

地球温暖化で破壊の危機も：極寒冷地の社会基盤構造物を守るために

Destruction Crisis due to Global Warming: What should be done to preserve the existing infrastructures in cold regions

蟹江 傑仁¹

1. 北海道大学工学院工学研究院

Shunji Kanie¹

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

In permafrost regions, it is reported that the thawing of permafrost has been enhanced due to abnormally high air temperatures and wildfires caused by global warming. In May 2020, the destruction of a fuel tank in Siberia occurred because of the thawing of permafrost and such a destruction crisis on infrastructure has become a reality. This paper introduces what is going on in the cold regions now as well as what should be done to preserve the existing infrastructures.

Key Words: Global warming, Permafrost, Infrastructure, Freeze and thaw, Countermeasures

キーワード：地球温暖化，永久凍土，社会基盤構造物，凍結融解，対策

1. はじめに

地球温暖化による影響が、さまざまなもので顕在化しつつある中、特にその影響が強く、また他の地域よりも早く現れると言われている極寒冷地では、いよいよ既存社会基盤構造物の破壊といった形で問題になりはじめている。西シベリアでのディーゼル燃料タンク倒壊はまさにその一例と言えるだろう。本稿では、絶妙なエネルギー収支バランスと炭素循環システムの下で成立してきた永久凍土地帯の特徴を紹介するとともに、地球温暖化によりどのような変化が見込まれるのかについて考えていく。また、今後予想される環境変化に対して、すでに構築された社会基盤構造物にはどのような配慮や措置を講じることができるのか。その保全対策についても考えていくものとする。

2. 何が起きたのか：西シベリアでのタンク倒壊事故

2020年、5月29日、北極海にほど近い西シベリアの都市ノリリスク（Norilsk：図-1 参照）において、発電所用ディーゼル燃料タンクが突然倒壊した（写真-1）。ちょうどこの時期、我が国ではCOVID-19の感染拡大が話題を独占していたこともあり、国内では余り報道されることになかったが、流出したディーゼル油2万トン余りが周辺河川に流れ込むこととなった（写真

-2, 写真-3)。それは瞬く間に北極海にまで及ぶ可能性も出てきたことから、自然環境への影響の大きさに配慮してロシア政府は同年6月3日、緊急事態宣言を発令した。しかしなぜ、このようなことが起きてしまったのか?その原因こそがかつて経験したことがないほどの「異常高温」による永久凍土の融解であり、同様の見解はロシア当局からも示されることとなつた¹⁾。

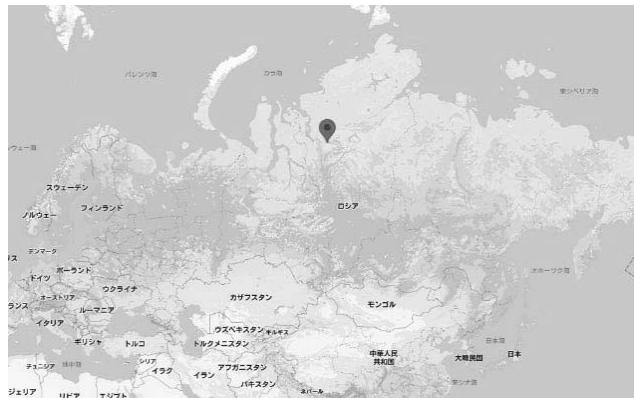


図-1 ノリリスクの位置図



写真-1 倒壊したと思われる倒壊前のタンク



写真-2 河川に流れ込んだディーゼル油



写真-3 汚染された河川の航空写真
(赤く見えているところが汚染カ所)

出典 : Clean-up Progress Update on the Accident at a Fuel Storage of Norilsk Nickel, Nornickel, June 9, 2020³⁾

そこで当時の気温に関わるデータを検証してみる。図-2はその時期一か月間の平均気温が、平年値よりどれほど高かったかを示す等温線の記録である。これを見ると、まさにノリリスクの周辺は平年値よりも月間平均気温で12°C以上も高かったことがわかる。2021年末、東シベリアにあるベルホヤンスクで記録された2020年6月の38°Cが、北極圏における観測史上最高気温として国連の専門機関の一つである世界気象機関に認定されたところだが、同じような時期にノリリスクでも異常高温を記録しており、2020年のシベリアは35°Cを超える猛暑日も各所で発生していたものと考えられるのである。年々、確実に気温上昇が続いていると言われるシベリアだが、このような異常高温は一体どのような現象をもたらすのかについて考えてみる。

図-3に永久凍土地帯の一般的な地中温度分布図と断面図を示す。温度分布図が示すように、夏場の気温上昇によって活動層厚（地表面近くの凍結と融解を繰り返す層）は大きくなるが、

冬場になると地表面からの冷気を取りこんで凍結するため、活動層は再び小さくなる。しかし、夏場の気温上昇が大きくなれば活動層厚も大きくなるとともに、地形によっては融解水が地下水として流出してしまう恐れがある。その結果、夏場の気温上昇は融解水量を大きくするだけでなく、新たな地下水流动の原因ともなりうるのである。また、ひとたび融解水が流出すると、失われた水の分だけ地盤の持つ熱容量が小さくなり、さらに深いところまで融解しやすくなると言える。その結果、地盤の氷が融解することによる体積の減少や、融解水の流出に伴う沈下が発生する。さらに、砂や粘土、シルトなど材料の違いにもよるもの、一般的に凍っている土の一軸圧縮強度は凍っていない状態よりも数倍から数十倍強度が高いと言われており、上部に構造物が設けられている場合には、深刻な地盤強度の低下を招くことが考えられる。このような一連の現象をノリリスクにおけるタンク倒壊事故に当てはめて考えてみると、倒壊したタンクはヤードの端部の斜面近くにあることから、融解水の出しやすい環境にあったと考えられる。このため、夏場の異常高温によって融解深が深くなるとともに、融解水が斜面方向に流出し、強度の低下と不同沈下が発生したものと推測された。これは異常気温がもたらした構造物への影響の一例に過ぎず、永久凍土地帯における気温の上昇は少しずつ、しかし確実に影響を与え始めていると考えられるのである。

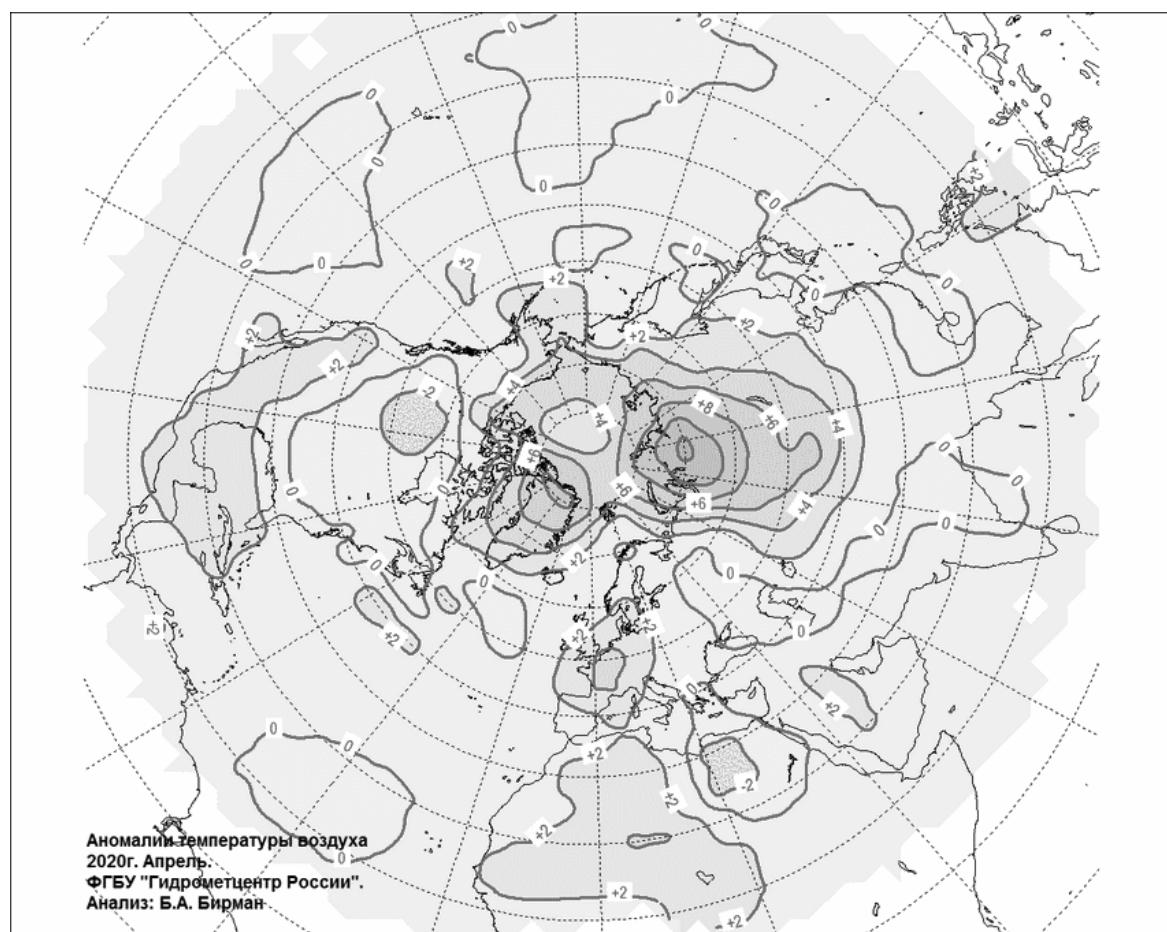


図-2 過去 1か月間の北半球の月間平均と気象異常のマップ(海拔気温の異常)²⁾

(<https://meteoinfo.ru/anomalii-tabl3>)

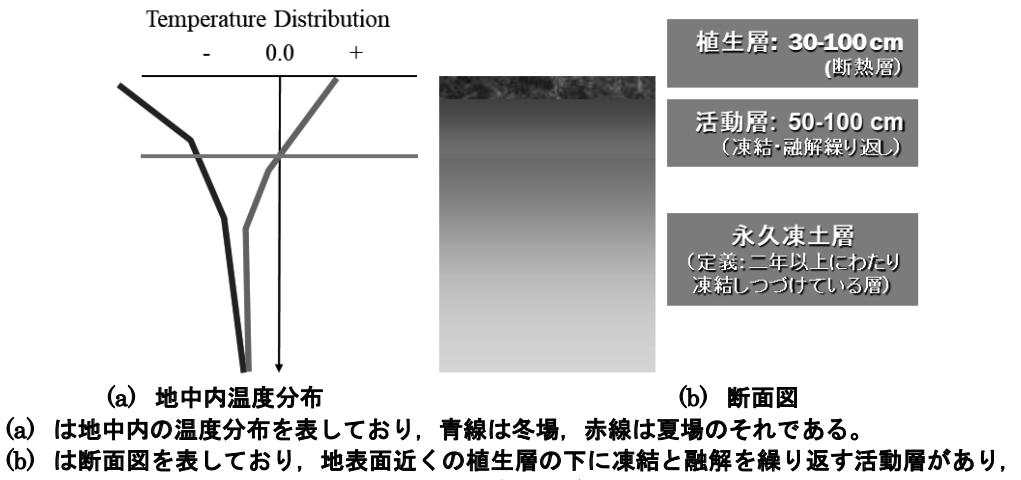


図-3 永久凍土地帯の地表面付近の断面図

2. 「永久凍土は凍土のままに」の大原則

シベリアでもアラスカでも、古くからそこに暮らす人々は、自然と共生する形で生活や文化を育んできた。外部からの開発の機運が高まったのは第二次世界大戦後、特に東西冷戦時代と言われる1960年代になってからのことである。その後の二度にわたるオイルショックは原油価格の高騰を招き、石油や天然ガスといった化石エネルギーを求めて、より過酷な環境下での開発が進められることとなった。しかしその当時から、「永久凍土は凍土のままに」という大原則は、その特殊環境と共生するための鉄則であり、今も変わることはない。

そもそも最終氷河期が終わる1~2万年前から、永久凍土地帯の環境は絶妙な熱エネルギー収支バランスと炭素循環システムの元で形成されてきた。夏に豊かな緑に覆われる大地（写真-4および写真-5）は空気中の二酸化炭素を吸収するとともに、表層近くにある植生層とともに地中の凍土融解に対する断熱層として機能する。すなわち、気温が上がっても凍土の融解を抑制する働きを持っているのである。一方冬は冬で、表層を覆う積雪が地表面でのアルベドの増加と断熱効果をもたらすこととなる。現在の永久凍土地帯における永久凍土層とその上部に存在する活動層のバランスは、このような特殊な環境下での長い営みの産物なのである。



写真-4 初夏の西シベリア：緑豊かな平原が続く
(筆者撮影)



写真-5 初夏の西シベリア：平原に忽然と現れる町
(筆者撮影)

このため、もし永久凍土地帯に建物を建てるのなら、基本的に杭などの構造物に支えられた「高床式」構造とするのが基本であり、建物の下と地表面の間には冷気が存分に通過できるよう設えることとなる。写真・6は典型的な永久凍土地帯における建物の基礎部分を撮影したものである。建物の下に十分な空間が取られており、建物がなかった状態の時と同様、地表面と地下との間での熱交換が十分に行えるようにしてあるのが最大の特徴である。

冬場の月間平均気温が-40°Cにもなる地域で、床下は極寒のままに保つようにするなど、温暖な環境下に暮らす人間には信じられないことかもしれない。しかもしも、このような対処がなされないと、建物の直下をはじめとして冬場に地盤が十分に冷却されない上、生活排熱が地下に伝えられることとなり、建物の下で凍土が融解を始めてしまうのである。万一その下にある氷塊を見落としているものなら、融解による水分の流出や地盤強度の低下で建物は不同沈下に陥り、破損や破壊につながることとなる。

写真・7はシベリアのある町で建設途中に放棄されたアパートである。建設開始当初はその下に眠る氷塊の存在に気付かず工事をはじめたものの、地表面からの冷却が十分ではなく、融解が始まってしまったため、建物全体が傾き始めてしまったのである。その結果、建設工事 자체を放棄することとなってしまった。「永久凍土は凍土のままに」という大原則はわかつても、小さな油断が取り返しのつかない損失に結びついてしまうほど、永久凍土地帯の環境は絶妙なバランスの上に成り立っていることを忘れてはならないのである。



写真-6 西シベリアの高床式建物の床下構造:床下を冷気が通り抜けるようにしている（筆者撮影）



写真-7 西シベリアで建設途中に放棄されたアパート: 大きく傾斜している（筆者撮影）

3. 永久凍土地帯で今、起こっていること

このように、「永久凍土は凍土のままに」というのが鉄則を守ることが何より重要となるが、異常気温や森林火災などで地表面からの融解深が大きくなると、その勾配に従って融解水の流動が始まることとなる。融解水は当然ながら氷よりも熱的エネルギーが高く、その移動は「熱の移動」でもある。このため、一度それが始まると融解水を流すに足りる程度の勾配の範囲は徐々に広がり始め、移動量や移動速度も大きくなっていくことは避けられない。

また、夏場の融解深が大きくなるということは、地表面の植生にも影響を与える。それまで

凍結面の上に蓄えられた夏場の水分が表層にあるモス層やカラマツ林帯（スプルース類）に供給されていたのに対し、融解深が深くなることでこれら表面植生層への水分供給ができなくなる恐れがでてくるためである。飯島らの研究によれば^{4),5)}、このような植生への影響はすでに衛星写真や現地踏査により確認されており、年を追うごとに深刻化していることが報告されている（図-4 参照）。

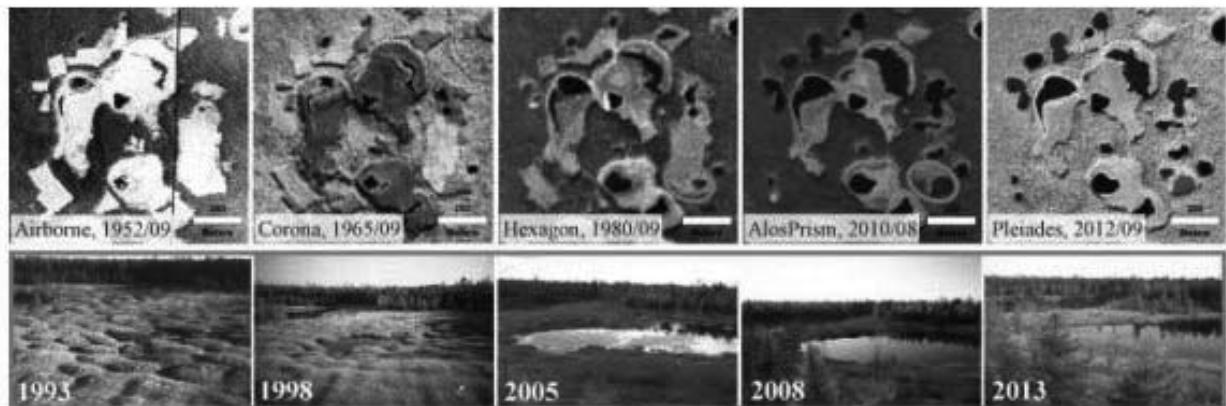


図-4 永久凍土地帯の表面植生層の変化：上段は衛星写真、下段は現地踏査によるもの

さらに、融解深が大きくなることにより、地下水の流動量も当然、大きくなる。特に融解水が集まりやすい集水地形においては、凍土の融解水だけでなく地表面上の雪氷の融解水や降雨も混じりあって、水の運動に伴う土粒子の移動を生み出すこともある。これが温度浸食と呼ばれるもので、一度始まってしまうと人間の手では容易には止められない不可逆現象なのである。写真-8は西シベリアの天然ガス・パイプライン周辺で発生した温度浸食である。中央部の盛り上がっている部分の下に天然ガス・パイプラインが埋設されているが、その周辺の凍土が融解により流出して激しい温度浸食を受けたことがわかる。一方、写真-9は東シベリアで観測された温度浸食である。物資輸送のために伐採を行ったが、その際に表面植生層が損なわれた結果、温度浸食が進んでしまったものである。このように、融解深の増加とそれに伴う地下水流動の変化は、深刻な地形変化につながる可能性が大きいと言える。



写真-8 半埋設方式の天然ガス・パイプライン周辺で発生した温度浸食



写真-9 物資輸送のために表面植生が傷み、進行が止められなくなった温度浸食

このような永久凍土の融解を起因とする地形変形は、近年の異常気象による突然の熱波や頻発する森林火災により引き起こされることが増えていると考えられる。そこで、融解過程とその後の地下水流動を追うような中規模モデル（メソスコピック・モデル）でのシミュレーション開発が行われている⁶⁾。すでに述べたように、永久凍土地帯の特徴的な地形は少なくとも最終氷河期以降の1～2万年の間に形成されたと考えられており、その間の複雑な環境条件の組み合わせを考えなければ形成の成り立ちを科学的に説明することは困難である。地球の温暖化に伴って今後どのような影響が出てくるのかについても、様々な環境因子を考慮した上で全球的モデルでのシミュレーションが必要となる上、的確に予測をすることは決して容易ではない。

しかし、異常気象による突然の熱波や森林火災などによる局所的な影響は、数年から数十年、状況によってはひと夏の環境・気象条件により引き起こされるため、全球的モデルよりも対象地域を絞った中規模モデル（メソスコピック・モデル）でのシミュレーションでもある程度、予測が可能な上、的確な評価ができるものと考えている。特に重要なのは融解水の流動で、本来そこにとどまっていたはずの融解水が流出することにより、冬場になんでも凍結できなくなり、地盤の強度低下や土壤粒子の流出などが発生しやすくなることを検知する試みである。

そこで、対象地盤を土柱カラムの集合体にモデル化した上で、凍結融解を評価する鉛直方向一次元熱伝導方程式を適用するとともに、融解水については地下平面内の流動を解く二次元有限差分モデルを当てはめて、疑似三次元シミュレーション・モデルを作成した。モデルのイメージを図-5に示す。季節変化による地表面での日平均気温の変化を入力値として採用することにより、数年間の気温変動による凍結融解の様子と、融解水の流動状況を見ることが可能となる。また、融解水の流動により凍結面上に蓄えられる水の量が減少することで、当該地盤に発生する地表面沈下も推定できるようにした。ただし、圧密沈下については含まれていない。

このシミュレーション・モデルを用いて、シベリアで実際に発生した森林火災による影響を評価してみた。図-6(a)は現地の平面図であり、黒枠で囲まれたエリア内が森林火災により表面植生が焼失したところを示している。また夏場の沈下量も色彩の濃淡で表してされており、上部中央付近が特に大きく沈下していることがわかる。現地の標高の変化を示すために、鳥観図も図-6(b)に示した。現地ではこの最も沈下量の大きかった点を含む東西方向のA-A断面について踏査による調査も行われており、その標高と計測された沈下量を図-6(c)に示す。これに対し、シミュレーションにより求められた沈下量は図-6(d)に示す通りである。図から明らかなように、概ね沈下量が適切に評価できていることがわかる。

このように、表面植生の変化による凍結融解深と地下水流動状況の変化がもたらす沈下などは、ある程度シミュレーションで予測できるのではないかと考えている。特に、融解水が集まりやすい場所がある場合や、河川により流出の可能性がある場合には、その後の地形変形への影響が出やすいものと考えられ、このようなシミュレーションが有効になるものと思われる。その一方、ノリリスクでのタンク倒壊のように、融解深の増加と地下水の喪失が構造物基礎の強度低下や不同沈下を招くと予想されるところでは、夏場に発生する地下水の流れを効果的に変化させることで、構造物の破壊を未然に防ぐこともできるのではないかと考えている。夏場における融解水の厚さは、その初期であれば地表面から数メートル程度であり、流出箇所周辺に数メートルの遮水対策を施すなどにより、対象地域の保水能力の保持が期待できるものと考えられ、構造物の安全性維持にもつながるのではないかと考えている。

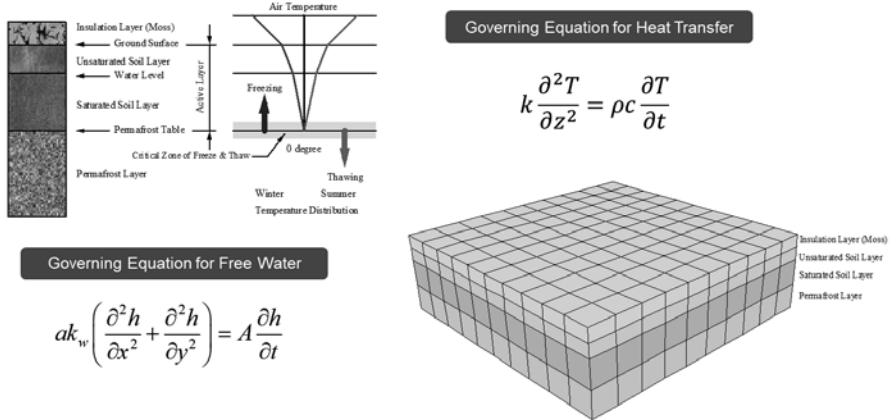
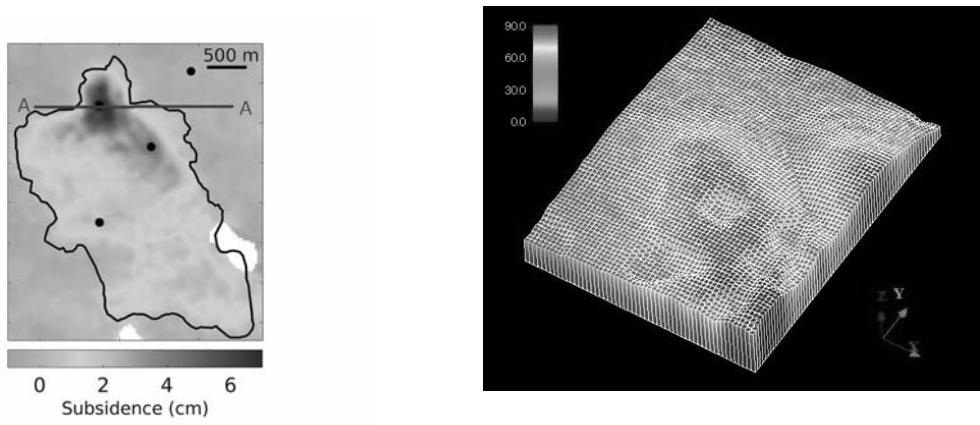
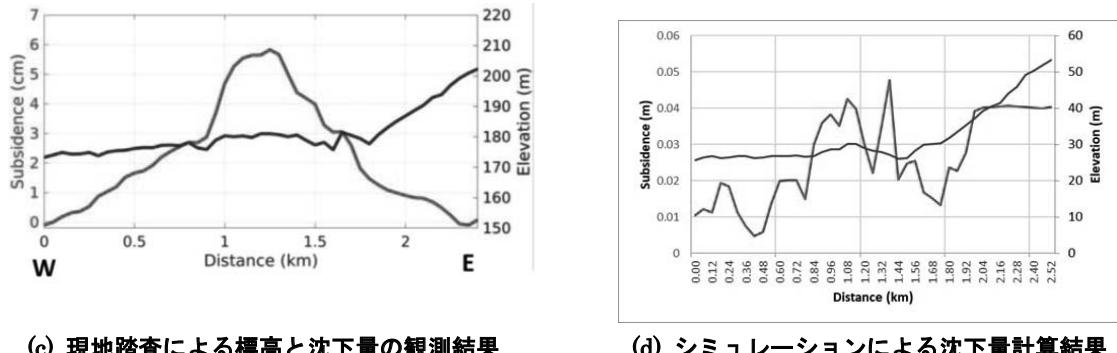


図-5 疑似三次元凍結融解・地下水流动連成シミュレーション・モデル



(a) 森林火災の場所と沈下量計測点

(b) 対象地域の鳥観図



(c) 現地踏査による標高と沈下量の観測結果

(d) シミュレーションによる沈下量計算結果

(c),(d)ともに、標高は青線、沈下は赤線で示している。沈下については衛星からの距離で表しているため、沈下量の大きい方が値が大きくなる。

図-6 シミュレーション・モデルの森林火災跡地への適用例

4. ヨーロッパへの天然ガス供給を支える：西シベリア・パイプライン

現在、脱炭素に向けて世界中がその取り組みへの加速度を上げているところではあるが、残念ながら今しばらくの間は「化石燃料を不要とする世界」は実現しそうにない。では、その生産・輸送の現場はどうなっているのか？永久凍土地帯における化石燃料輸送の要であるパイプラインについて見てみることとする。

写真-10 は西シベリア・ナディム（Nadym）という町の近郊における天然ガス・パイプラインである。この地域は 1970 年代から開発が進められ、ソ連（当時）の貴重な外貨獲得手段として東ヨーロッパを中心に輸出されてきた。これらのパイプラインは広大なシベリアの大地を駆け抜け、長期間に渡りソ連・ロシア経済を支えてきた。今現在もシベリア北部にあるヤマル半島では大規模な天然ガス田開発が進められており、ヨーロッパへの輸出が計画されている。

その中で東西冷戦時代の 1970 年代に建設された「西シベリア・パイプライン」の今を見てみる。このパイプラインは、夏場に融解する表面近くの活動層を掘削してパイプを設置し、表面を土で覆う形式である「半埋設式」で造られたものである。厳寒の冬場は地表面近くまで凍結するため掘削工事をすることはできないが、夏場であれば融解した表層部分を掘削することも容易なため、短い時間に効率よく建設できるということもあり、このような形式を採用したと考えられる。

しかし、注意しなければならないのは、このパイプラインで輸送される天然ガスの温度を何°C に設定するかという点である。彼らは 5~12°C というほぼ自噴温度のまま天然ガスを流し続けた結果、パイプラインから融解熱が伝わり、その周辺が融解するとともに一部では温度浸食という不可逆な地形変形まで生じさせることとなった。

その結果、パイプラインの一部では融解して溜まった水の上に浮かんだような状態になっている部分もあり（写真-11），漏洩や破損の原因となっている。正確な調査結果は公表されていないものの、一部研究者の報告では西シベリアにおける全生産量の 1~2% がこのような損傷により気中に漏洩しているとも言われている。その量は日本における一日の天然ガス使用量にも匹敵するもので、貴重な天然資源を利用することなく、温室効果ガスとして大気に放出していることとなり、人類にとって二重の損失を被っている可能性があると言えるだろう。



写真-10 西シベリアを駆け抜けるパイプライン：手前から奥行き方向に設けられた半埋設方式の天然ガス・パイプライン（筆者撮影）



写真-11 パイプライン周辺土の融解が進んだ結果、水面上で浮遊状態に陥った西シベリアの天然ガス・パイプライン（筆者撮影）

5. 厳寒の地で温めなければ流れない：アラスカ縦断原油パイプライン

一方、同時期に建設されたアラスカを南北に縦断するアリエスカ・パイプラインは建設時の様々な工夫により、建設から 40 年以上経た今でも健全に機能している（写真-12, 13 参照）。このパイプラインは北極海沿岸で生産された原油を、積出し可能なアラスカ南部の太平洋岸まで

輸送するもので、その延長約 1,300km のうち 1/3 は連続永久凍土地帯、さらに 1/3 近くは不連続永久凍土地帯を貫いている。輸送する物質が原油のため、送出し時には温度を 60°C 程度まで温めないとその高い粘性により流動性が確保できない。冬場の月間平均気温が -40°C にもなる地域で、60°C 近くなる原油を輸送するには、永久凍土地帯を守るための様々な工夫が必要となることは言うまでもない。温めた原油の熱が構造物に伝わり、支持構造物を通じて地盤を融かしてしまうからである。また一部の道路横断部は地下に潜って交差しており、特別な対策なしには成立しえない構造なのである。

一つの大きな特徴は、パイプラインを支える杭一本一本が「ヒートパイプ」（あるいはサーモサイフォン）と呼ばれる熱交換促進装置になっている点である。仕組みは極めて単純で杭の中に圧力を調整したアンモニアのような気体を入れ、外気温が地盤内の温度より低くなる冬には、地上で冷やされたアンモニアが液化して下に降り、一方地中に埋め込まれた下部では地盤の熱に温められて気化し、再び地上に戻るという仕組みである。つまり冬場の低い外気温を積極的に地盤内に取り込んで凍結の促進を図るという装置となる。

この装置はただ気体を杭の中に封じ込めるだけのため、それが外に漏れること以外は故障知らずということになる。また、地中の温度より外気温が高い夏場には、すべて気化した状態で杭の上部に溜まるため、自ら熱交換の作業を止めるという優れものと言えるだろう。この仕組み自体はパソコンの冷却装置などとして、私たちの日常生活の中でも幅広く使われているものであるが、永久凍土地帯で使われるものは何よりサイズが大きく、長いものでは 10m を超えるものさえある。アリエスカ・原油パイプラインでは、地上架設部分のほぼすべての支持杭にこのヒートパイプが用いられている他、道路横断部などの地中埋設部分でも、この装置が多数使われている。また、各種構造物の施工現場などにおいても、当初の予想より構造物近傍での地中温度が高めで凍土の融解が懸念される場合には、そのような場所にピンポイントで後追い設置することもあり、永久凍土地帯で構造物を造るときには非常に重宝する装置となっている。



写真-12 アラスカを縦断するアリエスカ・原油パイ
プライン その1 (フェアバンクス近郊)



写真-13 アラスカを縦断するアリエスカ・原油パイ
プライン その2 (フェアバンクス近郊)

支持杭はヒートパイプでできており、地盤の凍結を促進させる。支持杭の上についている白い2本の柱状フィンは冷却促進用のラジエータです (二つの写真ともに、筆者撮影)

6. まとめ：社会インフラを守るために

IPCC 報告にもあるように、地球は今後 100 年単位にわたって温暖化していくことは避けられない可能性が高い。そのために、二酸化炭素の排出量を制御するなど、今取り組まなければならない課題が多いのも事実である。その一方、特に温暖化による影響が顕著に出やすい極地では、すでに異常気象による突然の熱波や頻発する森林火災等によって局所的な永久凍土の融解が進み、場所によっては不可逆的な地形変形や既存社会基盤構造物の損傷といった影響も出てきている。

既述したように、今後 50 年あるいは 100 年といった長いスパンでの環境変化の影響を予測することは容易ではない。しかし、環境変化に敏感な極寒冷地における地形変形や既存構造物の破壊は、環境変化に関わる的確なデータ取得や観測ができれば、数値的なシミュレーションなどである程度予測できるものと考えている。本稿で取り上げた中規模モデルでのシミュレーションはその一例であり、工学的な観点に基づく影響評価を適切に行いながら、拡大的な被害の抑制と既存社会基盤構造物の安定性や安全性の保全に取り組むべきと考える。

参考文献

- 1) AFP BB ニュース :【解説】永久凍土の融解が原因、ロシア北極圏の燃料流出事故 「開くパンドラの箱」, <https://www.afpbb.com/articles/-/3287301?act=all>, 2020.
- 2) Hydrometcenter Russia, <https://meteoinfo.ru/anomalii-tabl3>, 2020.
- 3) Norilsk Nickel: Clean-up Progress Update on the Accident at a Fuel Storage of Norilsk Nickel, Nornickel, June 9, 2020.
- 4) M. Urlich, H. Matthes, L. Schirrmeyer, J. Schütze, H. Park, Y. Iijima, and A.N. Fedorov: *Differences in behavior and distribution of permafrost-related lakes in Central Yakutia and their response to climatic drivers*, *Water Resource Research*, 53, 1167–1188, DOI: 0.1002/2016WR019267, 2017.
- 5) Y. Iijima, H. Park, P. Ya. Konstantinov, G. G. Pudov, and A. N. Fedorov: *Active layer thickness measurements using a handheld penetrometer at boreal and tundra sites in eastern Siberia*, *Permafrost and Periglacial Processes*, 28, 306–313, DOI: 10.1002/ppp.1908, 2017.
- 6) S. Kanie, H. Zheng, H. Ishihara, K. Yanagiya, and M. Furuya: *Mesoscopic-model Simulation of Freeze and Thaw with Groundwater Flow for Terrain Change in Permafrost Regions*, *19th International Conference on Cold Regions Engineering*, On-line, 25th October 2021.