

メタンハイドレート採掘のための レーザーによる海底地層掘削の可能性

植田研究室 井上 誠

2009年3月1日

1 背景

メタンハイドレート（以下MH）は今後非常に有望な資源といわれており図1のように深海底の固い岩盤にはさまれて存在している。そのため非常に採掘が困難で日本ではMHの大量採掘のためにレーザーを使った海底岩盤掘削が検討されており、植田研究室もこの一環として基礎研究をしている。



図1．海底地層模式図

しかし表1と図2に示すとおりレーザーによる海底岩盤掘削は非常に困難であり、不可能であるといわれていた。

表1．レーザーによる水中岩盤掘削の困難性

レーザー光の水の吸収の大きさ	長所	短所
小	水中で減衰しにくいので届きやすい	岩石表面がガラス化して内部まで破壊できない
大	到達すれば破壊（キャビテーション）	水中ですぐに減衰して届きにくい

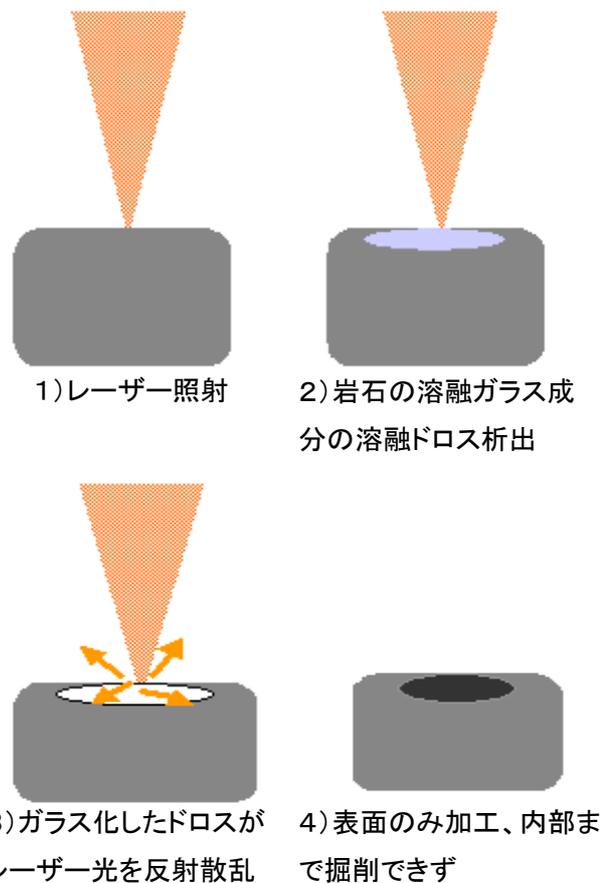


図2．レーザー照射による
岩石表面のガラス化

ところが水の吸収の大きいレーザー（CO₂）での実験では水中を通して岩石を破壊できることが実証された。



図3. CO₂レーザーでの岩石破壊

この結果から解明しなければならないことは

1. なぜ岩石を破壊できたのか
2. なぜレーザー光が水を通して吸収されずに岩石に到達できたのか？

であるが今回我々は2のメカニズムに注目し水の吸収の大きい波長のレーザーで研究を進めていく。

2 原理

我々は水の吸収係数が大きいCO₂レーザーがなぜ水中で対象物に到達したかについて、図4のように水中で気泡が連続してできた隙間を通してレーザー光が到達したのではないかという仮説を考えた。

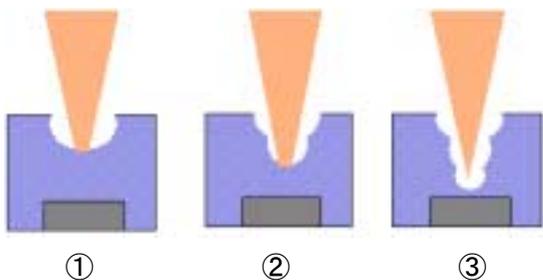


図4. チャンネリング

ビームによって最初の泡が形成される
泡の下面で次の泡が形成される
の繰り返しにより対象物にレーザー光が到達

本研究ではこのモデルをチャンネルングと呼ぶ。

3 本研究の特徴

1. 本研究は初歩的な実験なので数 cm オーダーの水を通して岩石を破壊することを目的としてチャンネルング現象の解明を試みている。
2. また本研究は基礎研究なので深海の高圧、などさまざまな条件を除いて実験をしている。
3. 本研究では図5のように特に水の吸収係数が大きい Er:YAG レーザーを用いてチャンネルングについて調べていく。

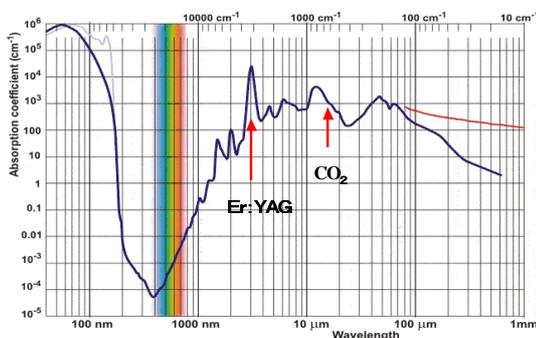


図5. 水の吸収係数とレーザーの波長
試料通過前の光の強度を I_0 , 距離 x だけ進

んだときの強度を I , 水の吸収係数を α とおいて

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

が成り立つ。この式に基づいて水中でレーザー光が 0.1% 程度に減衰する距離は

Er:YAG 約 6.4 μm CO₂ 約 70 μm
である。

4 実験

本研究で用いたレーザーは図6、概要は表2の通りである。



図6. 実験用レーザー

表2. 実験用レーザーの概要

項目	内容	備考
レーザーの種類	ロングパルス動作のLD 励起高エネルギー Er:YAGレーザー	Qスイッチなし
波長	2940nm	
ビーム品質	マルチモード	
繰返し 励起パルス幅 パルスエネルギー 最大電流時出力	20~400Hz 25~200 μ sec 375mJ/pulse (MAX) 17.0W	

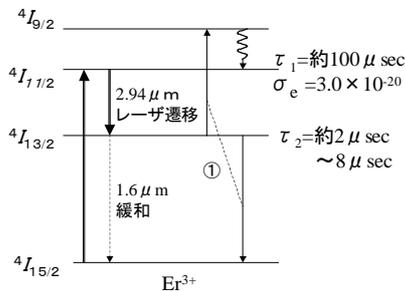


図7. Er^{3+} のエネルギー準位構造

従来 Er^{3+} イオンのエネルギー準位は高効率発振が難しかったが理由は以下のとおりである。

- 1) レーザー発振準位 ($4I_{11/2} \rightarrow 4I_{13/2}$) の誘導放出断面積 (3×10^{-20}) が小さい。
- 2) 量子欠損が大きい。(吸収波長 $0.96 \mu m$ 、発振波長 $2.94 \mu m$)
- 3) 上準位寿命 ($100 \mu s$) より下準位寿命 ($> 2ms$) が長い self-terminating 遷移である。

しかし発振効率を上げるメカニズムも存在している。

1) 2個の $4I_{13/2}$ 状態がある確率で相互作用し $4I_{13/2} + 4I_{13/2} \rightarrow 4I_{9/2} + 4I_{15/2}$ と遷移し(図中の過程) さらにこのうちの $4I_{9/2}$ 状態のイオンが $4I_{9/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ と遷移するアップコンバージョンによる下準位から上準位へのリサイクル過程が存在する。

このアップコンバージョンが発生する確率は単純には $4I_{13/2}$ 状態の密度が大きいほど高いので、この実験装置は $4I_{13/2}$ 状態の密度を高めるために高密度に励起して高効率発振を実現している。

実験系は図8の通りである。

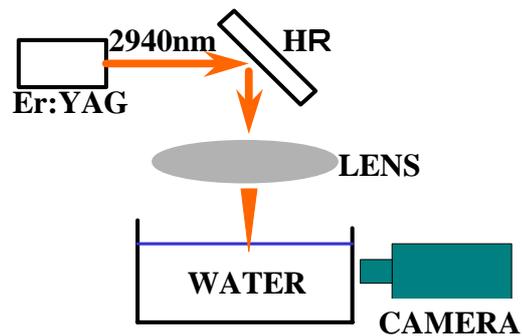


図8. チャンネリング観測図
実験 カメラによる気泡の撮影

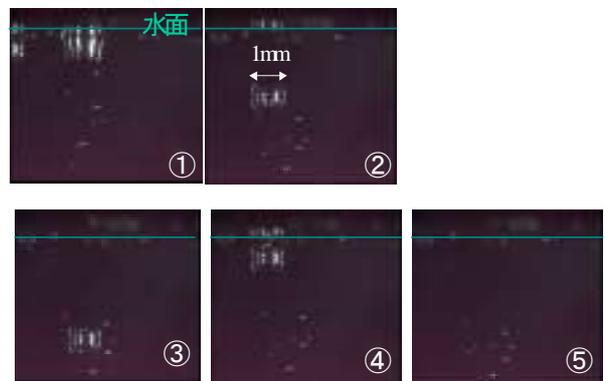


図9. 1pulse で生じた気泡の動き
繰り返し 20Hz パルス幅 200 μ s
出力パワー 0.2W

(実験 考察)

低いパワー条件では泡が上下しているのが観察できた。チャンネルリングは観測できなかった。

他の繰り返し、パルス条件にしても同様であった。

しかし定性的には pulse エネルギーを増やすとバブルの数が増えることが確認された。

パワーを大きくするとバブルの数が増えて動きも速くなり撮影が困難であった。そのためチャンネルリングが起きているかわからない。そこで透過前と水中透過後の波形の変化を比べてチャンネルリングの影響があるかどうか調べるため実験を行った。

実験 水中透過後のパルス波形の変化

パルス波形の変化を測定したところ以下のように変わった。

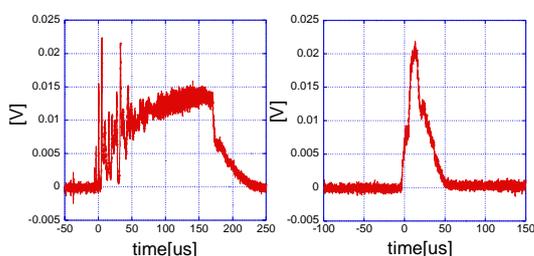


図 10 . 水中透過後のパルス波形の変化

左透過前 右透過後

繰り返し 20Hz パルス幅 200 μ s

出力パワー 5.5W

(実験 考察)

透過前のパルスの前半部分が水に吸収され後半部分が水がほとんど消えた状態で透過後の波形となって現れたのではないかとと思われる。

水の厚さを厚くするとまったくレーザー光が透過せずうすくすると水の層がほとんど飛ばされてしまい正確な水の吸収と気泡の関係がわからなかった。そのためにチャンネルリングがあったとは断言できない。

界面活性剤を用いると厚い水の層でもレーザー光が到達するので上の問題は解決している。

5 まとめと今後の展望

今回の実験ではチャンネルリングと呼べる現象は確認できなかった。

観測が困難と思われるので、今後は気泡が発生すると光軸の中心では空気と水の比率がだんだん変わってくることを利用し透過パワーをパラメーターとして実験を進めていく。

気泡の状態をより精密に測定する必要があるため水中の気泡の大きさ及び単位体積あたりの個数を測定できる装置を導入し、透過パワーとの関連を調べる、といったことを計画している。

参考文献

[1] 日本海洋掘削(株)

レーザー掘削・フラクチャリングシステムの開発 研究報告書

[2] 岩井克全 石芸耐 松浦祐司 宮城光信
Helena Jelinkova

高エネルギーEr:YAG レーザ光伝搬中の水の動的吸収係数

[3] H.Fukuoka T.Kanzaki K.Kuroyanagi
H.Kan

Demonstration of a diode-pumped
2.94- μ m Er:YAG laser which of output
energy exceeds 600mJ/pulse