

(19) CO₂ レーザを用いた岩盤掘削の基礎実験

STUDY ON ROCK EXCAVATION WITH CO₂ LASER

高谷 透*・里 優**・福井 勝則***・大久保 誠介***

Toru TAKATANI, Masaru SATO, Katsunori FUKUI and Seisuke OKUBO

When high power laser beams are focused against rocks, they produce melting and vaporization. Surrounding the molten rock is a zone of thermally degraded rock which usually contains fractures.

In this study, a granite and a sandstone were subjected to CO₂ laser beams. The results are summarized as follows ;

- 1) With increase of power of laser, the depth of kerf increases and the specific kerfing energy decreases. The specific kerfing energy can be calculated by (Energy)/(Kerf Area).
- 2) The excavated volume increases linearly with power of laser, and the specific energy is approximately maintained to be constant.
- 3) EPMA observation of dross indicates that Al, Fe, Ca and Si are mixed amorphously.

1. はじめに

レーザを岩石に照射すると、照射された部分の温度は急激に上がり熱応力により局所的な破壊が生じる。さらに高出力のレーザを用いると、照射された部分が溶融したり気化したりする。この方法には、(1)電気的に俊敏に制御でき、自動化に向いている、(2)反力が極めて小さい、(3)低騒音である、などの幾つの特徴があり、古くから研究が行われてきた。例えば、1960年代の米国では、急速掘削・掘進のための有力な手段の一つとして多くの基礎的研究が行われた¹⁾。その結果、発破と機械掘削以外の掘削手段としては、水ジェットについて有望であることが分かった。その後も、ある程度の研究がなされてきたが、岩盤掘削の分野では、実用化されるには至っていない。

最近のレーザに関する技術の発展は目覚ましく、大容量のものが比較的安価に入手できるようになった。その結果、岩盤掘削にレーザを応用できる可能性がでてきたといえよう。そこで、本研究では、レーザ掘削のための基礎データの収集を目指して掘削実験を行ったのでその結果を報告する。

2. 実験装置と岩石試料

本研究で用いた実験装置の概略図を図1に示す。用いたレーザ装置は、CO₂レーザ装置(三菱電機製)で、最大出力10kW、波長10.6μmである。CO₂レーザ装置では、He、N₂を媒体として固有の振動数を持ったCO₂を高いエネルギーレベルに励起させ、それが低いエネルギーレベルに落ちるときに放射された光を共振器によって増幅させる²⁾。共振器から取り出されたレーザ光は、直径が60mmで、集光レンズ

* 東京大学大学院 地球システム工学専攻

** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所

*** 正会員 工博 東京大学工学系研究科 地球システム工学専攻

によりレンズから254mm下方で集光される。図1に示すように、焦点の位置はレーザー光が照射される岩石試料表面より数cm上部に設定した。この焦点から岩石試料表面までの距離を変えることによって岩石表面での照射直径を変化させた。

実験は、X-Yステージ上の岩石試料を直線的に移動させながらレーザー光を照射させることにより行った。その際、岩石表面でのレーザー光の照射直径を5、10mmの2段階、レーザー光の出力を1.2、5.0、10.0kWの3段階、岩石の移動速度を1.7、5.0、16.7、50.0mm/sの4段階に変化させ検討した。

試料岩石として堆積岩の来待砂岩と火成岩の代表的な岩種である稲田花崗岩を選定し、ともに25cm×25cm×15cmの岩石ブロックを実験に用いた。実験室実験より求めた両岩種の物性値を表1に示す。

表1 来待砂岩と稲田花崗岩の物性値

	ヤング率 (GPa)	一軸圧縮強度 (MPa)	圧裂引張強度 (MPa)
来待砂岩	8.0	3.8	3.0
稲田花崗岩	6.5	18.0	5.8

3. 掘削深さ

レーザー光を照射した岩石ブロックを切断し、その切断面で観察される掘削深さをノギスにより測定した。稲田花崗岩の場合は、組成鉱物によるレーザー光吸収率の違いから掘削深さが場所により最大3倍程度の差異が生じたため、掘削深さを数カ所において測定し、その平均値により求めた。

図2・図3に、岩石の移動速度Vと掘削深さDの関係を示す。両対数グラフでの傾きは両岩石ともほぼ-0.8であり、移動速度が遅くなれば深く掘削される。単位掘削長あたりに投下されるレーザー光のエネルギーは、岩石の移動速度と反比例するが、図2・図3の傾きは-1よりも小さいので、移動速度が遅くなれば単位深さを掘削するのに必要なエネルギーは増加すると言える。

照射直径が5mmのときと10mmのときを比べる

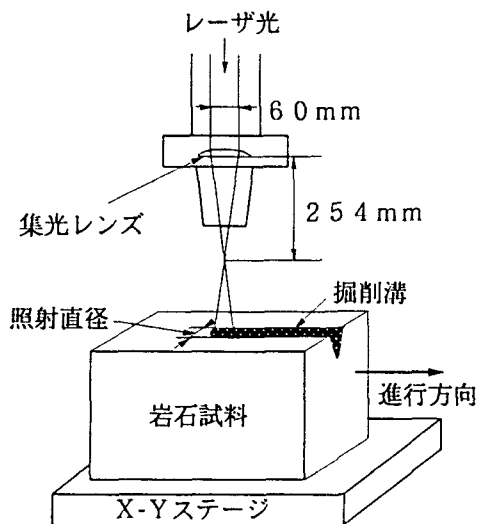


図1 実験装置の概略図

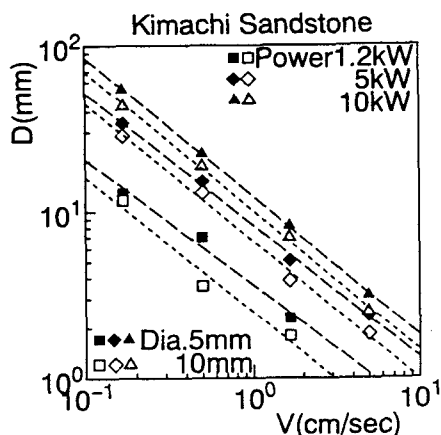


図2 移動速度Vと掘削深さDの関係（来待砂岩）

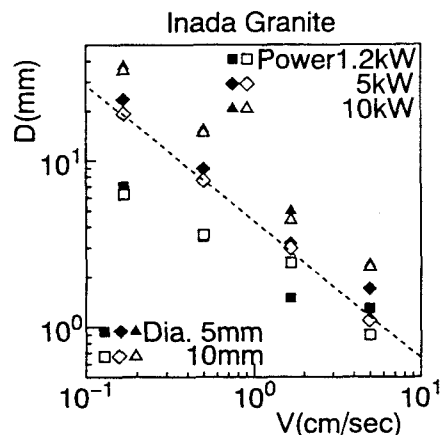


図3 移動速度Vと掘削深さDの関係（稲田花崗岩）

と、図2の来待砂岩では5mmのときの方が20%程度深く掘削されている。一方、図3の稲田花崗岩では比較的その差が小さい。

次に、来待砂岩におけるレーザ出力Pと掘削深さDの関係を図4に示す。当然ながら単位掘削長あたりに投下されるレーザ光のエネルギーはレーザ出力に比例するが、図4では、いずれの移動速度においてもレーザ出力が大きくなると直線関係からずれており、単位深さを掘削するのに必要なエネルギーはレーザ出力が大きくなるほど増加することが分かる。

4. 掘削断面形状と掘削体積

来待砂岩の切断面での掘削断面形状を写真1、2に示す。写真1に示すレーザ光の出力が1.2kWのときの掘削断面の形状はほぼV字状であったが、5kW、10kWと出力が大きく、深く掘削されるときには、写真2のように掘削断面の中央部が膨らんだような形になった。写真1ではV字状の溝にはドロス(dross)が詰まっているのに対し、写真2では掘削断面にドロスが詰まっていない部分が多く見られる。これは、5kWや10kWのときには、掘削された岩石の多くが気化する

ためである。レーザ光の出力が小さく岩石表面にドロスが残ると、レーザ光はドロスに遮られ、岩石が溶融するのに必要なエネルギーに達する幅は溝が深くなるほど狭くなり、掘削断面はV字状になる。他方、レーザ光の出力が大きくドロスが気化するときには、レーザ光の形状通りに溝が掘削される。レーザ光は図1に示すように岩石中で広がるので、掘削溝の幅も広がる。しかし、掘削溝の深部では気化に至らずドロスが残るので、掘削幅が狭まり、その結果中央部が膨らんだ掘削断面が形成される。

写真3は、レーザ出力10kW(照射直径10mm、岩石の移動速度1.7mm/s)のときの稲田花崗岩の掘削断

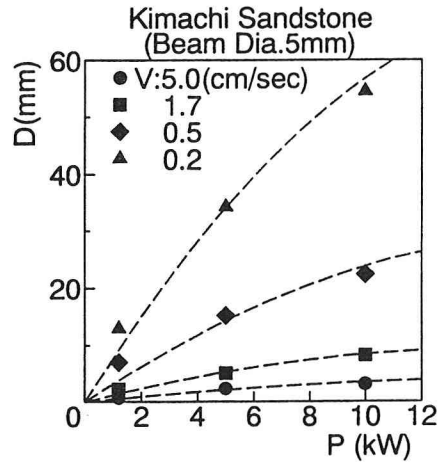


図4 レーザ出力Pと掘削深さDの関係(来待砂岩)

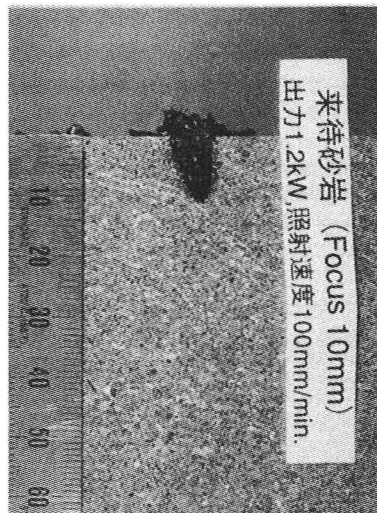


写真1 来待砂岩の掘削断面
(レーザ出力1.2kW)

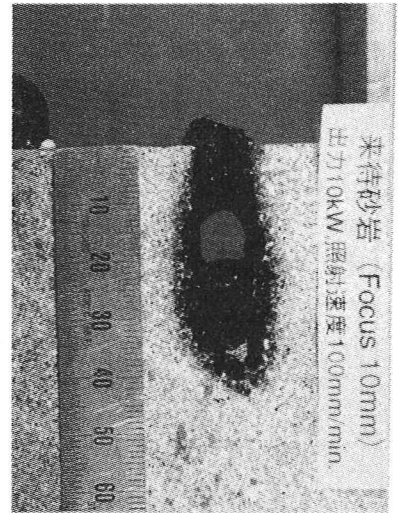


写真2 来待砂岩の掘削断面
(レーザ出力10kW)

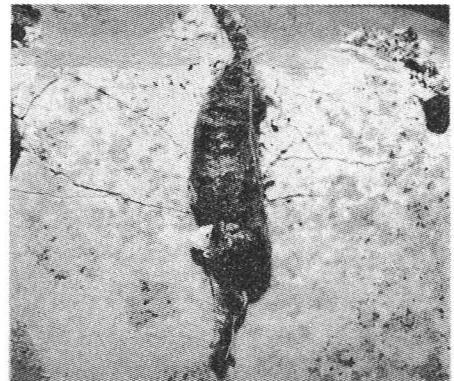


写真3 稲田花崗岩の掘削断面
(レーザ出力10kW)

面である。稲田花崗岩の場合、来待砂岩と異なりドロスの周りの岩石に多くの亀裂が生じる。この亀裂の生じた部分の厚みは、レーザ出力が1.2 kWのときは、1 mm程度である。一方、出力が10 kWのときの厚みは3～10 cm程度となる。出力が5 kWのときには、移動速度により相当に異なる結果となった。このような花崗岩の力学的な破壊は、熱応力や石英の $\alpha - \beta$ 転位に起因する体積膨張によると考える。

岩石試料を端面から5 cmのところで切断し、その断面を透明な方眼紙にトレースして掘削断面積を求めた。なお、稲田花崗岩では写真3のように亀裂が生じ、容易に取り除けると判断した部分も掘削断面積とした。比較的小さな岩石試料を用いたので試料の端部まで亀裂が伸びることがあった。このような場合には、充分大きな岩石試料を用いた場合と比べて、数10%大きな掘削断面積となっていると考える。岩石の移動速度 V と掘削断面積 S との関係を図5・図6に示す。図中の黒ぬりの記号は照射直径が5 mmのとき、白抜きの記号は10 mmのときである。図5の来待砂岩では、両対数グラフでの傾きがほぼ-1であり、 S と V は反比例の関係にあるといえる。深く掘削されているときは、掘削断面が膨らんだ形状になるので、図2に比べて傾きが大きくなっている。また、掘削断面積は、照射直径には関係が無く、レーザ光の出力にのみ依存していることが分かる。一方、図6は稲田花崗岩の場合である。図6では、レーザ光の出力が1.2 kWのときは両対数グラフの傾きがほぼ-1であるが、レーザ出力が10 kWや5 kWの、特に岩石の移動速度が遅い領域では亀裂が生じている影響で大きく傾きが変わっている。

来待砂岩と稲田花崗岩のエネルギー密度すなわち(レーザ出力)/(岩石の移動速度)と、掘削体積比エネルギーとの関係も検討した。掘削体積比エネルギーとは、単位掘削体積あたりのエネルギー量のことである。来待砂岩の場合、エネルギー密度が大きくなると徐々に掘削体積比エネルギーは大きくなるが、エネルギー密度が $1.0 \times 10^3 \text{ J/mm}$ あたりからは、逆に小さくなり、掘削効率が上昇する。エネルギー密度が大きくなると気化によりドロスなどの遮蔽物が速やかに除去されるようになるためと考えられるが、気化に要するエネルギーが相当に大きいので、劇的な掘削効率の上昇は見られない。一方稲田花崗岩の場合には、来待砂岩と同じ傾向を示すが、エネルギー密度が $1.0 \times 10^3 \text{ J/mm}$ をこえてからの掘削体積比エネルギーの減少する割合が来待砂岩より大きい。

また掘削体積比エネルギーの値から、掘削効率を示す掘削能係数(一軸圧縮強度/掘削体積比エネルギー)を算出すると、来待砂岩の場合や稲田花崗岩のエネルギー密度が小さい範囲で従来の機械式掘削方法の1/100～1/400程度、稲田花崗岩のエネルギー密度が大きい範囲でも1/10～1/100程度である。

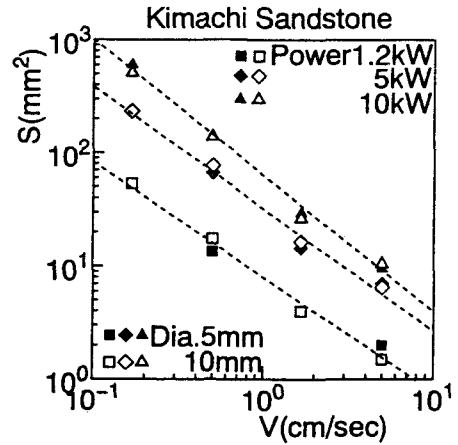


図5 移動速度 V と掘削断面積 S の関係(来待砂岩)

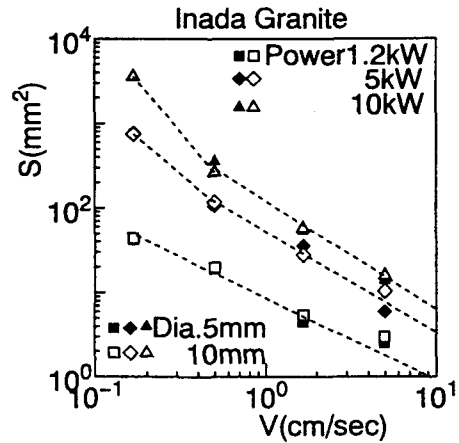


図6 移動速度 V と掘削断面積 S の関係(稲田花崗岩)

5. E P M Aによる検討

E P M A (Electron Probe X-ray Microanalyser)により岩石試料切断面のAl、Fe、Ca、Siの濃度を調べた。図7に、来待砂岩の掘削断面の状況を示す。来待砂岩では、レーザ出力1.2 kW、10 kWともに、各元素の濃度は元の岩石試料よりドロスの方が1.2～1.6倍程度高くなっている。空隙率が2.3%と比較的大きい来待砂岩では、空隙がほとんど無くなったドロスの濃度が高いのは定性的には妥当と考える。また、図7から分かるように、元の岩石試料では場所（鉱物）により、元素の濃度が100倍以上も異なる。一方、ドロス部分では最大でも2倍程度しか濃度の差が無く、岩石が溶融して均質化していることがわかる。

稲田花崗岩の場合は、どの元素についてもドロスの濃度は元の岩石試料の1.1倍程度となっている。これは、来待砂岩と比べて空隙率が小さいためと考えられる。また、元の岩石試料では各元素の濃度は100倍以上の差がある。一方、ドロスでは最大4倍程度の濃度の差になっており、来待砂岩と同様に均質化されている。

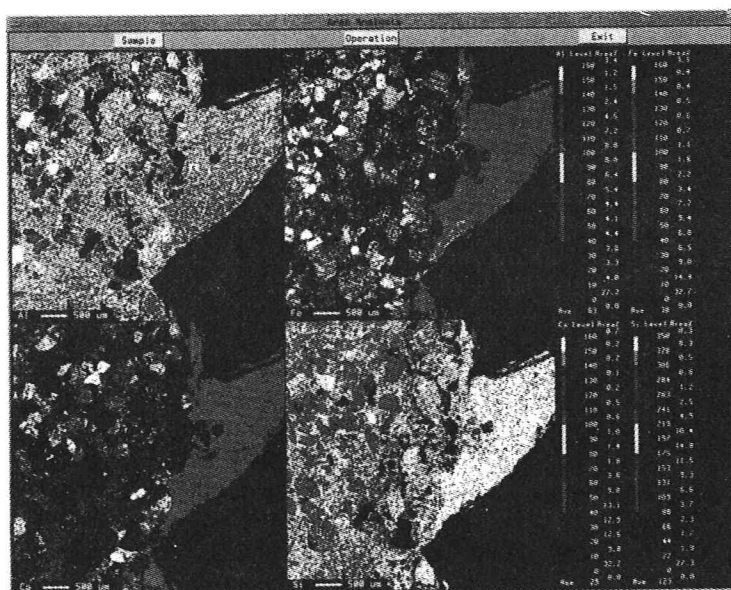


図7 E P M Aで観察した掘削断面の状況
(来待砂岩；レーザ出力10 kW、照射直径
10 mm、岩石の移動速度1.7 mm/s)

6. まとめ

本研究では、レーザ光の出力、岩石の移動速度および照射直径を変化させて、来待砂岩と稲田花崗岩の掘削実験を行った。その結果、次のようなことがいえる。

- (1) レーザ光の出力が大きくなると掘削溝が深くなる。しかしながらエネルギー効率 (Specific Kerfing Energy) は落ちる。
- (2) 来待砂岩の掘削体積はエネルギー密度にほぼ比例して大きくなる。エネルギー効率 (Specific Energy) はほぼ一定であるが、エネルギー密度が大きくなると気化がおきるので、上昇する。
- (3) 稲田花崗岩ではレーザ出力が10 kWのときは顕著な効率の上昇がみられた。熱応力や石英の $\alpha - \beta$ 転位に起因する体積膨張などの力学的な破壊機構が生じたためと考えられる。
- (4) E P M Aによる掘削断面の観察により、ドロス部分では元素の濃度が均質化されていることが分かった。

参考文献

- 1) William C. Maurer : ADVANCED DRILLING TECHNIQUES, pp.421～463, 1980.
- 2) 宮崎俊行、宮沢肇、村川正夫、吉岡俊朗：レーザ加工技術, pp.4～8, 1991.