

日本付近に到達する空気塊流跡線の季節変化

風岡亮*・木田秀次*

* 京都大学大学院理学研究科

要旨

本研究は、2001年1月から12月に九州と北海道に到達する空気塊流跡線を調べた。その結果、1年間に両地域の上空に到達する空気塊の起源やその輸送経路は、ユーラシア大陸と太平洋上に広く分布し、その季節変化が明瞭であった。また、九州と北海道の両地域は地球規模でみて非常に近い位置関係にあるが、同じ季節内に両地域に到達する空気塊の起源や経路は大きく異なることがわかった。

キーワード： 空気塊流跡線, エアロゾル, ダスト, ガス, 大気循環

1. はじめに

日本付近は、アジア大陸の東岸に位置し、海洋性と大陸性の空気塊とが混ざり合う地域である。このため、人為起源や自然起源の物質が複雑に分布しており、また、その季節変化や年々変動が顕著に認められる。海洋性の空気塊の影響を受ける場合、日本付近は比較的清浄な大気質になるのに対して、大陸性の空気塊の影響を受けると人為起源汚染物質（ガス、エアロゾル、雲凝結核）やダストを多く含んだ大気質になる。

特に偏西風が卓越する場合、日本付近で大陸起源とされる大気汚染物質がしばしば観測されることは数多くの研究者によって報告されている（e.g. Uematsu et al., 1992; Hatakeyama et al., 2000）。東アジアの大気汚染物質の排出量は、今後も増加することが予測されており（van Aardenne et al., 1999; Streets and Waldhoff, 2000），我が国の人間への健康影響や農作物・森林の植物影響がますます大きな問題になることが懸念される。このため、海洋性と大陸性の空気塊が我が国に輸送されるメカニズムを詳細に調べておく必要がある。

これまで、日本付近で観測される汚染物質の起源や輸送経路を調べるため、空気塊の流跡線解析

が数多くの研究者によってなされている。例えば、Mukai and Suzuki(1996)は日本海の隠岐島において3年間のエアロゾル観測を行った。その結果、エアロゾルの成分別濃度には季節変動が認められ、空気塊の輸送経路と関係があることを見出している。これは、日本付近に到達する物質の輸送過程に東アジアの大気循環の季節変動が大きな影響を及ぼしているためと考えられる。しかしながら、日々の大陸性・海洋性高気圧、移動性高低気圧、前線の活動とその構造が空気塊流跡線の季節的な特徴にどのような影響を与えているのかについて詳細に調べられているとは言い難い。そこで本研究は、日本付近に到達する空気塊流跡線の季節的な特徴を明らかにし、東アジア地域の対流圏の循環との関係について調べることを目的とした。

2. 空気塊流跡線

空気塊流跡線計算のために、NCEP/DOE AMIP-II reanalysis(Kanamitsu et al., 2002)の1日6時間毎に提供されているジオポテンシャル高度、地表面気圧、東西風、南北風、鉛直P速度の2.5度グリッドデータを使用した。本研究では、 σ 座標系

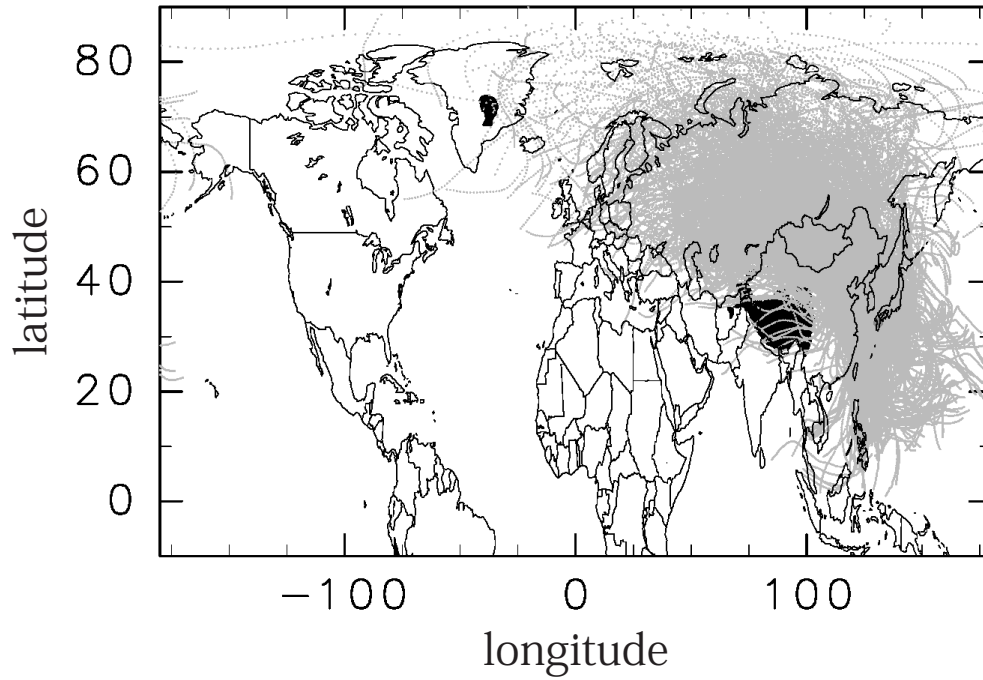


Fig.1 Seven-day backward air parcel's trajectories arriving at Kyushu(32.5N, 131.0E) from January to December 2001. Gray lines indicate the backward air parcel's trajectories. Black area indicate elevation higher than 3000m. The backward trajectories of air parcel started at level of sigma = 0.85, and were calculated each day at 00UTC, 06UTC, 12UTC, and 18UTC.

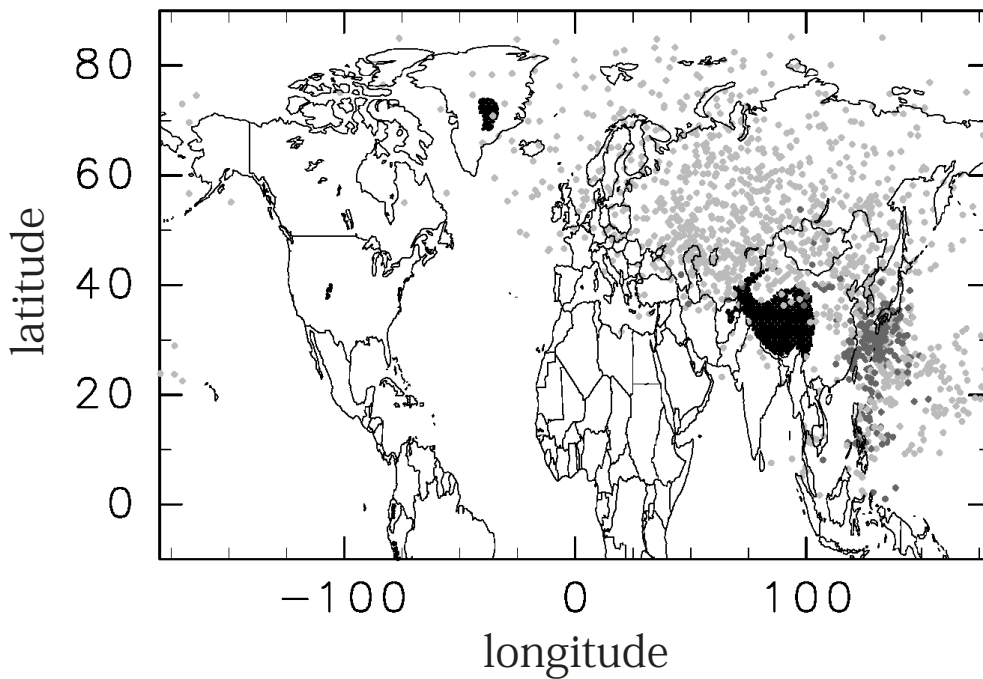


Fig.2 Seven-day backward positions of air parcel arriving at Kyushu from January to December 2001. Light gray dots indicate the backward positions of air parcel. Dark gray dots indicate the positions where the backward air parcel reached at level of sigma ≥ 0.95 .

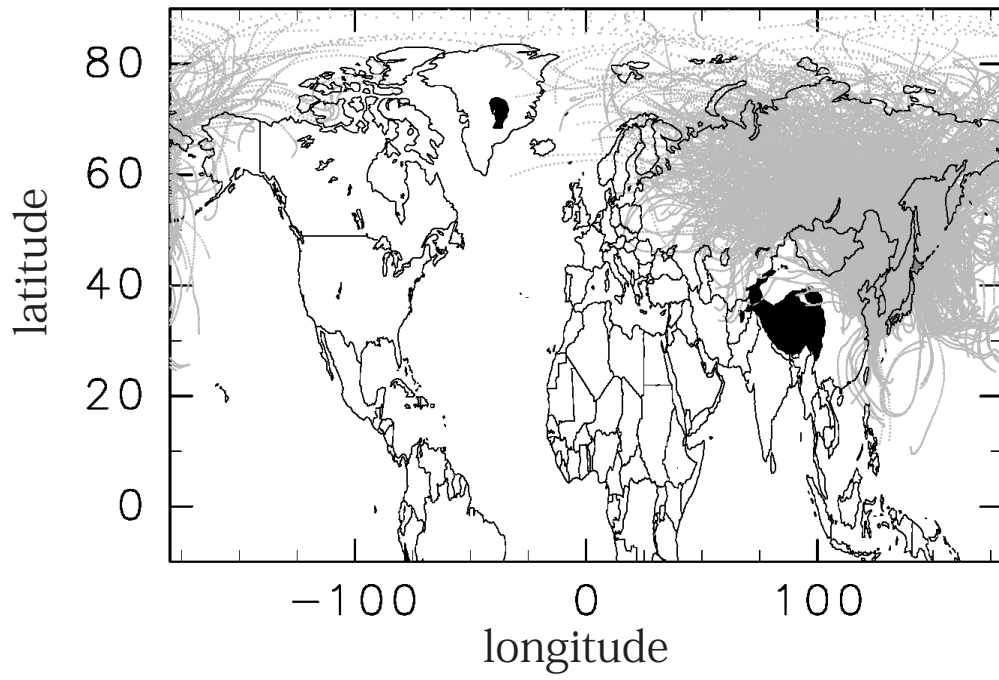


Fig.3 The same as in Fig.1, except for Hokkaido(43.5N, 142.5E).

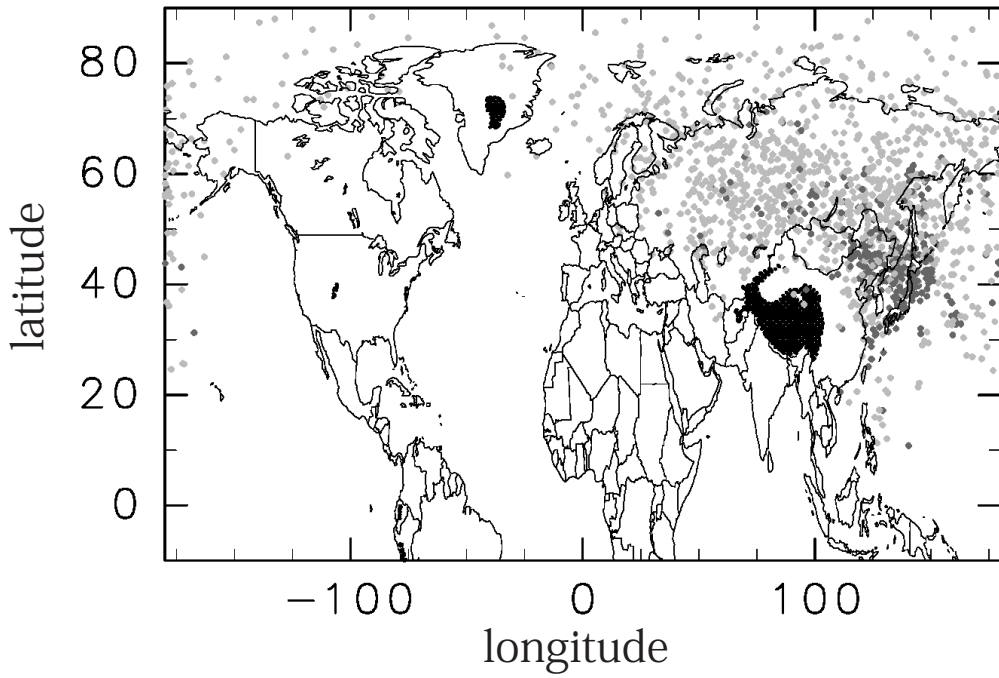


Fig.4 The same as in Fig.2, except for Hokkaido.

(Phillips, 1957)で空気塊の流跡線を時間と距離の線形補間を用いて計算した($\sigma = (P - P_{top}) / (P_s - P_{top})$), P:気圧, P_{top} :大気上限の気圧, P_s :地表面気圧)。 σ 鉛直速度は、鉛直P速度、地表面気圧、および地表付近の東西風と南北風データから求めた。また、流跡線計算領域の上部境界を10hpa面として、空気塊がこの面を通過しないような境界条件を与えた。さらに、空気塊が地表に到達する条件を $\sigma \geq 0.95$ になる時とした。

3. 結果

エアロゾルの滞留時間は、粒子の大きさや組成によって大きく異なるが、対流圏の下層で長く1週間程度とされている(Pruppacher and Klett, 1978)。そこで本研究は、日本付近に到達する空気塊の流跡線を調べるために九州(北緯32.5度, 東経131度)と北海道(北緯43.5度, 東経142.5度)の上空 $\sigma = 0.85$ (1400-1500m付近)に到達する空気塊の7日間バックワード流跡線を調べた。本研究では、九州と北海道の中心の1地点に到達する空気塊を九州と北海道に到達する空気塊とし、2001年の1年間に両地点の上空に到達した1日4回(00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC)の空気塊に着目した。

3.1 一年間に九州と北海道に到達する空気塊流跡線の特徴

Fig.1は、2001年1月から12月に九州の上空に到達した空気塊の7日間バックワード流跡線の水平分布を示したものである。また、Fig.2は同じ期間に九州の上空に到達した空気塊を7日間バックワードさせた時の位置を水平分布であらわしたものである。Fig.1の薄い灰色のラインが空気塊流跡線を示し、Fig.2の薄い灰色の点が7日前の空気塊の位置を示す。また、バックワードさせる途中に空気塊が地表に到達した場合、到達した時までの流跡線とその位置(濃い灰色)が示されている。図中のチベット付近の黒い領域は、高度3000m以上の地形をあらわしている。Fig.1とFig.2の流跡線の合成図は、通過経路の特徴を把握することが難しい。このため、今後は流跡線の確率分布で表現するつもりである。

九州に到達した空気塊の流跡線は、主にロシアや中国のユーラシア大陸と太平洋、東シナ海、フィリピン周辺の海域上に広く分布している。特に、ユーラシア大陸上の流跡線は、チベットの北側と東側に分布しており、南アジアや西アジアであま

り認められない。また、7日前の空気塊の位置も、流跡線と同じ地域に広く分布している(Fig.2)。地表付近から九州に到達していた空気塊は、西日本や東シナ海周辺域で多く認められる。

これに対して、北海道の上空に到達した空気塊の特徴はFig.3とFig.4に示すとおりである。北海道に到達する空気塊の流跡線は、主にロシアや中国北東部のユーラシア大陸上と太平洋北部やアラスカ周辺の海域上に広く分布している。また、九州の場合と同様に、流跡線は西アジアや南アジアで認められない。一方、7日前の空気塊は、西シベリアから中国北東部にかけての大陸上と太平洋北西部から北部にかけての海洋上に広く分布している。また、地表付近から北海道に到達していた空気塊は、日本を含むアジア大陸縁域で多く認められる。

これらのことから、両地域に到達する空気塊流跡線は、主に中国やロシアのユーラシア大陸上に広く分布するという共通点を持っていることがわかった。一方、海洋上の流跡線については、九州に到達するものが太平洋、東シナ海、フィリピン周辺の日本の南方海域上で認められたのに対し、北海道に到達するものが太平洋北部やアラスカ周辺の海域上で認められており、分布の特徴が大きく異なることがわかった。

3.2 季節別にみた九州に到達する空気塊流跡線の特徴

1年間に九州と北海道に到達する空気塊流跡線の分布が異なる原因を把握するために、季節別に流跡線の特徴を調べた。Fig.5とFig.6は、2001年1月、4月、7月、および10月に九州に到達した空気塊を7日間バックワードさせた時の流跡線とその位置を水平分布で示したものである。

Fig.5cから、前節の1年間トータルで見た時の日本の南方海域上で認められた流跡線は、予想されるとおり夏季の特徴であった。一方、1月(冬季)に到達する空気塊流跡線は、中国北部から北東部に集中して認められる。Fig.6aより、中央アジア(北緯40度, 東経60度)周辺に多くの空気塊が位置していることから、中央アジア地域からチベットの北側を迂回して九州に到達する大気の流れが卓越していたと考えられる。

また、4月(春季)と10月(秋季)の流跡線はアジア大陸上に集中して認められるが、冬季と特徴が異なっている。さらに、春季と秋季の空気塊流跡線同士の特徴も異なっており、その結果、到達する7日前の空気塊の分布にも違いがあらわ

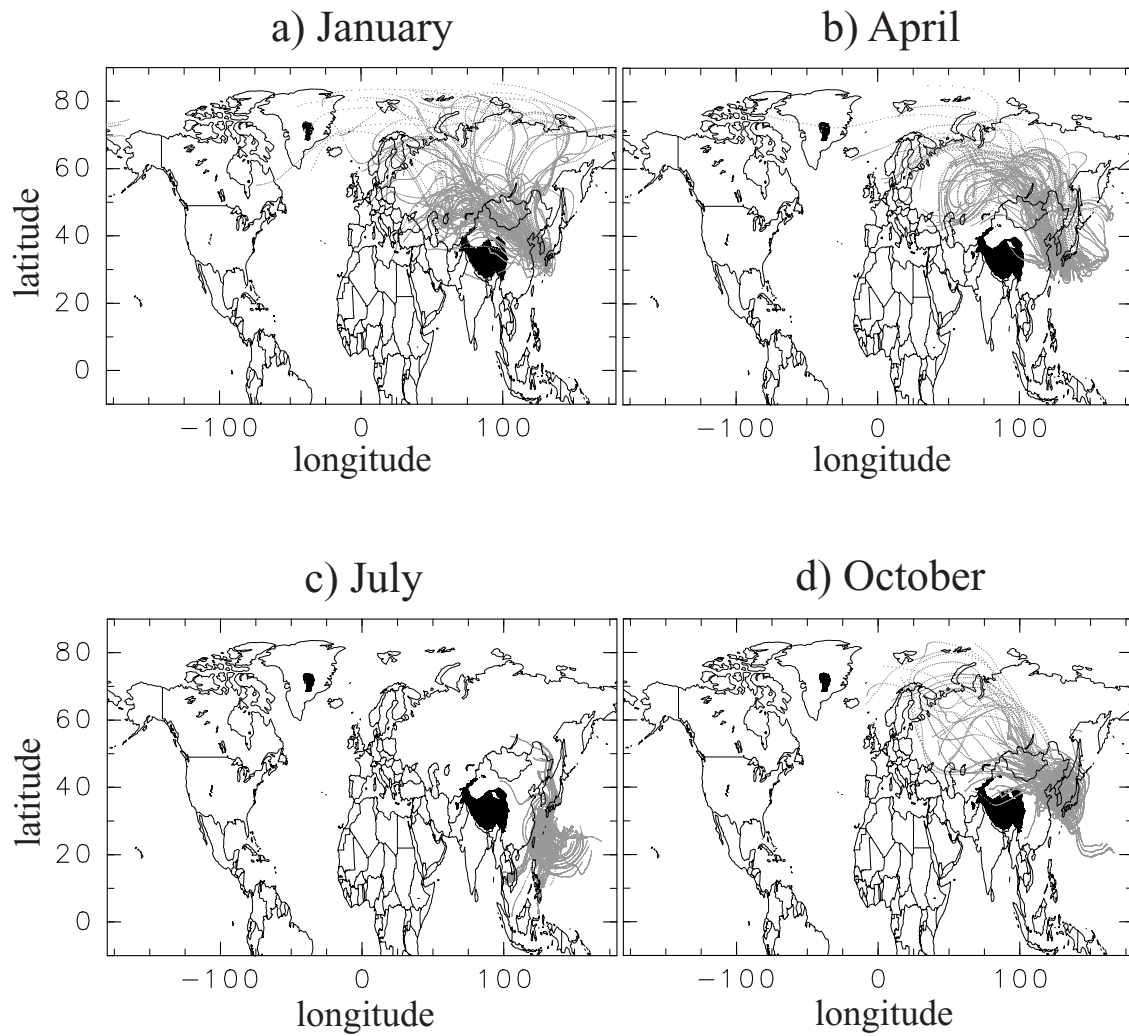


Fig.5 Seven-day backward air parcel's trajectories arriving at Kyushu in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001.

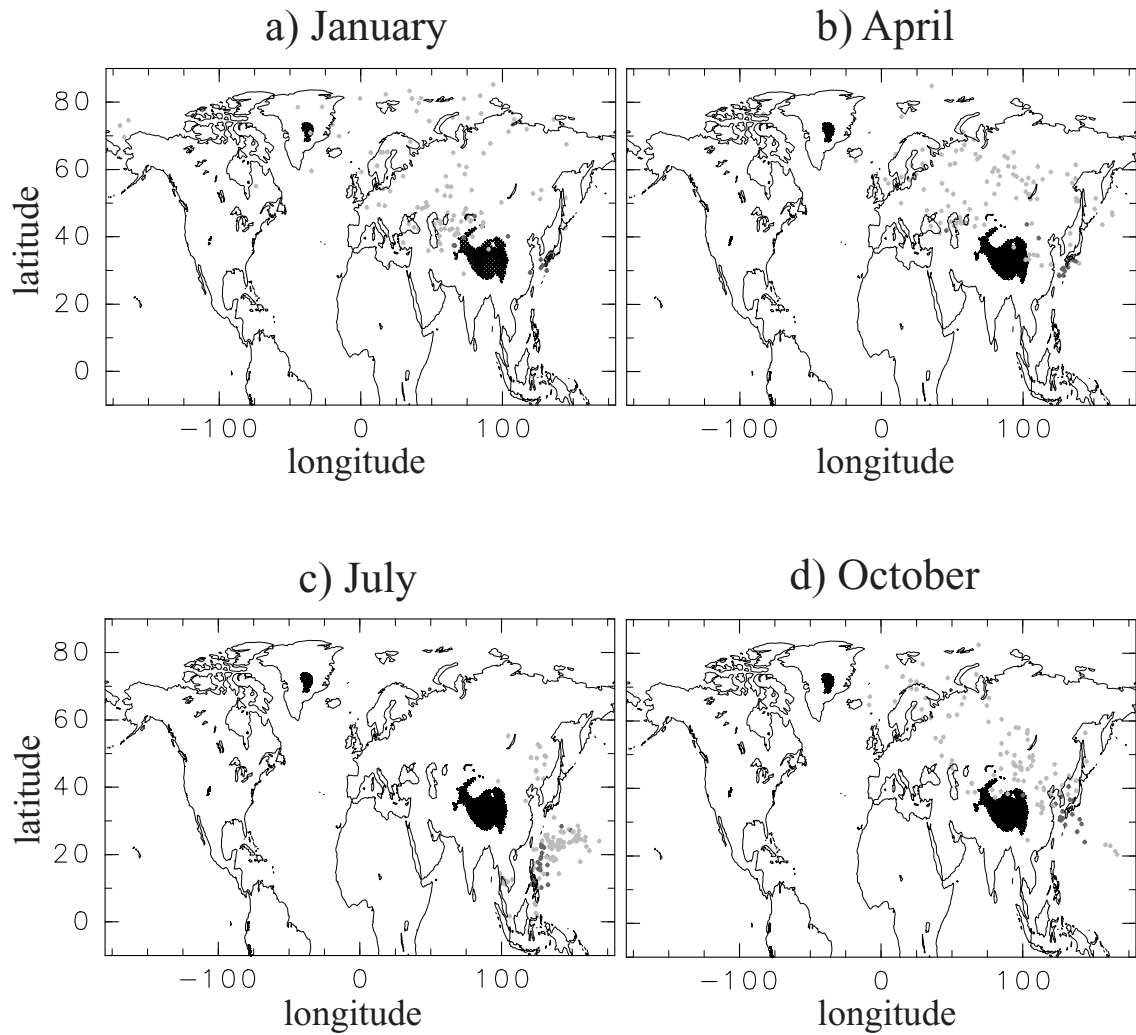


Fig.6 Seven-day backward positions of air parcel arriving at Kyushu in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001. Dark grey dots represent the positions where the backward air parcel reached at level of $\sigma \geq 0.95$.

れている。冬季と比較して、春季にモンゴルの東側を通過する流跡線が増加する傾向は、Mukai and Suzuki(1996)や Osada et al.(2003)の結果でも示されている。

3.3 季節別にみた北海道に到達する空気塊流跡線の特徴

2001年1月、4月、7月、および10月に北海道に到達した空気塊の流跡線の特徴は、Fig.7とFig.8に示すとおりである。1月の空気塊は、アラスカ周辺海域上から北海道に到達する西方へのコースとシベリア上空から北海道に到達する東方へのコースを通過していた。このため、3.1節で年間トータルに見た時の太平洋北部やアラスカ周辺海域上の流跡線は、主に冬季の特徴であったと考えられる。また、冬季の北海道に到達する空気塊の経路が二つ存在することは、Rahn et al.(1989)による北海道の奥尻島に到達する空気塊流跡線の解析結果でも見出されている。しかしながら、西方へのコースを通過する空気塊の中には、シベリア上空からのものも一部含まれており、輸送経路の複雑さがうかがえる。一方、7月に到達する空気塊流跡線は、中国北東部から日本付近にかけての地域とロシア東部に集中している。この地域では、到達する7日前でも大気中を漂っている空気塊が多く存在していることがFig.8cで確認出来る。したがって、1週間という期間にもかかわらず、日本を含むアジア大陸縁辺域の空気塊がゆっくりと北海道に輸送されていたと考えられる。

4. 考察

4.1 九州と北海道に到達する空気塊流跡線の比較

Fig.9とFig.10は、両地域に到達した空気塊を7日間バックワードさせた時の主な分布域の特徴を明らかにしたものである。図中の円領域は、空気塊の分布が集中して認められた地域を示し、また、点線の領域はバックワード時に地表に到達した主要な地域を示す。また、Table 1とTable 2は、分布域の特徴についてまとめたものである。これらの図から、春季と秋季の両地域に到達した空気塊は主にロシアや中国の大陸上から輸送されてきていたという点で、特徴がある程度似ていると考えられる(Fig.9bと10b, Fig.9dと10d)。

これに対して、冬季と夏季に両地域に到達する空気塊は、分布の特徴が大きく異なっている

(Fig.9aと10a, Fig.9cと10c)。冬季の場合、両地域にはロシアや中央アジアなどの大陸性の空気塊が輸送されてきているが、さらに、北海道にはアラスカ周辺の海域やオホーツク海上からの海洋性の空気塊がしばしば輸送されてきているのが認められる。一方、夏季の場合、九州には太平洋、東シナ海、フィリピン周辺海域の海洋性の空気塊が輸送されてきているが、北海道には日本を含むアジア大陸縁辺域の大陸性の空気塊が輸送されてきている。

Fig.11とFig.12は、2001年1月と7月に両地域に到達した空気塊のバックワード流跡線を合成したものである。図中の薄い灰色のラインは、北海道に到達した空気塊流跡線を示しており、濃い灰色のラインは九州に到達した空気塊流跡線をあらわしている。これらの図から、一部の流跡線が重なって確認し難い部分があるが、両地域に到達する空気塊の輸送経路も冬季と夏季に大きく異なっていたことが見出される。したがって、3.1節で述べた1年間に両地域に到達した空気塊流跡線の海洋上での分布域の違いは、冬季と夏季の同じ季節内に両地域に到達した空気塊流跡線の特徴が大きく異なっていたことが原因と考えられる。

4.2 冬季と夏季における日本付近への空気塊の輸送メカニズム

冬季と夏季の同じ季節内に九州と北海道に到達する空気塊流跡線の特徴が大きく異なる原因を調べるため、両地域に到達する空気塊流跡線の特徴と気象場との関係を調べた。

冬季の空気塊が中国北部の上空から九州に輸送されたパターンとアラスカ周辺海域上から北海道に輸送されたパターンは、西高東低の冬型気圧配置時に認められた。これは、日本付近を温帯低気圧が通過したことによって大陸上のシベリア高気圧が太平洋上に流出した事が原因と考えられる。また、アラスカ周辺海域やオホーツク海上の空気塊が北海道にまで輸送されるのは、通過した温帯低気圧の後面の気流によるものと考えられる。特に、アラスカ周辺海域の空気塊が西方へ輸送される原因については、今後詳しく調べていきたい。さらに、この中国北部の空気塊が九州に到達するパターンは、中国の南部や東シナ海周辺域で発生した温帯低気圧が九州を通過した時にも認められた。鶴野・村野(2000)や Kaneyasu et al.(2000)によって述べられているように、日本付近を温帯低気圧が通過するという現象は、大陸上

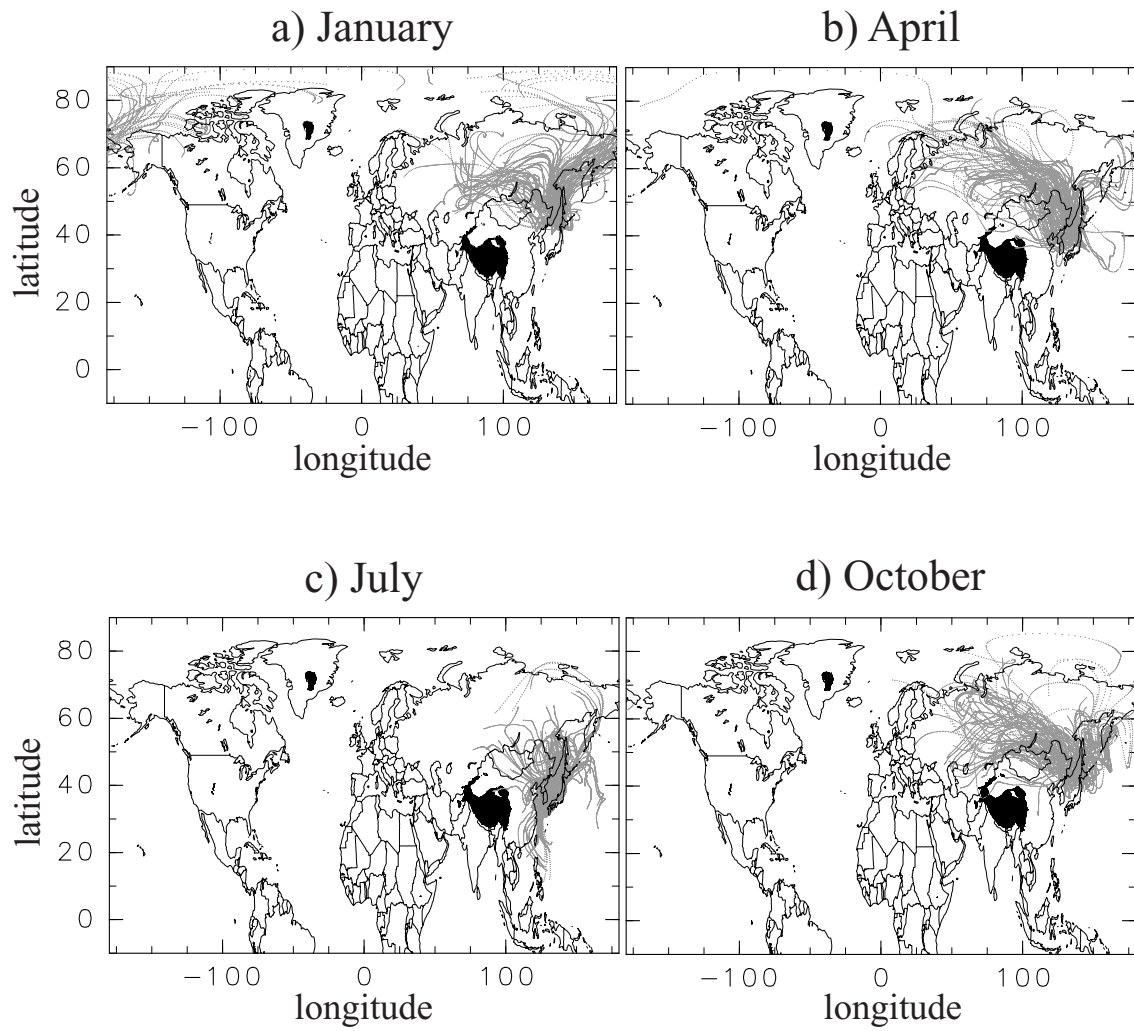


Fig.7 The same as in Fig.5, except for Hokkaido in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001.

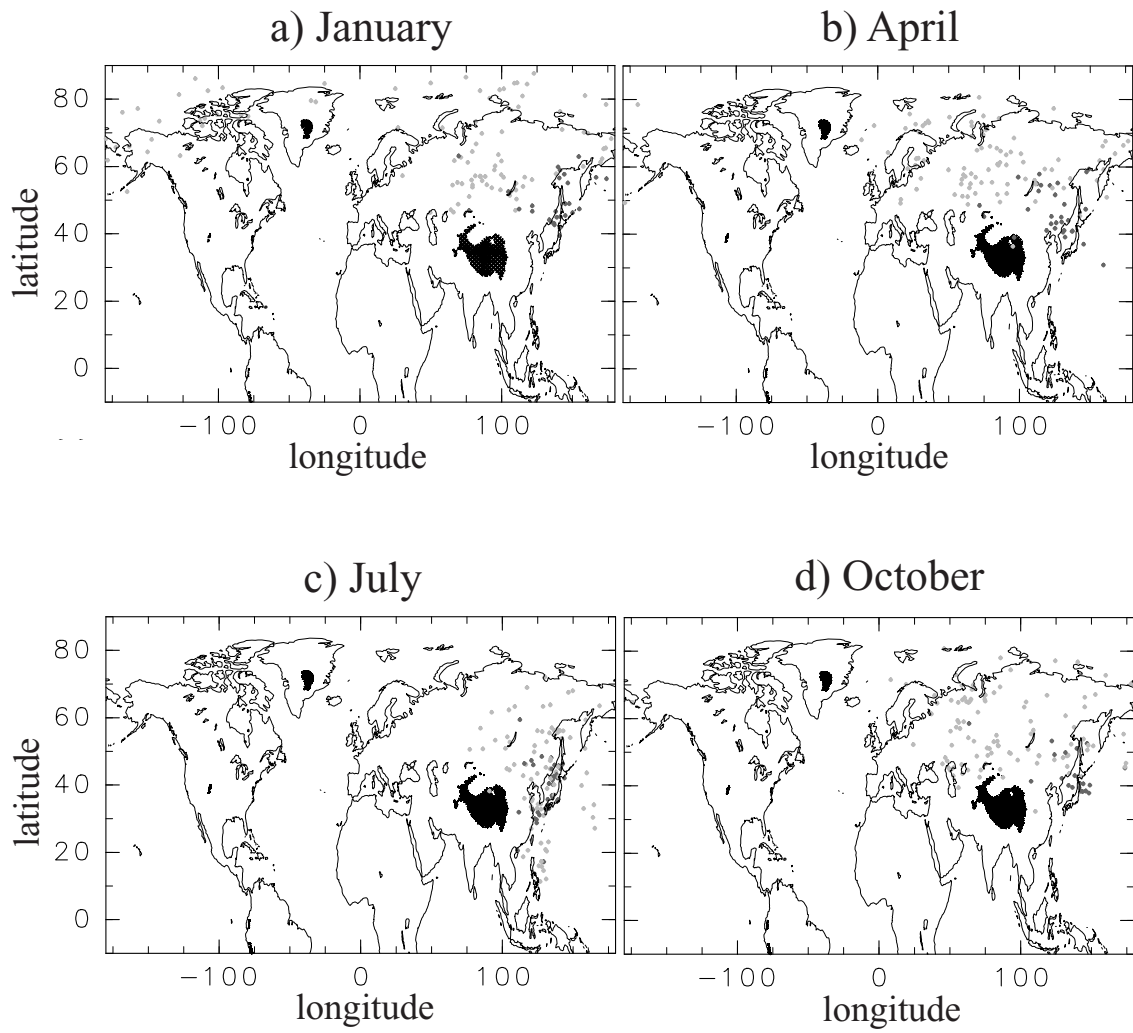


Fig.8 The same as in Fig.6, except for Hokkaido in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001.

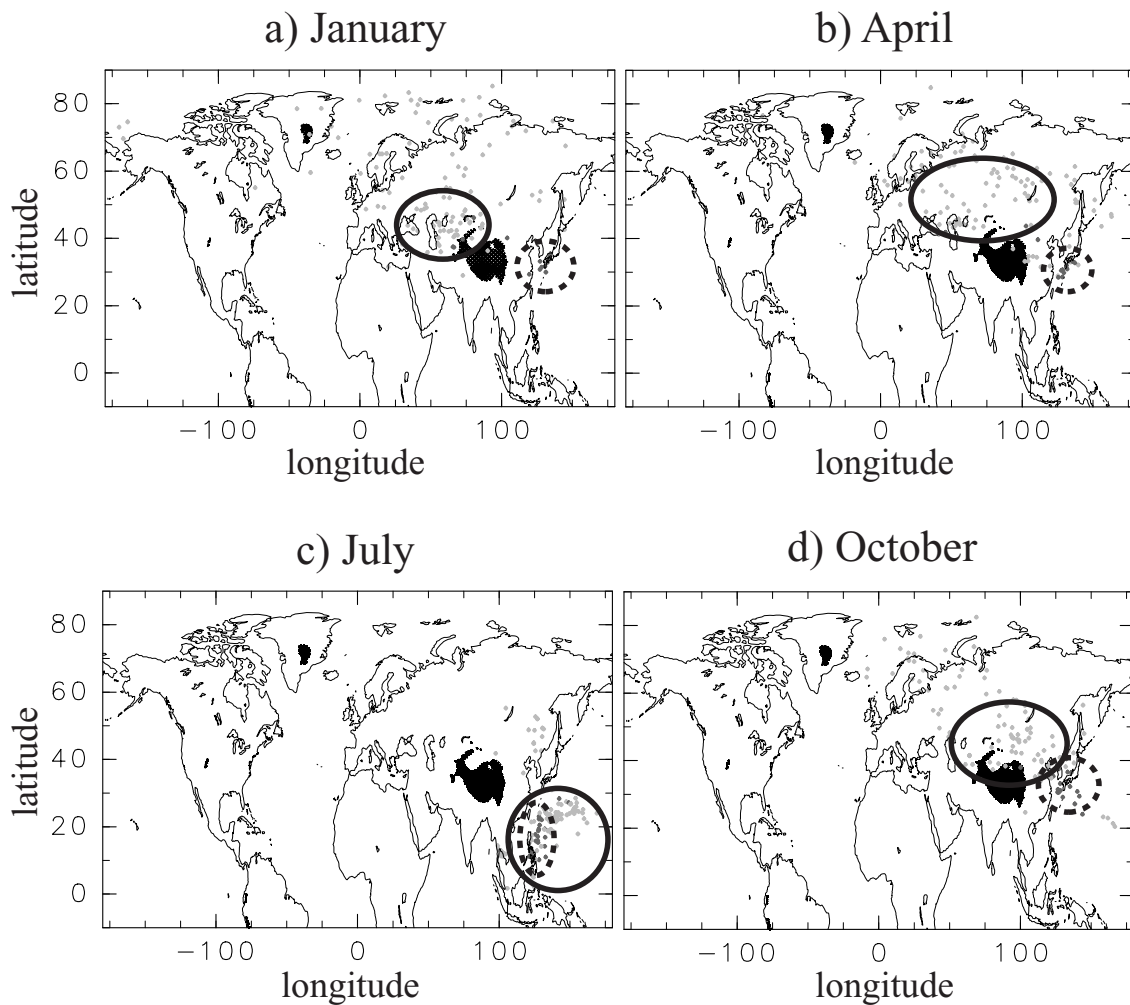


Fig.9 The major features of seven-day backward distributions of air parcel arriving at Kyushu in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001. Dotted circles indicate the area where the backward air parcels reached at level of $\sigma \geq 0.95$.

Table 1 Summary of seven-day backward distribution of air parcels arriving at Kyushu.

	Major area of 7 day backward position	
	Above ground ($\sigma < 0.95$)	Ground ($\sigma \geq 0.95$)
January 2001	Central Asia	East China Sea Western Japan
April	Central Asia West - Central Siberia	Western Japan East China Sea
July	Mid-Pacific, East China Sea, Philippine Sea, Southeast Asia	East China Sea Philippine Sea
October	North China Mongolia	East China Sea

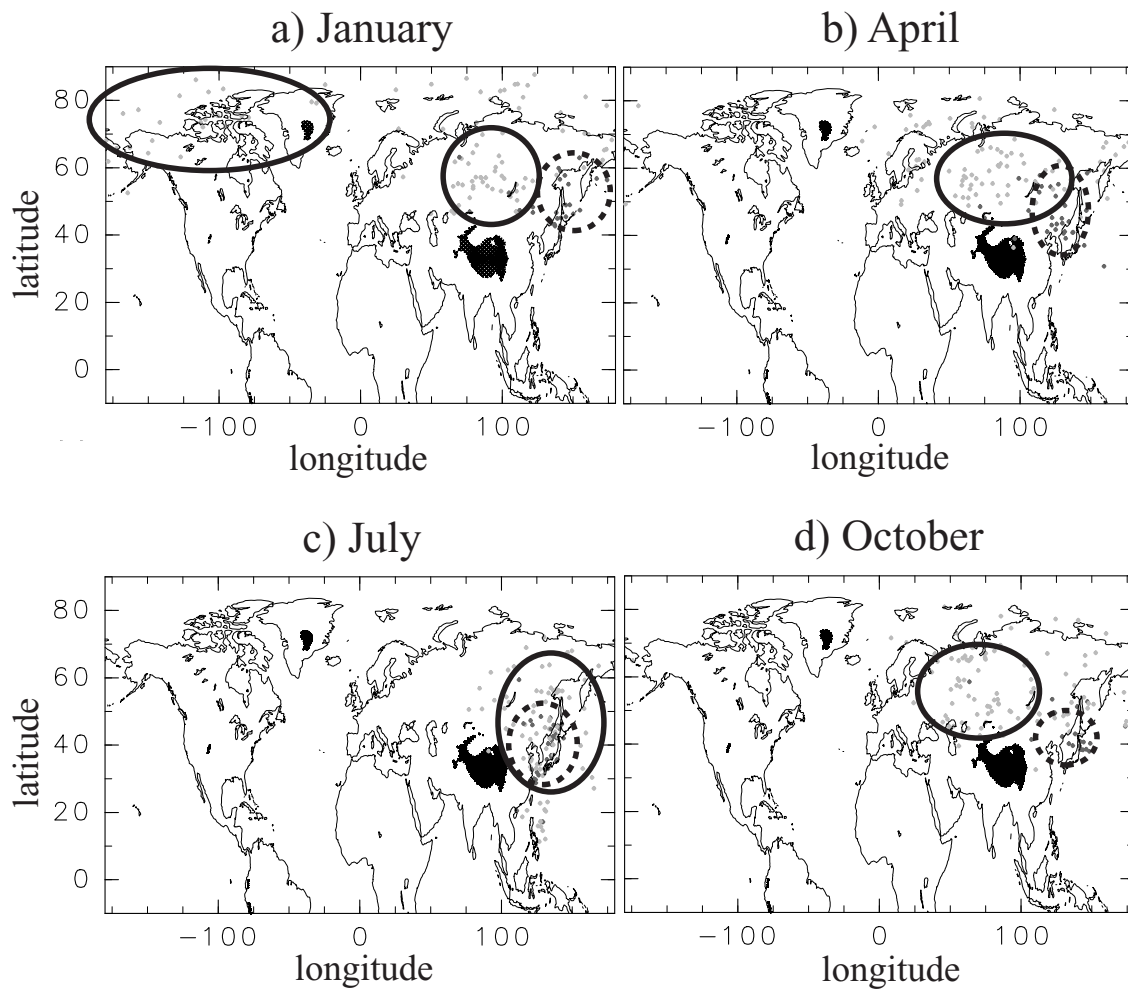


Fig.10 The same as in Fig. 7, except for Hokkaido in a) January, b) April, c) July, and d) October 2001.

Table 2 The same as in Table 1, except for Hokkaido.

	Major area of 7 day backward position	
	Above ground ($\sigma < 0.95$)	Ground ($\sigma \geq 0.95$)
January 2001	West Siberia Marine area near Alaska	Sea of Okhotsk Northern Japan
April	West - Central Siberia	Northeast China Southeastern Russia
July	Japan Northeast China	Japan Northeast China Eastern Russia
October	West Siberia	Northern Japan

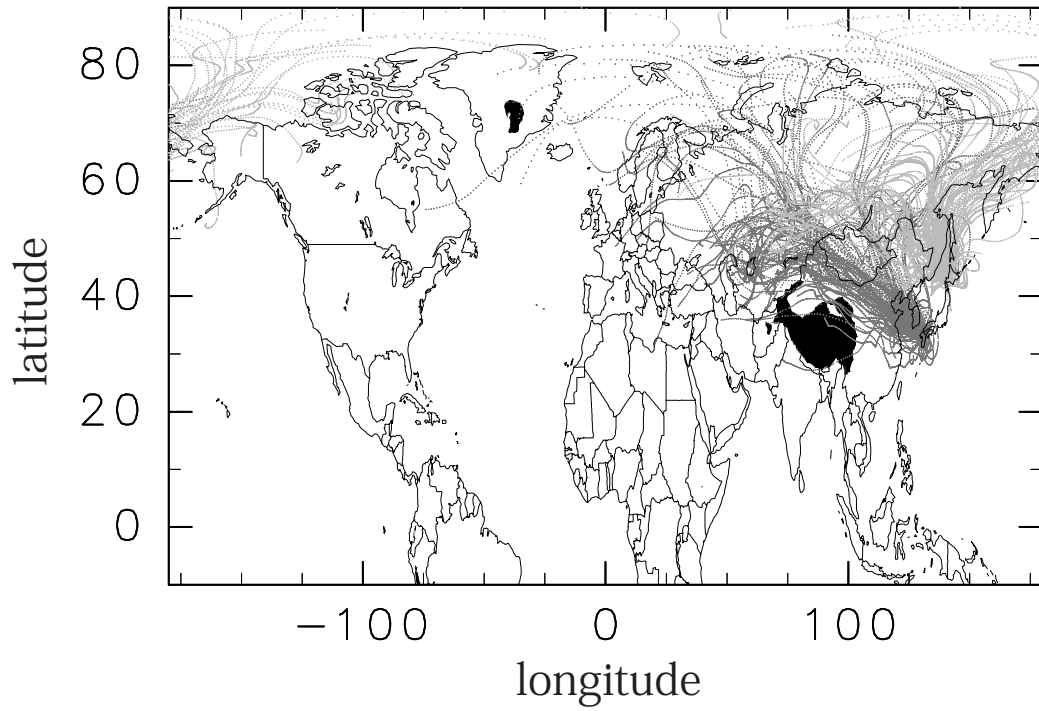


Fig.11 Seven-day backward air parcel's trajectories arriving at Kyushu and Hokkaido in January 2001.
 Dark and light grey indicate the air parcel's trajectories arriving at Kyushu and Hokkaido, respectively.

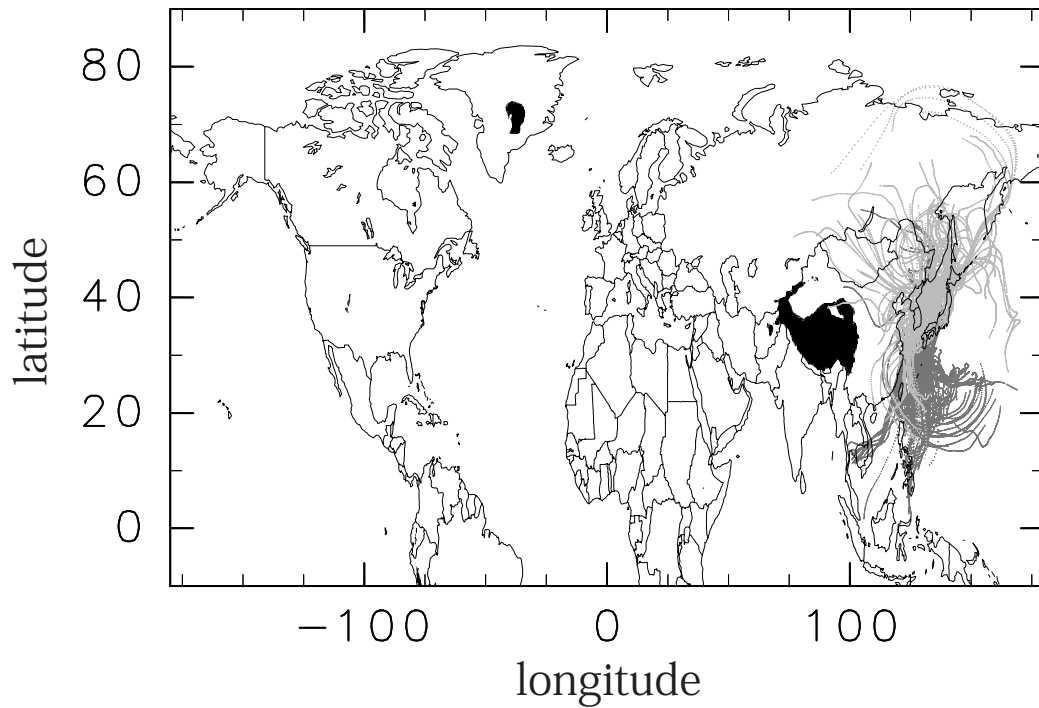


Fig.12 The same as in Fig.11, except for July 2001.

の空気塊が日本付近に輸送されるための重要なメカニズムになっている。したがって、冬季に九州と北海道に到達する空気塊の流跡線の特徴が大きく異なっていたのは、温帯低気圧が日本付近を通過することと、その結果として大陸上のシベリア高気圧が太平洋上へ流出することが主な原因と考えられる。

これに対して、夏季の九州には、太平洋、東シナ海、およびフィリピン周辺海域上からの空気塊が輸送されていたが、北海道には日本を含むアジア大陸縁辺域やロシア東部の空気塊が輸送されてきていた。この2001年7月は、太平洋高気圧が日本付近まで張り出し、その北側を梅雨前線が停滞する気象状況にあった。また、太平洋高気圧の日本付近への張り出し具合によって、梅雨前線の位置は日本付近を南北に変動していた。

九州付近で前線が停滞した場合は、空気塊がフィリピン周辺海域上や東南アジアから九州に輸送されてくる傾向にあったのに対して、九州付近が太平洋高気圧に覆われた場合、太平洋の空気塊が時計回りの経路で九州に到達していた。また、太平洋高気圧が九州まで張り出し、前線が北海道付近で停滞すると、ロシア東部の空気塊と日本を含むアジア大陸縁辺域の空気塊が北海道へ輸送される2つのパターンが認められた。しかしながら、北海道に到達する空気塊の輸送経路は、かなり複雑な前線構造の影響を受けており、森ら(1997)によって報告されている梅雨前線の北側と南側の大気質の違いに着目した詳細な解析が必要と考えられる。特に、アジア大陸縁辺域の空気塊が北海道まで輸送される時、3.3節でも触れたように、その空気塊は非常にゆっくりと輸送されていた。このようなアジア大陸東岸からの大陸性の空気塊の輸送は、太平洋高気圧の北側を流れる弱い偏西風の影響を受けていると思われる。したがって、夏季の九州と北海道の両地域に到達する空気塊の起源や輸送経路が大きく異なるのは、太平洋高気圧の張り出しとその北側を流れる弱い偏西風の南北の変動が大きき原因になっていると考えられる。

一方、春季と秋季における九州と北海道に到達する空気塊流跡線の特徴は、主にロシアや中国の大陸上から輸送されてきており、冬季や夏季のように極端に異なっていなかった。これは、日本付近がシベリア高気圧や太平洋高気圧の活動というよりも、むしろ偏西風の活動の影響を大きく受けているためと考えられるが、今後の課題として詳しく調べていきたい。

以上のことから、日本付近に到達する空気塊流跡線の季節的な特徴は、一年を通しての太平洋高気圧、シベリア高気圧、および中緯度偏西風の季節変動の影響を大きく受けていると考えられる。その結果、夏季と冬季の同じ季節内に日本の北部と南部に到達する空気塊の性質は大きく異なっていることが示唆される。

5. まとめ

本研究では、日本付近に到達する空気塊流跡線の特徴を明らかにするため、九州と北海道の上空($\sigma = 0.85$, 1400-1500m 付近)に到達した空気塊の7日間バックワード流跡線を一年分調べた。その結果、1年間に両地域の上空に到達する空気塊の起源やその輸送経路は、主に中国やロシアなどのユーラシア大陸上と太平洋上に広く分布することがわかった。両地域に到達する空気塊流跡線の特徴を季節別にみた結果、流跡線の季節変化は明瞭であった。一方、同じ季節内の両地域に到達する空気塊流跡線を比較した結果、春季や秋季と比較して、冬季と夏季の特徴が大きく異なっていた。このため、両地域は地球規模でみて非常に近い位置関係にあるが、同じ季節内に両地域に到達する空気塊の起源や経路は大きく異なることがわかった。特に、冬季の両地域に到達する空気塊流跡線の特徴の違いは、温帯低気圧が日本付近を通過することと、その結果として大陸上のシベリア高気圧が太平洋上へ流出するためと考えられる。これに対して、夏季の両地域に到達する空気塊流跡線の特徴の違いをもたらす原因は、太平洋高気圧の張り出しとその北側を流れる弱い偏西風の南北の変動と考えられる。

謝辞

本研究では、NCEP/DOE AMIP-II reanalysisのデータを使用させて頂きました。また、同研究室の西憲敬氏と濱田篤氏に他の流跡線計算との比較の結果に関して有益なコメントを頂きました。図の作成には地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリ(dc1-5.0)を使用させて頂きました。以上の各氏と各機関に御礼申し上げます。

参考文献

- 鵜野伊津志, 村野健太郎(2000): アジア大陸からの越境大気汚染に対する大気汚染物質輸送・変質・沈着モデルの適用例, 地球環境, Vol.5, No.1&2, pp.73-85.
- 森淳子, 宇都宮彬, 鵜野伊津志, 若松伸司, 大原利眞(1997): 九州北部地域におけるエアロゾル濃度の変動と高濃度エピソードの解析, 大気環境学会誌, Vol.32, No.2, pp.73-89.
- Hatakeyama, S.(2000): PEACAMPOT and PEACAMPOT II campaigns. IGAC Activities Newsletter, Vol.20, 11-14
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K, Hnilo, J.J., Fiorino, M. and Potter, G.L. (2002): NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 83, No.11, pp.1631-1643.
- Kaneyasu, N., Takeuchi, K., Hayashi, M., Fujita, S., Uno, I., and Sasaki, H.(2000): Outflow patterns of pollutants from East Asia to the North Pacific in the winter monsoon, Journal of Geophysical Research, Vol.105, No.D13, pp.17361-17377.
- Mukai, H. and Suzuki, M. (1996): Using air trajectories to analyze the seasonal variation of aerosols transported to the Oki Islands, Atmospheric Environment, Vol. 30, No.23, pp. 3917-3934.
- Osada, K., Kido, M., Iida, H., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Nagatani, M., and Nakada, H.(2003): Seasonal variation of free tropospheric aerosol particles at Mt.Tateyama, central Japan, Journal of Geophysical Research, Vol.108, No.D23, 8667, doi:10.1029/2003JD003544.
- Phillips, N.A. (1957): A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, Journal of Meteorology, Vol. 14, pp.184-185.
- Pruppacher, H.R. and Klett, J.D. (1978): Microphysics of clouds and precipitation, D.REIDEL PUBLISHING COMPANY, 714pp.
- Rahn, K.A., Lowenthal, D.H. and Marris, J.M.(1989): Long-range transport of pollution aerosol from Asia and the Arctic to Okushiri Island, Japan, Atmospheric Environment, Vol. 23, No.11, pp.2597-2607.
- Streets, D.G. and Waldhoff, S.T. (2000): Present and future emissions of air pollutants in China, Atmospheric Environment, Vol. 34, No.34, pp.364-374.
- Uematsu, M., Sugita, T., Anikiev, V.V. and Medvedev, A.N. (1992): Large-scale transport of pollution aerosol over the east coast of Asia, Geophysical Research Letters, Vol. 19, No.22, pp.2219-2221.
- van Aardenne, J.A., Carmichael, G.R., Levy, H., Streets, D. and Hordijk, L. (1999): Anthropogenic NOx emissions in Asia in the period 1990-2020, Atmospheric Environment, Vol. 33, No.4, pp.633-646.

Seasonal changes of air parcel's trajectories arriving at the Japan Area

Ryo KAZAOKA^{*} and Hideji KIDA^{*}

^{*} Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan

Synopsis

The 7-day backward air parcel's trajectories arriving at Kyushu and Hokkaido regions in boundary layer were calculated from January to December 2001. The source and transport pathway of air parcels arriving at Kyushu and Hokkaido regions for one year were widely distributed over Eurasia and Pacific Ocean, and the seasonal variability occurred. Although the Kyushu region is close to the Hokkaido region from a point view of global scale, the source and transport pathway of air parcels arriving at those area were greatly different.

Keywords: air parcel's trajectory, aerosol, dust, gas, atmospheric circulation