

1. はじめに

近年深刻なエネルギー問題により、天然ガスやメタンハイドレートといった新エネルギー源に注目が集まっている。これらは海底地層中に分布しており、ドリルを用いて機械的に岩盤に穴をあけるロータリー式と呼ばれる掘削方法で採取される。このロータリー法はドリルの先端であるビットの消耗や、その交換作業による作業時間の増加、硬い岩盤での掘削速度の低下などの問題がある。近年、このロータリー式の限界を超える可能性のある方法としてレーザー掘削が研究されている。レーザー光のエネルギーを用いて非接触に加工を行うものである。水中にレーザー光を伝播させ海底の岩石に照射するため、伝送ロスの少なくなる水の吸収の小さい波長のファイバーレーザーを用いて研究が行われていた。しかししばらく掘削したところで岩石が溶融し、表面で岩石のガラス成分が固まってしまう問題が起こることがわかった。これにより後に照射されるレーザー光を反射、散乱させ、エネルギー照射を妨げ、それ以上の加工が不可能になるという現象が確認され、レーザー掘削は不可能であるという結論に至った。その後本来なら水を透過しない波長であるCO₂レーザーを用いて実験したところ岩石表面のガラス化が起きない、常に新しい岩石表面を露出させ掘削を継続できることが分かった。このとき水中にはレーザーの光路に沿って筒状の気泡である気泡チャンネルが形成されており、この気泡チャンネルによって水中に誘起される衝撃波やジェット水流が岩石表面のガラス成分を飛散、排除させたことにより掘削の継続が可能になったと考えられている。

本研究ではCO₂レーザーよりさらに水の吸収の強いレーザーであるEr:YAGレーザーを用いて、より積極的に水中に気泡を誘起させることに主眼を置き、気泡チャンネル形成から崩壊過程のメカニズム解明と掘削能力の向上を目的とした。本

研究は海底地層の掘削のみならず土木建築への応用も期待される。

2. 気泡チャンネル観測実験

気泡チャンネル観測の実験系を Fig.1 に示す。Er:YAG レーザーパルスを集光し水中に入射し、これとタイミング同期を取ったNd:YAG レーザーの第二高調波である波長 532nm、パルス幅 20ns の光を照明光として水槽側面から入射し CCD で気泡チャンネル形成を観測した。入射したパルスの各時間における気泡チャンネル形成の様子を Fig.2 に示す。入力したパルス前半部分が吸収され、このとき水中では気泡チャンネルが形成された。気泡チャンネルが水槽底面に達するとパルスの透過が開始した。次第に冷却され、内部の膨張圧力が保てなくなるためチャンネル上部から崩壊した。このときパルスの透過も終了した。

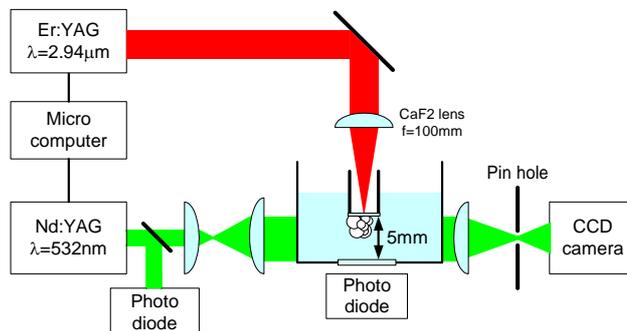


Fig. 1 気泡チャンネル観測の実験系

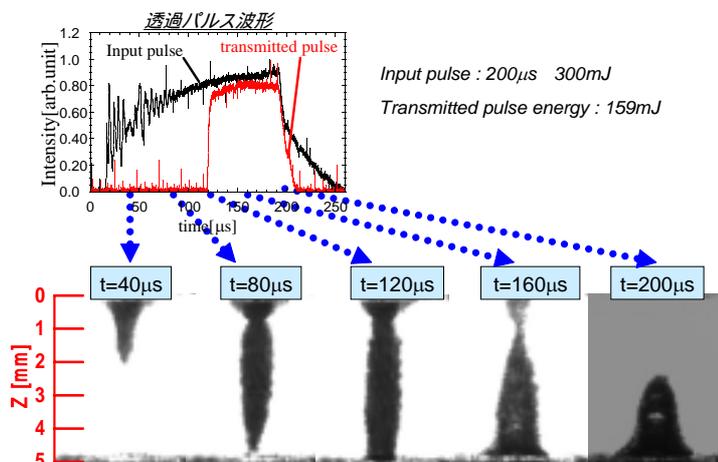


Fig. 2 気泡チャンネル形成

次にパルス幅一定の条件において、入力するパルスエネルギーを変化させたときの透過波

形の変化を Fig.3 に示す。またエネルギーの透過効率を Fig.4 に示す。入力パルスエネルギーを増加させると気泡チャンネルの寿命は長くなった。相対的に気泡チャンネル形成に使われるエネルギーは小さくなりエネルギーの透過効率が上昇した。今回、入力パルスエネルギー300mJ のときに最大透過効率 53%を得た。

同一パルスエネルギー帯においてパルス幅を変化させたときの結果を Fig.5 に示す。同じパルスエネルギーにおいて短パルス化すると高密度化したレーザービームが大きなエネルギー吸収を実現し、大きな気泡チャンネルが形成される。その結果チャンネル寿命が増加した。

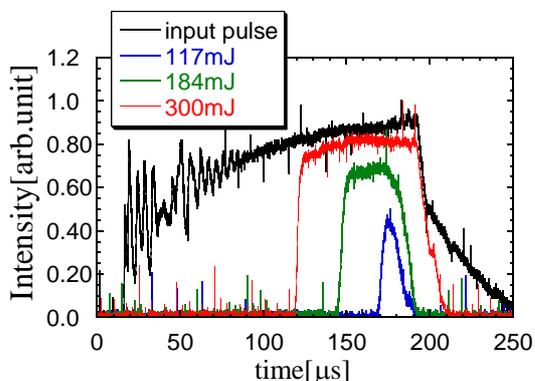


Fig.3 透過波形の変化

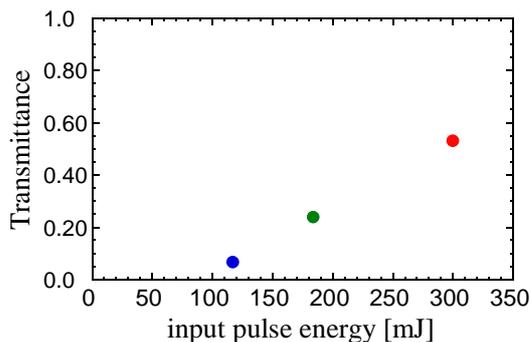


Fig.4 エネルギー透過効率

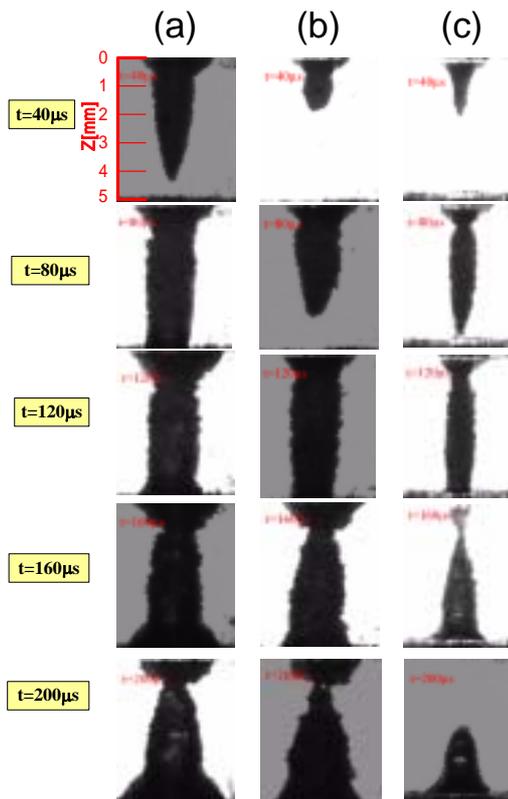


Fig.5 気泡チャンネル形成のパルス幅依存性
((a):100μs (b):160μs (c):200μs)

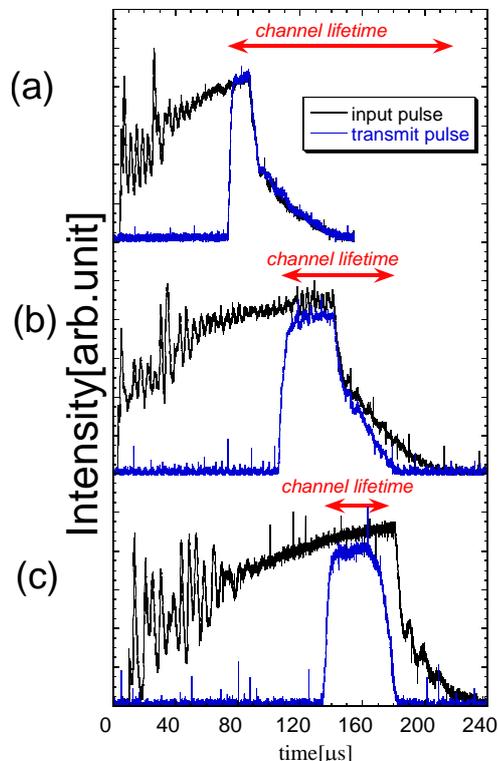


Fig.6 透過波形のパルス幅依存性
((a):100μs (b):160μs (c):200μs)

3. 気泡チャンネル内部構造の観測

これらの結果から気泡チャンネルの内部は完全に空洞で単一の気泡だと推測される。しかし今回のバックライトによる観測では気泡チャンネル全体が黒く写り、内部構造を知ることができない。単一の気泡であればチャンネル中央部が屈折せずに透過する光によって白く写るはずである。気泡の輪郭もいびつであるため、この気泡チャンネルはマイクロバブルの集合であるとも考えられる。Er:YAG レーザーによって形成される気泡チャンネルは過去にも報告されている。同じバックライト法により気泡チャンネルを観測しているが、やはりチャンネル中央部は黒く写っている。チャンネル崩壊時にはマイクロバブルとなって崩壊している。そこで気泡チャンネルの内部構造を知るための実験を行った。この実験系と結果を Fig.7 に示す。これまでの水槽の側面より照明光を入射する方法から Er:YAG レーザーと同軸に入射し気泡による散乱を観測する方法と水にローダミン 6G を溶かし照明光が水を透過したときの色素の蛍光を観測する方法と二種類でクロスチェックを行った。散乱による撮影ではチャンネル上部のガラスと水蒸気、チャンネル先端の水蒸気と水の界面の二点で観測され、チャンネル内部では界面がないことを示している。色素の蛍光による撮影でもチャンネル内部からの蛍光がなく、水の膜状のものが一切ないことを示している。これらの結果から気泡チャンネル内部はマイクロバブルではなく単一の気泡であるとの結論を得た。

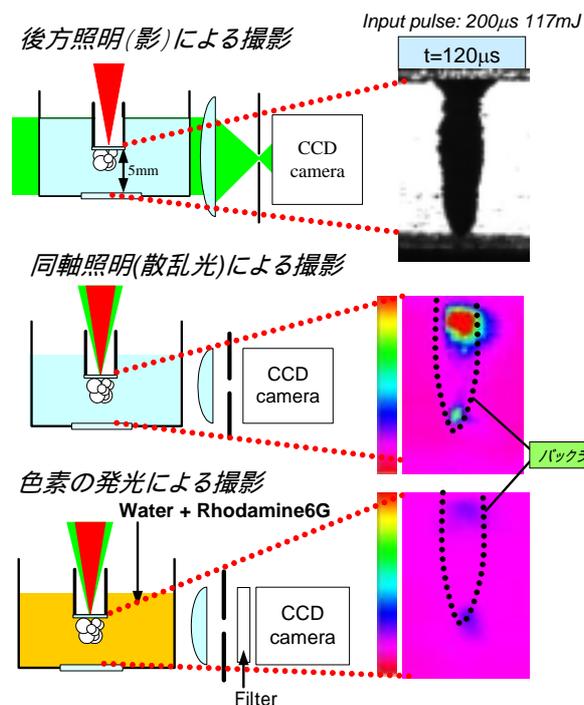


Fig.7 気泡チャンネル内部構造観測

4. 水中衝撃波の観測

先述した通り従来のレーザー掘削の問題点を解決した要素のひとつは水中衝撃波であった。ここでは気泡チャンネル生成時及び崩壊時に水中にどのような衝撃波が発生しているか計測を行った。

水中衝撃波の計測には圧電素子であるポリフッ化ビニリデンフィルム(PVDF)を用いた。PVDFフィルムは真鍮にエポキシ樹脂で貼り付け、Er:YAG レーザービームの中心から 1cm の位置に設置した。PVDF フィルムのサイズは 10mm × 10mm で厚さは 56µm であった。PVDF で採取した信号は 40dB のプリアンプを通してオシロスコープで観測した。

励起パルス幅 200µs、パルスエネルギー168mJ のときの音響信号を Fig.8 に示す。入力パルスの各時間における水中の様子を Fig.9 に示す。t=12µs において水中に最初の気泡が生成されると同時にその周辺に半円状に衝撃波が誘起された。このとき PVDF にも生成信号が観測された。その後、気泡チャンネル崩壊過程で水中衝撃波が観測された。衝撃波の発生位置は円の中心であり、気泡チャンネルの崩壊の位置が上部から中央部へと

移っていることが分かる。最後にビーム出射部のウインドウで最後の気泡が崩壊し、PVDF では大きな信号が観測された。実際に岩石掘削に用いる場合、ビーム出射部のウインドウが岩石表面にあたり、この位置で崩壊する衝撃波が岩石表面ガラス成分の排除、飛散に大きく寄与していると推測される。崩壊時の信号の方が生成時のものより大きく検出されているのは、崩壊過程のほうが急峻な現象であり、誘起される衝撃波も当然大きいからである。

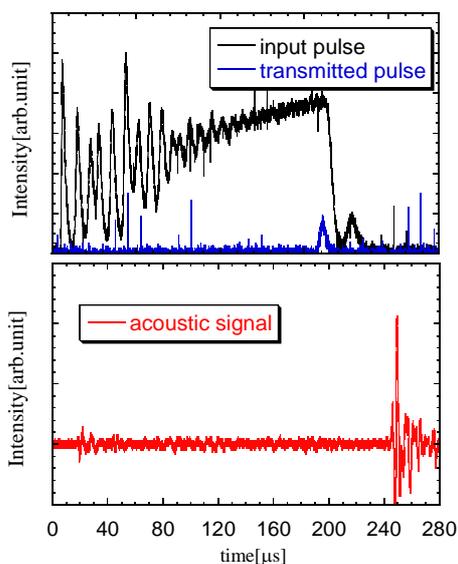


Fig.8 PVDF で観測した音響信号

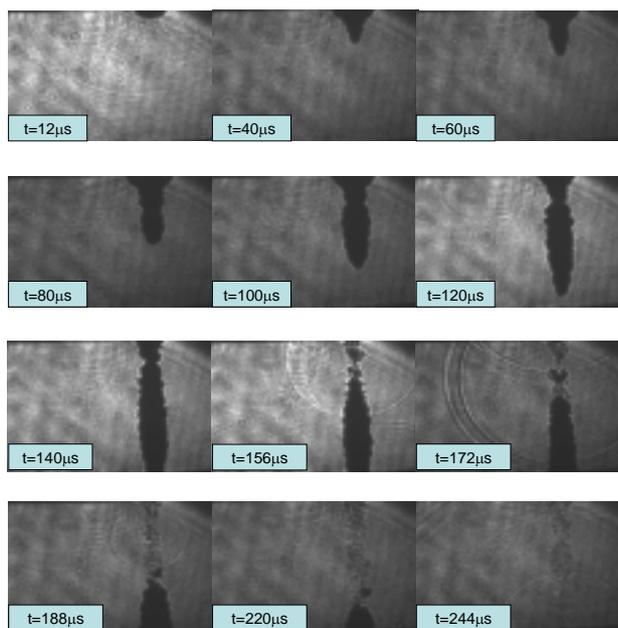


Fig.9 気泡チャンネル生成および崩壊時の水中衝撃波

入力パルスエネルギーを増加させたときの音響信号の変化を Fig.10 に示す。入力パルスエネルギーを増加させると、水がより大きなエネルギーを吸収し大きな気泡を形成するので生成信号も大きく検出されている。また大きな気泡が形成されることにより崩壊までの時間が延びていることが分かる。

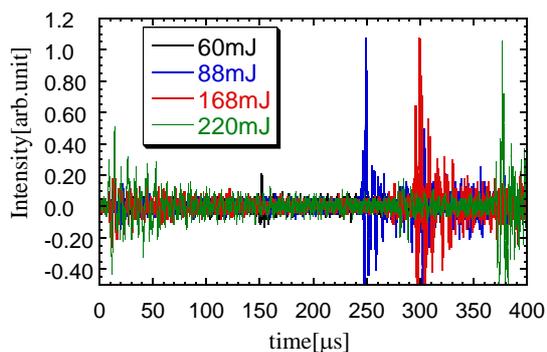


Fig.10 音響信号の入力エネルギー依存性

5. 懸濁液中での気泡チャンネル形成

ここでは透明な水中ではなく光学微粒子を混ぜた懸濁液中において気泡チャンネル形成実験をおこなった。実際に水中地層加工や建物コンクリート中への加工などの応用を考えると、レーザー照射部には常に掘削された岩石やコンクリートのかけらであるデブリが浮遊した状態であり、透明水中で加工が行われるわけではないからである。デブリの影響を調べるために仮想デブリとして光学研磨に使用される ZrO_2 を混入させて懸濁液を作成した。 ZrO_2 の平均粒子径は $0.2\mu m$ であった。使用した懸濁液の各濃度での透明度を Fig.11 に示す。

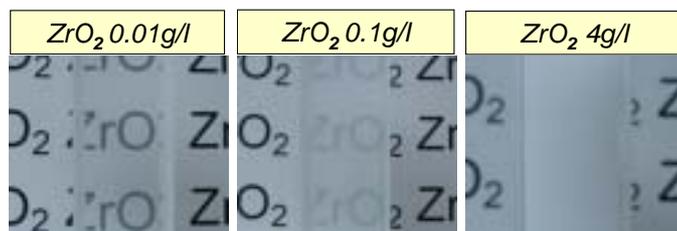


Fig.11 ZrO_2 の各濃度における透明度

この懸濁液中における透過波形の変化を Fig.12 に示す。透過パルス立ち上がり時刻は純水と懸濁液であまり変化がなく、水の吸収が強い Er:YAG レ

レーザーの特徴が表れていると言える。純水の場合に比べて懸濁液では立下り時刻が遅れており、気泡チャンネルの寿命が伸びている。その結果透過エネルギーが増加した。ZrO₂の濃度が濃ければ濃いほど気泡チャンネルの寿命が伸び、最終的にZrO₂の濃度が4g/Lのとき入力パルスの立下りと一致した。これはZrO₂粒子によって液体の重量が増加し、水中の不安定性の成長を抑制して気泡チャンネル上部の崩壊が遅延されたことによるものだと考えられる。純水の場合とZrO₂の濃度0.01g/Lのときの水中の気泡チャンネル形成の比較をFig.13に示す。わずかではあるがt=120μsからt=160μsで気泡チャンネル上部で崩壊に差が見られた。この結果は大変有望だと言える。このような散乱体がありレーザーの透過できない水中であってもEr:YAGレーザーは気泡チャンネルを作ることによって透過させることができる。また実際の掘削条件に近づいた方が、より長くチャンネルを持続し透過エネルギーが増加する。よってより加工のためにレーザー光のエネルギーを使うことができるということである。

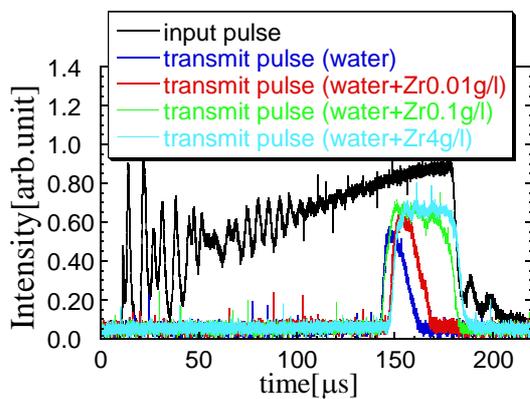


Fig.12 懸濁水中での透過パルス幅変化

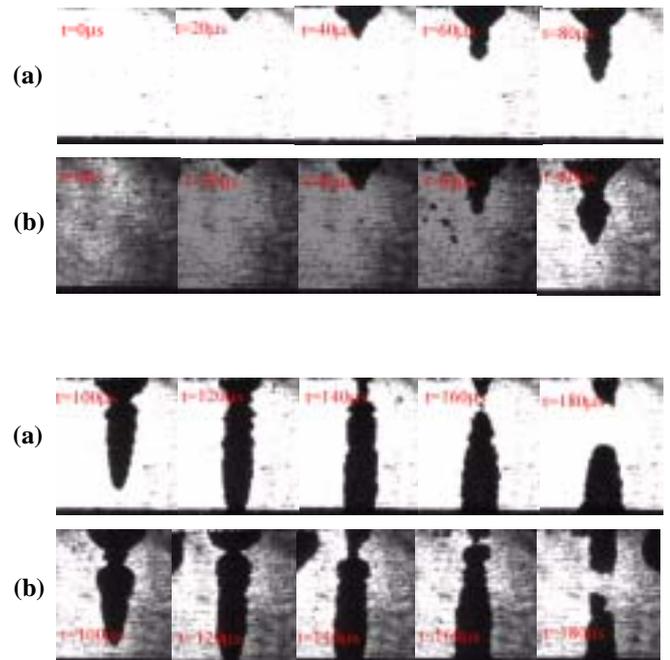


Fig.13 純水と懸濁液での気泡チャンネル形成の比較 (a)純水 (b)懸濁液

6. 岩石加工模擬実験

ここでは岩石加工の模擬実験を行った。今回使用したEr:YAGレーザーは岩石加工に用いるにはパワーが小さいので、より簡単に加工できる石膏を加工した。入力パルスはパルス幅200μs、パルスエネルギーは117mJであった。5mmチャンネルリングさせたあとに石膏にレーザー光が照射されるように調節した。

加工中の様子をFig.14に示す。パルス開始を0μsとし、t=80μsの気泡チャンネルが形成され、水中に伸びてくる、まだ石膏に対してレーザー光のエネルギーが供給されていない段階ですでに石膏表面には変化が見られ、粉が飛び散り始めている。これは気泡チャンネル形成に伴う衝撃波がチャンネル到着前に対象物を加工し始めていることを示している。そしてt=100μsにおいて気泡チャンネルが石膏表面に到達すると、レーザー加工によって生じた加工性生物デブリが飛び散っている様子が観測された。その後、t=120μsにおいてはデブリを弾き飛ばした環境でレーザー掘削が始まり、その結果デブリも周辺に排除されていった。気泡チャンネルは上部から崩壊していき最後は石膏表面で崩壊し衝撃波を発生させるが、この

ときも石膏には影響が現れ粒子が飛散している。

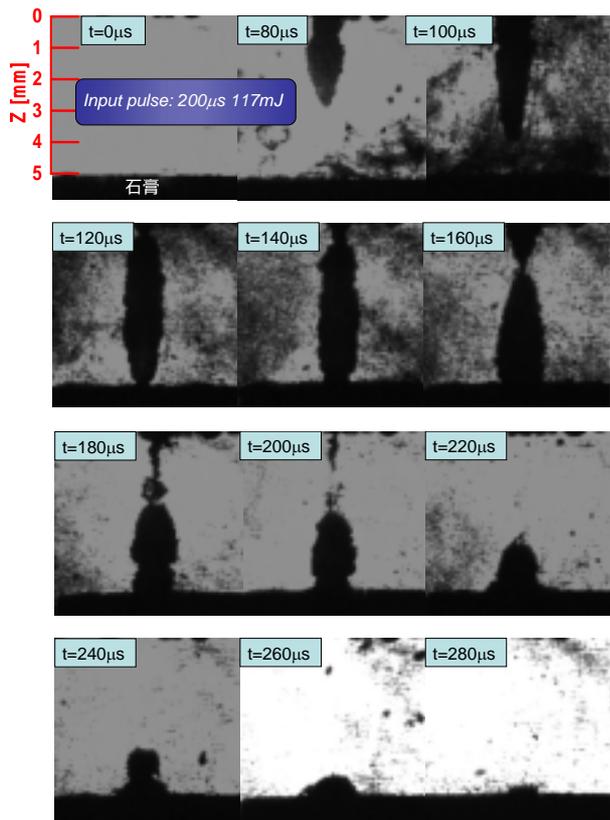


Fig.14 石膏加工中の水中の様子

同一条件において空気中、水中での加工表面の比較を Fig.15 に示す。空気中においてはレーザービームが照射された部分だけが穴が開いているのに対して、水中加工ではその周辺の広範囲に深く加工されているのがわかる。この結果はレーザー光と水中衝撃波の合同掘削力の大きさを示しており、今回対象としているのは精密加工ではなく、海底掘削や土木加工であるのでこのような拡大加工は望ましい特性といえる。

同一ショット数、パルスエネルギーにおける加工性の比較

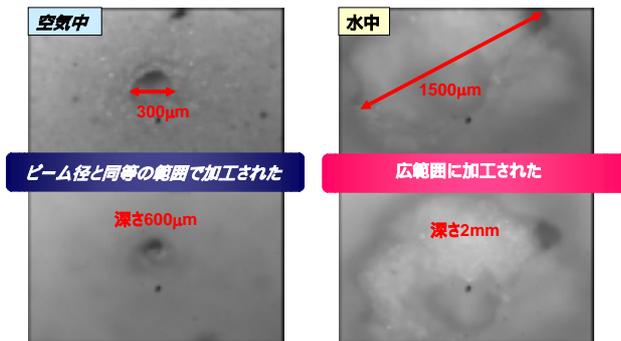


Fig.15 空気中、水中での加工表面の比較

7. まとめと今後の展望

海底地層のレーザー掘削技術において重要となる、レーザー誘起気泡チャンネルの生成から崩壊過程の時間分解計測を行った。デブリの影響を受けないことや、水中衝撃波による拡大加工など、実際にレーザー掘削に用いる上で気泡チャンネルを用いた加工が好ましい特性を持つことがわかった。しかし今回用いた Er:YAG レーザー単体のエネルギー透過率は最大でも 50%程度と、岩石掘削に用いるにはあまり大きくない。これは Fig.15 のように別にエネルギー照射用のレーザーを用い、気泡チャンネル形成と同時にチャンネル内部に伝搬させて岩石に照射することで飛躍的に透過エネルギーを上昇させることができると考えられる。

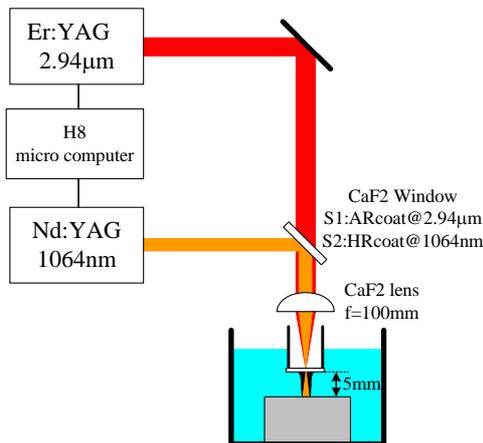


Fig.16 同時照射

参考文献

- [1]特開 006-307481 液中地層の掘削方法及び装置
- [2]les P. Lin et al “High-speed photography of Er:YAG laser Ablation in fluid” Investigation Ophthalmology&Visual Science, Vol.31 No.12 2546-2550
- [3]atsumasa Iwai et al “Penetration of high-intensity Er:YAG laser light emitted by IR optical fibers with sealing caps in water” Applied optics Vol.43 No.12
- [4]Ith et al “Dynamics of laser-induced channel formation in water and influence of pulse duration on the ablation of biotissue under water with pulsed erbium-laser radiation” Applied physics B Vol.59 621-629