

## 学位論文題名

## 森林生態系における物質環境の地域特異性に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、陸域生態系、特に森林生態系における酸性化、富栄養化が地球規模での重要な環境問題の一つとしてあげられている。森林生態系では、大気からの物質の流入と土壌からの排出という地球化学的過程において、植物吸収、落葉、落枝、植物溶脱、有機物分解を通して生じる生物地球化学的循環が生じており、それぞれの生態系はおかれた様々な条件下で独自の物質循環系を形成している。酸性化、富栄養化は、これら物質循環のバランスが維持できなくなって引き起こされる可能性がある。本研究は、物質循環の地域特異性をもたらす要因を解析することを目的に行った。調査地点は道央から道北に位置する針葉樹、広葉樹の8箇所の森林生態系およびロシア極東のハバロフスクの計9箇所である。本研究では、プロトン、塩基、窒素の動態に着目し、各森林生態系において地球化学的、生物地球化学的循環過程を測定し、それに基づき、植物系および土壌系の物質収支 ( $\Delta H^+$ ,  $\Delta BC$ ,  $\Delta N$ ) を算出した。なお、 $\Delta H^+$  はプロトンの緩衝量、 $\Delta BC$ 、 $\Delta N$  はそれぞれ塩基と窒素の蓄積量である。得られた値を、欧米の針葉樹林・広葉樹林において観測された文献値と比較検討した。

1. 大気降下物：大気からの  $H^+$  フラックスは  $0.03 \sim 1.00 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  の範囲にあり、ハバロフスクで低く、欧米の値に匹敵するものもあった。塩基フラックスは  $0.71 \sim 8.08 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、窒素フラックスは  $0.27 \sim 1.52 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  の範囲にあり、 $H^+$  フラックスが大きいほど大きい傾向があった。ただし、塩基フラックスは欧米で測定された値に比べ高かったのに対し、窒素フラックスは欧米と変わらなかった。

2. 酸緩衝能：いずれの地点も大気からの  $H^+$  フラックスの増加とともに植物系の  $\Delta H^+$  は増加した。北米では  $H^+$  フラックスが  $1 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  を超えると  $\Delta H^+$  が急激に低下し、 $2 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  のフラックスで負になる地点もみられた。別に北海道で測定された例では  $H^+$  フラックスが  $1.63 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と大きかったにも関わらず  $\Delta H^+$  の低下は見られず、北海道の植生の酸緩衝能が高いことが示唆された。土壌系の  $\Delta H^+$  は、すべての地点で土壌への  $H^+$  フラックスの増加とともに増加した。酸緩衝能は、植物系では主に塩基との交換反応により生じ、土壌系では塩基交換とともに、Al やその他の弱酸の緩衝により生じる。植物系において  $\Delta H^+$  が低下した北米の例では、塩基不足が原因ではないかと思われた。

3. 塩基蓄積：植物系の  $\Delta BC$  は樹種に関わりなく  $\Delta H^+$  の増加とともに増加しており、植生における塩基蓄積が酸緩衝に効果があることを示唆していた。ただし、欧米に比べ本研究での  $\Delta BC$  は著しく高く、とくに Ca で高かった。またハバロフスクでは  $\Delta H^+$  がほぼ0に近い値であったが  $\Delta BC$  は比較的高かった。

これは、元来植物は塩基を吸収蓄積することを示している。したがって、酸の負荷を受ける地域の植生は、余分な塩基吸収を強いられていると考えられる。

4. 窒素降下物の影響：植物系における  $\Delta N$  は  $\Delta BC$  と正比例関係にあり、窒素吸収は塩基吸収を助長した。 $\Delta N$  は大気降下物の窒素のインプットとともに増加する傾向が見られたが、増加の程度は欧米に比べ本研究の方が大きい傾向にあった。土壌系の  $\Delta N$  は植物系の  $\Delta N$  の増加に伴い低下し、本研究では泥炭土を除き負の値となった。泥炭土は土壌有機物中に窒素蓄積があると思われる。一方、欧米の多くの地点では土壌系の  $\Delta N$  は正となり、土壌中に余剰窒素が生じていた。この余剰窒素は硝酸となり、塩基を伴って溶脱し、土壌の酸性化を助長すると思われる。

5. 植生への塩基供給：大気からの塩基フラックスの増加に対し、植物系の  $\Delta BC$  は増加した。その内訳は Ca で高く Na は 0 に近かった。ただし、欧米およびハバロフスクでは大気からの塩基フラックスは  $2\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  以下であったのに対し、北海道ではそれ以上の値であった。このことは、大気からの塩基フラックスが植物系への塩基蓄積量を左右する要因の一つであることを示している。一方、土壌系の  $\Delta BC$  は、欧米では 0 に近かったが、本研究地点では泥炭土を除き負となり、とくに Ca で多かった。このことは、本研究地点では土壌系から植物系へ十分な Ca が供給されていたのに対し、欧米ではその供給が小さかったことを示している。

6. 土壌の酸緩衝が植物の酸緩衝に及ぼす影響：土壌系の  $\Delta BC$  の低下量は、本研究では  $\Delta H^+$  より圧倒的に大きく、植物吸収や溶脱による内部酸の生成が大きいことを示していた。この内部酸の生成が風化を助長し塩基を植物に供給すると考えられる。一方、北米の一部は  $\Delta BC$  の低下量より  $\Delta H^+$  の方が大きく、土壌溶液中の Al 濃度も高まっていた。すなわち、土壌系での酸緩衝が Al により生じていたことを示していた。さらにこの地点では、土壌系の  $(K+Ca+Mg)/Al$  (mol/mol) の値が生育の臨界点とされる 1 近くまで低下していた。事実この地点の植物系における  $\Delta H^+$  は負となり、植生の酸緩衝能は低下していた。このことは土壌からの塩基とくに Ca の供給が制限になり、Al が植生に対して障害をもたらしたためであると思われる。

7. まとめ：植物は土壌から窒素を吸収し、それに応じて塩基を吸収するが、そのことは土壌を酸性化し、風化を助長する。したがって、大気からの窒素供給が多くなると、必然的に土壌の酸性化と風化は促進される。さらに大気からの酸の流入が多くなると、その緩衝のため植生はより多くの塩基を吸収しなければならず、土壌の酸性化と風化はさらに加速される。したがって、大気からの塩基の供給は土壌の酸性化を軽減する重要な因子である。北海道およびハバロフスクでは、欧米に比べて大気からの窒素や酸のフラックスの増加にともなう塩基フラックスが大きく、このことが土壌の酸性化を軽減する大きな要因であったと思われる。したがって、酸や窒素フラックスに応じた人工的な塩基施与は効果的であると思われた。

以上のように本研究は、森林生態系における酸と塩基、および窒素の動態が相互に深く関わりを持ちながら、森林生態系が維持されていることを解析したもので、得られた知見は今後の森林生態系の維持管理に重要な示唆を与えると期待される。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介  
副 査 教 授 高 橋 邦 秀  
副 査 教 授 佐 藤 冬 樹  
副 査 助 教 授 柴 田 英 昭

## 学 位 論 文 題 名

### 森林生態系における物質環境の地域特異性に関する研究

本論文は9章からなり、図39、表97、引用文献142を含む総頁数173の和文論文である。別に参考論文6編が添えられている。

近年、陸域生態系、特に森林生態系における酸性化、富栄養化が地球規模での重要な環境問題の一つとしてあげられている。森林生態系では、大気からの物質の流入と土壌からの排出という地球化学的過程において、植物吸収、落葉、落枝、植物溶脱、有機物分解を通して生じる生物地球化学的循環が生じており、それぞれの生態系はおかれた様々な条件下で独自の物質循環系を形成している。酸性化、富栄養化は、これら物質循環のバランスが維持できなくなって引き起こされる可能性がある。本研究は、物質循環の地域特異性をもたらす要因を解析することを目的に行ったものである。調査地点は道央から道北に位置する針葉樹、広葉樹の森林生態系およびロシア極東ハバロフスクの計9箇所である。本研究では、プロトン、塩基、窒素の動態に着目し、各森林生態系において地球化学的、生物地球化学的循環過程を測定し、それに基づき、植物系および土壌系の物質収支 ( $\Delta H^+$ ,  $\Delta BC$ ,  $\Delta N$ ) を算出した。なお、 $\Delta H^+$  はプロトンの緩衝量、 $\Delta BC$ 、 $\Delta N$  はそれぞれ塩基と窒素の蓄積量である。得られた値を、欧米の針葉樹林・広葉樹林において観測された文献値と比較検討し、以下の結果を得た。

1. 大気降水物：大気からの  $H^+$  フラックスは  $0.03 \sim 1.00 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  の範囲にあり、ハバロフスクで低く、欧米の値に匹敵するものもあった。塩基フラックスは  $0.71 \sim 8.08 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 、窒素フラックスは  $0.27 \sim 1.52 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  の範囲にあり、 $H^+$  フラックスが大きいほど大きい傾向があった。ただし、塩基フラックスは欧米で測定された値に比べ高かったのに対し、窒素フラックスは欧米と変わらなかった。

2. 酸緩衝能：いずれの地点も大気からの  $H^+$  フラックスの増加とともに植物系の  $\Delta H^+$  は増加した。北米では  $H^+$  フラックスが  $1 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  を超えると  $\Delta H^+$  が急激に低下し、 $2 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  のフラックスで負になる地点もみられた。別に北海道で測定された例では  $H^+$  フラックスが  $1.63 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  と大きかったにも関わらず  $\Delta H^+$  の低下は見られず、北海道の植生の酸緩衝能が高いことが示唆された。土壌系の  $\Delta H^+$  は、すべての地点で土壌への  $H^+$  フラックスの増加とともに増加した。酸緩衝能は、植物系では主に塩基との交換反応により生じ、土壌系では塩基交換とともに、 $Al$  やその他の弱酸の緩衝により生じる。欧米の植物系において  $\Delta H^+$  が低下した理由は塩基不足が原因であると考えられた。

3. 塩基蓄積：植物系の  $\Delta BC$  は樹種に関わりなく  $\Delta H^+$  の増加とともに増加してお

り、植生における塩基蓄積が酸緩衝に効果があることを示唆していた。ただし、欧米に比べ本研究での $\Delta BC$ は著しく高く、とくにCaで高かった。またハバロフスクでは $\Delta H^+$ がほぼ0に近い値であったが $\Delta BC$ は比較的高かった。これは、元来植物は塩基を吸収蓄積することを示している。したがって、酸の負荷を受ける地域の植生は、余分な塩基吸収を強いられていると考えられる。

4. 窒素降下物の影響：植物系における $\Delta N$ は $\Delta BC$ と正比例関係にあり、窒素吸収は塩基吸収を助長した。 $\Delta N$ は大気降下物の窒素のインプットとともに増加したが、増加の程度は欧米に比べ本研究の方が大きかった。土壌系の $\Delta N$ は植物系の $\Delta N$ の増加に伴い低下し、本研究では泥炭土を除き負となった。泥炭土は土壌有機物中に窒素蓄積があると思われる。一方、欧米の多くの地点では土壌系の $\Delta N$ は正となり、土壌中に余剰窒素が生じていた。この余剰窒素は硝酸となり、塩基を伴って溶脱し、土壌の酸性化を助長すると思われる。

5. 植生への塩基供給：大気からの塩基フラックスの増加に対し、植物系の $\Delta BC$ は増加した。その内訳はCaで高くNaは0に近かった。ただし、欧米およびハバロフスクでは大気からの塩基フラックスは $2\text{kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 以下であったのに対し、北海道ではそれ以上の値であった。このことは、大気からの塩基フラックスが植物系への塩基蓄積量を左右する要因の一つであることを示している。一方、土壌系の $\Delta BC$ は、欧米では0に近かったが、本研究地点では泥炭土を除き負となり、とくにCaが多かった。このことは、本研究地点では土壌系から植物系へ十分なCaが供給されていたのに対し、欧米ではその供給が小さかったことを示している。

6. 土壌の酸緩衝が植物の酸緩衝に及ぼす影響：土壌系の $\Delta BC$ の低下量は、本研究では $\Delta H^+$ より圧倒的に大きく、植物吸収や溶脱による内部酸の生成が大きいことを示していた。この内部酸の生成が風化を助長し塩基を植物に供給すると考えられる。一方、北米の一部は $\Delta BC$ の低下量より $\Delta H^+$ の方が大きく、土壌溶液中のAl濃度も高まっていた。すなわち、土壌系での酸緩衝がAlにより生じていたことを示していた。さらにこの地点では、土壌系の $(K+Ca+Mg)/Al$  (mol/mol)の値が生育の臨界点とされる1近くまで低下していた。事実この地点の植物系における $\Delta H^+$ は負となり、植生の酸緩衝能は低下していた。このことは土壌からの塩基とくにCaの供給が制限になり、Alが植生に対して障害をもたらしたためであると思われる。

7. まとめ：植物は土壌から窒素を吸収し、それに応じて塩基を吸収するが、そのことは土壌を酸性化し、風化を助長する。したがって、大気からの窒素供給が多くなると、必然的に土壌の酸性化と風化は促進されると考えられる。さらに大気からの酸の流入が多くなると、その緩衝のため植生はより多くの塩基を吸収しなければならず、土壌の酸性化と風化はさらに加速される。したがって、大気からの塩基供給は土壌の酸性化を軽減する重要な因子であると考えられる。北海道およびハバロフスクでは、欧米に比べて大気からの窒素や酸のフラックスの増加にともなう塩基フラックスが大きく、このことが土壌の酸性化を軽減し、森林生態系を維持する大きな要因であったと思われた。

以上のように本研究は、森林生態系における酸と塩基、および窒素の動態が相互に深く関わりを持ちながら、そのバランスにおいて地域の森林生態系の維持が特徴付けられていることを明らかにしたものであり、得られた知見は今後の森林生態系の維持管理に重要な示唆を与えると期待されるとともに、その成果は学術的に高く評価される。よって審査員一同は、永田 修は博士(農学)の学位をうけるのに十分な資格を有するものと認めた。