

レーザー誘起表面ナノ周期構造を利用した道路構造物における 落雪対策に関する研究

Avoiding snow falling from highway structures using laser-induced periodic surface nano-structures

櫻井俊光, 松下拓樹, 高橋丞二, 松澤 勝(国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所)
染川 智弘(レーザー技術総合研究所, 大阪大学レーザー科学研究所),
井澤 靖和(レーザー技術総合研究所)

Toshimitsu Sakurai, Toshihiro Somekawa, Hiroki Matsushita
Joji Takahashi, Yasukazu Izawa, and Masaru Matsuzawa

1. はじめに

降雪が道路構造物(橋梁, 道路案内標識などの道路付属施設)に着雪して成長すると着雪が自重によって落下する. 道路構造物からの落雪は, 交通車両等の破損事故の原因にもなっており¹⁾, 着雪対策の効率化, 省力化が課題となっている. そのため, 雪が落下しにくい難着雪法の技術開発が求められている.

難着雪法には部材の性質を変える性状変更等²⁾がある. 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ている^{3,4)}. また, 超短パルスレーザーを金属表面に照射し掃引すると, レーザー波長程度の微細な溝周期構造が自発的に形成されることが知られており⁵⁾, レーザー誘起表面(ナノ)周期構造(Laser-induced periodic surface (nano-) structures, LIPSS)などと呼ばれている⁶⁾. LIPSSにより金属表面に撥水特性や親水特性が付与され, 付着した不純物などを取り込みながら水滴が滑り落ちる自浄機能への利用が期待されている^{4,7,8)}. LIPSSは落雪対策に利用可能と思慮されるが研究例は少なく, 耐久性や耐候性の面で不明瞭な点が多い^{9,10)}.

本稿は道路構造物に利用される亜鉛めっき鋼板などを対象に, LIPSSの技術を利用した道路構造物における落雪対策について実験結果を報告するものである.

2. 研究方法

亜鉛めっき鋼板や類似の金属板にレーザー照射によりLIPSSを施し, 走査型電子顕微鏡(SEM)による表面性状の観察, 水滴の接触角の計測および曝露実験を実施した.

2-1. 金属サンプル

金属サンプルは, 高耐食性亜鉛めっき鋼板(高Zn)とステンレス板(SUS304)を利用した(括弧内は以降の名称とする). なお, SUS304の表面仕上げはNo.2Bである. 高Znの表面処理はJIS G 3302のK27である.

2-2. レーザー装置と接触角計

使用した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800 nm, 100 fs, 1 kHz, 5mJである. 本実験ではパルスエネルギーを0.19 mJに減衰させて利用した. レーザー光はミラーで加工ステージまで導き, 金属サンプルには焦点距離 $f=150\text{mm}$ の凸レンズを利用して照射した. 加工ステージを用いて金属サンプルとレンズの距離を変えることで, レーザーフルエンス(J/cm^2)を調整した(図1a). 加工ステージの

稼働速度は 120 mm/min である．掃引方法を図 1b に示す．ピッチ間隔は 0.05mm とした．照射面積はそれぞれ，接触角計測用に 2mm×10mm，SEM 観察用に 1mm×10mm，曝露実験用に 80mm×80mm とした．一般的に水滴の接触角は，部材表面の濡れやすさを評価するために計測される¹¹⁾．本研究では接触角計（DMe-200，協和界面科学社製）を利用し，室内で水滴(2μL)の接触角を計測した．なお，水滴が付着しにくい超撥水性を示した場合のみ 10μL の水滴を計測した．

2-3. 曝露実験

曝露実験を寒地土木研究所石狩吹雪実験場で実施した．地上からの高さは 3m で，各金属サンプルを勾配 60°で取り付け（図 2），2018 年 2 月 16 日～3 月 9 日の期間で曝露を行った．観察にはタイムラプスカメラを使用した．なお，参考として，未照射とレーザー照射された SUS304 の裏面に温度計（Pt100 および熱電対）を設置した．

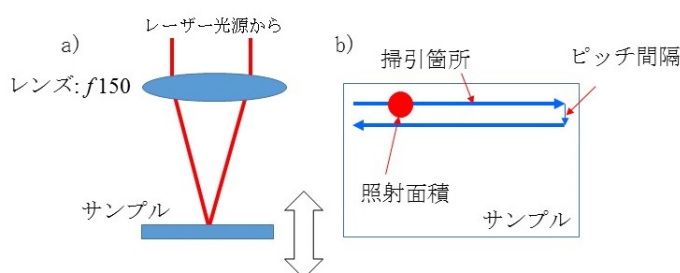


図 1. レーザー光の照射と掃引方法



図 2. 曝露実験開始時の写真．

3. 実験結果と考察

3-1. LIPSS による金属基板の接触角

LIPSS が施された金属基板における水滴の接触角の計測結果を図 3 a に示す．レーザー照射前の SUS304 および高 Zn における水滴の接触角は<90°である．両サンプルにおいて，レーザー照射により水滴の接触角が大きくなり，レーザーフルエンスが高くなるほど水滴の接触角が大きくなる傾向がある．この傾向は SUS304 における先行研究¹²⁾と一致する．一方，レーザーフルエンスが 0.7J/cm²程度するとき，高 Zn でも SUS304 でも接触角が 140°以上と高い接触角を示している．このレーザーフルエンス 0.7J/cm²時における SEM による表面構造を図 3b に示す．10μm 程度の凸構造があり，その表面や凸構造がない部分にはレーザーの波長程度の微細な LIPSS 構造が確認された．この凹凸構造によって水滴の接触角が大きくなり，撥水性を示したと考えられる．

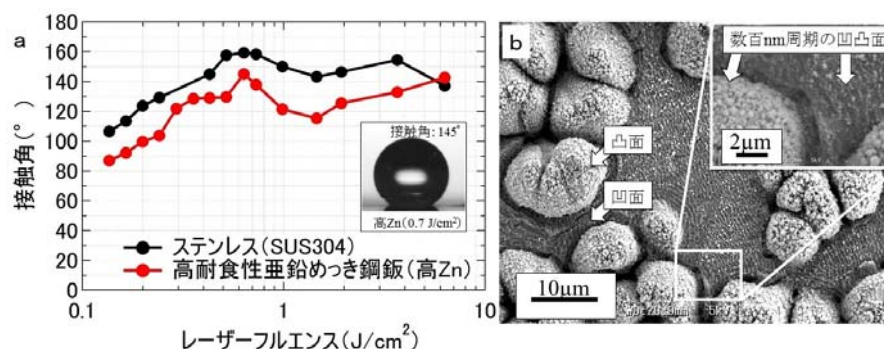


図 3. LIPSS を施した高 Zn と SUS304 の結果．

a) 水滴の接触角とレーザーフルエンスの関係，b) レーザーフルエンス 0.7J/m² のときの高 Zn 表面における SEM 画像

SUS の場合、高いレーザーフルエンスほど水滴の接触角が高くなるという報告¹²⁾があるが、本実験では SUS304 と高 Zn において低いレーザーフルエンスでも接触角が高くなるという結果を得た。一般的に、金属の蒸発に必要なエネルギーを超えると加熱部が除去され「アブレーション」にいたる¹³⁾。アブレーションの閾値は、レーザーフルエンスによるが、本実験で実施したような、低いフルエンスでも照射したレーザー波長程度の凹凸構造が形成されたと考えられる。この微細な凹凸構造が LIPSS である^{5,6)}が、本研究ではさらに大小 2 つの凹凸構造が確認された。蓮の葉の表面には、凹凸の多重構造があり、超撥水効果がみられることはよく知られている¹⁴⁾。本実験でも、高 Zn 表面に 2 重構造が得られており、同様のメカニズムで超撥水が得られたものと考えられる。ただし、水滴の接触角は、凹凸構造が付与されたとしても、元々の部材の性質に依存する。つまり、親水性の部材は、微細な凹凸によってより高い親水性（超親水）を示し、撥水性の部材は、微細な凹凸によってより高い撥水性（超撥水）を示す¹¹⁾。しかし、親水性の部材が凹凸によって一時的に撥水性を示す場合（ピンニング効果）がある。SUS304 と高 Zn における水滴の接触角は $<90^\circ$ であることから、元々親水性であり、レーザー照射後の水滴の接触角は撥水性を示した。これは安定な状態ではなく、一時的な性質（準安定状態）¹⁵⁾の可能性があることに留意が必要である。

3-2. 冬期間における曝露実験

室内で実施した接触角計測の結果ではレーザー照射した SUS304 と高 Zn の両方に大きな接触角が得られ、雪が付着しにくい状況が期待された。しかし、冬期間における曝露実験を行いタイムラプスカメラで落雪状況を確認したところ(図 4a)、実際には着雪した。曝露実験後、室内に持ち帰りレーザー照射した SUS304 と高 Zn の表面について水滴の接触角を計測したところ、両サンプルとも接触角が 30° 以下を示した。つまり、レーザー照射により超撥水性が付与されたが、曝露実験によって超撥水性から超親水性へと変化したことがわかった(図 4b,c)。これは、表面の凹凸に水やエアロゾルなどの不純物が入り込むことで、ピンニング効果が失われ、本来の性質である超親水性へと性質が変化したものと思慮される。すなわち、準安定状態から安定状態へと遷移した結果であり、超親水性の微細な凹凸構造により、金属サンプルに付着した雪が落ちにくい状況が作り出されたと考えられる。

実際、外気温がマイナスであっても金属サンプル裏面の温度は 0°C 以上である。他のサンプルで落雪が確認された時でも、レーザー照射された高 Zn のサンプル上には落雪せず雪が残っており(図 4a)、一度に落雪するのではなく、徐々に融解する様子が確認された。これは、レーザー照射された微細な凹凸構造をもつ高 Zn が超親水性であることなど、高 Zn と雪との間に吸着力が働いたためと思われる。



図 4. 曝露実験結果.

a)着雪の様子, b)曝露実験前の接触角, c)曝露実験後の接触角.

4. まとめ

本研究は、レーザー誘起表面（ナノ）周期構造による高耐食性亜鉛めっき鋼板（高 Zn）およびステンレス板（SUS304）について部材表面の性状変更を施し、水滴の接触角の計測、走査型電子顕微鏡観察および曝露実験を実施した。レーザー照射した高 Zn と SUS304 の表面における水滴の接触角を計測したところ、約 $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ のレーザーフルエンスでも接触角は 140° 以上となり撥水性が付与された。このとき、走査型電子顕微鏡観察で、部材表面には大小 2 つの凹凸構造が確認された。約 20 日間の曝露実験の後では高 Zn および SUS304 とも親水性に変化した。落雪を防ぐという観点で、レーザー照射によって微細な凹凸構造が付与された高 Zn は、親水性であっても一度に多量の雪を落下させないなど、落雪をコントロールする効果を発揮する可能性も示唆された。今後も、曝露実験を継続してこの効果を明らかにすることや、室内実験による微細な凹凸構造と雪の吸着力について明らかにしていきたい。

【参考・引用文献】

- 1) 小中隆範ら, 2015: 道路付属物からの落氷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**, 32-37.
- 2) 松下拓樹, 2008: 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**, 45-48.
- 3) 下村政嗣, 2010: 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, 9-28.
- 4) Sojoudi H. *et al.*, 2016: Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*, **12**, 1938-1963.
- 5) Birnbaum, M., 1965: Semiconductor surface damage produced by ruby lasers, *Journal of Applied Physics*, **36**, 3688.
- 6) Bonse, J. & J. Kruger, 2012: Femtosecond laser-induced periodic surface structures, *Journal of Laser Applications*, **24**, 42006.
- 7) Wu, B. *et al.*, 2009: Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser, *Applied Surface Science*, **256**, 61-66.
- 8) Song, Y. *et al.*, 2018: Controllable superhydrophobic aluminum surfaces with tunable adhesion fabricated by femtosecond laser, *Optics & Laser Technology*, **102**, 25-31.
- 9) Kulinich, S.A. *et al.* 2011: Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent? *Langmuir*, **27**, 25-29.
- 10) Varanasi, K.K. *et al.* 2010: Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces, *Applied Physics Letters*, **97**, 234102.
- 11) 辻井薫, 2009: 超撥水と超親水ーその仕組みと応用ー, 産業図書.
- 12) Moradi, S. *et al.*, 2013: Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: effects of laser parameters on superhydrophobicity, *Nanotechnology*, **24**, 415302.
- 13) Fujita, M., 2008: Processing with femtosecond lasers, in: S. Eliezer, K. Mima (Eds.), *Applied Laser-Plasma Interactions*, CRC press, p. 243.
- 14) Bathlott, W. & C. Neinhuis, 1997: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, **202**, 1-8.
- 15) Lafuma, A., & D. Quéré, 2003: Superhydrophobic states, *Nature Materials*, **2**, 457-460.