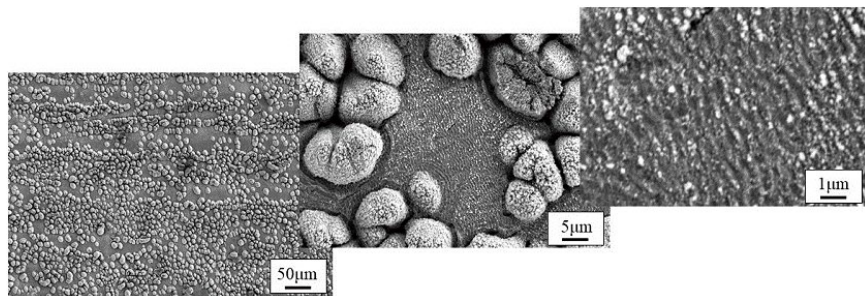


CONTENTS

- 超短パルスレーザーによる表面微細加工
～道路インフラの着雪防止技術への応用～
- 高速・高光耐性可変形鏡の開発
- 機関紙「レーザークロス」発行遅延のお詫び



【表紙図】超短パルスレーザー処理を施した高耐食性亜鉛めっき鋼板（ZAM）表面のSEM画像

超短パルスレーザーによる表面微細加工 ～道路インフラの着雪防止技術への応用～

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 櫻井俊光

レーザープロセス研究チーム 染川智弘

◆道路インフラの着雪防止技術の開発に向けて

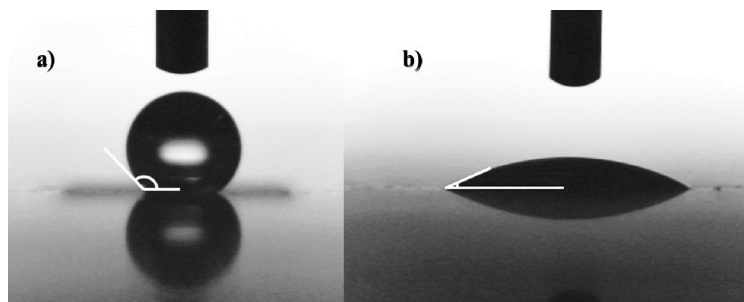
着雪による雪氷災害は、建設分野だけでなく建築、送電線、船舶、航空機、鉄道など幅広い分野で問題となっており、各分野でその対策が検討されている。解決済みの課題もあるが、抜本的な解決には至っていない課題も多い。降雪が橋梁などの道路インフラ（道路案内標識などの付属施設を含む）に着雪して成長すると、着雪が自重によって落下する。道路インフラからの落雪は、交通車両等の破損や、視界阻害による事故を誘発する可能性がある。道路インフラにおいては、着雪や落雪を防ぐための着氷雪除去は主に人力で行われているうえ、高所作業が必要となる場合もあり、作業に手間がかかるだけでなくコストの増加にもつながる。このため、新たな着雪防止技術の開発に対する社会的要請は高い。

着雪防止の手法には、主として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がある。形状変更の例としては、傾斜板や山型屋根による着雪対策工などがあり、着雪量や着雪時間を低減する効果が確

認されている[1]。これにより通行車両の被災リスクを軽減できるが、完全に着雪をなくすことは難しい。一方、性状変更に関しては近年、超短パルスレーザー加工を利用したバイオミメティクス（生物模倣技術）が注目されている。ステンレスなどの金属表面に超短パルスレーザーを照射し掃引すると、レーザー波長程度の微細周期構造（Laser induced periodic surface structures; LIPSS）が自発的に形成され、その構造や環境によって、蓮の葉にみられるような超撥水性[2]、あるいは超親水性[3]を示すことが報告されている。この技術を道路インフラの素材に適用できれば、雪着防止の新たな手法となり得る。これらを踏まえ我々は、耐食性に優れ道路インフラによく用いられる亜鉛めっき鋼板を対象とし、LIPSSを利用した落雪防止技術の開発に向け研究を開始した。本稿では、超短パルスレーザーを掃引照射した際の亜鉛めっき鋼板の表面形状の観測、およびレーザー処理後のサンプルを用いた屋外での曝露試験の結果について報告する。

◆超短パルスレーザーによるZAM表面加工

照射サンプルには、市場に流通している溶融亜鉛めっき鋼板の一種で、耐食性を高めるため、めっき浴にアルミニウムを主とする他元素を数%含有させた高耐食性亜鉛めっき鋼板(通称ZAM)を用いた。照射光源には、超短パルスレーザー装置Solstice Ace (Spectra-Physics社製)を用いた。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800 nm、100 fs、1 kHz、5 mJである。本装置は1 μ mの精度で位置調整が可能なXYZ加工ステージを擁しており、レーザー光をミラーで加工ステージまで導き、焦点距離150 mmの凸レンズでサンプルに照射した。レーザーフルエンス(J/cm^2)は照射後の加工痕の面積から算出した。レーザーフルエンス0.7 J/cm^2 、掃引速度2.0 mm/sでレーザー処理を施すと、表面にLIPSSと数10マイクロメートルサイズの凸構造(アイランド構造)が確認された(表紙図(中))。またSEM画像を注視すると、アイランド構造の表面にもLIPSSが形成されていることがわかる(表紙図(右))。溶融亜鉛めっき鋼板の製造工程では、めっき処理後溶融亜鉛が冷却され結晶化する際、数10ミクロンのアルミニウム初晶が形成されることが報告されている[4]。レーザー照射により形成されたアイランド構造と初晶の形状は良く似ており、このことからアイランド構造はアルミニウム初晶がもとになっているものと思慮される。つまり、超短パルスレーザー照射によりアルミニウムよりも融点の低い亜鉛はアブレーションされるが、アルミニウム初晶はアブレーションされずに残り、結果的にアイランド構造が形成されたものと考えられる。また、0.7 J/cm^2 でレーザー加工を施したサンプル表面は、水の接触角の計測から撥水性を示すことが明らかとなった。

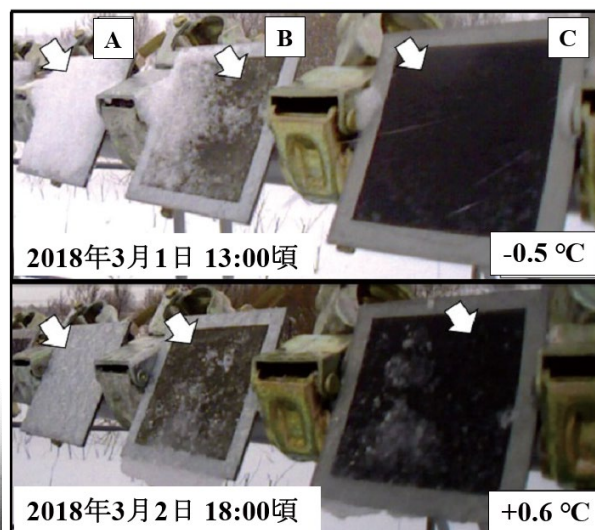


【図1】レーザー処理を施したZAM表面の水の接触角、a)曝露前(接触角 $\approx 150^\circ$)、b)曝露後(接触角 $\approx 20^\circ$)

◆曝露によるZAM表面の性状変化

レーザー加工を施したZAMサンプルを用い、屋外での曝露試験を行った。その結果、サンプルは設置後数日間撥水性を維持したが、曝露日数とともに性状は変化し、約20日後には超親水性を示すようになった(図1)。このような性状変化が起こる例として、Zhaoらの報告がある。彼らは、微細な凹凸構造を施した酸化亜鉛に紫外線を照射すると、表面が超撥水性から超親水性へと変化することを明らかとし、その要因が光化学反応による酸化亜鉛表面での水酸基(-OH)の生成にあると報告した[5]。今回の試験においても同様の反応が起こるものと考えられる。レーザー加工後すぐにサンプル表面の亜鉛が空気中の酸素により酸化され酸化亜鉛となる。その後屋外での曝露により太陽光に含まれる紫外線が照射され、酸化亜鉛の光化学反応を引き起こすことで表面の性状が超親水性へと変化するものと考えられる。

次にZAMサンプルの降雪時における曝露試験を行った。その結果、気温が0 $^\circ C$ 近傍のときサンプル表面から雪が消失するという現象がみられた(図2、サンプルC)。この要因には、性状変化したZAM表面の超親水性が関与していると考えられる。表面に付着する液滴の体積が一定であると仮定した場合、気液界面の面積は超撥水性より超親水性の方が大きい。単位面積における熱の流量、すなわち蒸発量を考慮すると、超親水性でかつ気温0 $^\circ C$ 近傍の条件下では着雪が融解し



【図2】曝露試験の様子。サンプルA：未処理のZAM、サンプルB：亜鉛めっき鋼板(本稿には記載なし)、サンプルC：レーザー処理を施したZAM。気温は近隣のアメダス(石狩)から取得した

蒸発しやすい条件であったと考えられる。以上により本研究では、超撥水性だけでなく超親水性でも着雪対策に効果がある可能性を示した。

謝辞

本研究は、レーザー技術総合研究所と寒地土木研究所の共同研究の一環として行われたものである。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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, 34-39, (2010).
[2] A-M. Kietzig *et al.*, Patterned superhydrophobic metal-

lic surfaces, *Langmuir*, 25(8), 4821-4827 (2009).

- [3] E. Kostal, *et al.*, Fabrication of Biomimetic Fog- collecting Superhydrophilic – Superhydrophobic Surface Micropatterns using Femtosecond Lasers, *Langmuir*, 34(9), 2933-2941 (2018).
[4] A. Komatsu, N. Yamaki and 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).
[5] D. Zhao *et al.*, Near-infrared promoted wettability recovery of superhydrophilic ZnO, *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, 12745-12749 (2017).

TOPICS

高速・高光耐性可変形鏡の開発

レーザー計測研究チーム 谷口誠治

レーザー技術開発室 本越伸二

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン、稲田順史、藤田雅之

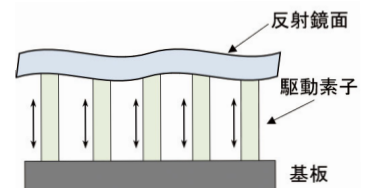
◆はじめに

当研究所は平成30年度から国立研究開発法人理化学研究所の委託を受け、三菱重工業(株)とともに防衛装備庁：安全保障技術研究推進制度(研究課題「高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究」)に参画している。本研究の目的は、大気中を高速移動する移動体への遠距離レーザー伝送技術の開発および原理実証である。この技術の開発により、光通信伝送距離を飛躍的に増大させることが可能となり、さらには遠距離無線給電[1]や地上レーザーを用いた宇宙デブリ除去[2]、高精度天体観測[3]といった応用にも期待できる。この技術を確認するための要素技術として現在、レーザー伝搬経路の波面擾乱(じょうらん)予測手法の確立、高速波面センサーの開発、高速・高光耐性可変形鏡の開発、光伝送に用いる高出力CWレーザーの開発などを行っており、その中で当研究所は、主として高速、高光耐性可変形鏡の開発を進めている。

◆予測的波面制御

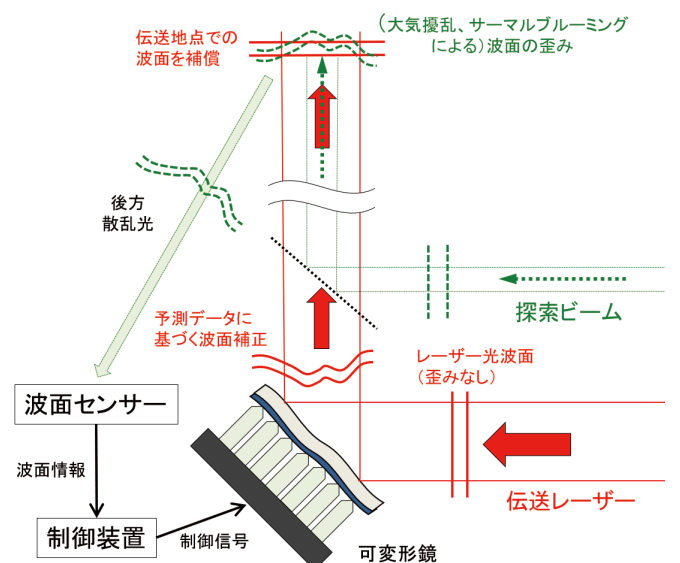
可変形鏡(deformable mirror)とは、薄く柔軟性のある鏡の背面に伸縮する駆動素子を複数配置し、電気的な信号などにより鏡の表面形状を変形させることが可能な反射鏡(図1)のことを指す。入射光波面の歪みを補正する補償光学系でよく利用される波面補正素子の

一種である。本研究で提案する波面制御法(予測的波面制御)[4]の概略図を図2に示す。遠方の伝送ターゲットに向けて先に探索ビームを照



【図1】可変形鏡の断面図

射し、波面センサーにより探索ビームの後方散乱光を計測する。これにより、大気の大気擾乱(大気の大気対流により空気の密度や温度などが時間とともに変動する現

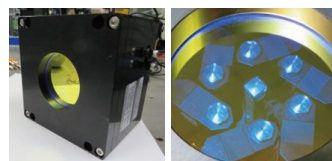


【図2】可変形鏡を用いた一般的な補償光学系の概念図

象)、およびサーマルブルーミング[5](光路内の空気の熱膨張により起こる光屈折効果)に起因して発生する波面の歪みを予測する。次に計測で得られた情報に基づき、可変形鏡を用いて伝送中の波面の歪みを補正する。伝送レーザーの波面を可変形鏡により予め歪ませておくことで、伝送地点でのレーザー波面が補償され、高いエネルギー効率での光伝送が可能となる。本システムに用いる可変形鏡には、大気擾乱およびサーマルブルーミングの変化をリアルタイムで補正可能な駆動速度が必要となる。大気擾乱およびサーマルブルーミングの変化速度は、伝送距離や大気の大気擾乱や風速や温度、伝送レーザーの出力(光強度)などの要因に左右されるが、本研究では伝送距離数キロメートル、最大風速10 m/s、伝送レーザー出力10 kWを想定しており、さらに光伝送ターゲットが大気中を高速移動することを考慮して、可変形鏡の開発目標値を最大駆動速度10 kHz、口径100 mm、光耐性10 kWに設定し、その構成要素である駆動素子、反射鏡面基板の特性調査および試作を開始した。

◆高速・高光耐性可変形鏡の開発

可変形鏡の性能を左右する最も重要な要素は駆動素子であるとされる。これまで可変形鏡に用いられてきた駆動素子には、圧電セラミックスを積層して厚み方向の変位を得る積層圧電アクチュエータ(ピエゾアクチュエータ)、圧電セラミックス板を2枚貼り合わせることで屈曲変位を発生させるバイモルフ素子、電極間の静電気力を利用した静電マイクロアクチュエータ(MEMS)、電磁石を応用したボイスコイルアクチュエータなどがあるが、この中で高速駆動時(10 kHz)の安定動作が唯一報告されているピエゾアクチュエータを選択した。反射鏡面にはサファイアガラスを選定した。サファイアガラスは光学素子の材料によく用いられるBK-7や合成石英に比べ「硬い」素材であり、表面研磨やレーザー光波長の高反射(HR)コーティングによる変形が小さく、鏡面の厚みをより薄くすることができる。



【図3】可変形鏡試作品(左)外観、(右)鏡面とピエゾアクチュエータ接着部の写真

図3に可変形鏡の試作例を示す。口径は50 mmで、鏡面の中心部とその周囲をピエゾアクチュエータ7本(7チャンネル)で支持している。アクチュエータにより鏡面を凹面または凸面状に歪ませることで、光伝送時に大気擾乱およびサーマルブルーミングにより起こるビーム径の広がり(デフォーカシング)を補償する仕様である。アクチュエータはピエゾ素子をベースに伸縮時に起こる破損を防ぐため与圧を与える平行バネ機構を備えたものを作製して用いた。鏡面には厚さ1 mm、HRコートをしたサファイアガラスを使用し、アクチュエータの先端部と鏡面は鏡を透過したわずかな光を吸収して発熱しないよう光透過性樹脂を用いて接着した。現在試作品の高速動作試験やアクチュエータの多チャンネル制御手法の開発などを行っており、今後のさらなる多チャンネル化、可変形鏡の大口径化に向けて開発を進めていく予定である。

謝辞：

本研究は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度JPJ004596(研究課題「高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究」)の支援の下行われた。ご協力頂いた国立研究開発法人理化学研究所、三菱重工業(株)の関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] 宮本智之, 電子情報通信学会論文誌, **J103-C**, pp.270-278 (2020).
- [2] T. Ebisuzaki et al., *Acta Astronautica*, **112**, pp.102 -113 (2015).
- [3] Y. Hayano et al., *Proc. SPIE*, **7736**, p.21 (2010).
- [4] 特開-2020-80367 (P2020-80367A).
- [5] F. G. Gebhardt and D. C. Smith, *IEEE J. Quant. Elect.*, **QE-7**, pp.63-73 (1971).

機関紙「レーザークロス」発行遅延のお詫び

拝啓 時下ますますご清祥のこととお喜び申し上げます。平素より当研究所の活動にご理解・ご協力を賜りましてありがとうございます。さて、5月に発行を予定しておりました当研究所の機関誌「レーザークロス」ですが、昨今の新型コロナウイルス感染症の状況により発行が遅れております。遅延をお詫びするとともに、5月以降の発行分を9月発行以降に変更させて頂いたことをご報告させて頂きます。何卒宜しくお願い致します。

敬具