

アラスカ大規模森林火災後の植生回復

北海道大学大学院地球環境科学研究院 露崎 史朗

一 はじめに

北米大陸西北端に位置する米国アラスカ州の内陸部では、春から夏にかけて森林火災が頻繁に発生する。火災は、一度起こると、自然に鎮火を待っていない。二・三か月燃え続けることも稀ではない。アラスカ内陸部フェアバンクス周辺で二〇〇四年に発生した大規模森林火災後の植生回復過程を、現在まで追跡調査している。その中で、火災



写真—1 2009年8月上旬にアラスカ内陸部ダルトンハイウェイで見られた森林火災

発生源となる森林から数キロから数十キロメートル離れたフェアバンクス(北緯64°30'、西経147°43')の町中でも、森林火災のため曇り空と間違えるほど煙が立ち込めていることも何日かあった(写真—1)。

アラスカ内陸部では、夏季の降水量は、年平均で三百ミリに達せず、もとも火災が発生しやすい状態にある。そのため、これまでも森林火災が頻発していたが、地球温暖化に伴い森林火災が大規模化しつつある。実際に、二〇〇四年に発生した大規模森林火災の翌年に訪れたボストンクreekを見るに、木々の根を支えていた地表面にあって、厚い有機物層までが焼失したため、多くの木々が倒れていた(写真—2)。これまでの森林火災では、地表面の有機物層までが焼失することは稀であった。

アラスカの森林火災の発生パターンは、火災発生のピークとなる時期までの温度と降水量に左右される。これらの時期に温度が低く降水量が多ければ火災は少なく、逆に、温度が高く降水量が少なければ、「乾いた雷」といわれる降雨を伴わない雷が発生し、火災は面積・強度ともに高くなる。アラスカにおける火災に対する対応であるが、基本的には、遠隔地での火災は衛星等により動向を監視し自然消火を待つ。しかし、建造物特にパイプラインを含めた人災が予測されれば、伐採を主とした防火帯の設置、ヘリコプター放水、などが行われる。

二 北方林と永久凍土

二-一 北方林

北方林とは、北半球高緯度域に形成される森林を指し、主に針葉樹林から構成され、亜寒帯林やタイガとほぼ同じ意味で使われることも多い。北方林は、世界の森林面積の三分の一を占めるが、森林の組成と構造は、シベリアと北米で大きく異なる。

アラスカを含めた北米の森林は、トウヒ属(*Picea*)の森林が、シベリアではカラマツ属(*Larix*)の森林が代表的なものである。アラスカのトウヒ属の代表

種は、シロトウヒ(*Picea glauca*)、クロトウヒ(*Picea mariana*)の2種である。東シベリアのカラマツは、主にグイマツ(*Larix gmelinii*)という種である。これら3種は、日本には分布していないが、日本に分布する近縁な種としては、エゾマツ(*Picea yezoensis*)、アカエゾマツ(*Picea glehnii*)、ニホンカラマツ(*Larix kaempferi*)がある。

これらの森林は、北に行くにつれ、低い日射量と温度から、森林は貧弱に



写真—2 2004年に発生したタイガ林大規模火災後の景観

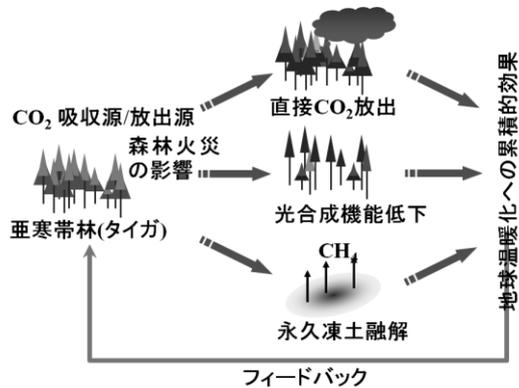


図-1 亜寒帯林(タイガ)における森林火災が生態系に与える様々な影響

とは、広域にわたり全面に永久凍土が凍結した地域である。一方、不連続凍土帯とは、部分的に永久凍土が融解する、あるいは欠落する地域を指す。点在凍土帯とは、永久凍土帯の北半球南限や高山など永久凍土が散在する地域を指す。日本でも点在する永久凍土として、富士山頂や大雪山に見ることが

できる。アラスカ内陸部では、フェアバンクス周辺が不連続凍土帯のほぼ北限で、それより北では連続凍土帯となる。

二.三 アラスカ内陸部の森林

フェアバンクス周辺では、極相となる森林の種組成は、北側斜面と南側斜面で大きく異なる。

北側斜面は、弱い日射と、それに伴う永久凍土の発達と、遅い有機物分解により厚く堆積した有機物層が見られ、貧栄養土壌となる。そのため、北側斜面では、高い栄養分を必要とする植物は定着が困難となり、赤貧土壌上でも定着できるクロトウヒの森林となる。

一方、南側斜面は、強い日射のため凍土が発達せず、決して栄養に富んだとは言えないが、北側斜面と比べれば相対的には土壌の発達が良好である。そのため、南側斜面では、土壌が良好であれば競争に強いシロトウヒが極相と森林の発達は、対応して見られる。

三 森林火災が生態系に与える影響

三.一 北方林と温室効果ガス

温暖化に関連して、北方林は、これまで森林と有機物層の発達に伴い炭素を吸収するため温暖化を緩和する吸収源として位置づけられていた。しかし、火災強度が高くなることで、放出源となりつつある(図-1)。

北方林における森林火災が炭素動態に与える影響は、火災時の直接の大気中への二酸化炭素放出という短期的影響のみならず、長期的な影響も起こる。一つは、森林消失による生態系(森林)の二酸化炭素吸収機能の減少である。即ち、生態系の光合成能力の低下と、それに伴う二酸化炭素吸収機能の低下が長期に渡り起こる。もう一つは、永久凍土融解に伴う温室効果ガスであるメタン(CH₄)の放出である。メタンは永久凍土中に大量に蓄積されており、二酸化炭素の二十三倍の温室効果がある物質である。森林消失により、これまで被陰されていた地表面が直射に暴露され、永久凍土の融解は進む。

なお、近年、森林の炭素蓄積機能としては、有機物層を含めた地下部の機能の見直しが迫られている。シベリアのカラマツ林では、地上部・地下部のバイオマス比率は、ほぼ1となることが明らかとなり、泥炭および有機物層の炭素蓄積量を加えれば、地下部の炭素蓄積量は地上部を上回る。アラスカ

でも有機物の堆積量は膨大である。したがって、北方林における炭素循環については、これまでの知見の再検討が迫られている。

森林火災に伴うこれらの全ての変化が温暖化を促進するため、これまで森林の成長に伴い炭素吸収源であった北方林は、放出源に転じ、相乗効果により地球温暖化への正のフィードバックが起こり、温暖化が加速されると考えられている。今後、森林火災の大規模化に伴う永久凍土の変化を介した生態系の応答とフィードバックを明らかにする必要があるのである。

三.二 植物の火災への適応

アラスカ内陸部の北側斜面で卓越するクロトウヒは、北米北部に広範に分布している。この種の特徴の一つとして、林冠種子貯蔵があげられる。林冠とは、森林上部で太陽光を直接受ける部分を指し、その林冠部に種子を散布せずに貯蔵することを、林冠種子貯蔵という。クロトウヒは、普段は、球果松ぼっくりに種子を貯えた林冠種子貯蔵を行う。そして、主に火災直後に、熱で松脂が揮発し松かさが開くと、球果中にある種子を散布する。これは、火災に適応した種子散布様式と考えられている。

森林火災は、クロトウヒを始めとする火災を利用する植物にとっては正の効果がある。林冠種子貯蔵を行う種に

二.二 永久凍土

永久凍土帯とは、土壌が2年以上凍結した状態にある地域と定義される。ときどき、土の中に氷の塊が永久にあることをイメージされる人がいるが、実際は砂利、砂、粘土等の土壌が凍った層となっている。

永久凍土帯は、その分布形状から、連続、不連続、点在凍土帯の三つに区分されることが多い。これらの区分は、凍土の融解の程度によるもので、植生の発達にも関係している。連続凍土帯

表一 森林火災に伴う植物への影響環境の変化 (文献(1)を改変)

火災強度	無	→	弱	→	強
埋土種子 ^(a)	多	→	中	→	無
栄養繁殖体 ^(b)	多	→	中	→	微
有機物層	多	→	中	→	微
光環境	低	→	高	→	高
病原菌	多	→	少	→	少
種間競争	強	→	強	→	微

(a) 土壌中に生存する発芽可能な種子等
 (b) 火災で死亡しなかった地下茎等の再生可能な植物体

とつては、火災直後は、林冠が開け地表面の光環境が好転し発芽・成長がしやすくなる、土壌中の病原菌が減少し生存率が高まる、林床植物の減少により種間競争が減少する、などの正の側面もある(表一)⁽¹⁾。これらの点は、土壌を焼失させない軽度の火災であれば、土壌中で発芽せずに生存できた埋土種子にとつても、光や熱が発芽シグナルとなるため、火災後に発芽することは定着に有利であり、林冠種子貯蔵と同様の利点がある。日本では、ヌルデやヤマハギなどが高温に曝されることで発芽が誘導されることが知られている。このような、火災適応種は、火災頻発地域で数多くみられ、乾季である夏に火災が多い地中海沿岸、アメリカ西海岸、南アフリカ、西オーストラリア南西部などの地中海性気候の地域では、煙誘導発芽と呼ばれる煙が発芽刺激となつて発芽する種が数多く知られている。

日本からも数種の煙誘導発芽植物が確認されている⁽²⁾。これは、日本においても、過去に長い火災の歴史があったことを示しているのだろうか。シベリアのカラマツも火災に適応した種子散布特性を持つ。これらのことは、自然火災が起こる地域では、樹木が長い歴史を経て火災に適応することで、森林の構造と機能を作り上げてきたことを物語っている。

過去五十年間にアラスカでは、森林火災の発生源を人為起源と自然起源のものに分けると、大まかには、発生件数では、落雷による自然火災が四割を占め、残りが焚火などに起因した人為火災となつている。火災面積では、人為火災の方が人間活動が活発な地域の近くで起こりやすいため、消火活動が自然火災に比べより行われる、自然火災の方が焼失面積が大きい、などの違いもあるが、九割程度が雷起源の自然火災となつている。

植物の火災への適応進化は、自然火災が地史的な長い期間にわたり生態系に影響していることを示している。このような火災地域での森林生態系にとつては、火災がその構造と機能を決定づけているといえる。アラスカにおいて、自然火災は消火活動の困難な遠隔地で起こり、人的被害がないと予測されれば自然鎮火を待つ。多くの自然火災に対しては、自然な推移を見守ることとなり、結果的には、人為が火災規

模や強度に影響することは、ほとんどなかった。

三. 三 北方林の火災と遷移

時間の経過につれて、植生や生態系が変化することを遷移と言う⁽³⁾。これまで、アラスカ内陸部では、森林火災の規模・強度は自然なまま推移したため、森林火災後の植生回復および遷移パターンは、おおむね予測可能なものであった。

これまでの森林火災は、林冠火災と呼ばれる主に林冠部分が燃え、地表面に厚く堆積する有機物層は全焼には至らない、比較的弱い火災が主であった。そのため、北側斜面の林床は火災後に散布されたクロトウヒ種子の発芽適地となり、クロトウヒの更新が火災直後から始まる。その結果、火災直後には、クロトウヒと比べて成長の速い草本植物が数年間ほど優占する。その後、数十年でクロトウヒの若齢林となり、極相に至るまでクロトウヒ林が維持される⁽⁴⁾。

一方、南側斜面のシロトウヒ林では、火災直後の数年間は、草本植生となるのはクロトウヒ林と共通である。草本植生は、クロトウヒ林では見られない低木林と置き換わる。そして、火災から二十年から三十年をかけて、成長の早い落葉広葉樹の森林が形成される。その後、徐々にシロトウヒに置き換わり、二百年以上の時間をかけてシロト

ウヒ極相となるシロトウヒ林が形成される。このように、これまでのアラスカ内陸部の森林火災後の遷移系列は、クロトウヒ林とシロトウヒ林で大きく異なる。

四 森林火災の大規模化と遷移

四. 一 森林火災規模の変化

温暖化に伴い、「乾いた雷」の頻度が増し、北方林の森林火災は、強度・規模ともに増しつつある。そのため、生態系の火災への応答も変化しつつある(表一)⁽⁵⁾。

火災強度が増すと、林冠火災ではなく、地表面の有機物層をも焼失させる強度の大きな全焼火災となる。アラスカ北方林では凍土の発達した北側斜面で見られるクロトウヒ林の方が、温暖化およびそれに伴う森林火災の影響は表れやすい。

二〇〇四年には、アラスカ各地で大規模森林火災が発生し、その合計焼失面積は四国の面積を上回るほどであった。雷が大規模なものであったばかりでなく、火災時の乾燥とフェーン現象が、火災の面積と強度を増大させることになった。これまででは、大規模火災が発生した翌年には、火災は比較的少ないのが普通だったが、翌年の二〇〇五年にも大規模火災が発生した。火災強度が高いと、林冠火災では全てが消失することはなかった地表面に

蓄積する有機物層の相当の部分が焼失してしまふ(写真1-2)。有機物層は、主にミズゴケ類(*Sphagnum* spp.)などの植物遺体から構成され場所によっては厚さが一メートル以上になることもある。これだけの倒木が見られるのは、倒木の根系を始めとする地下部を支えている有機物層が、ほぼ完全に消失し地面が樹木を支えきれなくなったことを示している。

有機物層の発達には、植物体の支持に加えて、断熱効果による土壌の保温効果、孔隙での水分保持、土壌移動の抑制、微地形の改変、など数多くの機能がある。したがって、大規模森林火災による有機物層の衰退は、これまでにない生態系変化を起こさせる鍵となるものと思われる。

四・二 大規模火災後の植生

大規模森林火災に伴う植生回復や遷移が、これまでの林冠火災と、どのように異なるかを明らかにするために、二〇〇四年にフェアバンクス周辺で発生した大規模森林火災跡地において、現在まで追跡調査を行っている。調査地は、北西向斜面で、火災前はクロトウヒの純林で、林床にはミズゴケ類に覆われた有機物が厚く堆積していた。ここにおいて、火災強度と植生の対応関係を知るために、地表面の焼失面積をもとに、様々な強度の個所に調査区を設け比較した。

四・二・一 有機物残存面

有機物層が火災により焼失した地表面(焼失面)と焼失していない地表面(残存面)では、回復様式が大きく異なっていた。

残存面では、火災により死亡しなかった地下茎や塊根などの栄養繁殖体による回復が主であった。栄養繁殖体により順調に回復していた代表的な種は、クロトウヒ林床でよく見られるナナカンバ・イソツツジ・クロマメノキ・コケモモなどの低木類とオハグロスゲやワタスゲなどの草本類である。地表面を覆うミズゴケ類は、回復は遅く、火災後数年間に枯死する部分もあった。種子トラップにより、クロトウヒの種子散布を調べたところ、その種子散布は火災後数年間に集中して行われ、それ以降は、ほとんど種子を散布しない。このことは、クロトウヒの侵入定着は、火災後数年間で決定されることを意味する。クロトウヒは、ミズゴケ上で豊富な実生(芽生え)の発生が認められた。クロトウヒの成長は極めて遅いが、残存面では他の樹種が侵入できないため、種間競争はなく、順調にクロトウヒ林に進行するものと思われた。よって、残存面では、林冠火災と類似した植生回復が起こっているとみなせた。

四・二・二 有機物焼失面

焼失面では、有機物層中の植物は死亡するため、植生回復は主に周囲から

の種子の移入によってなされている。そのため、成熟したトウヒ林には見られないヤノウエノアカゴケ・ウマスギゴケ等の蘚苔類、ヤナギラン・カナダノガリヤスなどの草本植物、アメリカヤマナラシ・カミカンバ・ヤナギ類などの落葉広葉樹が初期に定着していた。ヤナギランは、fireweedと呼ばれ、訳せば「火事場雑草」または「火色雑草」であり、山火事跡によくみられる植物である。

侵入した落葉広葉樹は、全てが長距離風散布種子を生産する種であり、クロトウヒ林内には見られないことから、周囲からの種子移入により侵入定着したものと考えられる。これらの樹種は、残存面では定着が認められず、有機物層の除去が定着条件となっていた。焼失面では、火災直後からクロトウヒの定着も認められたが、落葉広葉樹の密度はクロトウヒよりも高い。樹齢3年のクロトウヒは、樹高が四センチだが(写真1-3)、これでも成長は早い方であるが、落葉広葉樹と比べると、樹高成長は桁違いに遅い。火災十年後には樹高が一メートルに達する落葉広葉樹が数多くみられるが、クロトウヒは、十センチ止まりであった。死亡率は、クロトウヒを含めた樹種間で大きな差はなかった。

これらのことは、大規模火災では、林冠火災と比べると、遷移初期で既に群集構造が大きく変化し、遷移系列が

偏向していることを示している。

四・三 大規模火災による凍土衰退

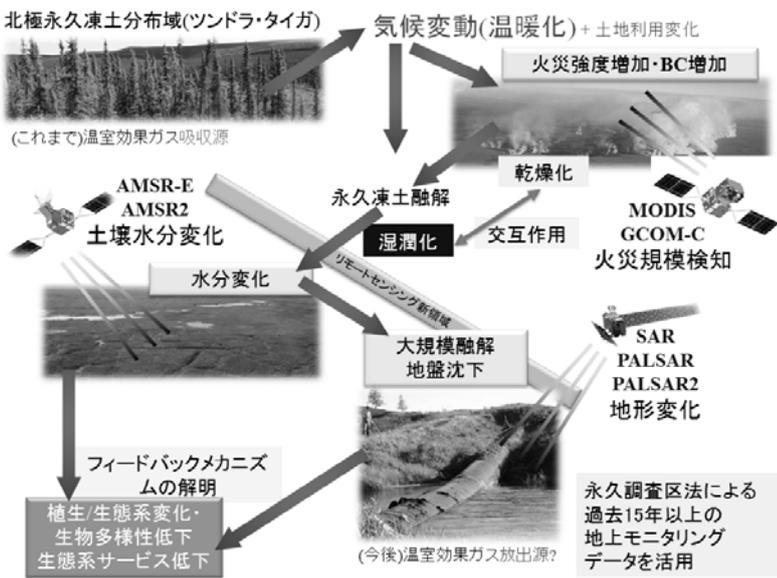
大規模火災域では、火災直後に、永久凍土層が減少し、凍結・融解を繰り返す活動層が増していた。火災から十年を経過しても、凍土層の回復傾向は不明瞭であった。

この原因として、有機物層の断熱効果の消失、有機物燃焼によるブラックカーボン(BC)増加と、それに伴う地表面アルベドの低下があげられる。アルベドとは、入射光に対する反射光の比で、値が低いほど反射光が少ないことを示し、土壌中に熱が吸収されていることを意味している。有機物層があれば、その熱は断熱効果により土壌深くまで伝わらず、土中温度は低いままである。しかし、いずれも有機物層に関連するBC増加とアルベド低下、断熱効果低下という、これらの相乗効果により、火災直後に急激に永久凍土の融解が進む。

地表面アルベドは、植物量とともに増加しており、アルベド回復は、植生



写真—3 火災後に見られたクロトウヒ実生(2007年7月)



図—2 アラスカ森林火災研究の概要

ここでは触れなかったが、タイガの北部には、広大な森林を欠いたツンドラ地帯が分布し、ツンドラ火災の強度も増加傾向にある⁹⁾。ツンドラにおいても、火災による永久凍土の衰退に伴う地盤沈下などの地形変化が認められる。今後、タイガとツンドラを合わせた火災への生態系応答の解明が北極域では必要となる¹⁰⁾。アラスカでは、消防士 (fire fighter) は人気な職業である。

五 おわりに

動の望めない堅果(ドングリ)等を生産する樹種は、温暖化の北進との競争に勝つとは思えない。一方、飛翔性・移動性の高い動物は、これまで生息できなかった極域の生息地に侵入できる可能性が高い。樹木を食害する昆虫も、その例から漏れず、アラスカでは、これまでに記録のない南方起源の昆虫による食害により、森林被害が増えている。虫害により枯死した樹木は、生木よりも燃焼しやすく、大規模火災を誘導しやすい。このことは、火災強度の変化には、捕食者などを介した間接的な作用をも考慮せねばならないことを示している。

火災現場にヘリコプターから飛び降り、防火帯を構築する姿は、スパイダーマンのように華麗な消火活動であり、男の子には憧れの的である。その活動を支えるためにも、米国森林サービス局 (USDA Forest Service) が中心となり、アラスカでは衛星を含めた、火災検知監視網の構築と延焼予測の改善を行っている。

北海道大学では、本年四月に北極域研究センターを立ち上げた (<http://www.arc.hokudai.ac.jp>)。その中の陸域研究課題には、森林火災とBCがあげられている (図—2)。これまでの森林火災に関する研究成果を進展させることで実戦への応用を進めている。本研究の大部分は、JIS-JAXA 委託研究「永久凍土帯における大規模火災後の植生・環境回復の機構・抑制・修復保全」により実施された。

参考文献

1) Johnson EA. 1992. Fire and vegetation dynamics. Studies from the North American boreal forest. Cambridge Univ. Press

2) Tsuyuzaki S & Miyoshi C. 2009. Effects of smoke, heat, darkness and cold stratification on seed germination of 40 species in a cool temperate zone, northern Japan. *Plant Biol.* 11: 369-378

3) 露崎史朗. 2004. 群集・景観・パターンと動態 (植物生態学). 朝倉書店 296-322 pp

4) van Cleve K & Vierick LA. 1981. Forest succession in relation to nutrient cycling in the boreal forest of Alaska. In Forest succession: concepts and application. Springer-Verlag pp. 185-221

5) Tsuyuzaki S, Narita K, Sawada Y & Harada K. 2013. Recovery of forest-floor vegetation after a wildfire in a Picea mariana forest. *Ecol. Res.* 28: 1061-1068

6) Tsuyuzaki S, Narita K, Sawada Y & Kushida K. 2014. The establishment patterns of tree seedlings are determined immediately after wildfire in a black spruce (*Picea mariana*) forest. *Plant Ecol.* 215: 327-337

7) Tsuyuzaki S, Kushida K & Kodama Y. 2009. Recovery of surface albedo and plant cover after wildfire in a *Picea mariana* forest in interior Alaska. *Clim. Change* 93: 517-525

8) 露崎史朗. 2007. 地球温暖化にともなう陸上生態系の変化 (地球温暖化の科学). 北大出版会 115-139 pp

9) Narita K, Harada K, Saito K, Sawada Y, Fukuda M. & Tsuyuzaki S. (in press) Vegetation and permafrost thaw depth ten years after a tundra fire in 2002, Seward Peninsula, Alaska. *Arct. Antarct. Alp Res*