

地球温暖化がシベリア冬道路に及ぼす影響

The effects of global warming to the winter road in Siberia

河本 憲*

Ken KAWAMOTO

*地域計画学研究室（指導教員：奥村誠 教授）

本研究では、地球温暖化がシベリアの冬道路の利用期間に及ぼす影響を分析した。はじめに凍結河川における氷厚の変化をモデル化し、実データに基づく河川氷厚の変化を計算する方法を確立した。次に氷厚に対する積載可能重量を求める力学モデルを明らかにした。これらを用いて仮想的な気象条件に対する氷厚と積載可能重量の計算を行い、温暖化による気温変化が利用可能日数に与える影響を求めた。その結果、温暖化の影響は線形的ではなく、概ね3~5℃の気温上昇で生活への影響が生じ、それまでに対策を立てる必要があることがわかった。

Key Words : 地球温暖化, 冬道路, 河川氷, 熱収支

1. はじめに

地球温暖化対策として、温暖化の進行を防ぐ緩和策と、社会への悪影響を最小限にとどめる適応策の2つがある。国際会議ではCO₂の削減などの緩和策が議論されることは多いが、適応策の議論は少ない。しかし本研究で取り上げるシベリアの冬道路のように、自然環境に強く依存したインフラが人々の生活を支えている地域では、温暖化が与える影響を把握、適応策を考える必要がある。

東シベリアサハ共和国においては、永久凍土層の上にあるためアスファルトの道路建設は現実的ではない。またレナ川などの大河川には橋梁がほとんど存在しない。そのため道路総延長の2/3が河川、湖沼、地盤の凍結面上を利用する冬道路で、交通に大きな役割を担っている。

IPCCが行った温暖化予測では、シベリア地方における温度上昇は顕著である。この冬道路は季節的な制約はあるものの、自然環境を利用した交通施設であり、環境への負荷は少ない。冬道路に代わるインフラの建設はCO₂などの環境負荷を持つため、冬道路の温暖化適応策を考えることは、地球規模の緩和策としても有効である。

そこで本研究では、地球温暖化が、冬道路の利用可能性に及ぼす影響を把握することを目的とする。まず気温と河川氷厚との関係を分析する。次に河川氷厚に対する積載可能重量、1年間の利用可能日数を求める方法を確立する。そして気温を変化させた場合の利用可能日数の変化を分析する。

2. 河川氷厚の増加と減少

2.1 河川氷厚の増加

冬期になり低温が続くと、河川が凍結し氷が厚くなる。久保¹⁾は、このような氷厚の増加現象をStefanの式を用いて計算した。Stefanの式とは鉛直一次元の熱伝導理論を用

いて結氷問題を解く理論式である。

気温が0℃付近で変化する時期を含めて氷厚を表現する、本研究では、Stefanの式を変形した式(1)を用いて、 $t-1$ 日目の氷厚 h_{t-1} [cm]と t 日目の気温 T_t [K]から氷厚の増加分を計算し、 t 日目の氷厚 h_t [cm]を求める。

$$h_t = \begin{cases} K \sqrt{\frac{h_{t-1}^2}{K^2} - (T_t - 273.15)} & (T_t < 273.15) \\ h_{t-1} & (T_t \geq 273.15) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 K : 係数[cm/(K·day)^{1/2}]

2.2 河川氷厚の減少

春先は気温が上昇し、日射量が増加すると熱交換が活発になるため、凍結河川の氷厚が減少する。本研究では近藤ら²⁾による熱収支を氷面上で考え、氷の融解を表現する。ただし融解は気温が0℃以上の時のみ起こる。

氷の融解エネルギー M は以下の熱収支式より求める。

$$M = R^{\downarrow} - L^{\uparrow} - H - IE \quad (2)$$

ただし、 R^{\downarrow} [W/m²] : 入力放射量[W/m²], L^{\uparrow} : 上向き長期放射量[W/m²], H : 顕熱放射量[W/m²], IE : 潜熱放射量[W/m²]

紙面の制約上省略するが、式(2)には気温のほか、湿度、日照時間、雲量などの気象条件が影響する。以上より求めた融解エネルギー M を氷の融解潜熱 l_f と氷の密度 ρ_i で除すことにより、氷厚の減少を表現する。

3. 氷の破壊現象とその計算

3.1 氷の破壊現象

河川に厚い氷が張った所も、大きな荷重をかけると壊れる危険性がある。氷板に荷重をかけると、橋などの構造物と同様にたわみ、曲げ変形を起こす。荷重が増加すると氷板下面の引張力が増加し、荷重の載荷点を中心に半径方向に楔状のクラックが入る。一度楔状のクラック

が入ると、氷の強度は大きく落ちる。また気温が 0°C 以上のときは再び凍結することはない。したがって本研究では、このような曲げによる楔状のクラックが入る荷重を破壊荷重と定義する。

3.2 氷厚の破壊荷重の理論

無限に広がる浮遊氷板に、半径 a の円盤等分布荷重が作用する場合を考えた、式(3)の久保¹⁾による近似式を用いて、氷厚 h と破壊荷重 P_{CR} の計算を行う。

$$\frac{P_{CR}}{\sigma_f h^2} = 0.371 \left(1 + 7.85 \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{Eh^3}} a \right) \quad (3)$$

ただし、 σ_f : 氷板破壊応力 [kg/cm²], k : 地盤係数 [kg/cm³], E : 氷のヤング率 [kg/cm²].

なお、氷板破壊応力 σ_f と氷のヤング率 E の、氷の温度による変化は過去の実験式を参考に設定する。

4. 気温の上昇が積載可能重量に及ぼす影響

4.1 分析対象地と使用データ

本研究では、冬道路の需要が高いサハ共和国の首都ヤクーツクのレナ川を対象とする。河川氷厚データは 1986 年 1 月から 1988 年 5 月までの冬期間に、10 日おきに測定されたものを、気象データは Baseline Meteorological Data in Siberia (BMDS) Version 4.1³⁾ による 1986 年から後のデータを使用する。

4.2 現時点の気候下における積載可能重量

データが得られた 14 年の日毎の平均値を平年値と考えて気象条件に与え、式(1), (2)より算出した氷厚と式(3)より算出した積載可能重量を与えた日平均気温とともに図 1 に示す。ただし、式(3)における積載半径を 2m とした。図 1 より、氷厚と積載可能重量が最大になるのは、それぞれ 4~5 月、2~3 月で、これらの時期は一致していないことがわかる。

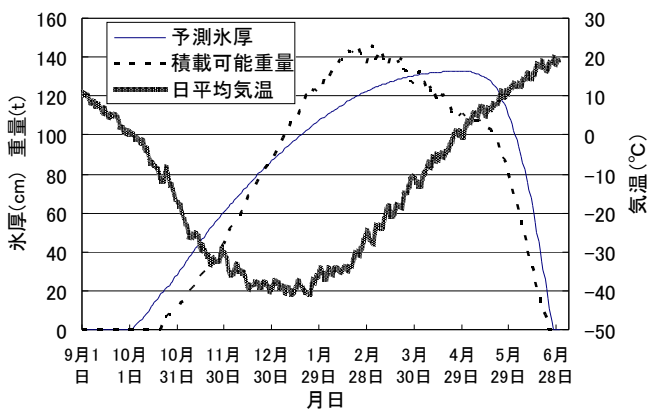


図 1 ヤクーツクにおける平年の積載可能重量

4.3 過去の気候変動における積載可能重量の変動幅

平年値の算出に用いた 14 年の各条件で、冬道路の使用可能日数を求めた。積載半径を 2m とした場合、過去の最

小使用可能日数は、20t の場合 197 日、40t の場合 181 日、60t の場合 145 日、80t の場合 117 日となる。将来の変動が以上の変動幅を越えるようになると、生活への影響が深刻になるので、そのときまでに対策を行う必要があると考える。

4.4 気温上昇による使用可能日数の変化

温暖化により気温上昇が起きると仮定して、冬道路の使用可能日数の変化を検討する。図 1 の計算に用いた気象条件の平年値において、日平均気温のみを上昇させて動揺の計算を行った。積載半径を 2m とし、積載重量が 20t, 40t, 60t, 80t であるときのそれぞれの上昇温度に対する使用可能日数の変化を図 2 に示す。

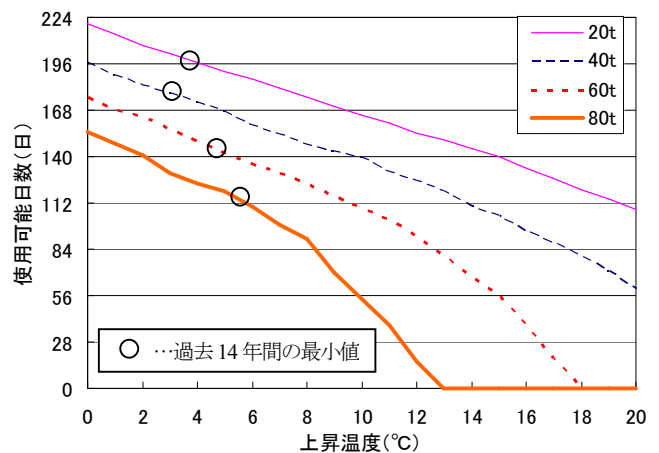


図 2 ヤクーツクにおける使用可能日数の変化

図 2 より、積載重量が重い車両ほど使用可能日数の減少が大きいだけでなく、温度変化に対して影響が非線形的加速することがわかる。

図 2 より、使用可能日数が過去 14 年の最小使用可能日数を下回るのは、概ね 3~5°C の温度上昇が起きたときだとわかる。つまり 3~5°C の温度上昇が起きる前に、温暖化対策を進める必要があると言える。

5. 今後の課題

氷厚の計算では熱収支のみを考えたが、上流の流量の変化やアイスジャムの影響も考慮した計算方法を確立することや、使用可能日数の減少に伴う効率的な輸送計画の立案方法が、今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 久保義光：氷工学序説，氷工学刊行会，1980
- 2) 近藤純正，三枝信子，渡辺力，山崎剛，桑形恒男，木村富士男：水環境の気象学，朝倉書店，1994
- 3) Suzuki R, Razuvaev VN, Bulygina ON, Ohata T : Baseline Meteorological Data in Siberia Version 4.1, Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan, 2007

(2010 年 2 月 10 日提出)