



【表紙図】長水槽による水中油 の遠隔計測実験の様子

レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発

◆海底開発にレーザー技術を利用

日本の領海・排他的経済水域は国土の面積の12倍程 度も大きく、レアアースに代表される海底鉱物資源や メタンハイドレートの採掘、CO₂を海底地層に圧入し て大規模削減を目指すCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)、石油や天然ガスなどのエネルギー資源 を輸送する海底パイプラインの建設など、海底の有効 利用に関するさまざまな計画が進められている。一方 海底開発では、資源探査手法の開発だけでなく、環境 保全の観点から海底インフラのメンテナンスや事故の 早期発見、海底開発に伴う海洋生態系・環境への影響 を評価する技術を確立することも重要とされている。

現状で主に行われている採取・採水測定では、評価 の頻度や評価可能なエリアに限度があるため、広範囲



レーザープロセス研究チーム 染川智弘

にわたる領域を短時間でモニタリングできる手法の開 発が望まれる。当研究所では、広範囲の海水領域を効 率よくモニタリングすることを目指して、海水中に含 まれるCO₂ガスや油の濃度などを遠隔からラマン散乱 で測定する、ラマンライダー技術を開発している。

◆長水槽による水中油の遠隔計測実験

これまでの研究では、水中のガスをラマン散乱で検 出する場合、散乱光強度が大きい波長355 nmのレー ザーを利用してきた。ところが油に波長355 nmのレー ザーを照射すると蛍光が生じ、ラマン信号に対する信 号雑音比が低下することがわかった。そこで今回は油 の検出のため、蛍光の影響が少なく、また水に対する 吸収が比較的小さく遠方まで伝搬が可能な波長532 nm のレーザーを利用することとした。

次ページへつづく

レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発

表紙図に長水槽による水中油の遠隔実験の様子、図 1(a)に光学配置図を示す。長水槽は30 cm角の開口、長 さは6 mであり、水道水で満たしている。使用したレー ザー光は波長532 nm、パルス幅10 ns、繰り返し10 Hz、パルスエネルギーは100 mJである。油試料として キャノーラ油を光路長が5、10、20 mmの蛍光セルに 入れ、水中伝搬距離が2 mの位置に設置した。ラマン 散乱光は口径20 cmの望遠鏡で集め、エッジフィルター でレイリー光を除去した後、ミニ分光器(波長分解能: 1.4 nm)で観測している。レーザーは蛍光セルに垂直に 入試させ、観測視野中のレーザーと油の相互作用長を







【図2】油試料の光路長に対する2910 cm⁻¹の油と3400 cm⁻¹の水のラマン信号強度比

変化させることで、測定する油の量を変化させた。

図1(b)に長水槽による水中油の遠隔計測実験でのラ マンスペクトルを示す。スペクトルは、観測視野に含 まれる水がほぼ均一であるために、3400 cm⁻¹に見ら れる水のラマン信号(O-Hの対称伸縮モード)で規格化 し、見やすいように、信号強度にオフセットをかけて 並べてある。油からは信号強度の大きな2910 cm⁻¹の C-Hの対称伸縮モードが水のラマン信号の裾に観測さ れている。挿入図に油の2910 cm⁻¹部分の拡大図を示 しているが、光路長に応じて油のラマン信号が大きく なっていることがわかる。したがって、水中にある油 に対してもラマン法による測定は可能であり、海底パ イプラインの油流出事故を遠隔から観測できる可能性 を示した。

図2に油試料の光路長と2910 cm⁻¹の油と3400 cm⁻¹の 水のラマン信号強度比との関係を示す。光路長5、10、 20 mmの3点の結果は、点線で示す直線近似でフィッ トすることが可能であるが、原点を通っていない。こ れは、2910 cm⁻¹の油のラマン信号は、信号強度の大 きな水の裾に位置しており、水のラマン散乱信号強度 のゆらぎ以下の信号は検出できないためだと考えられ る。検出限界はこの近似直線のX軸との交点とすると、 油の長さにして約5.0 mmである。

◆今後の展開

今回の実験では、遠隔操作型無人潜水機ROV (Remotely Operated Vehicle)などに装置を搭載する ことを想定し、小型の分光器を利用したため、信号強 度の大きな2910 cm⁻¹の信号しか観測できなかった。し かしながら、ダークカウントが少なく感度の高い分光 システムを利用すれば、検出感度が向上するだけでな く、1290~1750 cm⁻¹に見られる他の微細なラマンス ペクトルの観測が可能になり、より詳細な油の識別が 実施可能になるのではないかと考えている。

本実験では、散乱信号を取得する時間ゲート幅を4 msとしているために、6 m分の水からの散乱信号をす べて取得している。ICCDカメラを利用して、時間ゲー ト幅を5 nsに短縮したとすると、水のラマン散乱信号 は1.5 m分と小さくできる。水のラマン信号強度を減 少させ、それに伴う強度ゆらぎの影響を小さくするこ とが可能となるため、検出感度の向上が期待できる。 また、時間ゲートを掃引させることで、位置情報も取 得することが可能となる。

TOPICS

超短パルスレーザー加工のシミュレーション 理論・シミュレーションチーム 古河裕之

長友英夫、三間圀興 大阪大学レーザー科学研究所

■はじめに

超短パルスレーザー加工に関する大阪大学レーザー 科学研究所との共同研究では、近赤外の超短パルス レーザーを用いた微細加工プロセスのシミュレーショ ン手法の高度化を進めている。マイクロメーターの加 工精度を実現するには、レーザーで注入されたエネル ギーの熱伝導による拡散を極力避けることが必要であ る。マイクロメーターの空間スケールでは熱伝導の時 間スケールは数ピコ秒であり、マイクロメーターの微 細加工用レーザーのパルス幅は、ピコ秒もしくはサブ ピコ秒となる。このような超短パルスレーザー加工で は、レーザーの吸収は厚さ数十ナノメーターの層で生 じ、過渡的に超高圧が発生し気体・液体・固体相の圧 縮膨張が超音速で進行することにより、加工面はピコ 秒のオーダーで変化する気・液・固体の混相状態になる。 このような、混相状態と超短パルスレーザーとの相互 作用をモデル化し、正確なレーザー吸収の時間空間変 化をシミュレーションに反映することが重要である。

本研究では、レーザーの吸収過程とその後の輻射流 体運動の結果である、アブレーションや溶融層の生成 と凝固を記述する統合シミュレーションコードを開発 し、レーザー微細加工の最適化とサイバーフィジカル システム(CPS)の構築に資することを目指す。統合シ ミュレーションコードをさまざまな照射条件でのレー ザー微細加工へと適用するためには、混相状態とレー ザーの相互作用の物理の解明、およびそのモデル化を 行うことは極めて重要であるため、現在我々はその実 現に向けて研究を進めている。本年度は、固体とレー



【図1】井戸型の障壁をもつポテンシャル

筑波大学計算科学研究センター 矢花一浩 ザーの相互作用の初期過程の解明に注視した。固体は 原子が結晶構造を組んでおり、電子の波動関数に周期 性が表れ、バンド構造を形成する。結晶中の電子の波 動関数は、ブロッホの定理で表される関数形を持つ。

本稿では、まずレーザー場と相互作用する電子状態 を記述する簡易モデルであるクローニッヒ・ペニーモ デルを用いてバンド構造および波動関数を求め、さら に久保公式より複素誘電関数を求めることにより、 レーザーの吸収長などを評価した結果を報告する。

■クローニッヒ・ペニーモデル^{1,2}、 及びシミュレーション結果

レーザー場と相互作用する電子状態を記述する簡易 モデルとして、図1のような井戸型の障壁が周期的に 並んだポテンシャル中の電子状態を考える。高さが V₀で幅がb. 周期がL=a+bの井戸型のポテン シャルで、幅bはb<< aとする。図1のポテンシャ ル中では解析的に、conduction band $(E > V_0)$ や valence band (E < V₀)のバンド構造や波動関数を求 めることができる。図2は、物質としてアルミニウム を想定し、Lを格子定数、b=0.1165 L, Vo=フェル ミエネルギーとして求めた、アルミニウムのバンド構 造である。バンド構造と波動関数が求まれば、久保公



【図2】クローニッヒ・ペニーモデルにより求めたアル ミニウムのバンド構造



【図3】久保公式により求めた複素誘 【図4】久保公式により求めたレー 電応答関数 ザーの吸収長

式^{3.4}より複素電気伝導度、複素誘電応答関数、複素 屈折率、レーザーの吸収長等を求めることができる。 図3は求めた複素誘電応答関数、図4 は求めたレーザー の吸収長である。

■時間依存密度汎関数理論⁵⁾

超短パルス光が照射した直後の電子状態や、光から 電子へのエネルギー移行を正確に見積もるための有効 な手法として、第一原理計算手法である時間依存密度

レーザー電場中の電子状態の決定		\rightarrow	誘電応答関数の決定	
^		V		
	誘電媒質中のマクスウェル方程式から、電場を決定			

【図5】時間依存密度汎関数理論による物質中での光の 伝搬と吸収に関する解析の流れ

30
30
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
20
<li

の流れの概略図である。現在、矢花ら

により、時間依存密度汎関数理論を用いたアルミニウムの誘電応答関数等の計算が精力的に行われている。 実験結果⁶⁾ との比較など、活発な議論が本稿の著者間 で行われている。

参考文献

- [1] L. L. Chang, L. Esaki, and R. Tsu : Appl. Phys. Lett. 24 (1974) 593-595.
- [2] J.J. Ritsko, D. J. Sandman, and A. J. Epstein : Phys. Rev. Lett. 34 (1975) 1327-1330.
- [3] R. Kubo: J. Phys. Soc. Jpn. 12 (1957) 570-586.
- [4] B. Holst, et. al : Phys. Rev. B 90, 035121 (2014).
- [5] 矢花一浩; レーザー研究 44 (2016) 789-793.
- [6] Igor Zoric, Michael Zach, Bengt Kasemo, and Christoph Langhammer : ACS NANO **5** (2011) 2535–2546.

NEWS

井澤靖和所長 瑞宝中綬章を受賞

昨年11月3日、令和2年秋の叙勲受章者が発表され、当研究所井澤靖和所長(大阪大学名誉教授)が瑞宝中綬章を 受章されました。瑞宝章は、公務または公共的な業務に長年にわたり従事し、功労を積み重ねた方に授与される 勲章です。井澤先生は、大阪大学レーザー核融合研究センター/レーザーエネルギー学研究センター(現レーザー 科学研究所)でセンター長をつとめられ、レーザー学会など学術界においても指導的な役割を果たされました。現 在も当研究所所長やレーザー技術振興センター(PLT)理事長などを兼任され、精力的に活動されています。栄え ある叙勲を心からお祝い申し上げますとともに、今後もより一層のご活躍をお祈り申し上げます。

主な学会報告予定

http://www.ilt.or.jp

3月16日(火)~19日(金) 第68回応用物理学会春季学術講演会(オンライン開催) 染川 智弘「共鳴ラマンライダーに向けた深紫外波長可変Ti:Sレーザーの誘導ブリルアン散乱パル ス圧縮」

Laser Cross No.395 2021, Feb.

発行/公益財団法人レーザー技術総合研究所 編集者代表/谷口誠治〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル4F TEL[06|6443-6311 FAX[06|6443-6313 掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表・谷口誠治(E-mail:taniguchi@ilt.or.jp)までお願いいたします。