



その7

熱帯の泥炭、永久凍土の行方

国立環境研究所 伊藤 昭彦

森林は陸域の約3分の1に分布し、それは赤道直下の熱帯多雨林から高緯度の亜寒帯林（タイガ）にわたっている。世界の森林の中には日本で見られる温帯林とは大きく様相を異にするものも多く、今回取り上げる熱帯の泥炭や永久凍土上の森林などはその例であろう。それらは単に異質な森林というだけでなく、地域の水・物質の循環や生物多様性、さらには炭素循環を

介してグローバルな気候にも影響を与えうる重要性を持つことが明らかにされつつある。また、熱帯の泥炭と永久凍土は、気候変動や土地利用など様々な人間活動の圧力に曝される脆弱な存在でもある。本稿では、熱帯の泥炭と永久凍土について、その特殊性と機能、今後考えられる変化について解説する。

土地利用に曝される熱帯の泥炭地

泥炭（PEAT）とは、湿原のように過度な湿潤のため植物の枯死物が分解を受けずに長年堆積したものを指す。通常の森林土壌では、土壌に適度に空隙があり酸素が供給されるため、微生物による分解作用がはたらいって鉱質土層が形成される。しかし泥炭地では、場所により数センチ以上の厚さまで有機物のみ堆積した層が形成され、その上に特有の植物相が生育する。泥炭地は熱帯から北極域まで散在し、場所によっては燃料や蒸留酒製造などに利用もされてきた。

近年明らかにされた泥炭地の著しい特徴は、その巨大な炭素ストックである（図1）。前述のように厚く有機物が堆積するため、単位面積あたりの炭素貯留量が極めて高く、平均してヘクタールあたり20000ト（場所により変動は大きい）、時には30000ト以上にも及ぶことがある（文献1）。その蓄積に要する時間は、放射性炭素同位体などを用いて計測されており、およそ厚さ1メートルあたり1000年程度と考えられている。泥炭はその特殊な性質のため、保水性が高いが栄養塩には乏しく、樹木が根を張るには不安定であるが、そのような環境に順



熱帯（マレーシア）の泥炭地上に造成されたオイルパーム園（筆者撮影）



アラスカの永久凍土上のトウヒ林（著者撮影）

応した樹木・低木・草本で構成される泥炭林が成立している。湿原の一種であり、動物や鳥類の生息地として生物多様性を担う重要な存在でもある。

熱帯の泥炭地は、気候的にも土壌的にも農地や居住地として適さなかったが、近年の人口増

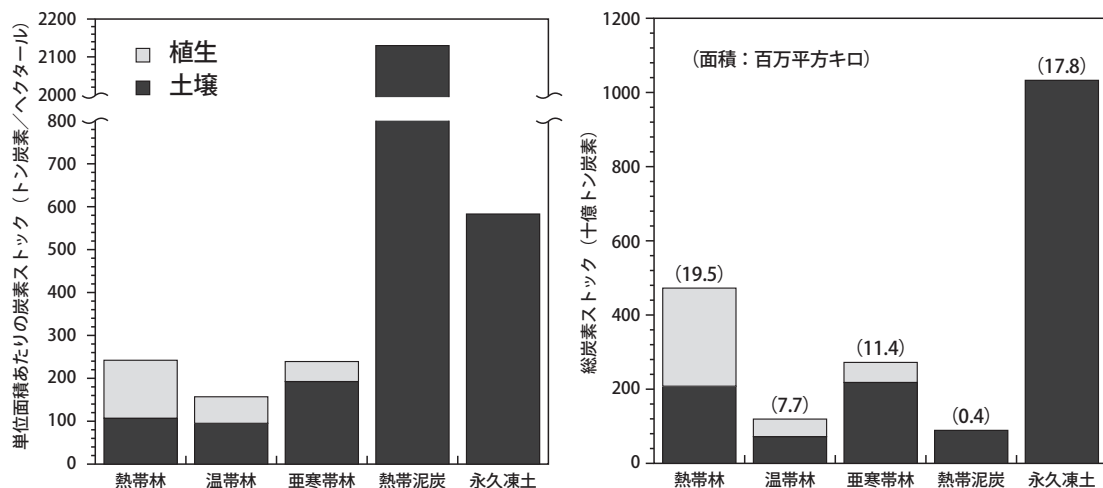


図1 炭素ストックの比較：単位面積あたりの平均（左）およびグローバルな総量（右）。永久凍土の一部は亜寒帯林を含む（出所：Pan ら (2011)、Page ら (2011)、Hugelius ら (2014) データより作図）

加や経済活動によるプレッシャーのため土地利用が進められている。その典型例は、東南アジアにおけるオイルパーム、ゴム、コシヨウ等のプランテーション拡大に見ることができる。泥炭地を農地に転用する場合、水路を張り巡らせて排水を行うため、泥炭が急速に乾燥して好気的な条件となり分解が加速される。分解された有機物からは大量の二酸化炭素（ CO_2 ）が放出されることになり、明らかに地球温暖化を加速する方向にはたらく。ここで問題なのは、もとの泥炭地が放出していたもう一つの温室効果ガス、メタンを考慮するとうなるかである。大気中でメタンは CO_2 に対して（同じ重量・100年間で）約28倍の赤外線吸収能力があり、湿原は最大の自然メタン放出源とされている。しかし熱帯の泥炭地は、土壌の化学性がメタン生成に向かないためか、予想されたほどメタンの放出量が大きくない場所も多いらしい（ただしメタン放出が大きい熱帯湿原もある）。そのため、農地転用が泥炭地の炭素収支に与える影響としては、 CO_2 放出や溶脱による炭素の喪失が主な問題になる。泥炭の蓄積に長期間を要することは前述したが、それは失った泥炭の回復が徐々にしか進まないことを意味している。

熱帯の泥炭地に対する脅威は土地利用だけではない。気候変動も泥炭地に影響を与えており、その一つがエルニーニョ発生時に頻発する泥炭地での火災である。強いエルニーニョが発生する時期には、東南アジアで極端に降水量が減り、森林の乾燥によって大規模な火災の発生

を伴いがちである。その際、落雷や強風などの自然の原因だけでなく、伐採や焼畑などの人間活動が発火原因となることで、より火災が拡大しやすい。1997年や2015年はその典型であり、インドネシアなど東南アジアでは広大な熱帯林が焼失した。泥炭地の火災は、地面の下で乾燥した泥炭がくすぶり続ける特殊なもので、消火・鎮火までに長時間を要する。そこから放出された煤煙が都市域まで流れ、健康被害を及ぼすこともまれではない。泥炭地の火災からの放出量を推定することは難しいが、2015年の東南アジアの例では数億ト（例えば約2・3億トと日本の年間排出量に迫る規模（文献2））の炭素が CO_2 、一酸化炭素などとして大気放出されたと考えられている。火災が頻発化すると、泥炭地を含む熱帯の生態系の衰退につながる負影響がますます強まることが懸念される。

気候変動に影響を受ける永久凍土

永久凍土とは年間を通して温度が 0°C を超えない土壌を指し、主に周極域や高山の寒冷地に分布している。シベリアやアラスカ・カナダ、そしてチベット高原などが主要な凍土地帯であり、場所によってその厚さは数百メートルに及ぶ。中にはエドマ（氷楔）と呼ばれる巨大な氷の塊を含むこともある。永久凍土上であっても、夏季には地表近くに融解する活動層ができて植生も存在する。その中には東シベリアのカラマツ林や、北米のトウヒ林といった森林も含まれるが、凍土が障害となり浅くしか根を張ることができ

ず、栄養条件も概してよくないため樹高や立木密度は低くなりがちである。

気候変動やグローバルな炭素循環の観点から、凍土地帯は特に重要な地域として注目されている。凍土地帯は低温のため植生の生産力は低いものの、ツンドラと呼ばれる荒原となり厚い泥炭を蓄える部分も多く、そこに貯留されている炭素は莫大な量である（図1）。近年の研究では、周極域の凍土は1780万平方キロメートルに分布し、その炭素ストックは3倍までの深さでおよそ1兆350億トンにも及ぶとされる（文献3）。これは大気中のCO₂に含まれる総炭素量を上回る規模であり、もし温室効果ガスとなって大気に放出されれば地球温暖化に著しい影響を与えることは想像に難くない。また、凍土の中には、最終氷期以降の植物の枯死物や、そこから発生したCO₂・メタンの気泡が凍結状態で封入されている。

周極域や高山域では、地表を覆う積雪が早く解けることで温度上昇が加速されるなどの理由で、温度上昇が他の地域よりも速く進むと考えられている。いち早く現れる影響として、森林の樹木種がツンドラに進出して分布を広げるなどの植生分布の変化がある。人工衛星による植生活動の監視データは、最近30年ほどの間に北半球の植生が活発化してきたことを示しているが、その中には凍土が分布する周極域も含まれる。東シベリアなどでは、沙漠並みに少ない降水量にもかかわらずカラマツ林が成立する要因の一つとして永久凍土による土壌水分の保持があるため、永久凍土の消失は森林の存続にとっ

て脅威となりうる。気候変動に伴う永久凍土の融解とそれに伴う植生の変化は、一度発生すると元の状態に復元することが困難な地球システムの中の「臨界現象（ティッピング・エレメント）」の一つと考えられている。植生の変化は、炭素ストックや光合成によるCO₂吸収量だけでなく地表のエネルギー収支を変化させ（植生の増加は反射率の低下により日射を吸収しやすくなるなど）、地球温暖化に複雑な影響を与える。

温度上昇に伴い、融解した凍土中の古い枯死物や地表近くの泥炭が分解され、温室効果ガス（CO₂やメタン）となって大気に放出されるおそれがある。現在のところ、永久凍土から大量の温室効果ガスが放出されているという確かな証拠はないが、このまま温暖化が進めばメタンなどが一気に放出される時期が来ると考えるものは多い。さらに、凍土地帯であっても夏季には20℃程度まで気温が上昇することもあり、そこに少雨による乾燥が重なると火災が起こりがちな条件になる。もともと亜寒帯林では落雷などが出火元となる野外火災が頻発する地域であるが、近年では人為的な原因による火災が増えている地域もある。将来の温暖化とともに乾燥化が進めば、火災が頻発してさらに温室効果ガスやスス（ブラック・カーボン、地表や雪氷のエネルギー収支に影響を与える）など大気に影響を及ぼす物質の放出が増える可能性もある。

泥炭と凍土の現状と将来予測

泥炭や凍土は地表下にあり、その分布や機能

を広域で評価することは容易ではなかった。しかし、近年では、泥炭は世界の土壌調査データや人工衛星データを用いた湿原マップ、永久凍土は掘削（ボアホール）調査データ等に基づいて分布図が作成されている。また地点数は限られるが層の厚さと炭素量を調査したデータから、炭素貯留量の推定も行われている。熱帯泥炭に関しては、インドネシアやマレーシアなどの東南アジアが主要な分布地と考えられてきたが、最近の調査ではコンゴ盆地にも広大な泥炭地が見つかっている（文献4）。

気候変動の観点では、熱帯の泥炭や周極域の永久凍土は、影響がいち早く顕在化しがちな脆弱性の高い領域として注目される。熱帯の泥炭地は、前述のように農地転換が大きな減少要因になっているが、オイルパームでは食用だけでなくバイオ燃料の一種、つまりエネルギーとしても利用が拡大しつつある。一方、永久凍土地帯では化石燃料や鉱物資源の採掘が一部行われているものの、永久凍土の減少を招く主要要因は気候変動による融解と考えられる。泥炭や凍土は地球上での分布が偏っており、気候や植生との相互作用など様々な要因が絡むため将来の減少速度を予測することは簡単ではない。しかし、泥炭や凍土は炭素の大きなストックであり、長期的に炭素を隔離する機能がある。それが失われてCO₂やメタンを大気に放出すれば温暖化の加速を招くことは明白であり、現状を把握して予測を行い、適切な対策を講じることが重要な課題である。

気候変動の予測には、大気や海洋の運動に関

する方程式を数値的に解く大気海洋大循環モデルが用いられてきたが、2000年代以降は陸域や海洋の炭素循環を取り入れた「地球システムモデル」も開発利用されている。それまでの予測では人為的なCO₂放出量に対応した大気濃度のシナリオを用いていたが、海洋や陸域によるCO₂吸収量の変化（炭素循環のフィードバック効果）が温暖化の進行を左右することが分かってきた。地球システムモデルの中で、泥

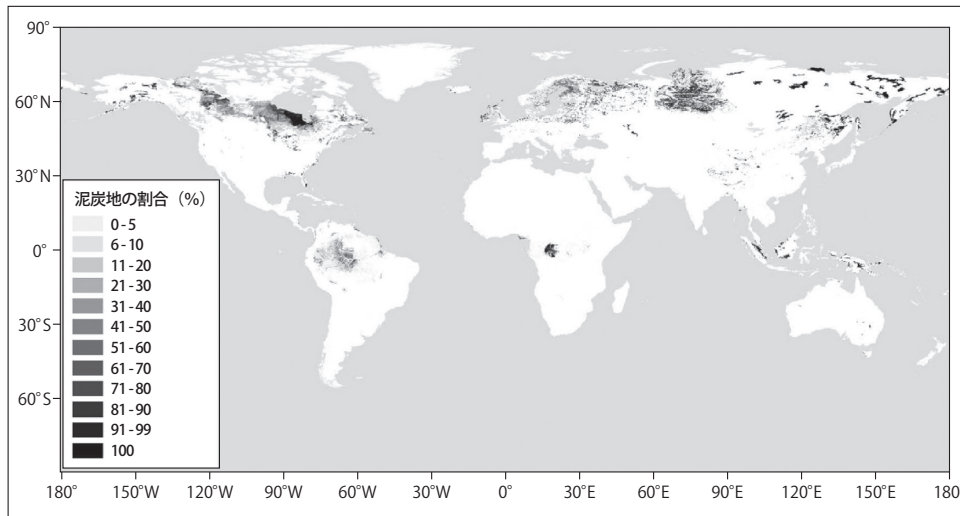


図2 世界の泥炭地の分布（出所：リーズ大学・PEATMAP 作成）

炭や永久凍土がどのように応答するかは重要な問題であるものの、まだクリアな結論は得られていない。2013年14に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書には、世界の19気候モデルによる凍土面積の予測結果が示された。温暖化対策が進まない限りゆきシナリオでは、世界の凍土面積は21世紀末までに半減からほぼ消滅する予測となり、積極的に対策を進めるシナリオでも大幅

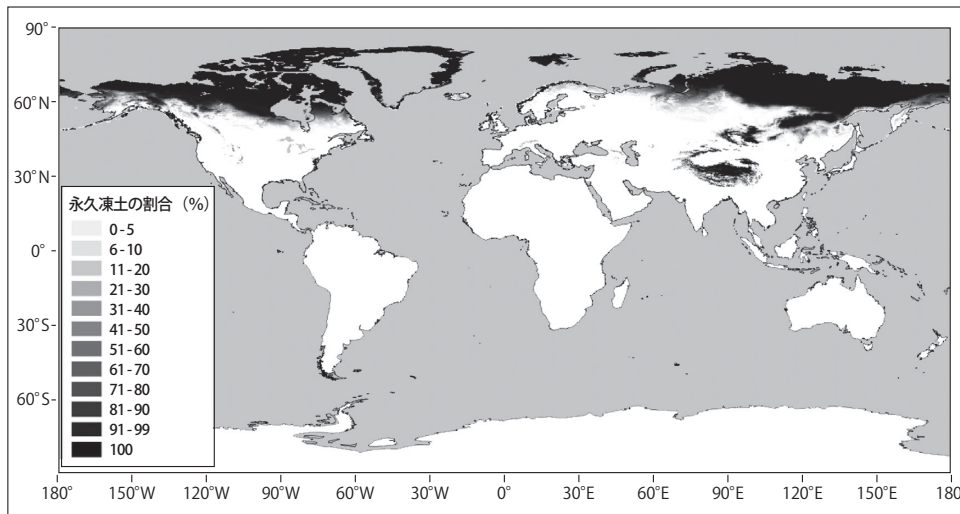


図3 世界の永久凍土の分布（出所：オスロ大学・GlobPermafrost データより作成）

な縮退が示されていた。しかし、モデル間で現状の凍土面積に大きな差があるなど、その推定結果には大きな不確実性が残されている。湿原を含む泥炭は、分布が不均質でさらにモデル化が難しい上、人間活動による影響をどう扱うかなど課題も多く、まさに予測に向けた研究が進められている段階である。

地球温暖化対策と泥炭・凍土

泥炭地や永久凍土の保護は、地球温暖化の防止だけでなく生物多様性の保全など、持続可能性の様々な観点で重要である。泥炭地や熱帯林の消失を伴うオイルパームなど商品作物の栽培拡大は国際的に注目される問題となったため、環境負荷の少ない持続可能なパーム油生産に対する認証制度も設立されている。また、健康被害や炭素放出を抑制するため、泥炭地火災の監視や防止も提案されている。永久凍土に関しては分布域が広いため、居住地や工業地域を除くと直接的な保全は難しいが、包括的な気候変動対策の中でそれを実現していくべきだろう。泥炭と凍土は、日本に住む私たちにとって身近な存在ではないかもしれないが、地球環境の中では特別な役割を果たしており、その現状と機能に関する関心を持ち理解を深めていくことが望まれる。

参考文献

- 気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書 2013年
 文献1 Page 5 (2011) Global Change Biology 17: 798-818
 文献2 Huijnen 4 (2019) Scientific Reports 6: 26886
 文献3 Hugelius 4 (2017) Biogeosciences 14: 6573-6593
 文献4 Dargatzis 4 (2017) Nature 542: 86-90
 文献5 Pan 4 (2011) Science 333: 988-993