

ロシア・アムール州の山火事後の森林再生初期過程 —特に針葉樹実生の更新と土壤養分, 炭量に注目して—

北海道大学大学院農学院 小林真

岡山大学大学院環境学研究所 廣部宗

イギリス・バンガー大学 DeLuca TH

ロシア・極東農業大学 Bruanin SV, Malashko EV, Valentina FV

北海道大学大学院農学研究院 橋床泰之・小池孝良

はじめに

山火事は主要な攪乱要因として、北方林の構造や機能へ大きな影響を及ぼしている(6, 11)。山火事は、様々なメカニズムを通じて北方林へ影響を与えるが、その一つに植物の更新へ与える影響がある。山火事は、堆積有機物の燃焼や樹冠の消失に伴う光環境の改善など、林床の環境を変化させることによって植物の更新へ影響を与える。そのような山火事による環境変化の1つに炭の生成がある(4)。

炭は多孔質な物質であり、これまでに土壤や植物の成長へ与える影響が報告されてきた。炭の持つ豊富な孔隙は、物理的、化学的に物質を吸着する力を持っている(5, 9)。炭の孔隙の中には炭の材料となる植物体が燃焼した際に生成された灰分が物理的に吸着されている(5, 14)。灰分には、窒素やリンの他に大量のカルシウムやマグネシウムなどのアルカリ土類金属類が含まれる。そのため、土壤への炭の添加はそのままアルカリ土類金属の添加と同義となり、土壤中のpHの増加を起す(5, 14)。また、燃焼時より炭に含まれる養分ではなく、水分中に溶けた養分も水分とともに炭の孔隙に保持される。過去の研究では、土壤への炭の添加によって、水溶性のアンモニア態窒素やリン酸などが土壤中で保持される期間が長くなることが示唆されている(5, 10)。

これまで、炭が土壤条件や植物の成長に及ぼす影響に関する研究は、温室に設置したポットや苗畑などで行われたものが殆どである(4, 5, 7, 9, 10, 12, 14)。一方、実際の山火事跡地では、様々な要因が複雑に土壤条件や植物の更新へ影響を与えていると考えられる。そのため、山火事跡地において炭が土壤条件や植物の成長へ与える影響の重要性を明らかにするためには、野外で炭がどれほど更新へ影響を与えているのかについて調査を行う必要がある。このような背景のもと、本研究では極東ロシア南部の針広混交林において、近年山火事が発生したグイマツとヨーロッパアカマツが優占する森林において、林床における炭の量、養分量、そして実生の更新数との関係についての野外調査を行った。本研究により、山火事という攪

乱が北方林における植生動態へ与える影響メカニズムについて新たな知見を得ることが期待できる。

試験地概要

野外調査は、極東ロシア・アムール州北部のゼーヤ市の南へ40 km離れた森林にて行った(53°32'02" N, 126°39'27" E)。森林の主な構成樹種はグイマツ(*Larix gmelinii*)およびヨーロッパアカマツ(*Pinus sylvestris*)で、シラカンバ(*Betula platyphylla*)とわずかに混交していた(図-1)。グイマツの幹の年輪数により林齢を推定したところ、約120年生の林分であった。林床の相対照度は開放地の20%ほどであった。土壤型はロシア方式で褐色タイガ土壤、土性は砂壤土であった。本調査地付近は非凍土地帯の北限に当たり、年平均気温は-2.1°C、年間の降水量は約520 mmである。本林分は地形的には平坦であった。当調査地では2007年の秋に地表火が発生した。山火事の強度はシラカンバの成木を枯死させるが、グイマツやヨーロッパアカマツの成木は枯死させないほどの弱度のものであった。

調査方法

試験地には、1 m×25 mのベルトトランセクトを一つ、2009年の7月上旬に設置した。トランセクトには、連続的に50 cmの小プロットを設置し、結果として合計で100個の小プロットが設置された(図-2)。各小プロット内において、2007年の山火事跡に侵入したグイマツおよびヨーロッパアカマツの実生数を数えた。また、各小プロットの中心より、リター層以深の林床基質を深さ5 cm、直径12.7 cmの採取円筒(容量200 ml)で採取した(合計100サンプル、図-3)。サンプリング深度は、事前の調査によって、実生の根が主に存在する深度(深さ0-5 cm)とした。各小プロットから採取したサンプルは、石、根、枝などを手作業で取り除いた後に、5 mmの篩を通して調製した。調製土壌10 gを2 M KCl溶液100 mlと混合し一時間振とう後、Whatman 2のろ紙にてろ過した。ろ過後の抽出液は、NH₄-N(以下NH₄)およびNO₃-N(以下NO₃)含有量の分析に使用した。NH₄の分析は、インドフェノール青色吸光度法に従って分光光度計にて(KFH-2-UHL-4.2 ZAGORSKY, Russia),

Kobayashi MAKOTO (Graduate School of Agr., Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589), Muneto HIROBE (Graduate School of Environmental Science, Okayama University, Okayama 700-8530), DeLuca TH (Environment Centre Wales, Bangor University, Bangor, Gwynedd LL57 2UW, UK), Bruanin SV, Malashko, EV, Procopchuk VF (Far Eastern State Agricultural University, Blagoveshchensk, 675009, Russia), Yasuyuki HASHIDOKO, Takayoshi KOIKE (Research Fac. of Agr., Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589). Investigation of early stage of forest regeneration after a surface fire in Amur region, Russia with special reference to the relationship between charcoal, soil nutrients and seedling establishment.



図-1 調査地の様子

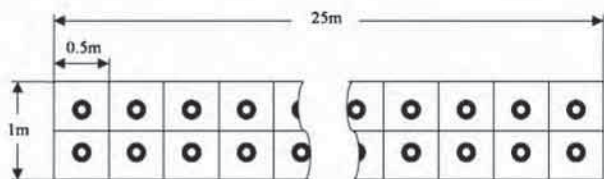


図-2 土壌サンプリングや実生の計数を行った実験設計
実生数は50cm四方の各小プロット内の数とした。また、土壌サンプリングは各小プロットの中心(黒丸)から行った。

また NO₃ は、イオン電極法に従ってイオンメータを用いて分析した (ELISS-121, SCI PRIDCUTION ASSOC MEASUR TECH, Russia)。すべての NO₃ 含有量は、イオンメータの検出限界以下であった。そのため本研究では、NO₃ の分析結果については報告しない。可給態リンの含有量はブレイ 2 法に従って分析した。すべての養分データは、抽出に用いた調製試料の乾重量あたりで計算し、含有量とした。その際、含水率は、約 20 g の生土をドライオープンにて 60°C で 18 時間乾燥させることで求めた。土壌の酸性度は 10 g の調製試料を 100 ml の蒸留水と混合し、一時間振とうして作成した懸濁液を対象に、携帯型 pH メータを用いて調べた (B-212, HORIBA, Japan)。

含水率を分析するためにオープンにて乾燥させた調製試料はそのまま炭の含有量の分析に用いた。炭の含有量は改良した形の CTO375 法を用いて行った(8)。調製試料は乳鉢と乳棒を用いて粉碎し 500 μm の篩にかけた。オープンで乾燥させた 0.5 g のサンプルを 5 cm×10 cm のアルミニウムのトレイに薄くのばした。マッフル炉による燃焼中は、炉の中に十分な酸素が供給されるようにした。そして 375 °C で燃焼した後の調製試料の重量と 450 °C で燃焼した後の調製試料の重量との差から、含まれる炭の量を決定した。調製土壌の重さあたりの炭の量は、60 °C で 18 時間乾燥させた後のサンプル重量あたりで算出した。この方

法は 99.85%以上の炭やススを除く有機体の炭素は 375°C の燃焼で気化し、10%以下のブラックカーボンが 450°C の燃焼によって気化するという原理に基づいている(8)。これら 2 つの温度は、熱および化学的手法を交えた“CTO375 法”で使われる温度である。元法である CTO375 法では、サンプル中に含まれる炭の量を調べる際に 2 つの温度で燃焼後のサンプルについて、元素分析計を用いて炭素含有量を分析する。しかし、元素分析計は極東ロシアでは保有台数が少なく使用が困難である。また現在、土壌はロシアから持ち出すことが非常に困難であるため日本での土壌分析も不可能である。そのため、本研究では異なる温度で燃焼した際の土壌重量の差から、含まれる炭の量を決定した。

本研究で用いた重量減少にもとづいて炭の量を直接的に推定する方法は、山火事由来の炭以外のブラックカーボンについても含めて測定することとなり、結果の解釈が混乱する危険性がある。しかし、同サイトが工業的ブラックカーボンであるススやエアロゾルを排出する箇所から 5 km 以上は離れていることなどから、林床のサンプルに含まれるブラックカーボンの多くは、山火事によって生成したものであると仮定した。分析、測定をしたパラメータの概要は表-1 に示す。



図-3 サンプリングした土壌の様子

統計解析

土壌サンプル中の炭の含有量とすべての理化学的特性、および実生の更新数との相関は、空間的自己相関を考慮した一般化線形モデルを用いて解析を行った(GLM)。目的変数は、炭の含有量以外の土壌パラメータおよび各実生の数とし、説明変数は炭量とした。

本解析では空間的自己相関を説明する空間項をモデルに含めて解析を行った(1)。解析にはまず、各プロット間で空間的自己相関は発生しないと仮定し、各目的変数に対するモデルを作成する。続いて、作成されたモデルより、各地点の周囲 5 m 以内における目的変数の平均値を推定、算出し、各点における空間的自己相関項とする。そして再度、目的変数に各パラメータを、説明変数に炭の量と空間的自己相関項を含めた GLM を作成し、説明変数が目的変数へ影響しているかを検討する。このことで、空間的自己相関を考慮した際に、説明変数は目的変数へ顕著な影響を及ぼしているのかを検討することが可能となる(1)。説明変数の影響については、推定されたモデルの傾きの正負とともに、推定されたモデルの傾きが 0 と有意に異なるかど

うかを Wald 検定によって対比較することで判断した。有意水準は 5%とした。各パラメータの誤差構造については実生数についてはポアソン分布を、その他のパラメータについては、正規分布を仮定した。すべての統計解析は、フリーソフト R version 2.6.0.を用いて行った。

結果

土壌中の炭の含有量と土壌 pH, 土壌含水率, そして可給態リン含有量との間には有意な正の相関関係があった(モデルの傾き=0.019, 0.859, 0.956 そして $p=0.012, 0.001, 0.013$)。さらに、炭の含有量とヨーロッパアカマツの実生の数との間にも、有意な正の相関が認められた(モデルの傾き=0.045, $p=0.009$)。しかし一方で、炭の含有量と NH_4 および炭の含有量とグイマツの実生の数には有意な相関関係は認められなかった。

表-1 本研究で調査した各パラメータのデータ構造。

	最小値	中央値	平均値	最大値	標準偏差	CV (%)
炭 (mg kg^{-1})	0.0	8.0	8.3	25.4	4.5	54.1
NH_4 (mg kg^{-1})	0.5	5.3	6.4	21.3	3.5	55.5
可給態 P (mg kg^{-1})	7.8	25.0	29.6	93.4	17.7	59.6
pH	5.6	6.4	6.3	7.1	0.4	5.7
含水率 (%)	16.5	30.9	33.7	71.6	11.4	33.8
グイマツ実生数 (実生 plot^{-1})	0.0	1.0	1.3	5.0	1.1	90.7
ヨーロッパアカマツ実生数 (実生 plot^{-1})	0.0	1.0	1.5	6.0	1.4	97.6

【註】炭=炭の含有量, $\text{NH}_4=\text{NH}_4$ 含有量, 可給態 P=可給態リンの含有量, 含水率=土壌含水率, pH=土壌 pH, グイマツ実生数=50 cm×50 cm の小プロット内のグイマツ実生数, ヨーロッパアカマツ実生数=50 cm×50 cm の小プロット内のヨーロッパアカマツの実生数。

考察

実際の山火事跡地において、土壌中の炭の含有量といくつかの土壌の理化学性、そしてヨーロッパアカマツの実生数との間に正の相関が見られた。このことから、炭の含有量が実生の更新へ影響するメカニズムとして、実生の根圏土壌における理化学性を通じたものが示唆された。

炭の含有量と土壌 pH の間に見られた正の相関関係は、燃焼時より炭の孔隙に含まれる灰分によって、酸性である土壌の pH が中性に近づけられたためと考えられる(5, 14)。炭の含有量と土壌含水率の間に見られた正の相関は、炭には無数の小孔隙および大孔隙を持っていて、それらが水分を保持するため、土壌中における含水率が増加したと考えられる(5, 9)。可給態リンの含有量が多かったことについては、当調査地で発生した山火事が、リンを多く含む炭を生成する弱度の地表火であったことも関係していると考えられる(7)。

また、リンはカルシウムやマグネシウムと結合して可溶性の低い状態で大孔隙に沈殿する(5)。このようなリン(P)酸塩は移動性が低いため(3)、炭の大孔隙中にとどまりやすい。そのため、炭の含有量とリンの量に正の相関があったのではないかと考えられる。一方、カルシウムやマグネシウムに結合したリンは菌根菌から滲出する有機酸によってリン酸が酸化され植物にとって利用可能となる。ヨーロッパアカマツや他のマツ科の樹種が成育する森林生

態系では、これらの成長にとってリンが制限となっているという報告もある(13)。本調査地では、炭がリンや水分を孔隙に保持することでそれらの土壌中での量を増加させるとともに植物への利用可能量を増加させ、より多くのヨーロッパアカマツの発生と定着へつながっていると考えられる。

他の研究(2)でも報告されているように、炭の存在と抽出可能な NH_4 の量とは相関が見られなかった。このことはおそらく、 NH_4 が炭に吸着されにくいためであると考えられる(2)。一方で、過去の研究ではブラジルのアマゾンの土壌において、炭を土壌に添加することによって NH_4 が炭に吸着されることによって NH_4 の土壌中からの流出が減少するということが報告されている(10)。しかしながら、この研究では炭による NH_4 の直接的な吸着以外による NH_4 流出量の減少である可能性も残る。今後の課題としては、これまでの研究の中で炭が促進するといわれている硝化や有機化のプロセスなど、土壌から流出する NH_4 量を減らしうる吸着以外の経路についても野外にて検証する必要があるだろう(4)。なお、イオン選択電極を用いて NO_3 が検出されなかったことで、北方林や温帯林において報告されている炭が正味の硝化へ与える影響については(4)、あいまいなままであった。

ヨーロッパアカマツの実生数と炭含有量については、有意な正の相関が認められたが、グイマツの実生数との間では有意な相関は認められなかった。この理由として、野外での観察結果からは、ヨーロッパアカマツの実生の方がグイマツの実生で成長速度が小さかったということが考えられる。炭による実生への正の効果には、林床の表面に存在している炭ではなく、土壌の内部に炭が存在し、植物の根が頻繁に接することではじめて発揮される(12)。本調査地では、炭の主な分布位置は、地表面と有機物層と鉱質土壌との境界の2箇所であった。そのため、より成長が早く根を発達させていたヨーロッパアカマツの実生の方が根を発達させ、根と炭が接する機会が大きくなり、結果として炭による根圏の養分水分条件による正の効果を受けやすかったのではないかと推察される。このような推察を確かめるために、小プロットや温室などを用いてこのような種間差を生み出すメカニズムを研究する必要がある。

本研究から、山火事によって生成された炭は、極東ロシアで優占しているヨーロッパアカマツ実生の更新へ顕著な影響を与えていることがわかった。山火事によって生成された炭が、土壌養分や実生の更新へ与える影響が野外で検出したことで、北方林における植生動態へ果たす炭の役割について、その重要性をより断定的に言及することが可能となった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員研究奨励費(NO. 192105 代表:小林真), 科学研究補助金基盤研究B(20380083 代表:小池孝良), 科学研究補助金基盤研究A(2025500208 代表:橋床泰之)の支援を得た。記して感謝する。

引用文献

- (1) Augustin NH., Muggleston MA., Buckland ST. (1996) An autologistic model for the spatial distribution of wildlife. *J. App. Ecol.* **33** : 339-347.
- (2) Berglund LM., DeLuca TH., Zackrisson O. (2004) Activated carbon amendments to soil alters nitrification

- rates in Scots pine forests. *Soil Biol. Biochem.* **36** : 2067-2073.
- (3) Certini G (2005) Effects of fire on properties of forest soil: a review. *Oecologia*. **143** : 1-10.
- (4) DeLuca TH., MacKenzie, MD., Gundale MJ. (2009) Bio-char effects on soil nutrient transformation. Chapter 14. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan Publications Ltd, London. Pp 251-270.
- (5) Glaser B., Lehmann J., Zesh W. (2002) Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review. *Biol. Fertil. Soil.* **35** : 219-230.
- (6) Goldammer JG. and Furyaev VV. (1996) *Fire in Ecosystem of Boreal Eurasia*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston London.
- (7) Gundale MJ. and DeLuca. TH. (2006) Temperature and source material influence the chemical properties of charcoal in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. *For. Ecol. Manag.* **231** : 86-93.
- (8) Gustafsson O., Haghseta F., Chan C., Macfarlane J., Gschwend PM. (1997) Quantification of dilute sedimentary soot phase: implication for PAH speciation and bioavailability. *Environ. Sci. Technol.* **31** : 203-209.
- (9) Keech O., Carcaillet C., Nilsson MC. (2005) Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: the role of wood porosity. *Plant Soil.* **272** : 291-300.
- (10) Lehmann J. da Silva Jr. JP. Steiner C. Nehls T. Zech W. Glaser B. (2003) Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments: *Plant Soil.* **249** : 343-357.
- (11) Makoto K., Nemilostiv YP., Zyryanova OA., Kajimoto T. Matsuura Y., Yoshida T., Satoh F., Sasa K., Koike T. (2007) Regeneration after forest fires in mixed conifer broad-leaved forests of the Amur region of Far Eastern Russia: the relationship between species specific traits against fire and recent fire regimes. *Eurasian J. For. Res.* **10** : 51-58.
- (12) Makoto K., Tamai Y., Kim YS., Koike T. (in press) Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings. *Plant Soil* DOI:10.1007/s11104-009-0040-z.
- (13) Sardans J., Roda F., Penuelas J. (2004) Phosphorous limitation and competitive capacities of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* on different soil. *Plant Ecol.* **174** : 305-317.
- (14) Tryon EH. (1948) Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. *Ecol. Monogr.* **18** : 82-115.