

ベリリウム7 (^7Be) で見る南極大気循環 —成層圏 - 対流圏交換過程を明らかにする観測研究—



中村 琢
(岐阜大学)



平沢 尚彦
(国立極地研究所)

1. はじめに

地球大気は、高度に応じて対流圏、成層圏、中間圏、熱圏へと層構造をなす。そのうち対流圏は地表から約10~15kmを占め、雲や降水を含む多くの気象現象がここで起こる。一方で、その上に位置する成層圏は鉛直方向に安定であり、上下の混合は起こりにくい。しかし現実の大気は、ジェット気流の蛇行や重力波、スケールの異なる擾乱などを通じて、成層圏と対流圏の間で頻繁に物質と運動量のやり取りを行っている。これが成層圏 - 対流圏交換 (Stratosphere-Troposphere Exchange, STE) である。STE は、オゾンやエアロゾル、放射性核種の広域分布に影響し、放射収支や気候の変動にも関与するため、その頻度、強度、経路を観測により定量化することが重要である。

STE の直接観測は容易ではない。上層の空気塊がどこから来て、どの高さを経て、どのくらいの時間スケールで地表付近へ到達するのかを示す「目印」が必要になる。宇宙線生成核種であるベリリウム7 (^7Be) は、その役割を担う代表的トレーサである。 ^7Be は宇宙線が上層大気中の酸素・窒素原子核に衝突する核反応で生成され、半減期は約53日である (Arnold & Al-Salih, 1955)。生成直後に大気中微粒子 (エアロゾル) へ付着して輸送され、降水によって効率的に除去される。上部対流圏での新規生成が多少あるが、地表付近で ^7Be 濃度が高い場面は、成層圏で生成された空気塊が

下降してきた証拠となる。半減期が2か月弱であることから、 ^7Be は「数日~数十日」の時空間スケールで起こる大気輸送と混合を反映する点で有用である。

^7Be 濃度は両半球の中緯度で多く、低緯度及び極域に向かって減少する特徴がある (Zhang et al., 2021)。南極域からは比較的高い濃度が報告されており、北極域とは異なる。南極域で高濃度になる原因の一つは極渦と呼ばれる極地域を広く覆う低圧域における下降気流の可能性が言及されている (Sanak et al., 1985)。広大な氷床は夜間に強く冷却されるため、密度の高い冷気が地形に沿って沿岸へと吹き下ろすカタバ風が発達しており、このカタバ風が成層圏から下降した ^7Be を沿岸域へ輸送する役割を果たしていることも考えられる。これらの大気循環が重なり合う南極で ^7Be を測ることは、成層圏起源物質がどのように地表近傍へ達するかを解明するうえで強力なアプローチとなる。

本稿では、日本南極地域観測隊 (JARE) 第56次 (2014/15)、第58次 (2016/17)、第59次 (2017/18) の夏季観測で取得した地上大気中 ^7Be 濃度データをもとに、南極インド洋セクターにおける時空間変動を解析した成果を紹介する (Hirasawa, et al., 2025)。対象は、南大洋航路上のトランセクト観測、昭和基地 (Syowa)、沿岸氷床上のS17拠点である (図1)。本研究の目的は、(1) 南大洋から沿岸へ至る空間分布の特徴、(2) 数日スケールの

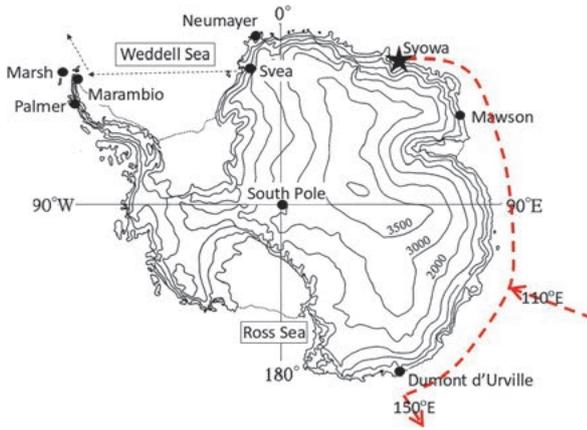


図 1 (a)

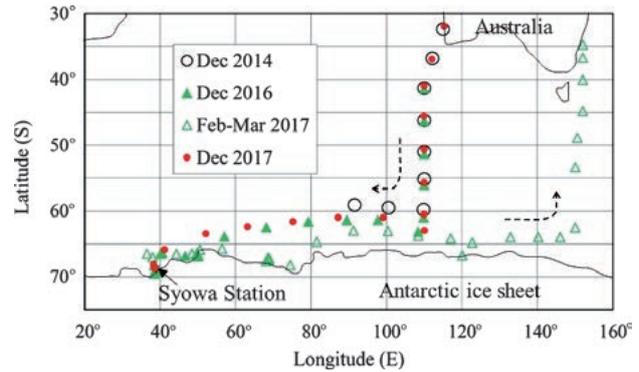


図 1 (b)

図 1 (a) 南極域における観測点の位置としらせのおおよその行路 (赤の破線)。黒の丸印は過去の⁷Be の観測が行われた地点を, 黒の星印は昭和基地を示す。(b) 3回の夏季航海期間におけるしらせ船上での全採取地点の位置を示す。

変動に基づいた総観規模擾乱¹に伴う大気循環との関係, (3) S17拠点における日周期変動に基づいたカタバ風の役割を明らかにし, 南極域における成層圏-対流圏交換過程の理解を深めることである。

2. 観測の概要と方法

観測は, しらせ航路, 昭和基地, S17拠点を移動し, 地上で連続的にエアロゾル試料を採取した。航路観測は観測船しらせが南大洋を航行する, 概ね35° -70° S, 40° -150° E の範囲を往復するトランセクトに沿って行われ, ストームトラック (総観規模擾乱が頻繁に発現する領域) を南北に横切る。これにより, 南緯30° 付近から70° 付近までの海上における⁷Be 濃度の空間分布が得られる。昭和基地は69.0° S, 39.6° E に位置する南極沿岸の拠点で, 大気・雪氷などの連続観測が実施されている。S17拠点は昭和基地の東方に位置し, 海岸から約20km 内陸に入った標高約600m の氷床上にあり, 大陸斜面を吹き下りてくるカタバ風の影響を捉えるのに適している。

エアロゾル試料はガラス繊維フィルタ (GB-100R) を装着した吸引式のハイボリュームエアサンプラー (HV-500F) で捕集した。フィルタ交換

は原則として毎日同時刻に行い, 採取開始・終了時刻を記録した。他に気象条件, 海氷の状態, 船速・方位などの記録がある。標準設定は流量約800L/min, 連続23時間運転で, 1枚のフィルタあたり約1100m³の空気を処理する。S17拠点ではカタバ風の日周期変動の影響を捉えるために11.5時間運転として約550m³を確保した。捕集直後のフィルタは密封保管し, 低温・遮光の管理下で日本へ輸送した。輸送や国内における順次分析により, 採取から分析まで最長80日程度を要することがある。もともと濃度の低い⁷Be がこの期間でさらに減衰し低濃度となるため, 測定技術が決定的に重要になる。

測定および分析は岐阜大学放射性同位元素実験分野と名古屋大学アイソトープ総合センターで実施し, 高純度ゲルマニウム半導体検出器により⁷Be の特性ガンマ線 (477.6keV) を定量した。1試料の測定時間は約5-12時間, 計数統計誤差は概ね10%以内である。バックグラウンドは鉛遮蔽下で評価し, 検出効率は標準線源で校正した。試料ごとに自己吸収補正とバックグラウンド補正を行い, 統計誤差と系統誤差を併せて評価した。フィルタの輸送・保管中の放射能減衰は半減期補正により採取時濃度へ換算した。気象場との対応付け

¹ 総観規模擾乱は水平スケールが数1000km, 時間スケールが一週間程度の大気循環システムであり, 移動性の低気圧や高気圧がその典型。

には、観測地点の地上気象に加え、ERA-Interimなどの再解析データを用い、降水、等温位面、総観規模の高気圧・低気圧の位置や動態、ジェットコアの位置などを参照した。ERA-Interimは、観測データと物理モデルを組み合わせることで過去の大気の三次元分布を再構成したデータであり、気温、風速、湿度、気圧、降水量などの変数が6時間ごとに得られる。本研究ではこれを利用して、観測点上空の対流圏界面高度や成層圏起源の空気塊の下降の有無を解析した。これにより、濃度変動の背後にある力学過程を同定した。

品質管理として、ブランク試料の定期測定、重複サンプリングによる再現性確認、検出限界（数 10^{-1} mBq/m³オーダー）の明示、採取体積の流量補正などを実施した。これらの手順により、航路・昭和基地・S17拠点の系列間で比較可能な⁷Be濃度データセットを構築した。データは極地研究所の学術データベースより公開されている（Hirasawa et al., 2022, 2025）。

3. 結果

この章では、観測で得られた⁷Be濃度の変化について、いつ、どこで、どのように変動したのかを順に示し、その解釈を気象の再解析データと照らし合わせて説明する。

3.1 南大洋トランセクトの空間分布と短期変動

観測船「しらせ」によってオーストラリアと南極の南大洋を南下・北上した観測では、中緯度域において⁷Be濃度が比較的高く、南極域に向かって濃度が低下する傾向があった。降水時には一時的に濃度が低下しており、降水による除去が推察された。これらはこれまでの知見と一致している。

「しらせ」は昭和基地とオーストラリア南方の南極海の間を南緯60度付近に沿って航行する。そこはストームトラックの南縁であり、しばしば総観規模擾乱、すなわち移動性の低気圧・高気圧の影響を受ける。そのデータが新しい知見を与えた。⁷Be濃度は1～8 mBq/m³の範囲で数日スケールでの増加と減少が繰り返された（図2b）。この周

期的変動が「しらせ」の位置での低気圧・高気圧の入れ替わりと同期していることが分かった。

気象再解析データによる解析から高濃度を示した期間において航路上空の成層圏-対流圏境界（対流圏界面）の高度が一時的に低下する傾向が認められた（図2a）。これは対流圏界面の折れ込み（tropopause fold）と呼ばれる現象であり（Holton et al., 1995）、成層圏起源の空気が対流圏側へ下降している状態である。この結果は、南大洋上空において対流圏界面の折れ込みによって成層圏の大気が対流圏に周期的に侵入していることを示唆している。

南大洋で見られた数日スケールの振動は、降水によるエアロゾル除去とその後の晴天場で上層からの供給の交互作用として見るができる。降水による除去の効率は強い上昇流の下で最大化すると考えられ、また、⁷Beの供給量は対流圏界面の折れ込みの強さによって決まる。これらはいずれもストームトラックの中心帯で最も顕著である。⁷Be濃度はこの二つのブレーキとアクセルの相対

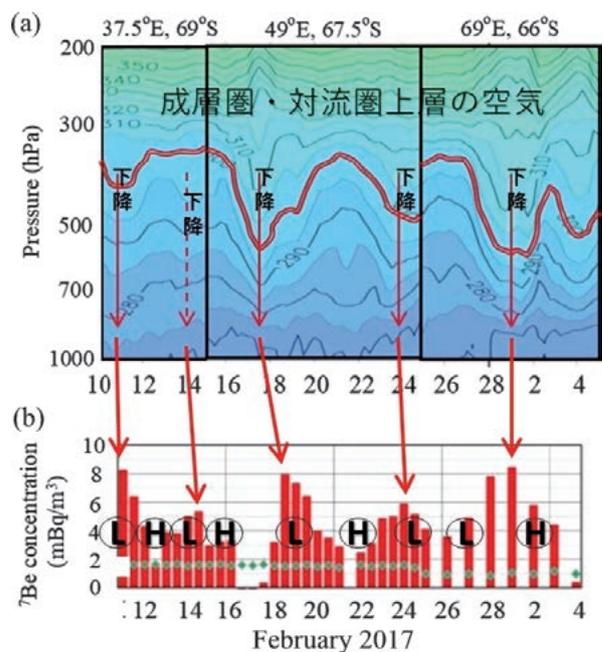


図2 (a) 温位の高度時間断面。温位は成層圏で高く、対流圏上層、下層に向かって低くなる。赤の二重線は対流圏上層の温位300Kの位置を示す。温位の変動から上空の空気が周期的に下降していることが分かる。(b) ⁷Be濃度と低気圧(L)、高気圧(H)の出現の時系列。高い濃度は上空の大気の下降、及び低気圧と概ね同期している。

関係を可視化するものである。

対流圏界面の折れ込みでは ^7Be だけでなく、低湿度・高オゾン濃度といった成層圏の性質を帯びた空気塊が対流圏中下層まで一時的に降りてくると考えられる。対流圏界面の折れ込みは南大洋において高緯度域で比較的活発である (Akritidis et al., 2021) ことを考慮すると、今回の観測により南極インド洋セクターの高緯度域における成層圏-対流圏交換の主要な経路を明らかにしたことになる。

3.2 S17拠点及び昭和基地における時間変動

氷床上の S17拠点における定点観測では、総観規模擾乱の影響が弱く対流圏界面の折れ込みが不明瞭な時期（1月前半）と総観規模擾乱の影響を受けて対流圏界面の折れ込みの活発な時期（1月後半）があった。後者においては総観規模擾乱の周期に合わせて ^7Be 濃度の変化が観測された。この期間に今回の観測データの中で最も高い濃度が観測された。

総観規模擾乱の影響が弱かった1月の前半には ^7Be 濃度に顕著な日周期変動が現れた(図3a)。夜間(21~9時)に濃度が高く、昼間(9~21時)に低い。夜間には氷床上が強く放射冷却し、密度の高い冷気が地形に沿って沿岸へ向かって吹き下ろすカタバ風が強まっている(図3b)。すなわち、内陸から供給される空気は ^7Be 濃度が高いことを示している。カタバ風の上流の内陸域は標高が3000mを超えており、そのような地域でカタバ風が取り込む対流圏中層の空気は ^7Be の生成域により近く、濃度が高いと考えられる。こうして比較的高濃度の ^7Be を含んだ空気が沿岸域に吹き下っていると考えられる。

観測により、この機構が定量的に実証された意義は大きい。

また、S17拠点の ^7Be 濃度は昭和基地に比べて平均的に高い傾向があった。両地点は20km程度しか離れていないため、総観規模の大気環境に関する差異は殆どない。ところが、カタバ風は氷床上のS17拠点で吹いていても、昭和基地まで届いて

いない場合が少なくない。これらのことから、S17拠点の ^7Be 濃度が昭和基地より高くなる傾向はカタバ風により輸送される ^7Be の影響の違いによると考えられる。

3.3 年ごとの変動と宇宙線

2015年から2017年にかけてS17の ^7Be 濃度は約1.2倍に増加した。南極大陸沿岸のノイマイヤー (Neumayer) III 基地における中性子モニタ (AMS Collaboration, 2025) の銀河宇宙線強度は同期間に約1.1倍に増加しており、増加率が同程度であることが確認された。太陽活動が弱いときは太陽風の磁気乱流による遮蔽が弱まり、銀河宇宙線が地球大気に達しやすくなるため、上層大気での ^7Be 生成率は増える。これは ^7Be が局所的な輸送だけでなく、太陽-地球系の長期変動も反映する指標であることを示す。

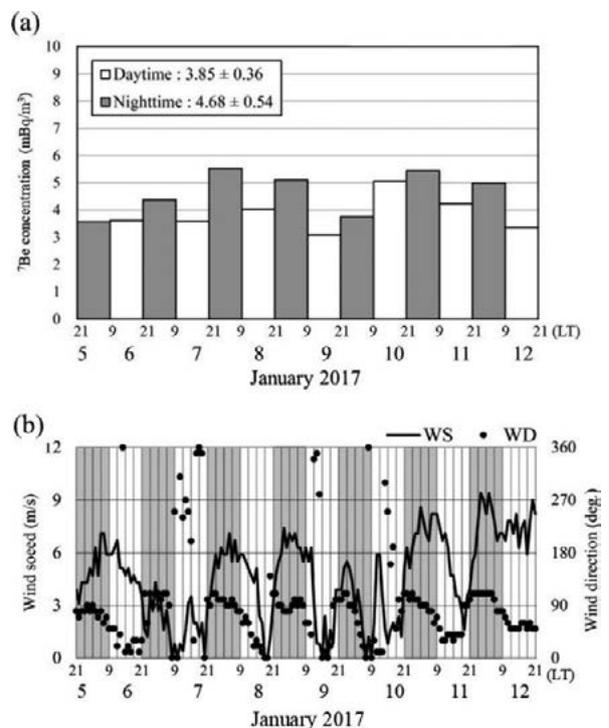


図3 (a) 南極氷床上のS17観測拠点の ^7Be 濃度の12時間間隔の時系列、及び日中(9~21時LT)と夜間(21~9時LT)の平均濃度と標準偏差を左上の枠内に示す。(b) 地上の風速(線)と風向(黒丸)の時系列。夜間(21~9時LT)に灰色の陰を付加する。

4. まとめと展望

JARE 第56次, 58次, 59次の夏季観測に基づき, 南極インド洋セクターにおける大気中 ^7Be 濃度の時空間変動を解析した。南大洋のトランセクトでは, 中緯度から南極域にかけての濃度の低下や降水除去が観測データに現れた。また, 南大洋と氷床上S17拠点の観測から総観規模擾乱に伴う周期的な対流圏界面の折れ込みを反映して濃度の上昇が繰り返し起こることが分かった。S17拠点では夜間に濃度が高く昼間に低い日周期変動が捉えられ, カタバ風が大陸の内陸部で取り込んだ ^7Be を沿岸への輸送に果たす役割が初めて裏付けられた。昭和基地の濃度がS17拠点より低い傾向にあることは, 昭和基地がS17に比べてカタバ風が届かないことが多いことが関係している可能性を指摘した。さらに, 2015年から2017年のS17拠点における濃度上昇は銀河宇宙線強度の増加と一致し, 太陽活動の影響が生成率を介して南極の ^7Be に反映されることが示唆された(図4)。

氷床表層への沈着は, 降水除去と乾性沈着の競合の結果であり, 沿岸で濃度が高いからといって

沈着も常に高いとは限らない。しかし, 今回明らかになった対流圏界面の折れ込みによる上空からの補給や, カタバ風による内陸域から沿岸域への運び込みは, 沿岸部に ^7Be が降り積もる量を増やす要因になっている可能性がある。氷床コアに記録される ^7Be および関連核種 ^{10}Be , ^{22}Na などの記録を読み解くには, 太陽活動による生成率の変化と, 大気の輸送・沈着過程の変動という二つの影響を区別して考える必要がある。本研究は沿岸域における物質輸送過程を示す観測的証拠を提供し, 氷床コアの記録を解釈するための基本的知見を強化するものである。

今後の課題として, 第一に, 連続観測の期間延長と通年化が挙げられる。夏季に顕著なカタバ風日周期のほか, 冬季の極夜条件下でのSTEの様相は未解明である。第二に, ^{10}Be , ^{22}Na など他の宇宙線生成核種との同時観測を行い, 生成率と輸送・沈着の寄与を成分分離することが重要である。第三に, 衛星観測・化学輸送モデル・再解析を組み合わせ, 対流圏界面の折れ込みやカタバ風と ^7Be 変動とを統計的に結び付けることが望まれる。第

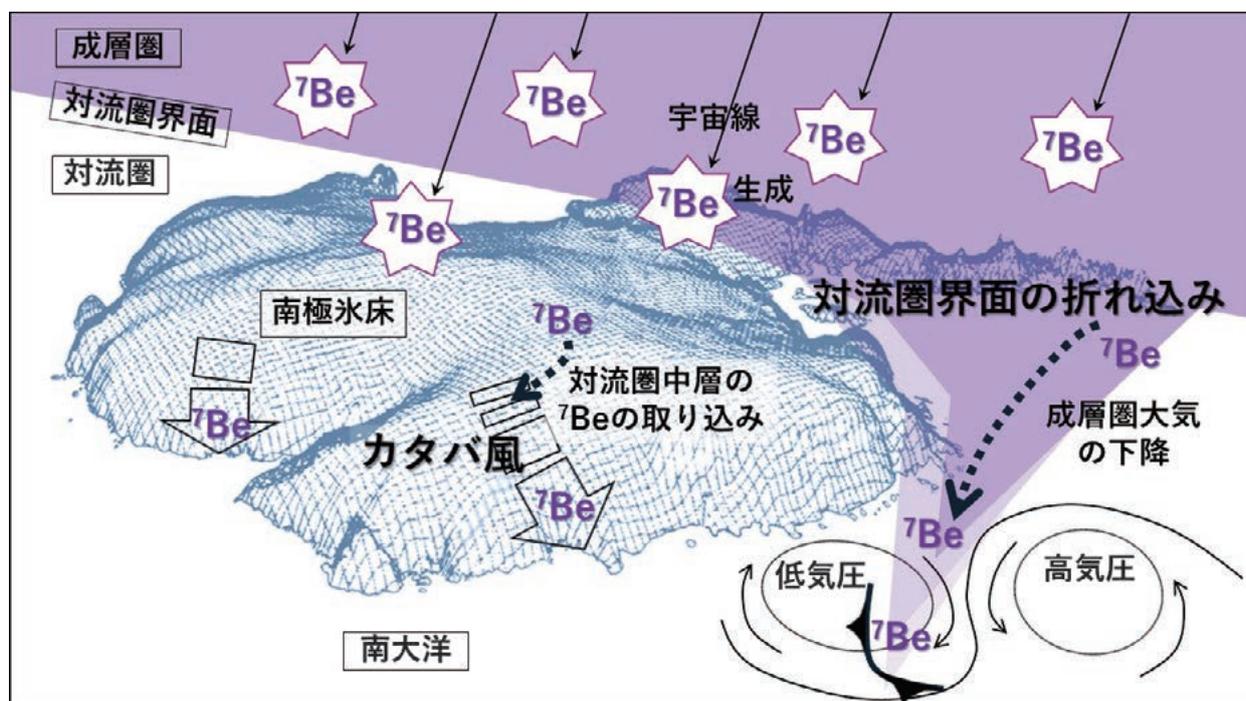


図4 高層大気中で宇宙線により生成された ^7Be は, 低気圧・高気圧システムに関連して発生する対流圏界面の折れ込み現象により地上付近に輸送され, また, 南極大陸の斜面を吹き降りるカタバ風に取り込まれて沿岸の地上付近に輸送される。(極地研究所他, プレスリリース, 2025より)

四に、沿岸から内陸へ延びる複数のトランセクトを設け、標高・距離に沿った連続場として日周期とイベント応答をマッピングすることで、鉛直・水平輸送の寄与をさらに分離できる。

南極は、地球大気循環の末端ではなく、物質とエネルギーの重要な分配点である。⁷Beをはじめとする宇宙線生成核種は、この分配の瞬間々々を可視化するタイムスタンプとして機能する。本研究で明らかになったカタバ風による内陸から沿岸への輸送と対流圏界面の折れ込みを介した成層圏大気の大気圏への混合の役割は、気候変動下における極域の応答を読み解くうえでも鍵となる。観測網の拡充とデータ同化の高度化により、南極大気ダイナミクスは、より精密に描き直されるであろう。

引用文献

- Akritidis, D., Pozzer, A., Flemming, J., Inness, A., & Zanis, P. (2021). A Global Climatology of Tropopause Folds in CAMS and MERRA-2 Reanalyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(8), e2020JD034115. <https://doi.org/10.1029/2020JD034115>
- AMS Collaboration, Aguilar, M., Alpat, B., Ambrosi, G., Anderson, H., Arruda, L., et al. (2025). Solar Modulation of Cosmic Nuclei over a Solar Cycle: Results from the Alpha Magnetic Spectrometer. *Physical Review Letters*, 134(5), 051001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.051001>
- Arnold, J. R. & Al-Salih, H. A. (1955). Beryllium-7 produced by cosmic rays, *Science*, 121, 451–453. <https://doi.org/10.1126/science.121.3144.451>
- 極地研究所 (平沢尚彦, 山田恭平), 岐阜大学 (中村琢, 三輪美代子, 田阪茂樹), 名古屋市科学館 (小塩哲朗) (2025): ベリリウム7 (⁷Be) が明らかにした南極域の大気の流れ, 2025年11月6日.
- Hirasawa, N., T. Nakamura, M. Miwa, K. Aoki, T. Ojio, K. Yamada, and S. Tasaka (2022): ⁷Be concentrations in surface air over the Indian sector of the Southern Ocean and at two Japanese coastal Antarctic stations in the summers of 2014/15, 2016/17, and 2017/18. *Polar Data Journal*, 6, 17–24. <http://doi.org/10.20575/00000036>
- Hirasawa, N. (2025). Antarctic surface air Beryllium-7 (Period-1:2014-2017) supplemental data [dataset]. *SciDataBase*. <https://doi.org/10.17592/002.2025090416>
- Hirasawa, N., Nakamura, T., Miwa, M., Ojio, T., Yamada, K., & Tasaka, S. (2025). Spatiotemporal Variations in Surface Air ⁷Be Concentrations Over the Antarctic Regions of the Indian Sector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(20), e2024JD043206. <https://doi.org/10.1029/2024JD043206>
- Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33(4), 403–439. <https://doi.org/10.1029/95RG02097>
- Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33(4), 403–439. <https://doi.org/10.1029/95RG02097>
- Sanak, J., Lambert, G., & Ardouin, B. (1985). Measurements of stratosphere-to-troposphere exchange in Antarctic by using shortlived cosmonuclides. *Tellus*, 37B, 109–115. <https://b.tellusjournals.se/articles/10.3402/tellusb.v37i2.15005>
- Zhang, F., Wang, J., Baskaran, M., Zhong, Q., Wang, Y., Paatero, J., & Du, J. (2021). A global dataset of atmospheric ⁷Be and ²¹⁰Pb measurements: annual air concentration and depositional flux. *Earth System Science Data*, 13(6), 2963–2994. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2963-2021>