

学 位 論 文 題 名

Studies on relationship between Asian dust outbreak
and the stratosphere-to-troposphere transport
in spring with coupled ice-core-meteorology

(アイスコア及び気象学的解析を用いた春季黄砂発生と
成層圏対流圏輸送の関係についての研究)

学位論文内容の要旨

北太平洋域は自然活動による物質循環が活発な地域である。春季東アジアの黄砂発生、夏季アラスカ・シベリア森林火災による煤の放出等がある。これらの物質はエアロゾルと呼ばれ、大気中で太陽光を散乱・吸収し地球の放射収支に影響する。更に雲の凝結核や氷晶核になり、間接的にも水循環や放射収支に影響する。つまり、北太平洋域のエアロゾル変動は気候変動予測において重要である。

冬季から春季には、中高緯度で成層圏対流圏交換の活発化も起こる。成層圏物質は、低気圧活動等に伴う圏界面の褶曲部からの移流、及び成層圏子午面循環による対流圏界面の通過等で対流圏へ移流する(成層圏対流圏輸送: Stratosphere-to-Troposphere Transport (STT))。成層圏物質である高酸化・温室効果ガスのオゾンや放射性核種のトリチウムは STT により対流圏へ輸送される。よって、成層圏起源物質の対流圏での変動量を調査することは、気候学的観点から重要である。

上記の物質は総観規模擾乱に伴って輸送されることが多い。そこで、偏西風の強い高高度の場所に物質循環を調査することが望ましい。しかし、地上とは異なり高高度での観測は困難が多く、観測データは多くない。本研究では、対流圏ダストである黄砂及び成層圏起源トリチウムの情報をアラスカ・ランゲル山(62°N; 144°W; 4100 m)で掘削されたアイスコアから取り出すことを試みた。今後、アイスコアを IC、ダストを DS、トリチウムを T と省略する。IC は過去の大気情報を取り出すのに適しているが、大気循環を議論する場合、ある一地点のデータでは困難である。そこで、気象学的な解析を同時に行い、広域の議論を可能にした。IC という歴史的な大気情報復元の利点と気象学という広域大気循環が議論できる利点を合わせ、春季北太平洋域の物質循環のメカニズムを以下の二つの研究から考察した。

(1) ランゲル山で掘削された IC 中の DS 粒子数濃度及び T 濃度の測定を行った。季節変動が顕著な北太平洋域で物質循環を議論するには、最低でも季節ごとのデータを取得する必要がある。季節以下の時間分解能でデータを取得した。測定データを季節ごとのデータに変換できるように季節区分を試みた。IC は北太平洋域ではまだ少ないが、更に各季節区分に成功した例はまだない。この IC を用いて、北太平洋域での、DS 及び T の季節・経年変動について調査した。また、DS と T の相関解析を行い、両者の関係について考察した。

(2) 活発な低気圧活動は黄砂発生や STT にも重要なことがわかっている。しかし、その両

者の関係及び IC 掘削地点への両者の影響についての一連の研究はない。そこで、2000 年以降春季に東アジアで増加している黄砂発生の中で気象観測から大規模黄砂として知られている 5 例（2001 年及び 2002 年の事例）に注目し、黄砂発生時の大気循環場の状態を調査した。また 5 事例中の黄砂及び成層圏物質の輸送経路をラグランジュ的な前方粒跡線解析によって調査し、ランゲル山へ与える影響について調べた。IC データと対比を行い、実際の IC データに与える影響について議論を行った。次に、ランゲルにおける降雪時（全球気象データの相対湿度 80% 以上で推定）の大気循環場の月平均値及び月平均大気循環場等を用いて IC 中の春季 DS 及び T 変動に与える影響について大気循環場の視点から議論を行った。最後に、研究課題（1）の春季 DS・T 変動が起こるメカニズムについて考察した。

（1）から、DS 粒子数濃度・T 濃度データに水素安定同位体比を合わせることで、①IC の年代決定及び季節区分を行い、1992-2002 年のデータを春前半、春後半、夏、秋、冬に区切ること成功した。IC 中では、②春前半に DS 粒子数濃度の増加、③春後半に T 濃度の増加が見られた。DS 粒子数濃度と T 濃度のピークが同時期になる年もあったが、季節進行として T 濃度ピークが若干遅れることがわかった。この原因については、（2）で議論される。また、④2000 年以降の黄砂発生の増加に伴い、2001 年、2002 年の春季に IC 中で DS の顕著な増大が見られ、2004 年 5 月の現地観測時にも東アジアからの DS 輸送を確認していることから、ランゲルでは春に黄砂の影響が大きいと考えられた。

本研究で最も重要な発見は、⑤北太平洋域で IC から初めて自然界における成層圏 T と対流圏 DS の季節・経年変動の関係が明らかになったことである。⑥季節ごとの DS 及び T フラックスの相関関係から、春季に長距離輸送の指標になる微小サイズ DS ($0.52\text{--}1.00\text{ }\mu\text{m}$) と T の間に経年的な強い正の相関を発見した。この結果から、⑦東アジアにおける春季低気圧活動の経年変動が、黄砂発生と STT に大きく寄与するということを世界で最初に提案した。これは、春季の黄砂発生量が増加すると、同時に成層圏起源の T やオゾンの対流圏移流量が増加することを示唆する。

（2）から、①5 つの黄砂発生時にはすべて同期して STT が起こり、3 事例は黄砂及び成層圏物質、2 事例で黄砂のみランゲル山への到達が考えられた。しかし、2001 年の黄砂事例では IC 中の T 濃度が最大値にはならなかった。それは、②ランゲルにて T が沈着する際の顕著な降雪の有無が大きな要因と考えられる（T は大気中で主に水蒸気として存在するため）。③2001 年の場合、成層圏物質の到達時には、顕著な降雪が期待できず降雪による T 沈着は少ないと考えられた。一方、2002 年の場合、黄砂と成層圏物質は同時に到達し、その時に降雪が起こり、T の効率的な沈着が期待できた。④ランゲルで降雪時の月平均大気循環場は、月平均大気循環場と非常に類似しており、春季の月平均場が東アジアでの黄砂発生条件だけでなく、ランゲルでの降雪条件にも寄与することを示唆する。また、⑤春季のランゲルへの T の貢献として、ランゲルでの降雪時に北太平洋上（特にアラスカ周辺）で発達する渦による STT の貢献も考えられた。⑥4、5 月はランゲルでは降雪日数が気候的に年間で最も多く、STT によるランゲルへの T 情報の沈着ロスが少ないと期待できる。⑦通常年の春後半 T 濃度ピークは成層圏子午面循環の季節変動で良く説明がつく。しかし、⑧2002 年のようなケースでは、ダストストームの渦強制による STT 効果が通常の T 季節変動に上乗せされて、T 濃度ピークの時期が春前半にシフトできると考えられる。最終的に、⑨ 東アジアの黄砂発生に伴う STT、北太平洋上での STT、ランゲルでの降雪頻度増加の条件が揃う春季後半に、IC 中の DS と T フラックスの経年的相関が最も高くなると考えられる。また本研究から、⑩IC 中の DS 粒子数濃度と T 濃度変動及び両ピーク位置関係から、過去において両物質変動に関わる春季北太平洋域の大気循環場変動の復元が期待できる。

以上の成果は、IC 研究と気象学という二分野に亘る研究を行って、初めて明らかにできる研究結果であり、将来の気候・環境変動予測のための基礎研究に貢献するものである。今後、

地球温暖化に伴った春季黄砂発生量の変動を低気圧活動に基づいて予測することは、同時に成層圏から対流圏への物質移流量の予測及び気候そのものへ与える影響の評価にもつながると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 准教授 白 岩 孝 行

副 査 助 教 飯 塚 芳 徳

副 査 教 授 中 島 映 至 (東京大学気候システム

研究センター)

学 位 論 文 題 名

Studies on relationship between Asian dust outbreak and the stratosphere-to-troposphere transport in spring with coupled ice-core-meteorology

(アイスコア及び気象学的解析を用いた春季黄砂発生と
成層圏対流圏輸送の関係についての研究)

大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)は、太陽光を散乱・吸収し地球の放射収支に直接的な影響を及ぼすばかりでなく、雲の凝結核や氷晶核として間接的にも水循環や放射収支に影響することが知られており、気候を左右する重要な要素として注目されている。本研究では、東アジアにおいて代表的なエアロゾルである黄砂に着目して、アラスカ・ランゲル山で採取したアイスコアを用いて、過去の黄砂発生と気象の関係を詳細に調べた結果について考察している。本研究の特徴は、アイスコア中の粒子数濃度とトリチウム濃度を高い時間分解能で測定し、季節変動まで明らかにした点にある。その結果、少なくとも 1992 年から 2002 年までの間、春前半に粒子数濃度が増大し、それとほぼ同時期あるいは少し遅れてトリチウム濃度が増大するという関係を初めて見出した。

この事実を解釈するために、アイスコア採取地点への粒子の輸送を粒跡線解析法で調べて、微小粒子の起源は東アジアの黄砂であると結論づけている。一方、トリチウムは、通常のアイスコア研究では核実験マーカーとして氷の年代決定に使われているが、STT(成層圏対流圏輸送)マーカーとして着目した点も本研究の特徴である。すなわち、成層圏から STT によって対流圏にもたらされたトリチウムが、アイスコア採取地点に降雪として堆積することおよびその時期が春に卓越することを明らかにした。このような解釈に基づいて、本研究では、春季の低気圧活動の活発化が、黄砂の発生および STT の活発化を招来するという仮説を提示している。

本論文は、4章から成り、第1章では研究の背景となっている地球温暖化におけるエアロゾルの役割およびアイスコア研究の必要性が述べられている。第2章では、アラスカ・ランゲル山におけるアイスコアの掘削から実験室における分析方法まで、本研究の基礎となるデータ収集および粒跡線解析法について述べた後、粒子数密度とトリチウムの季節変動およびその解釈が論じられている。第3章では、第2章で論じた解釈を補強するために、東アジアの黄砂発生と STT の関係を粒跡線解析法および大気循環場等の気象学的手法を駆使して論じている。第4章では、本研究の成果がまとめられ、今後の研究展望が述べられている。

以上、本研究は、高地山岳氷河のアイスコアを高い時間分解能で解析することによって、過去の黄砂発生とトリチウム堆積の季節変化を明らかにしたという点において、また東アジア起源の黄砂が北太平洋を越えてアラスカに輸送される過程および成層圏起源のトリチウムが積雪中に堆積する過程を詳細に検討したという点において、これまでにない科学的知見をもたらすものである。今後、地球温暖化に伴う低気圧活動の活発化と黄砂発生量の増大が予測される中で、本研究の成果は、黄砂の気候への影響を評価する上でも有用な成果である。また、一連の研究は、申請者自らが計画、実施したものであり、研究者としての資質の高さを知るに十分なものである。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。