

学位論文題名

Study on radial growth and carbon isotope ratio of larch
in taiga of north eastern Siberia

(東シベリアタイガ林カラマツの年輪幅および炭素同位体比に関する研究)

学位論文内容の要旨

環北極域は地球温暖化による気温上昇が最も大きく、その影響が最も顕著に表れる地域の一つであると考えられている。温暖化は凍土環境の変化と関連した水循環の変化に加えて、環北極域陸域生態系の物質循環系にいくつかの経路で大きな変化をもたらし、全球の気候変動に対して大きな影響を及ぼす。最も重要な変化の一つは環北極域陸域生態系の内の森林の大気CO₂の吸収源としての機能の変化であろう。寒冷気候帯の森林は気温の上昇に伴い生産量が増加すると考えられてきたが、北方林の年輪解析では20世紀以降、気温と年輪幅の正の相関が不明瞭になっており、“Divergence Problem (DP)”として認識されてきた。寒冷な気候に適応した植物が気温上昇の直接的な影響を受けていることに加え、乾燥ストレスが光合成速度を制限している可能性が考えられている。すなわち、樹木成長量が気温のみならず水分環境の影響を大きく受けているのは明らかであり、年輪気候学のさらなる進展のためには樹木の気温への応答に加えて、水分環境への応答を理解する必要がある。近年は様々な地域で樹木年輪幅から気温・降水量双方を加味した気候値であるPDSI(Palmer Drought Severity Index)の高精度復元が進展しつつある。

環北極域のほとんどの地域での年輪クロノロジー（各地域の平均的な樹木年輪幅の変動）の整備状況は、幅・密度のみであり、かつ1994年で停止している。特に、年降水量200-300mmと少なく、樹木に乾燥ストレスかかりやすいと考えられる東シベリアでの研究例は北米、北欧と比べて極めて少ないのが現状である。また、樹木の直接の水分供給源である土壌水分の長期的で高時間解像度のデータはカラマツ林動態の理解のために必要不可欠であるが、東シベリアにおける土壌水分の観測は長期のものでも過去20年程度である。そこで、本研究では、東シベリアにおける過去の土壌水分量、及び樹木の水分ストレスの履歴を復元するためには、1850年から現在までの現生木の年輪幅、及び年輪炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$)クロノロジー、及び過去約70年間の枯死木のそれらのクロノロジーを作成した。

東シベリア中央部に位置するヤクーツク (62N, 129E) において、カラマツ年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から過去100年間の土壌水分量の推定を試みた。年輪 $\delta^{13}\text{C}$ による土壌水分量の復元モデルを構築し、過去100年間の土壌水分量を復元した。すなわち過去10年間の土壌水分量観測値との相関分析から、ある年の土壌水分量はその年の晩材と翌年の早材の組み合わせから求めた年輪 $\delta^{13}\text{C}$ で最も良く推定された。このモデルを用いて過去100年間の土壌水分量を推定した。モデルを評価するために、降水量、PDSI、さらには1次元の陸面過程モデルによる計算結

果と比較し、妥当性が検証され、2006-2007年の湿潤イベントが過去100年間で際立ったものであったことが示された。

2005年以降、東シベリアでは降水量の増加により湿潤化が進行し、過度の湿潤環境がカラマツに与えるストレスを評価することが重要視されている。過湿環境がカラマツに与えるストレスを評価するためにヤクーツクにおいて2007年以降に枯死したカラマツ枯死木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ を測定し、現生木のそれと比較した。湿潤化が顕著となった2006年以降、枯死木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ が現生木のそれに比べて高い値を示し、枯死の数年前から現生木と異なる環境応答を示していたことが示された。しかしながら、現生木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ との乖離が1998, 2002, 2003年の乾燥イベントより起こる枯死個体も観測された。両者は生育場所の微地形的水分環境により分類することが可能であり、前者はより湿潤なサイトであった。すなわち、樹木年輪を用いて枯死以前の情報も併せて解析することで、カラマツ個体群の生育サイトの微地形的水分環境によって、乾燥・過湿どちらも枯死原因になりうることを示された。

平地タイガであるヤクーツクサイトと比較的降水量が多い山岳タイガのエレゲイサイト(60N, 134E)に生育しているカラマツの成長量規定因子を明らかにするために、両サイトで採取されたカラマツの年輪幅、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ と気象データ(気温、降水量)との応答関数解析を行った。ヤクーツクサイトでは、カラマツ年輪幅、 $\delta^{13}\text{C}$ が夏季の気温とそれぞれ、負および正の相関を示し、高温により誘発される水分ストレスがカラマツ成長量を強く規定している可能性が示された。一方、エレゲイサイトでは、年輪幅、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ 共に降水量とのみ有意な相関を示し、気温との間に有意な相関はみられなかった。降水量の違いによって、それぞれのサイトに生育するカラマツの水分ストレスの程度が大きく異なり、ヤクーツクサイトのカラマツに比較的大きな水分ストレスが生じている可能性が示された。

本研究により、東シベリアのタイガ林の過去100年間の水分環境が復元され、2006-2007年の湿潤イベントが過去100年間で際立ったものであったことが示された。タイガ林の優占種であるカラマツの植物生理は水分環境と密接に結びついており、2006-2007年の過湿イベントにより多くのカラマツが枯死するに至った。しかしながら、枯死木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ を用いた解析から、過湿イベント以前の乾燥イベントから過剰な水分ストレスが生じていた個体群の存在が明らかとなった。また、降水量が比較的多い山岳タイガのエレゲイサイトと比べて、平地タイガのヤクーツクサイトでは、カラマツに比較的大きな水分ストレスが生じている可能性も本研究から示された。東シベリアでは、将来の降水量増加が予測されているが、過湿イベントと乾燥イベント両方によるストレスがカラマツの炭素固定能、及び枯死プロセスに大きな影響を引き続き与えていく可能性がある。

学位論文審査の要旨

| | | |
|----|------|--------------------------------------|
| 主査 | 教授 | 杉本敦子 |
| 副査 | 特任教授 | 山崎孝治 |
| 副査 | 准教授 | 山本正伸 |
| 副査 | 准教授 | LOPEZ CACERES MAXIMO LARRY (山形大学農学部) |

学位論文題名

Study on radial growth and carbon isotope ratio of larch in taiga of north eastern Siberia

(東シベリアタイガ林カラマツの年輪幅および炭素同位体比に関する研究)

環北極域は地球温暖化による気温上昇が最も大きく、その影響が最も顕著に表れる地域の一つであると考えられている。寒冷気候帯の森林は気温の上昇に伴い生産量が増加すると考えられてきたが、北方林の年輪解析では20世紀以降、気温と年輪幅の正の相関が不明瞭になっており、“Divergence Problem”として認識されてきた。寒冷な気候に適応した植物が気温上昇の直接的な影響を受けていることに加え、乾燥ストレスが光合成速度を制限している可能性があり、東シベリアタイガ林に代表される乾燥域で顕著であると考えられる。すなわち、東シベリアタイガ林では、水分環境がカラマツをはじめとした樹木の炭素固定量に大きく影響を与えている可能性がある。しかし、その詳細は不明であり、カラマツ林の動態を水分環境との関係性のもとに理解することが必要であり、それは東シベリアタイガ林の炭素循環を解明し、その変動を予測する上で欠かせない。そこで、本研究では、カラマツ年輪幅、 $\delta^{13}\text{C}$ を用いて、東シベリアにおける過去の土壤水分量、及び樹木の乾燥ストレスの履歴を復元し、長期的時間スケールにおける水循環と炭素循環の関係性を明らかにすることを試みた。

東シベリア中央部に位置するヤクーツク (62N, 129E) において、カラマツ年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から過去100年間の土壤水分量の推定を試みた。年輪 $\delta^{13}\text{C}$ による土壤水分量の復元モデルを構築し、過去100年間の土壤水分量を復元した。すなわち過去10年間の土壤水分量観測値との相関分析から、ある年の土壤水分量がその年の晩材と翌年の早材の組み合わせから求めた年輪 $\delta^{13}\text{C}$ で最も良く推定された。このモデルを用いて過去100年間の土壤水分量を推定した。モデルを評価するために、降水量、PDSI、さらには1次元の陸面過程モデルによる計算結果と比較し、妥当性が検証され、2006-2007年の湿潤イベントが過去100年間で際立ったものであったことが示された。

2005年以降、東シベリアでは降水量の増加により湿潤化が進行し、過度の湿潤環境がカラマツに与えるストレスを評価することが重要視されている。過湿環境がカラマツに与える

ストレスを評価するためにヤクーツクにおいて2007年以降に枯死したカラマツ枯死木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ を測定し、現生木のそれと比較した。湿潤化が顕著となった2006年以降、枯死木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ が現生木のそれに比べて高い値を示し、枯死の数年前から現生木と異なる環境応答を示していたことが示された。しかしながら、現生木の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ との乖離が1998、2002、2003年の乾燥イベントより起こる枯死個体も観測された。両者は生育場所の微地形的水分環境により分類することが可能であり、前者はより湿潤なサイトで生育していた。すなわち、カラマツ個体群の生育サイトの微地形的水分環境によって、乾燥・過湿どちらも枯死原因になりうることが示された。

平地タイガであるヤクーツクとヤクーツクに比べて降水量が多い山岳タイガのエレグイ(60N, 134E)に生育しているカラマツの過去100年間における気候応答の推移を明らかにするために、両サイトで採取されたカラマツの年輪幅、 $\delta^{13}\text{C}$ と気象データ(気温、降水量)との応答関数解析を行った。ヤクーツクでは、過去100年間のカラマツ成長量は夏の気温と負の相間を示した。一方、エレグイにおいては、最近の20年間でのみカラマツ成長量と気温との負の相関が観測された。また、両サイトにおいて1990年以降、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から求められた水利用効率(iWUE)の急激な上昇が観測された。従って、カラマツは近年の気候変動に対して水利用効率を上げることで適応しているものの、不十分であり、降水量が比較的多いエレグイサイトにおいても、高温に起因する乾燥ストレスがカラマツ成長量をさらに強く規定するようになってきた可能性が示された。

本研究により、東シベリアタイガ林の過去100年間の水分環境が復元され、2006-2007年の湿潤イベントが過去100年間で際立ったものであったことが示された。タイガ林の優占種であるカラマツの植物生理は水分環境と密接に結びついており、2006-2007年の過湿イベントにより多くのカラマツが枯死するに至った。しかしながら、過湿イベント以前の乾燥イベントから過剰な水分ストレスが生じていた個体群も存在していた。また、降水量が比較的多い山岳タイガのエレグイサイトにおいても最近20年間のカラマツ成長量制限因子は温暖化に起因する乾燥ストレスであったことが示された。東シベリアでは、予測されている降水量増加に起因する過湿イベントと温暖化により増幅される乾燥イベント両方によるストレスがカラマツの炭素固定能、及び枯死プロセスに大きな影響を引き続き与えていく可能性が示された。

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。