

今回は、陸地を取り上げ、熱帯雨林（森林）、永久凍土、氷河について考えます。2020年5月29日、ロシアのシベリアの火力発電所で、ディーゼル燃料油タンクが損壊し、大量の油が流出する事故が発生しました。原因は建設時の杭が必要な深さにまで打ち込まれていなかったためですが、永久凍土の融解も損壊の要因の一つであると言われています。また、2021年2月7日にインド北部ウッタラカンド州の山間部で洪水が発生し、約150人が行方不明となりましたが、この洪水は、ヒマラヤ地域の山岳氷河が崩壊し、河川に流れ込んだために発生したと言われています。近年、温暖化の進行により、森林（熱帯雨林）、永久凍土、氷河で、そこに住んでいる人たちに大きな影響をもたらす変化が起きている。

熱帯雨林（森林）

世界の森林面積は、「世界森林資源評価2020」によると、2020年で4,058万km²、陸地の31%を占め、国別では、ロシア連邦（20%）、ブラジル（12%）、カナダ（9%）、アメリカ（8%）、中国（5%）、オーストラリア（3%）となっており、上位6か国で全体の57%を占めます。

1990年以降、推定420万km²の森林が失われましたが（森林の増加を含めると178万km²の減少）、森林の減少速度自体は大きく低下しています。過去30年間における森林減少の9割以上は南米とアフリカで発生しています。図1からわかるように最近10年間での森林減少は南米では減少傾向に、アフリカでは増加傾向にあります。減少が最も多い国はブラジルで、面積にして年平均1万4,900km²、森林面積に対する減少率は0.3%です。次いでコンゴが1万1000km²、減少率は

0.8%となっています。

アマゾンの森林は「炭素吸収源」として毎年およそ20億トンものCO₂を吸収しており、「地球の肺」と言われるように地球全体の大気や水の循環を整える大きな役割を担っています。

しかし、近年、熱帯雨林の吸収源としての能力低下が危惧されています。

ブラジルのアマゾンでは、2000年初頭までは、農牧地の広がりとともに、奥地の鉱山探索や開発などにより熱帯雨林の破壊が進んだため、伐採量の目標を設定し、図2のように面積の減少は食い止められてきました。しかし2019年に就任したボルソナロ大統領が開発重視の政策を推し進めた結果、野焼きと違法伐採で耕作地への転換が進み、2020年7月までの1年間で、アマゾンの熱帯雨林の森林消失面積が前年の同じ時期より9.5%多い1万1,088km²にまで広がりました。これは1年間で秋田県に近い面積の森林が消失したことになります。森林火災も多発しています。2019年1月から8月までに、7万5千件以上の森林火災が発生しており、前年同時期に比べ、倍近くに増加しました。増加の要因は、過剰な焼き畑や、違法伐採の隠ぺいのために放たれた火が燃え広がる、人為的な火災に加え、熱波や干ばつとの関連が指摘されています。さらに、気候変動による火災シーズンの長期化や火災の大規模化により、消火が困難になっていることも

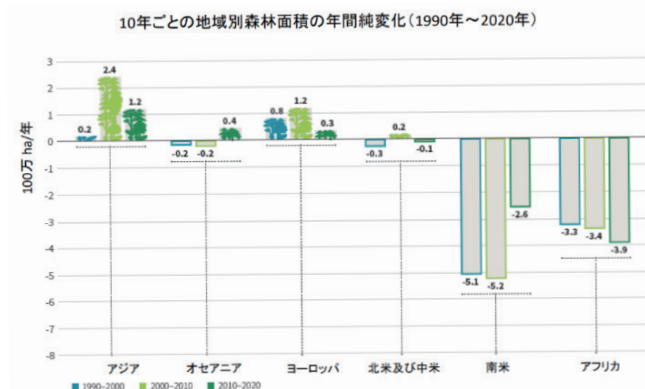


図1 世界森林資源評価2020 (FRA2020) より

指摘されています（「世界森林資源評価2020」）。

本来、森林は長い時間をかけて極相林（森林の群落が成長し種類や構造が安定し、大きく変化をしなくなる最終段階にいたった森林）となることでCO₂の光合成による吸収量と呼吸による排出量はプラスマイナスゼロとなります。2021年1月、北アリゾナ大学の研究グループがアメリカの科学誌で「気温が一定の水

準を超えると光合成の能力（CO₂を吸収して酸素を出す）が低下し、さらに高温になると光合成の反応ができなくなる。一方呼吸（CO₂を出す作用）は気温上昇に伴い増加する。結果、ある温度になるとCO₂は吸収より排出する方が多くなる。森林のCO₂吸収能力が2050年までに45%以上低下する恐れがあり、CO₂の吸収より排出する方が多くなる気温に達するのは今後20～30年以内」という研究結果を発表しています。そうすると地球温暖化のリスクはさらに高まることになります。

また、森林は、温暖化が進むと森林の土壤に含まれる有機物の分解速度が速まり、CO₂の排出が増加することも危惧されています。

アマゾンでティッピング・ポイントを超えると、CO₂の貯蔵庫の働きを失い、今ある湿潤な気候がサバンナのような気候になるとされています。そのティッピング・ポイントは森林破壊率が40%に達した時とする説や、森林被覆地帯が20%失われた時とする説などさまざまあり、いつ超えるかを見極めるには、さらなるモデル研究が必要だと言われています。森林火災によるさらなるCO₂の排出や焼け跡からの森林回復過程での炭素収支も考慮に入れる必要があります。また極相林となった森林そのものがCO₂排出に転じることやさらなる温暖化によってCO₂吸収を上回り排出増加になることも、リスクを大きくする要因だと考えられています。



図2 1988年以降の合法アマゾンの年間森林減少推移。青色では2019年の見積もり ブラジル国立宇宙研究所報道資料より（2019.11）

永久凍土

永久凍土とは、土壌の温度が0℃以下（氷点下）の土地で、その状態が冬から夏を経てまた次の冬になるまでの間続いている土地とされていて、アラスカ、カナダ、欧州北部、ロシアをまたぐ北極圏と北方林地帯、北半球の大陸の1/4に広がっており、ロシアは国土の60%が永久凍土と言われています。南半球でも南米アンデス山脈と南極大陸に存在します。永久凍土は、高山域及び極域にも広く分布しています。例えば、主な高山域は、世界の永久凍土面積の27～29%、360～520万 km²に相当します。

永久凍土の厚さは数百mにも及ぶことがあります。永久凍土の上部には夏の間溶けている活動層があり、タイガ（シベリア地方の針葉樹林）や草原となっています。活動層の厚さは年や場所によって変化しますが、標準的なものでは0.6～4mの厚さです。また、永久凍土は年平均気温が-5℃から0℃の間の気候条件の下で凍土が部分的に融解し、点在して分布する不連続永久凍土となります。最近では冬になっても凍結しない事例が増えています。一方、年平均気温-5℃以下の条件では凍土の融解は起こらず連続永久凍土地帯が形成されます。

永久凍土には、メタンハイドレート（メタンガスが水分子と結びつくことでできた氷状の物質で、別名「燃える氷」とも言われています）が推定で1兆7,000億トン含まれています。また北極及び寒帯の永久凍土には1兆4,600～1兆6,000億トンの有機炭素（有機

物に含まれる炭素)が含まれており、これは大気中の炭素のほぼ2倍にも相当します。つまり永久凍土の大部分を、メタン(CH₄)とCO₂が占めています。

永久凍土が溶けると、強力な温室効果ガスであるCH₄や他の炭化水素(エタンやプロパンなど)が大気中に放出され、温暖化が促進すると考えられています。CH₄はCO₂に比べ28倍もの温室効果があり、これが継続的に大気中に放出されると、温暖化の抑制が難しくなる可能性もあります。また、永久凍土には大量の水銀が含まれていることが判明しており、凍土融解の融解により、水銀が地表に流れ出る可能性も指摘されています。

では、永久凍土の現状はどうなっているのでしょうか。IPCCの「海洋・雪氷圏特別報告書」では、永久凍土の融解について次のように報告しています。

「永久凍土の温度は、1980年代初頭以降、ほとんどの地域で上昇している(高い確信度)。ただし上昇率は地域によって異なる。ロシアのヨーロッパ部分の北部では、顕著な永久凍土融解が生じている(中程度の確信度)。この地域では、1975～2005年の期間に厚さ最大15mの、温度が高い永久凍土が完全に融解し、不連続永久凍土の南限が最大80km北に移動し、連続永久凍土の境界が最大50km北に移動した(中程度の確信度)。現場測定と衛星データによると、過去20～30年の間に、氷を多く含んだ永久凍土の融解に関連した地表面の陥没が様々な場所で起こっている(中程度の確信度)。

多くの地域で、季節凍土の深さがここ数十年変化している(高い確信度)。1990年代以降多くの地域において、活動層の厚さが数cmから数十cm増している(中程度の確信度)。ユーラシア大陸の非永久凍土地域の一部では、季節凍土の厚さが減少し、場所によっては1930年から2000年にかけて30cm以上減少した可能性が高い(高い確信度)」

永久凍土は北極地方の平原を安

定させていますが、永久凍土の融解によって侵食や建築地盤の沈下などが進んでいます。

シベリアのツンドラ地帯では、何もない平原で巨大なクレーターが相次いで発見されています。2020年5月～6月に出現したと推定されるものは、地下にたまったメタンガスが噴出し、氷や岩石を吹き飛ばして形成されたものと報告されています。蓋の役割を果たす凍土層が気温上昇によって緩み、ガスが放出されやすい状況になっていたと考えられています。このクレーターが出現した地域は人口の少ない地域ですが、先住民の生活や石油やガスといったインフラ供給に影響を及ぼす可能性があります。

凍土は、土、砂、砂利等が混ざり合い、凍結しているので、コンクリート並みの強い強度を持ちます。シベリアではインフラ設備だけでなく住宅等も凍土を基盤として建設されています。深い基礎を打たなくてもよかったのですが、気温上昇により、凍土の融解や緩みにより地盤(凍土)が不安定になった結果、建物の壁にひびが入ったり、家屋が傾いたりする被害が発生しています。ロシアのメディアはノリリスク市では約60%の建物に変形したと報道しています。冒頭で紹介した、火力発電所の燃料タンクの倒壊事故は、この地域で発生しました。この地域のインフラの全面的改修が必要になる可能性が出てきたと言われています。

さらに、気温上昇による永久凍土の融解は、長年にわたり氷の中に閉じ込められていた病原菌やウイルスを大気中に解き放ち、現在の家畜や人間が免疫をもた



ロシア 東シベリアの永久凍土

ないために感染し、拡大する恐れもあります。例えば天然痘患者の埋葬で、凍土層に埋められた病原体が再活性化すると懸念も指摘されています。

実際、2016年には、ロシアのヤマル半島で、永久凍土の融解によって、70年前に埋められた炭疽菌感染のトナカイの死骸から感染が広がり、現地住民70人以上が入院する事態となり、そのうち子ども1人が死亡する事件が起きました。このことも大きなリスクとも言えます。

今後、永久凍土の融解はどうなっていくのでしょうか。

IPCCの「海洋・雪氷圏特別報告書」は、「永久凍土の融解は、積雪被覆及び北極域の海水面積の減少に伴い、地表面気温の上昇によって短期的(2031年から2050年)に継続すると予測され、それは河川流出及び局所的なハザードに不可避の結果をもたらすとしています。最悪のケースのRCP8.5のシナリオの下では、2100年までに永久凍土の $69 \pm 20\%$ が減少する可能性があり、永久凍土の減少が続くと、2100年までに数百から数千億トンの永久凍土に固定されている炭素が CO_2 や CH_4 として大気中に放出され、気候変動を悪化させる可能性がある」としています。永久凍土の融解は、現在必要とされている、また将来計画される温室効果ガス排出削減量に、新たに削減量を追加しなければならなくなる可能性があります。

山岳氷河

氷河とは、極地等に降り積もった雪が圧縮されて氷となって成長し、自身の重さによりゆっくりと流動していく氷塊のことを言います。山岳地帯で形成させる山岳氷河は、気温上昇により、消滅しつつあります。山岳氷河は、天然の貯水装置としての重要な機能を持っていますが、冒頭に紹介したウッタラカンド州の例では、本来なら氷の形で貯水しておく時期に氷河の融解が起こり、洪水が発生し、大きな被害をもたらしました。

気温上昇によって氷河の融解が進むことにより、周辺の生物種に大きな影響を与えるだけでなく、水の流

れ、保水量、流量のピーク時期、水温などに大きな変化が生じ、下流域の人々の生活に様々な影響を与えます。また、洪水や地滑り及び山腹斜面の不安定化による変化は、インフラ、文化、観光資源にも影響を及ぼします。

IPCCは「海洋・雪氷圏特別報告書」で、「氷河融解による高山流域における河川の流出量は、冬季の平均流出量の増加(確信度が高い)及び春季のピーク流量の早期化(確信度が非常に高い)を伴う。氷河からの年間流出量及び夏季の流出量は21世紀末にまたはその前までに(例えば、アジアの高山域では21世紀半ば頃に)ピークに達し(確信度が高い)、その後は減少すると予測される」としています。また、「2015年から2100年にかけて予測される氷河の質量の減少(氷床を除く)は、RCP2.6の $18 \pm 7\%$ (可能性が高い範囲)からRCP8.5の $36 \pm 11\%$ (可能性が高い範囲)の幅があります。比較的氷河が小さい地域(例、中央ヨーロッパ、コーカサス、北アジア、スカンジナビア、熱帯アンデス、メキシコ、東アフリカ及びインドネシア)では、RCP8.5において2100年までに現在の氷河の質量の80%以上が減少すると予測され(確信度が中程度)、将来の温室効果ガス排出量に関係なく多くの氷河が消滅すると予測されている(確信度が非常に高い)」としています。

今回は、森林、永久凍土と山岳氷河について考えましたが、いずれも CH_4 や CO_2 などの温室効果ガスの発生や吸収と直接関わる問題です。これらの要素がティッピング・ポイントに達することで、森林からの CO_2 の排出や永久凍土の融解による CH_4 や CO_2 の排出が止まらなくなることになります。

私たちは、排出削減をさらに進め、ティッピング・ポイントに達するのを食い止めなければなりません。