

学 位 論 文 題 名

Isotopic study on the sources of atmospheric water
vapor of taiga forest in eastern Siberia

（水安定同位体比を用いた東シベリアタイガ林の大気水蒸気の起源に関する研究）

学位論文内容の要旨

東シベリアは気候変動等に敏感に応答する地域であり、非常に厳しい乾燥気候下にあるにも関わらず、広範囲にわたり永久凍土と落葉性針葉樹林（タイガ林）が分布している。その為、現在の森林を介した水循環の解明は、今後気候変動によってどのように水循環が変化していくのかを予測するのに不可欠である。そこで、本研究では、2006年、2007年、2008年の夏季後半に東シベリアタイガ林にて、降水・植物体内水・土壌水・地表有機層中の水の安定同位体比と併せて、大気水蒸気安定同位体比の日変化や数週間スケールの変動を観測し、その変動要因の解明を行なった。これらの年では、夏季の降水量や冬季の積雪量が近年増大した影響で土壌水分量が多くなったおり、特に2007年は他の年に比べて異常に高い土壌水分量が観測された。

植物体内水の $\delta^{18}\text{O}$ は、 $-17\sim-13\text{‰}$ を示し、降水や浅層土壌水の値に近く、また蒸散由来の水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ 値であることを示した。

日変化の結果について、晴天日では夜明け前から午前中にかけて気温と大気混合比が上昇し、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ は $1\sim5\text{‰}$ 上昇した。また、午後にかけて混合比の低下と共に $\delta^{18}\text{O}$ は約 2‰ 低下した。その一方、曇天日では午後の混合比と $\delta^{18}\text{O}$ の低下は見られなかった。これらの結果は、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ よりも高い値を持つ植物の蒸散由来の水蒸気の寄与により、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ が午前中に上昇し、また低い $\delta^{18}\text{O}$ 値の水蒸気を含む自由大気が午後に取り込まれることにより、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ が午後には低下したことを示した。

大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ の数週間スケールでの変動について、2006年と2008年では大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ と混合比の間に正の相関が見られ、 $d\text{-excess}$ と混合比の間に負の相関が見られた。その一方、土壌水分量が過多にあった2007年では、そのような傾向は見られなかった。 $\delta^{18}\text{O}$ 値の高い水蒸気は、晴天時、気温が高かった時に観測され、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の低い水蒸気は、気温低下時、そして降水イベント直後に観測された。これらの結果より、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ の数週間スケールにおける変動では、植物の蒸散由来の水蒸気と降水イベントの

影響（降水プロセスにおけるレイリー蒸留や降水からの蒸発）を受けた水蒸気の寄与があったことが示された。加えて、大気水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ の変動と $500\text{km} \times 500\text{km}$ の領域における水平方向の水蒸気フラックスの変動の比較から、移流の影響も存在することが示された。また、降水量の空間分布と後方流跡線解析より、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の高い水蒸気は観測地点の周辺の、気温が比較的高く降水が観測されなかった森林から流れていたことが示され、その一方、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の低い水蒸気は、降水が観測された森林上から流れてきており、結果として、観測地点で降水が観測されなくても $\delta^{18}\text{O}$ 値の低い水蒸気が観測されたことを示した。

以上の結果及び考察により、比較的高い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ植物の蒸散由来の水蒸気が1日以内の短い時間スケールや数週間スケールといった長い時間スケールにおいてタイガ林の水循環の中で大きな役割を果たすことが示された。この結果は、タイガ林における降水システムの解明や、さらに、今後温暖化の影響で植生が変化したときにどのように水循環が変化していき、その影響がどのようなものになるのか、という事を予測する上で必要になると思われる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 杉 本 敦 子

副 査 教 授 藤 吉 康 志

准教授 辻 村 真 貴 (筑波大学生命環境系)

学 位 論 文 題 名

Isotopic study on the sources of atmospheric water vapor of taiga forest in eastern Siberia

(水安定同位体比を用いた東シベリアタイガ林の大気水蒸気の起源に関する研究)

東シベリアは厳しい大陸性の乾燥気候下にありながら、永久凍土と落葉性針葉樹林（タイガ林）が広く分布している。そのタイガ林の維持と存続の為、地表面（永久凍土）- 森林生態系（タイガ林）- 大気間で独特の水循環が形成されている。その為、気候変動による永久凍土やタイガ林の変化に伴い、この水循環の変化、あるいは消失が懸念される。そこで、本研究では現在タイガ林がどのようにこの水循環に寄与するのかを明らかにするために、特にタイガ林の蒸散過程に着目して、2006年、2007年、2008年の夏季後半に、タイガ林の降水、植物体内水、土壌水、地表有機層中の水安定同位体比と併せて、大気水蒸気同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）の日変化、及び数週間スケールの観測を行い、その変動要因となる水蒸気の解明とタイガ林の蒸散過程が水循環に果たす役割の評価を試みた。これらの年では夏季の降水量や冬季の降水量が近年増大した影響で土壌水分量が多くなっており、特に2007年は他の年に比べて異常に高い土壌水分量が観測された。

植物体内水の $\delta^{18}\text{O}$ は、 $-18\sim-13\%$ を示した。これは、降水や浅層土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ 値に近く、また蒸散由来の水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ 値である事を示した。

日変化について、晴天日では夜明け前から午前中にかけて気温と大気混合比が上昇、水蒸気 $\delta^{18}\text{O}$ は $1\%\sim5\%$ 上昇した。また、午後にかけて混合比の低下と共に $\delta^{18}\text{O}$ は約 2% 低下した。これらの結果は、日中の気温の上昇に伴って植物の蒸散の活発化と大気境界層の発達が生じ、午前中に植物の蒸散由来の水蒸気が大気中に流入することで水蒸気混合比と水蒸気同位体比が上昇した。また、午後では植物の蒸散の影響よりもより発達した境界層によって生じた自由大気を取り込みの影響の方が大きく、乾燥した自由大気中の水蒸気が取り込まれることによって水蒸気混合比と同位体比が低下した。また、特定の風向や風向に対する水蒸気同位体比の変動見られず、これは1日の中の数時間では、水平方向の水蒸気の流入の、水蒸気同位体比に対する影響はないものと見られた。以上の結果は、一様に広がっているタイガ林の特徴を表しているものと考えられる。

数週間スケールの水蒸気同位体比の変動では、観測された水蒸気同位体比は、2006年と

2008年では水蒸気同位体比と水蒸気混合比の間に正の相関が見られた。高い同位体比は気温が高いときに見られ、また低い同位体比は気温の低下時、特に2008年では大雨の直後に見られた。ここで、水平方向の水蒸気の流入の影響を併せて考察するため、500km×500kmの領域を設定し、その領域内の大気水収支と各辺からの水平方向の水蒸気フラックスの変動と水蒸気同位体比の変動を比較した。また、後方流跡線（HYSPLIT4）と気温・可降水量・降水量の空間分布よりどのような地域を空気塊が通過してきたのか考察した。その結果、高い同位体比（-23‰以上）は、水平方向の収束・発散に関わらず見られ、また流入する方角も様々であり傾向が見られなかった。また、空気塊が気温と可降水量が領域内と同等かそれ以上の地域を通過していた時に観測された。これは空気塊が、蒸散が活発になっているタイガ林上を通過する時に蒸散由来の水蒸気を取り込んだとみられる結果である。低い同位体比（-26‰以下）に関しては、大気水収支との比較より観測直前に水蒸気が収束して降水が生じ、その後可降水量が減少して低い同位体比が見られた。これは降水過程によって大気水蒸気が除去され、蒸散が一時的に停止した直後に、降った降水や落下中の雨滴からの蒸発によって同位体比の低い水蒸気が大気中に放出されたことによると考えられた。また、2006年では後方流跡線と気温・降水量の空間分布より領域外で広範囲に降水があり、その後気温が低くなった地域を空気塊が通過して、低い同位体比が観測された。これは、領域外で降水の影響を受けた水蒸気が空気塊に取り込まれて、観測サイトに到達した結果と見られる。以上より水蒸気同位体比の観測値は、その空気塊が観測サイトに到達するまでに取り込んだ蒸散由来の水蒸気の量で決まる事が考えられた。また広範囲にわたる降水が起こるとその水蒸気が取り除かれ、降水から蒸発した、蒸散の寄与のない水蒸気が空気塊を占め、それが低い同位体比として観測されたとみられた。ここで、水蒸気同位体比と混合比の関係より、水蒸気同位体比が、この蒸散の寄与のない水蒸気（バックグラウンド）に蒸散由来の水蒸気が混ざる事で変動するという過程を想定した。蒸散由来の水蒸気と蒸散の寄与のない水蒸気同位体比をそれぞれ-16.5‰、-29.1‰と仮定し、水蒸気同位体比の観測値から観測時の大気水蒸気に含まれる蒸散由来の水蒸気の寄与を推定した。その結果、最大で8割近くを占めることが示された。これは、タイガ林の蒸散過程が水循環の中で果たす役割が非常に重要であることを示している。

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。