

ロシア連邦サハ共和国の冬道路と地球温暖化の影響

ロシア連邦サハ共和国では、冬季に河川や湖沼が凍結し、その上を冬道路として利用している。しかしサハ共和国は地球温暖化の影響を強く受ける地域のひとつで、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第4次報告書では今後100年間で5~6℃の気温上昇が予測されており、この冬道路の利用可能性への影響が懸念される。本研究では、現地のヒアリング調査や冬道路を管理するための基準書を基に、サハ共和国における冬道路の建設、管理、利用の実態について明らかにした。次いで河川の氷と大気との間の熱のやり取りをモデル化し毎日の氷の厚さと積載可能重量の計算を行い、気温上昇が起きた時の使用可能日数を求めることにより、温暖化による冬道路への影響に関する分析を行った。

キーワード **冬道路, 氷, 地球温暖化, ロシア連邦サハ共和国, レナ川**

奥村 誠

OKUMURA, Makoto

博(工) 東北大学東北アジア研究センター教授・東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授

河本 憲

KAWAMOTO, Ken

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期

サルダーナ・ボヤコワ

Sardana BOYAKOVA

Ph.D. ロシアアカデミー北方民族人文学研究所研究員

1 はじめに

ロシア連邦サハ共和国は、東経110度付近から東経160度付近までの東西約2,000km、北緯55度付近から北緯72度付近の北極海までの南北約2,500kmにわたって広がっており、面積は日本の約8倍あるが、交通網の密度は極めて低い。この地域にはレナ川などの大きな河川があり、夏季には道路交通と河川水運が主要な交通手段となっているが、高緯度に位置するため、冬季は気温が-50℃まで下がり凍結により水運を利用できなくなる。

サハ共和国では、河川や湖沼、湿地などが凍結するのを待って、氷の上を道路として利用する「冬道路」が主要な交通の方法となっている。冬季限定で利用できる冬道路は他に、アイスランド、スウェーデン、フィンランド、カナダおよびアラスカなどに存在しているが、中でもサハ共和国は、地球温暖化の影響を最も大きく受ける地域であると考えられている。

地球温暖化が進めば河川や湖沼の凍結期間は短くなり、冬道路の通行可能期間は短縮すると考えられる。もちろんそれに並行して、夏季の河川水運が使える時期は長くなるであろうが、通常の道路と同じようにほぼ好きな時に無料で通行できる冬道路に対し、有料で、かつ所定の運航時刻まで待たなければならない水運に置き換わることは、利用者から見れば交通コストの増加となる。さらに湖沼や湿地を縦断していくルートでは、氷がない夏季には通行できないケースも少なくない。

また、電力会社のヒアリングにより、凍結期間の長さが

一定でも、タイミングが大きく変化して利用開始時期が予測できなくなると深刻な問題が発生することが分かってきた。というのは、都市と村落を結ぶ送電線などの工事では、電柱などの重量のある機材を運搬するために冬道路の利用が前提となっている。しかし真冬の極寒期に人里離れた地域で作業を行った場合、もし車両が故障すれば作業員の生命に危険が及んでしまう。そのため送電線などの工事ができるのは冬道路開通後の1か月と、冬道路閉鎖前の春の2か月の合計3か月間に限られる。このような状況下では、いつ河川が凍結し、いつから冬道路が使えるようになるのか、あるいはいつまで冬道路が安心して使えるのかという予測手法を確立し、温暖化に対応することが必要になる。

本研究では、冬道路の概要、構造、建設業務、管理業務の実態に関する視察や冬道路に関する基準書の入手と解説を実施するとともに、河川上の氷の凍結と融解のモデリング、氷圧と積載可能な車両の重量との関係についての考察を進めてきた。本稿は以上の成果を報告し、サハ共和国などの冬道路の使用地域における温暖化適応策の必要性をアピールして、日本における今後の研究を喚起しようとするものである。

以下、第2章ではサハ共和国の冬道路の概要、第3章では河川を横断する冬道路の建設と管理の実態、第4章では横断区間の利用について、第5章では温暖化の影響分析について述べる。

なお、本研究の内容は、ロシア国内の防衛上の機密事項に触れる可能性があることから、現地ヒアリングの対応

者が情報提供に対して慎重な姿勢を見せた。2010年12月のサハ共和国運輸省道路局訪問時に本論文の執筆計画を相談したところ、ヒアリング対応者名などを非公開にすることを条件に論文の公表を許可いただいた。このような経緯から、以下の記述は現地ですぐに入手可能なデータに限定して報告しているものであることをご理解願いたい。

2—サハ共和国における冬道路の概要

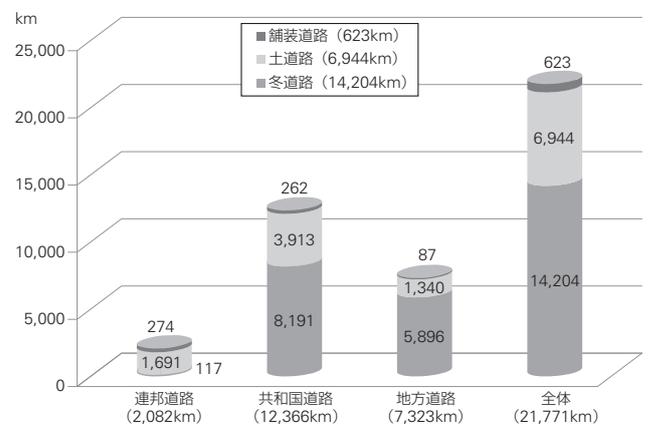
2.1 凍結河川上の道路

ロシア連邦西部のシベリア地域にはオビ川、エニセイ川、レナ川などのように長さが5,000km、流域面積が250万km²(日本の7倍)という巨大な河川があり、河川水運が行われている。しかしこれらの河川も冬季は凍結し、半年以上の期間は船を通すことができない。一方では冬季は気温が-50℃まで下がり、1m以上の厚みを持った氷はトラックを支えるのに十分な支持力を持っている。そこで凍結した河川の上に「冬道路」が設置される。これにより橋がないために夏には渡れない河川を横切ったり、大河川の上下流にある港町をつなぐような縦方向の輸送も自由に行うことができる。

2.2 サハ共和国の交通システムにおける冬道路

サハ共和国には全部で22,000kmの道路があるが、その3分の2はこの冬道路となっており、ヤクーツク周辺では

11月上旬から翌年の4月下旬までの6ヶ月弱利用されている。図-1にサハ共和国の主要交通路を示す。凡例の最初の2つが鉄道で、順に営業中、建設中の路線を示している。現在は最南部の国境からヤクーツクに向けて北上するシベリア鉄道の支線を建設中で、2011年現在、途中の鉱山町であるトモットまでの165kmが開通している。凡例の3、4番目が連邦道路で、実線が通年利用できる道路、破線が冬道路である。凡例の5、6番目は共和国道路で、同様に実線が通年道路、破線が冬道路である。これより冬道路がなければ首都ヤクーツクから到達することが困難な町が多いことが読み取れる。図-2はサハ共和国の道路の管理別、構造別の延長内訳を示している。地方道路では、図-1に記載した連邦道路、共和国道路よりも高い割合で冬道路が使われていることがわかる。



出典：サハ運輸計画書²⁾データより筆者作成

■図-2 サハ共和国における道路の管理別構造別延長



出典：サハ共和国道路地図帳 [2007]¹⁾

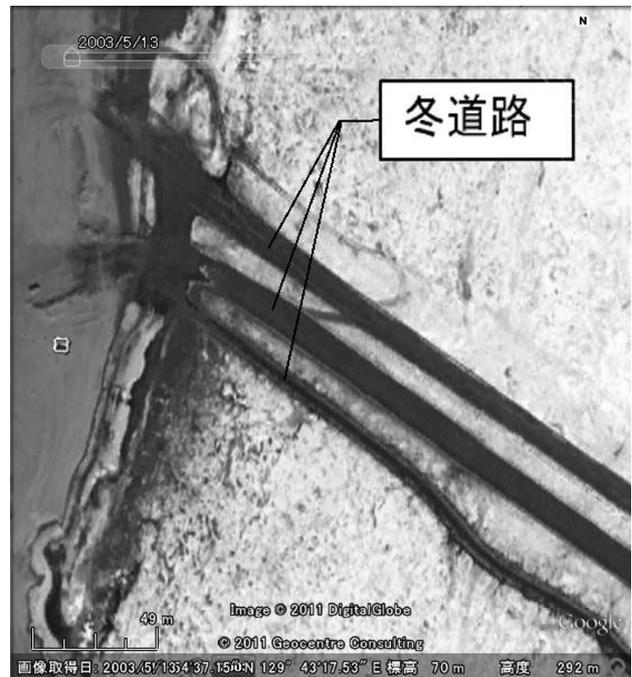
■図-1 ロシア連邦サハ共和国の主要交通路

図一において実線で連続的に描かれている通年道路も、大河川の横断地点には橋がなく夏はフェリーを利用する必要がある。例えばサハ共和国の中央を西南から逆L字型に北へと流れるレナ川の場合、サハ共和国の領内には1本の橋もかかっていない。しかし冬には冬道路を用いた横断が可能となる。写真一はグーグルアースに登録されているヤクーツク南方の冬季の衛星写真で、左上のヤクーツク市街地に接してレナ川の本流と支流が流れている。画像中央の下側に川幅約900mのレナ川の本流を斜めに横断している冬道路が黒く写っている。写真二はその部分を拡大したものである。氷の上に積もった雪を取り除けて氷の表面を出しているために黒く写ったのだと考えられる。また、ヤクーツクより600kmほど下流(北)のジガンスクという町の付近には、アラスと呼ばれる熱的カルスト地形が多数存在し、写真三のように夏には小さな湖を持つ窪地だらけになる。また、複雑に蛇行した河川も存在しているため、夏の通行はきわめて困難であることがわかる。

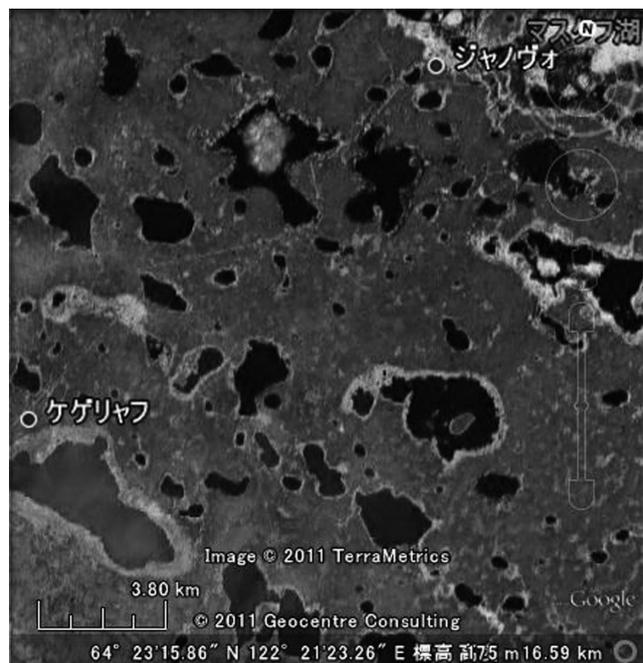
以上のようにサハ共和国では、経年的に利用できる道路の整備は困難であるため、冬道路が大きな役割を果たしている。1991年のソビエト連邦崩壊以前は、すべての定住者のいる村に対して必要な生活物資をヘリコプター輸送するサービスが連邦政府の責任で実施されていたが、ソビエト連邦の崩壊によってそのようなコストを負担することができなくなり、物資の輸送を完全に冬道路に頼るようになった村が増えている。



出典：Google Earth (2003年5月13日の登録画像)
写真一 ヤクーツク南方のレナ川の衛星写真



出典：Google Earth (2003年5月13日の登録画像)
写真二 レナ川横断冬道路の衛星写真



出典：Google Earth (2011年5月25日取得の最新画像)
写真三 ジガンスク付近の夏の湖沼群の衛星写真

3—河川上の冬道路の建設と管理

3.1 コリマ街道のレナ川冬道路

図一のように、ヤクーツクから3本の連邦道路が伸びているが、そのうち「コリマ街道」は、ヤクーツク市の北端からレナ川の氷の上を16km使って対岸のニジニバステヤーフに横断し、北東に進んでオホーツク海の港町アルダンに向かう。ロシア連邦道路庁は、このような河川横断区間の冬道路の建設・管理に関する技術基準書³⁾を作成しており、最新の1998年版は図書館およびインターネットから

の文書ダウンロードサービス(有料)で入手することができる。本章ではこの基準書の内容のほか、実際にコリマ街道のレナ川冬道路の建設と管理を請け負っている道路維持管理会社、およびサハ共和国政府運輸省道路局でのヒアリング調査に基づいて、冬道路の建設と管理の方法を紹介していく。

冬道路の一切の管理は、運輸省道路局、交通警察担当部局、非常事態省と道路維持管理会社が特別委員会を結成して行う。道路維持管理会社はサハ共和国内に何社が存在し、地域ごとに入札によって次の年の建設・管理会社を決める。管理会社は、落札できた地域内の横断地点ごとに、行政機関の講習を受けて知識を持っている人間の中から管理責任者を選定し、特別委員会において承認を受ける。横断地点ごとの通行可能期間の決定は特別委員会が行うが、上記のレナ川横断区間では例年12月25日から4月15日までの予定で通行許可を出している。運輸省でのヒアリングによれば、実際の通行許可と禁止の日付はかなり安定しており、ここ10年では最大でも10日程度の変化しかなく、特に温暖化による影響は感じられないということであった。

3.2 冬道路の構造と建設作業

河川に入る両側の地点は、堤防を乗り越える連絡道路の位置によってほぼ固定されている。砂質の場所ではできるだけ避けて、縦断勾配を6%以内になるように堤防から河川に向けてスロープを作る。その材料は土および雪を使うことが多い。

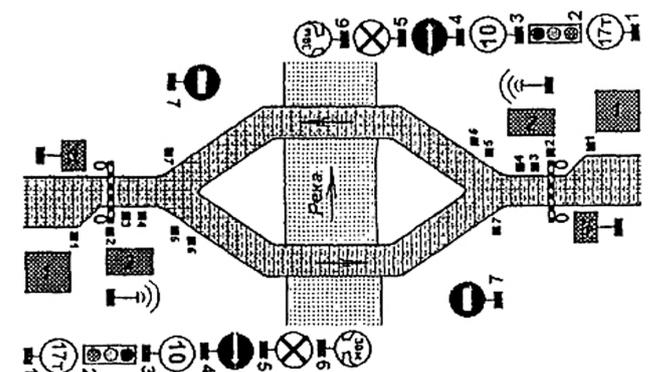
水上部では、重量のある車両の下では水がたわみ、底面の下の水圧が増す。この圧力波が重なると氷板を破壊することがある。道路の車線幅は最低5mで、石油や天然ガスの大型タンクローリー車が通過する場合には20m以上とする。反対方向に走る車両からの圧力波が重ならないように往復の車線を別々に設け、中心線の間隔は100m以上とする。また車線ごとに最高速度と最低車間距離を設定して、前後の車両による圧力波の重なりを避ける。1つの車線の中での車両の追い越しは許さないため、交通量が多い区間では第3、第4の車線を設定することが必要な場合があるが、その場合にも車線間の間隔を100m以上確保する。地形上一つの車線しか設定できないところでは、道路工事区間のように信号を用いた交互の一方通行とする。見通しのよさを考えてルートはできるだけ直線で設置するが、河川の流れに対して45度以上の角度、あるいは流れに沿った方向の直線をつないで設定する。曲線半径は60m以上の緩い曲線とする。氷の厚さは水深とほぼ比例するという傾向があるため、水上部のルートは、できるだけ水深の深い場所を選定することが望ましい。そ

こで、秋までに船からの水深観測を行って水深の分布図を作成しておく。もちろん秋から春にかけて水位がさらに低下していくので、その影響を見込んでおく必要がある。

12月にはレナ川は厚さ1mを超える水で完全に覆われる。担当の道路維持管理会社は、夏の間閉鎖されていた両岸のプレハブの詰所を建設作業用の詰所として使える状態に戻し、ブルドーザーを用いて横断道路の建設作業を始める。予定ルートに沿って氷の上の雪を30mぐらいの幅で取り除き、凹凸を削って氷の表面を平らにする。氷の構造を見極めながらルートを微調整することもある。平坦な氷には、大きな氷塊が上流から流されてきてその場所に停止したものと、最後の時期まで残っていた水面が凍ったものの2種類がある。後者は強度が小さいので避けるようにルートを微調整するのである。

各車線の片側、中心線から20m離れた線上に、10～50mおきにドリルを用いて氷に穴を開ける。穴の直径は氷が厚いほど大きく、6～16cmとする。この穴は氷の色や空洞を観察し、ものさしを差し込んで氷厚を正確に測るために用いられる。さらにこの穴から氷の下を流れる水をくみ出して氷の表面にまき、冷えた空気で凍らせて、氷厚と強度を増やすとともに凹凸をなくす。水の量は気温や風速から24時間以内に完全に凍る量を計算し、それを超えないように調整する。最後に夜間でも通行できるように反射材のついたポールを15～20m間隔で車線の両側に立てる。両岸の陸上部には図-3のように、遮断機および信号機と、車両重量制限、最高時速、一方通行、駐停車禁止、最低車間距離および反対車線の進入禁止の交通標識を設置する。荒天時や補修作業時に横断したい車両を待機させるスペースも河川敷内の陸上部に設ける。さらに河川上では、補修作業時の振り替えに用いる予備道路を、本道路に隣接して設定する工事を行うことになる。

道路維持管理会社による以上の作業の完了後、基準書の計算方法に従って当該区間の車両重量制限値を決定する。制限値を40t以上に設定するときは計算だけに頼るのではなく、予定重量の10%増しの試験用のおもりを用



出典：ロシア連邦冬道路技術基準書³⁾
 ■図-3 冬道路の概略平面図

意して実験を行う。おもりの移動実験の後に、氷に連続的な亀裂や割れが見られないこと、残留変形量が氷厚の5%を超えていないことを確認して、開放時間帯と通行開始日および予定終了日、開通後の管理作業計画に対して運輸省道路局または地方行政政府による承認を受けることになる。

3.3 冬道路の管理体制と使用終了の判断

開通後、詰め所には道路維持管理会社に属する4人のグループが2交替で勤務し、24時間体制で信号の管理と目視による過積載重量車両の遮断などを行う。グループのうちの1名が代表管理者であり、観測した氷厚から基準書に基づいて通行可能車両の重量を計算し、車両重量制限、最高速度、最低車間距離などの制限を変更する権限を持っている。氷の状態が悪い場合、あるいは悪天候により視界が悪くなった時には、一時的に通行止めにもできる。別に1組5名からなる巡回チームが1月までは3日に一回、2月からは毎日50mごとに氷の厚さと積雪深を測り、氷表面の亀裂やひび割れ、変形の有無を確認する。氷厚の測定は50mごとに開けた穴から直接メジャーで測る。この方法ならば穴から氷のサンプルを採取することも同時にできし、補強用の氷を採取するためにも穴が利用できる。あわせて1日1回外気温を測定する。

補強が必要な場合には水をまいて氷の厚さを増やす。この作業は2kmの区間ごとに、本道路に並行する予備道路に交通を振り替えながら、1区間に5日間かけて行う。50mごとのドリルの穴からポンプで水を汲み、雪と木材で仕切った範囲に10cm以内の深さに水をまく。水の深さは気温や風速から24時間以内に完全に凍る量を計算し、それを超えないように調整する。交通による氷のひび割れが見られるときには直ちに上面から水をまいて埋めるようにする。15cm以上の幅のひび割れは上から砕氷を用いて埋め、その後安定するまで通過車両の最小車間距離を100mに規制する。15cm以上のひび割れの長さが2m以上になったとき、ひび割れがくもの巣のように拡大したとき、局所的な氷の谷間や穴ができたときには直ちにその車線の交通を予備道路に回し、補修工事を行う。

春になり気温が零度を上回るようになると、日射の影響も受けて氷の厚さは減少し始める。基準書によれば、気温の3日ごとの平均値が上昇していれば、最新の観測結果を用いて可能積載重量を計算しなおす必要があるとしている。また氷の表面に融けた水が見られるようになると、観測体制や最大車両重量の規制の強化が実施される。現場の管理責任者の裁量で、終日24時間通行可能であった区間についても、通行時間を気温が低い夜間と

朝に限定することができる。

基準書では、通行終了の判断基準として、

- (1) 車線の氷の表面に長い距離にわたって水が現れるようになった
- (2) 幅15cm以上のひび割れが、長い区間にわたって出現した
- (3) 明らかに氷の厚さや強度が不足するようになった
- (4) 河川の水位の変化に伴い、アプローチの坂道区間が損傷した

という条件を挙げており、管理責任者が使用期間の終了を決定するとしている。

公式禁止日以降に軍事や医療などの理由で緊急に冬道路を利用したい場合には、道路維持管理会社に申請し、特別に使用許可を認める場合がある。ただし、公式禁止日以降は氷厚の計測はしていないので安全性は不確かであり、氷上流が発生したあとは許可しないということであった。

4—河川上の冬道路の利用

4.1 利用上の制限

河川上の横断区間においては圧力波の発生を防ぐために、車線ごとに一方通行としており、最大車両重量、最高速度と最低車間距離に関する規制がある。基準書によれば最高速度は時速20km、乗用車間の車間距離は30m以上、トレーラーなどの大型車の前後は70m以上を基準とし、その場所の状況に合わせて異なる値を設定している。2009年3月4日の時点では、上記のレナ川横断地点の最大車両重量は30t、写真—4の右側に写っている看板の最高速度は20km/hと書かれていたが、スロープの途中には10km/hの道路標識が立っていた。最低車間距離は看板、道路標識とも45mと表示されていた。

基準書によれば、霧あるいは吹雪の中での通行は禁



■写真—4 コリマ街道レナ川冬道路のヤクーツク側入口スロープ部

止されている。また河川上の区間内での駐停車、急発進、Uターン、車線外への乗り入れ、燃料の注入などは禁止されている。故障のため自力で動けなくなった車両は岸から50m以内の場合には直ちに詰め所のロープを用いて牽引されて岸に引き上げられる。それよりも遠い場所での故障車は他の車に牽引されることになるが、必ず他の車を先導させて10km/h以下の速度で牽引する。バスなどの多人数が乗車している車両の重量制限は、安全のために貨物車に対する最大車両重量制限の3分の1の重量とする。

徒歩で横断することは、次のような通路が設置されている場合にのみ認められる。歩行者用通路は車両が通過する車線からポールで区切られた外側に設けなければならない。さらに横断区間の長さが100mを超える場合、歩行者が途中で休み体を暖めることができる中間の休憩場所を100～150mごとに設置しておく必要がある。

路線バス、消防車、救急車、道路管理関係車両、公共の目的のための緊急車両の通行は優先されるため、他の車両は待機しなければならない場合がある。

4.2 期間外利用による事故

過去には公式開放の前の期間、および公式禁止日以降の期間における無断での利用が行われ、氷が割れて車両が沈む事故が起こっていたが、最近の状況は良くわからない。一般の人々に聞くと「最近でも事故は起こっている」という声をよく聞く。一方、運輸省道路局のヒアリングでは、最近はマスメディアやインターネットを通じての広報を充実させており、また通行禁止日後に、交通警察が出動して監視を行っているため、期間外の無断利用は減っているという。ヤクーツク周辺ではここ5年間は事故は発生していない、サハ共和国全域では2007～08年の冬には転落事故は発生していない、2006～07の冬は1台落ちたが救命活動の結果死者はでなかった、ということである。

5——温暖化の影響分析

5.1 サハ共和国における温暖化

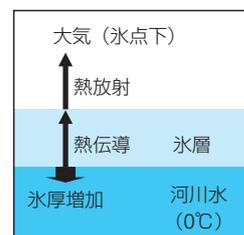
サハ共和国は地球温暖化の影響を最も大きく受ける地域の一つである。例えば1975年から2000年までの平均気温の上昇は、世界の平均では0.5℃であるが、ヤクーツク市では2.5℃に達している。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第4次報告書によると、ヤクーツク市周辺の平均気温は今後25年間に1.5℃、100年間では5～6℃程度上昇すると予想されている。また降水量も冬季は増加し、夏季は若干減少すると予想されている。このような気候の変化により、今後河川が凍結しなくなることはないとしても、

凍結や融解の時期が変動することが十分に考えられる。

5.2 冬道路の氷厚変化の物理学的モデル

冬道路に関する温暖化の影響を分析するにあたり、まず、気温と河川氷厚との関係をモデル化した。

冬季になり低温が続くと、河川が凍結し氷が厚くなる。久保⁴⁾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の式とは図—4のような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。ここでは、式(1)のようなStefanの式を用いて、 $t-1$ 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]を求めた。ただし氷厚の増加は気温が0℃以下の時のみ起きると仮定した。

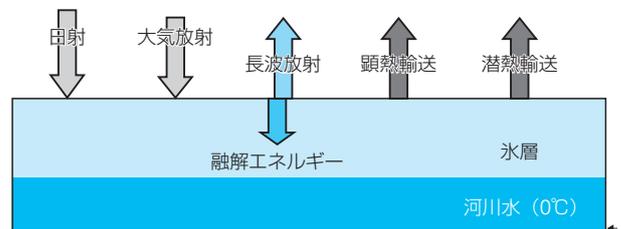


■図—4 氷厚増加時の熱伝導(Stefanの式より)

$$h_t = K \sqrt{\frac{h_{t-1}^2}{K^2} - (T_t - 273.15)} \quad (1)$$

ただし、 K :係数[cm/(K·day)^{1/2}]は地形や雪の状態、水質などの影響を受けるため、場所ごとの実績値に合うように値を決める必要がある。

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。ここでは図—5のような近藤ら⁵⁾による熱収支を氷面上で考え、氷の融解を表現した。ただし融解は気温が0℃以上の時のみ起こると仮定した。氷の融解エネルギー M [W/m²]は以下の式(2)のような熱収支式より求めることができる。



■図—5 氷厚減少時の熱伝導(近藤ら⁵⁾による)

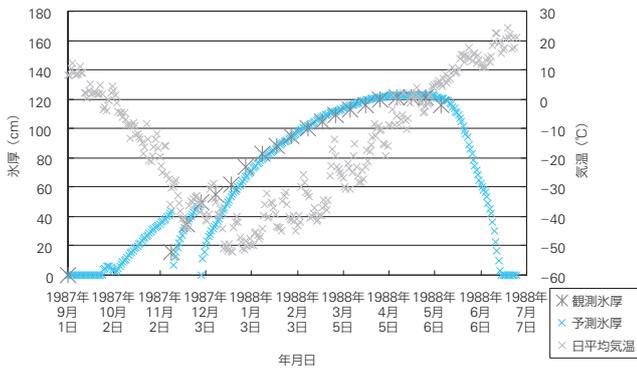
$$M = (1 - ref)S^{\downarrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} - H - IE \quad (2)$$

ただし、 S^{\downarrow} : 全天日射量[W/m²], L^{\downarrow} : 大気放射量[W/m²], L^{\uparrow} : 上向き長波放射量[W/m²], H : 顕熱輸送量[W/m²], IE : 潜熱輸送量[W/m²], ref : アルベド

以上より求めた1日当たりの融解エネルギー M を、氷の融解潜熱と氷の密度で除すことにより、氷厚の減少を計

算できる。

以上のモデル式に、1987年9月から1988年6月までの毎日の観測気温の変化を与えて、河川表面の氷の厚さの観測結果と照合した。(1)式の係数 k の値を調整した計算結果は図一6のとおりで、10~11月は河川の流れによる氷の流出や堆積が起こっているため、ある程度の厚さまで発達した時点で氷がいったん除去されると仮定したほうが当てはまりが良い。12月以降は氷の流出がなく定着しているため、連続的に計算した予測氷厚と観測氷厚がほぼ一致した。



■図一6 観測氷厚と予測氷厚の比較

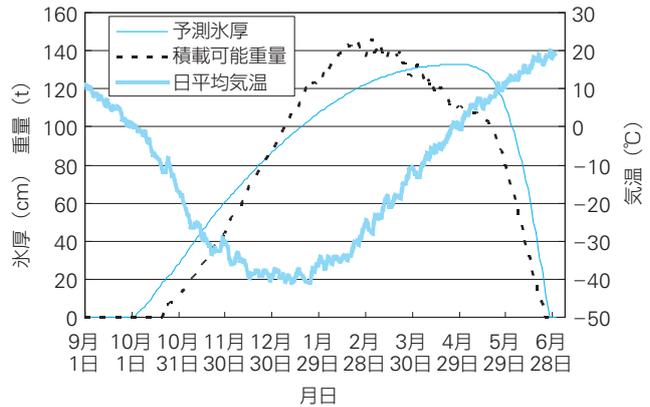
5.3 冬道路の積載可能重量の算定

次に河川氷厚に対する積載可能重量をモデル化した。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。このクラックが入るときの荷重を破壊荷重と定義する。無限に広がる浮遊氷板に、半径 a [cm]の円盤等分布荷重が作用する場合について、久保⁴⁾は式(3)のような近似式を与えている。これを用いて、氷厚 h [cm]と破壊荷重 P_{CR} [N]の計算を行った。

$$\frac{P_{CR}}{\sigma_f h^2} = 0.371 \left(1 + 7.85 \frac{\sqrt[4]{k}}{\sqrt[4]{Eh^3}} a \right) \quad (3)$$

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

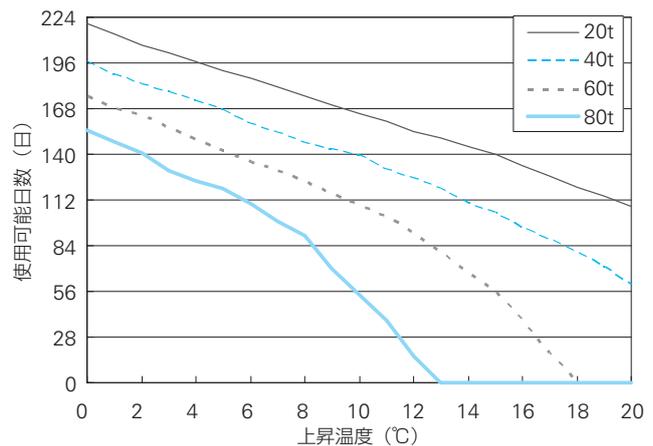
先の氷厚の変化モデルと合わせて、毎日の気温として、Baseline Meteorological Data in Siberia (BMDS) Version 4.1⁶⁾によるヤクーツクの過去14年間(1986年~2002年)の平均値を与えて氷厚と積載可能重量の値を計算した結果を図一7に示す。氷厚が最大になるのは気温が0℃以上となる4~5月であるのに対して、積載可能重量の最大値は氷温が低く厚さ当たりの強度が強くなる2~3月であることが確認できる。



■図一7 年平均気温に基づく予測氷厚と積載可能重量の計算値

5.4 温暖化による冬道路の使用期間への影響分析

次にヤクーツクの過去14年間(1986年~2002年)の平均気温を基準として、仮に毎日の気温がそのまま一定の温度だけ上昇したときの気温を与えて、上記のモデルを用いて氷厚の変化を計算し、各種の車両が通行できる期間の長さがどのぐらい短くなるかを計算した。その結果を図一8に示している。



■図一8 気温上昇に伴う、積載可能重量ごとの使用可能日数の変化

例えば20tの車両の場合、過去14年間の平均気温から6℃の上昇があると、可能期間は220日から188日と約1ヶ月間短くなる。実際にはこの可能期間になってからブルドーザーを入れて冬道路の建設作業を始めることになり、また氷の局所的な不均一性を考えれば耐荷力がなくなるぎりぎりまで通行することはできないため、一般車両が使用できる期間は計算値よりもかなり短い。実際ヤクーツク周辺では現在、12月下旬から翌年の4月下旬までの5ヶ月弱の間冬道路が利用されている。

この計算から、今後100年間の5~6℃の温度上昇による使用可能期間の短縮は約1ヶ月であり、少しずつ準備をすれば十分対応できる変化であるように見える。

6—おわりに

本研究では、サハ共和国において使われている冬道路の概要、構造、建設業務、管理業務の実態を調査した。さらに、河川上の氷の凍結と融解のモデリング、氷厚と積載可能な車両の重量との関係のモデリングを行い、温暖化の影響についての考察を行った。その結果、今後100年間の気温の5~6℃の上昇による使用可能期間の短縮は約1ヶ月であることを示した。

しかしながら、先に紹介した電力会社の送電線工事のように、具体的にある目的で冬道路を利用する場合には、使用期間はより限定され、期間の短縮よりもむしろ凍結融解時期の変動が大きな問題になるケースも存在する。本研究で試みたシミュレーション手法は、そのような場合の検討ツールとして役立つ可能性がある。

なお、本研究の計算手法は簡単化のための仮定を置いており、いくつかの点で改良を行うことが可能である。例えば氷厚の計算は鉛直1次元方向の熱収支のみを考慮しているが、流れの影響を考慮することが望ましい。また氷の融解速度は表面のアルベド(反射率)の影響が大きいとされており、現地の観測による実際値を使用することが望まれる。積載可能重量の計算では、円盤状の等分布荷重を仮定しているが、実際の車両の形状を加味することが望ましい。さらに将来の温暖化シナリオも、近年の毎日の平均気温をそのまま一律に上昇させることには問題があり、気候モデルからのアウトプットを使用することが望まれる。

謝辞: 本研究は、総合地球環境学研究所研究プロジェクト(2009-2013)「温暖化するシベリアの自然と人-水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応-」(井上元代表)および、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)「マイクロ環境史の復元手法による北極圏における温暖化の先住民社会への影響分析」(高倉浩樹代表)の一部として実施したものである。3回にわたる現地のヒアリング時の露英通訳についてルーキナ・リアンナ氏の、ロシア語資料の英文翻訳についてホーロド・マリーナ氏(関西大学・ポストドクトラルフェロー)の多大な協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Vetoshkin, A. F. and Fedorenko, N. N. (eds.) [2007], "Automobile Road Atlas, Republic of Sakha (Yakutia)", FGUP Yakutsk Gerogeodetic Enterprise.
- 2) Special Committee of Russian Federal President and Ministry of Transport [2006], "The status and future of Transportation Network, Republic of Sakha (Yakutia)".
- 3) Federal road agency of Russian Federal Government [1998], "Instructions on design, construction and usage of ice passages", Road Standard of commonly used highways: ODN 218.010-98.
- 4) 久保義光 [1980], 『氷工学序説』, 氷工学刊行会.
- 5) 近藤純正・三枝信子・渡辺力・山崎剛・桑形恒男・木村富士男 [1994], 『水環境の気象学』, 朝倉書店.
- 6) Suzuki R, Razuvaev VN, Bulygina ON, Ohata T [2007], "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.

(原稿受付2011年2月4日)

Winter Road in Sakha Republic and the Effects of Global Warming

By Makoto OKUMURA, Ken KAWAMOTO and Sardana BOYAKOVA

Many cars, buses and trucks are driven on frozen river and lake, named as "winter road", in Sakha Republic. Sakha Republic is one of the regions where the remarkable climate change will occur by global warming, then the change of available duration of the winter road will become an important issue in the near future. This article introduces how design, management and usage of the winter road are done in Sakha Republic, based on the hearing surveys and the technical standard of the winter road issued by the Russian Federal Government. Then we analyzed the effects of global warming to available period of the winter road over the Lena River near Yakutsk.

Key Words : *winter road, ice, global warming, Sakha Republic, Lena River*
