

オーストラリア起源ラドンの南極昭和基地への大気輸送とそのメカニズム

平沢尚彦^{1,2*}・田阪茂樹³・田口彰一⁴

An atmospheric transport mechanism of Australia-originated radon to Syowa station, Antarctica

Naohiko Hirasawa^{1,2*}, Shigeki Tasaka³ and Shoichi Taguchi⁴

(2010年2月15日受付; 2010年5月17日受理)

Abstract: Atmospheric radon (Rn) and thoron (Tn) measurement was carried out at Syowa station, Antarctica in the 2005 wintering season by JARE-46. The half life of Rn is 3.8 days and that of Tn is 55 seconds. This paper attempts to extract some cases in which the atmosphere contains a distant place originated Rn, based upon the vertical distribution of Rn and Tn. The origins of Rn in the extracted cases were specified by comparison with a global atmospheric radon transport model. While South America was the most common and frequent contributor among continents over all, the Australian continent was the major contributor in one case. The latter half of this paper examines the transport route and the effective atmospheric circulation of the Australian Rn to Syowa Station.

要旨: 南極域への大気・物質の輸送に関わる研究観測として、第46次南極観測隊において、大気のトレーサー物質であるラドン濃度、及びトロン濃度の地上観測が昭和基地で行われた。この論文では観測結果の概要をまとめ、遠方起源の高濃度ラドン大気の輸送について議論した。半減期3.8日のラドンと半減期55秒のトロンの地上付近の鉛直分布の測定値を用いて、遠方起源の可能性を持つ大気を抽出することを試みた。その結果を全球ラドン移流拡散モデルと比較し、ラドンの起源地域を推定することができた。海洋域及び南アメリカ大陸起源と推定されるケースが多い中で、オーストラリア起源と

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

³ 岐阜大学総合情報メディアセンター, Information and Multimedia Center, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu, Gifu 501-1193.

⁴ 産業技術総合研究所地球環境評価研究グループ, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569.

* Corresponding author. E-mail: hira.n@nipr.ac.jp

推定される、ラドン濃度の比較的高い事例が見いだされた。このオーストラリア起源の高濃度ラドン大気は、主にオーストラリア南東部から放出され、対流圏下層を通過して南極氷床域に広がった。氷床上では氷床表面に接するように対流圏下層を通過して昭和基地まで到達した。南極海から南極氷床上への輸送は、オーストラリア南方で発生した低気圧と、その東側において南極氷床上にまで伸びるリッジの間に形成された極向きの流れにより行われた。その直後に、南極海から氷床上に広がるリッジが2度にわたり形成され、それに伴う流れがラドンを南極氷床海岸域から内陸へ輸送した。内陸に輸送されたラドンは、リッジから切離した高気圧域内で氷床上に停滞した後、カタバ風循環によって氷床上から昭和基地付近へ輸送されたと考えられた。また、オーストラリアから昭和基地へのもう一つの経路として、比較的速い流れのある対流圏中上層を通ることによって、南太平洋、南大西洋を経る東回り輸送があり得ることも示唆された。

1. はじめに

南極域の地表面は氷床や海水で広く覆われており、エアロゾルやダストに代表される大気微量成分の発生源が少ない。そのため、南極域外から南極域にもたらされる大気微量成分の割合が地球上の他の地域のそれに比べて高い。大気微量成分は南極域に輸送された後、その一部が降水や沈着により南極氷床に取り込まれる。南極域外のどの領域の大気が、どのような経路で南極域に侵入し、南極域のどの領域に影響するのかは、その時の大気循環の状態、主に総観規模擾乱の位置や時間的変化等に密接に関連する（以後、長距離大気輸送メカニズムとする）。長距離大気輸送によって行われる熱、水、大気微量成分の南極域への注入は、直接的なエネルギーや物質の供給とともに、結果として放射収支、水循環過程に変化を引き起こすことで、南極域の気候形成に重層的に影響する。

南極氷床深層コアの分析から、南極氷床に取り込まれた物質の量が気候年代とともに変化してきたことが明らかにされている。この変動の中には、南極域のいくつかの氷床コアに共通して現れるものもあれば、限られた地域にだけ検出されるものもあることが分かってきた。すなわち、各地域に影響する主な長距離大気輸送メカニズムは、気候変化の中で、その出現頻度や影響の強さにおいて個別の変化をしてきたことが示唆される。南極氷床深層コアの掘削地点だけでなく、南極域の各地域がどのような長距離大気輸送メカニズムの影響を受けるのか、過去だけでなく現在の環境についてもまだよく分かっていない。現在の南極域において、各地域への主要な長距離大気輸送メカニズムを明らかにすることは、現在の南極域の気候の理解だけでなく、過去の南極域の大気循環の具体像を与えると考えられる。

大気の長距離輸送を追跡するために、大気のマーカーとなってその大気とともに移動する物理量や物質を利用する方法がある。そのような物質の一つがラドンである。大気中のラドンは主に陸面からの拡散により供給され、海洋表面からの供給量は陸面の100分の1の程度とされている（Wilkening and Clements, 1975; Jacob *et al.*, 1997; Taguchi *et al.*,

2002). ラドンは化学反応による化合物を作らず、水に溶けにくいいため、降水等によって大気中から除去されることがほとんどない。そのため、一旦大気中に放出されたラドンは、そこにあった大気とともに拡散しながら移動する。例えば、陸面から放出された高濃度ラドンの大気を追跡することにより、地球規模の大気の輸送を把握できることが期待されており、それを目的として全球ラドン移流拡散モデルの構築も行われている (Taguchi *et al.*, 2002; Zahorowski *et al.*, 2005; Nishizawa *et al.*, 2007; Hirao *et al.*, 2008 など)。

昭和基地は、地球規模の視点では海洋表面と雪表面に囲まれ、ラドン放出源となる陸面が極端に少ない地域である。氷床表面や海水面からのラドン放出はほとんどないとされる (Jacob *et al.*, 1997; Taguchi *et al.*, 2002)。従って、昭和基地でラドンを観測することにより、遠方の大陸表面等から放出された大気を検出できる可能性がある。それらの事例が検出されれば、全球ラドン移流拡散モデルや全球客観解析大気データを用いて時間を遡ることにより、大気の輸送経路や輸送に関与した大気循環、すなわち、個々の事例の長距離大気輸送メカニズムを明らかにすることができる。そこで、第 45 次及び 46 次南極観測隊において、昭和基地でラドン濃度 (半減期 3.8 日) 及びトロン濃度 (同 55 秒) の地上観測を行った。

一方、実際に観測されるラドン濃度は、測定地近傍の陸面からの放出の影響を大きく受ける (坂下ほか, 1996)。多くの研究で議論されてきたように (Guedalia *et al.*, 1980; Sesana *et al.*, 2003; Ikebe *et al.*, 1983; Moriizumi *et al.*, 1996; Omori *et al.*, 2009 など)、大気安定度が高い場合には、陸面から放出されたラドンは大気乱流による鉛直混合を受けにくく、地面近くの大气下層に捕捉される。地上付近のラドン濃度は高濃度になり、濃度の鉛直傾度は大きくなる。昭和基地のあるオングル島の地表面からもラドン放出がある。南極域の冬季は地表面近くの下層大気の安定度が高く、近傍の狭い発生源から放出されたラドンだけでも高濃度が発生し得る条件を満たしている。そのため、昭和基地で観測されたラドンが、近傍放出によるものか、遠方の大陸起源であるものかを識別する必要がある。そこで、本研究プロジェクトでは、昭和基地での地上ラドン濃度の鉛直分布の特徴、及び半減期の短いトロン濃度の観測結果を用いて、昭和基地に遠方起源の大気が到達した可能性のある事例を抽出する方法を検討してきた。観測データから抽出された事例について、全球ラドン移流拡散モデルと比較し、ラドンの起源地域及びその輸送経路を推定し、全球客観解析気象データの解析により大気輸送メカニズムを明らかにすることを大きな目的としている。

本論文では、第 46 次隊のラドン及びトロン観測の概況を示し、ラドンを含む大気の長距離輸送の可能性に関する検討結果を示すことを目的の一つとする。はじめに、これまでに作成された報告書等 (国立極地研究所, 2006; 田阪・松原, 2006) を引用し、観測方法 (第 2 章) 及び昭和基地地上ラドン濃度とトロン濃度の通年観測結果の概要 (第 3 章の前半) を

まとめる。第3章の後半では、観測データから遠方起源ラドンが含まれる可能性のある事例を抽出するために現在試行している方法の説明を行い、抽出結果を示す。第4章では、全球ラドン移流拡散モデルを用いて昭和基地へのラドンの輸送を計算し、観測から抽出された各事例との比較を行う。

ラドンの昭和基地への長距離大気輸送に関わる主要な大気循環を明らかにするためには、それぞれの長距離輸送事例についての気輸送メカニズムの解明を積み上げていく必要がある、それは今後の課題としたい。一方、今回の抽出事例では、オーストラリア大陸表面から放出されたラドンの輸送が見いだされている。オーストラリア大陸域からの大気・物質輸送は、昭和基地やドームふじ基地を含む東南極の西側地域への大気・物質輸送に関するこれまでの研究 (Reijmer *et al.*, 2002; Suzuki *et al.*, 2004 など) ではほとんど調べられておらず、興味深い。現状では、これについての気輸送メカニズムの知見はほとんどない。そこで、本論文では、オーストラリア大陸起源のラドンを含む大気の昭和基地への長距離大気輸送メカニズムを調べることをもう一つの目的とする。

2. 観測装置と設置状況

昭和基地でのラドン濃度、トロン濃度の測定には、Tasaka (1996), Takeuchi *et al.* (1999), Mitsuda *et al.* (2003) が、スーパーカミオカンデ実験に関連して開発した高感度検出器 (図1) を使用した。検出器の主な特徴については、国立極地研究所 (2006), 田阪・松原 (2006) にまとめられている。ラドン濃度の検出限界値は日別値で 6 mBq/m^3 である。一般に、ラドン濃度が低い海洋上で数十 mBq/m^3 程度が報告されており (Hirao *et al.*, 2008 など), 南極域での観測に有効と考えた。



図1 昭和基地観測棟に設置したラドン濃度測定装置の外観

Fig. 1. Appearance of the radon detector installed in a laboratory of Syowa Station, Antarctica.

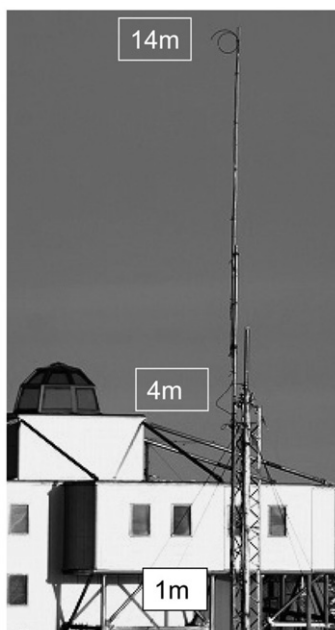


図2 昭和基地観測棟に隣接するラドン濃度測定用の大気サンプリング設備（地面からの高度1 m, 4 m, 14 m の3高度から大気引き込み）

Fig. 2. Air-intakes for radon measurement, installed at levels of 1 m, 4 m, and 14 m above ground level on the outside of the laboratory.

ラドン濃度測定用の大気取り入れ口は、昭和基地域や隣接する建物が作り出す鉛直乱流による混合の影響、また、地面からのラドン放出の影響を最小にするために、地上風の卓越風向（北東風）を考慮して、基地の北東領域にあって海岸に近い観測棟の北東面に設置された。なお、南極氷床斜面上で発達するカタバ風（斜面下降風）は、冬季に昭和基地に頻繁に達するが、その風向も北東である。今回実施する遠方起源と近傍起源との識別では、ラドン濃度の鉛直混合の状態を考慮するため（3.2節に詳細を説明）、地面からの高度1 m, 4 m, 14 m の3高度から大気を引き込み、それぞれの高度の濃度を測定した（図2）。大気引き込み口が建物の風上側（風向が北～東）にならない場合には、建物が濃度の鉛直分布に影響を与えるので、解析対象としない。

3. 昭和基地におけるラドン濃度，トロン濃度の観測

3.1. 通年観測

ここでは通年観測結果の概要を示す。より具体的な内容は、国立極地研究所(2006)、田阪・松原(2006)にまとめられている。その他、仲道(2008)により、観測結果の特徴、近傍起源のラドンに関する議論、及び昭和基地付近で採取した岩石資料のラドンに関する分析結果について詳しくまとめられている。

図3に、2005年2月20日～2006年1月31日の高度1 m, 4 m, 14 mのラドン濃度とトロン濃度の日平均値の時系列を示す。濃度の鉛直分布が建物の影響を強く受ける可能性を考慮して、その日の最大平均風速起時の風向が0-90度（北風から時計回りに東風）の場合だけをプロットした。高度1 mのラドン濃度は大きい時で500 mBq/m³、通常は100 mBq/m³程度である。日本での観測値（Omori *et al.*, 2009 など）の100分の1程度の濃度であり、近傍のラドン発生源が圧倒的に少ないことが改めて確認される。ラドン濃度が大きく増加するケースは冬季に多い。高度14 mのラドン濃度では、6-9月に100 mBq/m³を超えることが多かった。後で解析するように、高度14 mの濃度が大きくなる場合には、近傍の地面からの放出よりも遠方起源のラドンを多く含んでいる可能性がある。なお、高度1 m, 4 m, 14 mの順でラドン濃度が高いのは、大気取り込み口近傍の地表面や、少ないながら海表面から放出されるラドンが絶えず加わるためと考えられる。

トロンはその半減期の短さを反映して、ほとんどが近傍の地面からの放出と考えられる。高度1 mの濃度に比べて高度14 mの濃度の比率がラドンより小さいことも、トロンの近

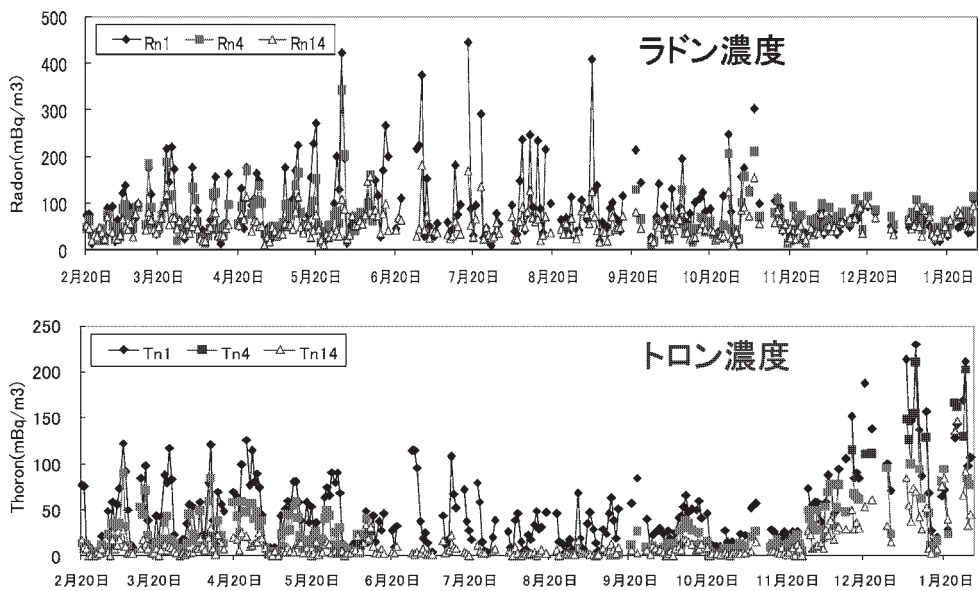


図3 高度1 m (◆), 4 m (■), 14 m (▲) の3高度のラドン濃度(上のグラフ), トロン濃度(下のグラフ)の日平均値の2005年2月20日～2006年1月31日の時系列。ただし、その日の最大平均風速起時の風向が0-90度（北風から時計回りに東風までの範囲）の場合のプロット。6月12日～9月20日は4 mの測定はない。単位は mBq/m³。

Fig. 3. Time series of daily-averaged radon concentration (upper panel) and thoron (lower panel) at the three levels (1 m: ◆, 4 m: ■, 14 m: ▲) from 2 February 2005 to 31 January 2006. The plots are done for days when the wind direction at maximum in mean wind speed met within a range from N to E clockwise. No measurement at 4 m a.s.l. was done from 12 June to 20 September.

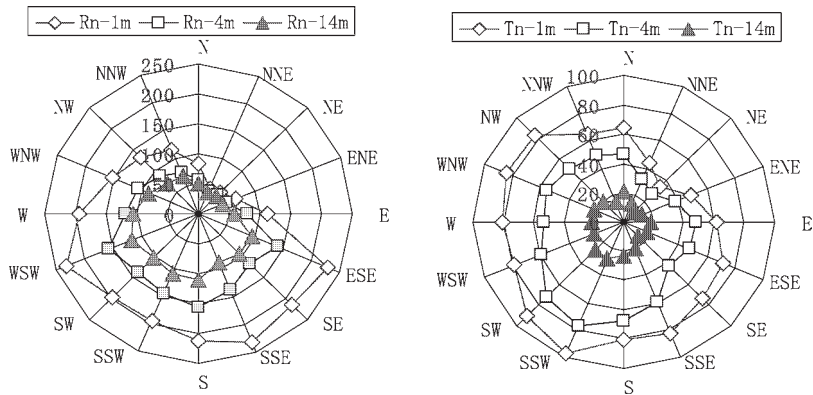


図4 高度1 m (◆), 4 m (■), 14 m (▲) の3高度のラドン濃度(左のグラフ), トロン濃度(右のグラフ)の日平均値の2005年2月20日~2006年1月31日の風向別平均値。単位は mBq/m^3 。

Fig. 4. Annual-averaged radon concentration at 16 wind-direction (left panel) and thoron (right panel) at the three levels (1 m: ◆, 4 m: ■, 14 m: ▲) from 2 February 2005 to 31 January 2006. No measurement at 4 m a.g.l. was done from 12 June to 20 September.

傍起源の比率が高いことによると考えられる。11月以降、ラドンでは高濃度イベントがほとんど見られなくなり全体的に低濃度化するのに対し、トロン濃度は3高度ともに徐々に増加した。11月以降、観測サイト周辺の積雪が減り露岩が現れてきたことが、その原因として最も考えやすい。この増加率が最も大きいのは高度14 mだった。

図4に、ラドン及びトロンの風向別の平均濃度を示す。どちらも大きな傾向は似ており、主風向である北東風を中心に平均濃度が最も低い。主風向の風上側は海岸からの距離が最も短く、近傍の地面からの放出の影響を最も受けにくいことが主な理由であろう。同じ理由で、半減期のより短いトロンの風向別濃度は、その風上側に控える東オングル島及び西オングル島の地面の(海岸までの)距離のパターンをより強く反映する。

3.2. 遠方起源ラドン事例の抽出

(a) 方法

半減期3.8日のラドンと半減期55秒のトロンの地上付近の鉛直分布の測定値を用いて、遠方起源のラドンを含む可能性のある大気の抽出を試みた。遠方でラドンが放出された大気であれば、鉛直混合がより進むことにより、濃度の鉛直傾度が小さくなる。逆に、遠方でラドン放出を受けていない大気であれば、近傍の地面からの放出の影響が強くなり、濃度の鉛直傾度が大きいと考えられる。トロン濃度は半減期が短いため、遠方起源の抽出には向かないが、近傍起源の影響を強く受けた大気を除外する材料とする。また、風速が弱い場合には近傍起源のラドンの影響を受けている可能性が高いので、風速にも閾値を設

けた。建物の影響を受けていない場合だけを対象とするために、風向が北～東(90度の風向幅)の事例を解析する。以下ではラドン濃度とトロン濃度の測定値による抽出方法を述べる。

まず、ラドン濃度及びトロン濃度の鉛直1次元分布を次の式としてモデル化する。

$$Q(z) = a \cdot \exp(-b \cdot z), \quad (1)$$

ここで、 z は地面からの高度 (m), $Q(z)$ は高度 z におけるラドン・トロン濃度 (mBq/m³), a は地表面 (高度 0 m) でのラドン・トロン濃度, b はラドン・トロン濃度の鉛直傾度に関連する定数である。

この鉛直分布は、各層間の拡散過程、崩壊過程、地面からの放出により、時間変化する。(1)式の分布では、拡散過程によって低高度層から高高度層への輸送を起こす。拡散係数 k は高度による変化がないとして、各高度におけるフラックス ((2)式, 上向きを正) 及びそれに伴う単位時間当たりの収束量 ((3)式, 収束を正) は、それぞれ次式となる。

$$-k \cdot \frac{\partial}{\partial z} Q(z) = k \cdot b \cdot Q(z), \quad (2)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(-k \cdot \frac{\partial}{\partial z} Q(z) \right) = k \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} Q(z) = k \cdot b^2 \cdot Q(z). \quad (3)$$

一方、各層のラドン及びトロンは時間とともに崩壊していくが、 λ を崩壊定数として単位時間当たりの各層の崩壊量は $\lambda \cdot Q(z)$ である。高度 z における濃度の時間変化は、この崩壊量と収束量との和で次式のように表せる。

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(z) = k \cdot b^2 \cdot Q(z) - \lambda \cdot Q(z) = (k \cdot b^2 - \lambda) \cdot Q(z). \quad (4)$$

現在の濃度の鉛直分布が定常状態 (時間変化しない状態, すなわち $\left[\frac{\partial}{\partial t} Q(z) = 0 \right])$ であるならば、全ての高度で収束量と崩壊量が釣り合って、(4)式の右辺より

$$k = \frac{\lambda}{b^2}. \quad (5)$$

観測される大気は一般に定常状態ではないので、観測値を用いて(5)式から得られるのは見かけの拡散係数である。濃度の鉛直傾度が大きければ (b の絶対値が大きいことに相当) 見かけの拡散係数 k は小さな値となり、鉛直傾度が小さければ (b の絶対値が小さいことに相当) 見かけの拡散係数 k は大きな値となる。そこで、本論文では、 k がある値 (閾値) より大きな場合を遠方起源のラドンを含む可能性の高い大気として抽出する。 k の閾値は、次節で示すように、観測結果をもとに経験的に定めた。なお、 b の逆数は濃度のスケールハイト H と定義できるが、見かけの拡散係数 k が大きな (鉛直拡散が進んだ) 大気のスケールハイト H が大きいことに対応する。

トロンは半減期が短いため上記の解析には向かないが、逆に、トロンの総量が大きな大

気は近傍での放出の影響が大きな大気と考えられる。濃度の鉛直分布を(1)式で表す時、トロン総量は(1)式を鉛直積分して求められる。単位時間当たりの崩壊量(散逸率)はトロン総量に比例し、 λ を掛けて(6)式で表せる。本論文では、散逸率が小さい場合を近傍のトロン放出の影響が小さい大気、すなわち遠方起源の性質を多く残した大気として抽出する。散逸率の閾値は、次節で示すように、観測結果をもとに経験的に定めた。

$$\lambda \cdot \int Q(z) \cdot \delta z = \frac{\lambda \cdot a}{b}. \quad (6)$$

以上のように、ラドン濃度の鉛直傾度が小さく、トロン濃度が小さい場合を、遠方起源のラドンを含む可能性の高い大気として定義する。単に大気安定度が小さくなった場合にも、ラドン濃度の鉛直傾度を小さくする効果がある。しかし、その場合、理論的にはトロン濃度の減少には寄与しないので、抽出条件には合致しないと考えられる。

(b) 抽出結果

風向が北～東であった日について、日平均の鉛直分布から求めたラドンの拡散係数と、トロンの散逸率の散布図を図5に示す。遠方起源のラドンを含む事例として、ラドンの拡散係数が $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ より大きく、かつ、トロンの散逸率が $4 \text{ mBq}/\text{m}^2/\text{s}$ より小さい値を持ち(図5の第2象限)、地上風速が $9 \text{ m}/\text{s}$ 以上の場合(図中に赤丸を付す)を抽出した。

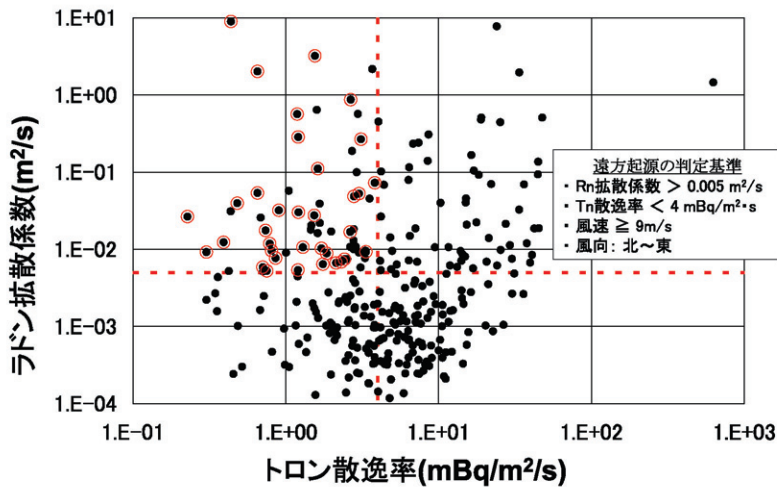


図5 2005年2月20日～2006年1月31日について、日平均の鉛直分布から求めたラドンの拡散係数とトロンの散逸率の散布図。遠方起源の抽出条件を赤色の破線で示す。ラドン及びトロンの条件を満たす事例(破線に相対的に、第2象限)のうち、風速及び風向の条件を満たす事例を抽出事例として赤丸で示す。

Fig. 5. Scatter diagram of vertical diffusion coefficient of daily-averaged radon vs. exhalation Rate of daily-averaged thoron for the period of 2 February 2005 to 31 January 2006. The two red broken lines indicates threshold values for radon and thoron. The events which meet all of the condition for distant transport are marked with red open circles.

表 1 遠方起源のラドンを含む可能性のある大気として抽出された 23 事例の代表日のラドンの拡散係数、トロン散逸率、風速（すべて日平均値）、及びその日数。トロン散逸率の“-”は、観測されたトロン濃度が低く散逸率が計算できない場合（散逸率は条件を満たす）、日数欄で“※”を付したものは、隔日で条件を満たす事例で、条件を満たす日数を示す。

Table 1. Distant-originated radon events: Date, vertical diffusion coefficient of radon (mBq/m²/s), exhalation rate of thoron (m²/s), and wind speed (m/s) on daily average. In the thoron column, “-” is given for the event when thoron was too low in concentration to estimate the exhalation rate. In duration column, “※” is given for the event when the day, meeting the condition, occurred every other day.

事例番号	発現初日	トロン散逸率 (mBq/m ² /s)	ラドン拡散係数 (m ² /s)	風速 (m/s)	最大平均 風速時の 風向	日数
# 1	2月26日	-	0.0147	17.3	NE	4
# 2	3月3日	1.20	0.0054	11.2	NE	1
# 3	3月11日	3.11	0.2671	9.7	NE	1
# 4	3月19日	1.21	0.2848	17.2	NE	4
# 5	3月28日	2.66	0.8681	11.5	NE	1
# 6	5月4日	1.54	0.0275	18.8	NE	3
# 7	5月17日	1.75	0.0064	12.1	ENE	1
# 8	5月21日	2.31	0.0069	11.4	ENE	1
# 9	5月24日	2.43	0.0075	23.5	ENE	1
# 10	6月3日	-	0.0072	22.3	NE	1
# 11	6月14日	1.85	0.0089	14.3	ENE	1
# 12	6月21日	1.62	0.1113	22.0	ENE	2
# 13	7月5日	0.75	0.0052	27.6	ENE	1
# 14	7月11日	1.30	0.0106	13.8	NE	1
# 15	7月20日	0.65	0.0536	10.5	NNE	1
# 16	8月16日	1.21	0.0302	11.3	E	1
# 17	8月24日	0.30	0.0092	10.2	NNE	1
# 18	8月28日	0.48	0.0396	21.3	ENE	※ 3
# 19	9月7日	0.86	0.0077	20.0	NE	1
# 20	9月15日	0.71	0.0059	17.1	ENE	2
# 21	9月27日	3.01	0.0526	14.2	ENE	2
# 22	10月2日	2.64	0.0168	10.7	NE	※ 2
# 23	10月24日	0.90	0.0320	11.1	NE	1

その結果、遠方起源のラドンを含む可能性のある大気として、2005年2月20日~2006年1月31日までの期間に23事例が抽出された。これらの中には、1日の事例や数日間継続する事例があった。表1にその代表日のデータを示す。また、条件を満たす日が1日だけ空けて続く場合には、同一事例とした（表の※2）。これらの事例は、総観規模擾乱の影響を受けた場合が多かった。この後、詳しく解析するオーストラリア起源のラドンの影響を受けたものは、6月21日を代表日とした2日間の事例である。

4. 抽出された遠方起源ラドン事例と全球ラドン移流拡散モデルによる起源の推定

本章では、全球ラドン移流拡散モデルの計算結果から、昭和基地へのラドンの長距離輸送を解析し、前章で抽出された23事例との比較を行う。モデルは Taguchi *et al.* (2002) 等を通して構築されてきている。ここで使ったモデルは、緯度経度格子は 1.125 度(東西 230 格子, 南北 161 格子), 鉛直 61 層からなり、時間間隔は 6 時間である。モデルに入力する気象データは ECMWF の客観解析データで、同じ格子システムである。ラドン放出条件として、これまでの議論を参考に (Wilkening and Clements, 1975; Jacob *et al.*, 1997; Taguchi *et al.*, 2002), 陸面で $1 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$ の放出, 海面で $0.01 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$ の放出を与える。ただし, 南極氷床及びグリーンランド氷床にはラドン放出源である土壌等がないため, 放出量はゼロとした。両氷床表面からのラドン放出については, 大気輸送により沈着したものが再度大気中に放出される場合が考えられるが, そこまで到達するラドン濃度の小ささと半減期を考慮すれば, 無視し得る量である。また, 南極氷床の縁辺の露岩域はラドン発生域とし

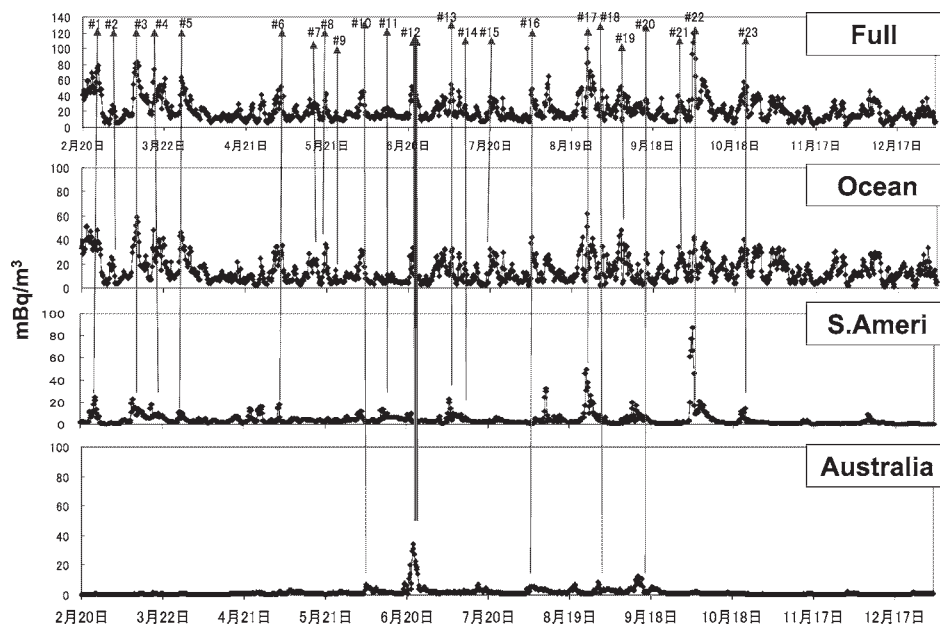


図6 全球ラドン移流拡散モデル (Taguchi *et al.*, 2002) で計算された昭和基地へのラドン輸送量の時系列。ラドンの起源別(海面, 南アメリカ大陸, オーストラリア)にも示す。観測値から抽出された遠方起源のラドンを含む可能性がある23事例の発現時期を縦線で示す。

Fig. 6. Time series of radon concentration in surface air at Syowa Station simulated by global atmospheric radon transport model constructed by Taguchi *et al.* (2002). Those of time series of radon concentration by emanation areas (Ocean, South American continent, and Australian continent) are also plotted. Vertical lines indicate the distant-originated radon events listed in Table 1.

て考慮していない。

図6に、このモデルで計算された昭和基地へのラドン輸送量の時系列を示す。輸送量は、起源域別に分けても示した。昭和基地に長距離輸送されるラドンのうち、最も頻度の高い発生源は海面である。遠方起源のラドンを含む可能性がある23事例すべてが、モデルで計算された海洋起源の極大と重なっており、その中のいくつかは、他の大陸起源のラドンの極大とも重なっている。このことにより、少なくとも23事例については、観測値からの抽出と全球ラドン移流拡散モデルの長距離輸送の予測とが適正であることを互いに示していると考えられる。

海面からの放出量は陸面に比べて顕著に小さいにもかかわらず、23事例では海面からの放出の寄与が最も大きかった。このことは、昭和基地と他の大陸との間に横たわる海面の影響が相対的に大きくなることを表しており、他の大気微量成分の発生源を考える際にも考慮すべきであろう。大陸のうちでは南アメリカ大陸の寄与が最も大きい。大陸起源のラドンが海洋起源の量に匹敵するか優っているのは、第12番、第17番、第22番の3事例だけである。このうち、第17番、第22番は南アメリカ大陸起源、第12番はオーストラリア大陸起源が卓越した。本論文の後半では、第12番の事例について詳しく解析する。

5. オーストラリア起源ラドン事例の解析

5.1. 詳細な時系列

ここでは、地上観測及び全球ラドン移流拡散モデルの解析から、昭和基地にオーストラリア起源のラドンが比較的多く輸送されたと考えられる6月21日の事例について詳しく調べる。図7に、6月20日から4日間の高度1mで観測されたラドン濃度とトロン濃度、

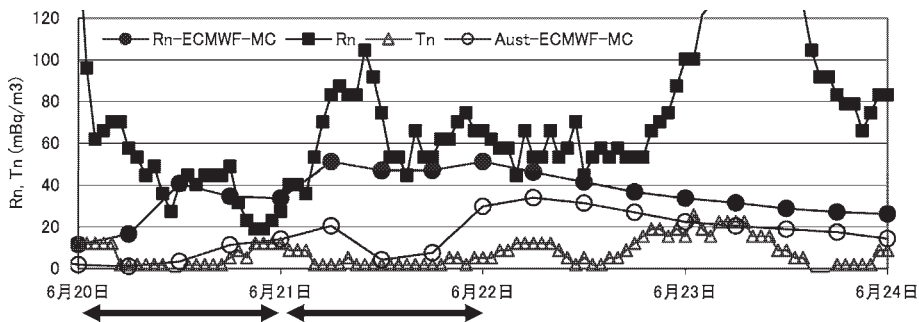


図7 2005年6月20日0000 UT~24日0000 UTの昭和基地の高度1mで観測された毎時のラドン濃度(■)、同トロン濃度(△)、モデル計算による6時間ごとの地上ラドン濃度(●)、及び同オーストラリア起源のラドン濃度(○)の時系列。

Fig. 7. Time series of hourly measured radon concentration (■) at 1 m a.g.l. and thoron (△), and 6-hourly simulated radon concentration (●) and the contribution on concentration emanated from Australian continent (○).

及び全球ラドン移流拡散モデルによる地上ラドン濃度と、オーストラリア起源のラドン濃度の時系列を示す。なお、モデルにおける地上ラドン濃度は大気の下層4層の平均であり、およそ300 m層の平均値として得られる。

20日及び21日の観測値は遠方輸送の条件を満たした。高度1 mのラドン濃度は21日の前半に約100 mBq/m³の極大を示した。この時、トロン濃度はむしろ低下し、近傍起源の大気の影響が比較的少なくなったことが分かる。22日の観測値は遠方輸送の条件には合わず、また、23日の風向は建物の影響を受ける南南西であった。ラドン濃度は2日にかけて約60 mBq/m³程度に一旦下がった後、23日に160 mBq/m³に達する極大を示した。なお、23日は東～南の風向が卓越し、測定用大気取り入れ口が建物の風下側になったため、遠方起源の判別の対象にできないが、この日はトロン濃度が増加しており、近傍起源の大気の影響が比較的大きかったと考えられる。

モデルのラドン濃度は20日から増加し、21-22日前半にかけて緩やかな極大を示し、23日にかけて減少した。オーストラリア起源のラドン濃度は、21日06 UTの約20 mBq/m³と22日06 UTの約40 mBq/m³の2回の極大を示した。20-21日は海洋起源のラドン濃度が卓越し、22日にはオーストラリア起源のラドン濃度が卓越した。

モデルで比較的高濃度のラドン輸送が現れた20-23日のうち、観測データで遠方起源の条件を満たしたのは20日と21日であった。両日ともにモデルでは海洋起源ラドンが卓越しているが、オーストラリア起源ラドンの寄与も評価されている。オーストラリア起源ラドンの寄与が卓越した22日は、ラドンの拡散係数は基準値よりやや小さい0.0013 m²/sで、トロンの散逸率は基準値よりやや大きい5.08 mBq/m²/sであるが、いずれも基準値に近い。遠方起源に関する判別は1日単位で行っているが、1 m高度のトロン濃度の時系列は22日の前半に21日と同程度の比較的低い値を示しており、より詳細な時間単位では、基準に見合う期間が見いだされる可能性が考えられる。今後、時間解像度の高い評価も必要であろう。これらは、観測値からの判別における現在の限界である。一方、モデルにおけるオーストラリア起源のラドンの輸送に遅延があった可能性も考慮すべき観点である。

なお、観測値の変動に比べてモデルの値の変動が小さくなるのは一般的傾向である(Taguchi *et al.*, 2002)。モデルが総観規模の風場を使い、格子間隔約100 km以下の構造は表現していないのに対して、実際の物質の濃度分布は、しばしば数 km程度の濃淡の構造を示すことがその理由の一つとして議論されている。

5.2. オーストラリアから昭和基地へのラドンの輸送経路

初めに、ラドンが南極域に侵入し昭和基地に達するまでの輸送経路を明らかにする。移流拡散モデルにより詳しく調べたところ、昭和基地付近に輸送されたラドンは、主にオーストラリア南東部で放出されたことが分かった。図8に、オーストラリア南東部(放出域

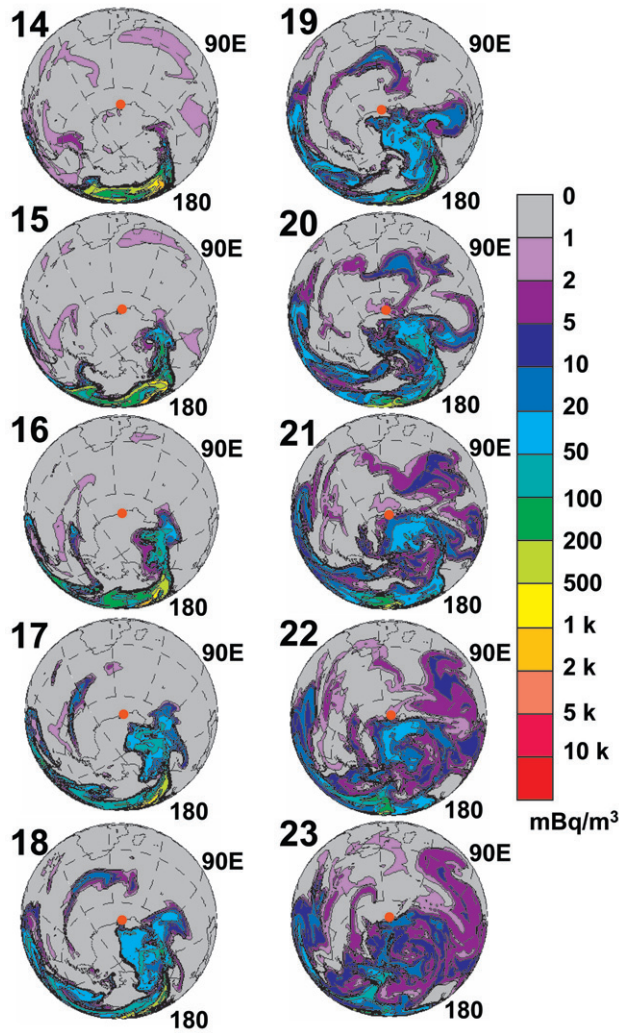


図8 オーストラリア南東部で放出 ($1 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$) されたラドンの地上分布の時系列。6月14日から23日の、いずれも00 UT。昭和基地の位置を赤丸で示す。

Fig. 8. Time sequence of distribution of surface radon concentration emanated from the south-eastern part of Australian continent at 00 UT from 14 to 23 June. The location of Syowa Station is indicated by a red closed circle.

は図10に示す)で放出されたラドンの地上分布の時系列を6月14-23日(いずれも00 UT)について示す。6月14日には、南極海域から広がる高濃度域が南極氷床の海岸域に沿った150-90°Eに分布した。この高濃度域は南極氷床内陸部に広がりながら西進し、19日には昭和基地の近傍まで達した。20日は、この西進したラドン高濃度域と、南極海上から広がる高濃度域が融合して昭和基地付近を覆った。後者は17日にアフリカ大陸の南西方の大西洋上に現れ、広がりながら東進した。これについては5.4節で改めて議論する。南極氷床上

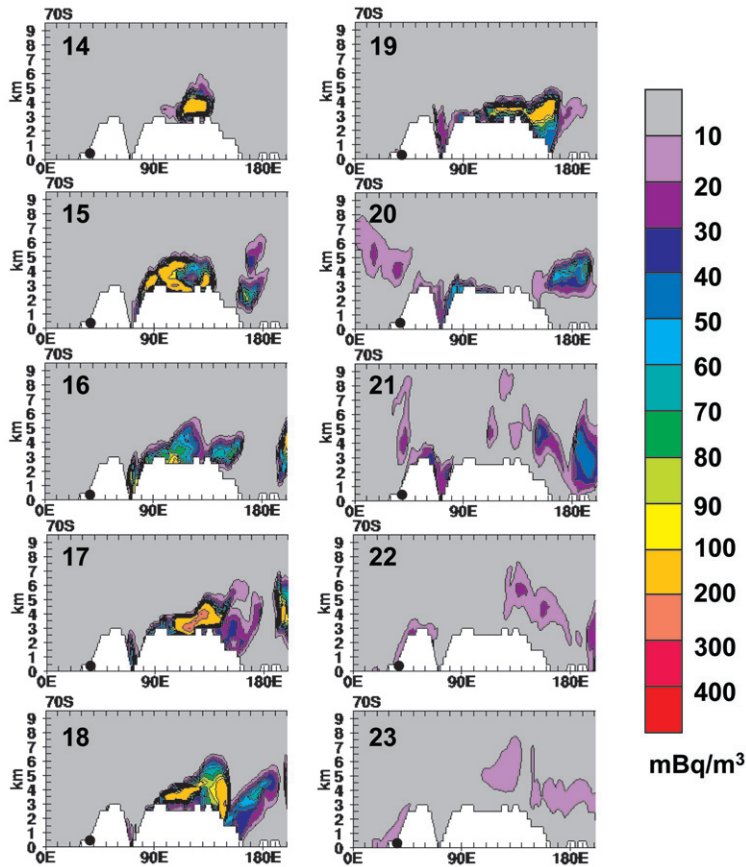


図9 オーストラリア南東部で放出 ($1 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$) されたラドンの、南極氷床海岸域 (70°S) に沿った経度-高度断面の時系列。6月14日~23日の、いずれも00 UT。昭和基地の位置 (40°E) を黒丸で示す。

Fig. 9. Time sequence of vertical-longitude section along 70°S of surface radon concentration emanated from the south-eastern part of Australian continent at 00 UT from 14 to 23 June. The location of Syowa Station (40°E) is indicated by a closed circle.

を西進したラドン高濃度域の、海岸域 (70°S) に沿った経度-高度断面の時系列を図9に示す。14日には $100\text{--}140^\circ\text{E}$ に高濃度域の中心が現れており、その後、高濃度域の西部が大陸の表面に接したまま対流圏下層に捕捉されて西に広がり、21日以降に昭和基地付近の経度帯に到達する。

20日以降も高濃度域の中心は南極氷床内陸域に停滞し、徐々に散逸した。高濃度のラドンは14日頃の一時期に限って南極海上から南極域に注入され、その後しばらくは南極域へのラドンの注入 (補給) は起こらなかった。

次に、オーストラリア南東部から放出されたラドンが南極域に注入される経路を調べる。図10に、6月11日の24時間にオーストラリア南東部から $1 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$ の割合で放出され

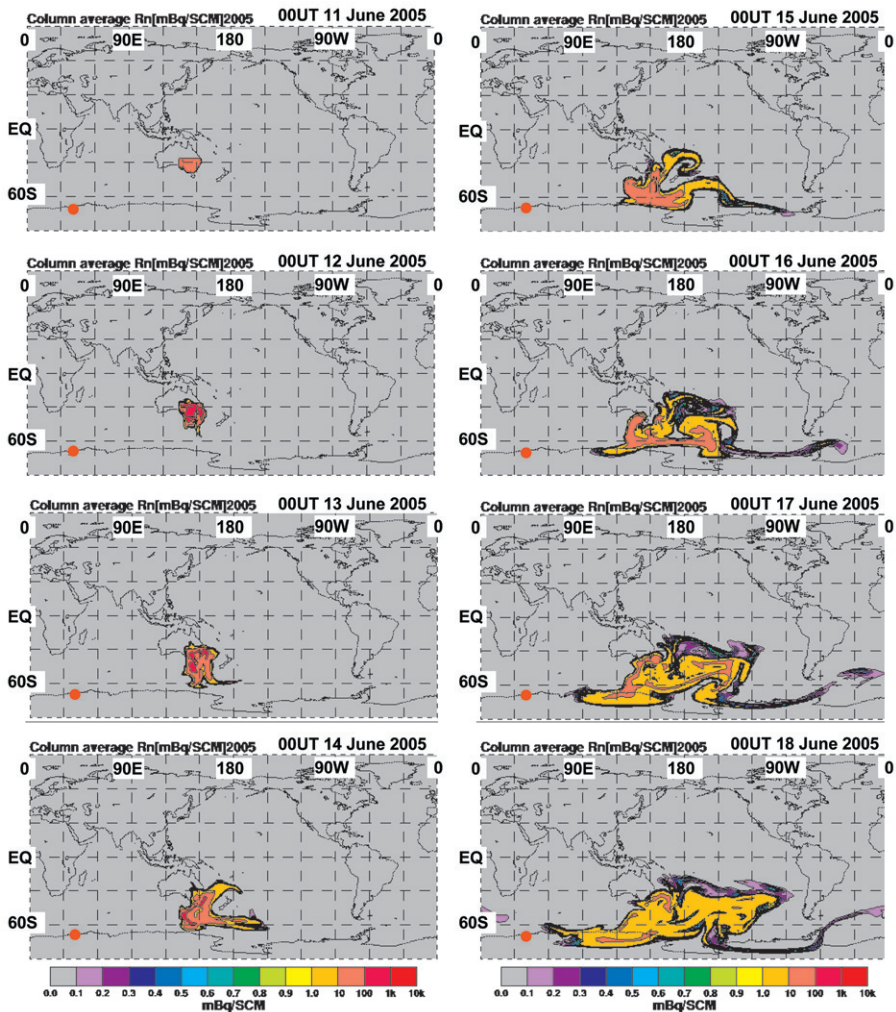


図 10 6 月 11 日の 24 時間にオーストラリア南東部から放出 ($1 \text{ Bq/cm}^2/\text{s}$) されたラドンの底面積 1 cm^2 の気柱平均量 (mBq/cm^2) の水平分布の時系列。ラドン放出域は 6 月 11 日 00 UT のラドン分布域として表される。昭和基地の位置を赤丸で示す。

Fig. 10. Time sequence of distribution of column-averaged radon concentration emanated from the south-eastern part of Australian continent at 00 UT from 11 to 22 June. The emanation is only on 11 June. The location of Syowa Station is indicated by a red closed circle.

たラドンが、昭和基地に到達するまでの水平分布の時系列を示す。この図は気柱（大気全層）の平均値である。11日に大気中に放出されたラドンは、14日までは主に対流圏下層にあって、比較的ゆっくりと南方に拡散し、14日には 140°E 付近で南極氷床沿岸部に到達している。図 8 の 14 日に $100\text{--}140^\circ\text{E}$ の海岸域に沿って高濃度域が広がっているのは、6 月 11 日以前に放出されたラドンが既に南極域に到達していたためである。しかし、11日に放出

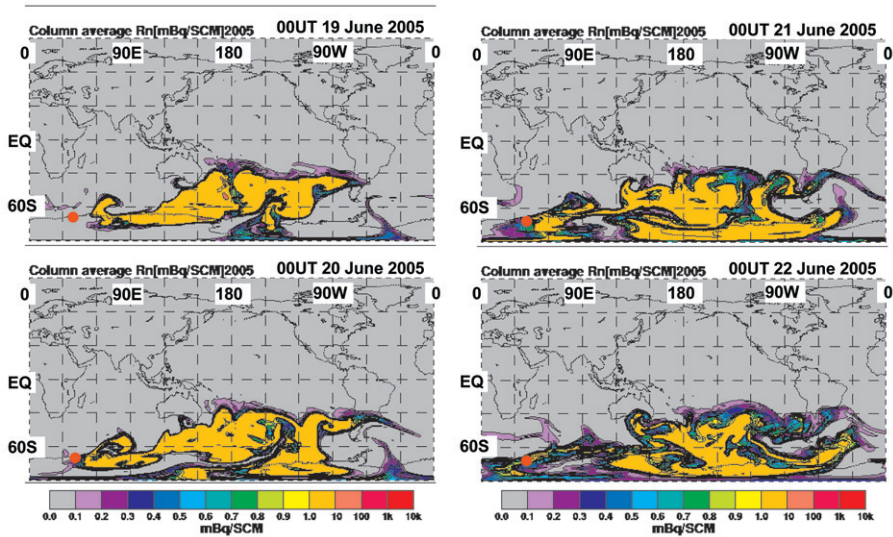


図 10 (続き)
Fig. 10. Continued.

されたラドンが昭和基地に到達するのは 20 日で、このタイミングは図 8 とほぼ同時であった。11 日より以前に放出され、先に南極域に注入されたラドンを含めて、この頃に南極域に注入されたラドンは南極氷床域に滞留していたことが図 8 及び図 11 より分かる。昭和基地に到達したのはその一部であり、大部分は昭和基地とは別の領域を通して南極氷床上から出て行ったか、または南極氷床上で散逸した。

5.3. ラドン輸送に関わった大気循環システム

ここでは、オーストラリア南東域で放出されたラドンの南極域への注入、ラドンの南極氷床内陸域への広がり、及び南極氷床上から昭和基地への輸送という 3 つの観点から、それらに関わった大気循環について議論する。

図 11 に、オーストラリア南方の南極海及び南極氷床域の 850 hPa の高度と風速の分布を、6 月 10-15 日の時系列で示す。オーストラリア南東部で放出されたラドンが南極域に向かって通過した領域 (図中に太い破線で示す) は、西に低気圧、東に高気圧があって、極向きの地衡風が形成されている。この地衡風が向かう先の南極氷床海岸域の風速場の日々の変化を追うと、10 日には南極氷床まで届かず東に転向し、11 日及び 12 日に南極氷床海岸域に向かい、13 日には再び東に転向、そして 14 日には、南極氷床海岸域に向かう流れが最も顕著になった。15 日には大陸方面から低緯度に向かう流れが卓越し、16 日以降もこの状況が続いた。したがって、図 10 で見たラドンは、14 日のこの流れによって南極氷床の海岸域へと輸送されたと考えられる。6 月 11 日より前に放出されたラドンは、11-12 日の流

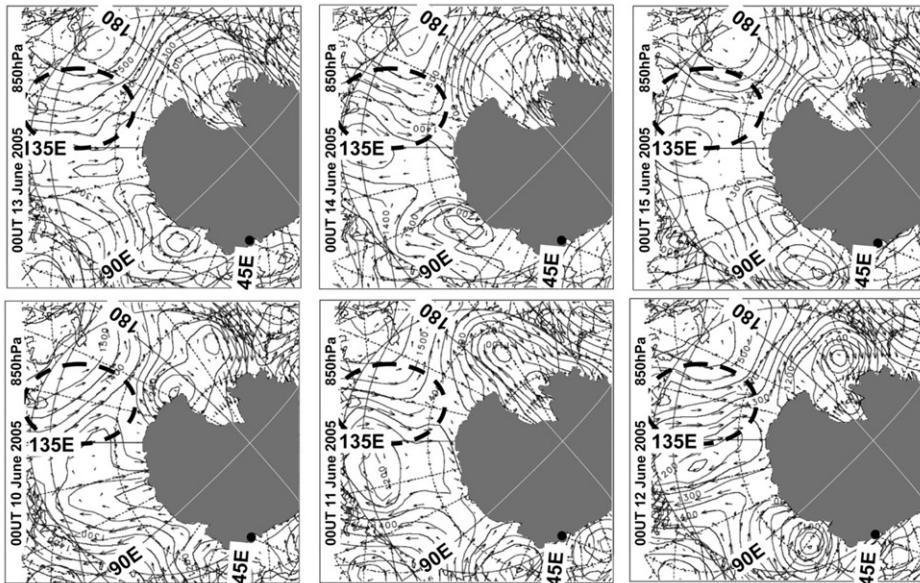


図 11 6月10-15日のオーストラリア南方の南極海及び南極氷床域の850 hPaの高度(等値線)と風速(矢印)の時系列。オーストラリア南東部で放出されたラドンが南極域に向かって通過した領域を破線で囲って示す。昭和基地の位置を黒丸で示す。

Fig. 11. Time sequence of distribution of 850 hPa height and wind vector around East Antarctica and the Southern Ocean from 10 to 15 June. The location of Syowa Station is indicated by a closed circle. The broken circle over the Southern Ocean indicates the area where the high concentration radon passes toward the Antarctic coast.

れで運ばれたと考えられる。

図 12 は図 10 と同様に、6月14日にラドンを放出した場合のモデルの結果である。15日、16日と南方に向かって拡散した後、偏西風に流されて東に向かった。11日に放出されたラドンが南極域に注入されたのに対し、わずか3日後に放出されたラドンが南極域に近づいた16日には、既に南極域に向かう流れはなかった。先に議論したように、その後少なくとも20日過ぎまでは、オーストラリア南東部で放出されたラドンの南極域への補給経路はなかったと考えられる。

次に、南極氷床海岸域に注入されたラドンが南極氷床上に広がり、昭和基地に到達するまでの大気の流れを議論するために、500 hPa 高度の時系列を図 13 に示す。6月14-16日にかけて東南極氷床の90-150°Eにリッジが現れ、それは17日まで維持された。リッジが最も明瞭になったのは15日及び16日で、これに伴う大気循環が、南極氷床海岸域に注入されたラドンを南極氷床上へ輸送したと考えられる。19-20日には別のリッジが形成された。21日にリッジの先端が切離して形成された、孤立した高気圧循環が25日まで南極氷床上に停滞した。ラドンの高濃度域はこの切離高気圧の大気循環に伴って南極氷床域に捕捉さ

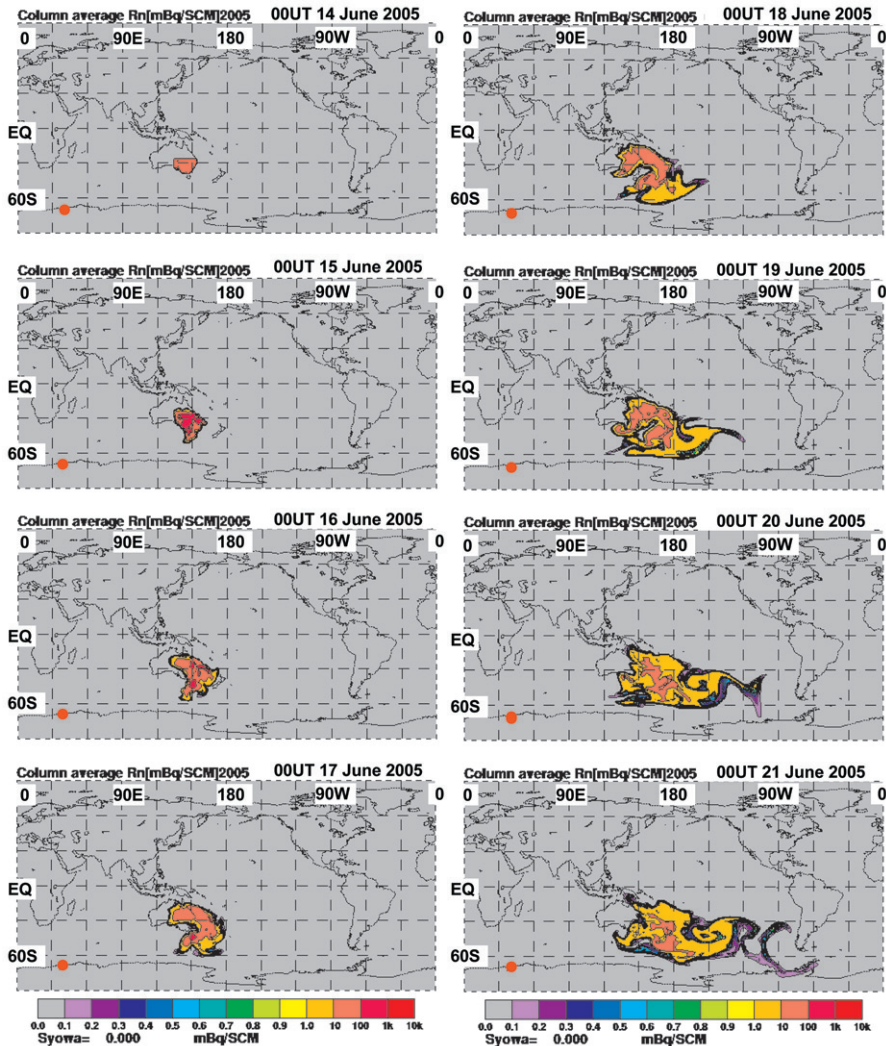


図 12 図 10 と同様。ただし、ラドンの放出は 6 月 14 日。
 Fig. 12. Similar in Fig. 10, but the emanation is only on 14 June.

れ、停滞したと考えられる。切離高気圧の縁辺部とラドン高濃度域の縁辺部は、どちらも昭和基地のすぐ東側にある。

一方、南極氷床上の大気境界層では、通常、カタバ風が形成されている。強い総観規模擾乱が南極氷床上に進入し、極向きの流れが形成された場合には、カタバ風は現れないことがある。みずほ基地で観測された冬季のカタバ風は、地上高 30 m 付近に最大風速 (30 観測事例の平均で風速 12 m/s) が現れ、地上高 700 m 付近までその影響が及んだ (Kawaguchi *et al.*, 1982)。図 13 に示される 21-22 日にかけての切離高気圧下の境界層では、南極氷床

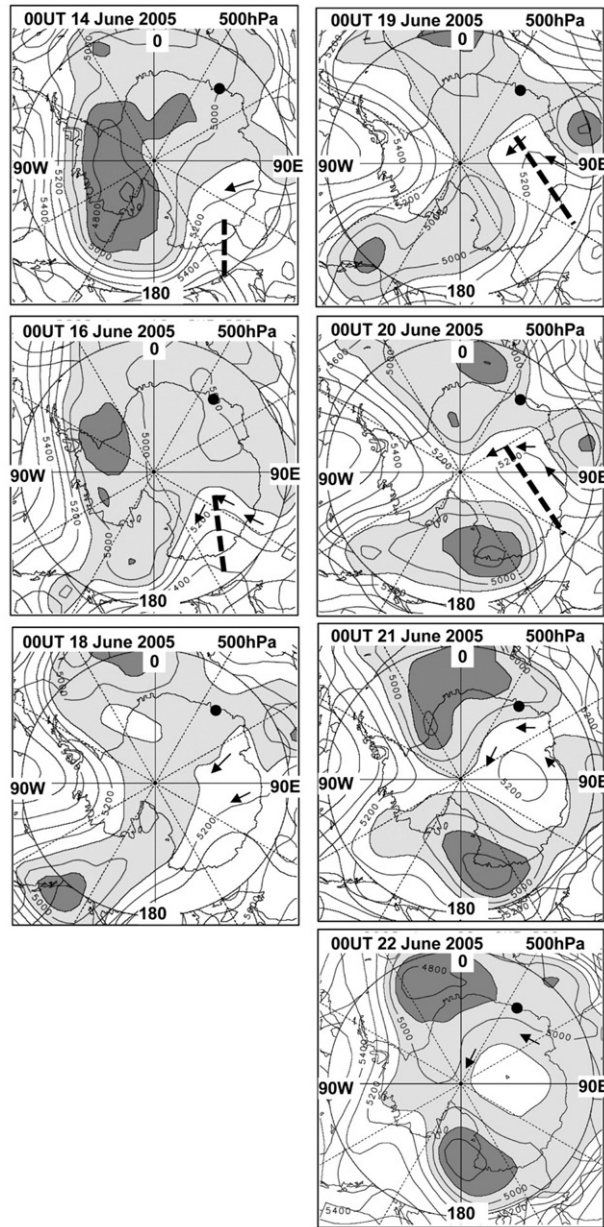


図 13 6月14-22日の南極域の500 hPa高度(等値線)の時系列。南極氷床上でのラドン輸送に関わったと考えられるリッジの位置を太い破線で、それに伴う流れの特徴を矢印で表現する。昭和基地の位置を黒丸で示す。

Fig. 13. Time series of distribution of 500 hPa height around Antarctica from 14 to 22 June. The location of Syowa Station is indicated by a closed circle. The broken line indicates ridge lines which control the radon transport over the Antarctic continent, and arrows indicate the relevant flow pattern.

上にカタバ風が発達していたと考えられる。南極氷床上に次第に広がったリッジに伴う流れにより、南極氷床の表面付近に捕捉されながら西進してきた、比較的高濃度のラドンを含む大気(図9)が、切離高気圧下のカタバ風や沿岸域に発達する東風により、昭和基地周辺に輸送されたと考えられる。

昭和基地付近の下層の大気の輸送経路を検討するために、バックワードトラジェクトリー解析を行った。図14にその結果を示す。ここでは Tomikawa and Sato (2005) により開発されたモデルと、NCEP 再解析データ(緯度経度 2.5 度格子)を用いた、 66°S - 70°S の1度ごと、 30°E - 50°E の5度ごとの格子の高度 300 m を起点とし、2005 年 6 月 22 日 00 UT~2005 年 6 月 16 日 00 UT まで遡った。なお、南極氷床の標高は海岸線から 10 km 程度の内陸側で 300 m 以上に達するので、トラジェクトリー解析の起点は設けられない。

南半球規模の視点でトラジェクトリーの分布を見ると、昭和基地の北西あるいは北側から

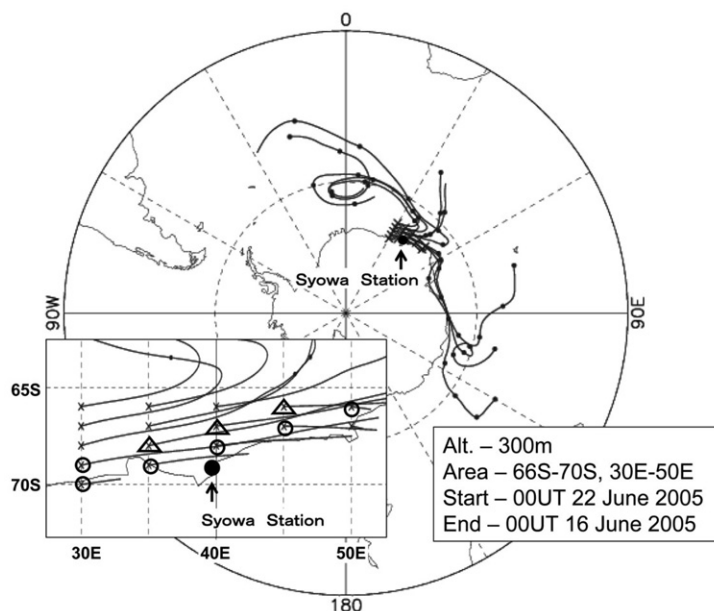


図14 2005年6月22日00UTの昭和基地付近を起点としたバックワードトラジェクトリー。起点を 66°S - 70°S の1度ごと、 30°E - 50°E の5度ごとの格子の高度300mとし、2005年6月16日00UTまで遡った。昭和基地周辺図中の、丸(○)はその起点から遡ったトラジェクトリーが氷床の表面に接地するもの、三角(△)は南極氷床の海岸線に沿った東方からの到達点をそれぞれ示す。

Fig. 14. Backward trajectories from around Syowa Station at 00 UT 22 June 2005 to 00 UT 16 June. The start points are given every 1 deg. between 66°S and 70°S , and every 5 deg. between 30°E and 50°E , altitudes of which are 300 m a.s.l. In a sub-figure, where the plot is made for around Syowa Station, open circles (○) put on starting points to which the trajectories come from the vicinity of surface of the Antarctic ice sheet. Moreover, open triangles (△) put on ones to which the trajectories come from the east along the coastal region of the Antarctic ice sheet.

到達するものと、南極氷床の海岸線に沿って東側から到達するものがある。昭和基地周辺の詳細図で、丸(○)でマークした起点から遡ったトラジェクトリは、氷床の表面に接地するためそれ以上の追跡をやめている。これらの起点は南極氷床に隣接し、南極氷床表面付近の流れ、すなわちカタバ風の影響を強く受けていることが示唆される。図中の三角(△)で示した起点には南極氷床の海岸線に沿って東側から到達しており、これもラドン輸送に関わっていると思われる。北側の起点に到達するトラジェクトリは、この事例の前半に卓越した海面起源のラドン輸送に関係すると考えられる。図には示さないが、起点時刻を遅らせるに従って、カタバ風の影響を受ける範囲が広がった。22日12 UTを起点とすれば起点の約半数が、23日00 UTではほぼ全てがカタバ風の影響を受けた。このことは、昭和基地付近の下層に輸送される大気の起源が22日00 UT頃を境に、海洋域から南極氷床上に変わったことを示唆する。

図15に、21日00 UTと22日00 UTのNOAA赤外画像を示した。21日00 UTには、海洋域から昭和基地上空を通過して総観規模擾乱に伴う雲域(低温域)がある。この雲域は、20日00 UT頃からこの領域に形成された。約2日停滞した後、22日00 UTには東に移動し、昭和基地上空には顕著な雲域は見られない。ラドン輸送に関わった下層の風系の変化は、この総観規模擾乱の変動に関連したと考えられる。総観規模擾乱に伴う大気循環とラドン輸送の関連は今後の課題である。

オーストラリア南東部から昭和基地周辺までラドンが輸送される間に、いくつかの総観

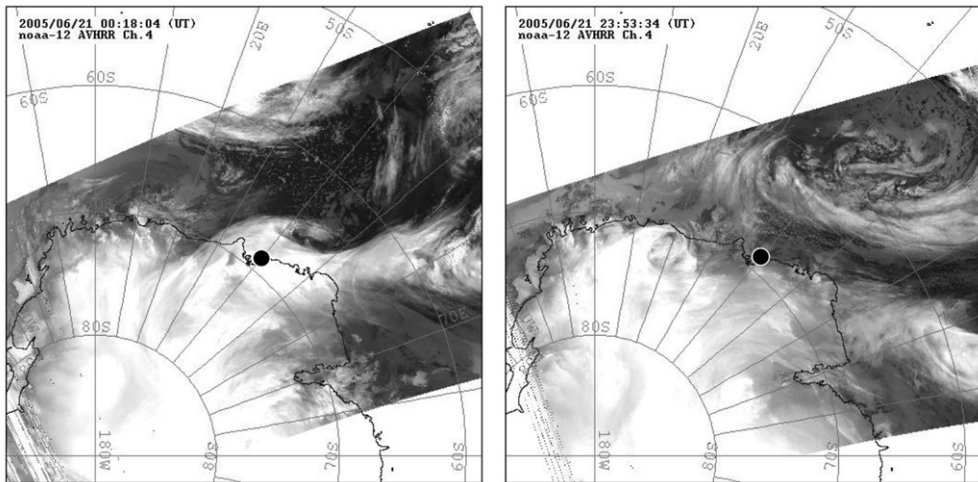


図15 2005年6月21日00 UTと22日00 UTのNOAA赤外画像。低温を白で、高温を黒のグレースケールで示す。昭和基地の位置を黒丸で示す。

Fig. 15. Infrared images at 00 UT 21 June and 00 UT 22 June. The lower temperature-areas are shown with white and the higher ones with black. The location of Syowa Station indicates with a closed circle.

規模擾乱の関わりがあった。特に最終局面の、南極氷床上からのカタバ風による昭和基地への輸送については、モデルの中のカタバ風の表現に大きく依存する可能性がある。カタバ風の最も強い風速は地上からわずか 30 m 程度の高度にあって、地上から高度約 300 m 層を 4 層で表現するモデルの輸送が実際より遅れたり、その極大が実際より小さく評価されることは考えられる。

5.4. 東回りの輸送経路

5.2. 節の図 8 で指摘した 17 日にアフリカ大陸の南西方の大西洋上に現れ、20 日に南極海上から昭和基地付近に広がった高濃度域を追うと、20 日頃に昭和基地付近に広がっている。今回の事例についてモデルの解析からは、ラドンはこの経路では昭和基地に到達してはいなかったが、昭和基地周辺への輸送経路としての機能を果たしていたので、ここでその特徴を記述する。

図 16 は図 8 と同様に、ラドンの地上と 500 hPa の濃度分布の時間変化を示す。17 日にアフリカ大陸の南西方の大西洋上の地上にラドンの高濃度域が現れたが、その上空 500 hPa にも高濃度域があることが分かる。500 hPa の時系列では、この高濃度域は 15 日に南極半島からウェッデル海上空を通過しており、17 日に昭和基地の経度帯の南極海上にあって、19 日、20 日と南に広がった。17 日に地上に現れた高濃度域は、鉛直混合により上空から輸送されたと考えられる。地上の高濃度域は 19 日、20 日とその領域を広げながら昭和基地に接近した。この際にも、500 hPa 等上空からの輸送が行われたと考えられる。実際に、図 9 の経度-高度断面の 20 日及び 21 日の 0-40°E 付近では、対流圏中上層にラドンの高濃度域が現れ、その下部が下層に広がっている。

図 17 に、図 14 と同様にバックワードトラジェクトリー解析の結果を示す。ただし高度 2500 m に起点を置いた。ほとんどは昭和基地の北西~北方の海洋上から到達する。昭和基地周辺図の白丸で示した 2 つの起点 ([45°E, 68°S] と [50°E, 67°S]) は、16-17 日に昭和基地北方の 35°E, 55°S 付近 (図中の矢印) の高度 4000 m 以上にあったトラジェクトリの到達点である。17 日の位置は、図 15 の 500 hPa での高濃度域に近い。このトラジェクトリは、時計回りの経路で南下しながら高度を下げ、昭和基地上空に到達する。もう一つ、16 日に南極半島上空の高度 3000 m 付近を高速で通過するトラジェクトリが見いだされた。これは一旦北上し、18 日前後に 0°, 50°S 付近を通り、南下して昭和基地上空の [45°E, 67°S] に到達する。これは、モデルの結果として図 16 及び図 10 で見いだされる、15-16 日に南極半島上空を通過する水平面上で非常に狭いラドン高濃度域の経路によく一致している。

起点の高度を 5000 m とした解析では、南極半島上空の狭いラドン高濃度域を通過するトラジェクトリは 4 本現れ、それぞれ [35°E, 67°S], [45°E, 67°S], [45°E, 69°S], [50°E, 68°S] に到達する (図は示さず)。これらの南極半島上空から昭和基地付近に到達する

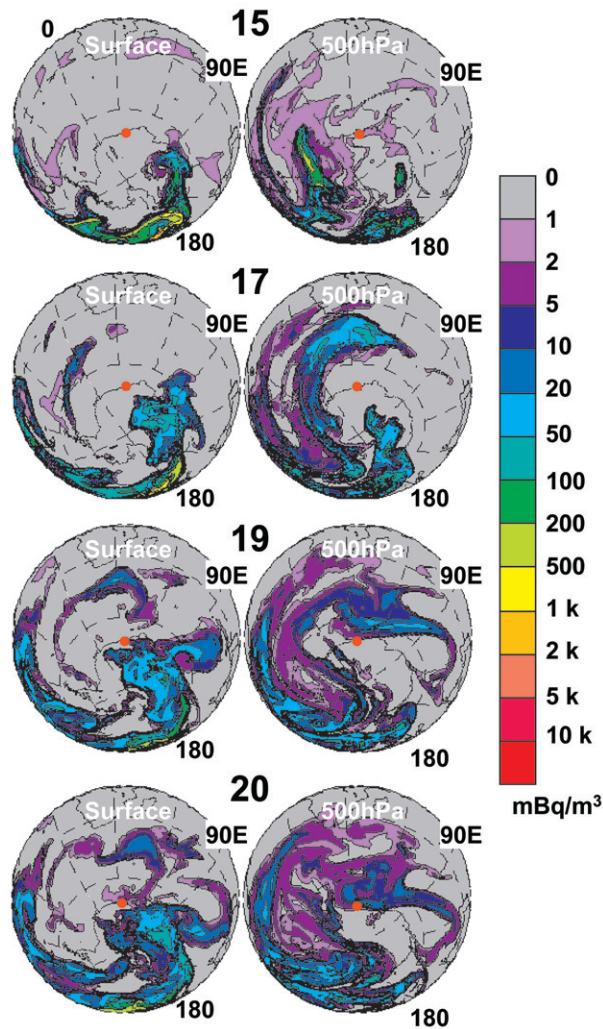


図 16 図 8 と同様。ただし、地上と 500 hPa の分布で、6 月 15 日、17 日、19 日、20 日を示す。
 Fig. 16. Similar in Fig. 8, but pairs of surface and 500 hPa, and on 15, 17, 19, and 20 June.

トラジェクトリは、図 9 の 20-21 日にかけて、ラドンの高濃度域が下降しながら南下することに対応しており、対流圏中層で昭和基地上空に高濃度ラドンを輸送する流れがあったことが示唆される。6 月 20-21 日の昭和基地付近にあった総観規模擾乱（図 15）が、南極海上を昭和基地に接近する際に大気鉛直混合が比較的活発であったと考えられる。この際、総観規模鉛直流だけでなく積雲規模の混合もラドン輸送に関与すると思われる。今回は、昭和基地付近の対流圏中上層に輸送された高濃度ラドンが、この擾乱に伴う鉛直混合によって地上付近まで輸送された解析事実は得られなかったが、このような輸送経路が成立する可能性は十分にある。

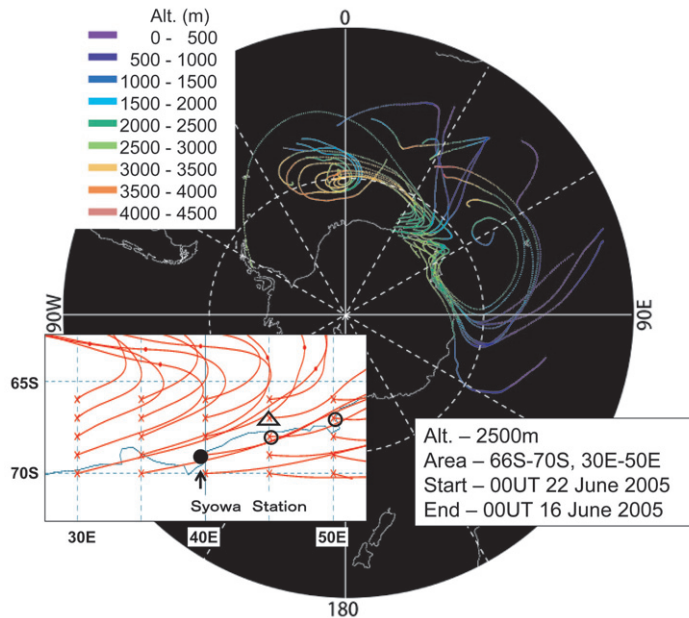


図 17 図 15 と同じ。ただし、起点の高度は 2500 m。また、トラジェクトリの高度を色別に示す。昭和基地周辺図中の、丸 (○) は 16 日、17 日に昭和基地北方の高度 5000 m 付近を通過したトラジェクトリの到達点、三角 (△) は 16 日に南極半島上空を通過したトラジェクトリの到達点をそれぞれ示す。

Fig. 17. Similar in Fig. 15, but the altitudes of the start points are 2500 m a.s.l. In a sub-figure, where the plot is made for around Syowa Station, open circles (○) put on starting points to which the trajectories come from the height level more than 4000 m to the north of Syowa Station. Moreover, open triangle (△) puts on one to which the trajectories come from over the Antarctic peninsula on 16 June.

ここで、オーストラリア起源のラドンが東に向かい、大西洋側から昭和基地に流入する東回りの経路が示された。この経路の後半については、昭和基地の北方海洋上を大きく東に回りこんで時計回りに接近する経路と、昭和基地北西方から南東進する経路の 2 種類があった。また、これらの経路は、南アメリカ起源のラドン輸送経路と類似する可能性があり、今後、さらに多くの事例解析を行いたい。東回りの輸送経路を通る場合には、10 日程度で約 20,000 km を移動する比較的速い輸送 (平均で 25 m/s 程度) が条件となる。そのためには、放出直後に速い流れのある対流圏中上層まで上昇させ、昭和基地付近で再び地上付近まで下降させる前線等の関与が、いずれの局面においても必要であろう。これらの大気循環システムがタイミングよく機能すれば、東回りの輸送経路がある。

6. ま と め

南極域への大気・物質の輸送に関わる研究観測として、第 46 次隊において、大気のトレーサー物質であるラドン濃度、及びトロン濃度の地上観測が昭和基地で行われた。高度 1 m

のラドン濃度は大きい時で 500 mBq/m³, 通常は 100 mBq/m³ 程度であり, 日本での観測値の 100 分の 1 程度の濃度であった。ラドン濃度が大きく増加するケースは冬季に多かった。トロンはその半減期の短さを反映して, ほとんどが近傍の地面からの放出と考えられた。ラドン濃度及びトロン濃度の風向別の平均濃度では, どちらも主風向である北東風を中心に平均濃度が最も低く, 主風向の場合に海岸からの距離が最も短く, 近傍の地面からの放出の影響を最も受けにくいことが主な理由と考えられた。

半減期 3.8 日のラドンと半減期 55 秒のトロンの地上付近の鉛直分布の測定値, 及び地上風の測定値を用いて遠方起源の可能性を持つ大気を抽出することを試みた。全球ラドン移流拡散モデルにおける昭和基地でのラドン濃度の極大が, 抽出された 23 事例に比べて 1 日程度の時間差で現れた。このことから, モデルのラドン輸送の推定と, 地上観測からの遠方起源事例の抽出が互いに検証されたと考えている。一方, 地上観測からの遠方起源事例としては抽出されなかった期間でも, 昭和基地には海洋表面から放出された比較的高濃度のラドンが, より頻繁に到達していることがモデルから示唆された。

起源となる大陸のうち, 最も頻度が高かったのは南アメリカ大陸であるが, 数は少ないながらオーストラリア起源のラドンが昭和基地に到達した事例も示唆された。オーストラリア起源のラドンが大気中で卓越したと推定された 6 月 21 日前後の事例について, 大気への放出地域, 輸送経路, 輸送に関わった大気循環システムについて解析した。このオーストラリア起源の高濃度ラドン大気は, 主にオーストラリア南東部から放出され, 対流圏下層を通過して南極氷床域に広がった。氷床上では氷床表面に接するように対流圏下層を通過して昭和基地まで到達した。南極海から南極氷床上への輸送は, オーストラリア南方で発生した低気圧と, その東側にあつて南極氷床上にまで伸びるリッジの間に形成された極向きの流れにより行われた。その直後に, 南極海から氷床上に広がるリッジが 2 度にわたり形成され, それに伴う流れがラドンを南極氷床海岸域から内陸へ輸送した。内陸に輸送されたラドンは, リッジから切離した高気圧域内で氷床上に停滞した後, カタバ風循環によって氷床上から昭和基地付近へ輸送されたと考えられた。また, オーストラリアから昭和基地へのもう一つの経路として, 比較的速い流れのある対流圏中上層を通過することによって, 南太平洋, 南大西洋を経る東回りの輸送があり得ることも示唆された。この場合, 10 日程度で約 20,000 km を移動する比較的速い輸送 (平均で 25 m/s 程度) が条件となる。そのため, 放出直後のラドンを速い流れのある対流圏中上層まで上昇させ, 昭和基地付近で再び地上付近まで下降させる前線等の総観規模擾乱が, それぞれの局面でタイミングよく関与する必要がある。

謝 辞

本研究観測は, 第 45-47 次日本南極地域観測隊において継続して実施された。各隊次に

おいて協力いただいた隊員諸氏に感謝いたします。特に、第45次隊及び第47次隊で観測を担当し、貴重な助言と設置・撤収の労をいただいた長田和雄氏、ならびに矢吹正教氏に深く感謝いたします。

文 献

- Guedalia, D., Ntsila, A., Druilhet, A. and Fontan, J. (1980): Monitoring of the atmospheric stability above an urban and suburban site using sodar and radon measurements. *J. Appl. Meteorol.*, **19**, 839-848.
- 林 政彦 (2001): Optical particle counter による対流圏・成層圏エアロゾルの観測. *エアロゾル研究*, **16**, 118-124.
- Hirao, S., Yamazawa, H., Moriizumi, J., Yoshioka, K. and Iida, T. (2008): Development and verification of long-range atmospheric radon-222 transport model. *J. Nucl. Sci. Technol.*, Suppl. **6**, 166-172.
- Ikebe, Y., Kojima, S. and Shimo, M. (1983): On the origin and transport of Rn-222 in the atmosphere. *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **3**, 51-54.
- Jacob, D.J., Prather, M.J., Rasch, P.J., Shia, R.-L., Balkanski, Y.J., Beagley, S.R., Bergmann, D.J., Blacksher, W.T., Brown, M., Chiba, M., Chipperfield, M.P., de Grandpré, J., Dignon, J.E., Feichter, J., Genthon, C., Grose, W.L., Kasibhata, P.S., Köhler, I., Kritz, M.A., Law, K., Penner, J.E., Ramonet, M., Reeves, C.E., Rotman, D.A., Stockwell, D.Z., Van Velthoven, P.F. J., Verver, G., Wild, O., Yang, H. and Zimmermann, P. (1997): Evaluation and intercomparison of global atmospheric transport models using ²²²Rn and other short-lived tracers. *J. Geophys. Res.* **102** (D5), 5953-5970.
- Kawaguchi, S., Kobayashi, S., Ishikawa, N. and Ohata, T. (1982): Aerological soundings of the surface boundary layer at Mizuho Station, East Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue, **24**, 77-86.
- 国立極地研究所 (2006): 日本南極地域観測隊第46次隊報告. 東京, 国立極地研究所, 273-283.
- Mitsuda, C., Kajita, T., Miyano, K., Moriyama, S., Nakahata, M., Takeuchi, Y., Tasaka, S. (2003): Development of super-high sensitivity radon detector for the Super-Kamiokande detector. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **497**, 414-428.
- Moriizumi, J., Nagamine, K., Iida, T. and Ikebe, Y. (1996): Estimation of areal flux of atmospheric methane in an urban area of Nagoya, Japan, inferred from atmospheric radon-222 data. *Atmos. Environ.*, **30**, 1543-1549.
- 仲道真也 (2008): 南極昭和基地におけるラドン及びトロン散逸率の評価. 名古屋大学, 56 p. 修士論文.
- Nishizawa, M., Nagai, H., Chino, M., Moriizumi, J., Yoshioka, K., Ohkura, T., Yamazawa, H., Iida, T., Mukai, H., Tohjima, Y., Oda, N. and Shimano, F. (2007): Development of three-dimensional numerical model for ²²²Rn and its decay products coupled with a mesoscale meteorological model I: model description and validation. *J. Nucl. Sci. Technol.* **44**, 1458-1466.
- Omori, Y., Tohbo, I., Nagahama, H., Ishikawa, Y., Takahashi, M., Sato, H. and Sekine, T. (2009): Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality. *Radiat. Meas.*, **44**, 1045-1050.
- Reijmer, C.H., van den Broeke, M.R. and Scheele, M.P. (2002): Air parcel trajectories and snowfall related five deep drilling locations in Antarctica based on the ERA-15 dataset. *J. Climate*, **15**, 1957-1968.
- 坂下哲哉・村上俊行・飯田孝夫・池辺幸正・茅野政道・鈴木國弘 (1996): 3次元局地拡散モデルを用いた大気中ラドン濃度の日変動シミュレーション. *保健物理*, **31**, 161-168.
- Sesana, L., Caprioli, E., Marazzan, G.M. (2003): Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *J. Environ. Radioactiv.*, **65**, 147-160.
- Suzuki, K., Yamanouchi, T., Hirasawa, N., Yasunari, T. (2004): Seasonal variation of air transport

- in the Antarctic and atmospheric circulation in 1997. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **18**, 96-113.
- Taguchi, S., Iida, T., Moriizumi, J. (2002): Evaluation of the atmospheric transport model NIRE-CTM-96 by using measured radon-222 concentrations. *Tellus*, **54B**, 250-268.
- Takeuchi, Y., Okumura, K., Kajita, T., Tasaka, S., Hori, H., Nemoto, M., Okazawa, H. (1999): Development of high sensitivity radon detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **421**, 334-341.
- Tasaka, S. (1996): Development of a new radon detector for use in the Superkamiokande experiment. *ICRR Annu. Rep. (Apr. 1994-Mar. 1995)*, 36-39.
- Tomikawa, Y., Sato, K. (2005): Design of the NIPR trajectory model. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **19**, 120-137.
- 田阪茂樹・松原正也 (2006): 超高感度ラドン検出器を用いた海洋環境中のラドン濃度連続観測. 129. (科学研究費補助金 (基盤研究(B)) 研究成果報告書; 平成 16-17 年度).
- Wilkening, M.H., Clements, W.E. (1975): Radon 222 from the ocean surface. *J. Geophys. Res.*, **80**, 3828-3830.
- Zahorowski, W., Chambers, S., Wang, T., Kang, C.-H., Uno, I., Poon, S., Oh, S.-N., Werczynski, S., Kim, J., Henderson-Sellers, A. (2005): Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites. *Tellus*, **57B**, 124-140.