

レーザー加工による難着氷雪技術に関する研究

共同研究報告書

令和 5年 3月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
公益財団法人レーザー技術総合研究所

Copyright © (2023) 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。

レーザー加工による難着冰雪技術に関する研究 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	松澤	勝 ^{※1}
元上席研究員	高橋	丞二 ^{※2}
元上席研究員	萬	直樹 ^{※3}
上席研究員	西村	敦史
総括主任研究員	松下	拓樹
主任研究員	松島	哲郎
研究員	櫻井	俊光

公益財団法人レーザー技術総合研究所
レーザー計測研究チーム

主任研究員 染川 智弘

- ※ 1 : 現 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長
※ 2 : 現 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 審議役
※ 3 : 現 国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長

要旨

積雪寒冷地では、冬期間に案内標識、道路情報板、橋梁等に着冰雪が成長し、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、着冰雪防止や効果的な着冰雪除去技術の開発に対する社会的要請が大きい。本研究は、超短パルスレーザーを利用して道路構造物に利用される亜鉛めっき鋼板の表面を加工し、撥水性特性に最適な加工条件を明らかにすることを目的とする。利用した亜鉛めっき鋼板は、Zn に 6% の Al と 3% の Mg (マグネシウム) が含まれる高耐食性亜鉛めっき鋼板 (ZAM) と、Zn に 2% の Al が含まれる亜鉛めっき鋼板 (ZA) で、市場に流通されている溶融亜鉛めっき鋼板 (JIS G 3302) である。超短パルスレーザーを照射・掃引した結果、レーザーフルエンス 0.7J/cm²、掃引速度 2.0mm/s で ZAM と ZA 表面が撥水性となった。さらに暴露試験を実施した結果、撥水性から湿雪に効果的と言われる超親水性へと性状が変化した。また少なくとも 2 年 4 ヶ月は超親水性が維持されたことも分かった。

キーワード：超短パルスレーザー、加工条件、難着雪、LIPSS

目 次

1. はじめに	1
2. 研究背景	3
3. 既往研究と課題	3
4. レーザー処理による亜鉛めっき鋼板表面の構造と水の接触角	4
4.1 レーザー処理条件：掃引速度	5
4.2 レーザー処理条件：レーザーフルエンス	6
4.3 レーザー処理後における亜鉛めっき鋼板の表面状態	7
4.4 レーザー処理後の接触角の変化	8
4.5 レーザー処理後における水滴の接触角	9
5. 北海道石狩市で実施した暴露試験	10
6. おわりに	13

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。本研究は、超短パルスレーザーを利用して道路構造物に利用される亜鉛めっき鋼板の表面を加工し、撥水性特性に最適な加工条件を明らかにすることを目的とする。

(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
公益財団法人レーザー技術総合研究所

(3) 研究内容

- ・超短パルスレーザーの最適な加工条件
- ・暴露試験による難着雪評価

(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	松澤 勝	元上席研究員
		高橋 丞二	元上席研究員
		萬 直樹	元上席研究員
		西村 敦史	上席研究員
		松下 拓樹	総括主任研究員
		松島 哲郎	主任研究員
		櫻井 俊光	研究員
レーザー技術 総合研究所	レーザー計測 研究チーム	染川 智弘	主任研究員

(5) 実施体制と分担

研究項目	研究細目	研究の分担	
		寒地土木 研究所	レーザー技術 総合研究所
研究計画と実験準備	研究の計画立案	◎	○
	レーザー加工実験の計画立案	○	◎
	実験供試体の準備	◎	—
実験の実施	レーザーによる表面加工実験	○	◎
	撥水特性や雪氷との摩擦に関する実験	◎	—
効果的な難着冰雪技術 の検討	難着冰雪効果に関する分析	◎	○
	レーザー加工条件の検討	○	◎
とりまとめ	研究成果のとりまとめ	◎	◎

(6) 研究の実施期間

平成29年9月1日～令和3年3月31日

2. 研究背景

北海道などの積雪寒冷地における着雪による雪氷災害は、道路、送電線などのインフラや船舶、航空機、鉄道などの公共交通機関だけでなく住宅や都心部の高層建築物など、幅広い分野で問題となっており、各分野で着雪対策工法が検討されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。解決済みの課題もあるが、抜本的な解決に至っていない課題も多い。

雪が降ればアーチ橋等の道路構造物や道路案内標識等の道路附属施設に雪が付着し、雪が降り続くとその着雪は大きくなる。落下すると、道路を走行するドライバーの視界をさえぎることで事故を誘発したり通行車両を破損させたりする可能性がある。国土交通省や地方自治体の道路管理者はこの落雪被害を防ぐため、主に人力で着雪を除去しており、日々の安全・安心な冬期道路の確保に尽力しているところである（図1）。またこの作業は手間やコストの増加となる。これら要因のため、道路附属施設を含めた道路構造物への着雪対策工法に対する社会的要請は大きい。



図1 道路案内標識への着雪と着雪除去作業の様子

3. 既往研究と課題

着雪対策工法には、主に部材の構造を変える形状変更と部材の性質を変える性状変更等の方法がある⁽⁴⁾。形状変更については、傾斜板や山型屋根を道路附属施設に設置して雪が粗大になる前に落とすという対策工が提案されており、着雪量や着雪時間の低減に効果があることが確認されている⁽⁵⁾。しかし、この工法だけでは完全に着雪をなくすことは難しい。一方、性状変更の一つとして生物模倣技術を利用した着雪対策工法が近年注目されている⁽⁶⁾。なお、生物模倣は「自然に学ぶものづくり」と言われる⁽⁷⁾。着雪対策工法には「蓮の葉」のような超撥水表面⁽⁸⁾、「カタツムリ」の殻のような超親水表面⁽⁹⁾、あるいは「ウツボカズラ」の内壁のような撥液表面⁽¹⁰⁾などの生物模倣技術が該当する。これら生物模倣技術の詳細については上述に加え過

去の文献^(11~16)などを参照されたい。

道路インフラに対する性状変更による着雪対策工法には、超撥水コーティング膜に代表されるフッ素系化合物が使われることがある⁽¹⁷⁾。また、屋根雪などの対策には親水性と疎水性のハイブリッド素材が効果的であり、屋根に降り積もった積雪を滑りやすくする滑雪性を狙ったコーティング方法もある⁽¹⁸⁾。さらに沿岸の波しぶきによる着氷防止には親水性シートが試験される⁽¹⁹⁾など、難着氷雪対策に利用される工法は多岐にわたる。これら利用用途の違いは一般的に外気温で説明される。外気温が -2°C 以上であれば雪と部材の界面における含水率が高くなり濡れた雪(湿雪)として着雪し、外気温がそれ以下であれば雪と部材の界面における含水率が低くなり乾いた雪(乾雪)として着雪する。湿雪には親水性が効果的で、乾雪には撥水性(あるいは疎水性)が効果的と言われている^(20~23)。そのため、地域や設置箇所の特性に合わせて表面性状を勘案し、材料を選定することが望まれる。しかし、撥水性と親水性のどちらにおいても、着雪対策の効果を持続させるための耐久性と耐候性の問題が常に浮上する。道路インフラでは数年に1回の塗り替えが必要とされる場合は維持管理コストの負担となり、効果が長期に渡って持続する素材が求められている。そこで著者等は、塗り替え等のメンテナンスが不要な着雪対策工法を検討している。

道路インフラ、たとえば道路案内標識の梁材等には耐候性の高い亜鉛めっき鋼板(表面に Zn (亜鉛) と Al (アルミニウム) 等の亜鉛合金が塗布された鋼板) が利用されることが多い。一方、金属表面に超短パルスレーザーを照射・掃引すると表面にレーザー波長程度の微細周期構造(Laser induced periodic surface structures; LIPSS) が自発的に形成され^(24, 25)、場合により超撥水性が付与される^(26, 27)。また、微細な凹凸構造を有する酸化亜鉛表面に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、赤外線照射すると超親水性から撥水性へと性状が変化するというユニークな研究結果もある⁽²⁸⁾。

本書では、道路附属施設を含む道路構造物における着雪対策として利用することを念頭に、亜鉛めっき鋼板表面に超短パルスレーザーで LIPSS を施し、屋外暴露試験を実施した結果を報告する。

4. レーザー処理による亜鉛めっき鋼板表面の構造と水の接触角

超短パルスレーザー装置は 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 (フェムト秒)、1kHz、5mJ である。なお、パルスエネルギーは 2 枚の偏光板と波長板を用いて調光される。本装置は、 $1\mu\text{m}$ から調整可能な XYZ 加工ステージを擁しており焦点等を細かく調整することが可能である。レーザー光はミラー等で加工ステージまで導かれ、 $f150\text{mm}$ のレンズで金属板に照射される。また、金属板の加工痕よりレーザーフルエンス(単位面積・1 パルスあたりレーザーエネルギー)を算出している。単位は J/cm^2 である。

金属サンプルは、Zn に 6% の Al と 3% の Mg (マグネシウム) が含まれる高耐食性亜鉛めっき鋼板 (ZAM) と、Zn に 2% の Al が含まれる亜鉛めっき鋼板 (ZA) で、市場に流通されている溶融亜鉛めっき鋼板 (JIS G 3302) である。ZAM と ZA に付着する亜鉛めっき最小付着量は 3 点平均でそれぞれ 275 、 $290\text{g}/\text{m}^2$ であり、それぞれ 39 、 $41\mu\text{m}$ の厚さでめっきされている計算となる。なお、ステンレス (SUS304、以降 SUS とする) も比較のため利用した。レーザー

を照射しながら掃引（以下、レーザー処理とする）した後に電子顕微鏡（以降 SEM とする）（Keyence VE-9800）で表面を観察し、撥水性や親水性の濡れ性については接触角計（DMe-200、協和界面科学社製）を利用して評価した。液体は蒸留水を利用し、温度は室温（20～25℃）である。なお、本書では接触角 150° 以上を超撥水性、90～150° を撥水性、30～90° を親水性、30° 以下を超親水性として表現するが、超親水性については文献により表現が異なることに留意したい。

4.1 レーザー処理条件：掃引速度

図 2 に、超短パルスレーザーのレーザーフルエンスを 0.7J/cm² とし、ステージの掃引速度を 0.4mm/s から 20mm/s まで変化させ、SEM 画像で表面を接触角計で接触角を評価した結果を示す。サンプルは ZAM、ZA、SUS で、ZAM、ZA、SUS とともにレーザー処理前の接触角は 90° 以下である。

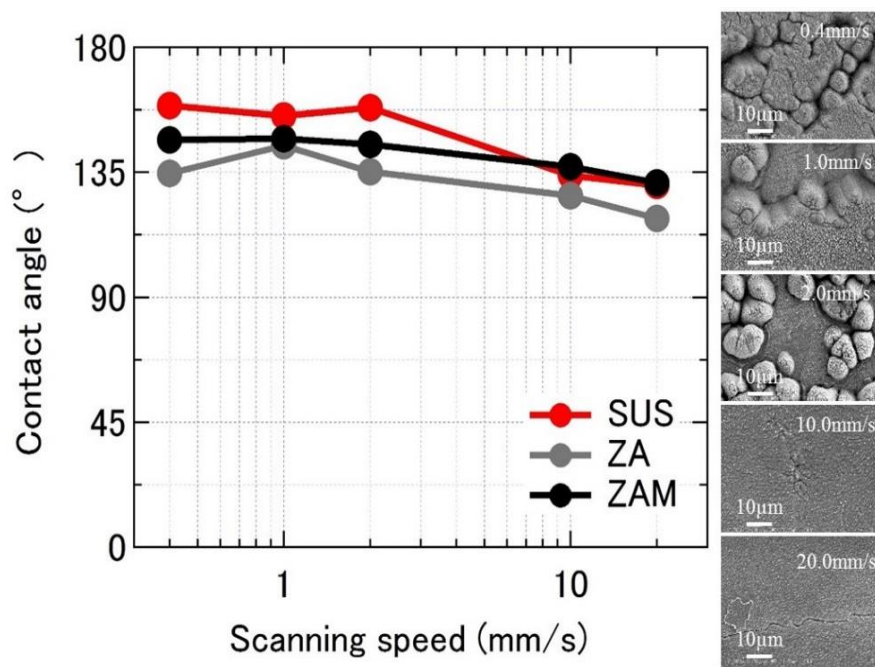


図 2 掃引速度を変化させたときの水の接触角
サンプルは ZAM、ZA、SUS で、SEM 画像は ZAM である

3つのサンプルにおいて接触角は掃引速度が速いほど低下する傾向にある。観測した ZAM の表面も掃引速度により異なり、掃引速度が 0.4～2.0 mm/s では ZAM 表面に大小の凹凸構造がみられ 10mm/s 以上になると凹凸構造はみられないが接触角が 90° 以上となった。蓮の葉効果から、表面の微細な凹凸構造が撥水性を付与させる⁽⁶⁾という点では、ZAM と ZA の表面の凹凸構造が撥水性を付与させたと思われたが、この点については後述する。ここで、掃引速度が遅いとサンプルを作成するまでの時間がかかるため、0.4～2.0 mm/s でほぼ同等の接触角であることから、以降では 2.0mm/s で実験を行うこととする。なお、2.0 mm/s 以下の掃引速度で SUS の接触角は 150° 以上であった。

4.2 レーザー処理条件：レーザーフルエンス

図3に、レーザーフルエンスを0.1~9.8 J/cm²まで変えたときの接触角を計測した結果を示す。ZAM、ZA、SUSともにレーザーフルエンスが高くなるほど接触角が大きくなる傾向にある。とくにZAMにおいては0.7 J/cm²で最も接触角が大きくなり接触角145°を示し、9.8 J/cm²で接触角140°程度であった。またSUSは0.6~0.8 J/cm²で最も接触角が大きくなり接触角は158°であった。

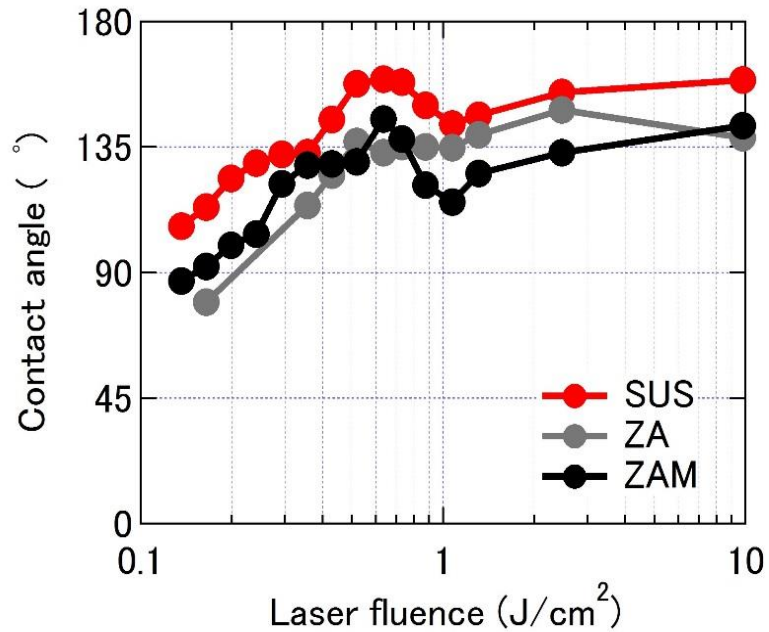


図3 レーザーフルエンスを変化させたときの水の接触角

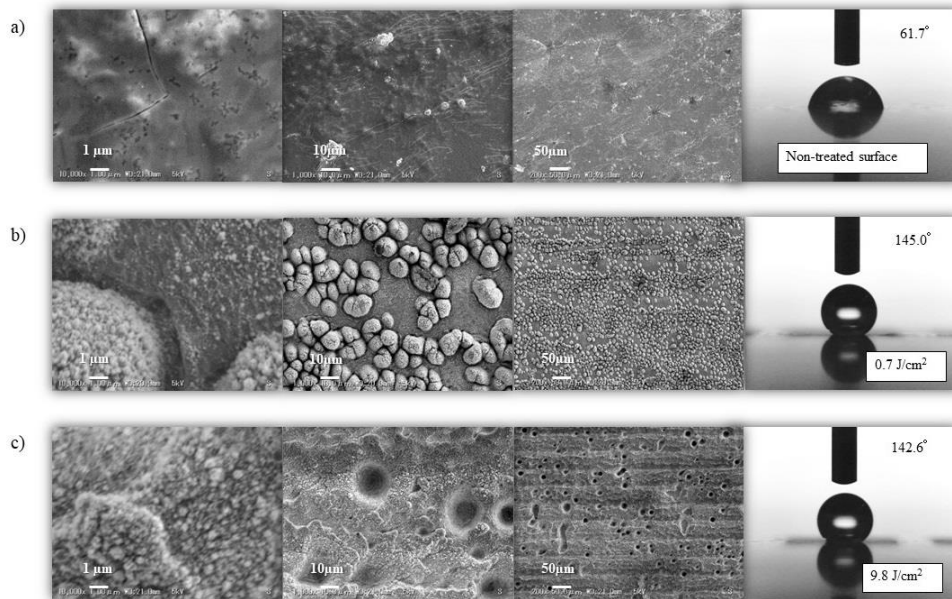


図4 レーザー未処理のZAM表面 a)と、b) 0.7 J/cm²、c) 9.8 J/cm²のレーザーフルエンスで処理したときのZAMのSEM画像
右写真はそれぞれの接触角の計測結果

図4に、レーザー未照射（図4a）、レーザーフルエンス0.7（図4b）、9.8J/cm²（図4c）でレーザー処理したSEM画像を示す。a)~c)の各3枚のSEM画像はそれぞれSEMの倍率が異なることに留意したい。SEMで拡大すると各掃引速度でサブミクロン（1μm以下）の凹凸構造が形成されている。9.8J/cm²では、ZAM表面に10μmサイズのディンプル状の凹みも形成されている。これが高い接触角を得た結果であると思われるが今後の詳細な解析が必要である。

4.3 レーザー処理後における亜鉛めっき鋼板の表面状態

0.7J/cm²でレーザー処理を施した後のZAM、ZA表面について詳しく述べる。図5にレーザー処理前後におけるZAMとZAのSEM画像を示す。レーザー処理前は前処理を行っていない購入時のままであるため表面にスクラッチ等がみられる。レーザー処理後のZAMとZAの表面には、数十マイクロメートルサイズの粗大な凹凸構造（以下、アイランド構造）と、表面を覆うLIPSSの2種類が存在する。LIPSSはレーザー波長程度の凹凸構造で、ZAMとZAの両方に形成されている。一方、アイランド構造には、形成された領域とそうでない領域がある。本研究で利用したZAMおよびZAは、元々熔融亜鉛から製造されており、熔融亜鉛の製造工程では亜鉛が冷やされ結晶化するとき数十ミクロンのアルミニウム初晶が形成されると言われている⁽²⁹⁾。初晶とアイランド構造の形状がよく似ていることから、アイランド構造はアルミニウム初晶が基盤となっているものと思慮される。またその表面にもLIPSSが施されている。

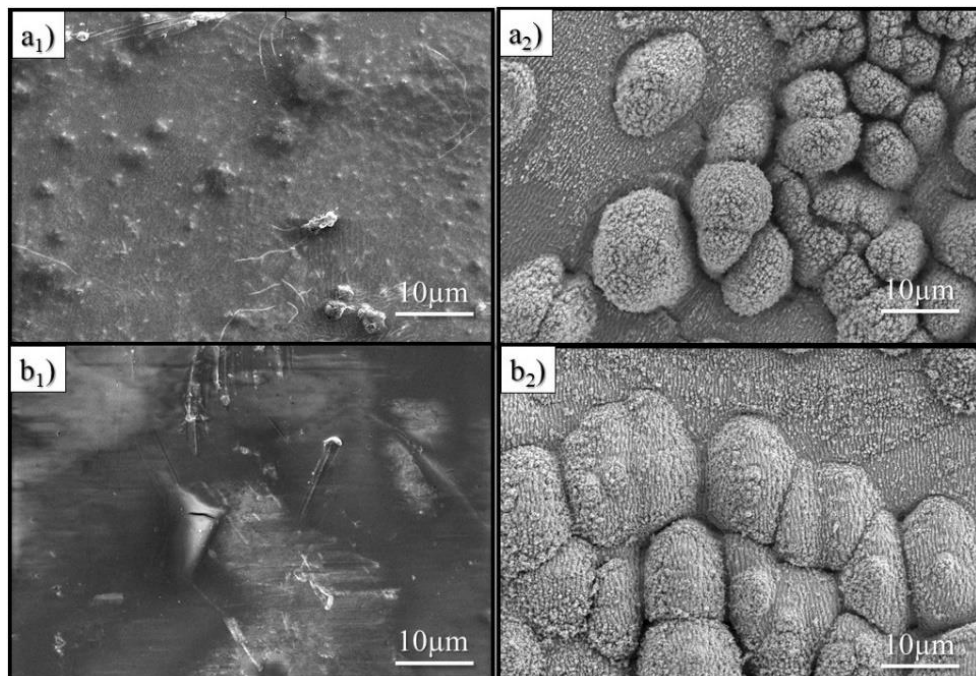


図5 レーザー処理前後におけるZAMとZA表面の電子顕微鏡画像
a1) レーザー未処理のZAM表面、a2)レーザー処理後のZAM表面、
b1)レーザー未処理のZA表面、b2)レーザー処理後のZA表面

図6に、SEM-EDS（エネルギー分散型X線分析装置）の結果を示す。SEM-EDSで元素分析を行った結果、LIPSSだけでなくアイランド構造にもZnが広く分布している。そのため、レーザー処理を施した後もZAMとZA表面には多くの亜鉛が存在するので、レーザー処理後の表面はほぼ亜鉛（あるいは酸化亜鉛）と考えられる。また、定性分析ではあるが亜鉛の濃度が比較的低いため、アイランド構造にはアルミニウムや他の元素が含まれているものと推察される。

以上から、 $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ でレーザー処理を施したZAMとZA表面はアイランド構造が形成され、アイランド構造の基板はアルミニウムの初晶であると考えられる。すなわち、 $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ のレーザーフルエンスは亜鉛が取り除かれやすいエネルギーであり、アルミニウムやマグネシウム等の元素は基板に残り、結果的にアイランド構造になったものと考えられる。言い換えれば、亜鉛めっき鋼板の表面にアイランド構造を作成するためには $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ は適したレーザーフルエンスである。

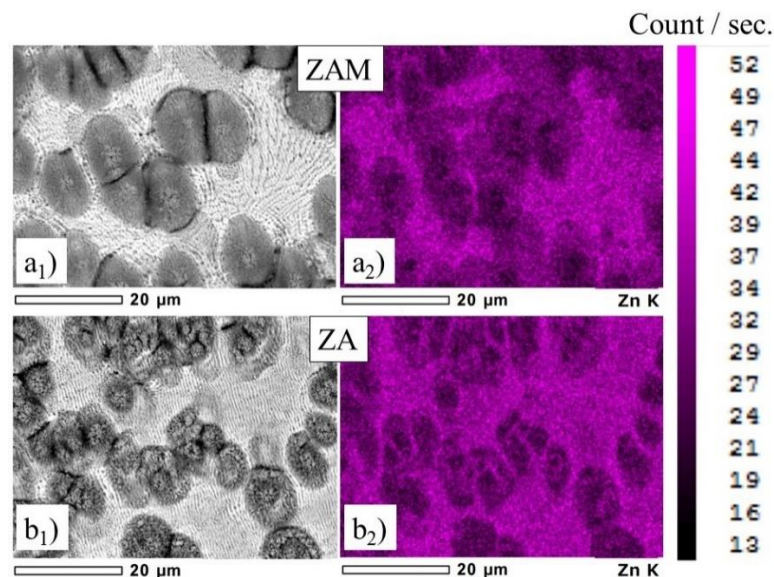


図6 レーザー処理後におけるZAM、ZA表面のSEM-EDS分析

a)ZAM、b)ZAであり、添字1は二次電子画像、添字2はZn(K線)分布である。なお図中右にあるコンターはK線の1秒間のカウント数である

4.4 レーザー処理後の接触角の変化

超短パルスレーザー処理を施した直後から接触角に変化が生じることが知られている⁽²⁷⁾。そこで本研究でもZAMとSUSについて接触角の時間変化について計測した。保管時は $+70^\circ\text{C}$ に設定したオープンの中に置いた。ZAMのレーザー出力は $0.2, 0.7, 9.8\text{J}/\text{cm}^2$ で、SUSは $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ である。図7に、結果を示す。レーザー処理から数日経過すると、すべてのサンプルにおいて接触角は比較的低い値であった。ZAMにおいては18日目まで接触角が上昇し、それ以降はほぼ変わることがなく、SUSにおいてはデータが少ないものの38日目には接触角 150° を超えた。ZAMとSUSともにそれ以降も計測しているが、接触角の値はほぼ同程度であった。以上から、少なくともレーザー処理を施してから60日以降に暴露実験等を実施することとした。

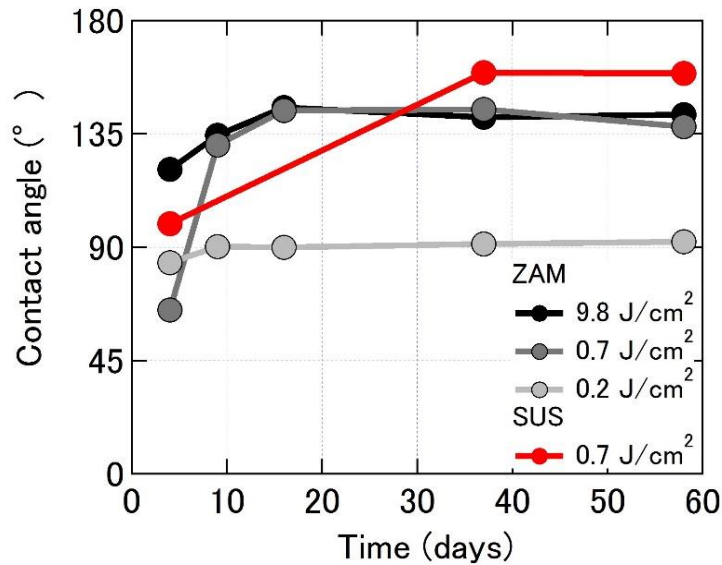


図7 レーザー処理後の接触角の時間変化

4.5 レーザー処理後における水滴の接触角

超短パルスレーザー処理により LIPSS が形成された金属表面は、蓮の葉のような微細な凹凸構造を模しており超撥水性が付与されることが期待され、2008 年頃から世界各国で研究が進められている(例えば、Zorba *et al.*, 2008⁽³⁰⁾)。金属はもともと親水性であることが多く、平衡状態 (Wenzel⁽³¹⁾の状態) では微細な凹凸があることで、その性状が強調されて超親水性になる。しかし、微細な凹凸に空気の層が存在し準安定状態 (Cassie-Baxter⁽³²⁾の状態) となれば超撥水性にもなり得る。その原理については多くの書籍や文献などに掲載されているため (例えば、辻井薫, 2009⁽³³⁾)、ここでは割愛する。

すでにいくつか上述しているが、レーザー処理後の ZAM に水滴を垂らし、接触角計で水平に置かれた ZAM 表面の水滴の接触角を計測すると接触角 145° を得る (図 8 a)。表面の濡れ性状の調査方法には転落角など動的な濡れ特性を調査する方法⁽³⁴⁾もある。転落角は水滴が滑り落ちる角度であるが、レーザー処理後の ZAM に水滴を垂らし、十分な時間が経過した後にステージを 90° 傾けても水滴が落ちることはなかった (図 8 b)。つまり、水平に置かれた表面では撥水性のように見え Cassie-Baxter 状態と期待された。しかし、転落角の調査から実際には水滴が ZAM 表面に張り付いていることから、水滴がコロコロと転がり落ちないのは液滴内部と ZAM 界面では親水性の状態 (Wenzel の状態) であるためと考えられる。

ここで若干の矛盾がみられる。図 8 a では接触角 145° であり撥水性と考えられたが、実際には内部に水が浸透し親水性であると考えられる。高い接触角が得られたのは、恐らく球体の水滴が ZAM から離れる部分で、コップの水が表面張力で溢れないのと同じように、ピン止め効果⁽³³⁾により、高い接触角を得たのだろうと推察される。

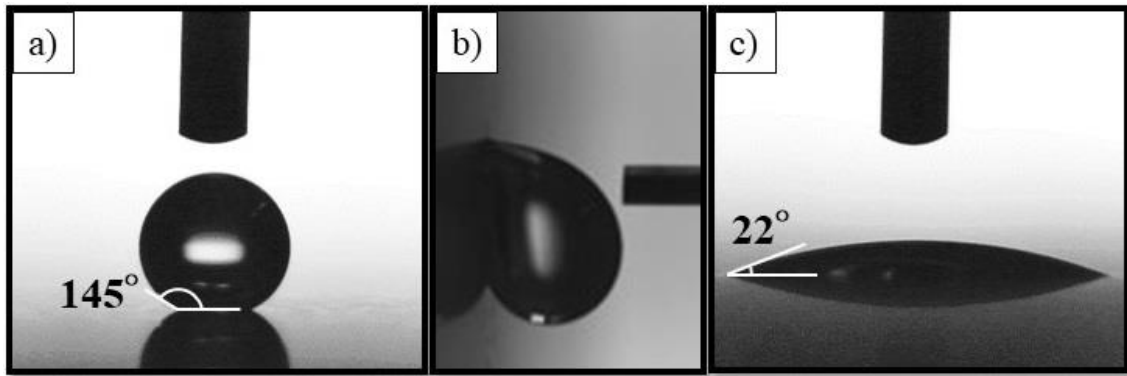


図8 レーザー処理を施した ZAM 表面における接触角

a) 暴露前 (水平)、b)暴露前 (垂直)、c)暴露後

これらはすべて同一表面に垂らした液滴の様子である

5. 北海道石狩市で実施した暴露試験

2018年2月から北海道石狩市における寒地土木研究所の石狩吹雪実験場で暴露試験を開始した(図9)。開始2週間を過ぎた頃に、レーザー処理後のZAMに水滴を垂らし接触角を計測すると、接触角 22° の超親水性へと性状が変化していることを確認した(図8c)。またZAにおいても同様の結果であり、超親水性へと性状が変化していた。先行研究では、酸化亜鉛に紫外線が照射されると酸化亜鉛表面に水酸基が生成され、撥水性から超親水性へと性状が変化することが報告されている⁽²⁸⁾。本研究においても、太陽光に含まれる紫外線によりレーザー処理後のZAMおよびZA表面に水酸基が生成されたとすれば、暴露後に超親水性へと変化したと理解することができる。

図9の暴露試験の様子について、水滴の接触角の測定後、2018年3月に改めて暴露試験を開始し、2020年7月に撮影した写真と比べると、未処理のZAM(Sample A)には雨粒が付着しているように見え、レーザー処理を施したZAM(Sample B)とZA(Sample C)には付着した雨粒が濡れ広がる様子が観察された。図9に示した写真では、未処理のZAM(Sample A)に雨粒が付着しているが、レーザー処理のZAM(Sample B)とZA(Sample C)には雨粒がみられない。雨粒が付着した直後に濡れ広がっているからである。以上から長期暴露の結果から、少なくとも2年4ヶ月間は超親水性が維持されていたといえる。

レーザー処理を施したZAMとZAの着雪および落雪の状況をタイムラプスカメラ(Brinno, BCC100)で定期的に撮影した結果を図10に示す。この図から、未処理のZAM(Sample A)に比べて、レーザー処理したZAMとZA(Sample B,C)への着雪が少ないことが分かる。また、氷の融点近傍では、レーザー未処理のZAM(Sample A)よりもレーザー処理を施したZAMとZA(Sample B,C)の方が早く雪が消失する現象を捉えた。近隣の気象庁AMeDASの気温について精査した。また石狩吹雪実験場に設置した寒地土木研究所所有の微量な降水量も計測可能なDFIR(Double fence intercomparison reference、二重柵基準降水量計)⁽³⁵⁾による降水量についても精査した。その結果、着雪した雪は -2°C 以上の降雪であることが想像されるが、マイナスの気温にもかかわらずレーザー処理後のZAMとZAにおいて着雪が消失している。

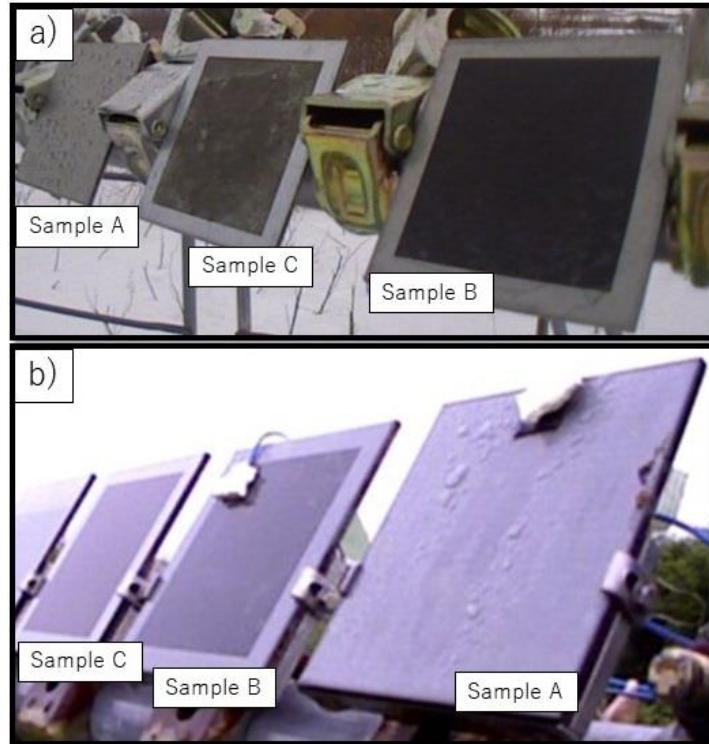


図9 暴露試験の様子

a)2018年3月9日、b)2020年7月24日。Sample A：レーザー未処理のZAM、Sample B：レーザー処理後のZAM、Sample C：レーザー処理後のZA

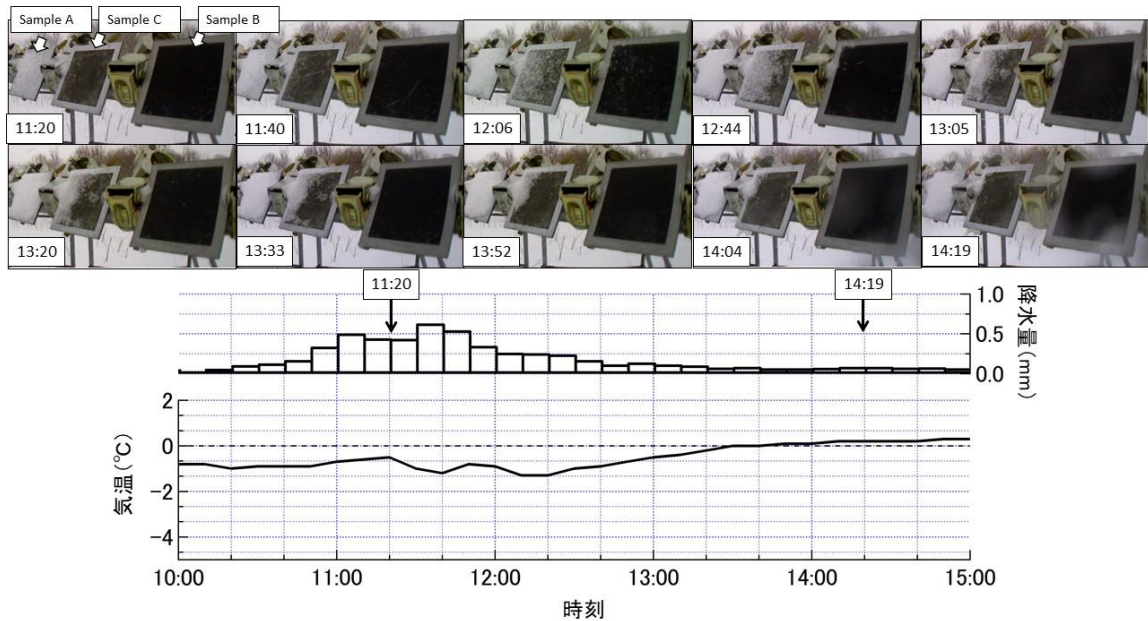


図10 暴露試験における着雪の様子と気象条件（降水量と気温）

Sample A：レーザー未処理のZAM、Sample B:レーザー処理を施したZAM、Sample C:レーザー処理を施したZA

この原因として、レーザー処理を施した ZAM と ZA の表面は黒く見え、光を吸収する特性があるように思われる。表面温度を計測したところ、レーザー未処理のサンプルよりもレーザー処理を施したサンプルの方が太陽光の影響で最大+2°C程度高いことも確認した。この昇温効果によって着雪の融解が促進し融解水が濡れ広がることで雪が消失したように見えたと考えられる。以上のように、レーザー処理を施した ZAM や ZA は、未処理の ZAM に比べて着雪量が少なく太陽光を吸収する効果も付与されたことにより、融雪が促進されたと考えられる。

融点近傍における雪は、水と氷と空気の複合体であり、部材と接触する雪の表面は水と考えられる。この水が蒸発することで基板上からの雪が減少すると思われる。また雪の水膜を通じた蒸発を取り扱う際には、水膜（水滴）の表面積が関係する。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。また h, r, r_1 には以下の関係がある。

$$h = r(1 - \sin(90 - \theta)) \quad (3)$$

$$r_1 = r \cos(90 - \theta) \quad (4)$$

各変数の関係を図 1 1 にまとめた。

部材に接触した液滴の体積を一定 ($V = \text{const.}$) とし、部材の接触角 θ を 1~180°まで変数として与え、図 1 1 の関係と(1)式から変数 r_1, 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 1 2)。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 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、超親水部材の方が十分に広い表面積を得る。

暴露後、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 8)。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 サンプルでは、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、熱流束 (単位面積当たりの熱量: W/cm²) を考えれば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ことは想像に難しくない。未処理のサンプルに付着した雪よりも、レーザー処理を施した ZAM と ZA の方がより早く雪が消失した理由を説明しうるものである。

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。一方で、

今回の試験では、超親水性材料で雪（液滴）の表面積を広くすることにより、落雪対策として利用可能性を示した。超撥水性は乾いた雪には効果的で、超親水性は濡れた雪に効果的であると考えられた先行研究は、本研究で得られた結果からも妥当と考えられ、継続した調査は不可欠である。

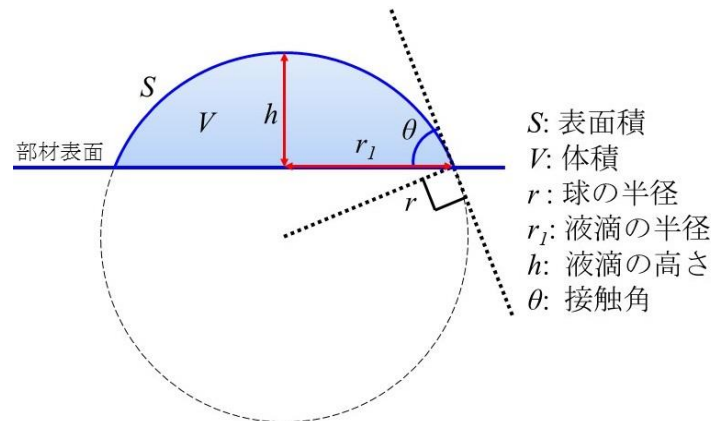


図 1 1 液滴の表面積の算出

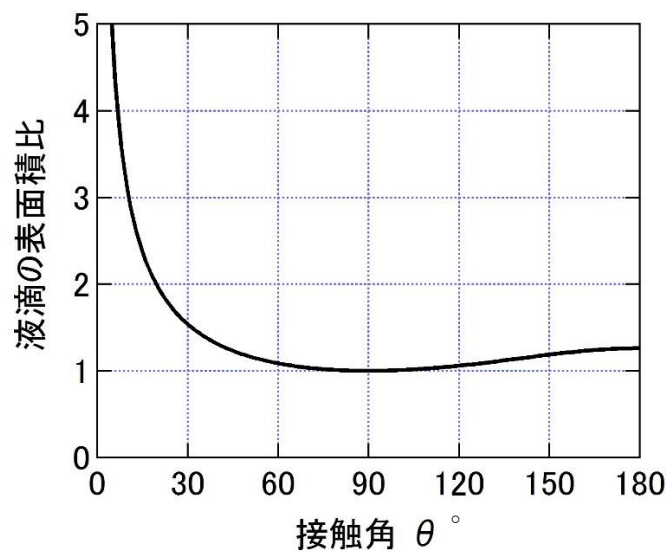


図 1 2 液滴の表面積比と接触角の関係

6. おわりに

本稿は超短パルスレーザー誘起表面周期構造により、亜鉛めっき鋼板に超親水性を付与させた着雪対策工法の一例である。亜鉛めっき鋼板は耐候性の高い材料であることから、超親水性が長い間付与され続けるのであれば着雪対策に効果があり、且つ耐候性の高い材料が発現されることとなる。ただし、レーザー処理条件から着雪等の現象に至るまでの十分な検討は今後も必要である。また実用化を考えたときレーザー掃引速度が非常に遅いことから大量生産は今のところ容易ではないと考えている。この点も今後の課題である。

謝辞

井澤靖和 氏（大阪大学名誉教授／レーザー技術総合研究所長）には、超短パルスレーザーを利用した着雪対策工法について多くの助言をいただいた。また DFIR で得られた降水量データは大宮哲 氏（寒地土木研究所）に提供いただいたものである。ここに感謝の意を表したい。

【参考資料】

- 1) 亀田貴雄、高橋修平：雪氷学、古今書院（2017）
- 2) 日本建築学会編：雪と建築、技報堂出版（2010）
- 3) スカイツリー、落雪予防へ対策強化 新設備で雪払い時間半減（日刊工業新聞、2017.12.25）
<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00455548>
- 4) 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）
- 5) 松下拓樹・他：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）
- 6) H. Sojoudi, et al.: Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces, *Soft Matter*, Vol.12, No.7, pp.1938 – 1963（2016）
- 7) 下村政嗣：生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティ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）
- 8) W. Barthlott and C. Neinhuis: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 202, pp.1 – 8（1997）
- 9) 井須紀文：カタツムリに学ぶ表面防汚技術、溶接学会誌、Vol.78、No.3、pp.187 – 190（2009）
- 10) 穂積篤、浦田千尋：低環境負荷表面処理技術の開発—有機フッ素化合物および凹凸加工を用いない新規はつ液処理の実用化を目指して—、シンセシオロジー研究論文(*Synthesiology*)、Vol.7(No.3)、pp.190 – 198（2014）
- 11) K.E. Tettey, M.I. Dafinone and D. Lee: Progress in superhydrophilic surface development, *Materials Express*, Vol. 1(No.2), pp.89 – 104（2011）
- 12) 穂積篤：自然に学ぶ撥液処理の新展開、日本接着学会誌、Vol.51、No.7、pp.370 – 374（2015）
- 13) M.J. Kreder, et al.: Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery?, *Nature Reviews Materials*, Vol.1, pp.1 – 15（2016）
- 14) A. Fihri, et al.: Recent progress in superhydrophobic coatings used for steel protection: A review, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 520, pp.378 – 390（2017）
- 15) E. Vazirinasab, R. Jafari, and G. Momen: Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review, *Surface & Coatings Technology*, 341, pp.40 – 56（2018）
- 16) P. Irajizad, S. Nazifi, H. Ghasemi: Icephobic surfaces: Definition and figures of merit, *Advanced in Colloid and Interface Science*, Vol.269, pp.203 – 218（2019）
- 17) H. Saito, et al.: Water- and ice-repellent coatings, *Surface Coatings International*, 80, pp.168 – 171（1997）
- 18) 吉田光則・他：着氷雪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）
- 19) T. Ozeki, 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, 4pages (2009)
- 20) 吉田光則、吉田昌充、金野克美：着雪氷防止技術に関する研究（第3報）—滑雪と材料表面特性について一、北海道立工業試験場報告、No.299、pp.13 – 17 (2000)
 - 21) 高倉政寛、伊東敏幸、苫米地司：滑雪現象の発生に影響を及ぼす外気温特性について、寒地技術論文・報告集、第13巻、pp.332 – 336 (1997)
 - 22) 加古哲也、中島章、加藤善二、植松敏三、渡部俊也、橋本和仁：固体表面での撥水性と着落雪挙動との関係、Journal of the Ceramic Society of Japan, 110(3), pp.186 – 192 (2002)
 - 23) 中島章：Design of a transparent hydrophobic coating, Journal of the Ceramic Society of Japan, 112(1310), pp.533 – 540 (2004)
 - 24) M. Birnbaum: Semiconductor surface damage produced by ruby lasers, Journal of Applied Physics, 36(11), pp.3688 – 3689 (1965)
 - 25) K. Okamuro, et al.: Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation, Physical Review B, 82(16), 165417 (2010)
 - 26) E. Skoulas, A. Manousaki, C. Fotakis and E. Stratakis, Biomimetic surface structuring using cylindrical vector femtosecond laser beams, Scientific Reports, 7, 45114; doi:10.1038/srep45114 (2017)
 - 27) A-M. Kietzig, et al.: Patterned superhydrophobic metallic surfaces, Langmuir, 25(8), 4821 – 4827 (2009)
 - 28) D. Zhao, et al.: Near-infrared promoted wettability recovery of superhydrophilic ZnO, The Journal of Physical Chemistry C, 121(23), pp.12745 – 12749 (2017)
 - 29) A. Komatsu, N. Yamaki, 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)
 - 30) V. Zorba, et al.: Biomimetic artificial surfaces quantitatively reproduce the water repellency of a lotus leaf, Advanced Materials, 20(21), pp.4049 – 4054 (2008)
 - 31) R.N. Wenzel: Resistance of solid surfaces to wetting by water, Industrial and Engineering Chemistry, 28(8), 988 – 994 (1936)
 - 32) A.B.D. Cassie and S. Baxter: Wettability of porous surfaces, Transactions of the Faraday society, 40, pp.546 – 551 (1944)
 - 33) 辻井薫：超撥水と超親水—その仕組みと応用—、米田出版(2009)
 - 34) 吉田直哉、渡部俊也：撥水材料の静的撥水性と動的撥水性、表面技術、Vol.60、No.1、pp.9 – 15 (2009)
 - 35) 大宮哲、松澤勝：強風時における雨量計の降雪粒子捕捉率に関する検討、寒地土木研究所月報、No.769、pp.2 – 8 (2017)

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.586 March 2023

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