

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23570030

研究課題名(和文)ハイマツ植生による大気からの水及び窒素吸収にかかわる生理生態学的機構の研究

研究課題名(英文) Ecohydrological process of canopy rainfall interception, fog capture and nitrogen uptake of *Pinus pumila* vegetation

研究代表者

久米 篤 (Kume, Atsushi)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20325492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：富山県の立山・浄土平(標高2839m)でハイマツ植生の水・物質動態を測定した。林内雨・林外雨量の現地測定および、林外雨と樹冠通過雨の化学分析の結果から、ハイマツ植生は降雨に関わらず高い頻度で発生する霧を植生表面から効率的に内部に取り込んでいることが明らかになった。同時に、ハイマツは針葉表面に付着した無機窒素成分の70%を吸収していることが示唆された。一方、多量の陽イオンが針葉表面から溶脱しており、特にカリウム溶脱量は、針葉の濡れ時間と硫酸イオン供給に比例していた。ストロンチウム同位体の分析結果は、立山の森林植生では土壌よりも大気からの物質沈着が重要であり、特に黄砂の影響が大きい可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The importance of fog precipitation in the alpine hydrological and matter cycle processes of *Pinus pumila* Regal canopy and rain interception was evaluated at Jodo-daira (36.6N, 137.6E, 2839 m a.s.l.) on a summit of Mt. Tateyama, central Japan in summer (August and September) for three years. The mean monthly rain and fog precipitation were 272.1 mm/month and 191.2 mm/month, respectively. The mean rainfall interception by *P. pumila* canopy was about 20%, but the canopy captured fog precipitation even in the absence of rainfall. At the top of the mountain, relative humidity was almost reaching 100% in the late afternoon every day, and drenched period of the canopy was long. Using delta18O and deltaD analysis, the mean contribution of fog water to the throughfall was estimated at approximately 35%, consistent with the result from direct measurement. These results indicate that *P. pumila* should have a significant influence on the local hydrological processes of the high mountain ecosystem.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学 生態・環境

キーワード：ハイマツ 霧 雨 林内雨 酸性降水物 葉面吸収 安定同位体 高山

## 1. 研究開始当初の背景

### ・根の活動が抑制される風衝地のハイマツ

ハイマツ(*Pinus pumila*)は日本の中部山岳を分布の南限とし、山岳の森林限界上部に優占する矮生の五葉マツで、密度の高い樹冠を持つ。ハイマツの生育環境では冬季に土壌が凍結するため、根系による水や栄養塩吸収は物理的に制限されている。実際に立山・室堂周辺でハイマツの光合成・蒸散速度を測定してみると、春先に樹冠が積雪上に露出した状態でも、土壌が融解するまでは光合成・蒸散がほとんど行われていなかった。一方、隣接した岩の表面に生育するイワヒゲやジムカデ等の土壌中に根を張らない木本植物では、雪解け直後から活発に光合成を行っていた(嶋田・久米 2006 イワヒゲとジムカデの生態学的研究 日本植物学会第 70 回大会)。すなわち、山頂部の環境においては土壌中の根の活動は物理的に制限されやすく、岩表面に付着した雪解け水や露などの有効水の利用も重要である可能性が示唆された。

### ・降水量を超えるハイマツの水消費

立山での 3 年にわたる観測で、夏の晴天時には、ハイマツ群落からの日蒸散量は 5mm/日を超えることが実測された。一方、中部山岳地域の夏期降水量は年毎に大きく変動する。立山では 8 月の月降水量が 100mm 以下の年が数年に 1 回あるが、月降水量が 40mm 以下の年(2006 年)でも、尾根上群落の蒸散活動が完全に停止することはなかった(杉浦・久米ほか 2006 立山高山帯ハイマツの光合成蒸散速度と大気乾燥度との関係 日本植物学会第 70 回大会)。このような乾燥年には、雨水の供給と根による水分吸収だけでは多量の蒸散量を説明できなかった。

### ・根を持たない植物の存在

土壌がほとんど発達していない風衝地や岩の上や隙間では、根を持たないコケ類や地衣類の群落が発達している。コケ類や地衣類は、基本的に変水性(poikilohydric)であり、乾燥と湿潤の繰り返される表面における水の出入りだけで生育が可能である。極域の氷河後退地で、灌木、草本、コケなど植物形態別に成分比較を行った事例では、植物生育型や根の有無にかかわらず炭素同位体比や窒素含有量は一定範囲内に収まっていた(Kume et al. 2003, 2008)。気孔の無いコケ植物も、葉緑体レベルでは高等植物と同様のガスコンダクタンス条件で光合成を行っており、根のないコケ植物の方が、根のある木本植物それ以上の効率で成長している事例も確認された。

立山のイワヒゲやジムカデの成長特性と合わせて考えると、極域や森林限界以上の山岳においては、降雨や土壌以外からの水分や栄養塩の獲得が重要であり、根以外の物質吸収が重要な役割を果たす可能性が示唆された。

### ・樹冠による乾性沈着物質の捕集

これまで、高等植物の地上部表面における水分吸収や栄養塩吸収はあまり重要視されてこなかった。しかし、霧や降水の含有成分が樹冠・林床に直接付加されるのに加えて、エアロゾルやガスなどの乾性沈着物質の影響も重要である事例が報告されている。ヤクタネゴヨウの研究結果(Kume et al. 2010)は、尾根や風障地に生育する五葉マツ類の針葉は比表面積が大きく、風の影響で葉面コンダクタンスが大きくなるため、乾性沈着物質が葉面上に捕集されやすいことを示している。沈着した物質に  $\text{SO}_4^{2-}$  などの酸性物質が多く含まれている場合には、葉内からの溶脱を促進していた。本州中部山岳地域においても、無降雨期間中に乾性沈着物質として葉表面に捕集・蓄積したものが霧や降雨によって溶解し、その一部が植物体表面から吸収されていることが予想される。植生表面における乾性沈着物質の蓄積と霧、降雨、露の相互作用の評価を行う必要性が示唆された。

## 2. 研究の目的

日本の山岳植生の特徴付けるハイマツは、保水性が乏しく貧栄養な土壌条件下で亜高山針葉樹林に匹敵する多量の針葉を保持している。そのため、降雨が樹冠遮断(蒸発)されて林床への水供給が妨げられているが、風が強く霧や露が高頻度で発生する山岳環境においては、水滴の樹冠への衝突による水分付着量も多くなる可能性がある。また、霧水には雨水よりも窒素化合物が高濃度で含まれている。そこで、1)ハイマツ樹冠表面による霧・露からの捕水および水分吸収量の把握、2)ハイマツ植生表面からの窒素吸収量・栄養塩吸収・溶脱量、3)大気由来の栄養塩類供給が山岳森林植生の栄養塩循環に及ぼす影響、を定量的に評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

ハイマツ植生への霧水や乾性降水物の沈着量を評価するためには、信頼できる気象観測を連続的に実施する必要がある。また、水循環とそれに伴う物質循環の定量的な把握が重要である。そこで以下の 4 点について、重点的に測定を行った。

1)標高 2860m の浄土山周辺で、降雨、霧、露、気温、日射、風向風速の連続観測を行う。

2)ハイマツ林内と林外に多数の Gutter 型採雨器を設置し、ハイマツ群落の有無が霧水獲得に及ぼす影響を調べる。

3)ハイマツ樹冠の存在が高山生態系の物質循環に及ぼす影響を評価するために林内雨、林外雨、霧水の化学特性を比較し、水が樹冠を通過する際に生じる樹体におけるミネラルの溶脱、吸収、乾性沈着の洗浄を評価する。

4)林外雨、林内雨、樹幹流、土壌、地下水

および植生内の各構成要素の Sr 同位体比を測定することで、植生内の栄養塩類の起源の推定を行う。

#### 4. 研究成果

##### ・ハイマツ樹冠による霧水捕集

静電容量型の表面濡れセンサを観測檜に設置し山頂付近の濡れ時間を測定したところ、夕方と夜半過ぎには60%以上の時間で表面が濡れており、ほぼ全ての日で相対湿度が99%以上になる時間帯が存在した。このような条件下で風速が大きい場合には、針葉から水が滴下するいわゆる樹雨が観察された。そこで、山岳域における降雨以外の水分供給を把握するために、立山山頂部において、ハイマツ林の林内雨の測定を行った。

降水量と樹冠通過雨量の結果より、ハイマツ樹冠による降雨遮断率は、3年間平均して20%であり、標高の低い地域に分布する他樹種の樹冠に比べ高かった。

林外雨量が増加すると、樹冠通過雨量も増加する傾向が見られたが、降水が少ない時には、林外雨量に比べて樹冠通過雨量のほうが多くなる期間があった。無降雪期(8月・9月)の浄土平における月平均降水量は0.45 mm h<sup>-1</sup>だったのに対し、霧水沈着量は0.14 mm h<sup>-1</sup>となり、霧水沈着量は降水量の約30%を占めた。樹冠通過雨中の水素・酸素安定同位対比は、降水よりも高く、霧水よりも低く、酸素安定同位対比より樹冠通過雨に対する霧水寄与率を計算すると、樹冠通過雨の約35%が霧水と推定され、直接観測の結果とほぼ一致した。以上より、降雨に関わらず高い頻度で発生する霧をハイマツ樹冠が効率的に取り込んでいることが明らかになった。

##### ・ハイマツ樹冠による栄養塩吸収

森林土壌は、森林から供給されるリターと基岩の風化産物によって生成されることが多いが、その際、大気沈着による物質供給の影響はあまり考慮されていない。しかし、日本のようにモンスーンの影響を受け、多雨・多雪な地域においては、植物体や土壌からの溶脱が卓越する傾向がある。そのため、基岩の影響が直接的に観察されるのは蛇紋岩や石灰岩が卓越した地域に限られ、むしろ、斜面方位や斜度、斜面上の位置など、地形要素の方が植物の成長や分布に大きな影響を与えている。このことは、上部から土砂が供給される谷部や平野部以外の場所では、大気からの物質沈着が栄養塩循環に大きな影響を及ぼしていることを示唆している。特に、山岳地帯の稜線付近における主な物質流入源は湿性・乾性沈着に限られ、それらの評価を行うことによって、高山生態系における物質循環の実態を把握できると考えられる。

日本の代表的な山岳域である中部山岳国立公園の立山・浄土平(標高2839m)においてハイマツ植生の物質動態を測定した結果、ハイマツは針葉表面に付着した無機窒素成

分の70%を吸収していた。一方、多量のK<sup>+</sup>イオンやMg<sup>2+</sup>イオンが針葉表面から溶脱しており、特にカリウム溶脱量は、針葉の濡れ時間とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオン供給に比例していた。Ca<sup>2+</sup>イオンも溶脱していたが、年によっては吸収傾向も確認された。

ハイマツ林内雨の87Sr/86Srは、大気沈着の値や海塩の値と非常に近い値となったが、ハイマツ樹体中の値は葉と枝、そしてリターでも黄砂の値に近いものとなった。周囲の高山植物の値はおおよそ大気沈着の値に近かった。これらの結果は、浄土平のハイマツ群落や周囲の高山植物の栄養塩供給には、海塩や黄砂などの大気沈着が重要であることを示唆した。

##### ・立山の標高別森林における栄養塩吸収

次に、立山の標高別に成立する各森林ではどのように物質循環が変化するかを調べるために、美女平のスギ林(標高977m)、プナ平のブナ林(1200m)、弥陀ヶ原のオオシラビソ林(1930m)で林内雨と樹幹流の87Sr/86Srを測定した。その結果、スギ林とオオシラビソ林の林内雨と樹幹流の値は、いずれも大気沈着の値に近かったが、ブナ林での値は黄砂の値とほぼ一致した。イオンクロマトグラフィーによる分析結果は、いずれの植生表面においても活発な樹冠との相互作用が確認され、オオシラビソ林ではCa<sup>2+</sup>イオン、ブナ林では大量のK<sup>+</sup>の溶脱が生じていた。

これらの結果は、立山ではいずれの森林地帯でも大気からのイオン供給が物質循環の主体をなしており、基岩の影響は非常に小さくなっていること、また、黄砂が重要な陽イオン供給源になっている可能性を示唆した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

1. Koichi Watanabe, Hideharu Honoki, Fuminori Endo, Takashi Murakami, Yuki Yoshida, Hajime Iida, Yoshitoshi Uehara, Atsushi Kume: Number concentration and size distribution of ultrafine particles on the roadside of the Tateyama-Kurobe Alpine Route, Japan, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46, 9, 921-930, 2011.07, DOI: 10.1080/10934529.2011.584505 [査読有].
2. Haruki Nakajima, Atsushi Kume, Megumi Ishida, Tohru Ohmiya, Nobuya Mizoue: Evaluation of estimates of crown condition in forest monitoring: comparison between visual estimation and automated crown image analysis, *Annals of Forest Science*, 68, 8,

- 1333-1340, 2011.12, DOI: 10.1007/s13595-011-0132-9 [査読有].
3. Yoshitoshi Uehara, Atsushi Kume: Canopy rainfall interception and fog Capture by *Pinus pumila* Regal at Mt. Tateyama in the northern Japan Alps, Japan, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44, 1, 143-150, 2012.02, DOI: 10.1657/1938-4246-44.1.143 [査読有].
  4. Masaaki Chiwa, Norio Onikura, Junichiro Ide, Atsushi Kume: Impact of N-Saturated upland forests on downstream N pollution in the Tatara River Basin, Japan, *Ecosystems*, 15, 2, 230-241, 2012.03, DOI: 10.1007/s10021-011-9505-z [査読有].
  5. Masaaki Chiwa, Toshihide Matsuda, Nobutake Nakatani, Tsuyoshi Kobayashi, Atsushi Kume, Hiroshi Sakugawa: Effects of canopy N uptake on foliar CO<sub>2</sub> assimilation rates and biomass production and allocation in Japanese red pine seedlings, *Canadian Journal of Forest Research*, 42, 7, 1395-1403, 2012.07, DOI:10.1139/x2012-091 [査読有].
  6. Inoue Mizuki, Atsushi Kume, Masaaki Chiwa, Yoshitoshi Uehara, Kiyoshi Ishida: Impact of soil water chemistry on the apparent sex ratio of the flowering ramets of the dioecious plant *Myrica gale* var. *tomentosa*, *Journal of Plant Research*, 125, 5, 631-641, 2012.09, DOI: 10.1007/s10265-012-0481-y [査読有].
  7. 久米 篤: オゾン感受性の樹種間差異とブナ枯れの関係を考える -富山県・立山のブナ衰退を例に-, 北方林業, 65, 80-83 ページ, 2013.03. [査読無].
  8. Masaaki Chiwa, Sachiko Inoue, Naoaki Tashiro, Daisuke Ohgi, Yoshitoshi Uehara, Hideaki Shibata, Atsushi Kume: Assessing the role of forests in mitigating eutrophication downstream of pasture during spring snowmelt, *Hydrological Process*, 2014.03, DOI: 10.1002/hyp.10189 [査読有].

〔学会発表〕(計6件)

1. Yoshitoshi Uehara, Atsushi Kume, Takanori Nakano, Koichi Watanabe, Kazuma Aoki: Atmospheric deposition and canopy interactions of *Pinus pumila* Regal forest at Mt. Tateyama in the Northern Japan Alps, Japan, The 5th EAFES International Congress, 2012.03.
2. 久米 篤: 日本の森林はオゾンと同時に様々な広域大気汚染の影響を受けている, 第124回日本森林学会, 2013.03.

3. Yoshitoshi Uehara, Atsushi Kume: Fog capture and rainfall interception by *Pinus pumila* Regal canopy at Mt. Tateyama in the northern Japan Alps, Japan, The 6th International conference on Fog, Fog Collection and Dew, 2013. 05.
4. 上原佳敏, 久米篤, 中野孝教: 立山高山帯のハイマツ植生における Sr 同位体の分布, 日本地球惑星科学科学連合 2013年大会, 2013. 05.
5. 上原佳敏, 久米篤, 中野孝教: Sr 安定同位体比からみたハイマツ表面からの栄養塩吸収, 日本生態学会第61回大会, 2014. 03.
6. 久米 篤: 硫酸イオンの沈着がマツ針葉表面からの栄養塩吸収と溶脱に及ぼす影響, 第125回日本森林学会, 2014.03.

〔図書〕(計1件)

久米 篤, 大政 謙次 (監訳) 植生のリモートセンシング, 森北出版, 2013.09.

〔その他〕

ホームページ等

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001688/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

久米篤 (KUME, Atsushi)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 20325492

### (2)研究分担者

智和正明 (CHIWA, Masaaki)

九州大学・大学院農学研究院・助教

研究者番号: 30380554

### (3)連携研究者

青木一真 (AOKI, Kazuma)

富山大学大学院理工学研究部・准教授

朴木英治 (HONOKI, Hideharu)

富山市科学博物館・学芸員

飯田 肇 (IIDA, Hajime)

立山カルデラ砂防博物館・学芸員