浩、董旭輝：砂塵嵐観測ネットワークに関する技術交流とセミナー、北京、(2001)

「ライダーによる黄砂の連続観測の成果と今後の展望」

- 4) 杉本伸夫、松井一郎、清水 厚、荒生公雄、村山利幸、鶴野伊津志、陳 岩：日本気象学会 2002 年春季大会、さいたま市 (2002)

「偏光ライダーによる黄砂のネットワーク観測」

- 5) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、荒生公雄、陳 岩：第 9 回大気ライダー観測研究会、東京商船大学、(2002)

「連続運転ライダーによる日中における黄砂観測の統計的解析」

- 6) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, and Y. Chen: Asian Dust Storm and Its Impact -2nd ADEC Workshop-, Xian, China January (2003)

“Study of dust transport using continuously operated lidars and a regional chemical transport model”

- 7) Zhao, S., N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui: Asian Lidar Network Conference 2004, Hon Kong, China (2004)

•Observations and analysis of dust by the lidar, auto-monitoring instruments and the CFORS model in Beijing in 2003•

- 8) Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, K. Arao, Y. Chen, S. Zhao, J. Zhou, and C-H. Lee: The 2<sup>nd</sup> International Workshop on Sandstorms and Associated Dustfall, Nagoya, 23 (2003)

“Study of Dust Transport Using a Network of Continuously-Operated Polarization Lidars”

- 9) Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arai, S. Zhao, J. Zhou, C-H. Lee: The 3<sup>rd</sup> Workshop on Aeolian Dust Experiment and Climatic Impact, Jejudo, Korea, 58-60 (2003)  
“Network Observations of Asian Dust and Anthropogenic Aerosols with Automated Two-wavelength Dual-Polarization Lidars”
- 10) 趙 淑莉、杉本伸夫、清水 厚、松井一郎：第 10 回大気ライダー観測研究会、八王子  
“An analysis of dust phenomena in Beijing in 2003”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

8. 成果の政策的な寄与・貢献について

- (1) JICA日中友好環境保全センタープロジェクトフェーズⅢへの貢献。  
(2) 日中韓黄砂モニタリングへの貢献。