

赤外レーザー照射による遠隔融雪技術の開発

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム

○櫻井 俊光
松島 哲郎
松下 拓樹

道路インフラに付着した雪が成長して落下すると、道路通行車両等に被害を与える可能性がある。そのため、道路管理者は定期的にこの着雪を除去するための作業を実施している。しかし、着雪除去作業には維持管理費の大きな負担となる。そこで、寒地土木研究所では道路インフラの着雪を遠隔で除去するための技術開発を目的として、赤外レーザー照射による遠隔融雪技術に関する試験を行ったので報告する。

キーワード：基礎技術、除雪・防雪、維持・管理

1. はじめに

積雪寒冷地では降雪や吹雪等により、冬期間に道路案内標識、道路情報板、橋梁等（以降、道路インフラとする）に着雪する（図-1）。道路インフラに着雪した氷雪が成長し落下すると、道路交通車両等への被害が発生する可能性がある。この被害を未然に防ぐため、道路管理者は定期的に着雪除去作業（図-2）を実施しているが、この着雪除去作業の手間やコストが道路維持管理上の負担となる。特に高所作業車等を利用しなければ届かない道路インフラに着氷雪が成長すると、その除去作業はより一層の負担となる。そのため、遠く離れた箇所に着雪した雪を効果的に取り除く着氷雪除去技術の開発に対す



図-2 着雪除去作業の実際の写真（松下 撮影）



図-1 道路インフラへの着雪：トンネル坑口の例
写真上：冬（櫻井 撮影）、写真下：夏

る社会的要請が大きい。しかし、遠く離れた対象物の着雪を除去する技術は、我々の知る限りではほとんどない。そこで、遠く離れた箇所の着雪を除去するため、長距離伝搬が可能なレーザーを利用した着氷雪の融解法を開発することを目的とし、本稿では屋内と屋外の試験結果について報告する。

本稿では、レーザーを利用して雪や氷を融解する基礎技術が主な内容となる。まず光による氷の融解に関する基礎について簡単に解説し、レーザーで氷を融かす室内試験と、レーザーで遠隔で雪を融かす屋外試験について述べる。

2. 光による氷の融解に関する基礎

(1) 雪氷の物性

一般的に、物質が固体から液体に相転移する現象を融解といい、融解に必要な熱量を潜熱と言う。雪はマイクロに見れば氷である。氷の潜熱は 333.6 kJ/kg (6.01 kJ/mol)¹⁾であり、この潜熱に相当する熱量を氷に与えることができれば、氷は融けて水となる。ただし、この潜熱は氷が水

に相転移する熱量であり、H₂O以外の不純物が混入していれば、それに応じて融けるための熱量は変化する。

雪は、氷と空気の混合物で単位体積あたりに占める氷の割合、つまり密度で表現される。たとえば新雪は密度30~150 kg/m³程度の範囲にある。氷は雪の通気性が失われる密度820 kg/m³以上とされ、氷の密度は0°Cで916.4 kg/m³となる。以上から、氷の潜熱に氷と雪の密度比を掛ければ雪を融かすために必要な熱量を計算できる。

光が物体に照射されると、主に反射、透過、吸収の3つの現象が生じる。照射された光のエネルギーと対象物質の分子・原子のエネルギー状態が相互作用する場合、光のエネルギーが物体へ受け渡され熱に変換される。これを(光の)吸収といい、上述した氷の潜熱よりも高いエネルギーの光を氷が吸収できれば、光でも氷が融解する。したがって、以下に述べるように光による融解法では、氷が吸収する光の波長を考慮することが重要である。

(2) 光の波長と氷の融解

一般的に、光が物体(ここでは氷とする)を透過するとき、光の強度 I は透過距離 x と比例関係にあり、

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

で表現される。 I_0 は入射した光の強度、比例定数 α は吸収係数である。吸収係数の単位は長さの逆数の次元で通常cm⁻¹で表現される。なお、光の強度 I はレーザー研究の分野では単位W/cm²とする場合が多い。 x も単位cmとするのが簡便であるが、本稿では長距離伝搬の試験も含まれるので x は単位cmや単位mなど適宜利用することとする。また、光の波長は単位 μm とする。

α は精密な実験²⁾により光の波長毎に得られている。図-3に α と波長の関係を示す。縦軸は α であり、この数値が高いほど光を良く吸収することを意味する。図-3から、たとえば可視光(0.35~0.7 μm 程度)の場合、波長の

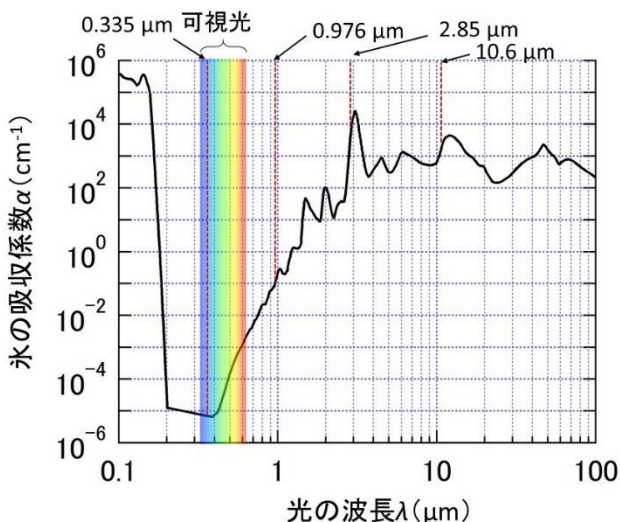


図-3 光の波長と氷の吸収係数(文献²⁾を改編)

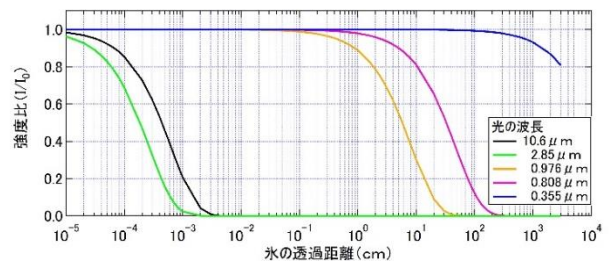


図-4 光の波長毎の氷の透過距離

(光の波長は代表的なレーザー光の波長を示す)

長い赤色の光ほど氷は良く吸収し、波長の短い青色の光ほど良く透過することがわかる。実際に、氷に太陽光が照射されると青い光だけが氷に吸収されずに透過し目に写る。たとえば「かまくら」や積雪の中で雪や氷が青く見えるのは、このためである。また、波長3 μm 程度までは波長が長いほど α が高くなり、3 μm ~100 μm まではほぼ横ばいに見えるが、図-3の縦軸は対数であることに注意されたい。

式(1)から、各波長における氷の透過距離 x を計算することが可能である。図-3の各波長の α を式(1)に代入し、入射した光と透過した光の強度比(I/I_0)で表現すると(あるいは入射した光の強度を定数($I_0 = 1$)にすると解りやすい)、それぞれの波長における x が算出される。図-4に、代表的なレーザーの波長における x を示す。ここで本研究には利用していないレーザー波長0.808, 0.355 μm も含まれることを添えておく。たとえば可視光の青色に見える波長0.355 μm では、 α が非常に小さいので厚さ10m(10³cm)の氷に照射しても、ほとんど吸収することなく光は透過する。一方、波長10.6 μm 、2.85 μm の光では0.01cmの距離で全ての光が吸収される。波長0.976 μm はその間にある。氷や雪を光で融解させるためには、 α が高い波長の光を利用することが効果的である。ただし、実際の氷には気泡等の不純物が内在するため、計算上の結果にとどめておくこととしたい。

(3) 光融雪技術の冬期道路管理への活用

冬期道路管理において、道路構造物に付着した雪、あるいは堆積した雪を融かす方法には、加熱法や凝固点降下法などがある³⁾。加熱法には、地下水や水道水を消雪パイプやホースで散水して雪を加熱する方法⁴⁾、かつて福井県で橋梁の冠雪対策として地下水を用いた事例⁵⁾、ロードヒーティング⁶⁾やシート状の熱源を道路構造物に貼り付けるヒーティング工法⁷⁾などが該当する。また、凝固点降下法には凍結防止剤等が該当する³⁾。実用化されている光融雪法には遠赤外線ランプ光源を利用した方法⁸⁾等がある。波長範囲の定義にもよるが、遠赤外線は波長2 μm から100 μm 以上で、少なくともこの波長範囲の α が高いことは図-3からもわかる。よって、遠赤外線を照射することにより雪氷を融かすことができるのは、氷にこのような光の吸収特性があるためである。

3. 赤外レーザーによる氷の融解試験（屋内）

(1) 利用したレーザーの仕様

1960年にレーザーが発明されて以来、気体（ガス）、固体、半導体など様々な媒質によるレーザー光源が開発されている¹⁰。図-3に示した近赤外（波長0.7~1.5 μm ）から中赤外域（波長30 μm 程度まで）のレーザー光源も多数ある。なかでもガスレーザーは赤外域の波長の種類が非常に多くある¹¹が、本研究では市場で入手しやすい光源を選定することとし、古くから様々な分野で応用されている波長10.6 μm の高出力CO₂レーザー¹²を選定した。出力は最大100 W、出力形式は連続波発振（GEM-100A, Coherent Inc.）である。

なお、本研究で使用したレーザー光源の仕様を表-1にまとめた。波長0.976 μm の近赤外レーザーは北見工業大学との共同研究¹³で、波長2.85 μm の中赤外レーザーは大坂大学との共同研究¹⁴で過去に実施したものである。

表-1 融氷雪に利用したレーザー光源

	レーザー装置	波長 μm	最大出力 W	ビーム径 cm	α cm^1
a	CO ₂ レーザー	10.6	100	0.4	1582.6
b	Er:ZBLAN ファイバーレーザー ¹³	2.85*	0.42	0.2 (平均)	3749.0
c	半導体レーザー ¹⁴	0.976	10.1	—	0.12

*推定値

(2) CO₂レーザーを利用した氷の融解試験

室内実験では、市場で入手可能な無気泡氷を利用した。室内の温度は室温（約20 $^{\circ}\text{C}$ ）であり、表面がわずかに融解した時にレーザーを照射したので、氷の温度は0 $^{\circ}\text{C}$ であると考えられる。無気泡氷に波長10.6 μm のCO₂レーザーを照射し、ビデオカメラで融解速度を算出した。

図-5に、CO₂レーザーによる氷の融解試験の結果の一例を示す。レーザーの光軸を水平に調整したにもかかわらず融解した穴が若干斜め上方に傾いている。この傾向は出力を変えたときにも現れた。その原因は定かではないが、空洞内において融解した水が影響した可能性がある。そこで解析では照射箇所（入口）から貫通した箇所（出口）までの斜距離を融解長さとした。

図-5の一例では、レーザーの出力は10.5 W、氷の厚さは約4.8 cmである。およそ29秒で氷が融解し、レーザー光が貫通した。図-6に、図-5で実施したビデオカメラ画像から1秒毎の融解距離を解析した結果を示す。経過時間との間に線形の関係が得られた。図-6の回帰直線の傾きから、融解速度は0.147 cm/sと見積もられる。

図-7に、CO₂レーザーの出力を変えて融解速度を解析した結果を示す。レーザー出力と融解速度には概ね線形の関係にある。回帰直線から、CO₂レーザーによる出力毎の氷の融解速度が推定可能である。たとえば、レーザ

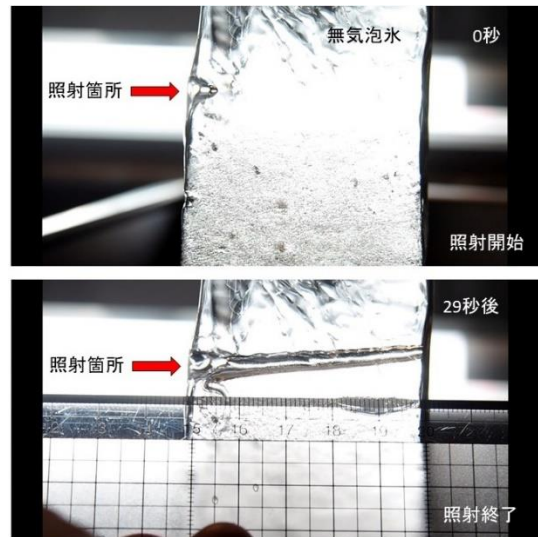


図-5 ビデオカメラで撮影した氷の融解の様子
CO₂レーザー照射開始（上）と照射終了（下）

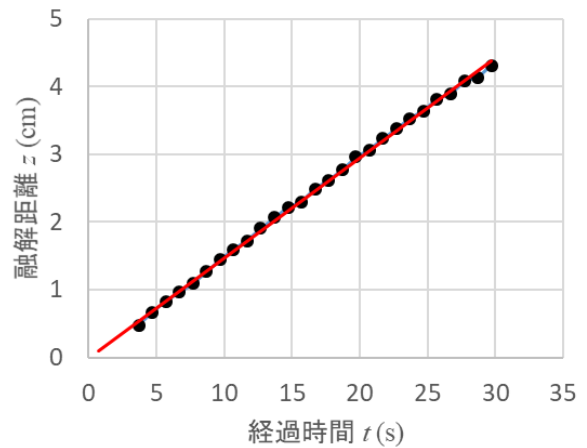


図-6 CO₂レーザー照射時の融解距離と経過時間の関係
回帰直線： $z = 0.147t$ (z : 融解距離m, t : 経過時間s)

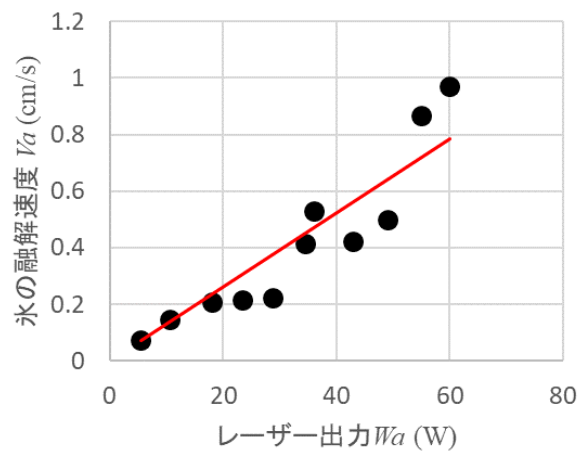


図-7 CO₂レーザー出力と氷の融解速度の関係
回帰直線： $V_a = 0.013W_a$
(V_a : 氷の融解速度cm/s W_a : CO₂レーザー出力W)

一出力60 Wのときの氷の融解速度は概ね0.7~1.0 cm/sの範囲にあることが分かる。なお、融解速度のばらつきの原因は、氷内部の温度分布等が関係していると思われる。室温に置かれた氷の内部温度を計測することは難しいが、すくなくとも試験直前では表面温度は0°Cであった。氷内部の温度が0°Cより低い時、温度上昇に利用される熱量が含まれるため融解速度にばらつきが生じたと考えられるが、推測の域を出るものではない。

(3) 氷を融かすための最適な波長

近赤外レーザー(波長0.976 μm)¹³⁾による氷の融解速度とレーザー出力の関係と、中赤外レーザー(波長2.85 μm)¹⁴⁾による氷の融解速度とレーザー出力の関係、上述の(2)で示したCO₂レーザーと同じ方法で精査した。レーザー出力と氷の融解速度の関係は、それぞれ

$$V_a = 0.013W_a \quad (2)$$

$$V_b = 0.023W_b \quad (3)$$

$$V_c = 0.0046W_c \quad (4)$$

である。ここでVとWは氷の融解速度 cm/sとレーザー出力Wである。添字a, b, cはそれぞれ表-1のレーザー装置a, b, cの波長10.6 μm 、2.85 μm 、0.976 μm による融解速度の結果である。式(2)~(4)の回帰係数(数値)の単位は $\text{cm s}^{-1} \text{W}^{-1}$ であり、1.0 Wあたりの氷の融解速度を意味する。つまり、出力1.0 Wのレーザーを照射すると1秒間に融解する氷の長さcmが算出される。図-8に、赤外レーザー(波長10.6 μm)、中赤外レーザー(波長2.85 μm)、近赤外レーザー(波長0.976 μm)から得られた融解速度の式(2)~(4)における回帰係数(σ とする)と α の関係を図示した。 σ と α の回帰式(図-8の点線)は

$$\sigma(\alpha) = A\alpha + B \quad (5)$$

と示され、図-8からAとBはそれぞれ 4.88×10^{-6} 、 $4.9 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ であった。一方、 α が0に限りなく近くなれば、

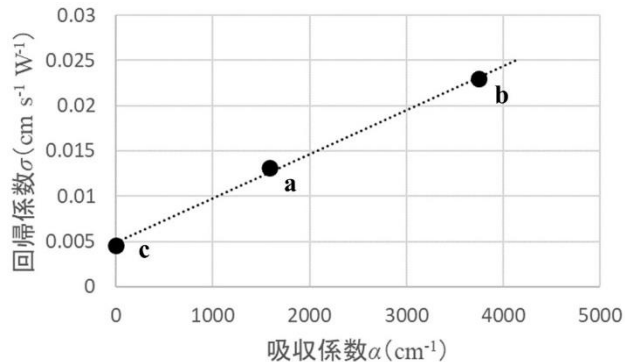


図-8 吸収係数 α と式(2)~(4)で得た回帰係数の関係
図中添字a, b, cはそれぞれ表-1のレーザー装置a, b, cに対応する。

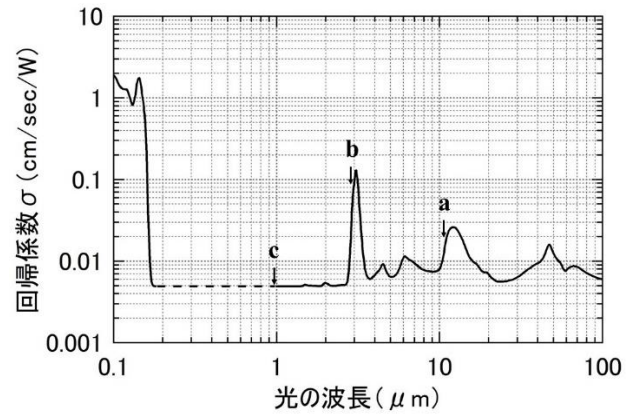


図-9 光の波長と回帰係数 σ の関係

図中添字a, b, cはそれぞれ表-1のレーザー装置a, b, cに対応する。

氷は融解しないものと考えられるが、回帰直線(点線)の切片Bの値は0以上である。これは、実験に利用した氷体の内部温度が完全には0°Cではないことと、氷の内部に気泡や不純物が存在していることなどが、融解速度に影響したと考えられる。

本実験で得られた式(5)の係数AとBの値および α の値(図-3)から、ほぼすべての光の波長における σ を算出することができる。図-9に結果を示す。ただし、図-9では縦軸が対数であり、式(5)の定数Bが有限であるため、 σ が $4.9 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 以下のデータは得られない。図-9の点線がそれであり、これに可視光も含まれる。

図-9から、実施していないレーザー光の波長による氷の融解速度が推定可能である。たとえば、近年アイセーフ光源として注目されている波長1.5 μm におけるレーザーを氷に照射した場合について試算すると、式(5)の σ は $0.005 \text{ cm s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 程度となる。仮に、波長1.5 μm 、出力1 kWのレーザー光を氷に照射すると氷の融解速度は5.0 cm/sと算出される。他方、波長0.18 μm 以下の紫外光においても氷が融解することが図-9からも示され、 σ が $1 \text{ cm s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ を上回るの、融解速度が非常に速いことが推察できる。ただし、紫外光による細胞膜機能の損傷¹⁵⁾などが確認されており、人体への影響が懸念される。そのため紫外レーザーの利用には慎重を期するものがある。安全を鑑みれば融雪用レーザーに適した波長は中赤外から赤外(1.5 μm ~100 μm)の波長帯域で、特に3.0 μm と11 μm 付近が最も効果的である。よって、本研究で利用した波長10.6 μm のCO₂レーザーは氷の融解に適した光源の一つで、さらには波長3.0 μm に近い波長2.85 μm のレーザー¹⁶⁾は最適な光源であると言える。

4. 赤外レーザーによる雪の遠隔融解試験(屋外)

(1) 屋外用レーザー融雪装置の概要

屋外用レーザー融雪装置を製作し、2022年3月18日に寒地土木研究所の石狩吹雪実験場でCO₂レーザー(ti100, SYNRAD社製)による融雪試験を実施した。上述したよ

うにレーザーの利点は指向性がよく、遠くまで伝搬が可能な点である。一方で、赤外レーザーは目に見えない不可視光であるがために、レンズ光学系を利用したとしても、レーザー光の制御は可視光のそれに比べて難しい。そこで、屋外用レーザー融雪装置に波長 $0.633\mu\text{m}$ のHe-Neレーザー（HNL050LB, Thorlabs社製）のガイド光をCO₂レーザー光と同軸に添付けた。He-Neレーザーは可視光（赤色）であり、CO₂レーザー光と同軸に装置から出射可能であるため、CO₂レーザーの光が不可視光であっても照射位置が目視で判断できるようになっている。ただし、距離が離れるにつれてガイド光も肉眼では視認できなくなる。そのため本研究では、100mを上限としてCO₂レーザーによる融解試験を実施した。

(2) 屋外用レーザーによる融雪の試験方法

屋外用レーザー融雪装置を高さ5mの仮設工に設置した（図-10）。CO₂レーザーの出力は100Wである。仮設工から徐々に距離を離し、100mまでの雪の融解状況について観察した。また積雪の表面に対して斜めに照射すると雪面の融解状況が分かりづらいので、木材（コンパネ合板）に雪をまぶしてCO₂レーザーをそこに照射した。木材に乗せた雪の厚さを予め計測しておき、照射後に完全に融解した時間と雪の体積を計測し、融解速度（cm³/s）とした。なお、試験当日の積雪表面の雪密度は約350kg/m³であった。

(3) 屋外用レーザーによる融雪結果

雪が融けた範囲を計測し、CO₂レーザー光強度を算出した。図-11に結果を示す。およそ距離5mであったレーザー光強度は、距離が離れるにつれて減衰し100mで約1.0W/cm²となった。これは、光学系の性質上、単にビーム径が徐々に拡大したことと、大気中の水蒸気がCO₂レーザー光を吸収したものと考えられる。

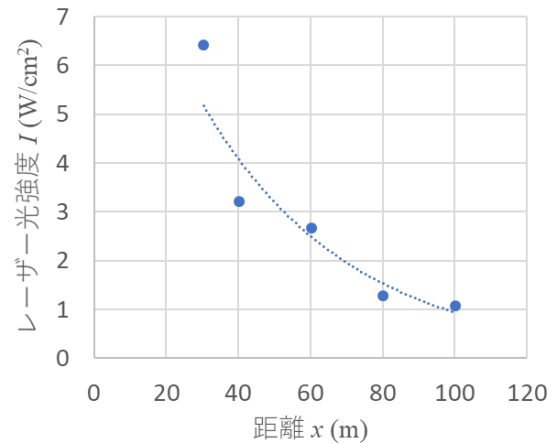


図-11 レーザー光強度と距離の関係

回歸線 $I = 10.9 \exp(-0.024x)$ (I: レーザー光強度、x: 距離)

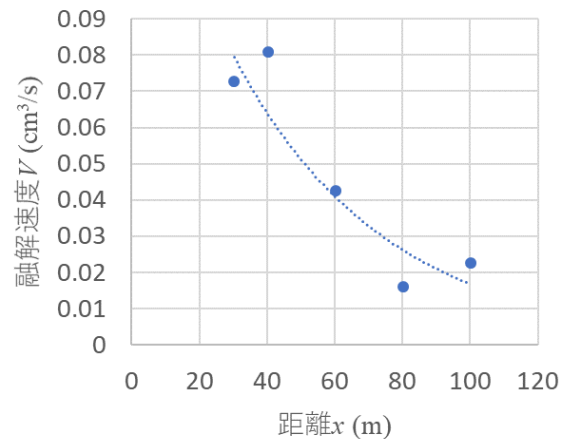


図-12 雪の融解速度と距離の関係

雪面の雪密度は346kg/m³である。

回歸線 $V = 0.16 \exp(-0.022x)$ (V: 融解速度、x: 距離)

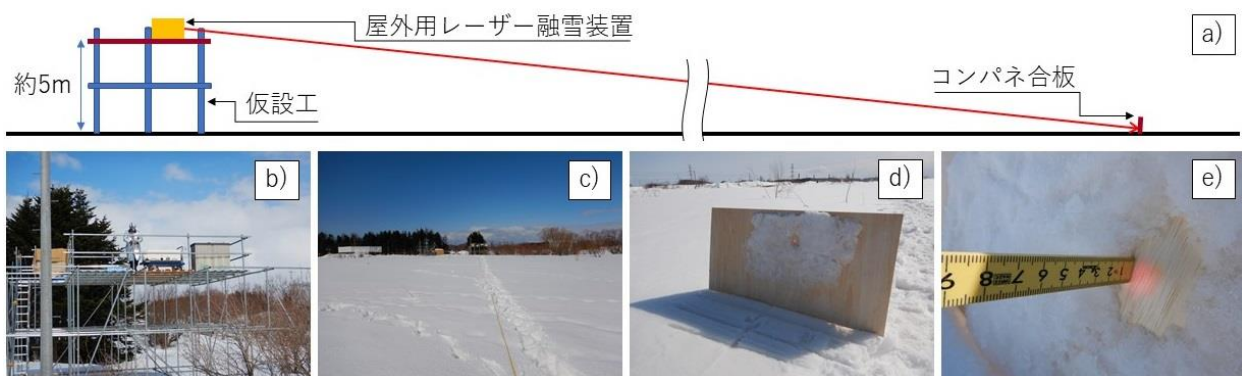


図-10 屋外用レーザー融雪装置による融雪試験の様子

a)試験方法の概要図、b)高さ約5mの仮設工に設置した屋外用レーザー融雪装置、c)およそ100m離れた箇所から撮影した仮設工、d)コンパネ合板に貼り付けた雪、e)レーザー照射後（赤色の点はHe-Neレーザー光（ガイド光））

※試験に利用したCO₂レーザーは波長 $10.6\mu\text{m}$ で最大出力100Wの光源である。人体の皮膚がレーザー光線に接触すると、火傷等を伴う危険性がある。そのため、本試験はb)に掲載した消防用の防火服、および保護メガネを着用して実施した。

次に、CO₂レーザー光を雪に照射し融解速度を計測した結果を図-12に示す。融解速度もレーザー光強度と同じように距離が離れるに従い減少したが、100 mでおおよそ0.01 ~ 0.02 cm³/sの融解速度であった。距離が離れるとレーザービーム径が拡大したこと、また水蒸気の影響によりレーザー光強度が減衰したことは否めないが、確かに100 m先においても雪が融けることを確認した。

本研究で試験したCO₂レーザーの最大出力は100 Wであった。実験結果から、このレーザー装置を用いる場合、例えば、雪の厚さ1 cm、雪密度約350 kg/cm³、面積1 cm²の雪を融かすために要する時間は、距離100 mで約60秒、距離30 mで約13秒となり、遠隔で雪を融かすことができると考えられる。速やかに道路インフラに着雪した雪を融かしたい場合、たとえば1 kWの高出力レーザーを照射すると距離100 mで約6秒、30 mで約1.3秒となる。より高出力レーザーを利用できれば速やかに融解することは可能であろうと思慮される。一方で、CO₂レーザーの光軸の調整は容易ではない。そのため、本技術の実際の利用方法としては、CO₂レーザーを道路インフラに常設し、対象物に照射し続けるという方法を構築し、また安全面からも十分な検討が行われた場合には利用価値は高いと考えられる。

5. まとめ

本稿では、レーザー光による氷の融解試験を室内で、雪の融解試験を屋外で実施した。室内実験では、3波長の赤外レーザーによる氷の融解試験の結果をとりまとめた。3波長を利用したレーザー光による氷の融解試験から、ほぼすべての波長における氷の融解速度に関わる係数を算出した。この係数から、近赤外から赤外 (1.0 μm ~ 100 μm) の波長帯域における氷の融解速度を見積もることが可能となった。特に3.0 μmと11 μm付近の光の波長が雪氷の融解には最も効果的であることを示した。屋外用レーザー融雪装置を製作し、波長10.6 μmのCO₂レーザーを雪に照射したところ、100 mでおおよそ0.018 cm³/sの融解速度であった。距離が離れるとレーザー光強度が減少することとなったが、距離100 m先においても確かに雪が融ける現象を確認した点については、本成果が世界初であることは添えておきたい。

謝辞：本研究の成果は、過去に実施した共同研究が基となっている。ご協力をいただいた大阪大学 時田茂樹 准教授 (現・京都大学 教授)、北見工業大学 古瀬裕章 准教授に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 日本雪氷学会編：新版 雪氷辞典, 古今書院, 2014
- 2) S.G. Warren and R.E. Brandt: Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation, *Journal of Geophysical Research*, 113, D14220, 2008
- 3) 日本建設機械化協会：2005除雪・防雪ハンドブック (除雪編), 2004年12月
- 4) 小松崎通雄, 池野正志, 坂東和郎：消雪パイプの50年にわたる技術の変遷に関する研究, 日本雪工学会誌, 27(2), 4-10, 2011
- 5) 金森英二, 梅田正浩：橋梁部材からの落雪対策, 第24回寒地技術シンポジウム, CTC08-II-014, 2008.
- 6) 布施浩司, 岳本秀人, 早坂保則：省エネルギー型ロードヒーティングの性能評価試験, 北海道開発土木研究所月報, No.594, 24-31, 2002
- 7) 佐藤圭輔, 後藤浩之：白鳥大橋の着雪対策について～安全で円滑な冬期交通の確保を目指して～, 第20回ふゆトピア研究発表会, 2008
- 8) 長澤輝, 四十谷朋子, 古澤立樹：遠赤外線融雪装置による崩落雪対策の運用効率化検証, ゆきみらい2018, 富山, 2018年2月8~9日
- 9) T.H. Maiman: Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187, pp.493-494, 1960.
- 10) 霜田光一：レーザー物理入門, 岩波書店, 1983.
- 11) 山中正宣：光励起気体レーザー —レーザー線の波長表—, レーザー研究, 第3巻 (第4号), pp.253-294, 1976.
- 12) C.K.N. Patel: Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂, *Physical Review*, 136(5A), pp.1187-1194, 1964.
- 13) 櫻井俊光, 古瀬裕章ら、着氷雪除去のためのレーザー光源の最適波長に関する研究、土木研究所、共同研究報告書、525, 1-10, 2021
- 14) 櫻井俊光：中赤外レーザーを用いた革新的氷床内部連続分析システムの基礎研究, 科学研究費助成事業, 挑戦的萌芽研究 (15K13605), 2015年度~2016年度, <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-15K13605/>
- 15) 荒見真一郎, 秦恵, 板谷安佐子, 山下智子, 蜂谷欽司, 鏝山宗利, 多田幹郎：長波長紫外光による酵母 *Saccharomyces cerevisiae* 細胞膜機能の損傷, 岡山大学農学部学術報告, 82, 1 - 7, 1993
- 16) Tokita, S., M. Hirokane, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, S. Sakabe, Stable 10W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88 μm, *Optics Letters*, 35, 3943-3945, 2010.