

レーザーを用いた落氷雪事故防止技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 1

担当チーム：雪氷チーム

研究担当者：高橋丞二、松下拓樹、櫻井俊光

【要旨】

本研究では、道路構造物からの落雪を防ぐため道路構造物における落雪防止を目的として、1) レーザー表面加工法による着雪防止、2) 遠隔レーザー融解法による着氷雪処理について実施した。

1) 道路構造物に利用される亜鉛めっき鋼板に、特定の条件でレーザー処理を施し曝露試験を実施したところ、超親水性が付与され、未処理のものよりも着雪した雪の融解が促進されることを確認した。

2) 赤外 CO₂ レーザーを氷に照射すると氷が融解することを示した。また、レーザー照射範囲よりも広範囲で亜鉛めっき鋼板の温度が上昇する可能性を示し、CO₂ レーザーの照射で鋼板は損傷しないことを確認した。

キーワード：着氷雪、落雪防止、道路構造物、レーザー加工、レーザー融氷雪

1. はじめに

降雪が橋梁などの道路インフラ（道路付属施設を含む）に着雪し成長すると自重によって落下する。道路インフラからの落雪は、交通車両等の破損や視界阻害による事故を誘発する可能性がある¹⁾。着雪や落雪を防ぐための着氷雪除去は、主に人力で行われているうえ、高所作業が必要になる場合があるなど、作業の手間やコスト負担になる²⁾。このため、道路インフラへの落雪防止の開発に対する社会的要請は大きい。

落雪防止には、主に部材の構造を変える形状変更、部材の性質を変える性状変更等がある³⁾。形状変更については、傾斜板や山型屋根による着雪対策工等があり、着雪量や着雪している時間を低減する効果が確認されている⁴⁾。この方法により通行車両の被災リスクを軽減できると考えられるが、完全に着雪をなくすことは形状変更だけでは難しい。一方、性状変更の一つとして、生物模倣を利用した方法が近年注目されはじめている⁵⁾。またレーザーで氷が融解することが最近報告された⁷⁾。レーザーは指向性と集光性が高いため、遠く離れた着雪を処理することが可能と考えられる。

本研究は、レーザー表面加工法による着氷雪防止の基礎技術開発（2章）と、遠隔レーザー融解法による着氷雪処理の基礎技術開発（3章）から構成されており、道路インフラからの落氷雪による事故を未然に防ぐことを目的とした基礎的な研究である。

2. レーザー表面加工による着氷雪防止の基礎技術

生物模倣とは「自然に学ぶものづくり」と言われる⁸⁾。たとえば、「ひつつき虫」と言えば幼少時代を思い出す人もいると思われるが、「マジックテープ®」や「ベ

ルクロ®」と呼ばれる面状ファスナーは、ひつつき虫を模倣した技術として知られている。

数ある生物模倣技術の中で、落雪防止対策の性状変更においては、たとえば、蓮の葉のように水滴がコロコロと転がるような撥水表面⁹⁾、カタツムリの殻に水膜が形成されるような親水表面¹⁰⁾が該当する。超撥水コーティング膜による難着氷雪技術では、株式会社 NTT-AT による有機フッ素化合物系を利用した実験¹¹⁾がある。このようなコーティング剤が道路インフラにも実際に利用されているが、撥水性を維持するためには数年に一度程度の塗り替えが必要な場合が多い。また、微細な凹凸構造を有する超撥水表面では、水滴とは異なり、氷化や着氷除去作業などの過程で針のように鋭く上がった凸部が削られることで撥水性能が失われるため、耐久性の面で問題があると言われている¹²⁾。一方、氷の融点（0°C）近傍では、液滴が濡れ広がる超親水性が滑雪や着氷の剥離に効果的であると言われている¹³⁾。たとえば、海水飛沫による着氷の場合、超親水性シートの方が超撥水性シートよりも着氷が剥離しやすく、被害が及ばない程度の重量で落氷したとの試験結果がある¹⁴⁾。ただし、シートそのものの耐久性はわかっていない。撥水性材料も親水性材料も、道路インフラに利用するためには耐久性も兼ね備えた技術が要求される。

一方、超短パルスレーザー（パルス幅が 10⁻¹²~10⁻¹⁵ 秒と非常に短いレーザー）を金属や合金に照射し掃引すると、レーザー波長程度の微細周期構造（Laser induced periodic surface structures; LIPSS）が形成され¹⁵⁾、表面構造や環境によって超撥水性¹⁶⁾あるいは超親水性¹⁷⁾が付与されることが知られている。しかし、道路イ

ンフラに利用される亜鉛めっき鋼板でも LIPSS が形成されるかどうか解っていない。また近年、酸化亜鉛に微細な凹凸構造を施し紫外線を照射すると、撥水性から超親水性へと性状が変化し、また近赤外を照射すると撥水性が戻るというユニークな研究結果が報告された¹⁸⁾。そこで本研究では、亜鉛めっき鋼板を対象として、LIPSS を利用した道路インフラにおける着雪防止技術を検討する。

ここで、一般的に表面における水滴の接触角 90° 以上で撥水性、 150° 以上で超撥水性、 90° 以下で親水性として表現される。超親水性については文献で異なるが、本稿では水滴の接触角 30° 以下を超親水性と表現する。

2.1 実験方法

供試体は、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ の溶融亜鉛めっき鋼板 (JIS G 3302) であり、高耐食性亜鉛めっき鋼板 (ZAM: 亜鉛 (Zn) に 6wt.% のアルミニウム (Al) と 3wt.% のマグネシウム (Mg) が含まれる) と、亜鉛めっき鋼板 (ZA: Zn に 2wt.% の Al が含まれる) を用いた。ZAM と ZA の亜鉛めっき最小付着量は 3 点平均でそれぞれ 290 、 275g/m^2 であり、亜鉛合金の密度 6.6g/cm^3 とすると、それぞれ 44 、 $42\mu\text{m}$ の厚さで表面に亜鉛が覆われている計算となる。

超短パルスレーザーは Solstice Ace (Spectra-Physics 社製) であり、波長、パルス幅、繰り返し周波数、パルスエネルギーはそれぞれ 800nm 、 100fs 、 1kHz 、 5mJ である。本装置は $1\mu\text{m}$ から照射位置を調整可能な XYZ ステージを擁しており、パルスレーザー光をミラーで加工ステージまで導き、供試体には焦点距離 $f=150\text{mm}$ の凸レンズで照射・掃引 (以下、レーザー処理とする) した。一般的に照射されるパルスレーザーの単位面積あたりのエネルギーとして、レーザーフルエンス (J/cm^2) が用いられる (あるいは単にフルエンスともいう)。ここでは 1 パルスのレーザー照射後に形成された痕 (加工痕) よりレーザーフルエンスを算出した。レーザーフルエンス、挿引速度を変えてレーザー処理を実施した。レーザー処理後に、走査電子顕微鏡 (SEM、Keyence VE-9800) で表面を観察し、走査電子顕微鏡エネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDS、JEOL JSM-7200F & JED-2300) で供試体表面の元素分析を行った。また、供試体表面に $2\sim 10\mu\text{L}$ の水滴を載せ、接触角計 (協和界面科学社製、DMc-200) で水滴の接触角を計測した。分野によっては塩水や油による評価も実施されているが、ここでの接触角は、水滴の接触角とする。なお、SEM および SEM-EDS 分析と接触角の計測に用いた試験供試体のサイズは $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 3.2\text{mm}$ で、

レーザー処理面のサイズは $5\text{mm}\times 10\text{mm}$ である。

冬期の曝露試験は、寒地土木研究所石狩吹雪実験場 (北海道石狩市) で行った。地上からの高さ 3m に、試験供試体を勾配 60° で方位はほぼ西向きに取り付けた。試験供試体のサイズは $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 3.2\text{mm}$ で、レーザー処理面のサイズは $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ である。曝露した時期は 2018 年 2 月～3 月である。着雪と落雪の状況の観察にはタイムラプスカメラ (撮影間隔: 1分) を利用した。なお、気温は実験場から約 2.8km の位置にある気象庁アメダス (石狩) を参照した。

2.2 結果と考察

2.2.1 レーザーフルエンスと接触角

図 1 に、レーザーフルエンスを変えたときの試験供試体表面と液滴の接触角の関係を示す。なお、挿引速度は 2.0mm/s である。

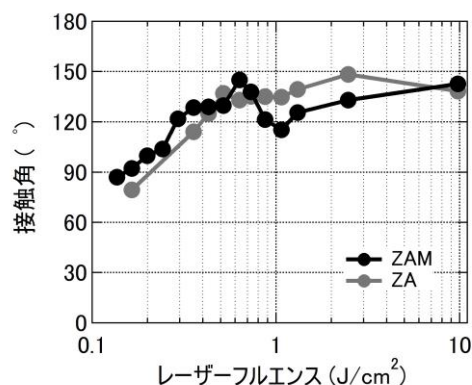


図 1 レーザーフルエンスと接触角の関係。
試験供試体は ZAM と ZA

レーザーフルエンスが低いときは、水滴の接触角が 90° 以下であり、レーザーフルエンスが高くなるほど水滴の接触角が高くなる。特に ZAM においては 0.7J/cm^2 で接触角が 150° 程であり、超撥水に近い値となった。ZA においても 0.7J/cm^2 付近で高い接触角を示した。一方、レーザーフルエンスが 1.0J/cm^2 あたりで ZAM 表面の水滴の接触角が低くなり、レーザーフルエンスが 9.8J/cm^2 になると、水滴の接触角が 150° に近づく傾向にある。レーザーフルエンスを変えると水滴の接触角が突然低くなったり高くなったりする現象はレーザー処理を施したステンレスで確認されており、レーザーフルエンスに依存して 2 重、3 重に凹凸構造がステンレス表面に出現するためと言われている¹⁹⁾。ZAM および ZA についても同様に、表面の性状がレーザーフルエンスで異なるものと考えられる。

図 2 に、レーザーフルエンス毎に撮影した ZAM の SEM 画像を示す。 0.5J/cm^2 以下のフルエンスまでは表

面に $1\mu\text{m}$ 以下の LIPSS が形成された。 $0.6, 0.7\text{J}/\text{cm}^2$ のフルエンスでは、LIPSS と数十マイクロメートルサイズの凸構造（以下、アイランド構造とする）が確認された。 $1.0\text{J}/\text{cm}^2$ 以上になるとアイランド構造が形成されなくなり LIPSS も不明瞭となった。水滴の接触角が低くなった原因の一つと考えられる。 $1.9\text{J}/\text{cm}^2$ 以上ではより表面が荒い構造となり、さらに $9.8\text{J}/\text{cm}^2$ では大きな窪みが形成された。より大きな窪みが形成されたことが水滴の接触角が高くなった原因と思われるが、大きな窪みが均一ではないことは留意したい。このように、レーザーフルエンスを変えると表面の構造に変化がみられ、それに伴い接触角も変化したものと考えられる。

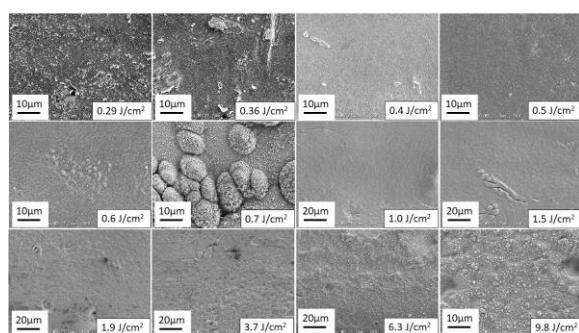


図2 レーザーフルエンス毎のZAM表面におけるSEM画像

次に、レーザーフルエンスを一定 ($0.7\text{J}/\text{cm}^2$) にして挿引速度を変化させて水滴の接触角を計測し、SEMでZAMとZAの表面を観察した(図3)。挿引速度を変えてもフルエンス $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ では、水滴の接触角に大きな変化はないが、挿引速度が遅いほど水滴の接触角が高い傾向にある。ただし、 $1.0\text{mm}/\text{s}$ 以下になるとアイランド構造が崩れた。また挿引速度が $10.0\text{mm}/\text{s}$ 以上になるとアイランド構造は出現せず LIPSS だけが形成された。アイランド構造を活かすのであれば、 $2.0\text{mm}/\text{s}$ が最適な挿引速度である。

既往研究では、凹凸構造の中に細かい凹凸構造、その中にさらに細かい凹凸構造・・・と続くフラクタル構造が、高い超撥水性を付与するとされている^{20,21)}。そこで以降では、フラクタル構造に近い構造を形成したフルエンス $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ 、挿引速度 $2.0\text{mm}/\text{s}$ の加工条件に着目する。

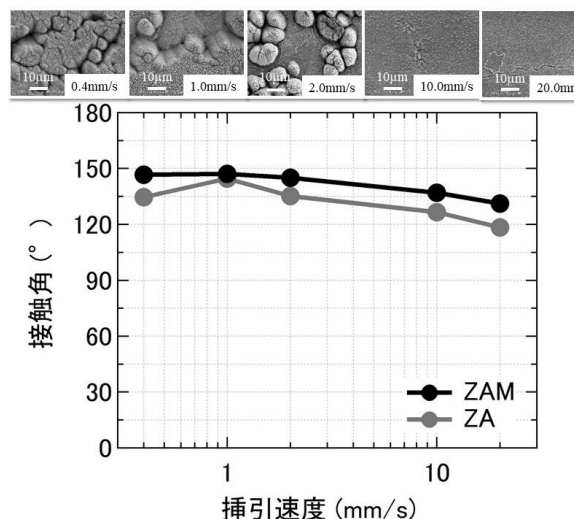


図3 挿引速度と接触角の関係。試験供試体はZAMとZA。上部画像は挿引速度毎のZAMにおけるSEM画像

2.2.2 レーザー処理後のSEM-EDS分析

図4に、レーザー処理前と処理後のZAMとZA表面のSEM画像を示す。レーザー処理前のZAMとZA表面における接触角は 90° 以下であるため、親水性であることがわかる(図4a₁, b₁)。ただし、レーザー処理前のZAMとZAは購入したままの状態であるため、スクラッチやホコリなどが存在している。よって、この接触角は完全な平面の亜鉛めっき鋼板における値ではないことは添えておきたい。

上述したように、レーザー処理条件はレーザーフルエンス $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ 、挿引速度 $2.0\text{mm}/\text{s}$ である。ZAMだけでなくZA表面にもLIPSSとアイランド構造が確認された(図4a₂, b₂)。また、LIPSSはアイランド構造表面にも形成されていることを確認した。

図5に、レーザー処理後のSEM画像(二次電子像)と元素マッピング分析結果のうち亜鉛(Zn)の強度分布を示す。Znは、LIPSSだけでなくアイランド構造にも広く分布しており、また掲載は割愛するが酸素(O)も広く分布していることから、レーザー処理後の表面はZnOであると考えられる。また、アイランド構造ではZnの濃度が比較的low(図5a₂とb₂で、Znの強度が小さい)、アイランド構造にはAlや他の元素が含まれているものと推察される。レーザー処理を施したZAMとZAの供試体において、アイランド構造が形成された領域とそうでない領域が存在することについて考察する。熔融亜鉛の製造工程において、熔融亜鉛が冷やされ結晶化するときに数十ミクロンのAl初晶が形成される²²⁾。Al初晶は数十ミクロンの大きさであり、

その周りに Zn と Al の共晶を形成する。超短パルスレーザーを集光し照射すると瞬間的に温度が上昇し、Al よりも融点の低い Zn が最初に蒸発（より正しくはアブレーション）する。Al 初晶は蒸発せずに残り、結果的に表面が凸のアイランド構造を形成したと考えられる。つまり、アイランド構造は Al 初晶が基になっていると考えられる。

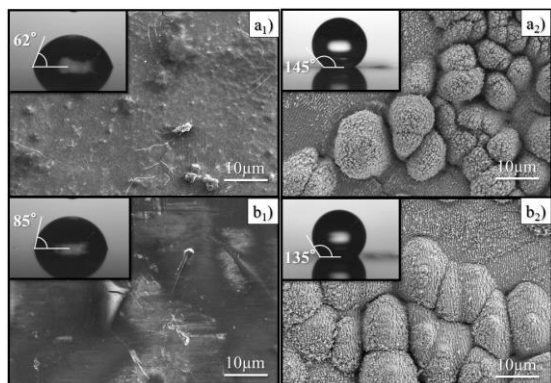


図4 超短パルスレーザーで処理を施した a)ZAM と b)ZA 表面における SEM 画像と接触角.

添え字 1 : 未処理、添え字 2 : レーザー処理後

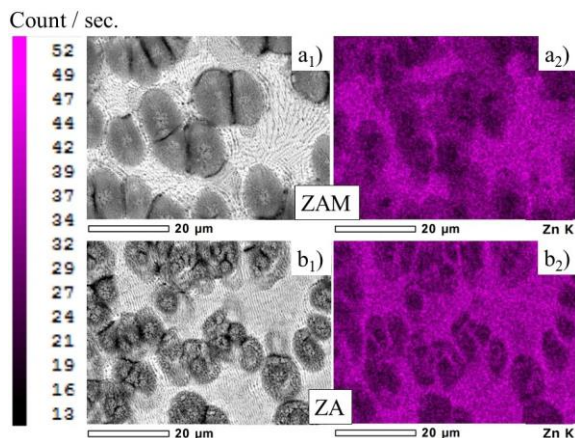


図5 レーザー処理後における a)ZAM、b)ZA 表面の元素分析結果. 添え字 1 : 二次電子像、添え字 2 : Zn(K 線)の強度分布. 左側カウンターに Zn(K 線)の強度(1 秒間の電子線カウント数)を示す

2.2.3 レーザー処理を施した合金の摩擦係数

亜鉛めっきのような合金に超短パルスレーザーを照射すると、レーザーの照射条件に依存して、表面が凸あるいは凹の 2 種類の表面構造が形成されることが知られている²³⁾。また、氷に対しても摺動速度が遅いと、試験供試体の摩擦係数が高くなる傾向にあることが知られている²⁴⁾。つまり静摩擦の状態に近づく、凸構

造があることによる摩擦力がより強く働くことになる。

本研究の供試体でも、凸の表面構造が形成される場合には、試験供試体に載せた物体の摺動速度が低いと動摩擦係数が未処理の場合に比べて大きくなると考えられる。よって、本研究でレーザーフルエンス $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ 、挿引速度 $2.0\text{mm}/\text{s}$ の条件で作製した ZAM、ZA においても雪に対して摩擦力が高くなり、落雪しにくくなると予想される。

2.2.4 曝露試験

図 6 に、曝露試験前後における ZAM の接触角の計測画像を示す。室内実験における水滴の接触角では、レーザー処理を施した ZAM が撥水性を示した(図 6a)。ところが、曝露開始後、数日間は撥水性を維持したが、約 20 日後には超親水性へと変化した(図 6b)。既往研究では、紫外線照射により酸化亜鉛表面に水酸基が生成され、水と酸化亜鉛表面との親和性が高くなり、結果として超親水性へと性状が変化するとされている¹⁸⁾。レーザー処理を施した ZAM 表面の多くは酸化亜鉛(図 5)であると考えられることから、本曝露試験においても太陽光に含まれる紫外線により、レーザー処理を施した ZAM 表面と水との親和性が高くなり、結果的に撥水性から親水性へと性状が変化したと考えられる。なお、掲載はしていないが、ZA においても同様に曝露試験前後で撥水性から超親水性へと性状が変化した。さらに、曝露試験を開始してから 2 年以上が経過したが、ZAM 表面の超親水性が維持されていることを確認している。

図 7 に、供試体への着雪が確認された画像を示す。氷の融点より十分に低い気温の場合、たとえば 2018 年 2 月 22 日の例(図 7a)では、未処理の供試体から落雪が確認されたが、レーザー処理を施した ZAM と ZA の両供試体には着雪が持続し、さらに ZAM 表面では落雪することなく着雪の体積が徐々に減少する状況が確

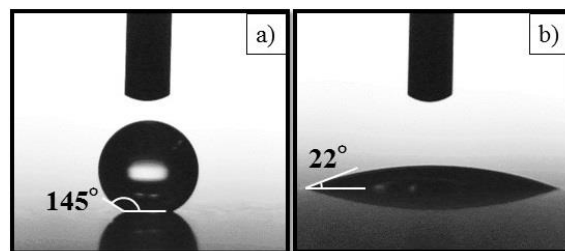


図6 接触角の計測結果

a)曝露試験前の ZAM 表面における接触角、b)約 20 日後の曝露後の ZAM 表面における接触角

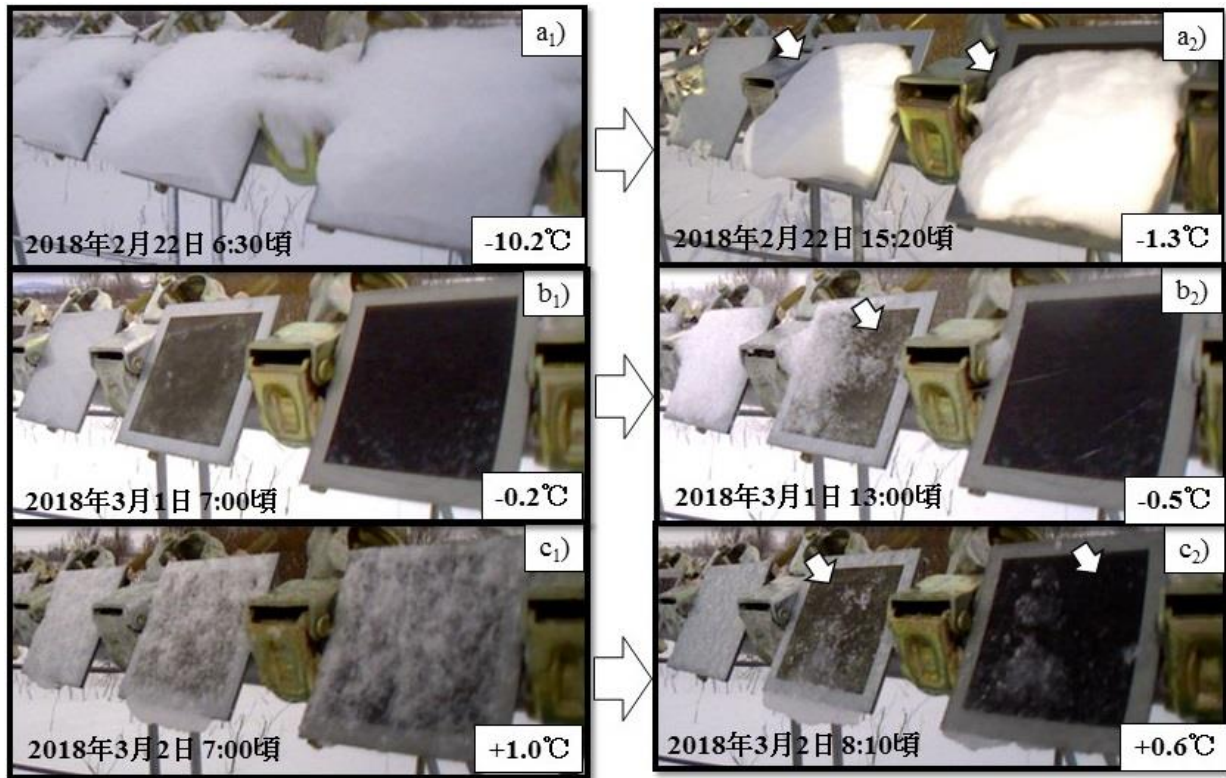


図7 曝露試験における着雪の様子。

a) 氷点下のとき、b) 氷の融点近傍（気温：マイナス）のとき、c) 氷の融点近傍（気温：プラス）のとき。
 供試体： 左から ZAM（未処理）、ZA（レーザー処理）、ZAM（レーザー処理）

認められた。氷の融点近傍（気温 0°C）の場合、たとえば 2018 年 3 月 1 日の例（図 7b）では、レーザー未処理の供試体よりもレーザー処理を施した供試体の方が早く雪が消失した。レーザー処理を施すことにより、昇華あるいは融解後の蒸発が促進された結果と考えられる。2018 年 3 月 2 日の例（図 7c）においても、レーザー処理を施した供試体では、着雪後に融解し蒸発が促進されて結果的に雪が消失した様子が観察された。

レーザー処理を施した亜鉛めっき表面には図 4 に示した LIPSS とアイランド構造がある。このため、先行研究²³⁾²⁴⁾と同じように捉えれば、LIPSS やアイランド構造による摩擦力が働き着雪が滑り落ちにくくなったと考えられる。

次に、レーザー処理を施した供試体の着雪が早く消失した理由を考察する。氷の融点近傍における雪は、水と氷と空気の複合体である。水の密度が氷の密度よりも高いので、部材と接触する雪の表面は水（水膜）と考えられる。水膜を通した蒸発を取り扱う際には、表面積が関係する。ここでは簡易的に水膜を含む雪が液滴のように濡れるものとして取り扱い、液滴の接触角と表面積の関係を見積もった。

部材表面に接触した液滴の体積および表面積は、

$$V = \frac{1}{6}\pi h(3r_1^2 + h^2) \quad (1)$$

$$S = \pi(r_1^2 + h^2) \quad (2)$$

で表される。図 8 に各変数の関係をまとめた。

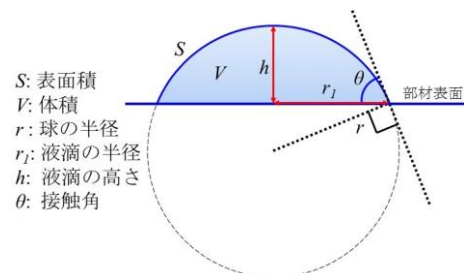


図8 液滴の表面積と接触角の関係

部材に接触した液滴の体積を一定 ($V=const.$) とし、部材の接触角 θ を 1~180°まで変数として与え、図 8 の関係と(1)式から変数 r_1 と h を求めて(2)式に代入すると、液滴と部材の接触角と液滴の表面積の関係が得ら

れる。ここで、接触角 90° のときに表面積が最小となるので、接触角 90° の表面積を 1 として規格化し、液滴の表面積比として表現した (図 9)。接触角 180° のときは、液滴の表面積は接触角 90° の 1.25 倍であるが、接触角が 1° に近づくほど液滴の表面積比は高くなる。つまり、同じ体積の液滴が部材に付着したとき、超親水性部材の方が十分に広い表面積を得る。

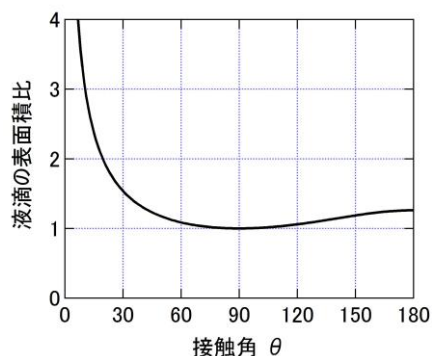


図 9 液滴の表面積比と接触角

曝露後、未処理の ZAM における接触角は平均 49° であり、レーザー処理を施した ZAM の接触角は平均 22° であった (図 6)。 49° と 22° の表面積比はそれぞれ 1.2 と 1.9 である。レーザー処理を施した ZAM 供試体では、水滴は未処理の ZAM に比べておよそ 1.6 倍の表面積をもつことになる。氷の融点近傍において、雪が融解し蒸発するときの熱流束 (単位面積当たりの熱量: W/cm^2) を考えると、表面積が大きいほど、すなわち接触角を可能な限り小さくするほど、より蒸発が早くなると考えられる。このことが、未処理の供試体に付着した雪よりも、レーザー処理を施した ZAM と ZA の着雪の方がより早く消失した理由の一つと考えられる。

2.2.5 レーザー表面加工法のまとめと今後の課題

着雪対策として、超撥水性材料が広く使われており、その効果も検証されている。一方、本研究では超親水性材料で雪 (液滴) の表面積を大きくすることにより、落雪対策として利用できる可能性があることが示された。ただし本稿は一例であり、着雪を保持可能な質量や着雪時における雪と亜鉛めっき表面の接触面積、着雪と表面の凹凸構造との関係解明など課題は多い。また、本稿で実施したレーザー掃引速度は 2.0 mm/s であり、 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ の面積を施すのに 16 時間を要しており、効率的に超親水性を付与する手法を見出すことが課題である。

3. 遠隔レーザー融解法による着氷雪処理の基礎技術

3.1 光による氷の融解

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)²⁵⁾ 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。

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²⁵⁾。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。

冬期道路管理において、道路構造物に付着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²⁶⁾。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²⁷⁾、ロードヒーティング²⁸⁾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²⁹⁾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²⁶⁾。

光 (電磁波) が物体に照射されるとエネルギーの保存則から、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。

光が物体 (ここでは氷とする) を通過するとき、光の強度は通過する距離と比例関係にある。その比例定数を吸収係数 (長さの逆数の次元で、通常 cm^{-1} で表現される) という。氷の吸収係数は光の波長毎に実験的に得られている (図 10)³⁰⁾。

氷は吸収係数が高いほど光を良く吸収する。可視光の場合、図 10 から氷は赤色ほど良く吸収し、青色は良く透過する。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。

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³¹⁾等がある。遠赤外線は波長 $2\sim 30\mu\text{m}$ 程度の範囲であり、氷が吸収する光の波長であることが図 10 からわかる。よって、遠赤外線を氷に照射す

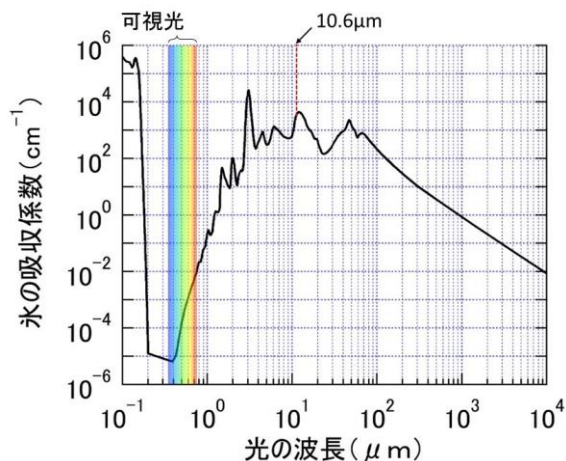


図 10 光の波長と氷の吸収係数

氷の吸収係数は Warren and Brandt 2008³⁰⁾の消衰係数 (Web 上に公開) から計算した値。波長 10.6μm は本研究で利用した CO₂ レーザーの波長

ることによって氷が融解することは想像に難くない。レーザーはランプ光源とは異なり、位相と波長が揃った光で指向性が良く、数十メートルから場合によっては百メートル以上先の対象物に照射することも可能である。また集光性も良いため、狙った箇所に光を集めて単位面積あたりの光の強さ(レーザー強度: W/cm²)をコントロールすることが可能である。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し、目的に応じて調整できると考えられる。さらに、融雪に効果的なレーザー出力や照射時間、照射可能距離が明らかになれば、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。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い。本研究では、まずレーザー光源を選定し、室内における氷の融解および道路付属施設等に利用される亜鉛めっき鋼板の損傷に関する実験を行い、遠隔レーザー融解法の実現可能性を検討する。

3.2 実験方法と結果

3.2.1 レーザー光源の選定

1960年にレーザーが発明³²⁾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³³⁾。図 10 に示した近赤外(波長 0.7~1.5μm)から中赤外域(波長 30 μm 程度まで)のレーザー光源も数多くある。なかでもガスレーザーは波長の種類が非常に多くある³⁴⁾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³⁵⁾様々な分野で応

用されている波長 10.6 μm の高出力 CO₂ レーザーを選定した。出力は最大 100W、出力形式は連続波発振(GEM-100A, Coherent Inc.)である。

3.2.2 氷のレーザー照射実験

室内実験では、市場で購入可能な無気泡氷を利用した。室内の温度は室温(20°C程度)であり、表面がわずかに融解したタイミングでレーザーを照射したので、氷の温度は 0°C であると考えられる。無気泡氷にレーザーを照射し、ビデオカメラで融解速度を算出した。図 11 にその結果の一例を示す。レーザーの出力は 10.5W、氷の厚さは約 4.8 cm で、29 秒で氷が融解してレーザーが貫通した。ビデオカメラ画像から 1 秒毎の融解距離を解析すると、図 12 に示すように経過時間との間に線形の関係が得られた。

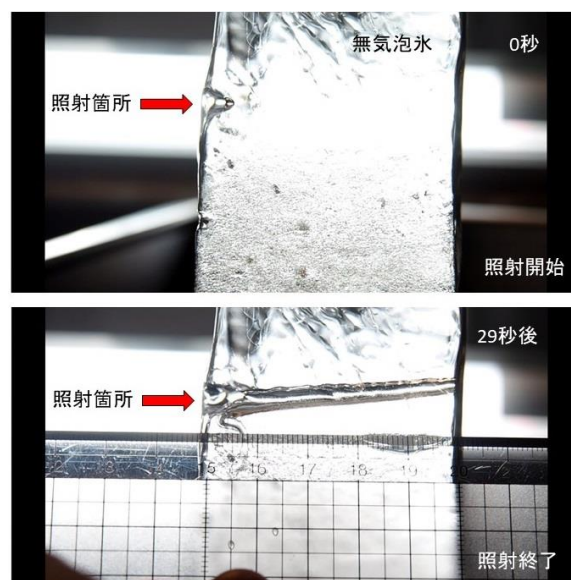


図 11 CO₂ レーザー照射開始(上)と照射終了(下) (レーザー出力 10.5W のとき)

図 12 の回帰直線の傾きから、融解速度は 0.147 cm/s となる。ここで図 12 をみると、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。そこで解析には照射箇所(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。

CO₂ レーザーの出力を変えて融解速度を解析した結果を図 13 に示す。レーザー出力毎に氷の融解速度にばらつきはあるものの、レーザー出力と融解速度は概ね線形の関係にある。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。図 13 の原点を通

傾きの最大値が氷 0°Cにおける融解速度とし、傾きを変えずに融解速度の最大と最小を破線で示すと、たとえばレーザー出力 60W のときの氷の融解速度は 0.7~1.0cm/s となる。なお、融解速度の最小は氷内部の温度上昇に利用される熱量が含まれると考えれば、理解しやすい。

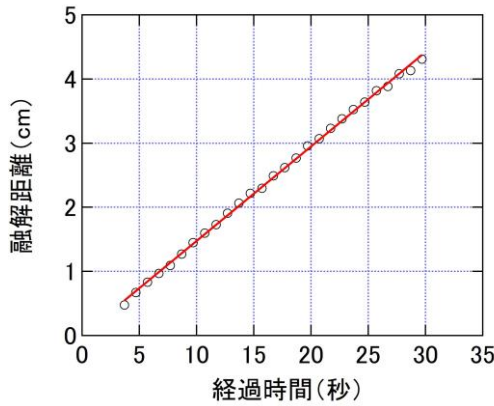


図 12 CO₂レーザー (10.5W) 照射時の融解距離と経過時間の関係. 回帰直線: $z = 0.1473t$ (z :融解距離(cm)、 t :経過時間(秒))

傾きの最大値から、レーザー出力が 100W のとき 1.6cm/s の速度で氷を融解することが可能であると推測される。また、本実験では氷を利用した実験であるが、新雪の融解速度は、新雪（ここでは 100kg/m³とする）と氷 (916.4kg/m³) の密度の違いから 100W で秒速 14.7cm の融解速度が期待される。

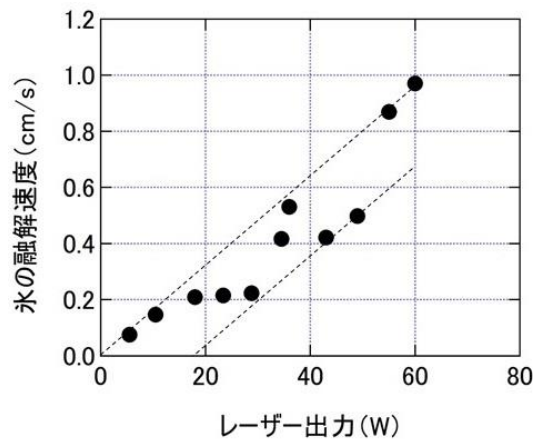


図 13 CO₂レーザー出力と氷の融解速度の関係. 回帰直線: $y = 0.016x$ (y :氷の融解速度(cm/s)、 x :レーザー出力(W))

3.2.3 亜鉛めっき鋼板へのレーザー照射と伝導融解 橋梁の上部構造や道路案内標識の梁材に利用される

亜鉛めっき鋼板(100mm×100mm×32mm厚)に CO₂レーザーをスポット径 φ10mm 程度で照射したところ、少なくとも 90W までは全く変化が見られなかった。

波長 10.6μm における亜鉛の吸収率は赤外吸収スペクトルからおおよそ 15%³⁶⁾、熱容量は 38 J/K³⁷⁾であり、これらの値を基にレーザー照射時における亜鉛の温度分布を数値的に計算することが可能である。

図 14 に、CO₂レーザー照射による亜鉛板の表面温度分布を熱流体シミュレーション (SOLIDWORKS Flow Simulation) で計算した結果を示す。

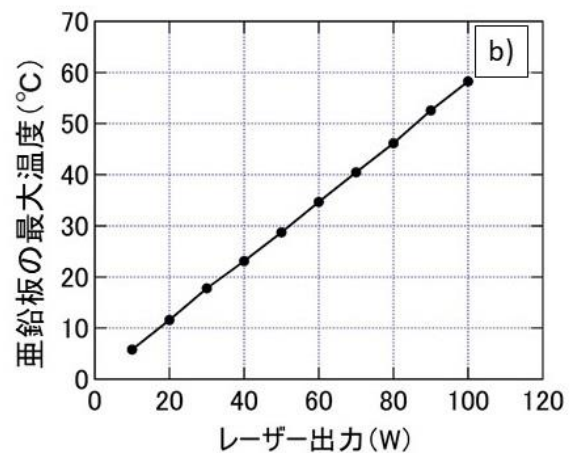
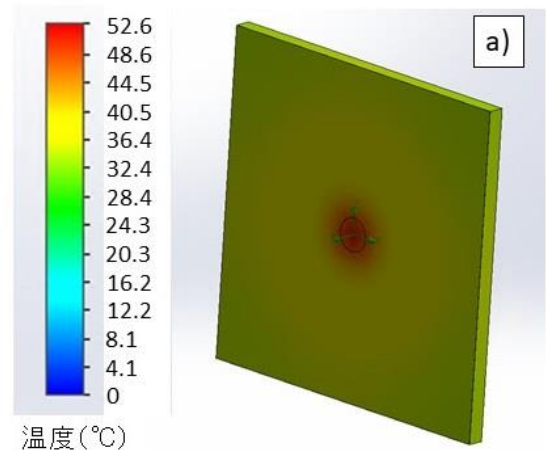


図 14 レーザー照射時における亜鉛の温度.

- a)レーザー出力 90W(φ10mm)時における表面温度分布、
- b)亜鉛の最大温度 (中心部) とレーザー出力の関係
回帰線: $T = 0.58P$ (T :亜鉛めっき鋼板の最大温度 (°C)、 P :レーザーパワー (W))

亜鉛めっき鋼板の表面は亜鉛で覆われているので、ここでは計算を簡単にするため亜鉛板として計算した。亜鉛板のサイズは、CO₂レーザー照射実験の亜鉛めっき鋼板と同じである。なお、スポット径 φ10mm で照射したものとし、環境温度は 0°C (273.15K) とした。

計算結果の一例を図 14a に示す。レーザー出力が

90W のとき、レーザースポットの中心の最大温度は+52.6°Cであった。端部の温度は+36°Cほどで、亜鉛板全体の温度が環境温度(0°C)よりも十分に高温となる。次に、レーザの出力を変えて最大温度を図示すると、最大温度とレーザ出力には、線形の関係にあることがわかる(図14b)。亜鉛の融点は419.5°Cである。図15bの帰線から亜鉛の融点に達するレーザ出力は100kW以上となることから、市場で購入可能なCO₂レーザ(<1kW)を照射しても、亜鉛めっき鋼板にはほとんど影響しないと考えられる。

図14aに示したように、亜鉛めっき鋼板の1点に照射しただけで表面全体の温度が0°C以上になれば、亜鉛めっき鋼板に着雪した雪を全体的に融かすことができると想像される。そこで、道路案内標識の梁材にCO₂レーザを照射することを想定し、梁材の温度分布を計算した。CO₂レーザ100Wを1cm²のスポットとして照射したとき、梁材表面の最大温度は+30°C程となった(図15)。

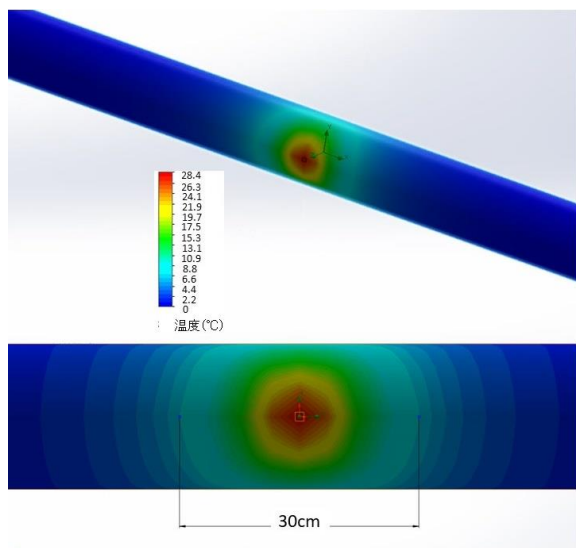


図15 CO₂レーザ100Wを照射した時の道路案内標識の梁材(亜鉛めっき鋼板)における温度分布(シミュレーションによる推定値)

また図から、直径30cm程度の範囲で+8°C程度の温度上昇が認められた。したがって、梁材に熱が伝導されることにより、照射されたレーザのスポット径よりも広い範囲で融雪が促進される可能性があることが示唆される。ただし、亜鉛めっき鋼板の温度上昇が着雪の融解に直接寄与するかどうかは、亜鉛と雪の熱の伝わり(熱伝達係数など)も考慮する必要があり、定量的な解析は今後の課題である。

3.3 遠隔レーザ融解法のまとめと今後の課題

CO₂レーザ(波長10.6μm)を氷に照射したとき、出力60Wで氷の融解速度は0.7~1.0cm/sであった。亜鉛めっき鋼板にCO₂レーザを照射したところ、現有のレーザ光源(出力90W)では鋼板は損傷しないことがわかった。また、熱流体シミュレーションによりレーザ照射スポットの範囲だけでなくより広範囲において熱が伝導し融解が促進することが期待された。ただし、本結果は定性的な結果であり、今後屋外試験等により定量的に確認する必要がある。なお、CO₂レーザの波長10.6μmの光は氷だけでなく水も吸収する。すなわち、人体の皮膚に含まれる水分も温度上昇させる働きがあるため、人体への影響(火傷等)については十分に注意して実施する必要がある。安全対策等についても今後の課題である。

参考文献

- 1) 小中隆範ら: 道路付属物からの落水雪による飛散状況とその影響について、寒地土木研究所月報, No.748, pp.32-37, 2015
- 2) 坂瀬修ら: 道路案内標識の冠雪対策による雪処理作業の軽減について、第55回北海道開発技術研究発表会, 2012
- 3) 松下拓樹: 道路案内標識の着雪・落雪対策について、寒地土木研究所月報, No.658, pp.45-48, 2008
- 4) 松下拓樹、坂瀬修、松澤勝: 道路案内標識の簡易着雪対策工の効果について、寒地土木研究所月報, No.691, pp.34-39, 2010
- 5) 松下拓樹、松澤勝、中村浩: 簡易対策工による道路案内標識への着雪時間減少効果について、寒地土木研究所月報, No.724, pp.43-49, 2013
- 6) Sojoudi H. et al.: Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces, *Soft Matter*, 12, pp.1938-1963, 2016
- 7) Sakurai, T. et al.: Studies of melting ice using CO₂ laser for ice drilling, *Cold Regions Science and Technology*, 121, 11-15, 2016
- 8) 下村政嗣: 生物の多様性に学ぶ新世代バイオメテック材料技術の新潮流, 科学技術動向 2010年5月号, pp.9-28, 2010
- 9) Barthlott W., & C. Neinhuis: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 202, pp.1-8, 1997
- 10) 井須紀文: カタツムリに学ぶ表面防汚技術, 溶接学会誌, 78, pp.187-190, 2009

- 11) Saito, H. *et al.*: Water- and ice-repellent coatings. *Surface Coatings International*, 80, pp.168–171, 1997
- 12) Kulinich, S.A. *et al.*: Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent? *Langmuir*, 27, pp.25-29, 2011
- 13) 吉田光則、吉田昌充、金野克美、染谷宏、森脇元宏: 着雪氷防止技術に関する研究 (第 4 報) — 滑雪塗料の開発とその評価について —、北海道立工業試験場報告、No.302, pp.87-91, 2003
- 14) Ozeki, T. *et al.*, Field observation of sea spray icing on lighthouses and ice adhesion test of superhydrophilic pliable sheet for deicing, *International Workshops on Atmospheric Icing of Structures XIII*, Andermatt, September 8 to 11, p.4, 2009
- 15) Birnbaum, M.: Semiconductor surface damage produced by ruby lasers, *Journal of Applied Physics*, 36, p.3688, 1965
- 16) Kietzig, A-M., *et al.*: Patterned superhydrophobic metallic surfaces, *Langmuir*, 25(8), pp.4821-4827, 2009
- 17) Kostal, E., S. Stroj, S. Kasemann, V. Matylitsky, M. Domke: Fabrication of Biomimetic Fog-collecting Superhydrophilic – Superhydrophobic Surface Micropatterns using Femtosecond Lasers, *Langmuir*, 34(9), pp.2933-2941, 2018.
- 18) Zhao, D., *et al.*: Near-infrared promoted wettability recovery of superhydrophilic ZnO, *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, pp.12745-12749, 2017
- 19) Moradi, S. *et al.*: Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: effects of laser parameters on superhydrophobicity, *Nanotechnology*, 24, p.415302, 2013
- 20) Onda, T. *et al.*: Super-water-repellent fractal surfaces, *Langmuir*, 12, pp.2025-2127, 1996
- 21) 辻井薫: 超撥水と超親水—その仕組みと応用—、米田出版、2009
- 22) A. Komatsu, N. Ymaki, A. Ando, Steel sheet hot dip coated with Zn-Al-Mg having high Al content, United States Patent, No.: US 6,709,770 B2, 2004.
- 23) 藤田雅之ら, フェムト秒レーザーを用いた Al-Si 合金の低摩擦化加工, レーザー研究, pp.341 – 344, 2014
- 24) Kietzig, A. *et al.*: Physics of ice friction, *Journal of Applied Physics – Applied Physics Reviews - Focused Review*, 107, p.081101, 2010
- 25) 日本雪氷学会編: 新版 雪氷辞典, 古今書院, 2014
- 26) 日本建設機械化協会: 除雪・防雪ハンドブック, 2005
- 27) 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), pp.4-10, 2011
- 28) 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, pp.24-31, 2002
- 29) 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
- 30) Warren, S., and R.E. Brandt: Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation, *Journal of Geophysical Research*, 113, D14220, 2008
- 31) 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
- 32) T.H. Maiman: Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187, pp.493-494, 1960
- 33) 霜田光一: レーザー物理入門、岩波書店、1983
- 34) 山中正宣: 光励起気体レーザー — レーザー線の波長表一、レーザー研究、第 3 巻 (第 4 号)、pp.253-294、1976
- 35) C.K.N. Patel: Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂, *Physical Review*, 136(5A), pp.1187-1194, 1964
- 36) 神森大彦, 山口直治, 佐藤公隆: 金属酸化物の赤外吸収スペクトル—赤外吸収スペクトルの鉄鋼研究への応用 (第 1 報) —、分析化学、pp.1050-1055、1967
- 37) R.A. Robie *et al.*: Heat capacities and entropies at 298.15 K of MgTiO₃ (geikielite), ZnO (zincite), and ZnCO₃ (smithsonite), *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 21(7), pp.743-749, 1989

FUNDAMENTAL STUDIES OF PREVENT ACCIDENTS RESULTING FROM SHEDDING OF SNOW AND ICE ON HIGHWAY FACILITIES, USING LASER TECHNIQUES

Research Period : FY2017-2019

Research Team : Cold-Region Road Engineering
Research Group (Snow and
Ice)

Author : TAKAHASHI Joji

MATSUSHITA Hiroki

SAKURAI Toshimitsu

Abstract : The shedding of snow and ice from highway structures, typically made of galvanized steels, affects traffic accidents. In order to prevent shedding of snow and ice from the highway structures, here we studied both 1) snow repellency of the galvanized steels after surface treatment with a femtosecond laser and 2) melting experiment of ice by CO₂ laser irradiance and the temperature increasing of the galvanized steels using a thermal fluid simulation. We found followings,

1) The laser-treatment using femtosecond laser cases the surface becoming superhydrophilic for at least 2 years after outdoor exposure, and snow disappeared from the surfaces but snow remained on the untreated galvanized steels. We argue that the superhydrophilicity of the laser-treated surfaces facilitates evaporation of the surface-warmed melt due to the larger melt-air interface area. We also found that the snow sticking on the surface due probably to a high friction. Both phenomena are effective at prevent shedding snow from the laser-treated surfaces of the galvanized steels.

2) A CO₂ laser can be used to melt ice. We use a CO₂ laser at 10.6 μ m, a wavelength at which ice strongly absorbs, to melt through ice. The resulting melting speed is measured at several irradiation laser powers. The speed increase nearly in proportion to the laser power. We also tested damages on the galvanized steels. The result suggests that the galvanized steel would not damage but increase in temperature of the galvanized steels wider area than the laser spot and the area may be effective for melting snow and ice.

Key words : shedding, snow and ice, prevention of accidents, laser treatment, laser melting