

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：82114

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13605

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Study of melting ice using infrared laser for ice sheet drilling

研究代表者

櫻井 俊光（Sakurai, Toshimitsu）

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（寒地土木研究所）・研究員（移行）

研究者番号：00581810

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は氷床を迅速に掘削しながら分析する技術、すなわちレーザードリル連続分析システムの開発を目指すものである。本研究では、氷が吸収する波長を考慮して中赤外レーザー光源を利用し、氷と雪の融解速度を計測した。その結果、CO₂レーザー強度が50W/cm²の場合、氷で0.8mm/s、153kg/m³の雪で4mm/sの融解速度を得た。また、掘削長が100mを超える場合を想定して、レーザードリルとしては透過率の高いファイバーカップルのレーザー光源が良いことも提案した。本システムを実現させるためには、今後のレーザー開発における技術推進も必要となる。

研究成果の概要（英文）：We measured melting speed of ice using infrared laser to propose the ice sheet laser drilling system for continuous analysis of the past climate changes. In this study using CO₂ laser to melt ice, we found that the ice melting speed is 0.8mm/s for ice, and 4mm/s for snow (153kg/m³). We also propose that the fiber coupled laser is preferred to drilling ice sheet and the fiber should be high transmittance rate. In further study, we need to optimize the laser drilling system including the development of laser source itself.

研究分野：雪氷物理、レーザー技術

キーワード：氷 雪 融解 レーザー

1. 研究開始当初の背景

南極やグリーンランドの氷床内部は、学術的に重要な課題が含まれている研究対象である。たとえば、以下に記す課題がある。

- 1) 昨今懸念されている温暖化に伴う氷床の融解は、たとえば海面の上昇を脅かしている。そのため、氷床の鉛直プロファイルから得られる過去の気候変動情報から、気候変化に伴う氷床全体の物理的・化学的要素を含む挙動を迅速に明らかにする必要がある。
- 2) 氷床下で微生物の生息が明らかになれば、生物が極限環境でも生き続けることができる確固たる証拠となる。数十万年も隔離された地底湖に生息する微生物探査を全世界が注目したがコンタミネーションの影響による湖汚染の問題で停滞している。

このように氷床内部には、地球科学的あるいは古生物学的に重要な課題がある。そのため、氷床を掘削する技術開発がすすめられてきた経緯がある。

氷床掘削の技術には、熱水ドリル(e.g., Tsutaki & Sugiyama, 2009)、サーマルドリル(e.g., Weiss et al., 2008)、氷床から鉛直に掘られた円柱状のアイスコア掘削(e.g., Motoyama, 2007)などがある。しかし、熱水ドリルは、氷床表面の雪を融かし熱水にして氷床を鉛直に掘り進めるため、表面の雪に含まれる物質がコンタミネーションの原因になる可能性がある。サーマルドリルは、熱源をドリルに装着させて融解させる装置であるが、氷や融解水と常に接触しているため、これもコンタミネーションが懸念される。アイスコア研究では、常にコンタミネーションとの戦いであり、コンタミネーションを定量評価した報告もある(Miteva et al. 2014)。とても骨の折れる作業が必要になるため、このような状況を打破するためにも、コンタミネーションの懸念のない氷床掘削装置の開発が望まれている。

さて、積雪寒冷地において、太陽光で雪が融ける現象を目にすることがあると思われるが、それは氷が光を吸収するからである。レーザーもまた光である。

レーザーで氷を融かした研究事例は、知る限りでは 1973 年に報告された 1 報しかない (Clark et al., 1973)。もちろん、極地研究に応用された事例はない。そこで本研究は、コンタミネーションの影響のないレーザードリルシステム (Laser Drilling System, LDS) の可能性を検討する。光で氷が融けるのであればコンタミネーションの影響がなく、氷を融かした融解水をそのまま分析できる利点がある。

2. 研究の目的

本研究は、氷床を迅速に掘削しながら分析する技術、すなわちレーザードリル連続分析システムの開発を目指すものである。萌芽的

な研究初期段階において本研究は、氷が吸収する波長を考慮して中赤外レーザー光源を利用した氷の融解速度を明らかにし、まずは LDS を提案することが目的である。なお、LDS には高出力レーザー光源が不可欠であり、高出力レーザー開発に重要な冷却技術についても検討を行った。

3. 研究の方法

氷は波長に依存して吸収係数が変化する。具体的には図 1 に示すように、可視光でほぼ透過するが、0.5 μm あたりから吸収しはじめ、1.0 μm 以上になると桁で吸収係数が高くなり、3 μm 、11 μm あたりでピークをむかえる。したがって、これらのピーク波長における光源の選定が最適であるが、レーザー光源の開発に依存するところもある。

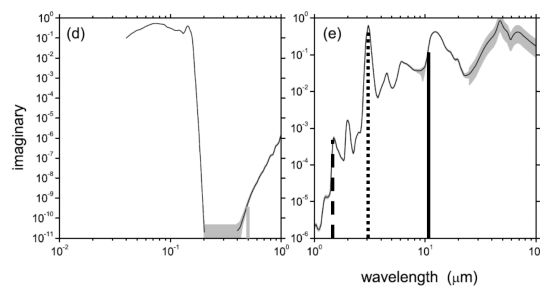


図 1 Warren and Brandt(2008)による、波長に依存した氷の吸収係数 (縦軸: 消衰係数として表示、横軸: 波長). 吸収係数 $\alpha = 4\pi\kappa/\lambda$. κ : 消衰係数、 λ : 波長. 吸収係数の逆数は光の侵入深さである. 実線: 10.6 μm 、点線: 2.8 μm 、破線: 1.5 μm 、実線 (レーザー): 0.532 μm .

CO₂ レーザーは、二酸化炭素を媒質として開発された光源であり、10.6 μm や 9.8 μm が代表的な波長である。氷の吸収を考えれば 10.6 μm を利用することが良いことも図 1 から解る。また近年、Er (エルビウム) などを媒質とした光源の開発も加速されており、中赤外レーザー光源がいくつか利用できるようになってきた。大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 (現・レーザー科学研究所) では時田講師を中心として 2.8 μm の波長におけるレーザー光源を開発している。なお、民間企業ではより長い波長のレーザーも開発している。

本研究では、中赤外レーザーの波長 10.6 μm の CO₂ レーザー、大阪大学が開発している 2.8 μm の Er:ZBLAN ファイバーレーザー等を利用して氷の融解実験を実施した。実験環境は室温で、氷温度はサーモビューアで確認された。

4. 研究成果

4 - 1 CO₂ レーザー

CO₂ レーザーを照射したときの氷の様子を図 2 に示す。CO₂ レーザーを氷に照射させると氷に穴が開き、完全に貫通した様子が写真からわかる。



図2 氷に CO₂ レーザーを照射した直後の写真

レーザー照射強度を変化させて氷と雪の融解速度を計測した結果、レーザー照射強度に比例して氷の融解速度が速くなった(図3)。しかし、レーザーの光エネルギーが氷の融解に全て使われたと仮定した場合に比べて、実際の融解速度はその50%程度であった。これは、融解水の影響と、照射されていない氷から熱が流れたことが原因と考えられる。

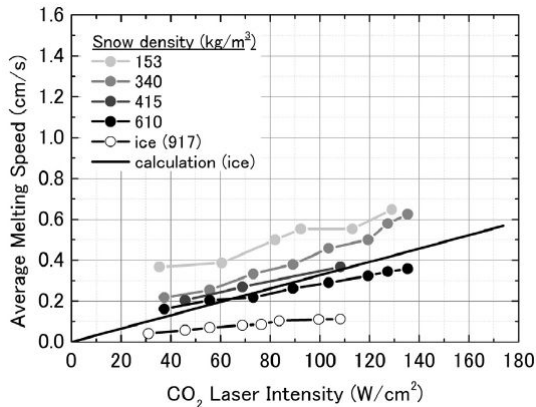


図3 CO₂ レーザーによる氷と雪の融解速度。氷の融解速度は白丸で、直線は氷がレーザー照射による光エネルギーを100%吸収したと仮定した場合の融解速度。黒丸から薄いグレーの丸は雪の融解速度を示す

レーザー掘削では、鉛直下方に向けて氷に照射させることを想定している。そこで、照射角度を変化させて融解実験を実施したところ、氷に融解水が溜まり融解速度が低下することも解った(図4)。水もまた CO₂ レーザーの波長を吸収するため、融解水が影響した結果である。

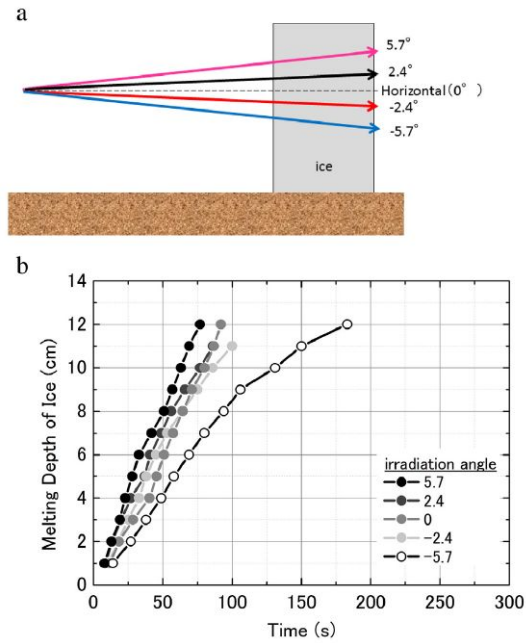


図4 レーザー照射角を変えた時の氷のレーザー融解実験結果(レーザー強度: 106W/cm²)。

a) レーザーの照射角を変えた時の模式図、b) レーザー照射時間と氷の融解した深さ

4 - 2 Er:ZBLAN ファイバーレーザー

Er:ZBLAN ファイバーレーザーの波長を変えることができるが、本研究は 2.8μm で氷の融解実験を行った。レーザー強度は CO₂ レーザーの 1/20 程である。レーザー強度は比較的弱いですが、明らかに氷が融けている様子が図5からもわかる。

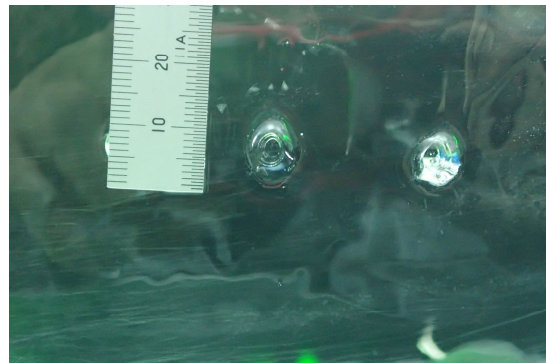


図5 Er:ZBLAN ファイバーレーザー(5.7W/cm²)を氷に照射した直後の様子。

レーザー強度を変化させて氷の融解実験を実施したところ、氷の融解速度は 5.7W/cm² で 0.0075cm/sec、4.0W/cm² で 0.0048cm/sec であった。CO₂ レーザーによる融解速度から Er:ZBLAN ファイバーと同程度のレーザー強度として計算すると、CO₂ レーザーの融解速度と比べて 1.1 倍程の速度で、ほぼ同等であることがわかった。また、サーモビューアで氷の温度を計測すると、氷体は 0 であり、レーザーが照射されているところは 30 程度であることも確認された(図6)。なお、氷の上昇温度(融解水の温度)を計算したと

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) 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 Region Science and Technology*, 121, 11-15, 2016.
doi:10.1016/j.coldregions.2015.09.014
- 2) T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishii, Y. Izawa, Boiling effect in liquid nitrogen directly cooled Yb³⁺:YAG laser, *Applied Optics*, 55, 1351-1355, 2016.
doi:10.1364/AO.55.001351
- 3) T. Sakurai, H. Ohno, H. Motoyama, T. Uchida, Micro-droplets containing sulfate in the Dome Fuji deep ice core, Antarctica: findings using micro-Raman spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy*, 48, 448-452, 2017.
doi:10.1002/jrs.5040
- 4) H. Ohno, Y. Iizuka, A. Hori, A. Miyamoto, M. Hirabayashi, T. Miyake, T. Kuramoto, S. Fujita, T. Segawa, R. Uemura, T. Sakurai, T. Suzuki, H. Motoyama, Physicochemical properties of bottom ice from Dome Fuji, inland East Antarctica, *Journal of Geophysical Research -Earth Surface-*, 121, 1230-1250, 2016.
doi: 10.1002/2015JF003777
- 5) Dome Fuji Ice Core Project Members (64 members include H. Motoyama as a corresponding author and T. Sakurai), State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, 3, 1-13, 2017.
doi: 10.1126/sciadv.1600446

〔学会発表〕(計 2 件)

- 1) 櫻井俊光、ハイク コスロービアン、染川智弘、藤田雅之、本山秀明、渡辺興亞、井澤靖和、レーザー氷床掘削のための氷の融解に関する研究、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、幕張、幕張メッセ、2015 年 5 月 24 日～5 月 28 日
- 2) 櫻井俊光、大野浩、本山秀明、内田努、顕微ラマン分光法による南極ドームふじ氷床コア中の硫酸微液胞の発見、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張、幕張メッセ、2016 年 5 月 22 日～5 月 26 日

〔図書〕(計 件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

なし

○取得状況(計 件)

なし

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

櫻井俊光 (SAKURAI, Toshimitsu)

寒地土木研究所・寒地道路研究グループ・

雪氷チーム・研究員

研究者番号: 00581810

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

・本山 秀明 (MOTOYAMA, Hideaki)

国立極地研究所・気水圏研究グループ・

教授

研究者番号: 20210099

・藤田 雅之 (FUJITA, Masayuki)

レーザー技術総合研究所・レーザープロセ

ス研究チーム・主席研究員

研究者番号: 30260178

・時田 茂樹 (TOKITA, Shigeki)

大阪大学・レーザー科学研究所・講師

研究者番号: 20456825

(4)研究協力者

なし