

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

共同研究報告書

令和 3年 3月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人北見工業大学

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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 共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地道路研究グループ 雪氷チーム

元・上席研究員 高橋 丞二^{※1}
主任研究員 松下 拓樹
研究員 櫻井 俊光
元・研究員 小中 隆範^{※2}

国立大学法人北見工業大学
地球環境工学科

准教授 古瀬 裕章

- ※1：現 北海道開発局事業振興部
※2：現 北海道開発局小樽開発建設部

要旨

レーザーは指向性が良く、遠くまで伝搬し対象物へ照射することが可能である。レーザーによる氷や雪の融解法は、冬期道路管理への活用が期待されている。本共同研究では、近赤外レーザーによる氷の融解実験を実施し、波長 $0.976\mu\text{m}$ の近赤外レーザー光を氷に照射すると氷が融解することを確認した。寒地土木研究所の研究（H29 年度～R4 年度）で実施している波長 $10.6\mu\text{m}$ の赤外レーザーおよび過年度に報告された中赤外レーザーによる氷の融解実験に加えて本共同研究で得られた結果から、最適な波長に関する検討をおこなった。その結果、波長 $10.6\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーが最適な光源の一つであることを確認した。他方、近赤外レーザーでは、氷の内部が融解する現象を確認した。内部融解を促進する場合には近赤外レーザーも有効かもしれないが、利用方法については検討する必要があると考えられる。

キーワード：レーザー融氷雪、氷の吸収係数、レーザーの波長、氷の融解速度

目 次

1. はじめに.....	1
2. レーザー融冰雪法.....	2
2.1 氷の物性.....	2
2.2 光の波長と氷の融解.....	2
2.3 レーザー融冰雪技術開発における冬期道路管理への活用の可能性.....	4
3. 近赤外レーザーによる氷の融解実験.....	4
3.1 レーザーの仕様と実験の様子.....	4
3.2 近赤外レーザーによる氷の融解実験の結果.....	5
3.2.1 半導体レーザー（波長 0.808 μm ）による氷の融解.....	5
3.2.2 半導体レーザー（波長 0.976 μm ）による氷の融解.....	6
4. 氷を融かすための最適な波長.....	8
5. まとめ.....	10

1. はじめに

(1) 目的

積雪寒冷地では、冬期間に案内標識、道路情報板、橋梁等に着氷雪が成長し、落雪による被害が発生している。落雪を防ぐための手間やコスト負担が大きいため、着氷雪防止や効果的な着氷雪除去技術の開発に対する社会的要請が大きい。しかし、レーザーを用いた雪氷融解に関する基礎研究はほとんどなく、寒地土木研究所寒地道路研究グループ雪氷チームで取り組んでいる CO₂ レーザー（波長 10.6μm）による氷の融解実験が、世界的にも新しい取り組みであると言って良い。さらに、CO₂ レーザー波長以外においても氷が融解する可能性があるため、CO₂ レーザー以外の可能性について検討する必要がある。本研究では国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と複数のレーザー光源を所有する国立大学法人北見工業大学が共同研究を実施し、近赤外レーザー光による氷の融解速度を明らかにすることを目的とし、氷を融かすための最適なレーザー波長について検討した。

(2) 研究の実施場所

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

国立大学法人北見工業大学 地球環境工学科

(3) 研究内容

- ・近赤外レーザーによる氷の融解実験
- ・氷を融かすための最適な波長について検討

(4) 参加者

共同研究者

機関名	所属名	氏名	役職名
寒地土木研究所	寒地道路研究グループ 雪氷チーム	高橋 丞二	上席研究員
		松下 拓樹	主任研究員
		櫻井 俊光	研究員
		小中 隆範	研究員
北見工業大学	地球環境工学科	古瀬 裕章	准教授

(5) 研究の実施期間

平成30年10月1日～令和2年3月31日

2. レーザー融冰雪法

2.1 氷の物性

一般的に、物質が固体から液体に変わる現象を融解といい、融解に必要な熱量を潜熱と言う。雪はミ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変化する場合の熱量であり、 H_2O 以外の不純物が混入していれば、それに応じて融かす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、すなわち密度で表現される。たとえば新雪は密度 $30\sim 150 \text{ kg/m}^3$ の範囲であり、氷は雪の通気性が失われる密度 820 kg/m^3 以上とされ、氷の内部から気泡が無くなると氷の密度は 0°C で 916.4 kg/m^3 となる¹⁾。すなわち、簡単には、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することが可能である。

光が物体に照射されるとエネルギーの保存則から主に、反射、透過、吸収の3つの現象を生じる。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に、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を氷が吸収できれば、光でも氷が融解する。ただし、光による融解法では、氷が吸収する波長を選定することが重要である。

2.2 光の波長と氷の融解

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

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

で表される。 I_0 は入射した光の強度、比例定数 α は吸収係数(長さの逆数の次元で通常 cm^{-1} で表現される)である。氷の吸収係数は光の波長毎に実験的に得られており(図1)²⁾、吸収係数が高いほど光を良く吸収する。たとえば可視光($0.35\sim 0.7\mu\text{m}$ 程度)の場合、図1から氷は波長の長い赤色の光ほど良く吸収し、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 $3\mu\text{m}$ 程度までは波長が長いほど吸収係数が高くなり、 $3\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ まではほぼ横ばいに見えるが、図1の縦軸は対数であることに注意されたい。

式1から、各波長における光の透過距離を計算することが可能である。図1の各波長の吸収係数を式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氷の透過距離が算出される(図2)。たとえば、可視光では青色に見える波長 $0.355\mu\text{m}$ においては吸収係数が非常に小さいので、厚さ 10m (10^3cm)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 $10.6\mu\text{m}$ 、 $2.85\mu\text{m}$ の光では 0.01cm の距離で全ての光が吸収される。波長 $0.976\mu\text{m}$ 、

0.808 μm はその間にある。ただし、実際の氷には気泡だけでなく、後述する氷の結晶粒界等も不純物として氷の内部に存在するため、この結果は計算上の検討にとどめておくこととしたい。

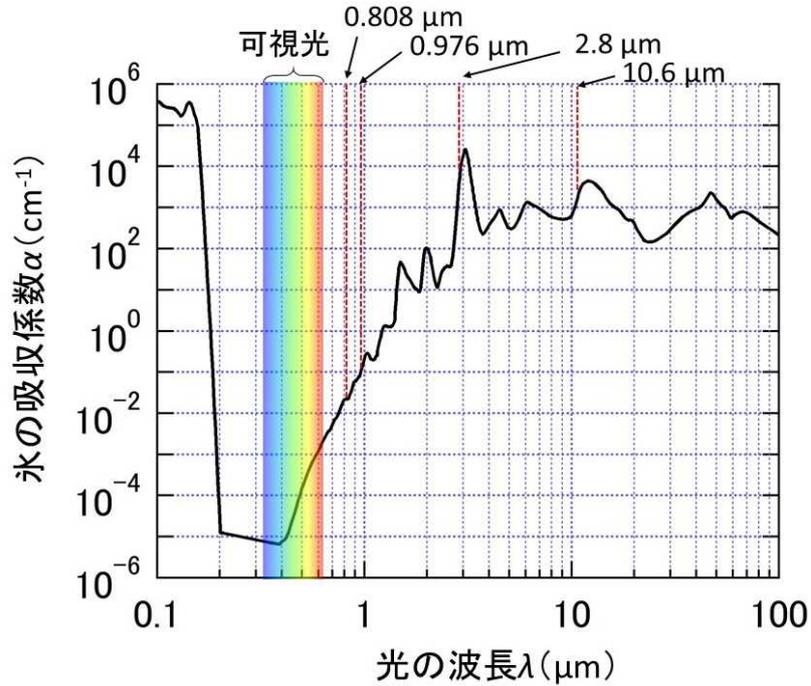


図1 光の波長と氷の吸収係数

氷の吸収係数は Warren and Brandt 2008²⁾の消衰係数 (Web 上に公開) から計算した値。

上部に記載した波長は本研究で利用したレーザーの波長である

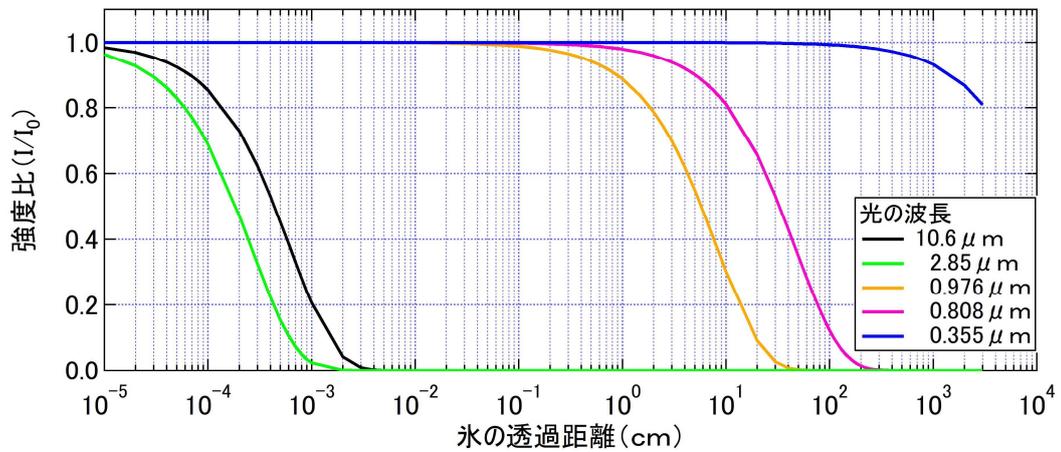


図2 各波長における光の強度比と透過距離の関係

2.3 レーザー融氷雪技術開発における冬期道路管理への活用の可能性

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⁾、ロードヒーティング⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾等がある。波長範囲の定義にもよるが遠赤外線は波長 $2\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ よりも長い波長で、この波長範囲の氷の吸収係数が高いことは図1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。

レーザーはランプ光源やLED等とは異なり、位相と波長が揃った光で指向性が良く、遠く離れた対象物に照射することが可能である。また集光性も良いため、狙った箇所にレンズ光学系等を利用し光の強さを調整することが容易である。たとえば、道路上から遠く離れた橋梁の上部構造や道路案内標識等の道路付属施設に着雪した雪を融解するためにレーザー光を制御するなど、目的に応じて調整が可能であるため、道路の除排雪支援や、雪崩の発生要因である雪庇や巻きだれ等処理することも可能になると想像される。

このように、レーザーによる氷の融解に関する技術開発は、北海道のような積雪寒冷地において毎年のように悩まされている雪氷に関係する多くの課題解決の一助になると期待される。

3. 近赤外レーザーによる氷の融解実験

3.1 レーザーの仕様と実験の様子

実験に使用したレーザー光源の仕様を表1にまとめた。本共同研究では、波長 $0.808\mu\text{m}$ と $0.976\mu\text{m}$ の近赤外レーザーによる氷の融解実験を行った。なお、中赤外レーザー(波長 $2.85\mu\text{m}$)による氷の融解実験については、過年度の共同研究⁸⁾で実施した。また CO_2 レーザー(波長 $10.6\mu\text{m}$)による氷の融解実験については過年度の研究⁹⁾で実施した。

表1 融氷雪に利用可能なレーザー光源の仕様

レーザー名	波長 (μm)	最大出力 (W)	ビーム径 (cm)	氷の吸収係数 (cm^{-1})
半導体レーザー (北見工業大学)	0.808	30.5	—	0.021
半導体レーザー (北見工業大学)	0.976	10.1	—	0.120
Er:ZBLAN ファイバーレーザー ⁸⁾ (大阪大学レーザー科学研究所)	2.85 (推定)	0.42	0.2 (平均)	3749.0
CO_2 レーザー ⁹⁾ (寒地土木研究所)	10.6	100	0.4	1582.6

図3に半導体レーザーの外観、図4に波長0.976 μm における氷融解の様子を示す。

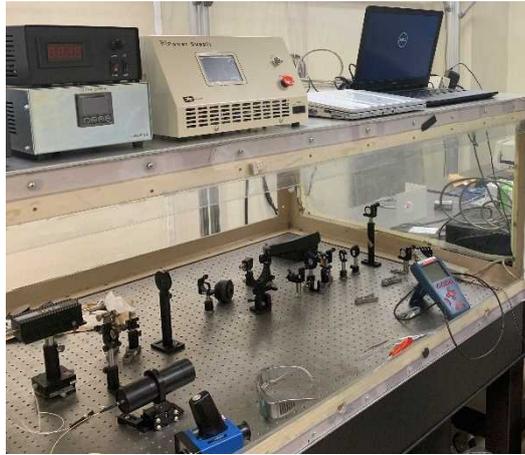


図3 半導体レーザー装置（波長0.808 μm 、波長0.976 μm ）



図4 半導体レーザー（波長0.976 μm ）による氷の融解（6.88Wのとき）

3.2 近赤外レーザーによる氷の融解実験の結果

レーザーを照射して氷が融解する速度を解析した。解析方法は、ビデオカメラを用いて氷体側面から観察し、融解により氷に穴が形成された長さから時間を求めた。

3.2.1 半導体レーザー（波長0.808 μm ）による氷の融解

図5に、波長0.808 μm の半導体レーザーを照射した結果を示す。出力は30.5Wである。照射直後に、氷内部に気泡や結晶粒界に沿って液滴等が出現し（領域A_a）、照射後80秒ほど経過した辺りから氷に穴が空き始めた（領域B_a）。その後、急激に融解水が流れ出てきたこと（排水）により穴の長さが長くなり（領域C_a）、その後は穏やかな融解がみられた（領域D_a）。融解速度の解析には、融解水の排水による影響が少ないと考えられる領域B_aの値（図5の赤線）が良いと考えられるが、非常に融解速度が遅く解析が容易ではないことから、波長0.808 μm におけるレーザー出力は最大値30.5Wのみ実施した。

波長 $0.808\mu\text{m}$ では、氷の吸収係数は 0.021cm^{-1} であり、他のレーザー光源に比べて緩やかに吸収するものと思慮される。融解に使われない透過した光が、照射された氷の表面よりもさらに氷内部に存在する気泡や結晶粒界等に照射され、排水などにより急激に融解する領域 C_a のような現象が引き起こされたものと考えられる。

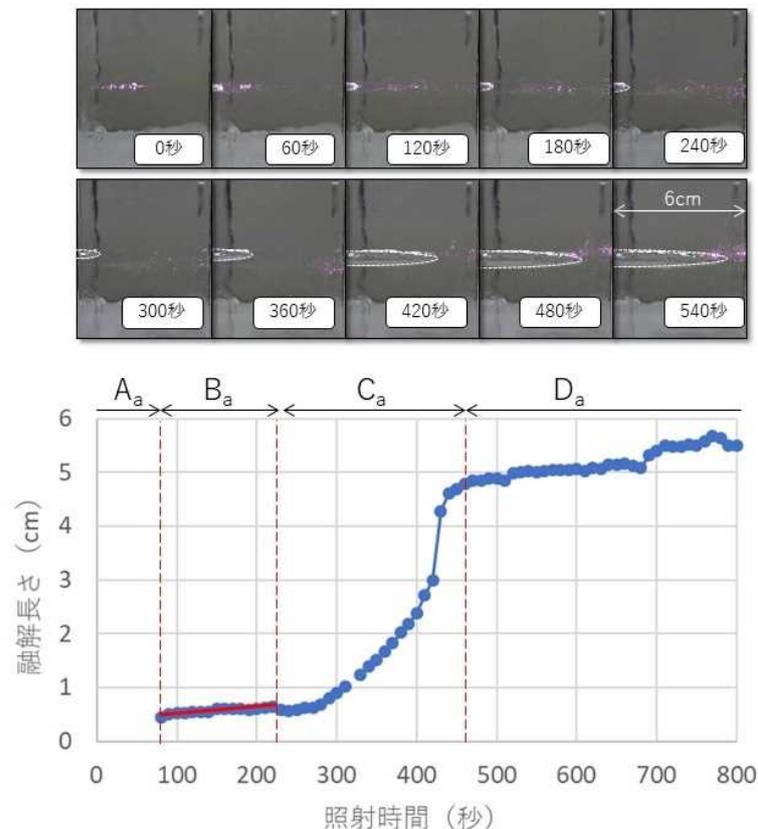


図5 半導体レーザー（波長 $0.808\mu\text{m}$ ）による氷の融解（出力：30.5W）

3.2.2 半導体レーザー（波長 $0.976\mu\text{m}$ ）による氷の融解

図6に、波長 $0.976\mu\text{m}$ の半導体レーザーを照射した結果を示す。出力は 10.1W である。波長 $0.808\mu\text{m}$ の半導体レーザーを照射した時と同様に、照射直後には氷内部に気泡や結晶粒界に沿って液滴等が出現し（領域 A_b ）、照射後60秒ほど経過した辺りから氷に穴が空き始めたが、融解速度は安定していない。その後、急激な融解は見られなかったが融解速度が安定した（領域 B_b ）。貫通する直前にはプロットの傾きが若干小さくなり比較的穏やかな融解がみられた（領域 C_b ）。融解速度の解析には、融解速度が安定した領域 B_b の値（図6の赤線）を用いた。

波長 $0.976\mu\text{m}$ では、氷の吸収係数は 0.120cm^{-1} であり、波長 $0.808\mu\text{m}$ の半導体レーザーよりも吸収しやすい波長であるが、過年度の実験（中赤外・赤外レーザー）に比べると緩やかに吸収するものと思慮される。波長 $0.808\mu\text{m}$ の半導体レーザーと同様に、融解に使われない透過した光の影響や穴からの排水により、領域 A_b で不安定な融解現象が見られたと考えられる。

波長 $0.976\mu\text{m}$ の半導体レーザー出力 $1.9\sim 10.1\text{W}$ までの融解速度を解析した結果を図7に示す。レーザー出力 W_b が大きいほど融解速度 V_b が大きくなる。なお、回帰線はレーザー出力が0のとき融解速度も0になるので原点を通る線形とした（ここで単位 sec は秒である）。

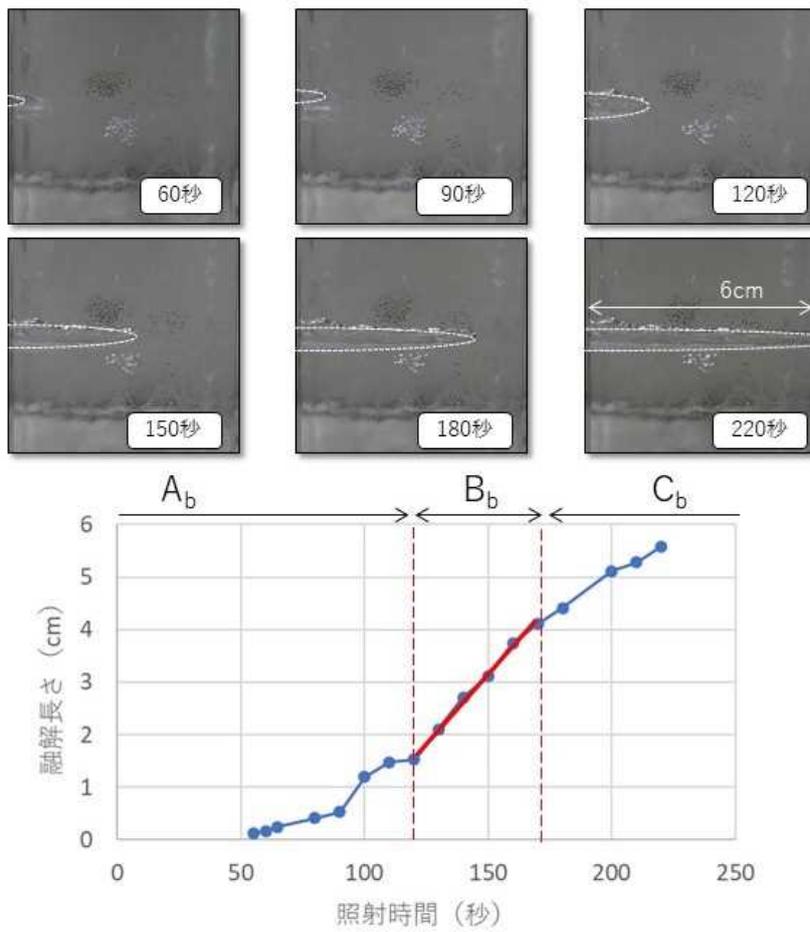


図6 半導体レーザー（波長 0.976 μ m）による氷の融解（出力：10.1W）

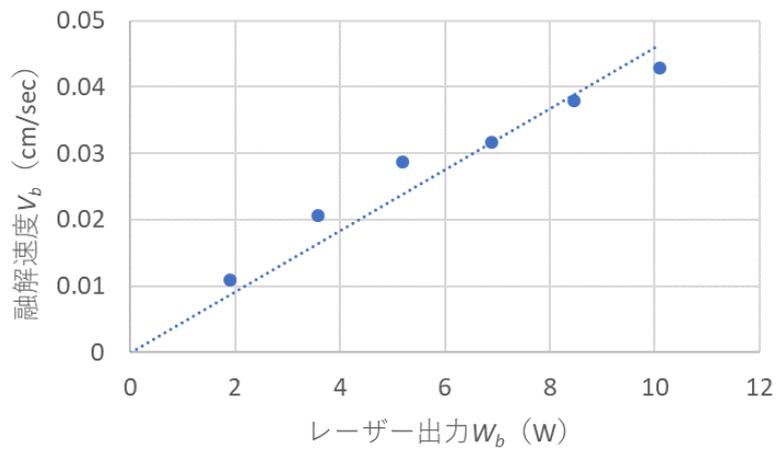


図7 半導体レーザー（波長 0.976 μ m）におけるレーザー出力と氷の融解速度の関係

回帰線： $V_b = 0.0046W_b$

4. 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 ）による氷の融解速度とレーザー出力の関係と、過年度に実施した中赤外レーザー（波長 2.85 μm ）⁸⁾および赤外レーザー（波長 10.6 μm ）^{9,10)}による氷の融解速度とレーザー出力の関係を精査した。レーザー出力と氷の融解速度の関係はそれぞれ、

$$V_b = 0.0046W_b \quad 2$$

$$V_c = 0.023W_c \quad 3$$

$$V_d = 0.013W_d \quad 4$$

である。ここで V と W は氷の融解速度(cm/sec)とレーザー出力(W)である。添字 b, c, d はそれぞれ波長 0.976、2.85、10.6 μm のレーザー光による値を示す。また、波長 0.808 μm の半導体レーザーにおける融解速度と出力の関係については、透過する光の割合が高く定量的な評価が難しいので本稿では除外する。式 2~4 の回帰係数 σ の単位は cm/sec/W であり、1W あたりの氷の融解速度を意味する。つまり、出力 1 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、近赤外レーザー（波長 0.976 μm ）、中赤外レーザー（2.85 μm ）、赤外レーザー（10.6 μm ）から得られた融解速度の式 2~4 における回帰係数 σ と吸収係数 α の関係を図示した。

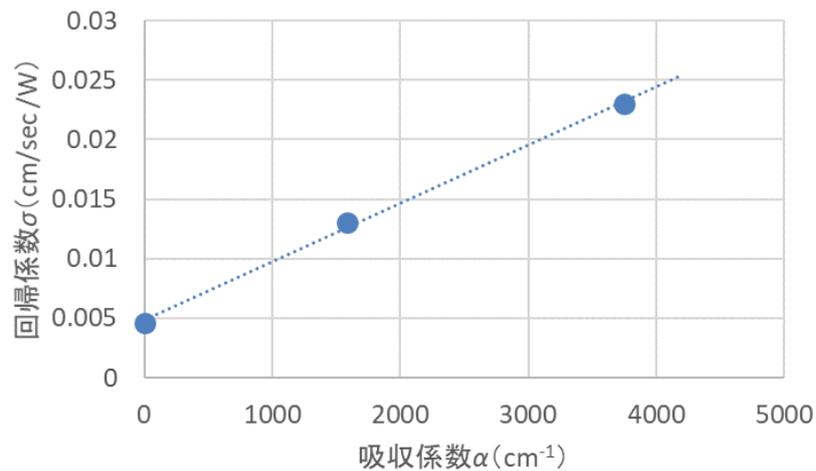


図 8 吸収係数と式 2~4 で得た回帰係数の関係

回帰係数 σ と吸収係数 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 4.88×10^{-6} 、 4.9×10^{-3} であった。また図 8 の回帰線は良い相関関係（統計的に有意な関係）にあることがわかる。一方、吸収係数が 0 に限りなく近くなれば氷は融解しないと考えられるが、本実験では図 8 の回帰直線（点線）の切片 B の値が 0 以上である。これは、実験に利用した氷体温度が完全には 0°C ではないことと、氷の内部に気泡や氷の結晶粒界が存在していることなどにより、融解速度に影響したと思慮される。

本実験で得られた式 5 の係数 A と B の値および吸収係数 α の値（図 1）から、ほぼすべての光の波長における回帰係数 σ を算出することができ、結果を図 9 に示した。ただし、図 9 では式 5 の定数 B が有限であるため、回帰係数 ($\sigma =$) 4.9×10^{-3} 以下の波長 ($0.185 \sim 0.98 \mu\text{m}$) は本研究では得られていない（図 9 の点線）。可視光の波長もそれに含まれる。

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 $1.5 \mu\text{m}$ 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、回帰係数は 0.005 cm/sec/W 程度となる。仮に、出力 1 kW のレーザー光を氷に照射したとき、氷の融解速度は 5.0 cm/sec となる。他方、紫外光（波長 $0.18 \mu\text{m}$ 以下）においても氷が融解することが図 9 から示され、回帰係数が 1 を大きく上回る波長が存在する。ただし、紫外光による細胞膜機能の損傷¹⁾が確認されており人体への影響が懸念されるため、紫外レーザーの利用には慎重を期するものである。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 ($1.5 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$) の波長帯域であると考えられ、特に $3.0 \mu\text{m}$ と $11 \mu\text{m}$ 付近が最も効果的であると思われる。よって、本研究で利用している波長 $10.6 \mu\text{m}$ の CO_2 レーザーは氷の融解に最適な波長の一つであると言える。

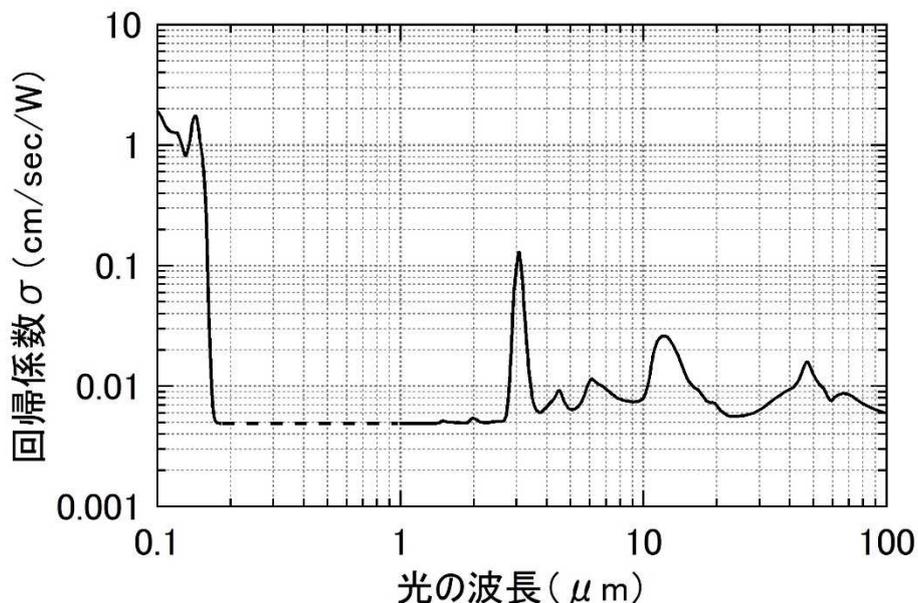


図 9 光の波長と回帰係数の関係

5. まとめ

本共同研究では、寒地土木研究所と北見工業大学が協力して近赤外レーザー光による氷の融解実験を実施した。吸収係数が比較的低い波長 $0.808\mu\text{m}$ のレーザー光を氷に照射すると、氷の内部融解が促進されたものの、レーザー照射による穴の形成については定量的な値は得られていない。一方、波長 $0.976\mu\text{m}$ のレーザー光を氷に照射し、レーザーの出力を変化させたところ、出力値に依存して氷の融解速度が高くなる様子が観察された。過年度に実施した中赤外・赤外レーザー光による氷の融解実験結果と合わせて精査することで、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することが可能となった。なお、近赤外レーザーの応用としては、たとえば内部融解を予め促進させる方法も考えられるが、利用法については検討が必要である。また紫外レーザーも氷の融解に利用できるものと思われるが人体への影響が懸念されることから、氷の融解には中赤外 ($3\mu\text{m}$ 程度) や赤外レーザー ($11\mu\text{m}$ 程度) が適した光源であると考えられる。

【参考資料】

- 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) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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/>
- 9) 櫻井俊光, 松下拓樹, 松島哲郎, 高橋丞二：赤外レーザー照射による着氷雪除去の可能性について,寒地土木研究所月報, No. 808, 45-50, 2020
- 10) T. Sakurai, H. Chosrowjan, T. Somekawa, M. Fujita, H. Motoyama, O. Watanabe, Y. Izawa: Studies of melting ice using CO₂ laser for ice drilling, *Cold Regions Science and Technology*, 121, 11 – 15, 2016
- 11) 荒見真一郎, 秦恵, 板谷安佐子, 山下智子, 蜂谷欽司, 鑛山宗利, 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

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.525 March 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所

寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046