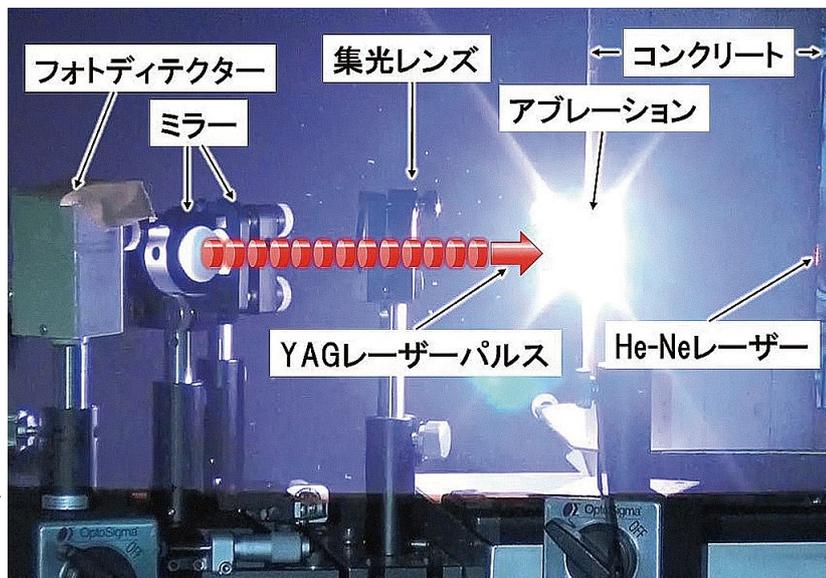


CONTENTS

- 高温にさらされたコンクリートの遠隔診断に向けて！
- レーザー誘起超音波法の開発
- 第83回応用物理学会秋季学術講演会報告



【表紙図】加振用レーザーパルスがコンクリート試験体に照射された瞬間の写真(図3参照)

高温にさらされたコンクリートの遠隔診断に向けて！ レーザー誘起超音波法の開発

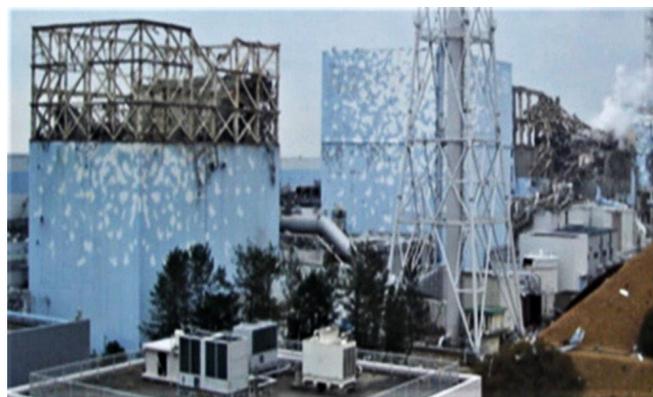
特別研究員 大道博行

はじめに

筆者らは、廃炉に役立つ遠隔・非接触検査技術開発に向け、高温にさらされたコンクリート試験体にレーザー駆動超音波検査技術を適用し、超音波伝搬時間と試験体の劣化との関係を実験的に調べた。ここではその概要を紹介する。興味を持たれた読者は詳細を記述した原著論文など^{1,2)}を参照されたい。

2011年3月11日東日本大震災に引き続き東京電力ホールディングス株式会社・福島第一原子力発電所において炉心溶融、建屋の爆発という未曾有の過酷事故が起こった(図1参照)。それ以降、多くの困難に直面しながらも関係者の努力により、廃炉に向けた作業が着実に進められている。今後の課題の一つに、原子炉圧力容器、原子炉格納容器など高線量環境下の構造物の健全性の測定・診断がある。また核燃料とその周辺物質は溶融凝固し、いわゆる核燃料デブリとなって原

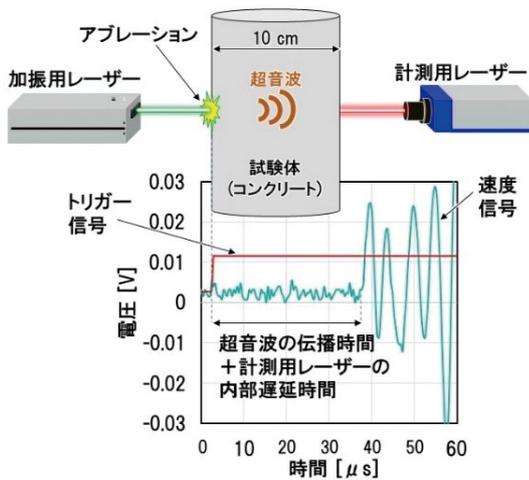
子炉建屋内に留まっており、その構造を遠隔・非接触で調べる技術も必要とされている³⁾。これらを視野に加熱により変性したコンクリートのレーザー駆動超音波を用いた診断技術⁴⁾の基礎的研究を行った。



【図1】建屋爆発事故後の福島第一原子力発電所の写真(左から1号機、2号機、3号機の順、東京電力ホールディングスホームページより)

■研究の現状

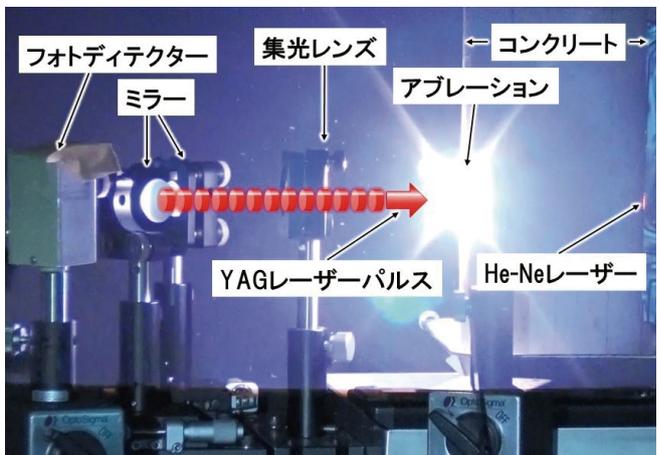
実験装置は図2に示すようにパルスエネルギー数百mJ、時間幅10ナノ秒の加振用パルスレーザーと、超音波を測定するためのレーザーパワー mWクラスの計測用CW(連続波)レーザーの2種類で構成されている。まず試験体に加振用レーザーパルスを照射し、表面にプラズマを発生させ、その圧力で超音波を駆動する。例えば金槌で一億分の一秒という短い時間で極めて強くたたいたようなものと想像していただければよいと思う。この超音波は対象物の表面及び内部を伝播し、裏面に達する。到達した波のうち、試験体表面に垂直方向の波(縦波)の変位の時間変化(速度)を、ドップラー効果に基づく波長シフトにより求める。ここでは縦波の各種コンクリート中での伝搬時間を求め、伝搬速度を求めることにより、主としてコンクリートの強度低下に関する情報を得ることを目的に基礎的実証実験を行った。



【図2】試験体の診断実験の模式図

コンクリート模擬試験体は直径10 cm、高さ20 cmの円筒形状をしている。圧縮強度は福島第一原子力発電所で用いられているものと同等のものを用いた。この試験体を実際と同じようにゆっくりと加熱、冷却して高温加熱試験体とした。室温の試験体の質量と105℃および200℃に加熱されたそれを比べると減少している。これは水分の蒸発に対応していると考えられる。400℃を超えると水酸化カルシウムや炭酸カルシウムが発熱を伴い脱水、分解して酸化カルシウムになり水蒸気や二酸化炭素ガスを放出する。このような変化に対応した質量の減少が測定された。図3に加振用レーザー照射に伴う強い発光を示す。この時発生す

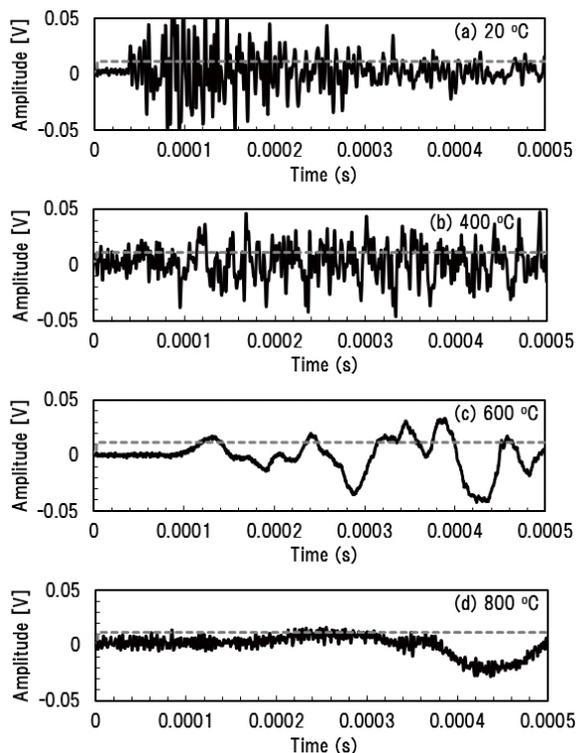
る超音波がコンクリート中を伝搬し、試験体裏側に到達する。超音波振動によりドップラーシフトを受けたHe-Neレーザー反射光と参照光との干渉により速度信号を得る。図2の下の方の図は、縦波の速度に対応した信号を検出した結果である。図中、“トリガー信号”は加振レーザーが照射された時刻に対応するフォトディテクターの信号である。電子回路の遅延時間等を考慮して求めた超音波の伝播速度は4,700 m/sであった。この値は、健全なコンクリートの値として妥当であることなどから、遠隔、非接触を特徴とする本方式の有効性を確認した。これを踏まえ、順次高温にさらされた試験体を伝搬した超音波の縦波成分の速度を求めた。



【図3】加振用レーザーパルスがコンクリート試験体に照射された瞬間の写真(表紙写真)

図4に測定された加熱温度毎の縦波の時間波形を示す。温度20℃は非加熱である。温度400℃までの信号は数百kHzまでの幅広い周波数スペクトルを有しているが、温度600℃以上では10~20 kHzのスペクトルになっており、温度400℃以下のそれとは著しく異なっている。温度400℃までは、時間波形とそのスペクトルから弾性波の伝搬と評価できる。温度が上がるに従って速度が低下している。これは水分やガスが抜け質量が低下したことだけでは説明ができず、コンクリート内部の変性、亀裂等の発生により伝搬速度が低下したものと考えられる。

実際に実験に使用した試験体を切断し、顕微鏡観察することにより亀裂が増えていることを確認した。一方600℃以上に加熱された試験体では1~10 kHz近辺の縦振動が観察されている。コンクリートは、加熱温度100℃程度までは強度に関して大きな変化は無いが、それより高い温度になると、セメント硬化体が水



【図4】加熱温度と信号波形

和生成物の脱水により収縮し、骨材が膨張するとされ、強度が低下する。実際、試験体を切断し、内部を顕微鏡で観察すると加熱温度が高くなるに従って亀裂が著しく増加している。また圧縮試験から求めたヤング率は、加熱温度が高くなると低下することが分かった。この結果より、加熱温度400℃までの試験体では、超音波速度低下の主因は、コンクリートが変性しヤング率が低下したことによると考えられる。加熱温度600℃以上の試験体では測定された縦振動の成因が分かっておらず検討を行っている。

■まとめ

レーザーを利用した遠隔診断技術により、加熱温度400℃までのコンクリート中の超音波の縦波成分の伝播時間が評価できることを紹介した。加熱温度600℃-800℃の試験体でも低周波の縦振動が再現性良く測定されているが、この振動の物理的成因は分かっておらず、今後の検討課題である。また本技術の実用化に向けた課題としては、廃炉の様々な状況に対応した、測定範囲の拡大⁵⁾、遠隔技術と組み合わせたシステム開発などが挙げられる。

謝辞

本記事は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの山田知典氏、原子力機構の柴田卓弥氏との共同研究の成果¹⁾を紹介したものである。

参考文献

- 1) T. Yamada, H. Daido, T. Shibata, J. Nucl. Sci. Technol. 59, pp. 614-628 (2022) (Open access)
- 2) 大道博行、山田知典、柴田卓弥、ILT2022年報、pp. 1 - 4 (2022).
- 3) 原子力機構 CLADSの廃炉技術研究 <https://clads-jaea.go.jp/jp/rd/>
- 4) 島田 義則、オレグ コチャエフ、倉橋 慎理、保田 尚俊、御崎 哲一、高山 宜久、曾我 寿孝、電気学会論文誌C、Vol.139、No.2、2019、pp.131-136.
- 5) 倉橋慎理、コチャエフ オレグ、大道博行、染川智弘、手塚英志、ILT2022年報、pp. 35 - 41 (2022).

第83回応用物理学会秋季学術講演会報告

■応用物理学会が東北大で開催

2022年9月20日～23日に東北大学川内キャンパスで開催された第83回応用物理学会秋季学術講演会に参加した。2年前のコロナ禍により講演会が中止されて以来、実開催されたのは今回で2度目となるが、最近の講演会は、ポスター発表は現地開催、口頭発表はオンラインとのハイブリッド開催、というのが定番になりつつある。今回は前回(第69回春季学術講演会)よりもはるかに多くの現地参加者があった。講演会では、ナ

レーザープロセス研究チーム コスロービアン ハイク

ノ粒子や人工知能(AI)、応用物理学に関するさまざまな分野の国際的なセッションが数多く開催された。筆者は波長可変チタンサファイアレーザーの誘導ブリルアン散乱(SBS)を利用したパルス圧縮技術に関する研究結果(Laser Cross No.408, 2021 May他を参照)を現地発表し、参加した研究者と多くの有意義な議論を交わすことができた。本稿では、レーザー分光・計測技術や高出力レーザー開発などの分野でのトピックを紹介する。

■フォトニクスに関する合同シンポジウム

期間内にはJASP(応用物理学会)、Optica(旧アメリカ光学会OSA)、SPP(フィリピン物理学会)が連携した合同シンポジウムが開催され、ナノフォトニクス、テラヘルツフォトニクス、非線形光学など光技術に関する最新のトピックが多数報告された。基調講演として、Opticaの河田会長(阪大名誉教授)から分光データ解析に深層学習(deep-learning)ではなく自己学習(self-learning)を応用した新しい手法が紹介された。自己学習型ランダムスキャン方式とラスタースキャン方式の比較などを通して自己学習のイメージング技術へ応用例が示された。Choi 博士(高麗大(韓))は、高深度光学イメージングに関する研究成果を報告した。光学イメージングは生標本の生理学を理解する上で重要な役割を果たす。例えば、がんの85%は生体組織の表面付近に発生するため、光学イメージング法による早期発見が可能である。一方で、通常は光学イメージングの深度限界は生体組織の深さに対して浅く、組織の深部で起こる重要な反応の観測は困難であった。不均一な生体組織内で発生する複数の光散乱が画像情報の解像度を著しく低下させることが主な要因である。これに対しChoi 博士は、多重散乱理論の応用により従来の限界を超えるイメージング深度を達成した。講演では、生きたマウス脳における初期の髄鞘形成過程の観測など、この手法を用いた最近の研究成果が報告された。

■10ジュール級高出力パルスレーザー

荻野博士(大阪大学レーザー科学研究所)は、Yb:YAGを用いた低温伝導冷却アクティブミラー増幅システムの開発に関する最新の成果を報告した。開発されたレーザーはパルスエネルギー 10 J、パルス時間幅10 ns、繰り返し100 Hzで、世界最高クラスの高出力パルスレーザーである。この成果は、慣性核融合などへの応用に向けたパルスエネルギー 100 J、繰り返し100 Hzのレーザーシステム開発への重要なマイルストーンとなる。

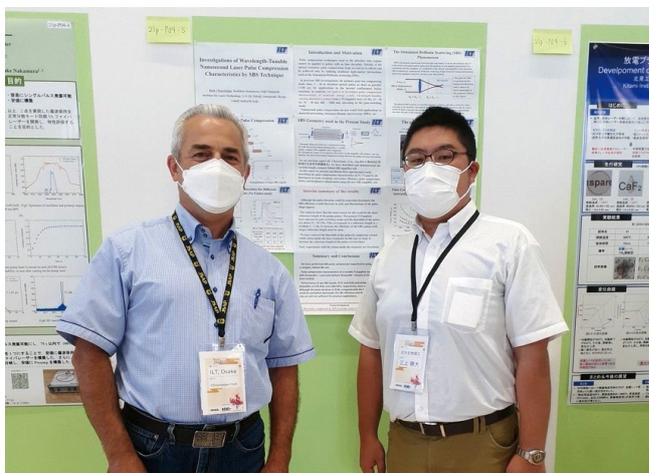
■大型レーザー単結晶

単結晶はセラミックに対して優れた熱伝導率、機械的特性を持つ。信光社、三菱重工業から、レーザー媒質に用いる大型単結晶の開発に関する報告があった。彼らはレーザー出力10 kWを達成するため、チョクラ

ルスキー法を用いてNd:YAG/YAG複合レーザー媒質を1 atm%ドープした単結晶(直径50 mm)を共同開発した。試作品を用いた最初の出力試験では、80 W(スロープ効率22.8%)のレーザー出力が得られたとのことであった。また、信光社が開発したTSMG(Top Seeded Melt Growth)法を用いることで、チョクラルスキー法よりもさらに大型のYAG単結晶(直径~120 mm)の作製が可能であるとのことであった。

■ビーム結合によるファイバーレーザーの高出力化

Nilsson 教授(サウサンプトン大(英))から、高出力ファイバーレーザーの開発状況や高出力化のためのビーム結合技術に関する報告があった。単一ファイバーからの最大CW出力は現在20 kW(IPG社)であるが、ビーム結合(スペクトルビーム結合)による最大CW出力は300 kWに到達しており(この発表は講演日の1週間前にロッキードマーチン社から公開されたごく最近のものである)、講演では、これまでのファイバーレーザー開発では高出力および高ビーム品質が求められてきたが、今後はビーム整形も重要な要件となることが強調された。また講演では、深層学習(ニューラルネットワーク)を利用したビーム強度形状の作成、および正確な位相情報を必要としないビーム結合法が提案された。しかしながらビーム結合手法を実装する際の鍵は、多数の増幅ビームの作成、およびそれらをバンドル内にどれだけコンパクトに配置(高いフィルファクター)できるか、という点にあるのは従来と同様である。



【写真】発表会場にて(左：筆者、右：三上講師(近畿大))